



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN E INSPECCIÓN DEL  
RODETE FRANCIS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN  
FRANCISCO MEDIANTE SUSTITUCIÓN DE MATERIAL DE LOS  
ÁLABES POR INSERTOS METÁLICOS PREFABRICADOS**

**BALSECA CIFUENTES YIDEMNY ESTEFANÍA**  
**TELENCHANA BARRIONUEVO ALEXIS PAUL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**TIPO: PROYECTO TÉCNICO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2019**

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2018-04-23

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**BALSECA CIFUENTES YIDEMNY ESTEFANÍA**

Titulado:

**“PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN E INSPECCIÓN DEL RODETE  
FRANCIS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN FRANCISCO  
MEDIANTE SUSTITUCIÓN DE MATERIAL DE LOS ÁLABES POR  
INSERTOS METÁLICOS PREFABRICADOS”**

Sea aceptado 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 DEL PROYECTO**

---

Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar  
**MIEMBRO DEL PROYECTO**

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2018-04-23

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

**ALEXIS PAÚL TELENCHANA BARRIONUEVO**

Titulado:

**“PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN E INSPECCIÓN DEL RODETE  
FRANCIS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN FRANCISCO  
MEDIANTE SUSTITUCIÓN DE MATERIAL DE LOS ÁLABES POR  
INSERTOS METÁLICOS PREFABRICADOS”**

Sea aceptado 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 DEL PROYECTO**

---

Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar  
**MIEMBRO DEL PROYECTO**

**EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** YIDEMNY ESTEFANÍA BALSECA CIFUENTES

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** **“PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN E INSPECCIÓN DEL RODETE FRANCIS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN FRANCISCO MEDIANTE SUSTITUCIÓN DE MATERIAL DE LOS ÁLABES POR INSERTOS METÁLICOS PREFABRICADOS”**

**Fecha de Examinación:** 2019-02-14

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Edwin Viteri Núñez <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Isaías Caicedo Reyes <b>DIRECTOR DEL PROYECTO</b>			
Ing. Carlos Serrano Aguiar <b>MIEMBRO DEL PROYECTO</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. Edwin Fernando Viteri Núñez  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



**EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** ALEXIS PAÚL TELENCHANA BARRIONUEVO

**TRABAJO DE TITULACIÓN:** **“PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN E INSPECCIÓN DEL RODETE FRANCIS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN FRANCISCO MEDIANTE SUSTITUCIÓN DE MATERIAL DE LOS ÁLABES POR INSERTOS METÁLICOS PREFABRICADOS”**

**Fecha de Examinación:** 2019-02-14

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Edwin Viteri Núñez <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Isaías Caicedo Reyes <b>DIRECTOR DEL PROYECTO</b>			
Ing. Carlos Serrano Aguiar <b>MIEMBRO DEL PROYECTO</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. Edwin Fernando Viteri Núñez  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El Trabajo de Titulación que presento, 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 teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

**Yidemny Estefanía Balseca  
Cifuentes**

---

**Alexis Paúl Telenchana  
Barrionuevo**

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Nosotros, Yidemny Estefanía Balseca Cifuentes y Alexis Paúl Telenchana Barrionuevo, declaramos que el presente Trabajo de Titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación.

---

**Yidemny Estefanía Balseca  
Cifuentes**

Cedula de Identidad: 060375801-2

---

**Alexis Paúl Telenchana  
Barrionuevo**

Cedula de Identidad: 185002086-6

## **DEDICATORIA**

Han pasado 23 años desde el día en que los conocí y sé que desde ese día o tal vez mucho antes, ustedes ya estaban pensando en cómo brindarme lo mejor. Cada día he visto cómo trabajan tan arduamente por sus hijos, esperando que tengan un futuro brillante y lleno de éxitos. Juan y Martha, gracias por ser los mejores padres del mundo, este logro es para ustedes.

**Yidemny Estefanía Balseca Cifuentes**

A mis padres Jorge y Lupita, a mi hermano Jorge y mis hermanas Alejandra y Lisbeth, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor, y además gracias a su anhelo de superación me dieron las fuerzas para poder culminar una etapa más en mi formación estudiantil – profesional.

**Alexis Paúl Telenchana Barrionuevo**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres por su apoyo absoluto en esta etapa de mi formación como profesional. A mi familia y amigos por apoyarme en cada decisión y proyecto. A mis maestros por el esfuerzo realizado para transmitir sus conocimientos y formar un profesional integro no solo en lo académico sino también en lo personal. A todos los colaboradores del Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas y partes Industriales por brindarme su amistad y apoyo desinteresado día a día durante el desarrollo de mi trabajo de titulación. A la ESPOCH por realizar acuerdos de cooperación con empresas que permiten el desarrollo de sus futuros profesionales. El camino no fue fácil, pero gracias a cada uno de ustedes se hizo más ameno, gracias por ser personas maravillosas y por formar parte de él.

**Yidemny Estefanía Balseca Cifuentes**

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. A mis padres, hermano y hermanas por el ejemplo de perseverancia y constancia que los caracteriza y que me han infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su gran amor. A todo el personal del CIRT por brindarme su amistad, apoyo y compartir todos sus conocimientos día a día durante el desarrollo de este trabajo. A mis amigos que mutuamente nos apoyamos en nuestra formación académica y que de una u otra manera han sido un apoyo al realizar este trabajo. A los maestros que marcaron cada etapa de mi camino universitario, en especial al Ing. Isaías Caicedo e Ing. Carlos Serrano que nos ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de este trabajo.

**Alexis Paúl Telenchana Barrionuevo**

## TABLA DE CONTENIDO

Pág.

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

### CAPÍTULO I

<b>1.</b>	<b>MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Formulación del problema.....	2
1.3	Justificación.....	3
1.4	Alcance.....	3
1.5	Objetivos.....	4
1.5.1	<i>Objetivo general</i> .....	4
1.5.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	4

### CAPÍTULO II

<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
2.1	Generación eléctrica en Ecuador.....	5
2.1.1	<i>Centrales hidroeléctricas</i> .....	6
2.2	Turbinas utilizadas para la generación.....	7
2.2.1	<i>Tipos de turbinas</i> .....	7
2.2.1.1	<i>Turbinas de acción</i> .....	7
2.2.1.2	<i>Turbinas de reacción</i> .....	8
2.2.2	<i>Principales características de funcionamiento</i> .....	10
2.3	Tipos de desgaste en los álabes.....	11
2.3.1	<i>Abrasión</i> .....	13
2.3.2	<i>Erosión</i> .....	14
2.3.2.1	<i>Corte por erosión</i> .....	15
2.3.2.2	<i>Fatiga superficial</i> .....	15

2.3.2.3	<i>Deformación plástica</i> .....	15
2.3.2.4	<i>Fractura por fragilidad</i> .....	16
2.3.3	<i>Cavitación</i> .....	18
2.3.3.1	<i>Efectos de la cavitación</i> .....	20
2.3.3.2	<i>Formas en que se presenta la cavitación</i> .....	21
2.3.3.3	<i>Clasificación de la cavitación</i> .....	21
2.3.3.4	<i>Influencia en Turbinas Francis</i> .....	23
2.3.4	<i>Fatiga</i> .....	24
2.3.5	<i>Microscopia electrónica de barrido - Análisis mecanismos falla y desgaste</i> ..	25
2.4	<i>Zonas críticas de un rodete Francis</i> .....	26
2.5	<i>Materiales utilizados en la fabricación de rodetes</i> .....	28
2.5.1	<i>Propiedades del acero ASTM A743 CA6NM</i> .....	28
2.5.2	<i>Propiedades del acero ASTM A182 F6NM</i> .....	30
2.5.3	<i>Propiedades microestructurales de los aceros inoxidable martensíticos</i> .....	31
2.5.3.1	<i>Fases presentes dentro de los aceros inoxidable</i> .....	34
2.6	<i>Reparación de rodetes</i> .....	38
2.6.1	<i>Reparación por relleno con soldadura</i> .....	39
2.6.1.1	<i>Materiales de aporte utilizados para reparación</i> .....	39
2.6.1.2	<i>Técnicas de soldadura empleadas en la reparación</i> .....	40
2.6.1.3	<i>Metalurgia de la soldadura</i> .....	41
2.6.1.4	<i>Aspectos fundamentales en el proceso de reparación</i> .....	57
2.6.1.5	<i>Causas y medidas de corrección de cavitación en rodetes Francis</i> .....	61
2.6.2	<i>Reparación mediante adhesión de cerámicos</i> .....	61
2.7	<i>Control de calidad aplicado al proceso de reparación</i> .....	63
2.7.1	<i>Control mediante ensayos no destructivos (END)</i> .....	63
2.7.1.1	<i>Inspección visual (VT)</i> .....	64
2.7.1.2	<i>Tintas penetrantes (PT)</i> .....	65
2.7.1.3	<i>Partículas magnéticas</i> .....	67
2.7.1.4	<i>Ultrasonido</i> .....	68
2.7.1.5	<i>Dureza</i> .....	71
2.7.1.6	<i>Espectrometría</i> .....	74
2.7.2	<i>Control mediante ensayos destructivos (ED)</i> .....	74
2.7.2.1	<i>Ensayo de tracción</i> .....	75
2.7.2.2	<i>Ensayo de impacto Charpy</i> .....	75

2.7.3	<i>Control metalográfico</i> .....	76
2.7.3.1	<i>Análisis microestructural</i> .....	77
2.7.3.2	<i>Análisis de inclusiones</i> .....	78

### **CAPÍTULO III**

<b>3.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>82</b>
3.1	Etapa 1: Antes de la reparación .....	83
3.1.1	<i>Revisión reparaciones previas en el rodete</i> .....	83
3.1.1.1	<i>Reparación de fisura del álabe #04</i> .....	84
3.1.1.2	<i>Reparación de fisura del álabe #08</i> .....	85
3.1.1.3	<i>Reparación de fisura del álabe #09</i> .....	85
3.1.2	<i>Inspección de desgaste</i> .....	87
3.1.3	<i>Control dimensional</i> .....	88
3.1.4	<i>Remoción del recubrimiento</i> .....	89
3.1.5	<i>Caracterización del material</i> .....	90
3.1.5.1	<i>Espectrometría</i> .....	91
3.1.5.2	<i>Medición de dureza</i> .....	92
3.1.5.3	<i>Metalografía en campo</i> .....	94
3.2	Etapa 2: Durante la reparación .....	96
3.2.1	<i>Corte de los álabes mediante plasma</i> .....	96
3.2.2	<i>Control de calidad de los insertos</i> .....	98
3.2.2.1	<i>Caracterización del material de insertos metálicos prefabricados</i> .....	99
3.2.2.2	<i>Control dimensional de insertos metálicos prefabricados</i> .....	102
3.2.2.3	<i>Ensayos no destructivos en insertos metálicos prefabricados</i> .....	103
3.2.3	<i>Presentación de insertos</i> .....	113
3.2.4	<i>Soldadura de insertos</i> .....	115
3.2.5	<i>Pulido de los álabes acorde a los planos</i> .....	117
3.3	Etapa 3: Después de la reparación .....	118
3.3.1	<i>Control de calidad de las juntas soldadas</i> .....	118
3.3.1.1	<i>Inspección visual (VT)</i> .....	118
3.3.1.2	<i>Inspección con tintas penetrantes (PT)</i> .....	119
3.3.1.3	<i>Inspección con partículas magnéticas (MT)</i> .....	120



3.3.1.4	<i>Inspección con ultrasonido (UT)</i> .....	121
3.3.2	<i>Caracterización de juntas soldadas pre tratamiento térmico</i> .....	121
3.3.3	<i>Tratamiento térmico</i> .....	122
3.3.4	<i>Caracterización de juntas soldadas post tratamiento térmico</i> .....	123
3.4	Actividades adicionales .....	124
3.4.1	<i>Análisis afectación del material por corte con plasma</i> .....	124
3.4.1.1	<i>Medición de micro dureza</i> .....	124
3.4.1.2	<i>Análisis metalográfico en laboratorio</i> .....	126
3.4.2	<i>Análisis del mecanismo de desgaste mediante MEB</i> .....	128
3.4.3	<i>Ensayos destructivos del material ASTM A743 CA6NM</i> .....	130
3.4.3.1	<i>Ensayo de tracción</i> .....	131
3.4.3.2	<i>Ensayo de impacto</i> .....	133

## **CAPÍTULO IV**

<b>4.</b>	<b>MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>135</b>
4.1	Resultados inspección de desgaste .....	135
4.1.1.1	<i>Resultados análisis mecanismo de desgaste mediante MEB</i> .....	136
4.2	Resultados control dimensional .....	139
4.2.1	<i>Control de luz entre álabes</i> .....	140
4.2.2	<i>Control de desgaste</i> .....	141
4.3	Resultados remoción de recubrimiento .....	142
4.4	Resultados caracterización del material – Etapa 1 .....	143
4.4.1	<i>Resultados espectrometría</i> .....	143
4.4.2	<i>Resultados medición de dureza</i> .....	143
4.4.3	<i>Resultados metalografía</i> .....	144
4.4.4	<i>Ensayos destructivos</i> .....	145
4.5	Resultados corte de los álabes con plasma .....	146
4.5.1	<i>Cambios a nivel microestructural del material</i> .....	146
4.5.2	<i>Cambios de dureza del material</i> .....	147
4.6	Control de calidad de los insertos .....	148
4.6.1	<i>Resultados escaneo 3D</i> .....	148
4.6.2	<i>Resultados espectrometría</i> .....	150

4.6.3	<i>Resultados medición de dureza</i> .....	151
4.6.4	<i>Resultados metalografía</i> .....	151
4.6.5	<i>Resultados inspección con tintas penetrantes (PT)</i> .....	152
4.6.6	<i>Resultados inspección con partículas magnéticas (MT)</i> .....	152
4.6.7	<i>Resultados inspección con ultrasonido (UT)</i> .....	152
4.7	Control de Calidad de la junta soldada del álabe #01 .....	152
4.7.1	<i>Resultados PT - Junta soldada del álabe #01</i> .....	153
4.7.2	<i>Resultados MT - Junta soldada del álabe #01</i> .....	153
4.7.3	<i>Resultados UT - Junta soldada del álabe #01</i> .....	153
4.8	Control de Calidad de la junta soldada placa .....	153
4.8.1	<i>Resultados PT - Junta soldada placa</i> .....	153
4.8.2	<i>Resultados MT - Junta soldada placa</i> .....	153
4.8.3	<i>Resultados UT - Junta soldada placa</i> .....	154
4.9	Caracterización de juntas soldadas pre y post tratamiento térmico .....	154
4.9.1	<i>Cambios de dureza de la junta</i> .....	154
4.9.2	<i>Análisis metalográfico probetas junta soldada sin TT y con TTPS</i> .....	157
4.9.2.1	<i>Probeta sin tratamiento térmico</i> .....	157
4.9.2.2	<i>Probeta con tratamiento térmico a 580°C</i> .....	159
4.9.2.3	<i>Probeta con tratamiento térmico a 600°C</i> .....	160
4.9.2.4	<i>Probeta con tratamiento térmico a 620°C</i> .....	162
4.9.2.5	<i>Medición de bandas en metal base de probetas con TT</i> .....	163
4.9.3	<i>Resumen análisis microestructural de la junta con y sin TT</i> .....	164
4.9.4	<i>Resumen análisis de inclusiones</i> .....	166
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>167</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>170</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Características turbinas Francis - Central Hidroeléctrica San Francisco. ....	10
<b>Tabla 2-2:</b> Materiales de rodets recuperados en el CIRT. ....	28
<b>Tabla 2-3:</b> Composición química ASTM A743 Gr. CA6NM. ....	29
<b>Tabla 2-4:</b> Propiedades mecánicas ASTM A743 Gr. CA6NM. ....	29
<b>Tabla 2-5:</b> Composición química ASTM A182 Gr. F6NM. ....	30
<b>Tabla 2-6:</b> Propiedades mecánicas ASTM A182 Gr. F6NM. ....	30
<b>Tabla 2-7:</b> Influencia de los principales elementos aleantes en el acero inoxidable. ....	31
<b>Tabla 2-8:</b> Métodos de soldadura usados en reparación de rodets y características. ...	40
<b>Tabla 2-9:</b> Soldabilidad en función de porcentaje de carbono y elementos aleantes. ...	45
<b>Tabla 2-10:</b> Pre calentamiento y TTPS en aceros inoxidables martensíticos. ....	48
<b>Tabla 2-11:</b> Causas comunes de defectos de soldadura y soluciones. ....	55
<b>Tabla 2-12:</b> Acabado superficial (pulido rodets) en función de cabeza de presión. ....	59
<b>Tabla 2-13:</b> Causas y medidas de corrección de cavitación en rodets Francis. ....	61
<b>Tabla 2-14:</b> Tipos de Belzona usados en reparación de rodets. ....	62
<b>Tabla 2-15:</b> Clasificación de tipos y métodos de tintas penetrantes. ....	66
<b>Tabla 2-16:</b> Ventajas y limitaciones de ensayo de tintas penetrantes. ....	67
<b>Tabla 2-17:</b> Ventajas y limitaciones de ensayo de partículas magnéticas. ....	68
<b>Tabla 2-18:</b> Ventajas y limitaciones de ensayo de ultrasonido. ....	69
<b>Tabla 2-19:</b> Carga e indentadores de escalas Rockwell. ....	72
<b>Tabla 2-20:</b> Carga escala Vickers. ....	73
<b>Tabla 2-21:</b> Variaciones permisibles en dimensiones de probetas de impacto. ....	76
<b>Tabla 2-22:</b> Reactivos utilizados para ataque químico. ....	78
<b>Tabla 2-23:</b> Parámetros ancho y diámetro de inclusiones <sup>A</sup> ....	80
<b>Tabla 2-24:</b> Números mínimos por niveles de severidad. ....	80
<b>Tabla 3-1:</b> Procedimiento para inspección de desgaste. ....	87
<b>Tabla 3-2:</b> Procedimiento para control dimensional. ....	88
<b>Tabla 3-3:</b> Procedimiento para Remoción del Recubrimiento. ....	89
<b>Tabla 3-4:</b> Procedimiento para espectrometría. ....	91
<b>Tabla 3-5:</b> Procedimiento para medición de dureza con durómetro magnético. ....	93
<b>Tabla 3-6:</b> Procedimiento para metalografía en campo. ....	94
<b>Tabla 3-7:</b> Procedimiento para corte mediante plasma. ....	97

<b>Tabla 3-8:</b> Composición química solicitada – Insertos metálicos prefabricados. ....	99
<b>Tabla 3-9:</b> Propiedades mecánicas solicitadas - Insertos metálicos prefabricados.....	99
<b>Tabla 3-10:</b> Caracterización material de insertos metálicos prefabricados. ....	100
<b>Tabla 3-11:</b> Control dimensional mediante escaneo 3D.....	103
<b>Tabla 3-12:</b> Niveles de calidad para END. ....	104
<b>Tabla 3-13:</b> Procedimiento para ensayo de tintas penetrantes. ....	105
<b>Tabla 3-14:</b> Tipos de discontinuidades PT. ....	106
<b>Tabla 3-15:</b> Criterios de aceptación PT. ....	107
<b>Tabla 3-16:</b> Procedimiento para ensayo de partículas magnéticas. ....	108
<b>Tabla 3-17:</b> Niveles de aceptación para reflectores con dimensiones medibles.....	110
<b>Tabla 3-18:</b> Procedimiento para ensayo de ultrasonido.....	110
<b>Tabla 3-19:</b> Método DAC SDH - Niveles de inspección y evaluación (60°). ....	112
<b>Tabla 3-20:</b> Número máximo de reflectores no medibles. ....	113
<b>Tabla 3-21:</b> Niveles de aceptación para reflectores con dimensiones medibles.....	113
<b>Tabla 3-22:</b> Presentación de insertos. ....	114
<b>Tabla 3-23:</b> Soldadura de insertos. ....	115
<b>Tabla 3-24:</b> Procedimiento para ensayo de inspección visual. ....	119
<b>Tabla 3-25:</b> Procedimiento para el ensayo de micro dureza.....	124
<b>Tabla 3-26:</b> Procedimiento para metalografía en laboratorio. ....	127
<b>Tabla 3-27:</b> Procedimiento análisis mecanismo de desgaste mediante MEB.....	129
<b>Tabla 3-28:</b> Procedimiento para ensayo de tracción.....	131
<b>Tabla 3-30:</b> Procedimiento para el ensayo de impacto.....	133
<b>Tabla 4-1:</b> Composición química recubrimientos aplicados a elementos hidráulicos. ....	139
<b>Tabla 4-2:</b> Rango de luz permisible entre álabes del Rodete Francis de la CHSF. ....	140
<b>Tabla 4-3:</b> Luz entre álabes Rodete Francis de la CHSF antes de la reparación. ....	140
<b>Tabla 4-4:</b> Holgura a la entrada del Rodete Francis de la CHSF.....	141
<b>Tabla 4-5:</b> Holgura a la salida del Rodete Francis de la CHSF. ....	142
<b>Tabla 4-6:</b> Resultados espectrometría - Álabes 4, 8 y 9 del Rodete Francis CHSF. ...	143
<b>Tabla 4-7:</b> Medición de dureza - Álabes 4, 8 y 9 del Rodete Francis CHSF.....	143
<b>Tabla 4-8:</b> Resultados Ensayo de Tracción en Acero ASTM A743 Gr. CA6NM.....	145
<b>Tabla 4-9:</b> Resultados del Ensayo de Impacto.....	145
<b>Tabla 4-10:</b> Valores micro dureza medida a partir del borde de corte por plasma.....	147
<b>Tabla 4-11:</b> Resultados espectrometría insertos metálicos prefabricados 3, 7, 9 y 13. ....	150
<b>Tabla 4-12:</b> Medición de dureza de insertos metálicos prefabricados 3, 7, 9 y 13.....	151

<b>Tabla 4-13:</b> Dureza Brinell Junta soldada con TT a diferentes temperaturas.....	154
<b>Tabla 4-14:</b> Tamaño de agujas de martensita en la junta soldada. ....	165
<b>Tabla 4-15:</b> Ancho de bandas martensíticas y austeníticas a diferentes temperaturas.	165
<b>Tabla 4-16:</b> Número de severidad de las diferentes probetas de la junta soldada. ....	166
<b>Tabla 4-17:</b> Número de severidad obtenida en diferentes procesos. ....	166

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2-1:</b> Centrales de generación en el Ecuador.....	5
<b>Figura 2-2:</b> Rodete Kaplan. ....	8
<b>Figura 2-3:</b> Rodete Pelton de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. ....	9
<b>Figura 2-4:</b> Rodete Francis de la Central Hidroeléctrica Lumbaqui. ....	10
<b>Figura 2-5:</b> Ubicación de los principales componentes de la Turbina Francis.....	11
<b>Figura 2-6:</b> Mecanismos de desgaste abrasivo. ....	13
<b>Figura 2-7:</b> Parámetros del desgaste por erosión. ....	14
<b>Figura 2-8:</b> Mecanismos de desgaste erosivo. ....	15
<b>Figura 2-9:</b> Tasa de erosión como función del ángulo de impacto.....	16
<b>Figura 2-10:</b> Superficie erosionada del Rodete Francis de la U1 de la CHSF. ....	17
<b>Figura 2-11:</b> a) superficie erosionada (izq), b) superficie cavitada (der). ....	17
<b>Figura 2-12:</b> Diagrama presión-temperatura. ....	18
<b>Figura 2-13:</b> Reducción de área de la burbuja de vapor. ....	20
<b>Figura 2-14:</b> Cavitación fija (movimiento de burbujas en un rodete Francis. ....	22
<b>Figura 2-15:</b> Cavitación entre álabes. ....	22
<b>Figura 2-16:</b> Cavitación por vórtices (Cavitación whirl con baja carga). ....	23
<b>Figura 2-17:</b> Daños por cavitación en los álabes de una Turbina Francis. ....	23
<b>Figura 2-18:</b> Formación de grietas. ....	24
<b>Figura 2-19:</b> Imágenes obtenida con detector de electrones retro dispersados. ....	25
<b>Figura 2-20:</b> Imágenes obtenida con detector de electrones secundarios.....	26
<b>Figura 2-21:</b> Identificación y diferenciación de las zonas críticas de desgaste. ....	26
<b>Figura 2-22:</b> Caída de presión del Rodete Francis. ....	27
<b>Figura 2-23:</b> Picaduras en álabe turbina hidráulica debido a erosión por cavitación ....	28
<b>Figura 2-24:</b> Rango de contenido de Cr y Ni en aceros inoxidables. ....	29
<b>Figura 2-25:</b> Tipos aceros inoxidables en función de % de: a) Cr y Ni, b) Cr y C. ....	32
<b>Figura 2-26:</b> Diagrama de equilibrio Fe-Cr.....	32
<b>Figura 2-27:</b> Diagrama pseudobinario Fe-Cr-C con 13%Cr. ....	34
<b>Figura 2-28:</b> Cizallamiento e inclinación de superficie formación martensita (placas).35	
<b>Figura 2-29:</b> Temperatura Ms en función del contenido de carbono. ....	36
<b>Figura 2-30:</b> Componentes y morfología de la martensita en forma de listones. ....	36
<b>Figura 2-31:</b> Reparación de Rodete Pelton por relleno con soldadura. ....	39

<b>Figura 2-32:</b> Zonas de rodete Francis sometidas a alto esfuerzo.....	40
<b>Figura 2-33:</b> Zonas de soldadura. ....	42
<b>Figura 2-34:</b> Relación - Tamaño de grano de zonas pozo de soldadura y temperatura. 43	
<b>Figura 2-35:</b> Regiones de la ZAC y temperaturas pico alcanzadas acero inox 13-4.....	43
<b>Figura 2-36:</b> Subregiones ZAC acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA6NM.44	
<b>Figura 2-37:</b> Zonas críticas diagrama de Schaeffler.....	46
<b>Figura 2-38:</b> Evolución de la ZAC en soldadura con múltiples pases.....	47
<b>Figura 2-39:</b> Diagrama CCT para el acero ASTM A743 Gr. CA6NM. ....	51
<b>Figura 2-40:</b> Microestructura acero ASTM A743 CA6NM homogenizado y revenido 53	
<b>Figura 2-41:</b> Prop. Mecánicas y % austenita en función de temperatura de revenido. .	54
<b>Figura 2-42:</b> Control dimensional – Medición luz entre álabes. ....	57
<b>Figura 2-43:</b> Plantillas de control de perfil para rodete Francis. ....	57
<b>Figura 2-44:</b> Aplicación de refuerzos para soldadura.....	58
<b>Figura 2-45:</b> Plantillas de control de perfil para rodete Francis. ....	59
<b>Figura 2-46:</b> Fisura en álabe del rodete Francis HSF. ....	60
<b>Figura 2-47:</b> Reparación de álabes mediante cerámicos. ....	62
<b>Figura 2-48:</b> Procedimiento de ensayo de tintas penetrantes. ....	65
<b>Figura 2-49:</b> Ensayo de tintas penetrantes rodete Pelton.....	66
<b>Figura 2-50:</b> MT en rodete Francis de la Central Hidroeléctrica Agoyán.....	68
<b>Figura 2-51:</b> Ultrasonido - Método pulso-eco. ....	69
<b>Figura 2-52:</b> Inspección de rodete Pelton con ultrasonido PA. ....	70
<b>Figura 2-53:</b> Visualización de representaciones A, B y S Scan. ....	70
<b>Figura 2-54:</b> Distancia entre indentaciones Brinell. ....	71
<b>Figura 2-55:</b> Distancia indentaciones Rockwell.....	72
<b>Figura 2-56:</b> Indentador Vickers y distancia entre indentaciones. ....	73
<b>Figura 2-57:</b> Espectrómetro de emisión por chispa.....	74
<b>Figura 2-58:</b> Probetas ensayo de impacto para metales ferrosos.....	76
<b>Figura 2-59:</b> Preparación metalográfica – pulido espejo.....	77
<b>Figura 2-60:</b> Tipos de inclusiones ....	79
<b>Figura 3-1:</b> Fisura álabe #04 U2.....	84
<b>Figura 3-2:</b> Reparaciones fisura álabe #04 U2 .....	84
<b>Figura 3-3:</b> Reparación fisura álabe #08. ....	85
<b>Figura 3-4:</b> Fisura álabe #09 U2.....	85
<b>Figura 3-5:</b> Determinación de extensión de fisura y perforación álabe #09 U2.....	86

<b>Figura 3-6:</b> Reparación álabe #09 U2.....	86
<b>Figura 3-7:</b> Zonas de inspección de desgaste de los álabes. ....	88
<b>Figura 3-8:</b> Zonas de inspección del álabe del Rodete Francis. ....	104
<b>Figura 3-9:</b> Ensayo de tintas penetrantes en junta soldada.....	120
<b>Figura 3-10:</b> Ensayo de partículas magnéticas en junta soldada. ....	120
<b>Figura 3-11:</b> Ensayo de ultrasonido en junta soldada.....	121
<b>Figura 3-12:</b> Junta soldada y END realizados previo a su caracterización. ....	122
<b>Figura 3-13:</b> Ciclos térmicos para los tratamientos realizados en la reparación. ....	123
<b>Figura 3-14:</b> Probetas luego de ser sometidas a tratamiento térmico.....	123
<b>Figura 4-1:</b> (1) Corte por erosión y (2) erosión por cavitación .....	135
<b>Figura 4-2:</b> Zona desgastada del Rodete Francis de la CHSF. ....	136
<b>Figura 4-3:</b> Topografía de erosión abrasiva en el Acero ASTM A743 Gr. CA6NM. .	136
<b>Figura 4-4:</b> Topografía progreso de desgaste. ....	137
<b>Figura 4-5:</b> Mala adherencia del Carburo de Tungsteno en el acero.....	137
<b>Figura 4-6:</b> Superficie del álabe con metalizado. ....	138
<b>Figura 4-7:</b> Mapeo zona de análisis mecanismo de desgaste. ....	139
<b>Figura 4-8:</b> Superficie luego de la remoción del recubrimiento.....	142
<b>Figura 4-9:</b> Análisis microestructural e inclusiones reparaciones en sitio álabe #09..	144
<b>Figura 4-10:</b> Análisis microestructural e inclusiones de material cortado por plasma	146
<b>Figura 4-11:</b> Análisis de inclusiones de material cortado por plasma.....	146
<b>Figura 4-12:</b> Inspección dimensional computarizada – Inserto #03.....	149
<b>Figura 4-13:</b> Inspección dimensional computarizada – Inserto #07.....	149
<b>Figura 4-14:</b> Inspección dimensional computarizada – Inserto #09.....	149
<b>Figura 4-15:</b> Inspección dimensional computarizada – Inserto #13.....	150
<b>Figura 4-16:</b> Análisis microestructural e inclusiones acero ASTM A182 Gr. F6NM.	152
<b>Figura 4-17:</b> Medición de dureza de la junta soldada.....	154
<b>Figura 4-18:</b> Análisis microestructural e inclusiones metal fundido – Probeta sin TT	157
<b>Figura 4-19:</b> Análisis microestructural e inclusiones ZAC – Probeta sin TT. ....	158
<b>Figura 4-20:</b> Análisis microestructural e inclusiones MB – Probeta sin TT. ....	158
<b>Figura 4-21:</b> Análisis microestructural e inclusiones MF – Probeta TT 580°C. ....	159
<b>Figura 4-22:</b> Análisis microestructural e inclusiones ZAC – Probeta TT 580°C. ....	159
<b>Figura 4-23:</b> Análisis microestructural e inclusiones MB – Probeta TT 580°C.....	160
<b>Figura 4-24:</b> Análisis microestructural e inclusiones MF – Probeta TT 600°C. ....	160
<b>Figura 4-25:</b> Análisis microestructural e inclusiones ZAC – Probeta TT 600°C. ....	161



<b>Figura 4-26:</b> Análisis microestructural e inclusiones MB – Probeta TT 600°C.....	161
<b>Figura 4-27:</b> Análisis microestructural e inclusiones MF – Probeta TT 620°C. ....	162
<b>Figura 4-28:</b> Análisis microestructural e inclusiones ZAC – Probeta TT 620°C. ....	162
<b>Figura 4-29:</b> Análisis microestructural e inclusiones MB – Probeta TT 620°C.....	163
<b>Figura 4-30:</b> Bandas en MB de muestras sometidas a tratamiento térmico. ....	164

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 2-1:</b> Interpretación y evaluación de indicaciones END. ....	64
<b>Gráfico 3-1:</b> Procedimiento de reparación convencional de rodetes. ....	82
<b>Gráfico 3-2:</b> Procedimiento de reparación de un rodete por sustitución de material. ...	83
<b>Gráfico 4-1:</b> Dureza en función de la distancia al borde cortado con plasma .....	148
<b>Gráfico 4-2:</b> Variación dureza zonas junta soldada con TT diferentes temperaturas. .	156

## **LISTA DE ANEXOS**

**ANEXO A.** Probeta de Tracción.

**ANEXO B.** Probeta de Impacto.

**ANEXO C.** Bloque de Calibración – Ultrasonido Haz Angular.

**ANEXO D.** Plantillas de Control de Desgaste.

**ANEXO E.** Plano para Control de luz entre álabes.

## SIMBOLOGÍA

Ms	Temperatura a la que inicia la transformación de austenita a martensita
Mf	Temperatura a la que finaliza la transformación de austenita a martensita
HBW	Dureza Brinell con indentador de carburo de tungsteno
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
$\gamma$	Austenita
$\gamma'$	Austenita retenida
$\delta$	Ferrita delta
$\alpha'$	Martensita
$M_xC_y$	Carburos
CE	Carbono equivalente
Ceq	Carbono equivalente químico
CEe	Carbono equivalente del espesor
Tp	Temperatura de precalentamiento
Fe <sub>3</sub> C	Cementita
V <sub>pulido</sub>	Velocidad de pulido
D	Diámetro de disco
Rp <sub>0,2</sub>	Esfuerzo a la fluencia
Rm	Esfuerzo último a la tracción
%A	Porcentaje de alargamiento
KCU	Resistencia al impacto
$\bar{x}$	Promedia
S <sub>n-1</sub>	Desviación estándar
CV	Coefficiente de variación

## LISTA DE ABREVIACIONES

AC	Corriente Alterna
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
CCH	Cahier Des Charges
CCT	Transformación de Enfriamiento Continuo
CELEC	Corporación Eléctrica del Ecuador
CIRT	Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas y Partes Industriales
CNC	Control Numérico Computarizado
DAC	Distance amplitud correction
DC	Corriente Continua
DCEN	Corriente Continua electrodo negativo
DCEP	Corriente Continua electrodo positivo
DGS	Distance, gain and size
ED	Ensayos Destructivos
END	Ensayos No Destructivos
EPP	Equipo de Protección Personal
FCC	Cúbico Centrado en las Caras
GTAW	Soldadura por arco de gas tungsteno
HDBSD	Detector de electrones retrodispersados
HIC	Agrietamiento por Hidrógeno Inducido
MF	Metal fundido
MB	Metal Base
MSS	Acero Inoxidable Martensítico
MT	Magnetic Testing
PQR	Registro de calificación del procedimiento de soldadura
PT	Penetrant Testing
SDH	Side Drilled Holes
SE1	Detector secundario
MEB	Microscopio electrónico de barrido
PA	Phased Array
ROI	Region of interest
SMAW	Soldadura por arco de metal protegido
TT	Tratamiento Térmico
TTPS	Tratamiento Térmico Post Soldadura
UNS	Sistema Numérico Unificado
UT	Ultrasonic Testing
WPS	Especificación del procedimiento de soldadura
VT	Visual Testing
ZAC	Zona Afectada por el Calor

## RESUMEN

El principal objetivo del presente trabajo es elaborar e implementar el procedimiento de reparación e inspección del Rodete Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco mediante sustitución de material de los álabes por insertos metálicos prefabricados. Se ha procedido a caracterizar el estado del material del rodete en estado de recepción (espectrometría, dureza, metalografía y ensayos destructivos) y el mecanismo de desgaste encontrado en los álabes (MEB), para posteriormente documentar paso a paso todas las etapas de reparación, que mediante la dirección de un Técnico Especialista en Reparación de Turbinas se ha llevado a cabo, además se realizó un estricto control de calidad en todas las etapas de reparación mediante plantillaje, escaneo 3D, Ensayos No Destructivos (VT, PT, MT y UT) y Control dimensional, así mismo se evalúa las transformaciones a nivel microestructural del Acero ASTM A743 Gr. CA6NM generados en el proceso de soldadura que combina GTAW y SMAW para finalmente determinar la Temperatura de Tratamiento Térmico Post Soldadura óptimo. Se encontró que el desgaste de erosión por cavitación es el más crítico que se da en el lado de presión a la salida de los álabes del rodete, además de esto se encontró una pérdida de tenacidad del acero debido al endurecimiento del material por las reparaciones en sitio realizadas durante los mantenimientos, también se determinó que el corte por plasma en el Acero ASTM A743 Gr. CA6NM genera una ZAC de 2mm, y por último a nivel microestructural se determinó que un TTPS a 620°C genera una homogenización en el tamaño de agujas de martensita en las tres zonas de la junta (MB, ZAC y MF). Se recomienda calificar la especificación del procedimiento de soldadura (WPS) y los procedimientos de inspección mediante END, y conjuntamente se trabaje en la certificación del personal de todas las áreas del CIRT para garantizar y asegurar una buena práctica de reparación.

**Palabras clave:** <TECNOLOGÍAS Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <BAÑOS (CANTÓN)>, <CAVITACIÓN>, <CONTROL DE CALIDAD>, <DESGASTE>, <ESCANEAO 3D>, <MARTENSITA>, <ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEB)>, <RODETE FRANCIS>, <TUNGURAHUA (PROVINCIA)>.

## SUMMARY

The objective of the current research work is to develop and implement the procedure of repair and inspection of Francis runners at San Francisco Hydroelectric Power Plant by replacing the material of blades through prefabricated metal inserts. It proceeded to characterize the state of the blade material in the receiving state (spectrometry, hardness, metallography and destructive tests), besides the mechanism of wear found in the blades (SEM), to subsequently document step by step all the repair stages, that through the operation of a Specialist Technician in Repair of Turbines has been carried out. In addition, it made a strict quality control in all the stages of repair by means of stenciling, 3D scanning, Non-Destructive Tests (VT, PT, MT and UT) and dimensional control. Later, it evaluated the transformations based on microstructural level of steel ASTM A743 Gr. CA6NM generated in the welding process that combines GTAW and SMAW to determine finally the Optimal Post Welding Thermal Treatment Temperature. It was found that wear erosion by cavitation is the most critical that occurs on the pressure side at the outlet of the impeller blades. In addition, it found a loss of steel toughness due to the hardening of the material by the repairs carried out during the maintenance. It determined that plasma cutting in the ASTM A743 Gr. CA6NM Steel generates 2mm HAZ. Finally, at the microstructural level determined that a PWHT at 620° C generates a homogenization in the size of martensite needles in the three zones of the joint (MB, HAZ and MF). It is recommended to qualify the welding procedure specification (WPS) and inspection procedures through NDT and work together on the certification of personnel from all areas of CIRT to guarantee and ensure good repair practice.

**Keywords:** <TECHNOLOGIES AND ENGINEERING SCIENCES>, <BAÑOS (COUNTY)>, <CAVITATION>, <QUALITY CONTROL>, <WEAR>, <3D SCANNING>, <MARTENSITE>, <SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM)>, <FRANCIS RUNNER>, <TUNGURAHUA (PROVINCE)>.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo principal elaborar e implementar el procedimiento de reparación e inspección del rodete Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco mediante sustitución de material de los alabes por insertos metálicos prefabricados, para lo cual se realizarán una serie de actividades que contribuyan a la sustentación de conocimientos referentes al tema y además aseguren una buena práctica de reparación.

La importancia de esta investigación radica en la generación de información en lo que respecta a la reparación de rodetes mediante sustitución de material, ya que esta técnica es experimental y no se realiza en base a directrices normalizadas sino en base a la experiencia.

Para el desarrollo del tema se pretende caracterizar el mecanismo de desgaste encontrado en los álabes del rodete mediante microscopía electrónica de barrido, ya que esta permitirá determinar las posibles causas del daño que sufre el elemento hidráulico. Se realizará un control de calidad riguroso en las diferentes etapas de reparación utilizando técnicas como el plantillaje, ensayos destructivos, no destructivos y metalografía. El análisis metalográfico permitirá evaluar las transformaciones microestructurales de los aceros inoxidables martensíticos usados en la reparación.

En el capítulo I se dan a conocer antecedentes y se formula el problema objeto de estudio. En el capítulo II se dan a conocer generalidades acerca del estado del país en cuanto a generación hidroeléctrica, turbinas utilizadas, desgastes que sufren los elementos hidráulicos, materiales con los que se fabrican estos elementos, reparaciones realizadas y aspectos del control de calidad aplicados a estos procesos. En el capítulo III se indica la metodología utilizada y se detalla el proceso de reparación por etapas. En el capítulo IV se muestran y discuten los resultados obtenidos en la investigación.



## CAPÍTULO I

### 1. MARCO REFERENCIAL

#### 1.1 Antecedentes

La energía hidroeléctrica es una fuente limpia y renovable puesto que utiliza únicamente agua, dicha fuente de energía es utilizada por máquinas conocidas como turbinas hidráulicas. Estas se construyen desde hace mucho tiempo y la tecnología empleada en ese proceso ya ha alcanzado una gran madurez, con eficiencia máxima mayor al 95% (Lain, García, Quintero, & Orrego, 2008); es importante indicar que alcanzar esta eficiencia es complejo ya que cada turbina debe ser diseñada acorde a las necesidades y requerimientos de cada hidroeléctrica.

Las turbinas hidráulicas son máquinas rotativas accionadas por el agua, de forma que convierten la energía hidráulica de una corriente o salto de agua, en energía mecánica (Garrido, Zafra, & Vázquez, 2009). Por su naturaleza estas máquinas se encuentran sometidas a diferentes esfuerzos, los cuales generan el deterioro de sus componentes.

Existen diversos tipos de turbinas, entre las principales tenemos: Pelton, Francis y Kaplan, pero en la presente investigación se estudiarán específicamente las turbinas Francis (turbinas de reacción). Éstas presentan bajas pérdidas hidráulicas, alta eficiencia, alta velocidad específica, bajos costos en acoplamiento con el generador, operan a grandes rangos de alturas y caudales; pero presentan problemas de cavitación, bajo rendimiento a cargas parciales y alto desgaste por erosión debido al diseño del perfil hidráulico (Morales, Corredor, Paba, & Pacheco, 2014).

Los rodetes Francis por su geometría están sometidos a cambios bruscos de presión, lo cual provoca cavitación, entendida como el daño provocado por la implosión de burbujas de vapor presentes en un fluido (Mesa & Sinatora, 2003), y a su vez éste fenómeno conlleva a la erosión de la superficie de los álabes, que con el paso del tiempo se desgastan considerablemente; produciendo así la disminución de la eficiencia y he ahí la importancia de estudiarlo. Debido a que las turbinas operan a carga parcial surge inestabilidad hidrodinámica lo cual crea altas fluctuaciones de presión no estacionarias que con el tiempo podrían llevar a un fallo por fatiga del material (Lain, García, Quintero, & Orrego, 2008).

En Ecuador existe un gran número de centrales hidroeléctricas, teniendo así una capacidad de energía eléctrica instalada en el Ecuador es de 5.207 MW siendo la electricidad proveniente de centrales hidroeléctricas el 53% de la oferta total (Lazo, 2015). En la actualidad el gobierno ha impulsado el cambio de la matriz energética y ha ejecutado proyectos hidroeléctricos que ayudan al desarrollo industrial, productivo y social del país (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2017); y se estima que para el año 2022 la energía generada mediante el uso de recursos hídricos alcance el 93% aproximadamente. La central hidroeléctrica San Francisco tiene 230 MW de capacidad instalada, dicha energía eléctrica es generada mediante dos turbinas Francis de eje vertical de 115 MW cada una. Esta central, junto con las centrales Agoyán y Pucará pertenece a la Unidad de Negocio Hydroagoyán (Lazo, 2015).

En una central hidroeléctrica el proceso de producción es continuo, las turbinas trabajan las 24 horas del día y sus componentes sufren deterioro, por lo cual se realiza el Mantenimiento Mayor (Overhaul), que consiste en la reparación total electromecánica de la unidad, cuyos trabajos generalmente tienen una periodicidad de 10 años, dependiendo de varios factores como el desgaste, paradas y tiempos de operación (OSINERGMIN, 1997).

Basados en una investigación realizada por CELEP EP en el año 2009, en busca de empresas ecuatorianas que brinden servicios de reparación de elementos hidromecánicos, se determinó que hasta ese entonces no existía producción nacional competitiva, por lo cual era necesario recurrir a países como: Alemania, Suecia, Italia, Chile, Colombia, entre otros; siendo Chile la mejor opción debido a costos de transporte, logística y tiempo (Sagñay & Pilamunga, 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 EP, 2012). Como iniciativa de la Unidad de Negocio Hydroagoyán, se creó el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales (CIRT), cuyo objetivo es ser líderes en procesos de reparación, recuperación de turbinas y sus componentes, mediante la mejora continua en sus procedimientos, investigación, innovación y desarrollo de tecnología.

De la central hidroeléctrica San Francisco ha salido de funcionamiento el rodete Francis de la Unidad 2 el 01 de abril de 2014 con 44124 horas de operación, y el costo de adquisición de este rodete corresponde a aproximadamente 3,5 millones de dólares,

dificultando la compra de este tipo de elemento hidráulico (Cañizares & Quinchuela, 2017); como su costo de reparación varía entre el 10 y 20% de dicho valor, se prevé realizar su reparación en el CIRT luego de verificar su factibilidad.

## 1.2 Formulación del problema

En los rodetes Francis se produce el fenómeno de cavitación generada por vórtices, estos vórtices se producen en el tubo de aspiración y provocan oscilaciones de presión que genera la formación de burbujas y la implosión de estas en la zona cercana al borde de salida de los álabes. A través de una simulación se nota de manera clara la formación de este fenómeno y mediante un análisis de esfuerzos se observa que las zonas de las entradas están sometidas al mayor esfuerzo y por tanto sufrirán daños, y la mejor manera de corroborar su presencia es observando el daño real producido en el rodete. Al realizar múltiples recuperaciones por relleno con soldadura lo único que se logra es acelerar el daño por cavitación y fisuraciones debido al endurecimiento (disminución en la tenacidad) y fragilización del material debido a las grandes variaciones de temperatura en el proceso, la falta de control de temperatura de pre calentamiento y tratamientos térmicos post soldadura, lo que causa un deterioro prematuro de los álabes. Se ha identificado fracturas en los álabes ocasionadas por los sobreesfuerzos generados en los arranques, paradas y reparaciones mal realizados del rodete; estos factores conducen al desgaste del material por distintos mecanismos, y como consecuencia la disminución de su vida útil.

Años atrás en el país no existía una empresa que brinde servicio para su reparación y el costo del mismo en el extranjero era muy elevado; actualmente, gracias a las adecuaciones realizadas por parte de la empresa estratégica pública CELEC EP Hidroagoyán, fue inaugurado el CIRT, mismo que cuenta con la tecnología, laboratorios, maquinaria y equipos de punta, pero el problema radica en la carencia de información y procedimientos comprobados para la reparación y recuperación de partes hidráulicas. Por tanto, se pretende implementar un procedimiento de reparación mediante sustitución de material de los alabes por insertos metálicos prefabricado ya que este proceso nunca se ha realizado antes en el país, acompañado de un plan estricto de control y aseguramiento de la calidad que permita determinar los cambios en la microestructura (tamaño de grano, fases, inclusiones), morfología, composición química, defectología, propiedades físicas y mecánicas, en todas las etapas de la reparación.

### 1.3 Justificación

En el Ecuador, con el objetivo de promover la generación de energía a través de fuentes limpias como son las hidroeléctricas y tomando en cuenta el elevado costo que tienen las reparaciones de las turbinas en el extranjero, se ha impulsado la investigación en cuanto a procedimientos y tecnologías para su recuperación, para así alejar al país de la dependencia tecnológica de empresas extranjeras.

CELEC EP cuenta con un Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales (CIRT), lo cual favorece a la ejecución de reparaciones bajo parámetros técnicos, validados con normas internacionales que garantizan la calidad del proceso, evitando así reparaciones innecesarias que representan una pérdida de tiempo y dinero. El CIRT se ha planteado la reparación del Rodete Francis de la Unidad 2 perteneciente a la Central Hidroeléctrica San Francisco, mediante la adquisición a través de compras públicas de insertos metálicos prefabricados ASTM A182 Gr. F6NM, y de la contratación del servicio de un Especialista Técnico en Reparación de Turbinas, con lo que se contribuirá en la elaboración de procedimientos, recolección y documentación de la información necesaria para dicha reparación.

Con la finalidad de contribuir con el desarrollo de estos procedimientos se pretende generar y documentar la información para la reparación de rodetes Francis, mediante sustitución de material de los alabes por insertos metálicos prefabricados, y la verificación con un adecuado control de calidad mediante la aplicación de metalografía, ensayos no destructivos y tratamientos térmicos, que garanticen y aseguren una buena práctica de reparación, lo cual representa una solución viable frente a la adquisición de un rodete nuevo.

### 1.4 Alcance

El alcance del presente trabajo es dotar al CIRT perteneciente a la Unidad de Negocio Hidroagoyán CELEC EP, de un Manual Técnico de Procedimientos para la reparación e inspección de los álabes fijos de rodetes Francis de una unidad de generación Hidroeléctrica; lo cual se utilizará como guía técnica con el fin de optimizar: tiempos, recursos y personal.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 *Objetivo general*

Elaborar e implementar el procedimiento de reparación e inspección del rodete Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco mediante sustitución de material de los alabes por insertos metálicos prefabricados.

### 1.5.2 *Objetivos específicos*

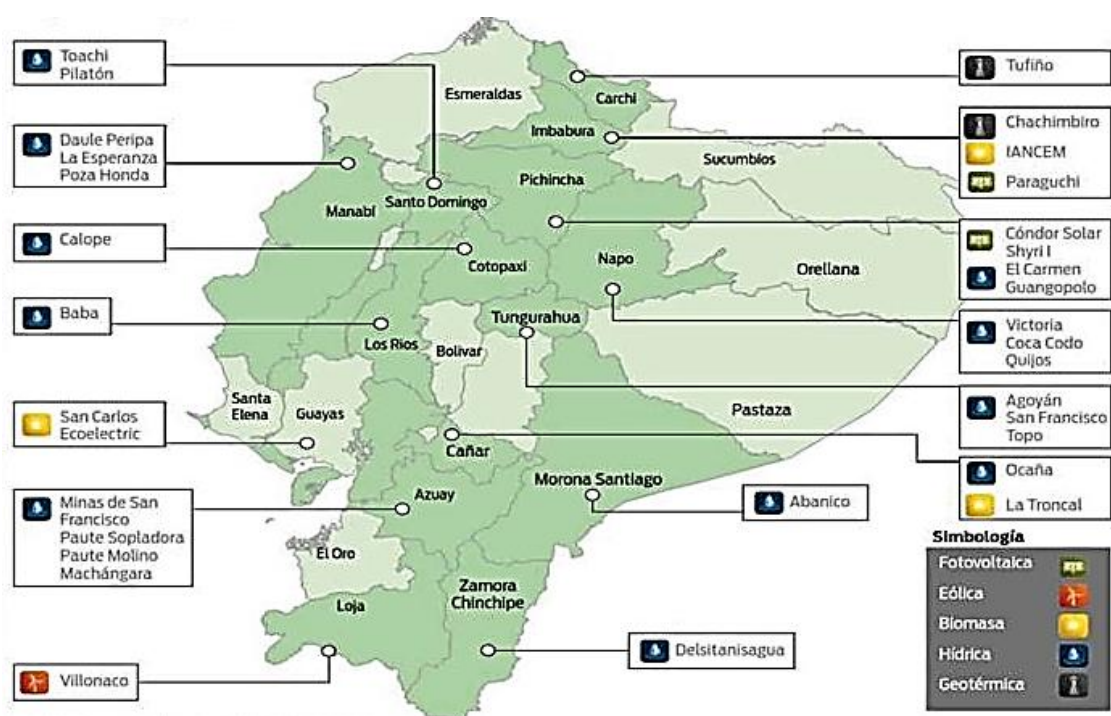
- Caracterizar el mecanismo de desgaste encontrado en los álabes del rodete mediante microscopia electrónica de barrido.
- Realizar el control de calidad del rodete en las diferentes etapas de reparación mediante plantillaje, ensayos destructivos, no destructivos y metalografía.
- Llevar a cabo el control de calidad de los insertos prefabricados mediante escaneo 3D (técnica de superposición), ensayos no destructivos y metalografía.
- Evaluar las transformaciones microestructurales de los aceros inoxidables martensíticos ASTM A743 CA6NM y ASTM A182 F6NM durante el proceso de reparación.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Generación eléctrica en Ecuador

La Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) es el ente encargado de la generación y transmisión de la energía eléctrica a nivel nacional, mediante la producción de energía a través de centrales hídricas, térmicas y eólicas. CELEC EP cuenta a nivel nacional con 14 Unidades de Negocio, las mismas que a su vez poseen una o más centrales de generación eléctrica. En la Figura 2-1 se puede apreciar las diferentes centrales de generación eléctrica ubicadas a nivel nacional.



**Figura 2-1:** Centrales de generación en el Ecuador.

Fuente: (CELEC EP, 2013)

En la actualidad el gobierno ha impulsado el cambio de la matriz energética y ha ejecutado proyectos hidroeléctricos que ayudan al desarrollo industrial, productivo y social del país (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2017); se estima que para el año 2022 la energía generada mediante recursos hídricos alcance el 93% aproximadamente.

### 2.1.1 *Centrales hidroeléctricas*

El Ecuador tiene una capacidad de energía eléctrica instalada de 5.207 MW, siendo el 53% de la oferta total proveniente de centrales hidroeléctricas (Lazo, 2015, pág. 10), las mismas que se encuentran ubicadas en sitios donde la geografía del lugar presenta diferencias de altura y abundantes recursos hídricos, de esta manera el agua adquiere energía potencial que posterior se convierte en cinética, la cual se utiliza para hacer girar el rodete de la turbina y de esta forma producir energía mecánica que por transmisión de movimiento al generador se convierte en energía eléctrica. Las principales características de una central hidroeléctrica, desde el punto de vista de su capacidad de generación son la potencia y la energía, las cuales están interrelacionadas por su marco operativo o precedencia (Caicedo, 2009, pág. 25)

#### ***Central Hidroeléctrica San Francisco***

Las turbinas que se utilizan en la Central Hidroeléctrica San Francisco son turbinas Francis de eje vertical, conocidas como turbinas de sobrepresión por ser variable la presión en las zonas del rodete, o de admisión total, ya que este se encuentra sometido a la influencia directa del agua en toda su periferia. La aplicación de este tipo de turbinas es muy extensa, pueden emplearse en saltos de distintas alturas, dentro de una amplia gama de caudales entre 2 y 200m<sup>3</sup>/s aproximadamente, para el caso de la Central San Francisco es de 116m<sup>3</sup>/s y la caída neta es de 200 m.

Las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco producen 115MW cada una, teniendo así una producción total de 230MW debido a sus 2 unidades de generación instaladas, las mismas, que son de rendimiento óptimo, pero solamente entre unos determinados márgenes, los cuales están entre: 60 y 100% del caudal máximo, esta es una de las principales razones por la que se disponen de 2 unidades en la central con tal que ninguna trabaje individualmente, por debajo de los valores del 60% de la carga total (Ludeña, 2009, pág. 28).

#### ***Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales***

El CIRT, administrado por CELEC EP Hidroagoyán, es el único Centro de Investigación en el Ecuador que cuenta con la más alta tecnología y mano de obra nacional, en donde se reparan Turbinas y partes industriales que en el pasado se enviaban fuera del país por largos periodos de tiempo y con altos costos.

Según un análisis de costos, la reparación de los rodetes en el CIRT representa un ahorro económico aproximado del 60% del precio al enviarlos al extranjero para su recuperación, además, los tiempos de entrega se reducen considerablemente, evitando paralizaciones prolongadas de las Unidades de Generación.

En la actualidad en el CIRT, tanto rodetes y piezas industriales son sometidos a procesos como: técnicas de ingeniería inversa, levantamiento geométrico, tratamiento térmico, pulido, soldadura manual y robotizada, ensayos no destructivos, entre otros (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2017).

## 2.2 Turbinas utilizadas para la generación

Una turbina hidráulica es una turbomáquina motora hidráulica, que aprovecha la energía de un fluido, ya sea esta potencial o cinética que pasa a través de ella para transformar la energía de los fluidos en energía mecánica, para aprovechar el movimiento circular que genera el eje de la turbina (Zegarra, 2015, pág. 1), moviendo así una máquina o bien un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica (López & Ramírez, 2011, pág. 9).

### 2.2.1 *Tipos de turbinas*

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar de acuerdo con el cambio de presión en el rodete o al grado de reacción, teniendo así:

#### 2.2.1.1 *Turbinas de acción*

Son aquellas en las que el fluido de trabajo no sufre un cambio de presión importante en su paso a través del rodete, ya que el impacto del fluido es a presión atmosférica, teniendo que aprovechar únicamente la velocidad del flujo de agua (López & Ramírez, 2011, pág. 9), por este motivo son aprovechadas para grandes saltos, usando en esta acción toda la energía potencial del fluido para transformarla en energía cinética y esta energía cinética es transformada en trabajo de eje. La dirección del flujo es tangencial y el impacto del chorro a los álabes de la turbina es de forma frontal; a este grupo pertenecen las turbinas Pelton y Michell Banki (Zegarra, 2015, pág. 9).



### 2.2.1.2 Turbinas de reacción

Las turbinas de reacción son aquellas en las que el fluido de trabajo sufre un cambio de presión importante en su paso a través del rodete (López & Ramírez, 2011, pág. 9), pueden ser de flujo axial (en caso de las turbinas Kaplan y de Hélice) o de flujo diagonal o radio axial (en caso de las turbinas Francis y Dériaz). La turbina de reacción actúa aprovechando la velocidad relativamente baja del fluido, pero con alta presión. La presión va disminuyendo durante su paso a través de los álabes hasta llegar a una presión muy baja, en ocasiones próximas a cero o incluso negativas (Zegarra, 2015, págs. 9, 11).

También se puede clasificar las turbinas hidráulicas de acuerdo con el tipo de rodete, y entre las mismas de cada tipo se puede diferenciar sólo por tamaño, ángulo de los álabes o cangilones (López & Ramírez, 2011, pág. 10). Los tipos más importantes son:

#### a) Turbinas Kaplan

Son turbinas axiales que están diseñadas para trabajar con saltos de agua pequeños y con grandes caudales (López & Ramírez, 2011, pág. 10), en estas turbinas las palas del rodete tienen forma de hélice como se observa en la Figura 2-2, esta turbina es la más eficiente de todas ya que con ella se da grandes rendimientos (hasta 95% aproximadamente), las palas o álabes son orientables lo que implica un mejor posicionamiento de estas para un mejor ingreso de flujo, este movimiento es manejado mediante un servomecanismo que hace innecesario la instalación de álabes guía o distribuidores (Zegarra, 2015, págs. 12-13).



**Figura 2-2:** Rodete Kaplan.

Fuente: (GLOBAL Hydro, s.f.)

## b) Turbinas Pelton

Son turbinas de flujo transversal, de admisión parcial, y en vez de contar con álabes tiene cangilones, y están diseñadas para trabajar con saltos de agua muy grandes, pero con caudales pequeños (López & Ramírez, 2011, pág. 10). Lo característico de estas turbinas es que la presión se mantiene constante en el rodete, ya que el chorro es libre y por estar el chorro impactando en los cangilones de la turbina que están colocadas en la base del rodete como se muestra en la Figura 2-3 (Zegarra, 2015, págs. 9-10).



**Figura 2-3:** Rodete Pelton de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair.

Fuente: Autores

## c) Turbinas Francis

Son turbinas de flujo mixto y de reacción, existiendo algunos rodetes con diseños complejos que son capaces de variar el ángulo de sus álabes durante su funcionamiento, además de estar diseñadas para trabajar con saltos de agua medios y caudal medios (López & Ramírez, 2011, pág. 10). En la actualidad la turbina hidráulica más usada en el mundo es la turbina Francis, que al transcurrir del tiempo ha ido evolucionando, perfeccionando su geometría hasta alcanzar altos valores de eficiencia y aprovechando al máximo el caudal usado. La turbina Francis se caracteriza por ser de presión variable en las zonas del rodete ya que éste se encuentra sometido a la influencia directa del agua en toda su periferia. Tiene un buen rendimiento cuando se tiene un caudal cercano del 60 % al 110 % del caudal de diseño (Lain, García, Avellan, Quintero, & Orrego, 2011, pág. 132) y pueden ser instaladas con el eje en posición vertical siendo esta disposición la más generalizada (Zegarra, 2015, pág. 14).



**Figura 2-4:** Rodete Francis de la Central Hidroeléctrica Lumbaqui.

Fuente: Autores

### 2.2.2 Principales características de funcionamiento

Una turbina hidráulica está diseñada para que funcione un tiempo que oscila entre 15 y 30 años, existiendo turbinas cuyo tiempo de funcionamiento ha sido superior a 50 años, pero este tiempo de funcionamiento están asociadas a tres elementos: buena operatividad, buen mantenimiento y buenos procesos de mejoramiento, sin embargo, en los últimos años las necesidades del mercado de energía han venido exigiendo niveles de operatividad más amplios, que redundan en la disminución de su tiempo de funcionamiento (Lain, García, Avellan, Quintero, & Orrego, 2011, pág. 132). Las características básicas de las Turbinas instaladas en la Central Hidroeléctrica San Francisco se muestran en la Tabla 2-1.

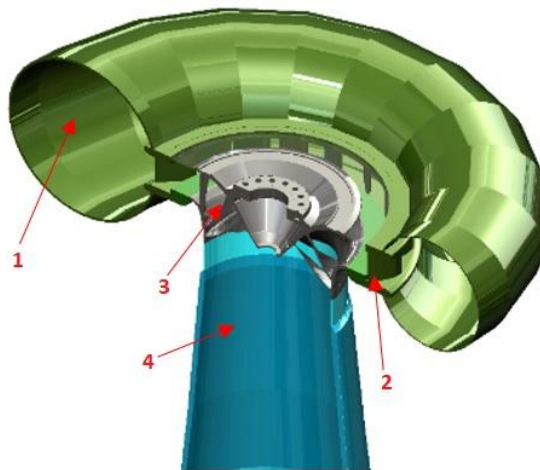
**Tabla 2-1:** Características turbinas Francis - Central Hidroeléctrica San Francisco.

Tipo de Turbina	Francis Simples
Cantidad de Turbinas	2
Diámetro del rotor de la Turbina	2450 mm
Diámetro del rodete en la salida	3030 mm
Número de Alabes del Rodete	13 álabes fijos
Número de Alabes Directrices	20 álabes directrices
Rotación de la Turbina	327,27rpm
Rotación de disparo	548rpm
Potencia nominal	115MW/unidad
Caída neta nominal	213m
Eficiencia máxima	95, %
Sentido del Giro	Horario (Visto de arriba)
Eje	Vertical
Número de cojinetes de la turbina	1
Tipo de cojinete	Cojinete guía auto lubricante tipo casquillo
Diámetro de la Válvula Mariposa	3000mm
Tipo de accionamiento	Accionamiento por los servomotores y cierre por contrapeso
Densidad del agua	0,99985g/cm <sup>3</sup>
Aceleración de la gravedad	9,777m/s <sup>2</sup>
Temperatura del agua	16°C

Realizado por: Autores

Fuente: (Ludeña, 2009, págs. 10-11)

Basándonos en la Figura 2-5, el funcionamiento de la Turbina Francis consiste en la entrada del agua a través de la tubería forzada hacia el caracol (1), la misma que convierte la energía potencial en energía cinética, para después dirigirse hacia el rodete (3), cuando el agua entra en contacto con el rodete gira gracias a las condiciones de caudal y presión del fluido, y una vez que el agua ha pasado por el rodete, sale de la turbina a través del tubo de salida o aspiración (4), cuando el rodete gira comunica su movimiento rotacional al eje de la turbina, que está conectado al generador, mientras que la regulación de la turbina, es decir la velocidad a la que gira el rodete es controlada por álabes directrices (2), los mismos que pueden girar permitiendo el ingreso de menor o mayor cantidad al rodete (López & Ramírez, 2011, pág. 22).



**Figura 2-5:** Ubicación de los principales componentes de la Turbina Francis.

*Nota:* 1. Distribuidor, 2. Álabes móviles, 3. Rodete, 4. Tubo de aspiración

**Fuente:** CIRT

### 2.3 Tipos de desgaste en los álabes

El deterioro de rodetes hidráulicos es un problema en el proceso de generación de energía eléctrica ya que causa reducciones en la eficiencia de dichos elementos, siendo uno entre muchos factores que afectan al rodete de la turbina (López & Ramírez, 2011, pág. 24). Existen algunos factores que inciden directa o indirectamente sobre la vida útil de las turbinas, los mismos que se manifiestan en un menor o mayor desgaste de las piezas (Caicedo, 2009, pág. 142), entre los cuales se puede citar los siguientes:

- Diseño y construcción.
- Instalación y Montaje.
- Condiciones de operación conforme a recomendaciones del fabricante.

- Mantenimiento bajo recomendaciones del fabricante.
- Materiales y suministros utilizados en la operación y mantenimiento.
- Calidad de agua turbinada.

De todos ellos, el que realmente está fuera de control es la calidad de agua, que depende de la cantidad de sólidos en suspensión, el tipo de sólidos, las dimensiones y forma de los sólidos; y es la causante del desgaste de los rodetes, ocasionando la pérdida de partículas metálicas de la superficie de una pieza por la acción directa o por combinación con una serie de factores (Martínez, 1989, págs. 28-29).

En las turbinas hidráulicas el desgaste es producido por partículas en el flujo de fluido, siendo dos los desgastes más comunes, erosión por partículas sólidas y erosión por cavitación (Caicedo, 2009, pág. 144), en el caso particular de la turbina Francis, se pueden definir varios modos de falla, que aparecen según las condiciones de operación de la turbina, bien en el rango óptimo de diseño, o bien en el rango no óptimo (carga parcial o condiciones *off-design*, es decir cuando la turbina funciona por debajo del 60% y por encima del 100% del caudal de diseño.), además de la operación con altas concentraciones de sólidos en suspensión.

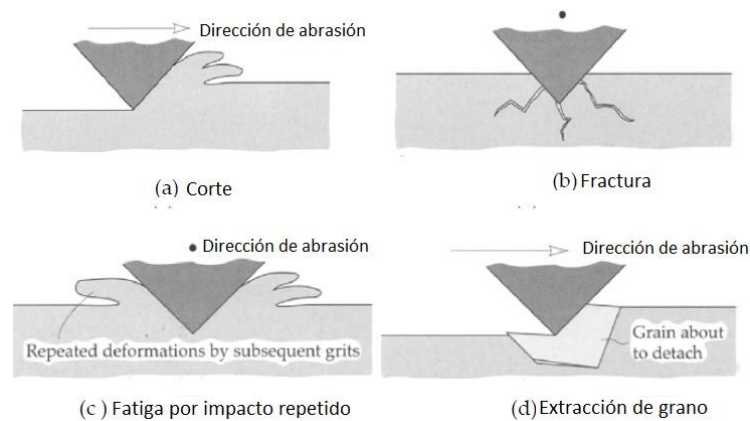
El origen de las vibraciones, la cavitación, la erosión por arena y, en general, los fenómenos que afectan la vida de la máquina se deben a las fluctuaciones de presión (que surgen al operar la máquina en carga parcial o sobrecarga), la geometría de la turbina, el medio en que se opera la máquina (presencia de arena en el agua) y la resistencia de los materiales utilizados en la turbina contribuyen a la reducción de la vida útil de la turbomáquina, de las cuales la variable más importante es la geometría del rodete, ya que está relacionada de manera directa con la aparición de vibraciones, las cuales son capaces, incluso, de destruir toda la instalación de la turbina (Lain, García, Avellan, Quintero, & Orrego, 2011, págs. 129-130).

Estas condiciones de funcionamiento generan cuatro modos de falla principales: el primero, *la abrasión*, que es causado por la interacción de partículas sólidas con las superficies generando un proceso similar al corte (desbaste); el segundo, *la erosión por arena*, que es causado por la interacción de las partículas de arena suspendida en agua con las superficies sólidas de los componentes de la turbina; el tercero, *la cavitación*, que es originada por la formación de vapor de agua y la consecuente implosión de burbujas

sobre las paredes de la turbina, especialmente sobre el rodete al operar en condiciones *off-design*; y, por último, la *fatiga* de los componentes de la turbina por la aparición de esfuerzos alternantes de gran magnitud, generados también al operar la turbina en condiciones *off-design* (Lain, García, Avellan, Quintero, & Orrego, 2011, págs. 28-29).

### 2.3.1 Abrasión

El desgaste abrasivo por partículas sólidas o asperezas duras, que se parece mucho al corte de una serie de máquinas-herramienta, sin embargo, el examen microscópico ha revelado que el proceso de corte solo se aproxima mediante la arena más aguda y muchos otros mecanismos más que están involucrados. Las partículas o granos pueden eliminar el material mediante micro corte, microfractura, extracción de granos individuales o fatiga acelerada por deformaciones repetidas, como se ilustra en la Figura 2-6 (Neopane, 2010, págs. 2-3).



**Figura 2-6:** Mecanismos de desgaste abrasivo.

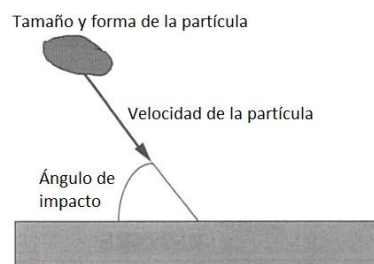
**Fuente:** (Neopane, 2010, págs. 2-3)

El primer mecanismo ilustrado en la Figura 2-6a es el corte, que representa el modelo clásico en el que un grano afilado o una aspereza dura cortan la superficie más suave, eliminando el material como residuos de desgaste. Segundo, cuando el material desgastado es frágil, se puede producir una fractura de la superficie desgastada (Figura 2-6b), en este caso, los residuos de desgaste son el resultado de la convergencia de grietas. Tercero, cuando un material dúctil es desgastado por un grano contundente, es improbable que se corte y la superficie desgastada se deforme repetidamente (Figura 2-6c), en este caso, los residuos de desgaste son el resultado de la fatiga del metal. El último mecanismo ilustrado (Figura 2-6d) representa el desprendimiento de grano o la extracción de grano, este mecanismo se aplica principalmente a la cerámica, donde el límite entre los granos es relativamente débil (Neopane, 2010, págs. 2-3).

El desgaste abrasivo tiene la virtud de ser posiblemente el mecanismo de desgaste más fácil de eliminar si se dispone de materiales adecuados, ya que solo se produce cuando la relación de dureza de las partículas a la del material es mayor a 1.2; cuando la relación entre la dureza de la partícula y la dureza del material es inferior a 1.2, el desgaste abrasivo disminuye rápidamente, pero no cesa por completo hasta que la dureza del material es mayor que la dureza de la partícula por un factor similar de 1.2. Se observa que cuando las partículas tienen la misma dureza que el material, se produce cierto rasguño y desgaste del material, aunque el daño a las partículas por aplastamiento y deformación plástica es considerable (Neopane, 2010, págs. 2-3).

### 2.3.2 Erosión

Cuando el flujo presenta concentraciones moderadas de arena, se genera un desgaste por erosión debido a los impactos de las partículas contra las superficies sólidas de los diferentes elementos de la turbina (Lain, García, Avellan, Quintero, & Orrego, 2011, págs. 129-130), es así que, el desgaste por erosión se define como el proceso de eliminación de metal provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie (López & Ramírez, 2011, pág. 26).

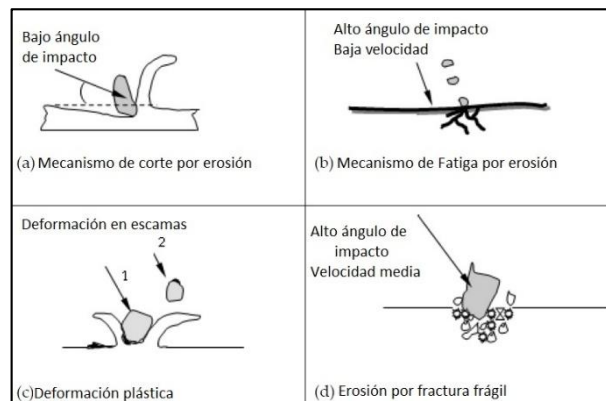


**Figura 2-7:** Parámetros del desgaste por erosión.

Fuente: (Neopane, 2010, págs. 2-6)

El desgaste erosivo implica varios mecanismos de desgaste, que están controlados en gran medida por diferentes parámetros (Figura 2-7): el material de partículas, el ángulo de impacto, la velocidad de impacto, el tamaño de las partículas (Neopane, 2010, págs. 2-4), y los patrones de flujo y turbulencia, ya que, si el flujo es turbulento, el número de colisiones contra la superficie sólida es mayor que si el flujo es laminar, y aumenta la tasa de erosión (Thapa, Sand erosion in hydraulic machinery, 2004), además, si la partícula es dura y sólida es posible que ocurra un proceso similar al desgaste abrasivo (Neopane, 2010, págs. 2-4).

Los mecanismos conocidos de desgaste erosivo se ilustran en la Figura 2-8.



**Figura 2-8:** Mecanismos de desgaste erosivo.

Fuente: (Neopane, 2010, págs. 2-4)

### 2.3.2.1 Corte por erosión

Cuando las partículas golpean la superficie con un ángulo de impacto bajo y eliminan el material mediante una acción de corte, el mecanismo de erosión se llama erosión abrasiva. Las arenas abrasivas ruedan o se deslizan cuando golpean la superficie y causan erosión por abrasión o mecanismo de corte (Figura 2-8a), eliminando el material mediante raspado o desguace por los bordes afilados de las partículas que forman cicatrices cortas de la pista (Neopane, 2010, págs. 2-4).

### 2.3.2.2 Fatiga superficial

El mecanismo de erosión por fatiga de la superficie (Figura 2-8b) ocurre cuando las partículas golpean la superficie con un gran ángulo de impacto, pero a baja velocidad, siendo similar al desgaste debido a la fatiga de la superficie en las superficies rodantes. La superficie no puede ser deformada plásticamente, pero por otro lado la superficie se debilita debido a la acción de la fatiga y las grietas se inician en la superficie después de golpear repetidamente, teniendo un desprendimiento de las partículas de la superficie después de varios golpes (Neopane, 2010, págs. 2-5).

### 2.3.2.3 Deformación plástica

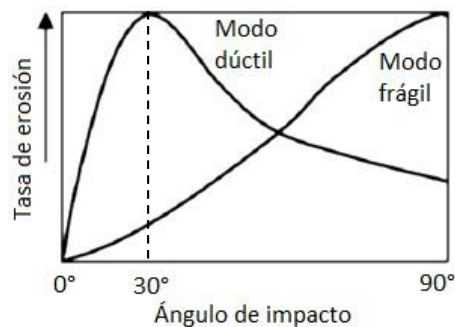
La deformación plástica de la superficie (Figura 2-8c) se produce debido a la formación de escamas alrededor del punto de golpeo cuando las partículas golpean la superficie elástica con velocidad media y gran ángulo de impacto, con dicho golpe repetido en los copos, el material se desprenderá como escombros (Neopane, 2010, págs. 2-5).



#### 2.3.2.4 Fractura por fragilidad

Cuando las partículas golpean la superficie quebradiza con un gran ángulo de impacto a velocidad media, se produce una erosión por fractura frágil (Figura 2-8d), y si las partículas son afiladas, es más probable que ocurra una fragmentación frágil y que las partículas se desprendan del material por agrietamiento debajo de la superficie (Neopane, 2010, págs. 2-5).

El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de impacto de la partícula (Figura 2-7) respecto de la superficie (López & Ramírez, 2011, pág. 26), teniendo una máxima tasa de desgaste por erosión cuando el impacto está entre  $10^\circ$  a  $30^\circ$  en los materiales dúctiles, mientras que dicha tasa de desgaste baja cuando se presenta ángulos de impacto normal; y para los materiales frágiles, la tasa de desgaste por erosión se incrementa a medida que el ángulo de impacto aumenta y es más alta para impacto normal (Baena, 2008, pág. 15). La Figura 2-9 muestra la variación de la tasa de desgaste por erosión respecto al ángulo de impacto para materiales dúctiles y frágiles.



**Figura 2-9:** Tasa de erosión como función del ángulo de impacto.

Fuente: (Thapa, Sediment in Nepalese hydropower projects; Neopane, 2010, págs. 2-7)

Los materiales dúctiles parecen deformarse y posiblemente se endurezcan cuando se les golpea en forma perpendicular, pero a un ángulo crítico de  $30^\circ$  como se muestra en la Figura 2-9, el metal se elimina por una acción de corte, y al tratarse de las turbinas, se habla de erosión por sedimentos, que es un fenómeno que afecta el rendimiento de las turbinas, debido al desgaste que provoca sobre los álabes de las mismas (López & Ramírez, 2011, pág. 26).

La erosión por sedimentos es un proceso más sencillo que el de cavitación y esencialmente se produce por el impacto de partículas que es efecto del caudal sólido que arrastran las aguas, especialmente cuando éstas van a gran velocidad, como sucede en

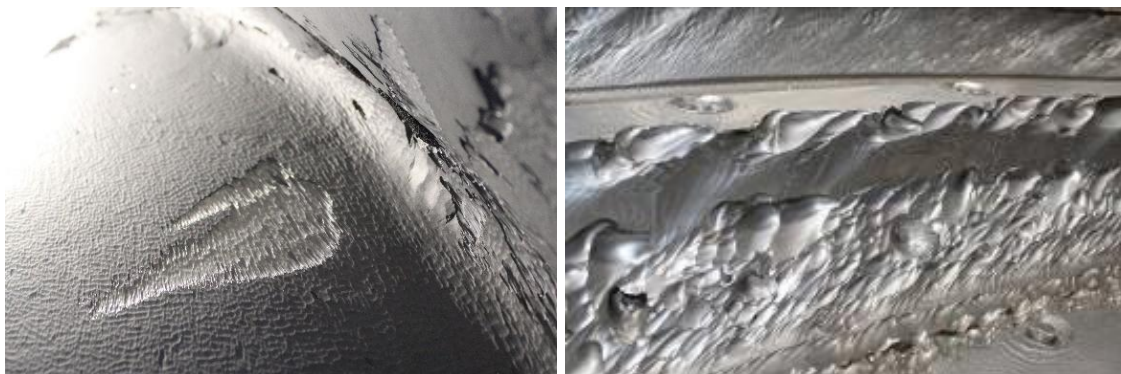
saltos de gran altura, los granos de arena en suspensión hacen el efecto de esmeril, desgastando el metal sobre el que roza el agua y produciendo en él surcos con superficies lisas de forma irregular y angulosa (filosa al tacto) (López & Ramírez, 2011, pág. 27), como se puede observar en la Figura 2-10.



**Figura 2-10:** Superficie erosionada del Rodete Francis de la U1 de la CHSF.

Fuente: Autores

La erosión por partículas sólidas depende de la calidad de agua y de la resistencia del material de las piezas en contacto con el fluido y la erosión por cavitación depende en sí, del diseño y condiciones operativas. En el acero inoxidable, la apariencia de una superficie afectada por erosión se muestra en la Figura 2-11(izq) como una superficie brillante con desprendimiento de material en forma de escamas de pescado y en la dirección del flujo de agua, en cambio una superficie afectada por cavitación tiene una apariencia opaca con desprendimiento de material perpendicular a su superficie y con muchas aristas diminutas como se muestra en la Figura 2-11(der) (Caicedo, 2009, pág. 144).

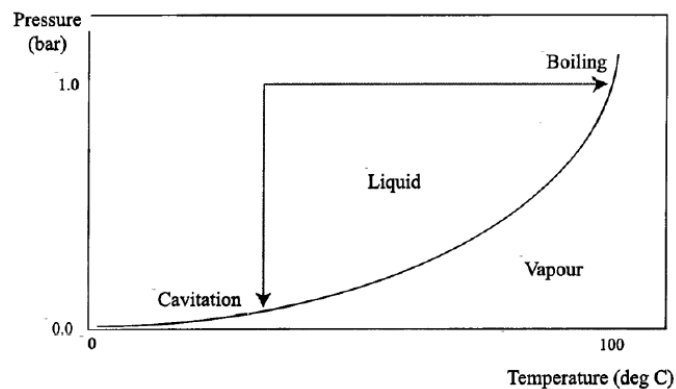


**Figura 2-11:** a) superficie erosionada (izq), b) superficie cavitada (der).

Fuente: Autores

### 2.3.3 Cavitación

La cavitación es la formación y actividad de burbujas (cavidades) en líquidos, la formación, precisamente de estas cavidades tiene lugar cuando la presión de un líquido está por debajo de la presión de vapor ( $P_v$ ) (López & Ramírez, 2011, pág. 24), dicho cambio de presión crea un vacío el cual da paso a la formación de burbujas (Zegarra, 2015, pág. 22), estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, lo que provoca que las burbujas implosionen bruscamente generando sobre las paredes sólidas tensiones elevadas (López & Ramírez, 2011, pág. 24) y si ocurre de forma consecutiva, el choque de presión (implosión) erosionará finalmente el material de la superficie (Sinclair & Rodrigue; Zegarra, 2015, pág. 22).



**Figura 2-12:** Diagrama presión-temperatura.

Fuente: (López & Ramírez, 2011, pág. 25)

El fenómeno de desgaste por cavitación es imperceptible ya que se da en el interior de la turbina, sin embargo habiendo distintos métodos de contrarrestar e identificar este fenómeno, físicamente era muy complicado verificar la zona exacta de influencia del mismo y la única forma que existía de verificarlo era durante la etapa de mantenimiento, pero con los métodos de simulación y usando el CFD esto ha cambiado, ya que no solo podemos identificar la zona de influencia sino que también podemos cuantificarla incluso antes de la puesta en marcha, generando menores costos de mantenimiento (Zegarra, 2015, pág. 33).

La cavitación, se puede clasificar como el segundo parámetro más importante, para evaluar el nivel de riesgo asociado al aumento del rango de operación de la turbina, después del riesgo de daño por resonancias sobre la estructura inducidas por el ruido

(Nicolet, Arpe, & Francois, 2004), por lo que se ha determinado que la formación de cavitación y sus consecuencias son función de muchos factores, tales como el diseño y tamaño de la máquina, la velocidad específica o el punto de funcionamiento, entre otros (López & Ramírez, 2011, pág. 24).

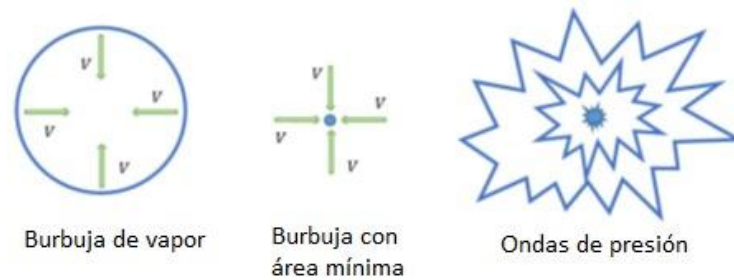
El rápido colapso de burbujas produce ondas de choque con frecuencias muy altas y presiones de hasta 410 MPa, produciendo fuerzas que son capaces de deformar varios metales hasta la zona plástica, teniendo consecuencias muy dañinas (Ayuso, 2004):

- La formación de inestabilidades de carga parcial, consecuencia de trabajar con caudales inferiores al de diseño (antorcha).
- Aparición de ruido y vibraciones.
- Disminución de prestaciones de la máquina hidráulica (caída del rendimiento), reduciendo la fiabilidad.
- Desarrollo de procesos erosivos.
- Incremento en los gastos de mantenimiento, que implica el costo por reparación y la paralización de la producción.

Entre las características más representativas del fenómeno de cavitación se encuentra la dimensión de las burbujas que es de aproximadamente 6.35mm (0.25in) como máximo de diámetro, con una duración de 3 milisegundos y una velocidad de colapso de 233m/s (765 ft/s), presentando presiones de hasta 345MPa (50ksi) (Sinclair & Rodrigue; Zegarra, 2015, pág. 22), dicho fenómeno ocurre típicamente en las bombas centrífugas dañando los álabes del impulsor y en las turbinas Francis dañando principalmente el rodete, las marcas de desgaste producidas por la cavitación aparecen imperceptiblemente hasta que los daños son mayores y tienen forma de picaduras ocasionadas por golpes de objetos punzocortantes (Zegarra, 2015, pág. 23).

Las profundidades de las erosiones varían en dimensión, dependiendo del tiempo de exposición a este fenómeno y las turbinas más propensas a estas erosiones son las turbinas Kaplan, seguidas de las Francis. Durante la fase de formación cavitación (cavitación incipiente), mientras que el fluido se encuentra en zonas de baja presión se crean en el seno del líquido una infinidad de burbujas de vapor (cavidades gaseosas) que se agrandan mientras dura esta etapa. Esta formación de burbujas microscópicas de vapor es el inicio de la cavitación, y en zonas donde la presión es mayor las burbujas recién expandidas son

comprimidas, aumentando enormemente la temperatura del gas que estas contienen, hasta que las burbujas colapsan en sí mismas implosionando (Figura 2-13), como consecuencia se obtiene la liberación de una enorme cantidad de energía (Zegarra, 2015, pág. 23).



**Figura 2-13:** Reducción de área de la burbuja de vapor.

Fuente: (Zegarra, 2015, pág. 23)

Los altos contenidos de gas parecen favorecer el comienzo de la cavitación, debido a que originan una mayor cantidad de burbujas, pero por otra parte, un contenido elevado de aire disminuye la velocidad de implosión (Marchegiani, 2006, pág. 7), y si nos centramos en la Figura 2-13 podemos deducir que al desaparecer la energía cinética se transforma en energía de presión, es decir aparece un golpe de ariete puntual (Zegarra, 2015, pág. 24) después que la bolsa ya aumentada de tamaño es arrastrada a una región de mayor presión y finalmente estalla (Marchegiani, 2006, pág. 7).

#### 2.3.3.1 Efectos de la cavitación

Podemos clasificar los efectos de la cavitación como: mecánicos, químicos e hidráulicos.

*Efecto mecánico.*- Consiste en el desprendimiento del metal ocasionando con esto un desgaste que acorta la vida de la turbina, esto ocurre debido a las grandes presiones locales originadas en el punto de desaparición de la burbuja (fenómeno denominado implosión) (Zegarra, 2015, pág. 25).

*Efecto químico.*- Las altísimas presiones originadas con la implosión de las burbujas originan localmente la liberación de iones de oxígeno, lo mismos que atacan a las superficies metálicas expuestas como resultado del efecto mecánico, ocasionando un deterioro aún más rápido (Zegarra, 2015, pág. 25).

*Efecto hidráulico.*- La presencia de las burbujas son arrastradas hasta los álabes y por lo general se ubican sobre o en parte de él, dependiendo del tipo de cavitación que se tenga, estas burbujas al permanecer adheridas a su superficie impide que el agua moje esta zona

y en consecuencia la energía no se transfiere, generando esto una baja en el rendimiento de la turbina (Zegarra, 2015, pág. 25).

### 2.3.3.2 *Formas en que se presenta la cavitación*

La cavitación se puede presentar de dos formas, como incipiente o constante.

*Cavitación incipiente.*- Se define como la condición del flujo en el cual la cavitación comienza a ser detectable, comúnmente se identifica con sonidos suaves e intermitentes que pueden ser detectados por el oído humano o mediante la asistencia de hidrófonos o acelerómetros (Zegarra, 2015, pág. 28).

*Cavitación constante o crítica.*- Se define como la situación del flujo en la que aparece cavitación continua en un grado moderado, pudiendo identificarse por medios de detección sonora (se caracteriza por ruidos de intensidad inferior a 80 dB) (Zegarra, 2015, pág. 28).

### 2.3.3.3 *Clasificación de la cavitación*

Existen tres maneras de clasificar el régimen de cavitación: cavitación fija, cavitación conducida (travelling) y cavitación por vórtices (vortex cavitation), en cada uno de estos tipos la cavitación ocurre por la aceleración del flujo, acompañado de una caída de presión que alcanza valores por debajo de la presión de vapor, comenzando así el proceso de formación de burbujas, las cuales, al viajar aguas abajo, encuentran zonas de alta presión (presiones por encima de la presión de vapor) que generan implosiones sobre las superficies sólidas o paredes que se encuentran en el fluido. Este proceso corresponde a un fenómeno multifásico (presencia de dos fases en un mismo dominio de análisis) y aparece en condiciones de operación de carga parcial y sobrecarga (Avellan, 2004).

#### **1) Cavitación fija**

Aparece en gran porcentaje del lado de succión de los álabes, en la zona de salida del rodete como se muestra en la Figura 2-14 y se ve influenciado por el punto de funcionamiento de la turbina, pudiendo producir erosiones profundas en el lado de succión por un corto período de exposición, siendo así, la forma más dañina de cavitación en máquinas hidráulicas, que acostumbra a producirse cuando la turbina trabaja con saltos mayores que los de diseño. Existen casos en que las burbujas de vapor que se presentan en el lado de presión son despreciables ya que se encuentran en menor medida en

comparación con el lado de succión, estas burbujas se presentan cuando el ángulo de ingreso del fluido no es el óptimo (Zegarra, 2015, pág. 28).

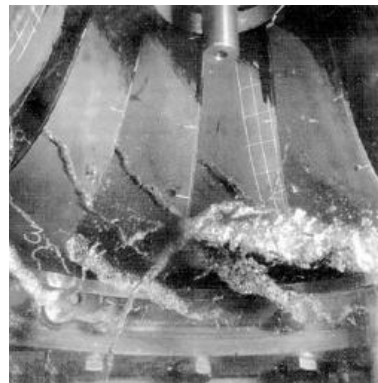


**Figura 2-14:** Cavitación fija (movimiento de burbujas en un rodete Francis).

Fuente: (Avellan, 2004)

## 2) Cavitación conducida (Travelling)

Luego de iniciada la cavitación, las burbujas de vapor viajan a lo largo de la superficie de los álabes cubriendo gran parte de ellos como se muestra en la Figura 2-15, esto normalmente sucede cuando la cavitación está en su forma constante o crítica. Este alojamiento de burbujas impide que se realice de forma normal la transferencia de energía entre el fluido y el rodete (Zegarra, 2015, pág. 29).



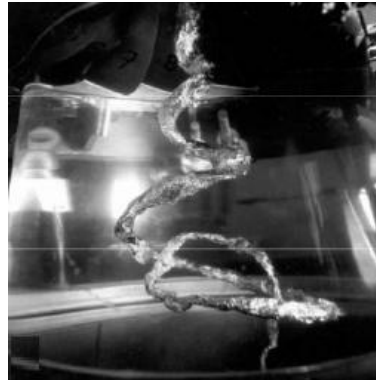
**Figura 2-15:** Cavitación entre álabes.

Fuente: (Avellan, 2004)

## 3) Cavitación por vórtices (Vortex Cavitation)

A la salida del rodete aparece un vórtice cavitante en el tubo de aspiración cuando se trabaja a cargas parciales o con sobrecargas, generando una antorcha, que provoca oscilaciones de presión que pueden traducirse en fluctuaciones no deseadas de par en el

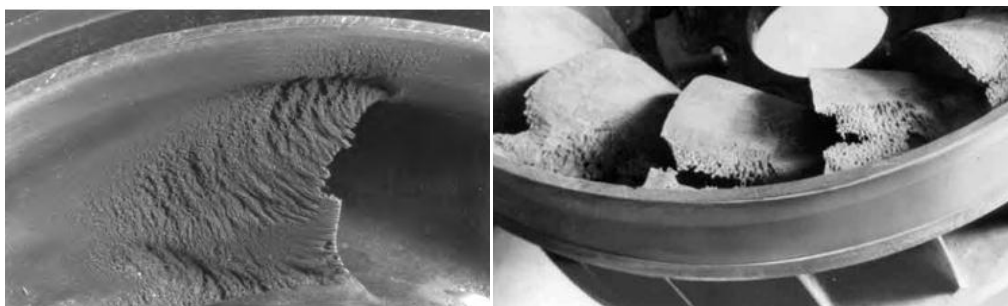
eje de la turbina, acompañado de un notable nivel de vibraciones (Zegarra, 2015, pág. 29).



**Figura 2-16:** Cavitación por vórtices (Cavitación whirl con baja carga).

**Fuente:** (Lain, García, Avellan, Quintero, & Orrego, 2011, pág. 130)

El daño que las burbujas de cavitación pueden causar en un material cuando se colapsan en las proximidades de la superficie, ha sido intensamente estudiado por muchos años por científicos e ingenieros. Cuando este colapso se produce cerca de una superficie sólida, la reproducción de colapsos de millones de burbujas puede provocar falla por fatiga superficial, y como consecuencia el desprendimiento de fragmentos de material dando origen a la erosión por cavitación. La Figura 2-17 (izq), muestra los daños por cavitación en una hélice de bomba de flujo mixto, fabricado de una aleación basada en aluminio, mientras que en la Figura 2-17 (der), se muestran daños más severos en las alabes de una turbina Francis, la cavitación se ha generado en las cuchillas (Tovar, 2012, pág. 39).



**Figura 2-17:** Daños por cavitación en los álabes de una Turbina Francis.

**Fuente:** (Brennen, 1994; Gulich & Rosch, 1988)

#### 2.3.3.4 *Influencia en Turbinas Francis*

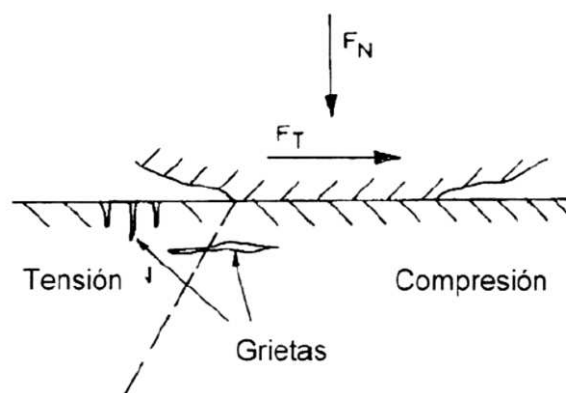
Las consecuencias que convierten en dañina la presencia de la cavitación son:



- La formación de inestabilidades de carga parcial, consecuencia de trabajar con caudales inferiores al de diseño.
- La formación de antorchas por sobrecarga (caudales de funcionamiento superiores al de diseño).
- Aparición de ruido y vibraciones.
- Disminución de prestaciones de las turbinas Francis (caída del rendimiento), reduciendo la fiabilidad de nuestras instalaciones.
- Desarrollo de procesos erosivos.
- Incremento en los gastos de mantenimiento (no solo el costo asociado a la sustitución de las piezas afectadas, sino al costo del número de horas sin producción) (Zegarra, 2015).

#### 2.3.4 *Fatiga*

El desgaste por fatiga es el resultado de esfuerzos cíclicos entre las asperezas de dos superficies en contacto, que aparentemente, por principio no se notan daños significativos, pero en realidad la resistencia del material cede por los repetidos ciclos de carga y descarga pueden inducir la formación de grietas superficiales y subsuperficiales que eventualmente después de un número crítico de ciclos se crean grietas superficiales y subsuperficiales, las cuales pueden crear un daño irreversible en el material. En la Figura 2-18 se muestra el proceso de formación de grietas superficiales o subsuperficiales y la propagación de la grieta por fatiga (Tovar, 2012, pág. 24).



**Figura 2-18:** Formación de grietas.

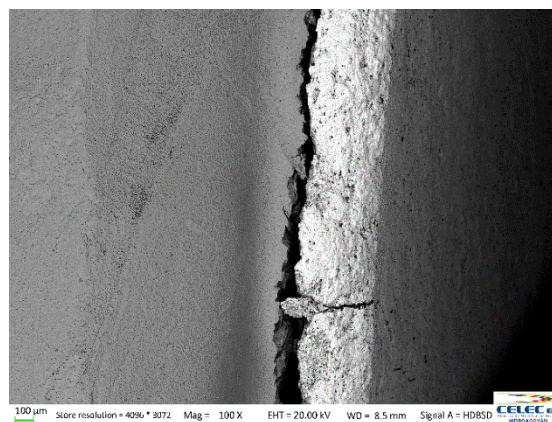
Fuente: (Bhushan & Gupta, 2007)

Una falla por fatiga podrá estar asociada a un límite hidráulico, como es el de operar la turbina en regímenes por fuera de su punto óptimo de funcionamiento (Lain, García,

Avellan, Quintero, & Orrego, 2011, pág. 136), por lo que, ampliar el rango de operación por debajo del 60% del caudal nominal de generación implica la aparición de problemas y fenómenos no deseados como la torcha, la cavitación y las vibraciones severas, que atentan contra la integridad estructural de la turbina. En dichas condiciones, se inducen daños sobre los diferentes componentes de la máquina, asociados a problemas de fatiga, con su respectivo proceso de generación de grietas, resonancias y erosión por cavitación (Lain, García, Avellan, Quintero, & Orrego, 2011, pág. 129).

### 2.3.5 Microscopia electrónica de barrido - Análisis mecanismos falla y desgaste

La microscopia electrónica de barrido es ampliamente utilizada para el análisis de mecanismos de falla y de desgaste ya que su resolución permite obtener imágenes a nivel nanométrico. La característica fundamental de este microscopio es el tipo de imágenes que ofrece en función del detector que se utilice, existen dos tipos de detectores. El detector de electrones retro dispersados permite obtener imágenes de carácter composicional, estos electrones captan y presentan a los elementos más livianos de colores oscuros y a los elementos pesados de color claro, lo cual permite determinar diferencias en cuanto a la composición química de un área de análisis. La Figura 2-19, muestra la zona de un cangilón de rodete Francis falló durante su funcionamiento, la imagen fue obtenida con el detector de electrones retro dispersados por lo cual se observa una diferencia entre tonalidades del acero (oscuro) y recubrimiento de carburo de tungsteno (claro).

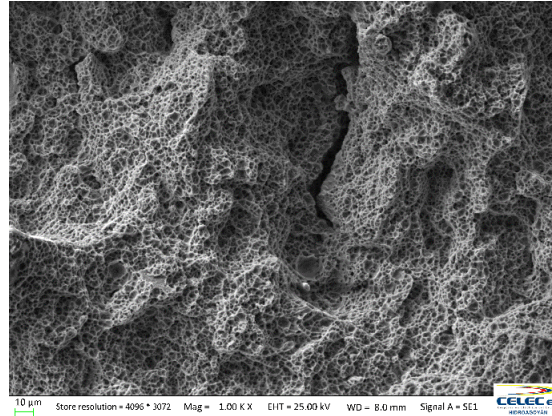


**Figura 2-19:** Imágenes obtenida con detector de electrones retro dispersados.

**Fuente:** Autores

El detector de electrones secundarios muestra la topografía de la superficie lo cual es clave en el análisis ya que permite observar la forma de la superficie después de haber

estado sometida a un determinado esfuerzo y permite recabar los indicios del mecanismo. En la Figura 2-20, se observa una imagen obtenida con este detector en la superficie de una muestra sometida a un ensayo de impacto, el mecanismo de falla que se presenta en este tipo de rotura son los micro hoyuelos que se extienden a lo largo de toda la superficie, acompañados de múltiples micro fisuras.

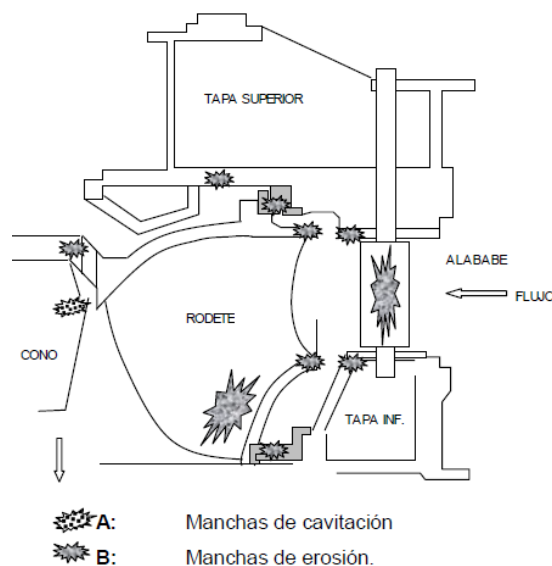


**Figura 2-20:** Imágenes obtenida con detector de electrones secundarios.

Fuente: Autores

#### 2.4 Zonas críticas de un rodete Francis

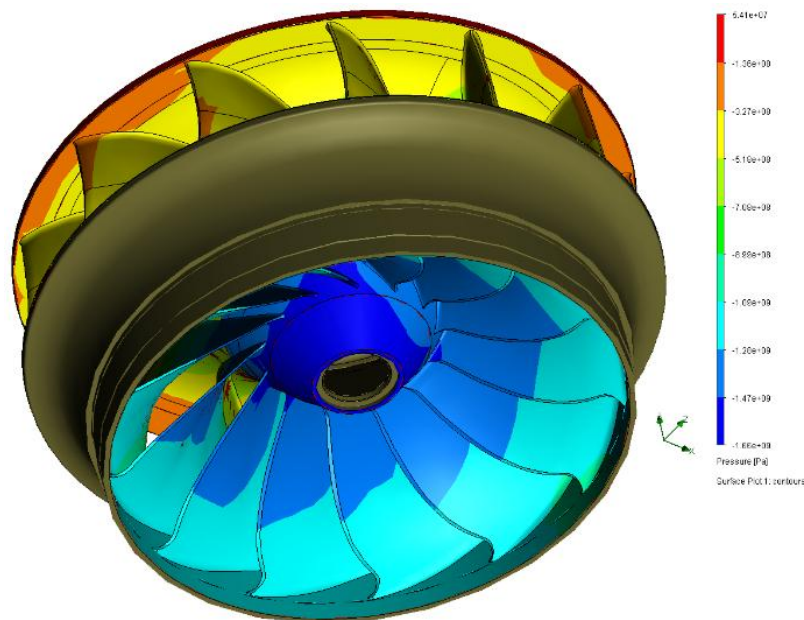
Las zonas que se encuentran sujetas a mayor desgaste erosivo son aquellas en las que su paso del agua es más restringido y por ende su velocidad es más alta. En la Figura 2-21 se identifica estas zonas, diferenciándolas si es erosión o cavitación (Caicedo, 2009, pág. 145).



**Figura 2-21:** Identificación y diferenciación de las zonas críticas de desgaste.

Fuente: (Caicedo, 2009, pág. 145)

En las partes donde la presión es más alta, es donde el rodete va a tener mayores esfuerzos, y comparando con un rodete en físico que está desgastado, se ve claramente que los daños se dan en la parte por donde ingresa el fluido (Mora, 2018, pág. 50), dichas zonas son propensas a ser dañadas por erosión, ya que es donde tenemos las presiones más altas tal como se muestra en la Figura 2-22, sin embargo luego que el fluido viaja aguas abajo la presión cae repentinamente, produciéndose el fenómeno de cavitación, siendo la zona de mayor caída de presión el lado de succión de los álabes incluyendo toda la salida del rodete (Zegarra, 2015, pág. 77).



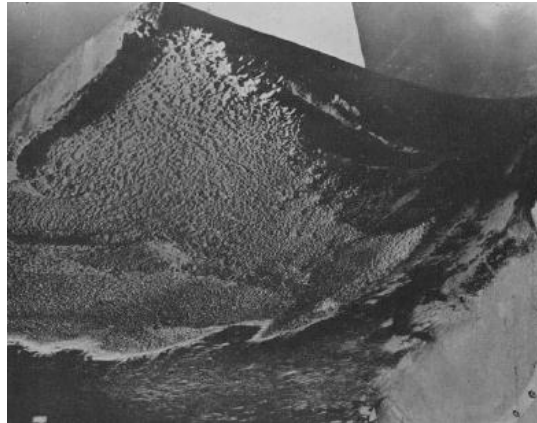
**Figura 2-22:** Caída de presión del Rodete Francis.

Fuente: (Toapanta, 2019, pág. 185)

Las grandes caídas de presión y las vorticidades que hay debido a la geometría del rodete vienen acompañadas de un fenómeno conocido en mecánica de fluidos como la torcha ( Figura 2-16), generado por las vorticidades en el paso del fluido, este fenómeno ayuda a que se mantenga la baja presión en la salida del rodete (Zegarra, 2015, pág. 79).

El problema de mantenimiento continuo en las turbinas hidráulicas es por lo general ocasionado por la erosión, la corrosión y la cavitación de componentes que se encuentran en contacto con el agua, además de las picaduras o cavidades observadas que son producto de una acción erosiva producida por la cavitación y se produce en áreas de baja presión y altas velocidades de agua (Rheingans, 1962). La Figura 2-23, exhibe el daño de la erosión

por cavitación de un álabe de turbina hidráulica después de aproximadamente cuatro años de funcionamiento.



**Figura 2-23:** Picaduras en álabe de turbina hidráulica debido a erosión por cavitación.

Fuente: (Tovar, 2012, pág. 41)

## 2.5 Materiales utilizados en la fabricación de rodetes

Las turbinas hidráulicas generalmente se fabrican de acero inoxidable ya que gracias a su composición (aleación a base de hierro, carbono, cromo, níquel y molibdeno) poseen una buena resistencia a la corrosión. Existe una variedad de aceros inoxidables utilizados, teniendo así en la Tabla 2-2 los materiales de rodetes que han sido recuperados en el CIRT en los últimos años.

**Tabla 2-2 :** Materiales de rodetes recuperados en el CIRT.

<i>Central Hidroeléctrica</i>	<i>Tipo de Rodete</i>	<i>Material</i>
Alao	Pelton	AISI 414
San Francisco	Francis	ASTM A743 CA6NM
Molino	Pelton	AISI 422
Lumbaqui	Francis	ASTM A743 CF20
Agoyán	Francis	ASTM A743 CA6NM
Pucará	Pelton	AISI 410

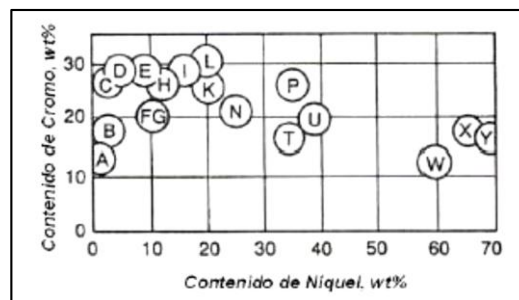
Realizado por: Autores

Fuente: CIRT

### 2.5.1 *Propiedades del acero ASTM A743 CA6NM*

La aleación CA6NM fue desarrollada a principio de los años 60 en Suiza e introducida en Estados Unidos durante los años 70 (Crawford, 1974), se emplea en aplicaciones como fabricación de componentes de bombas, turbinas hidráulicas, propulsores, entre otros, por su excelente combinación de resistencia, soldabilidad y tenacidad, lo cual ha permitido su uso en estas aplicaciones.

La norma ASTM A743 designa este material como el grado CA6NM, brindando una idea inicial sobre su composición química, es así que la letra C indica que es una aleación resistente a ataques corrosivos a temperaturas inferiores a 650°C; la segunda letra de la nomenclatura: A, indica la relación entre los contenidos de Cromo y Níquel, como se aprecia en la Figura 2-24, donde la cantidad de ambos aumenta alfabéticamente, el porcentaje máximo de carbono está representado por el número 6, multiplicado por 100, y las últimas letras indican la presencia de elementos de aleación adicionales en el acero: Níquel y Molibdeno (Hoyos, 2009, pág. 2).



**Figura 2-24:** Rango de contenido de Cr y Ni en aceros inoxidable.

Fuente: (Hoyos, 2009, pág. 2)

La composición del Acero ASTM A743 Grado CA6NM se muestra en la Tabla 2-3, dicha composición tiene gran influencia en la microestructura, y al tener tales porcentajes de Cr, Ni y C se da paso a la formación de una matriz martensítica a temperatura ambiente (Rojas, 2009).

**Tabla 2-3:** Composición química ASTM A743 Gr. CA6NM.

Grado (UNS)	Composición (%)							
	C <sub>máx</sub>	Mn <sub>máx</sub>	Si <sub>máx</sub>	P <sub>máx</sub>	S <sub>máx</sub>	Cr	Ni	Mo
CA6NM (J91540)	0.06	1.00	1.00	0.04	0.03	11.5-14	3.5-4.5	0.40-1.0

Realizado por: Autores

Fuente: (ASTM A743, pág. 3)

La dureza máxima de este acero corresponde a 285HB (ASTM A743, pág. 5), y las propiedades mecánicas se indican en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4:** Propiedades mecánicas ASTM A743 Gr. CA6NM.

Grado	Esfuerzo de tensión, min		Esfuerzo último, min		Elongación en 2 in (50mm), min, %	Reducción de área min, %
	ksi	MPa	ksi	MPa		
CA6NM	110	755	80	550	15	35

Realizado por: Autores

Fuente: (ASTM A743, pág. 6)

Cuando se realiza reparación por soldadura se deben tener en cuenta que al utilizar altas temperaturas en la remoción de discontinuidades los aceros deben ser precalentados a una temperatura mínima de 10°C. Este acero debe recibir tratamiento térmico luego de una reparación por soldadura (ASTM A743, pág. 4).

### 2.5.2 Propiedades del acero ASTM A182 F6NM

El acero ASTM A182 F6NM es un acero inoxidable martensítico comúnmente utilizado en cuerpos de válvulas, bridas, asientos de válvulas, equipos para yacimientos petrolíferos, sistemas de turbinas hidroeléctricas, bombas, planta de procesos químicos, fundición a presión (BSSA, s.f.), posee una dureza máxima de 295HB (ASTM A182, 1998, pág. 7), con una composición química que se muestra en la Tabla 2-5.

**Tabla 2-5:** Composición química ASTM A182 Gr. F6NM.

Grado (UNS)	Composición (%)							
	C <sub>máx</sub>	Mn <sub>máx</sub>	Si <sub>máx</sub>	P <sub>máx</sub>	S <sub>máx</sub>	Cr	Ni	Mo
F6NM (S41500)	0.05	0.50-1.00	0.60	0.030	0.030	11.5-14.0	3.5-5.5	0.5-1.0

Realizado por: Autores

Fuente: (ASTM A182, 1998, pág. 7)

La adición de molibdeno da una mejor resistencia a la corrosión. El bajo contenido de carbono proporciona una capacidad de soldadura mucho mayor y, junto con el níquel, produce una excelente tenacidad, por lo que el uso dominante de este grado es en la industria del petróleo y el gas (BSSA, s.f.). Las propiedades mecánicas se indican en la Tabla 2-6.

**Tabla 2-6** Propiedades mecánicas ASTM A182 Gr. F6NM.

Grado	Esfuerzo de tensión,		Esfuerzo último, min		Elongación en 2 in (50mm), min, %	Reducción de área min, %
	ksi	MPa	ksi	MPa		
F6NM	115	790	90	620	15	45

Realizado por: Autores

Fuente: (ASTM A182, 1998, pág. 9)

Este acero se caracteriza por su resistencia a la corrosión por picaduras y fisuras básicas, resistencia al agrietamiento por estrés de sulfuro moderado, buena resistencia de rendimiento, mejor tenacidad que la mayoría de los grados martensíticos y buena soldabilidad en comparación con otros grados martensíticos. Todavía requiere tratamiento térmico antes y después de la soldadura (BSSA, s.f.).

### 2.5.3 Propiedades microestructurales de los aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos son esencialmente aleaciones Fe-Cr que contienen entre 12 y 17 por ciento de Cr y tienen suficiente carbono (0.15 a 1.0%C) para que se pueda producir mediante el templado una estructura martensítica a partir de la región de la fase austenítica y en consecuencia, se podrán alcanzar valores de dureza y resistencia muy elevados (Smith & Hashemi, 2006, pág. 425), el porcentaje de cromo en conjunto con el porcentaje de níquel (Figura 2-25) determinan la naturaleza y la proporción de las fases presentes y en consecuencia define el tipo del acero inoxidable (Mohamed, 2002), a continuación en la Tabla 2-7 se enlista algunas propiedades que los elementos aleantes proveen al acero inoxidable.

**Tabla 2-7:** Influencia de los principales elementos aleantes en el acero inoxidable.

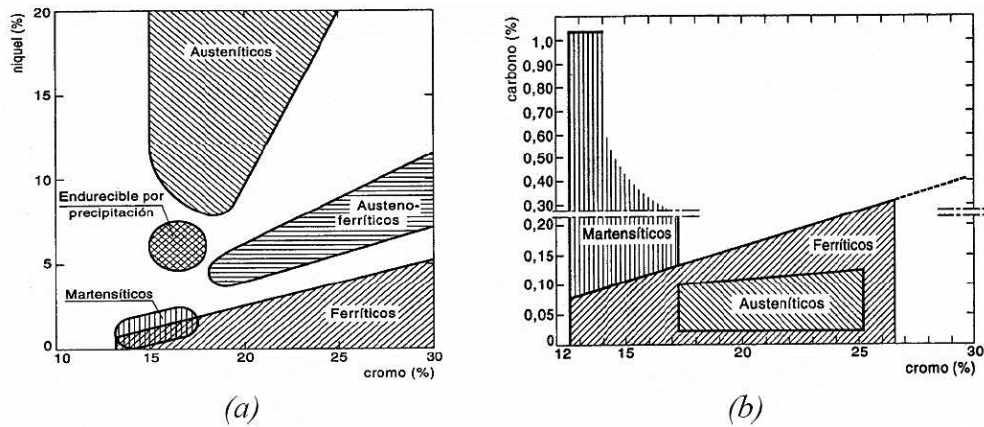
Elemento	Propiedades
<i>Cromo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Provee la resistencia a la corrosión cuando se encuentra por encima de 10,5wt% y forma la capa de óxido mediante la pasivación.</li> <li>- Es soluble en el Fe, pero forma carburos con el C como el <math>M_{23}C_6</math>.</li> <li>- Mejora la tenacidad, templabilidad y resistencia al desgaste.</li> <li>- Incrementa la profundidad de penetración de dureza resultante del tratamiento térmico, al promover la carburación.</li> </ul>
<i>Níquel</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Su principal función es promover la fase austenítica.</li> <li>- Mejora la resistencia mecánica y a la corrosión; la templabilidad y tenacidad al impacto.</li> <li>- Mejora la resistencia a la cavitación, erosión por partículas</li> </ul>
<i>Molibdeno</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejora la templabilidad, resistencia al desgaste, tenacidad, resistencia a la temperatura elevada, resistencia a la termofluencia y dureza.</li> <li>- Generación de procesos de endurecimiento secundario.</li> <li>- Promueve la formación y retención de la ferrita en la microestructura</li> </ul>
<i>Carbono</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es un gran estabilizador de austenita y formador de carburos.</li> <li>- Mejora la templabilidad, resistencia, dureza y resistencia al desgaste.</li> <li>- Reduce la ductilidad, la soldabilidad y la tenacidad.</li> </ul>

Realizado por: Autores

Fuente: (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 15)

Los aceros inoxidables martensíticos son magnéticos, pueden trabajarse en frío sin dificultad, especialmente con bajo contenido de carbono, pueden maquinarse satisfactoriamente, tienen buena tenacidad, gran resistencia a la corrosión atmosférica y a algunos agentes químicos, y se trabajan fácilmente en caliente (Avner S. , 1988, págs. 364-366).



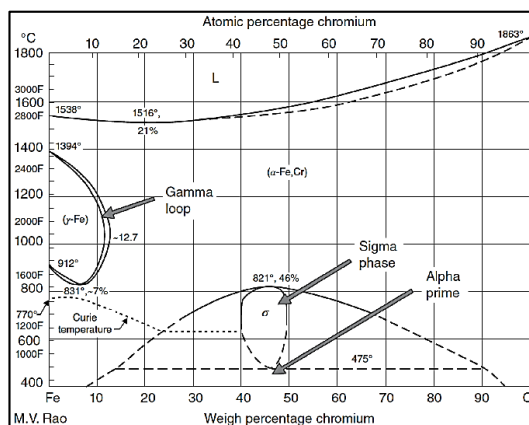


**Figura 2-25:** Tipos aceros inoxidable en función de % de: a) Cr y Ni, b) Cr y C.

Fuente: (Mohamed, 2002)

Estos aceros son básicamente aleaciones Fe-Cr con una cierta cantidad de carbono, donde la proporción de Cr y C consigue que el acero se sitúe en una zona que caiga bajo el bucle  $\gamma$  en el diagrama Fe-Cr (Figura 2-26), por tanto, si la aleación se calienta hasta una temperatura dentro de ese bucle, toda la ferrita se transformará en austenita, y posterior, un enfriamiento suficientemente rápido transformará dicha austenita en martensita (Gordo & Piris, 2012, págs. 320-321).

Dado que el cromo mejora mucho la templabilidad del acero, el elevado porcentaje presente en esta familia hace que la velocidad crítica de enfriamiento para templar completamente sea pequeña, evitando que se desarrollen peligrosas tensiones durante el temple y, en consecuencia, la forma más habitual de enfriamiento para el temple de un acero martensítico es en aire, aunque si la pieza es muy gruesa podría requerirse el hacerlo en aceite (Gordo & Piris, 2012, págs. 320-321).



**Figura 2-26:** Diagrama de equilibrio Fe-Cr.

Fuente: (Phillips, 2016)

El proceso de tratamiento térmico para los aceros martensíticos es esencialmente el mismo que para los aceros simples al carbono (Avner S. , 1988, págs. 364-366), por lo que tras el temple, el acero estará muy duro, pero presentará una baja plasticidad y tenacidad, por lo que para mejorar estas propiedades, se procederá a aplicar a continuación un revenido a las temperaturas apropiadas (Gordo & Piris, 2012, págs. 320-321), donde todo esto implica que, la aleación sea austenitizada, enfriada con suficiente rapidez para producir una estructura martensítica y luego se reviene para eliminar en su mayoría las tensiones residuales (Smith & Hashemi, 2006, pág. 425), lo que significa que, una mayor temperatura de revenido producirá una mayor disminución de dureza y resistencia, pero una mejor recuperación de la plasticidad y tenacidad (Gordo & Piris, 2012, págs. 320-321).

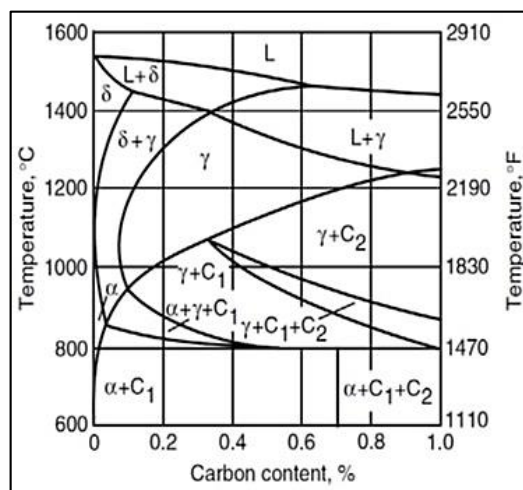
En los aceros martensíticos suele aparecer, durante el revenido, el problema de la fragilidad de revenido, que abarca tratamientos entre 420 y 540 °C generando una disminución de la tenacidad, sobre todo a impacto, de manera que los revenidos deben darse por debajo o por encima de ese margen elevado, además, estos aceros presentan el problema de la temperatura de transición dúctil-frágil que en ocasiones es del orden de la temperatura ambiente (Gordo & Piris, 2012, págs. 320-321), además, es importante que el tiempo de revenido sea el mínimo posible para prevenir la descarburización o el excesivo crecimiento de grano (Avner S. , 1988, págs. 364-366)

La presencia de una cantidad importante de Cr hace que durante el revenido aparezca el fenómeno de dureza secundaria por la precipitación de carburos de cromo, de manera que la dureza y resistencia no disminuyen de forma importante hasta temperaturas de revenido altas. La estabilidad que proporciona la precipitación de carburos permite a estos aceros trabajar en servicio a temperatura elevada, aunque siempre inferior en al menos 150° a la de revenido, para evitar una pérdida significativa de propiedades durante su utilización en servicio (Gordo & Piris, 2012, págs. 320-321).

Algunos ejemplos de este grupo son los tipos 403, 410, 416, 420, 501 y 502. Los tipos 410 y 416 son las aleaciones más conocidas en este grupo y se utilizan en aletas para turbina y piezas de fundición resistentes a la corrosión (Avner S. , 1988, págs. 364-366).

### 2.5.3.1 Fases presentes dentro de los aceros inoxidables

Los MSS (aceros inoxidables martensíticos) 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 (Figura 2-27): fase líquida o líquidus (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 (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 19).



**Figura 2-27:** Diagrama pseudobinario Fe-Cr-C con 13%Cr.

**Nota:** 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>

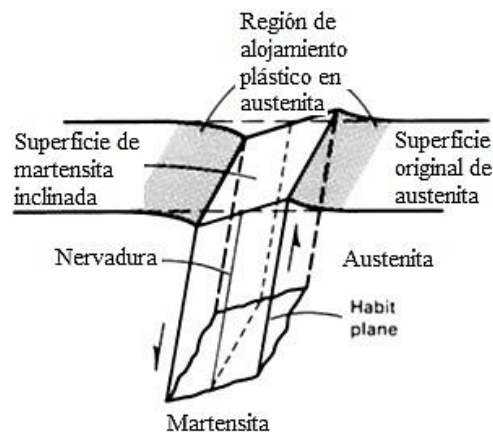
**Fuente:** (Kuo, 2003)

### Ferrita o hierro delta ( $\delta$ )

Es una de las formas alotrópicas del hierro la cual a temperaturas inferiores cercanas a los 700°C tiene su denominación  $\alpha$  y por encima de los 1300°C tiene su forma  $\delta$ , las cuales poseen una estructura cristalina BCC (Cúbica centrada en el cuerpo), siendo sus 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 (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 18).

## 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  $M_s$  (temperatura a la que la fase gamma empieza a transformarse en martensita), 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 2-28 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 (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 16).

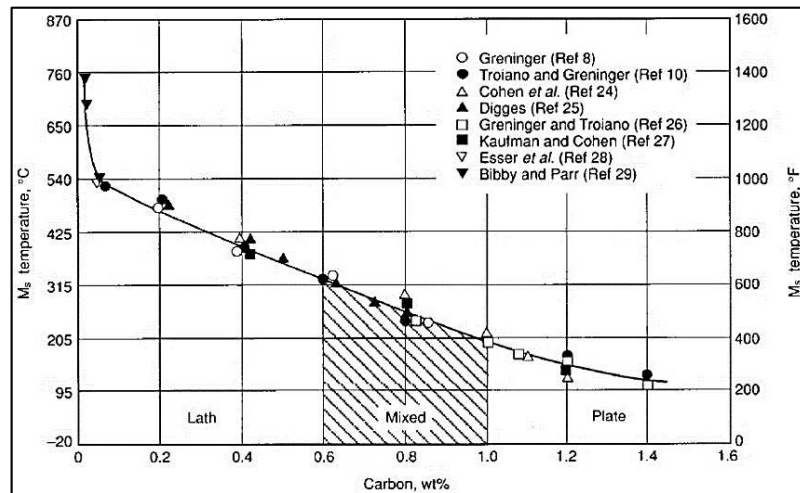


**Figura 2-28:** Cizallamiento e inclinación de superficie formación martensita (placas).

Fuente: (ASM INTERNATIONAL, 1998)

La martensita es deformada por las restricciones creadas y produce una gran densidad de 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, 1998). 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

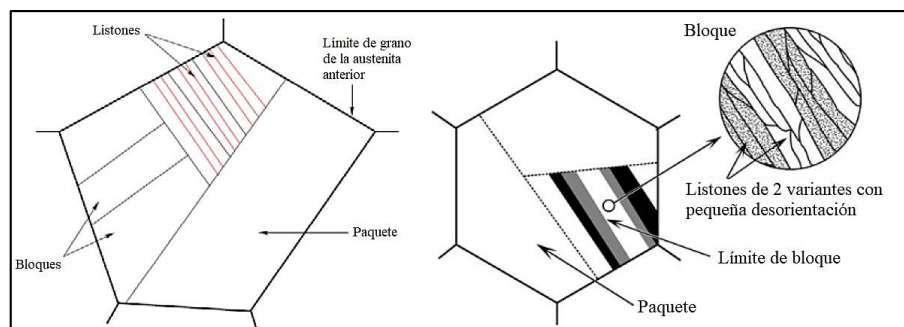
morfología de la martensita se divide principalmente en dos tipos, en forma de listones o placas, los cuales varían de acuerdo a su contenido de carbono, el cual también influye en la temperatura de formación o  $M_s$  como se indica en la Figura 2-29.



**Figura 2-29:** Temperatura  $M_s$  en función del contenido de carbono.

Fuente: (ASM INTERNATIONAL, 1998)

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 2-30. 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, 1998; Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 18).



**Figura 2-30:** Componentes y morfología de la martensita en forma de listones.

Fuente: (Carrouge, 2002)

### **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, y si no es controlada puede resultar perjudicial. Se caracteriza por ser no magnética y tener una estructura cristalina de tipo FCC (Cúbica centrada en las caras). 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  $M_s$  (Carrouge, 2002; Hoyos, 2009; Bhadeshia, 1979).

### **Austenita retenida ( $\gamma'$ )**

Durante el temple, al transformar la austenita en martensita se produce una gran expansión en volumen, lo que origina grandes tensiones residuales en el acero. Las placas de martensita formada rodean y aíslan pequeños depósitos de austenita, que se deforman para dar espacio a la martensita de menor densidad; para avanzar con la transformación es necesario que la martensita circundante se deforme para dar lugar a que los restantes depósitos de austenita se transformen. Sin embargo, debido a que la martensita fuerte se resiste a la transformación, la martensita existente se agrieta o permanece atrapada en la estructura como austenita retenida (Askeland, 1998).

Durante el revenido la martensita revenida se ablanda, se hace más dúctil y puede deformarse, permitiendo que después que la austenita retenida se enfríe por debajo de las temperaturas  $M_s$  y  $M_f$  se transforme en martensita. Es posible que sea necesario un segundo paso de revenido para eliminar la martensita dura y quebradiza obtenida a partir de la austenita retenida (Auz, 2017, pág. 40).

### **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 2-27, 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 CA6NM 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 (Arietamiento por hidrógeno inducido) (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 19).

## 2.6 Reparación de rodetes

La reparación de rodetes se realiza con el objeto de maximizar la vida útil del equipo y mantener una alta disponibilidad y buen funcionamiento, pero al igual que con cualquier equipo, las reparaciones excesivas de un rodete pueden llevar a la reducción de su rendimiento y de su vida útil. Las reparaciones extensivas de la soldadura pueden provocar la distorsión de los alabes, aceleración de daños por cavitación y posible reducción de eficiencia. Adicionalmente, este tipo de reparación puede causar tensiones residuales en el rodete lo cual produce un agrietamiento estructural en las áreas sometidas a altos esfuerzos, es por ello que se buscan métodos alternativos (Duncan, 2000, p. 5).

La principal razón para realizar la reparación de un rodete es la presencia de picaduras por cavitación y los pasos básicos a seguir son: inspección, identificación de la causa de las picaduras, planificar de mejor enfoque para la reparación y realizar reparaciones. La identificación de las causas es un paso muy importante, si se realiza de manera adecuada puede ayudar a mitigar el problema con las respectivas correcciones (Duncan, 2000, p. 5).

Antes de realizar la reparación se deben analizar 2 opciones, una es restaurar el rodete acorde al perfil original y otra es modificar el perfil en busca de reducir las causas del daño (la primera opción es la más sencilla, pero la segunda ofrece mayores beneficios a largo plazo). Una vez establecido el método de reparación se plantean los procedimientos adecuados y se busca mano de obra calificada, de esto dependerá la efectividad de la reparación (Duncan, 2000, pp. 5, 6).

### 2.6.1 *Reparación por relleno con soldadura*

La soldadura es el método más común y hasta la fecha el método exitoso de reparación del daño producido por cavitación en turbinas hidráulicas, Figura 2-31. Para la reparación se siguen varios pasos: control dimensional inicial, aplicación de respaldos, preparación de la superficie, precalentamiento, aplicación de soldadura, pulido del área, inspección de soldadura, remoción de respaldos y control de dimensiones finales. Adicionalmente, antes de iniciar, es importante conocer la composición del material base, el material de soldadura y establecer el proceso a utilizar (Duncan, 2000, p. 13).



**Figura 2-31:** Reparación de Rodete Pelton por relleno con soldadura.

Fuente: Autores

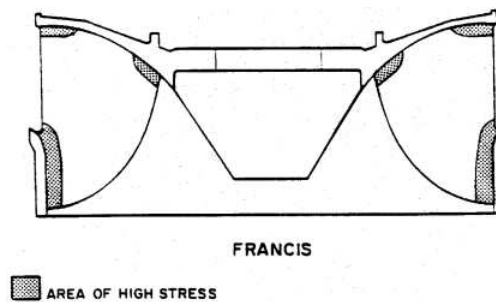
#### 2.6.1.1 *Materiales de aporte utilizados para reparación*

Los materiales que se pueden utilizar para reparación de rodets fabricados con acero inoxidable martensítico (CA6NM) son varios, en áreas que estén sometidas a un bajo esfuerzo y también en áreas de sometidas a alto esfuerzo, pero donde la profundidad de la picadura no exceda el 10% del espesor del material, la reparación puede ser realizada con material de aporte inoxidable austenítico 308 (Duncan, 2000, p. 14). Los aportes austeníticos son recomendados para soldadura de aceros inoxidables martensíticos, debido a que el cordón será más dúctil que la zona afectada por el calor, el metal depositado será el que absorba por fluencia las tensiones y deformaciones generadas en las zonas cercanas el cordón, evitando así la formación de grietas (INDURA S.A., 2010, pág. 43).

En áreas sometidas a alto esfuerzo, donde la profundidad de la picadura exceda el 10% del espesor del material se debe buscar material de soldadura recomendado, en este caso 410 Ni-Mo puede ser el más apropiado, debido a la similitud entre la composición



química y propiedades físicas con las del metal base. Este material requiere precalentamiento para prevenir fisuramiento asistido por hidrogeno y tratamiento térmico post-soldadura para revenir el metal base. Estudios han demostrado que la reparación con material de aporte austenítico 15Cr25 y recubrimiento de una aleación que contiene 50% de Co da como resultado una reparación con buenas propiedades físicas y resistencia a la cavitación sin tratamiento térmico post-soldadura, es importante mencionar que la experiencia con este procedimiento es limitada (Duncan, 2000, pp. 14, 15).



**Figura 2-32:** Zonas de rodete Francis sometidas a alto esfuerzo.

Fuente: (Duncan, 2000, pág. 53)

### 2.6.1.2 Técnicas de soldadura empleadas en la reparación

Para la reparación de elementos de turbinas hidráulicas se mencionan 3 métodos que han sido ampliamente experimentados y con los cuales se han obtenido buenos resultados: SMAW, GMAW Y GTAW (Cañizares & Quinchuela, 2017, pp. 38, 39). En la Tabla 2-8, se describen las principales características de estas técnicas.

**Tabla 2-8:** Métodos de soldadura usados en reparación de rodets y características.

Técnica	SMAW	GMAW	GTAW
<b>Aporte</b>	Electrodo revestido	Alambre sólido	Varilla
<b>Ventajas</b>	Gran versatilidad Bajo costo de operación No requiere gas de protección ni un fundente granular Puede ser utilizado en áreas de acceso limitado, como la unión de los cangilones con el rodete Fácil acceso a personal calificado	Alto factor de operación, producción en serie Altas tasas de deposición Varios grados de penetración en función del gas de protección Casi no se produce escoria sobre el cordón de soldadura Proceso semiautomático o automático (menor habilidad del operador)	Soldadura de calidad superior en todas las posiciones, sin distorsión Con o sin metal de relleno No se necesita limpieza entre los pases Control preciso de las variables de soldadura Facilita la soldadura en lugares de difícil acceso

**Tabla 2-8 (Continúa):** Métodos de soldadura usados en reparación de rodetes y características.

<b>Desventajas</b>	Bajas tasas de deposición Remoción de escoria Cambio de electrodos debido a su limitado tamaño Cuidado especial de los electrodos Gases y humos generados en el proceso	Difícil transporte por el gas Costo de equipo elevado comparado con otros procesos Mayor número de parámetros que se deben controlar Personal con mayor capacitación Mayor consumo de energía eléctrica Difícil usar en lugares con acceso limitado Sensibilidad a corrientes de aire	Alto costo del equipo y mano de obra Dificultades para trabajar al aire libre Enfriamiento más rápido en comparación de otros métodos Requiere mayor destreza por parte del soldador Bajos índices de deposición
--------------------	---	---	--

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (Cañizares & Quinchuela, 2017, p. 71)

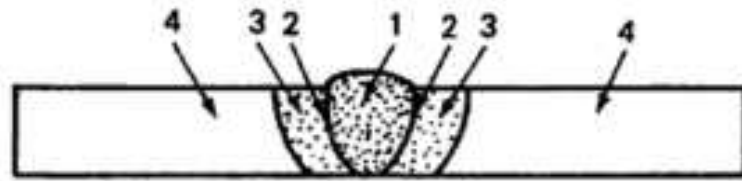
### 2.6.1.3 *Metalurgia de la soldadura*

La soldadura es el proceso mediante el cual se pueden unir dos o más partes utilizando una fuente de calor y/o presión localizadas, en este proceso se puede utilizar o no material de aporte (Rodríguez, 2013, pág. 21), en el caso específico de reparaciones, la soldadura es utilizada para aportar material a un elemento desgastado hasta devolverle sus dimensiones originales. La metalurgia de la soldadura se enfoca en el análisis de los procesos de calentamiento, fusión, solidificación y enfriamiento que giran en torno a la soldadura, este proceso es uno de los más usados actualmente para la unión de materiales metálicos, a la vez es el más complejo desde el punto de vista metalúrgico (Serna, Pedraza, & Ángel, 2015). 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 (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 29)

#### ***Zonas metalúrgicas del pozo de soldadura***

En la soldadura por fusión se produce el fenómeno de la solidificación, el cual crea en la pieza soldada, discontinuidades que definen las siguientes zonas: fundida, unión y

afectada por el calor (Morrall, Jimeno, & Molera, 2004, pág. 1051). Las zonas se muestran en la Figura 2-33 y se describen a continuación.



**Figura 2-33:** Zonas de soldadura.

1. Fundida, 2. Zona de unión, 3. Zona afectada por el calor, 4. Metal base

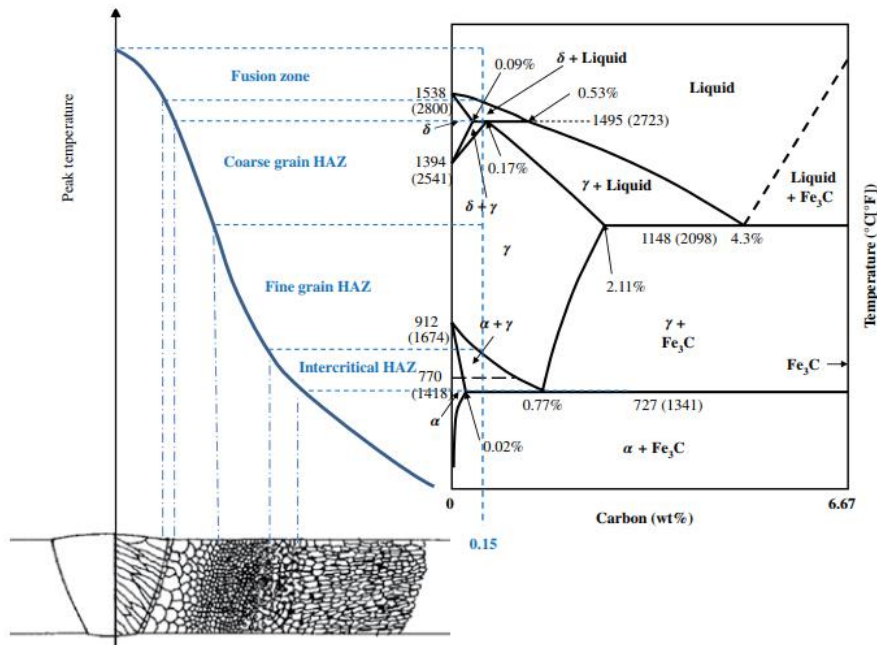
Fuente: (Morrall, Jimeno, & Molera, 2004, pág. 1051)

*Zona fundida:* Es aquella donde se produce la fusión y posterior solidificación del metal de aporte (si existe), el cual se mezcla con el metal base y genera el metal de soldadura (SENATI, 2013, pág. 22). Los metales sufren una transformación total a estado líquido para volver a solidificarse, mediante la nucleación y recristalización de su microestructura (Cañizares & Quinchuela, 2017, págs. 29,30).

*Zona de unión:* Es la interfaz entre la región fundida y la región en estado sólido, normalmente es la zona más propicia a inicio de fisuras, ya que existen áreas con fusión parcial (SENATI, 2013, pág. 22).

*Zona afectada por el calor:* Es la zona del metal base que sufre ciclos de calentamiento y enfriamiento debido al aporte térmico de la soldadura (SENATI, 2013, pág. 22), esta región 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.

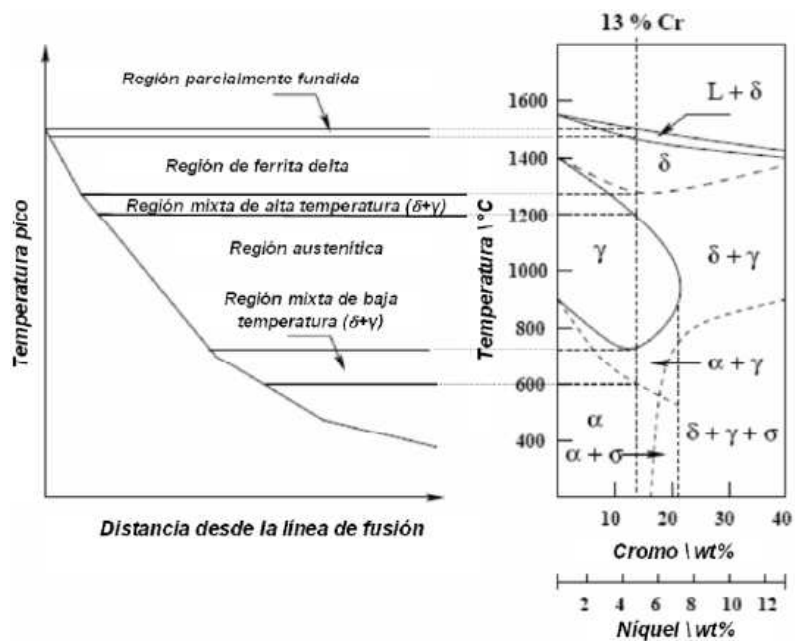
En los aceros al carbono, esta zona puede dividirse en subregiones en donde aparecen granos gruesos, granos finos e intercríticos (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 30). La figura indica la relación entre la temperatura que alcanzan las diferentes zonas a medida que se alejan del eje de la soldadura y el tamaño de grano que se forma luego de la soldadura, la diferencia se produce debido a la diferencia en las tasas de enfriamiento.



**Figura 2-34:** Relación - Tamaño de grano de zonas pozo de soldadura y temperatura.

Fuente: (Lippold, 2015)

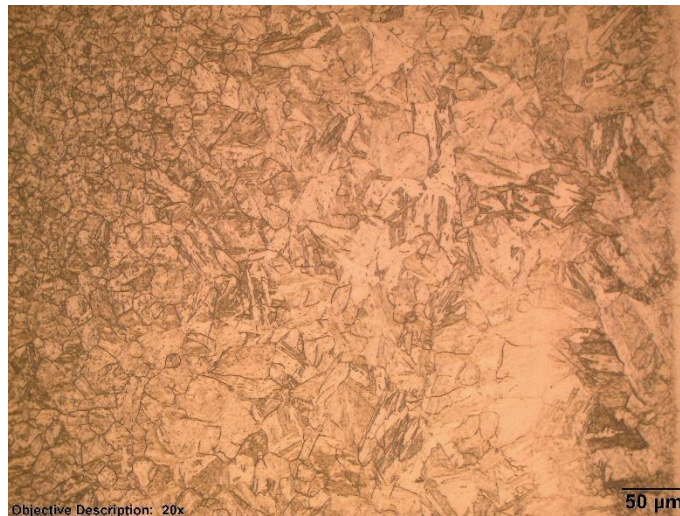
Para los aceros inoxidables con contenido de Cr 13% y Ni 4% se tiene un diagrama similar, el gradiente de temperatura y las temperaturas pico alcanzadas a diferentes distancias de la línea de fusión en la ZAC ocasionan diferentes transformaciones microestructurales durante el calentamiento, mismas que luego del enfriamiento producen subregiones con distintas microestructuras (Hoyos, 2009, pág. 18).



**Figura 2-35:** Regiones de la ZAC y temperaturas pico alcanzadas acero inox 13-4.

Fuente: (Hoyos, 2009, pág. 19)

La diferencia entre los granos es muy clara, la Figura 2-36 muestra la microestructura de la soldadura realizada en un acero inoxidable martensítico (ASTM A743 CA6NM), en la cual se pueden notar claramente granos de gran tamaño, granos muy finos y luego granos promedio (intercríticos).



**Figura 2-36:** Subregiones ZAC acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA6NM.

**Fuente:** Autores

*Metal base:* Corresponde a la región que no ha sido afectada microestructuralmente, pero a pesar de ello en esta zona se generan esfuerzos residuales que deberán ser aliviados mediante tratamiento térmico. Los esfuerzos son tensiones de contracción generadas por el ciclo térmico de la soldadura (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 30).

### ***Soldabilidad***

Es la mayor o menor facilidad con que un metal permite que se obtengan soldaduras sanas y homogéneas, que respondan a las necesidades para las que fueron concebidas incluyendo códigos de fabricación (SENATI, 2013, pág. 21). La Soldabilidad de un material constituye una propiedad muy compleja y en muchas ocasiones queda condicionada a variaciones metalúrgicas y sus propiedades. Esto significa que un material puede tener buena soldabilidad, cuando se puede lograr una unión soldada con propiedades mecánicas y físico-químicas adecuadas, por cualquiera de los procesos de soldadura y sin necesidad de utilizar técnicas auxiliares (Serna, Pedraza, & Ángel, 2015).

La soldabilidad de los aceros puede ser determinada en función del porcentaje de carbono y porcentaje de elementos aleantes, como se describe en la Tabla 2-9.

**Tabla 2-9:** Soldabilidad en función de porcentaje de carbono y elementos aleantes.

Suma de los elementos aleantes (%)	Contenido de carbono (%)			
	Tipo de soldabilidad			
	Excelente	Buena	Regular	Mala
<1	0.25	0.25-0.35	0.35-0.45	>0.45
1-3	0.2	0.20-0.30	0.35-0.45	>0.40
>3	0.18	0.18-0.28	0.28-0.38	>0.38

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (Serna, Pedraza, & Ángel, 2015)

A pesar de que el material a ser soldado tenga una mala soldabilidad existen factores que pueden mejorar esta propiedad, así tenemos: espesor del material, porcentaje de elementos aleantes, tipo de junta, proceso de soldadura, velocidad de enfriamiento, energía suministrada, precalentamiento y secuencia de soldadura (Serna, Pedraza, & Ángel, 2015).

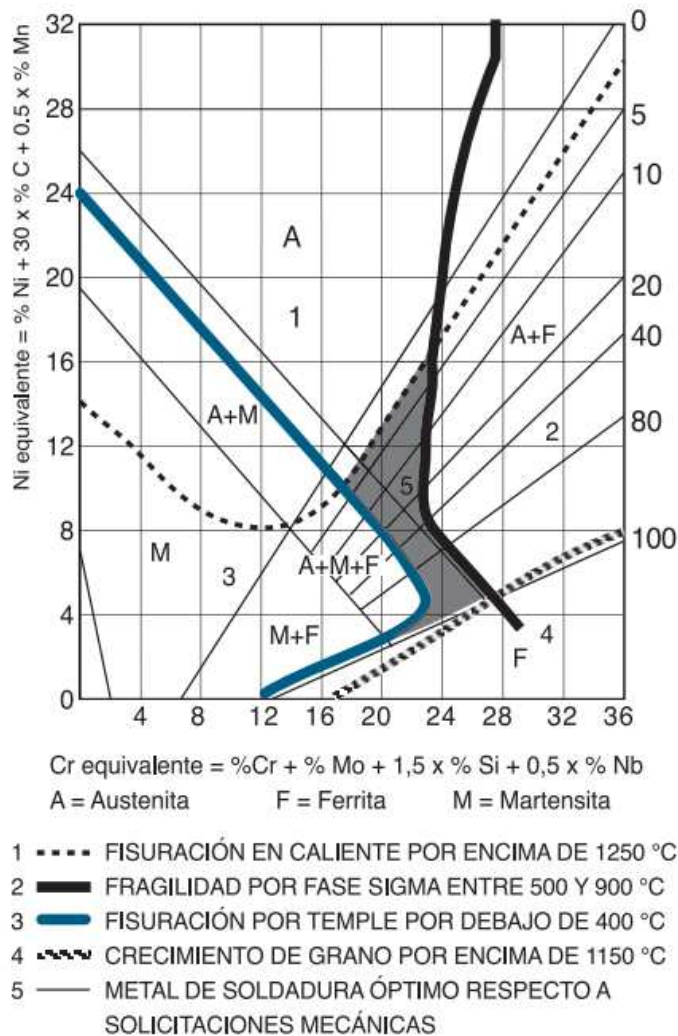
### ***Composición del pozo de soldadura***

Con la finalidad de predecir la composición final del pozo de soldadura se han elaborado una serie de diagramas de constitución, siendo el diagrama de Schaeffler es el más aceptado ya que brinda una buena aproximación a la microestructura final de juntas soldadas de aceros inoxidables y soldaduras disímiles. El diagrama se obtuvo de manera empírica y permite determinar la estructura por medio de la composición química del metal base y aporte. Existen limitaciones en cuanto a la proporción de los elementos, los porcentajes no deben ser mayores a C 0.2%, Mn 1%, Si 1%, Mo 3% y Nb 1.5% (Ospina, Aguirre, & Parra, 2007, págs. 275,276). En el diagrama existen dos variables: porcentaje de cromo equivalente (1) y porcentaje de níquel equivalente (2).

$$\%Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb \quad (1)$$

$$\%Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn \quad (2)$$

El cromo equivalente incorpora los elementos alfa genos (formadores de ferrita) y el níquel equivalente los elementos gamma genos (formadores de austenita), en las fórmulas cada elemento se multiplica por un factor que varía en función del grado de influencia en la formación de ferrita o austenita según sea el caso (INDURA S.A., 2010, pág. 28). El diagrama de Schaeffler posee 5 zonas críticas como se indica en la Figura 2-37.



**Figura 2-37:** Zonas críticas diagrama de Schaeffler.

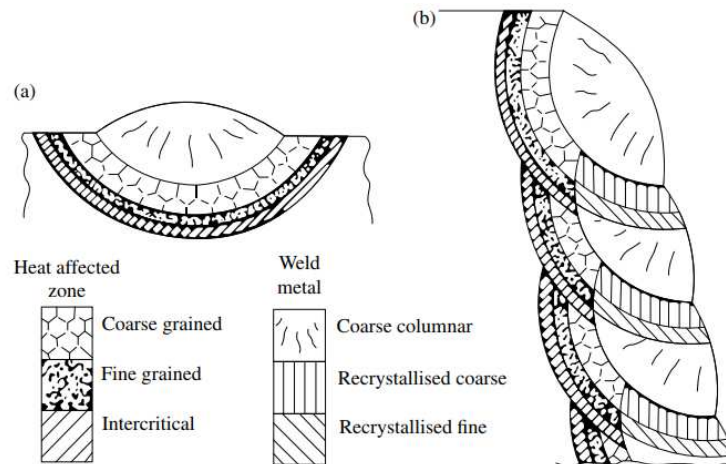
Fuente: (INDURA S.A., 2010, pág. 30)

Ensayos han demostrado que los pozos de soldadura de aceros inoxidable que contienen entre un 5 y 8% de ferrita no tienen tendencia al agrietamiento, es así que cuando existe ausencia de esta fase la tendencia al agrietamiento es mayor (Pástor, 2004, pág. 44).

### ***Soldadura de pases múltiples***

Cuando se realizan soldaduras con pases múltiples se produce un efecto de revenido en función del calor que ingresa a los pases anteriores en el proceso, esto se debe a ciclos térmicos muy energéticos donde las temperaturas alcanzadas en las diferentes zonas vienen acompañadas de velocidades de enfriamiento elevadas (Pástor, 2004, pág. 102). Las pasadas sucesivas modifican los pases anteriores refinando el tamaño de grano (Cañizares & Quinchuela, 2017, pág. 37).

En las soldaduras con múltiples pases la evolución de la ZAC se vuelve muy complicada debido al recalentamiento de la microestructura subyacente y la superposición de las regiones de la ZAC del siguiente cordón de soldadura (Hoyos, 2009, pág. 66), tal como se muestra en la Figura 2-38.



**Figura 2-38:** Evolución de la ZAC en soldadura con múltiples pases.

a) Soldadura con un único pase, b) Soldadura con pases múltiples

Fuente: (Hoyos, 2009, pág. 67)

Se plantea una aproximación de la influencia de los múltiples pases, en donde, la primera pasada produce un aumento de la dureza del metal base en un 65% aproximadamente, para luego disminuir y estabilizarse luego de la tercera pasada y llegar a un aumento del 25% en la dureza inicial (Pástor, 2004, pág. 103).

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

La importancia del pre calentamiento en una soldadura radica en que evita la formación de grietas. Determinar la temperatura de pre calentamiento adecuada es fundamental para evitar fisuras, depende principalmente de la composición química del metal base y parámetros de ejecución del procedimiento de soldadura (Pástor, 2004, pág. 134).

Existe una variedad de métodos para determinar la temperatura de pre calentamiento, entre los cuales tenemos: método de la B.W.R.A, método de Seferian y temperaturas recomendadas en función del carbono equivalente. De entre todos los métodos el que contiene cálculos más simples es Seferian y está en función del carbono equivalente  $CE$  y el espesor del material a soldar  $e$  (mm). La temperatura de pre calentamiento  $T_p$  (°C) está definida por (3):



$$T_p = 350\sqrt{CE - 0.25} \quad (3)$$

El carbono equivalente total (4) en este caso corresponde a la suma del carbono equivalente químico  $CE_q$  (5) y del carbono equivalente del espesor  $CE_e$  (6).

$$CE = CE_q + CE_e \quad (4)$$

$$CE_q = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{Mo}{13} \quad (5)$$

$$CE = 0.005eCE_q \quad (6)$$

Una expresión simplificada para el carbono equivalente total (7) se indica a continuación:

$$CE = CE_q(1 + 0.005e) \quad (7)$$

Según la AWS, la temperatura de precalentamiento y de tratamiento térmico post soldadura para los aceros inoxidable martensíticos puede ser determinada en función del porcentaje de carbono que contengan, como se indica en la Tabla 2-10.

**Tabla 2-10:** Precalentamiento y TTPS en aceros inoxidable martensíticos.

Carbono %	Temperatura mínima de precalentamiento		Requerimientos de tratamiento térmico post soldadura
	°C	°F	
<0.05	121	250	Opcional
0.05-0.15	204	400	Recomendado
>0.15	316	600	Necesario

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (American Welding Society, 2011, pág. 280)

Adicionalmente, en el documento “*Supplement to the Welding Journal “Heat Treatment of Welded 13%Cr-4%Ni Martensitic Stainless Steels for Sour Service”*” se establece la temperatura de precalentamiento para los aceros inoxidable martensíticos en un rango de 85-120°C y la temperatura entre pases en el rango de 100-150°C, con la finalidad de evitar el agrietamiento asistido por hidrógeno (Cañizares & Quinchuela, 2017).

La soldadura del acero inoxidable martensítico grado CA6NM necesita de control de temperatura entre pases y el valor debe estar por debajo de la temperatura de transformación martensítica  $M_s$  para asegurar que en el cordón de soldadura se produzca la transformación a martensita antes de que el siguiente cordón sea depositado, permitiendo así el efecto de revenido. Las temperaturas de inicio  $M_s$  (8) y fin  $M_f$  (9) de

la transformación martensítica están en función de la composición química del material según Akselsen (Auz, 2017, pág. 26), así tenemos:

$$M_s = 539 - 423\%C - 30.4\%Mn - 12.1\%Cr - 17.7\%Ni - 7.5\%Mo \quad (8)$$

$$M_f \cong M_s - 130^\circ C \quad (9)$$

De acuerdo con la AWS, los rangos de temperatura de transformación martensítica y las características de endurecimiento al aire de los aceros inoxidable son lo suficientemente altas como para que una temperatura de precalentamiento de 315°C o menor tenga un efecto mínimo en la dureza de la zona afectada por el calor o el metal de soldadura. Se recomienda mantener altas temperaturas de precalentamiento y entre pases, y asegurar una velocidad de enfriamiento muy lenta en el rango de temperatura de transformación martensítica aproximadamente 90 °C a 120 °C, seguido directamente por el revenido. Es decir, la soldadura no debe enfriarse a temperatura ambiente, y el tratamiento de revenido debe iniciarse antes de que se alcance la temperatura de martensita  $M_f$  (American Welding Society, 2011, pág. 280).

### ***Tratamiento térmico***

El tratamiento térmico es una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento en tiempos determinados y aplicados a un metal o aleación en el estado sólido con la finalidad de obtener propiedades mecánicas deseadas, dicho proceso se obtiene mediante la transformación de la austenita, modificando factores tales como los constituyentes estructurales, la granulometría y su patrón de esfuerzos residuales, pero sin modificar la composición química de los materiales (Avner S. , 1988, pág. 252).

### **Etapas del Tratamiento Térmico**

Un tratamiento térmico en general consta de las siguientes tres etapas: *calentamiento hasta la temperatura fijada*, la elevación de temperatura debe ser uniforme en la pieza; *permanencia a la temperatura fijada*, con el fin de completar la transformación del constituyente estructural de partida; y *enfriamiento*, que tiene que ser rigurosamente controlado en función del tipo de tratamiento que se realice (Auz, 2017, pág. 38).

## **Tipos de Tratamientos Térmicos**

*Recocido:* consiste en calentar el metal hasta una determinada temperatura y enfriarlo después muy lentamente a lo largo del intervalo de transformación, mejora la plasticidad, ductilidad y tenacidad, elimina la acritud y tensiones y afina el grano, además de homogeneizar o producir una microestructura específica (Callister, pág. 338).

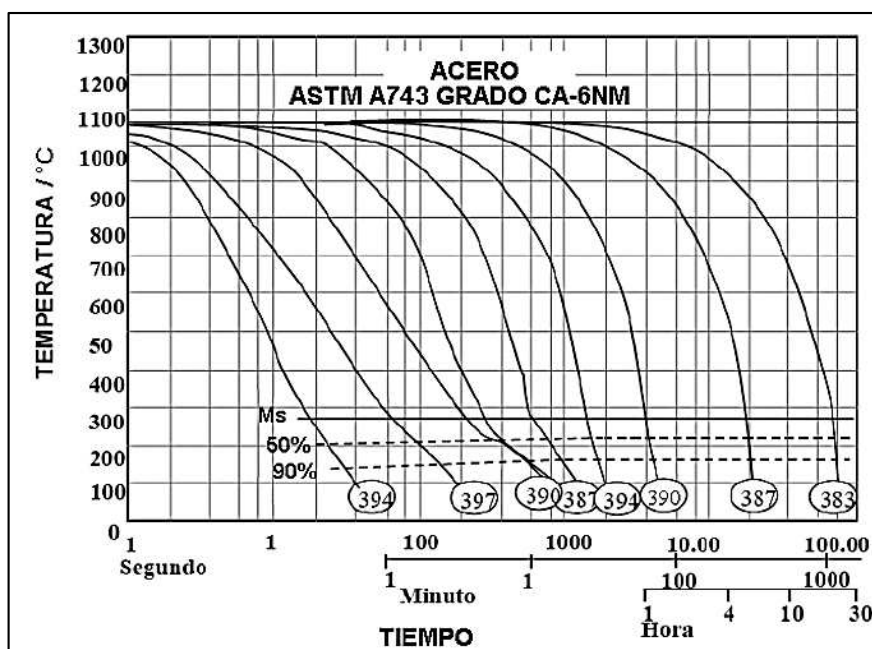
*Normalizado:* afina el tamaño de grano y produce una distribución de tamaños más uniforme en los aceros que se han deformado plásticamente, incrementando la tenacidad del material (Callister, pág. 340).

*Temple:* tratamiento térmico de endurecimiento que se caracteriza por enfriamientos bruscos en un medio adecuado: agua, aceite o aire, para transformar la austenita lograda durante el calentamiento en martensita, que es el constituyente duro típico de los aceros templados, y así aumentar la dureza y la resistencia mecánica (Auz, 2017, pág. 39).

*Revenido:* los aceros sometidos a temple quedan demasiado duros y frágiles debido a las tensiones internas que se generan al producirse la transformación martensítica, por lo que para corregir este estado y obtener una dispersión excepcionalmente fina de  $Fe_3C$ , conocida como martensita revenida. El revenido consiste en calentar el acero hasta una temperatura inferior a la de transformación  $Ac_1$ , después de haberle realizado un temple o un normalizado, seguido de un enfriamiento controlado para transformar la martensita en formas más estables, consiguiendo así: disminuir la resistencia mecánica y la dureza, aumentar la plasticidad y la tenacidad, aliviar tensiones en el material y precipitar carburos y formar austenita estable. El enfriamiento puede ser rápido cuando se pretende resultados altos en tenacidad, o lentos, cuando se pretende reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones (Auz, 2017, pág. 39).

### ***Tratamiento térmico post soldadura del acero ASTM A743 Gr. CA6NM***

Debido a la alta templabilidad del acero A743 Gr. CA6NM ocasionado por su composición química, ocurre la transformación martensítica aún con altos tiempos de enfriamiento (Auz, 2017, pág. 40), como se observa en la Figura 2-39.



**Figura 2-39:** Diagrama CCT para el acero ASTM A743 Gr. CA6NM.

Fuente: (Rojas, 2009, pág. 17)

La soldadura del acero inoxidable martensítico conlleva una considerable expansión volumétrica y alteración de la microestructura original del material debido al proceso de temple al que se somete durante el enfriamiento. Además, debido a que los aceros inoxidables presentan mayor coeficiente de expansión térmica y más bajo coeficiente de conducción térmica que los aceros al carbono, durante la soldadura y en su posterior solidificación se produce acumulación de tensiones internas que reducen las propiedades mecánicas del material, siendo necesario tratamiento térmico de alivio de tensiones (Almeida & Villena, 2009, pág. 35), para evitar fisuración de los cordones de soldadura, aliviar tensiones, recuperar la estructura alterada y consecuentemente mejorar las propiedades mecánicas de la soldadura (Laufgang, 2003).

Una alta dureza en la ZAC o del metal base no es recomendable por la inherente fragilidad, por lo que se realizan tratamientos térmicos post soldadura de Revenido, cuyas variables deben ser adecuadamente seleccionadas para no perjudicar la resistencia a la corrosión del acero inoxidable (Laufgang, 2003). Según la norma ASTM A743 el revenido de la aleación CA6-NM se efectúa en el intervalo de temperatura de 565°C a 620°C, mientras que para (Akhiate, 2014) el revenido de este acero se realiza a una temperatura ligeramente superior a la de inicio de transformación a austenita  $A_{c1}$  (570-600)°C, y por otra parte encontramos el revenido de aleaciones martensíticas en el rango de 595 a 620 °C para mejorar la ductilidad a niveles de resistencia más bajos, evitando el

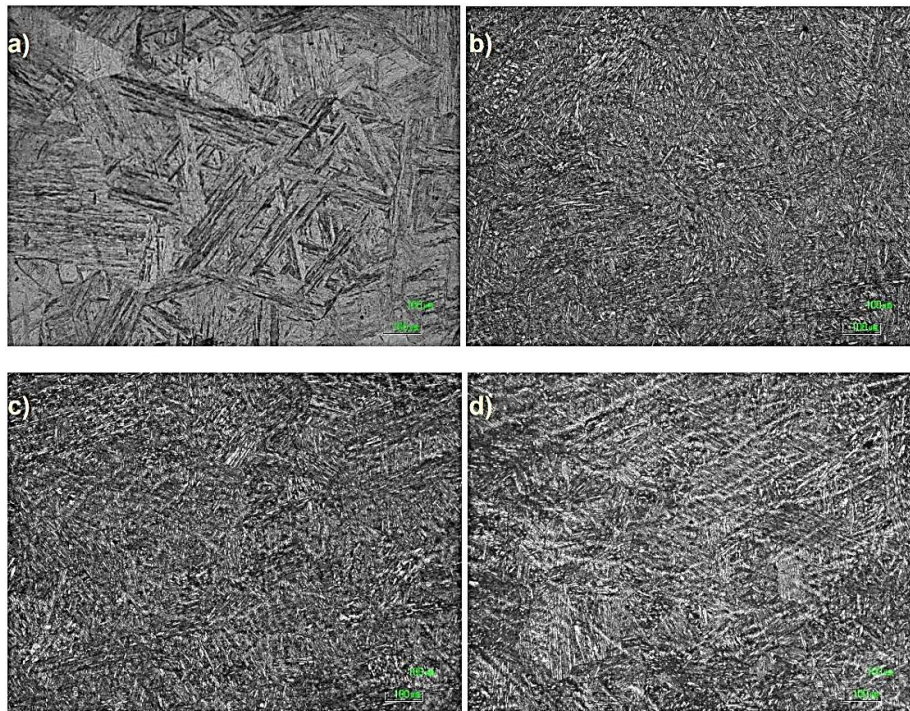
revenido dentro del rango de 370 a 595°C para evitar la baja resistencia al impacto resultante (ASM Metals Handbook) y por último se recomienda en el Manual de Fundiciones de Acero, realizar el revenido post soldadura a una temperatura dentro del rango de 593 a 620 °C y luego enfriar en aire (Steel Founders Society of America, 2004, pág. 16).

Respecto al tiempo de sostenimiento que se debe mantener el material a la temperatura de revenido, debe ser el necesario para que toda la masa consiga una temperatura uniforme, siendo determinado por el espesor de la sección (Steel Founders Society of America, 2004, pág. 16). El tiempo empleado debe ser tal que los carburos de hierro-cromo que estuvieran presentes se mantengan en solución y se evite la descarburación, un excesivo crecimiento de grano. Como regla general, el tiempo de permanencia hasta alcanzar una temperatura homogénea en toda la masa debe ser una hora por cada pulgada de espesor (Medrano, 2006, págs. 65-69), o de 30 a 60 minutos para espesores de hasta 0.5 pulgadas (Acuña & Lozada, 2013, pág. 10) y por cada pulgada o fracción de espesor adicional incrementar 30 minutos más (ASM Metals Handbook). Se debe limitar la velocidad de enfriamiento por las tensiones térmicas que pudiesen generar (aproximadamente 200°C por hora por pulgada de espesor), para evitar la fragilización y fisuración por enfriamiento brusco.

El revenido ejecutado como tratamiento térmico posterior a la soldadura promueve la reducción de la dureza de la martensita y la precipitación de austenita estable (tipo 1) submicroscópica finamente distribuida, que permanece después del enfriamiento y junto con la martensita revenida otorga al material una combinación de dureza y tenacidad adecuadas para el uso en rodets hidráulicos. La microestructura obtenida a temperatura ambiente usualmente consiste de martensita en la que una cierta cantidad de austenita reformada está dispersa a lo largo de los límites de los listones de martensita y de granos de austenita primaria. La cantidad de austenita depende del tiempo y temperatura de revenido, además de ser función de la composición química (Akhiate, 2014).

En la Figura 2-40 se muestra la microestructura del acero CA6-NM: (a) en estado homogenizado, después sometido a tratamientos térmicos con tiempo de sostenimiento de 3h (b) Revenido a 580°C, (c) Revenido a 620°C y (d) Revenido a 640°C. En la Figura (a) la microestructura en estado bruto de fundición donde se pueden observar los paquetes de listones de martensita conformando una estructura gruesa. Las figuras (b) y (c)

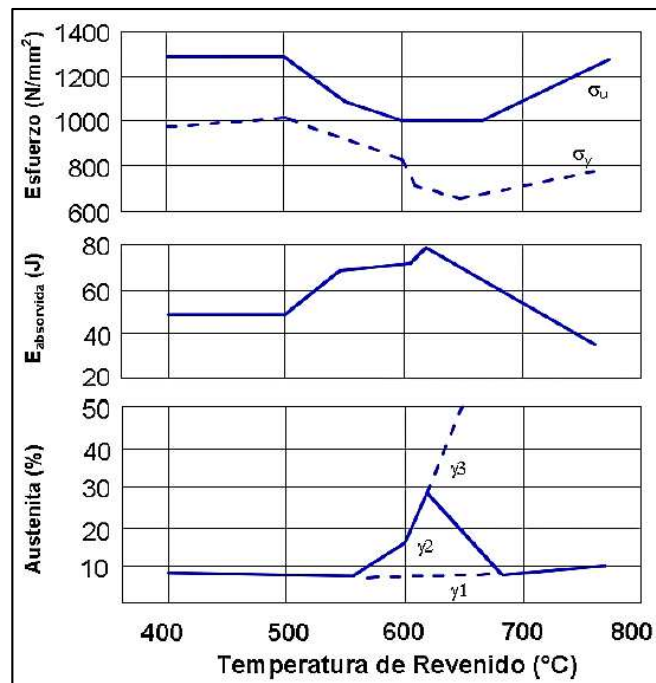
muestran como los listones de martensita empiezan a descomponerse en estructuras cada vez más finas a medida que aumenta la temperatura de revenido hasta 620°C, lo cual ocurre por la precipitación de carburos desde la martensita. En la figura (d) se observa la microestructura martensítica revenida a una temperatura de 640 °C.



**Figura 2-40:** Microestructura acero ASTM A743 CA6NM homogenizado y revenido.

Fuente: (Rojas, 2009, pág. 52)

Las transformaciones que se producen durante el revenido de la martensita tienen características decisivas en la tenacidad de los aceros CA6-NM, además de la presencia de austenita formada entre 550 y 600 °C, la cual no se transforma en martensita después del enfriamiento. Se ha verificado mediante pruebas dilatométricas que el comienzo de la aparición de austenita se produce alrededor de 550 °C, hasta alcanzar un contenido máximo de aproximadamente 30% a 620 °C y como se muestra en la Figura 2-41, por encima de esta temperatura se produce una reducción de la austenita formada y el surgimiento de una austenita inestable (Santos, 2000, págs. 16-17), capaz de transformarse en martensita fresca, que es indeseable en el material ya que aumentaría la dureza y fragilidad, por ello el revenido no debe superar esta temperatura (ASTM A743). En la Figura 2-41 se muestra valores de las propiedades mecánicas y los tipos de contenido de austenita (estable o inestable) como una función de la temperatura de revenido.



**Figura 2-41:** Prop. Mecánicas y % austenita en función de temperatura de revenido.

$\gamma_1, \gamma_2$ : austenita que es retenida por composición química,  $\gamma_3$ : austenita inestable que se transforma en martensita

Fuente: (Hoyos, 2009, pág. 9)

El acero CA6NM presenta un comportamiento particular en sus propiedades mecánicas a diferentes temperaturas de revenido, presentando una caída en la dureza para el revenido entre 600 y 620 °C, esta caída en la dureza se asocia fundamentalmente al contenido de austenita retenida en el material después del revenido, encontrando una mayor cantidad de austenita retenida para dichas temperaturas de revenido como lo muestra la Figura 2-41 (Baena, 2008, pág. 12).

### ***Defectos producto de la soldadura***

Durante el proceso de soldadura pueden aparecer una variedad de defectos, producidos por diversas causas. Los defectos más comunes son:

**Porosidad:** son cavidades formadas por la oclusión de gases en el interior de la soldadura, pueden también estar abiertos a la superficie. Los poros no representan defectos graves, excepto cuando se encuentran situados en los planos de tensiones máximas, dado que los poros reducen la sección neta resistente de la soldadura (Monge, 2007).

**Inclusiones sólidas:** Cualquier materia extraña, que quede aprisionada en el metal fundido, diferente de los metales de base y de aportación de la soldadura constituye una

inclusión sólida. Las más frecuentes son las escorias, los óxidos y las inclusiones metálicas. La importancia de estos defectos depende del tamaño de la inclusión y pueden ser más evidentes o amplificarse durante el servicio (Monge, 2007).

**Falta de fusión:** es el agrietamiento del metal de la soldadura. Tiene más probabilidades de ocurrir en la primera capa de soldadura que en cualquier otra parte, y de no repararse continuará pasando a las demás capas al ir siendo depositadas (Buitrago, 2009).

**Falta de penetración:** esta expresión se usa para describir la situación en que el metal depositado y el metal base no se funden en forma integral en la raíz de la soldadura. La penetración incompleta es indeseable, particularmente si la raíz de la soldadura está sujeta ya sea a tensión directa o a esfuerzos de flexión. El área que no se funde permite concentraciones de esfuerzos que pueden resultar en fallas sin deformación apreciable (Buitrago, 2009).

**Fisuras:** son discontinuidades producidas por rotura local. Cuando son microscópicas reciben el nombre de micro fisuras. Pueden ser internas o externas y pueden producirse en el metal fundido, en la zona de unión, en la zona de influencia térmica o en el metal de base. Las fisuras son especialmente peligrosas porque producen una disminución de la sección resistente, concentración de tensiones en los extremos y son zonas débiles en ambientes corrosivos (Monge, 2007).

Las posibles causas y soluciones de la aparición de los diferentes defectos en soldadura se indican en la Tabla 2-11.

**Tabla 2-11:** Causas comunes de defectos de soldadura y soluciones.

	Causas	Soluciones
Porosidad	Excesiva concentración de hidrógeno, nitrógeno y oxígeno en la atmosfera de la soldadura	Uso de electrodos de bajo hidrógeno, materiales de relleno con alta concentración de desoxidantes, incrementar el flujo de gas protector
	Alta tasa de solidificación	Usar precalentamiento o incrementar la cantidad de calor
	Metal base contaminado	Limpiar las superficies adyacentes a la soldadura
	Metal de aporte contaminado	Usar material limpio, empacado y almacenarlo en un área limpia
	Inapropiada longitud de arco, corriente de soldadura o manipulación del electrodo	Cambiar las técnicas de o condiciones de soldadura
	Volatilización de elementos de aleación	Utilizar metal de relleno apropiado y reducir la entrada de calor
	Acero galvanizado	Usar electrodo E6010 y manipular el calor del arco para volatilizar el zinc adelante del pozo de soldadura
	Excesiva humedad en el electrodo o en el metal base	Usar recomendaciones de mantenimiento y recuperación de electrodos, limpiar y precalentar las superficies
	Metal base con alto contenido de azufre	Usar electrodos que produzcan escorias de reacción básica



**Tabla 2-11 (Continúa):** Causas comunes de defectos de soldadura y soluciones.

Inclusiones	<p>Falta de remoción de la escoria</p> <p>Inclusión de óxidos refractarios</p> <p>Inclusiones de tungsteno</p> <p>Inapropiado diseño de la junta</p> <p>Inclusiones de óxido</p> <p>Escoria flotando delante del arco</p> <p>Escasa técnica de manipulación del electrodo</p> <p>Inclusiones de pedazos de revestimiento</p>	<p>Limpiar bien la superficie de soldaduras anteriores</p> <p>Cepillado enérgico de soldaduras anteriores</p> <p>Evitar el contacto entre el electrodo y el metal líquido</p> <p>Incrementar el ángulo de ranura de la junta</p> <p>Proveer suficiente gas protector</p> <p>Reposicionamiento para evitar perder el control sobre la escoria</p> <p>Cambiar el tipo de electrodo</p> <p>Usar electrodos en buen estado</p>
Falta de fusión	<p>Insuficiente entrada de calor, tamaño inapropiado de electrodo, inadecuado diseño de la junta, inadecuado suministro de gas protector</p> <p>Posición incorrecta del electrodo</p> <p>Metal de soldadura fluye adelante del arco</p> <p>Óxidos y escorias atrapadas en la ranura de la soldadura o en la cara de la junta</p>	<p>Seguir el procedimiento de soldadura recomendado</p> <p>Mantener la posición apropiada</p> <p>Reposicionar la pieza a soldar, reducir la corriente o incrementar la velocidad de soldadura</p> <p>Limpiar la superficie antes de soldar</p>
Falta de penetración	<p>Excesivo espesor de la raíz o separación insuficiente</p> <p>Insuficiente energía de entrada</p> <p>Escoria adelantada al arco</p> <p>Demasiado tamaño del diámetro del electrodo</p> <p>Desalineación del otro lado de la junta</p> <p>Apertura de la raíz cerrada</p>	<p>Usar la geometría de la junta apropiada</p> <p>Seguir el procedimiento adecuado de soldadura</p> <p>Ajustar el electrodo o la posición de soldadura</p> <p>Usar electrodos más pequeños en la raíz o incrementar la separación en la raíz</p> <p>Inapropiada visibilidad de la contra-cara de la soldadura</p> <p>Usar mayor separación en la raíz o menor diámetro de electrodo</p>
Fisuración del metal base	<p>Junta rígida</p> <p>Excesiva dilución</p> <p>Electrodos defectuosos</p> <p>Escaso ajuste</p> <p>Depósito de soldadura muy pequeño</p> <p>Metal base de alto contenido de azufre</p> <p>Distorsión angular</p> <p>Agrietamiento en el cráter</p>	<p>Pre calentamiento, alivio mecánico de tensiones, minimizar tensiones de contracción mediante retrocesos del arco u otra técnica de soldadura</p> <p>Cambiar la corriente y/o velocidad de soldadura, soldar con electrodo revestido negativo</p> <p>Cambiar a electrodos nuevos, hornear los electrodos para remover humedad</p> <p>Reducir la separación de la raíz , reconstruir las caras de la junta con depósitos de soldadura</p> <p>Usar electrodos de mayor diámetro, aumentar la corriente de soldadura, reducir la velocidad de soldadura</p> <p>Usar metal de aporte de bajo contenido de azufre</p> <p>Producir un mejor balance de calor por ambos lados de la junta</p> <p>Llenar el cráter antes de apagar el arco, usar un dispositivo de reducción de la corriente de soldadura cuando se llegue al final de la junta</p>
Fisuración del metal de soldadura	<p>Hidrógeno en la atmósfera de soldadura</p> <p>Fisuración en caliente</p> <p>Baja ductilidad</p> <p>Esfuerzos residuales altos</p> <p>Alta templabilidad</p> <p>Fases frágiles en la microestructura</p>	<p>Usar procesos de bajo hidrógeno, pre calentamiento y mantenimiento por 2 horas después de ejecutada la soldadura o post-calentamiento inmediato</p> <p>Usar baja energía de entrada, depositar capas delgadas, cambiar el metal base</p> <p>Usar pre calentamiento, recocer el metal base</p> <p>Rediseñar la soldadura, cambiar la secuencia de soldadura, aplicar tratamiento térmico intermedio</p> <p>Pre calentamiento, aumentar la energía de entrada, tratamiento térmico sin enfriamiento hasta la temperatura ambiente</p> <p>Realizar tratamiento térmico de solución antes de soldar</p>

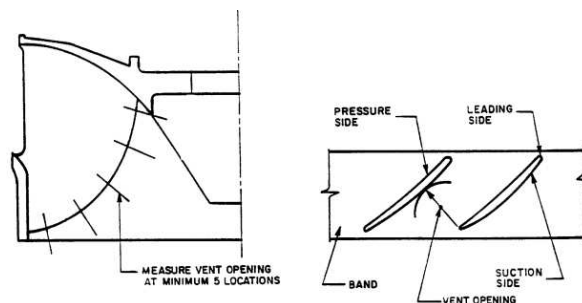
**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (Pástor, 2004, págs. 155,157-160)

#### 2.6.1.4 Aspectos fundamentales en el proceso de reparación

A continuación, se dan a conocer los aspectos fundamentales del proceso de reparación por relleno con soldadura de un rodete, cada uno de estos parámetros son de gran importancia y de ellas dependerá el éxito de la reparación.

*Control dimensional inicial:* Antes de iniciar la reparación, se debe realizar un control dimensional con la finalidad de determinar si se ha producido una distorsión en el rodete y establecer cómo será corregida en caso de existir. En los rodetes Francis se debe realizar una revisión de las aperturas del borde de salida en puntos de control establecidos (luz entre álabes), esta revisión se realiza para obtener un promedio y la variación existente, Figura 2-42. Se debe tomar acciones correctivas si la variación de la luz entre álabes es grande (Duncan, 2000, pág. 16).



**Figura 2-42:** Control dimensional – Medición luz entre álabes.

Fuente: (Duncan, 2000, pág. 55)

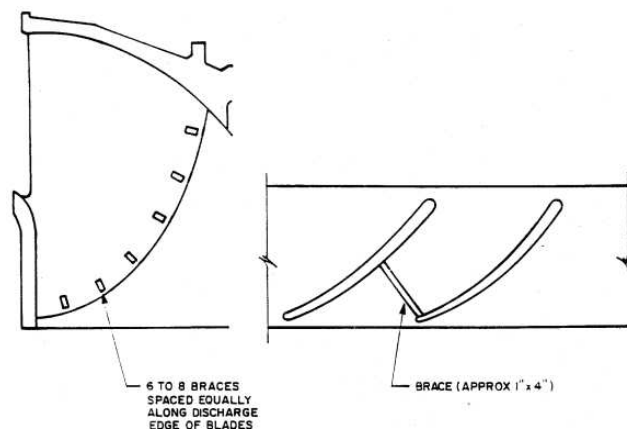
*Control de desgaste:* realizar un control de desgaste es fundamental para determinar la cantidad aproximada de material que se ha perdido en un determinado tiempo de operación. El control puede ser realizado mediante plantillas de control de desgaste, mostradas en la Figura 2-43, estas plantillas permiten medir la holgura existente en puntos de control específicos.



**Figura 2-43:** Plantillas de control de perfil para rodete Francis.

Fuente: Autores

*Aplicación de refuerzos y tirantes:* Cuando la cantidad de soldadura en un rodete es tal que puede producir la deformación del alabe, se deben colocar refuerzos en el lado de la cuchilla opuestos a la reparación por soldadura; estos refuerzos por lo general se ubican cerca del borde de salida, Figura 2-44. A pesar de que los refuerzos son temporales se deben utilizar procedimientos adecuados para su colocación, minimizando así los esfuerzos residuales o cambios metalúrgicos que puedan generarse en el rodete. Se recomienda utilizar material austenítico 308 para rodetes de acero inoxidable (Duncan, 2000, p. 17).



**Figura 2-44:** Aplicación de refuerzos para soldadura.

Fuente: (Duncan, 2000, pág. 57)

*Preparación de la superficie:* la preparación se debe realizar mediante esmerilado o pulido y debe extenderse de entre  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  in (6 y 13 mm) más allá del borde del área afectada. El área preparada debe ser inspeccionada visualmente para detectar posibles defectos que puedan aparecer. En caso de ser áreas sometidas a grandes esfuerzos deberán utilizarse END como tintas penetrantes (para aceros inoxidables austeníticos) y partículas magnéticas (para aceros inoxidables martensíticos) (Duncan, 2000, p. 17).

*Aplicación de la soldadura:* La aplicación de la soldadura debe ser realizada con el objetivo de obtener una junta soldada de buena calidad, con esfuerzos residuales y distorsión mínimos. Es de vital importancia, no aplicar más de 3mm ( $\frac{1}{8}$  in) de material de soldadura en cada pase. Asimismo, como se indicó en apartados anteriores el control de la temperatura de precalentamiento y entre pases es fundamental, la temperatura debe ser monitoreada por medio de un pirómetro o con crayones indicadores, adicionalmente el área ubicada a 4 in desde la soldadura no debe estar caliente al tacto (Duncan, 2000, pág. 19).

Pulido: luego de la reparación con soldadura se debe pulir la superficie hasta obtener el perfil deseado, para lo cual pueden utilizarse plantillas de control de perfil como se indica en la Figura 2-45. Estas plantillas se ubican en puntos de control específico para tomar como referencia su forma y pulir hasta llegar a la geometría deseada.



**Figura 2-45:** Plantillas de control de perfil para rodete Francis.

Fuente: Autores

En la Tabla 2-12, se muestran recomendaciones de acabado superficial en función de la cabeza de presión.

**Tabla 2-12:** Acabado superficial (pulido rodetes) en función de cabeza de presión.

Cabeza de presión, ft (m)	Acabado superficial, $\mu\text{in}$ ( $\mu\text{m}$ )
<300 (91)	250 (6.3)
300-100 (91-305)	120 (3.2)
>1000 (305)	90 (2.3)

Realizado por: Autores

Fuente: (Duncan, 2000, pág. 20)

Existen varios tipos de abrasivos en el mercado, siendo los más utilizados los fabricados de óxido de aluminio y de carburo de silicio. Para la reparación de rodetes fabricados de acero inoxidable o acero fundido se utiliza óxido de aluminio. A continuación, se presenta una ecuación (10) para calcular la velocidad a la cual se pulirá la superficie, la cual debe estar en el rango de 5500 y 6500 ft/min por seguridad del operador. Esta velocidad  $V_{pulido}$  expresada en ft/min está en función de la velocidad angular de la herramienta en revoluciones por minuto  $rpm$  y el diámetro del disco en pulgadas  $D$ , para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{pulido} = rpm \times \frac{D}{12} \quad (10)$$

*Inspección de la junta:* Las soldaduras realizadas para reparación por picadura generalmente no generan tensiones desde el punto de vista estructural, pero a pesar de ello deben someterse a una inspección visual exhaustiva, además, se debe realizar ensayos de tintas penetrantes donde la calidad de la soldadura parezca deficiente. Si se tiene indicios de porosidades se deberá realizar una inspección completa con tintas completa. Zonas sometidas a alto esfuerzo deben ser necesariamente examinadas con tintas penetrantes, al igual que zonas donde hubo aparición de grietas durante la reparación (Duncan, 2000, pág. 21).

*Remoción de refuerzos:* Antes y después de la remoción de los refuerzos para soldadura se debe realizar un control de la luz entre álabes en el borde de salida, para comprobar que los álabes no pierdan su forma (Duncan, 2000, pág. 21).

*Control dimensional final:* Si el rendimiento de la turbina no ha decrecido, la luz entre álabes en el borde de salida luego de la reparación debe ser igual o mayor a la medida tomada antes de la reparación, una tolerancia de -0 a +3% del total de la apertura es recomendada (Duncan, 2000, pág. 21).

*Reparación de fisuras:* En los rodetes pueden aparecer fisuras de gran tamaño, Figura 2-46, debido a las tensiones residuales en el material o a golpes con objetos sólidos en los álabes. Cuando se presentan este tipo de defectos, es importante mantener un registro de su ubicación y dimensiones. Realizar perforaciones en los extremos de la grieta es una técnica para detener el crecimiento de la fisura. Como regla general, la soldadura de fisuras no debe realizarse en sitio, a menos que la integridad estructural del rodete se vea comprometida, ya que la soldadura puede generar mayor tensión en el rodete y con ello un agrietamiento más severo (Duncan, 2000, pág. 28).



**Figura 2-46:** Fisura en álabe del rodete Francis HSF.

**Fuente:** Central Hidroeléctrica San Francisco

### 2.6.1.5 Causas y medidas de corrección de cavitación en rodets Francis

En base a estudios y a la experiencia, se plantean medidas de corrección a las posibles causas del problema de picadura por cavitación en rodets Francis, con la finalidad de tomar medidas durante la reparación, que no solo ayuden a corregirlas, sino prevenirlas.

**Tabla 2-13:** Causas y medidas de corrección de cavitación en rodets Francis.

<i>Zona</i>	<i>Posible causa</i>	<i>Posibles medidas a tomar</i>
Lado de succión, cerca de la banda y del borde posterior	Presión general muy baja	Reducir las salidas
Borde delantero del álabe cerca de la banda en el lado de succión	Perfil o contorno del álabe inapropiado	Corregir el contorno o perfil
	Operación con cabezas mucho mayores a las de diseño	Modificar el perfil delantero si el rango de la cabeza es normal*
Borde delantero del álabe cerca de la banda en el lado de presión	Perfil del borde delantero inapropiado	Modificar el perfil delantero
	Operación con cabezas mucho menores a las de diseño	Modificar el perfil delantero si el rango de la cabeza es normal*
Borde posterior del álabe	Contorno del borde posterior inapropiado	Ajustar el contorno
Corona o borde delantero	Operación por periodos extendidos	Reducir la carga de operación
En las entradas en la corona	Discontinuidades en la corona	

\*El rango normal de la cabeza de presión para una turbina Francis es desde el 25% al 10% por encima de la cabeza nominal.

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (Duncan, 2000, pág. 39)

### 2.6.2 Reparación mediante adhesión de cerámicos

Como métodos alternativos de reparación cuando únicamente existe desgaste producto de la cavitación del material se utilizan cerámicos para relleno, Figura 2-47, los cuales ofrecen una buena resistencia a la cavitación, corrosión y erosión, además de una mejora en la eficiencia del rodete (Belzona, 2013, pág. 1).

Frente a los principales problemas que ocasionan las reparaciones por soldadura como aceleración de la cavitación futura y esfuerzos residuales, las reparaciones con polímeros presentan una solución viable por sus características. Entre sus principales ventajas tenemos: duraderos (resisten entornos industriales), no se contraen (reparación permanente), liso (reduce la turbulencia), resistencia al impacto (mínimas reparaciones correctivas), resistencia a la abrasión (extiende la vida de servicio), aplicación en frío

(seguro), longevidad (resiste el paso del tiempo) y alta adhesión (asegura una larga vida en servicio (Belzona, 2012, pág. 6)).



**Figura 2-47:** Reparación de álabes mediante cerámicos.

**Fuente:** Central Hidroeléctrica San Francisco

Existen dos variedades de cerámicos, las pastas que sirven para reconstruir y los recubrimientos que proporcionan protección. Cuando se combinan se detiene el daño y se garantiza la protección del equipo a largo plazo. Esta técnica evita la necesidad de utilizar herramientas y equipos especializados y reduce los periodos de inactividad, ya que la aplicación se puede realizar de forma sencilla con la mano o aerosol. Los recubrimientos y compuestos se aplican a temperatura ambiente, eliminando la necesidad de trabajo en caliente (Belzona, 2013, págs. 1,2).

Para reparación de rodetes se utilizan 3 productos de la serie 1000 de Belzona: 1131, 1321 y 1812, sus propiedades se indican en la Tabla 2-14.

**Tabla 2-14:** Tipos de Belzona usados en reparación de rodetes

<i>Belzona</i>	<i>Características</i>
1131	Un compuesto epoxi de 2 partes con propiedades auto lubricantes para la reparación de metales, la creación de superficies de baja fricción y la protección de los sistemas de lubricación contra el desgaste y agarrotamiento en caso de pérdida de lubricación. Tiene excelente resistencia química y se adhiere a casi cualquier superficie rígida sin necesidad de trabajo en caliente.
1321	Un recubrimiento epoxi relleno de cerámica de 2 partes, diseñado para proporcionar resistencia contra la erosión y la corrosión de superficies metálicas. Este recubrimiento epoxi libre de solventes tiene excelente resistencia química y se adhiere a casi cualquier superficie rígida.
1812	Un material compuesto dúo a base de epoxi, que combina agregados de cerámica resistentes a la abrasión extremadamente duros y estrechamente compactos en un aglutinador polimérico para la reparación y protección de equipos dañados por la abrasión de partículas finas.

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (Belzona, s.f.)

## 2.7 Control de calidad aplicado al proceso de reparación

El control de calidad en el proceso de reparación es un aspecto muy importante, ya que permite determinar si los rodets cumplen con los estándares de calidad establecidos en normas, asegurando así su integridad estructural. Se utilizarán principalmente para el control ensayos no destructivos, ensayos destructivos y ensayos metalográficos. Los ensayos no destructivos permitirán detectar defectología en el material y realizar las correcciones respectivas si procede. Los ensayos destructivos permitirán evaluar el estado del material y estudiar los cambios producidos. Los ensayos metalográficos permitirán evaluar las transformaciones microestructurales que ha sufrido el material.

### 2.7.1 Control mediante ensayos no destructivos (END)

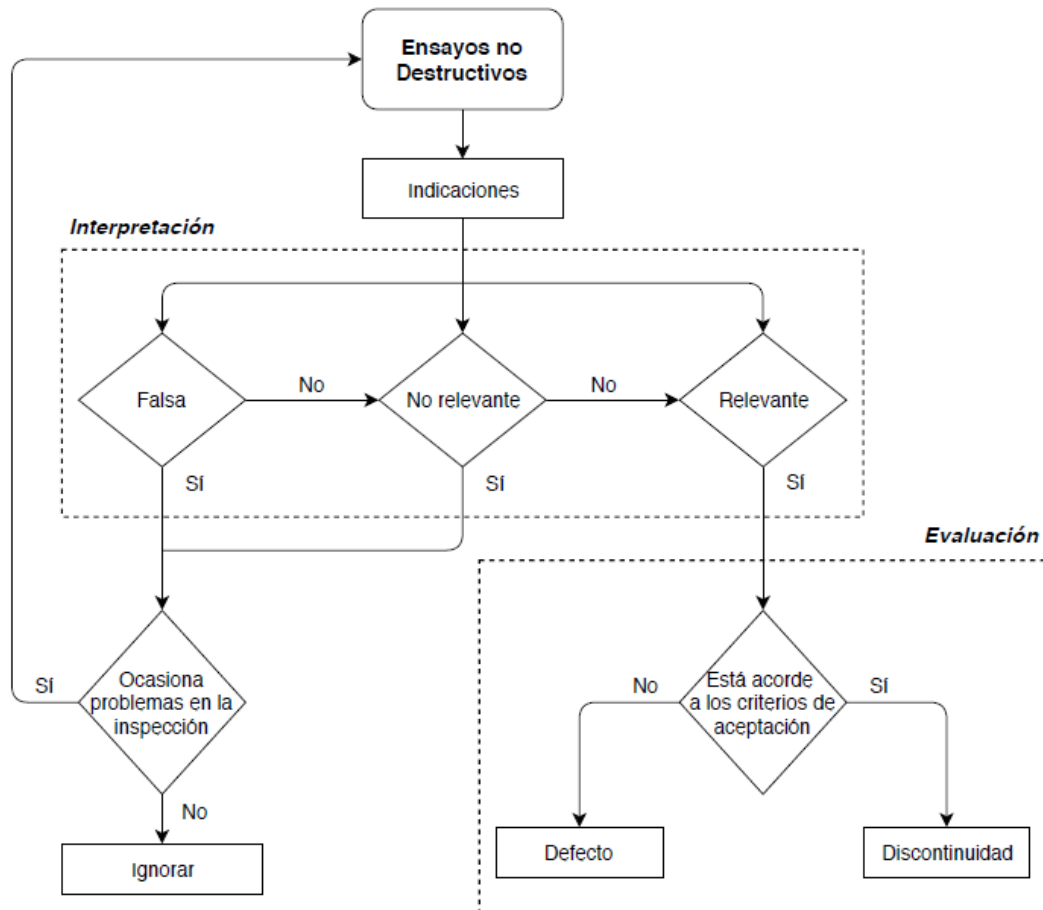
Se conoce como ensayo no destructivo a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades: físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Estos ensayos implican un daño imperceptible o nulo (Caisaguano, 2013, pág. 33).

Existen métodos superficiales (VT y PT), métodos subsuperficiales (MT) y métodos volumétricos (UT) para determinar la defectología interna.

La importancia de los END radica en el análisis de las indicaciones encontradas para determinar en base a criterios de aceptación si se aceptan o rechazan. Para lo cual es importante definir conceptos como indicación, discontinuidad y defecto.

Una indicación es la respuesta o evidencia de una discontinuidad resultante de la aplicación de un ensayo no destructivo, las indicaciones se clasifican en: falsas, no relevantes y relevantes. Una discontinuidad es una interrupción en la estructura física normal del material o producto. Un defecto es una discontinuidad cuyo tamaño, forma, orientación, ubicación o propiedades son inadmisibles para alguna norma específica (Fernández, 2005, pág. 1). En el Gráfico 2-1, se indica el proceso de interpretación y evaluación de indicaciones encontradas con END.





**Gráfico 2-1:** Interpretación y evaluación de indicaciones END.

Realizado por: Autores

Las indicaciones falsas se producen por una mala práctica o mala ejecución de la técnica del ensayo no destructivo, las indicaciones no relevantes por lo general son producidas por la geometría de la pieza que se examina o también están dentro de los parámetros aceptables y las indicaciones relevantes son aquellas que están presentes en el material y deben ser evaluadas.

Los ensayos no destructivos son herramientas básicas para la evaluación de la integridad de un equipo o parte industrial. La calidad de los ensayos está directamente relacionada con la calidad de trabajo de quien brinda el servicio, un ensayo es fiable cuando es realizado por personal calificado (Caisaguano, 2013, pág. 34).

#### 2.7.1.1 Inspección visual (VT)

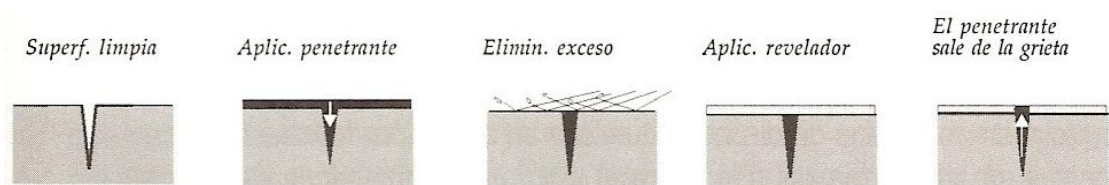
Existen dos formas de realizar el ensayo de inspección visual: prueba visual directa y prueba visual remota.

*Pruebas visuales directas:* se pueden usar para las pruebas visuales focales cuando el acceso es suficiente para colocar el ojo dentro de los 600 mm de la superficie que se va a probar y en un ángulo no inferior a 30° con respecto a la superficie que se va a analizar. Los espejos se pueden usar para mejorar el ángulo de visión, y se pueden usar ayudas tales como lentes de aumento, endoscopio y fibra óptica para ayudar en las pruebas. La pieza o componente específico bajo prueba inmediata se iluminará, si es necesario, con iluminación auxiliar, para obtener un mínimo de 160 lx para pruebas visuales generales y un mínimo de 500 lx para pruebas visuales locales (CCH 70-4, 2014, pág. 29).

*Pruebas visuales remotas:* cuando las pruebas visuales directas no se pueden utilizar, las pruebas visuales remotas sustituirán las primeras, usando ayudas visuales como endoscopios y fibra óptica, acopladas a cámaras u otros instrumentos adecuados (CCH 70-4, 2014, pág. 29)

#### 2.7.1.2 Tintas penetrantes (PT)

La inspección por líquidos penetrantes es un ensayo que se utiliza para detectar e identificar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales examinados (Sagñay & Pilamunga, 2012, pág. 11). El procedimiento, Figura 2-48, se basa en que la aplicación de un líquido aplicado sobre la superficie limpia de la pieza penetre en las discontinuidades que afloran a la superficie debido al efecto capilar, de forma que, al limpiar el exceso de líquido de la superficie, quede solamente el líquido introducido en las discontinuidades. Al salir posteriormente ese líquido, ayudado normalmente por la acción de un agente denominado revelador, señala sobre la superficie las zonas en las que existen discontinuidades (Serrano, 2007, pág. 2).



**Figura 2-48:** Procedimiento de ensayo de tintas penetrantes.

Fuente: (Serrano, 2007, pág. 2)

El campo de aplicación más frecuente de estos ensayos es la inspección de metales no ferromagnéticos (aluminio y sus aleaciones, aceros inoxidables, cobres, bronce, latones), los metales ferromagnéticos (aceros al carbono y aleados) también se pueden inspeccionar por líquidos penetrantes, pero normalmente suele ser más ventajoso emplear

el método de ensayo no destructivo de partículas magnéticas, que es mucho más sensible en estos materiales. Durante la reparación de rodetes este ensayo es fundamental al permitir la detección de defectos de manera rápida y sencilla para su respectiva corrección en caso de ser necesario, Figura 2-49.



**Figura 2-49:** Ensayo de tintas penetrantes rodete Pelton.

Fuente: Autores

En este ensayo se pueden utilizar diferentes tipos y métodos de penetrantes, su uso depende de la aplicación. En la Tabla 2-15, se indica su clasificación acorde a la ASTM.

**Tabla 2-15:** Clasificación de tipos y métodos de tintas penetrantes.

<i>Tipo I - Examinación con penetrante fluorescente</i>	
Métodos	Descripción
A	Lavable en agua
B	Post-emulsificante, liofílico
C	Lavable en solvente
D	Post-emulsificante, hidrofílico
<i>Tipo II - Examinación con penetrante visible</i>	
Métodos	Descripción
A	Lavable en agua
C	Lavable en solvente

Realizado por: Autores

Fuente: (ASTM A165, 1995, pág. 2)

La técnica de líquidos penetrantes es ampliamente usada y tiene sus ventajas y limitaciones, tal como se indica en la Tabla 2-16.

**Tabla 2-16:** Ventajas y limitaciones de ensayo de tintas penetrantes.

<i>Ventajas</i>	<i>Limitaciones</i>
Es un ensayo que permite ensayar toda la superficie de la pieza.	
No importa el tamaño o forma de la pieza.	Solo detecta discontinuidades abiertas a la superficie y no puede detectar discontinuidades subsuperficiales.
No necesita equipos complejos o caros.	No se puede aplicar a materiales porosos.
Puede realizarse de forma automatizada o manual, en taller o en obra.	Las superficies a ensayar tienen que estar completamente limpias.
Puede realizarse donde no hay suministro de electricidad o agua.	
Se puede aplicar a una amplia gama de materiales.	

**Realizado por:** Autores

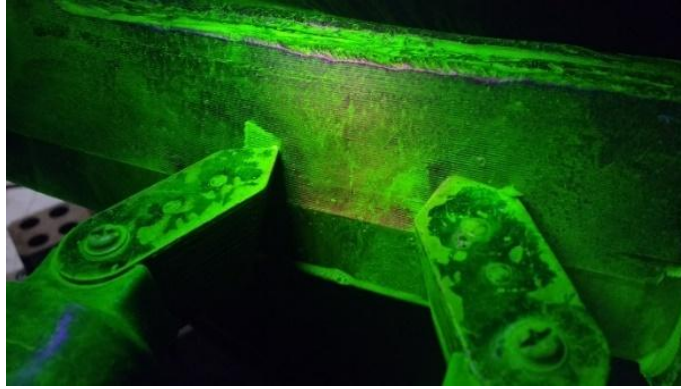
**Fuente:** (Serrano, 2007, pág. 7)

El tiempo de penetración es un punto muy importante, deberá ser el necesario para que el líquido penetrante se filtre por cualquier discontinuidad, por pequeña que sea. Este tiempo puede oscilar entre 5 y 60 minutos. Se establecerá en cada caso en función del material a ensayar, el tipo de discontinuidad y las recomendaciones del fabricante (Serrano, 2007, pág. 4).

### 2.7.1.3 *Partículas magnéticas*

Ensayo no destructivo que se realiza con el objetivo de encontrar defectos superficiales y subsuperficiales, y es aplicable para materiales ferromagnéticos, mientras que en aceros austeníticos no es aplicable; y cuando es usado para aceros austeníticos-ferríticos (dúplex) se deben establecer las condiciones del ensayo.

Las superficies para inspeccionar deben estar libres de aceite, grasa, arena, incrustaciones, óxido, etc., o irregularidades que puedan afectar la distribución del líquido y la evaluación de la prueba. Cuando el ensayo se aplica en superficies terminadas puede sufrir daño por algunos métodos de magnetización (golpes de arco superficiales); además, para discontinuidades pequeñas, la superficie deberá ser preparada más cuidadosamente (CCH 70-4, 2014, pág. 41).



**Figura 2-50:** MT en rodete Francis de la Central Hidroeléctrica Agoyán.

**Fuente:** Autores

El ensayo se lleva a cabo en ausencia de luz blanca, pero con cierta cantidad de luz ultravioleta (Figura 2-50) definida por la norma aplicable; la magnetización se la realiza mediante un yugo magnético conectado a un generador que generará el campo magnético necesario, para en lo posterior aplicar las partículas fluorescentes y así realizar la examinación y evaluación de los defectos encontrados en la superficie; para finalizar el ensayo se debe desmagnetizar la superficie.

**Tabla 2-17:** Ventajas y limitaciones de ensayo de partículas magnéticas.

<i>Ventajas</i>	<i>Limitaciones</i>
Rápido y económico.	Equipo caro.
Menor grado de limpieza.	Requiere energía eléctrica.
Revela discontinuidades en la superficie.	No tiene gran capacidad de penetración.

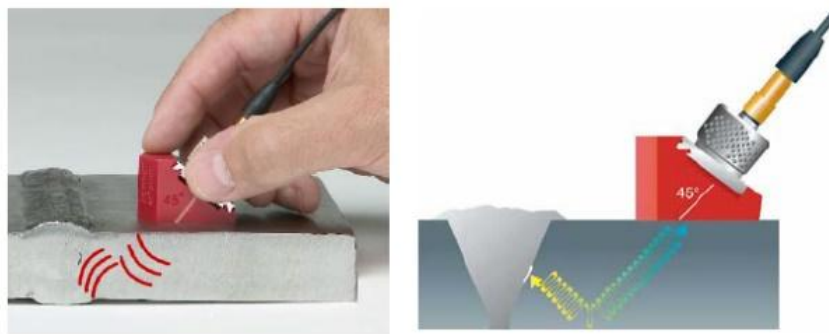
**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (Romero & Proboste, 2013, pág. 4)

#### 2.7.1.4 Ultrasonido

La inspección por ultrasonido es un método no destructivo en el cual un haz o un conjunto de ondas de alta frecuencia son introducidos en los materiales para la detección de fallas en materiales metálicos y no metálicos. Las ondas que viajan a través del material; van disminuyendo paulatinamente y son reflejadas a la interfaz (superficie de contacto). El haz reflejado es analizado y mostrado para definir la presencia y localización de fallas y discontinuidades (Campaña, 2010, pág. 4).

El principio de funcionamiento del método pulso-eco que es el más utilizado, se basa en la porción reflejada del sonido para evaluar los defectos, Figura 2-51. El cabezal piezoeléctrico funciona tanto como emisor como receptor. Como la energía recibida es mucho más débil que a emitida, aquí no puede operarse sobre la base de sonido continuo, se emplean exclusivamente impulsos de sonido. Un impulso eléctrico de cortísima duración genera una análoga onda ultrasónica, inmediatamente después, mientras aún se está propagando la onda el mismo oscilador está listo para la recepción. La onda penetra el material hasta que, como resultado de una superficie limite, tiene lugar una reflexión total o parcial (Rimoldi & Mundo, 2012, pág. 33).



**Figura 2-51:** Ultrasonido - Método pulso-eco.

**Fuente:** (Rimoldi & Mundo, 2012, pág. 22)

La técnica de ultrasonido es ampliamente utilizada, tiene sus ventajas y limitaciones, tal como se indica en la Tabla 2-16.

**Tabla 2-18:** Ventajas y limitaciones de ensayo de ultrasonido.

<i>Ventajas</i>	<i>Limitaciones</i>
Detección de defectos internos.	Costo muy elevado del equipado.
Resultados inmediatos.	Personal calificado y experiencia.
Alta capacidad de penetración.	No apto para superficies delgadas.

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (Romero & Proboste, 2013, pág. 4)

En la actualidad, el ultrasonido convencional ha sido reemplazado por el arreglo de fases (PA) para la inspección de rodets, Figura 2-52, consiste en una representación gráfica de los defectos. Este método, principalmente combina 3 tipos de representaciones: A, B y S (Figura 2-53).



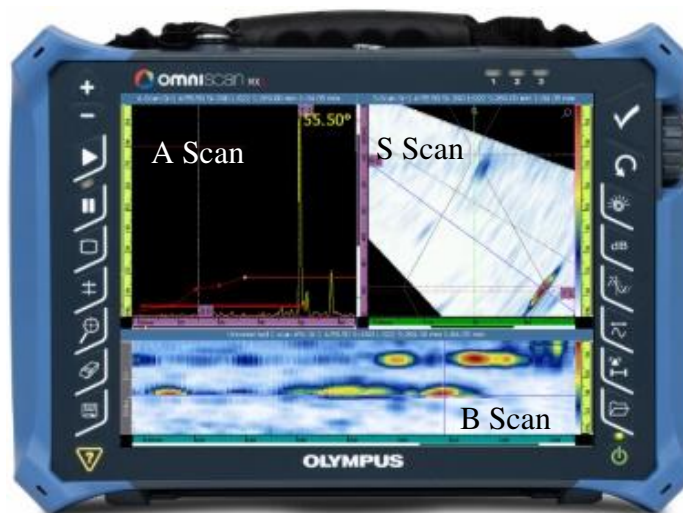
**Figura 2-52:** Inspección de rodete Pelton con ultrasonido PA.

Fuente: Autores

La representación A muestra la cantidad de energía recibida como función del tiempo. Las cantidades relativas de energía son presentadas en el eje vertical mientras que el tiempo transcurrido es presentado en el eje horizontal (Rimoldi & Mundo, 2012, pág. 28).

La representación B genera un perfil correspondiente a la sección transversal de la pieza que se está analizando. El tiempo de “viaje” de la onda es visualizado en el eje vertical mientras que en la posición del cabezal es representada en el eje horizontal (Rimoldi & Mundo, 2012, pág. 29).

La representación tipo S corresponde a una vista de 2 dimensiones, que enlaza las características de un palpador de arreglo de fase con la profundidad de la pieza inspeccionada. Uno de los ejes es la distancia proyectada y el otro es el recorrido del ultrasonido. La vista de dos dimensiones representa el rango de barrido, un sector circular (Romero & Proboste, 2013, págs. 18-19).



**Figura 2-53:** Visualización de representaciones A, B y S Scan.

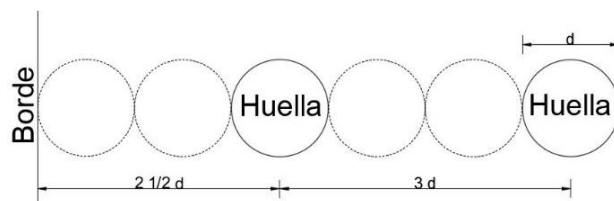
Fuente: Olympus MX2 Training Program

### 2.7.1.5 Dureza

Se entiende por dureza la propiedad de la capa superficial de un material de resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, en presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro cuerpo, más duro, el cual no sufre deformaciones residuales (indentador), de determinada forma y dimensiones (Calle & Henao, 2009, pág. 1). Existen diferentes escalas para la medición de dureza y entre las principales tenemos: Brinell, Rockwell y Vickers.

#### *Escala Brinell*

En la escala Brinell los indentadores serán bolas de carburo de tungsteno de cuatro diámetros permitidos (1, 2.5, 5 y 10 mm). La distancia entre los centros de dos indentaciones adyacentes debe ser al menos tres veces el diámetro de la indentación media. La distancia desde el centro de cualquier indentación a un borde de la probeta debe ser al menos dos veces y medio el diámetro de la indentación media, tal y como se indica en la Figura 2 (ASTM E10-15 pág. 5).



**Figura 2-54:** Distancia entre indentaciones Brinell.

Fuente: Autores

La carga del ensayo Brinell estará en función del diámetro de bola que se utilice para el ensayo.

Esta escala es utilizada cuando se desea medir la dureza de: acero estructural y otras secciones laminadas, la mayor parte de las fundiciones, incluyendo el acero, hierro fundido y aluminio, y la mayor parte de los fraguados (Ordóñez, 2003, p. 21).

#### *Escala Rockwell*

Existen dos tipos de indentadores para dureza Rockwell, bola de acero de 1/16 in y punta de diamante, su uso depende de la escala que se desee utilizar. La carga del ensayo está en función de la escala a utilizarse, la Tabla 2-19 indica los parámetros.



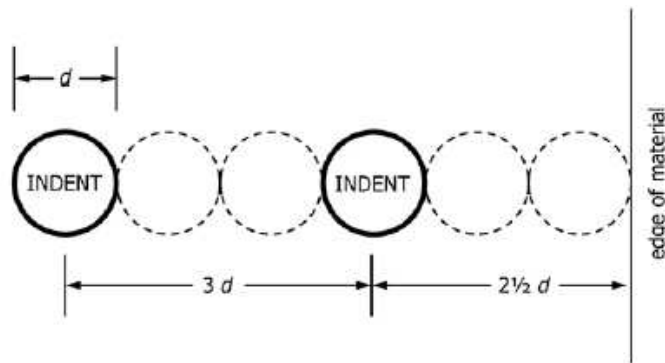
**Tabla 2-19:** Carga e indentadores de escalas Rockwell.

Símbolo de escala	Indentador	Fuerza total del ensayo (kgf)
B	Bola de acero de 1/16 in	100
C	Punta de diamante	150
A	Punta de diamante	60

Realizado por: Autores

Fuente: (ASTM E18-15, p. 4)

La distancia entre los centros de dos indentaciones adyacentes debe ser al menos tres veces el diámetro de la indentación media. La distancia desde el centro de cualquier indentación a un borde de la probeta debe ser al menos dos veces y medio el diámetro de la indentación media, tal y como se indica en la Figura 2-55 (ASTM E384-11, pág. 7).



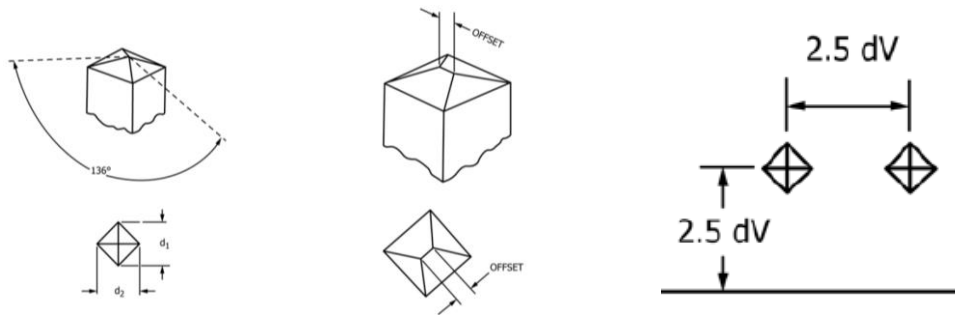
**Figura 2-55:** Distancia indentaciones Rockwell.

Fuente: (ASTM E18-15, pág. 7)

Esta escala es utilizada cuando se desea medir la dureza de carburo cementado, cerámicas, aceros, metales no ferrosos, plásticos, piedras de amolar. Se puede medir dureza del material, el efecto del tratamiento térmico, las profundidades de capas carburizadas o descarburizadas y capa endurecida por flama, efecto de endurecimiento y el resultado de dureza de la deposición (Mitutoyo, 2010, p. 2).

### *Escala Vickers*

El indentador para esta escala es un diamante de forma piramidal de base cuadrada con ángulos de cara de  $136^{\circ}$ . Es necesario garantizar que el espacio entre las indentaciones sea lo suficientemente grande para que las pruebas adyacentes no interfieran entre sí. En la Figura 2-56, se indica el espacio mínimo recomendado entre pruebas separadas y la distancia mínima entre una indentación y el borde de la muestra (ASTM E384-11, pág. 8).



**Figura 2-56:** Indentador Vickers y distancia entre indentaciones.

Fuente: (ASTM E384-11, pp. 2, 9)

La carga de esta escala varia en dependencia de si se realizara un ensayo de macro dureza o micro dureza. En la Tabla 2-20, se indican los parámetros.

**Tabla 2-20:** Carga escala Vickers.

Rango	Fuerza de la prueba
Micro	$9.807 \times 10^{-3} \text{ a } \leq 9.807 \text{ N}$ (1 a $\leq 1000\text{gf}$ )
Macro	$> 9.807\text{a } \leq 1176.80 \text{ N}$ ( $> 1$ a $\leq 120 \text{ kgf}$ )

Realizado por: Autores

Fuente: (ASTM E384-11, p. 3)

Cuando la dureza es medida a nivel macro, se puede utilizar para medir:

- Carburo cementado, cerámicas, aceros, metales no ferrosos.
- Placas delgadas, láminas metálicas, niquelado, objetos miniatura.
- Resistencia de materiales, efecto del tratamiento térmico, profundidades de capas carburizadas o descarburizadas y capa endurecida por flama, efecto de endurecimiento y la dureza resultante de la soldadura o de posición (Mitutoyo, 2010, p. 2).

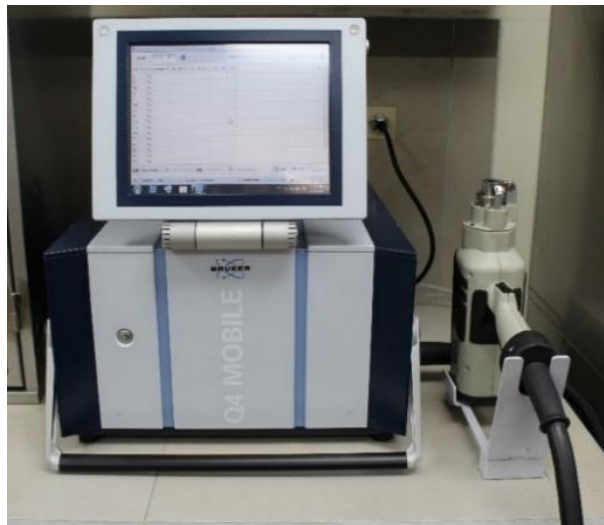
Cuando se realiza medición de micro dureza, se utiliza para:

- Sellos de circuitos integrados, aceros, metales no ferrosos.
- Plástico delgado, láminas metálicas, niquelado, recubrimientos, capas de superficie, metales laminados.
- Efecto del tratamiento térmico y profundidades de capas carburizadas y capa endurecida por flama (Mitutoyo, 2010, p. 1).

### 2.7.1.6 Espectrometría

La espectrometría de emisión es una técnica espectroscópica que analiza las longitudes de onda de los fotones emitidos por los átomos o moléculas durante su transición desde un estado excitado a un estado de inferior energía. Cada elemento emite un conjunto característico de longitudes de onda discretas en función de su estructura electrónica. Mediante la observación de estas longitudes de onda puede determinarse la composición elemental de la muestra (Pérez, s.f.).

Para la determinación de la composición química mediante esta técnica se utilizan espectrómetros de emisión por chispa, Figura 2-57, los cuales presentan ventajas ante otros tipos al ser capaces de cuantificar el porcentaje de carbono.



**Figura 2-57:** Espectrómetro de emisión por chispa.

Fuente: Autores

### 2.7.2 Control mediante ensayos destructivos (ED)

Un ensayo destructivo es aquel que deteriora la pieza que inspecciona, pero dependiendo del tipo de ensayo, la pieza experimentara desde una leve marca, a una deformación permanente o incluso su rotura parcial o total. Las ventajas que tienen estos ensayos son que permiten obtener información detallada sobre el comportamiento estructural de un elemento y extraer conclusiones sobre factores críticos. (Federación de enseñanza de CC.OO., 2011, págs. 1, 3).

Para los ensayos destructivos, suelen usarse probetas construida con el material que se desea ensayar y que servirán para una sola aplicación. Una probeta es una porción del material a ensayar con una forma y unas dimensiones determinadas que se encuentran normalizadas estas probetas y/o especímenes sufren cambios irreversibles como producto de la prueba. Las probetas se usan una vez y se descartan. En muchos casos, las probetas deben ser maquinadas y modificadas para adecuarse a estándares antes de la prueba en sí (Sheila, 2011).

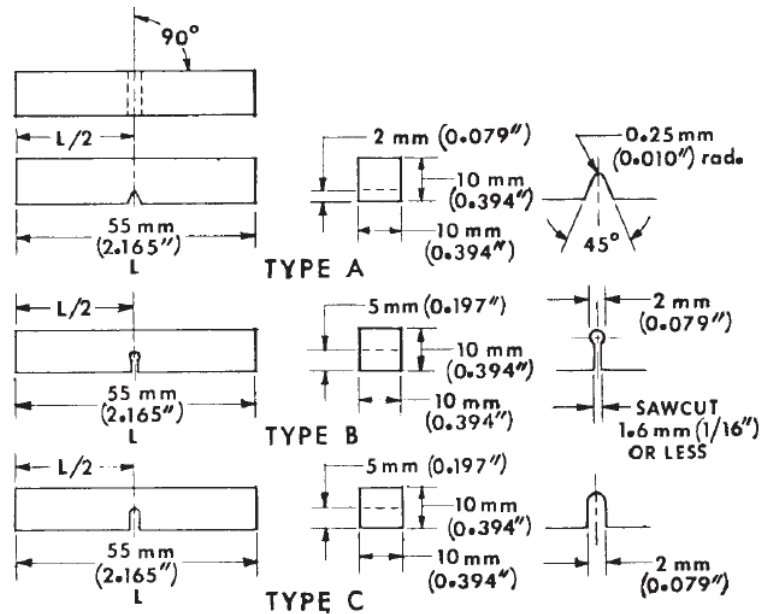
#### 2.7.2.1 *Ensayo de tracción*

El objetivo del Ensayo de Tracción es proporcionar información sobre la resistencia y la ductilidad de los materiales bajo tensiones de tracción, y es aplicable a materiales metálicos en cualquier forma a temperatura ambiente, y servirá para obtener el límite elástico, resistencia a la tracción, porcentaje de elongación y reducción del área, para dicho ensayo se utiliza una máquina universal, probeta a ensayar (probetas planas o circulares), agarres adecuados a la probeta, extensómetro. Se debe tener en cuenta que, para garantizar el esfuerzo de tracción axial dentro de la longitud del calibre, el eje de la probeta de prueba debe coincidir con la línea central de las cabezas de la máquina de prueba (ASTM E8/E8M, 2013).

#### 2.7.2.2 *Ensayo de impacto Charpy*

Esta prueba consiste en romper una pieza de prueba con muescas con un solo golpe de un péndulo oscilante. La muesca en la pieza de prueba tiene una geometría especificada y está ubicado en el medio entre dos soportes, opuesto a la ubicación que se ve afectada en la prueba. La energía absorbida en la prueba de impacto, la expansión lateral y el aspecto de la fractura por corte son normalmente determinados. Debido a que los valores de impacto de muchos materiales metálicos varían con la temperatura, se deben realizar pruebas a una temperatura determinada. Cuando esta temperatura no sea la temperatura ambiente, la pieza de prueba se calentará o enfriado a esa temperatura, bajo condiciones controladas. La prueba de impacto de péndulo de Charpy se usa a menudo en pruebas rutinarias de aceptación o rechazo de componentes de alto rendimiento en entornos industriales (ISO 148-1, 2016, pág. 3).

El tipo de probeta elegida depende de las características del material a ensayar. Un espécimen dado puede no ser igualmente satisfactorio para metales blandos no ferrosos y aceros endurecidos; por lo tanto, se reconocen muchos tipos de especímenes (ASTM E23, p. 2). Para el caso de los metales ferrosos como aceros se tienen las siguientes probetas:



**Figura 2-58:** Probetas ensayo de impacto para metales ferrosos  
Fuente: (ASTM E23, p. 3)

Las variaciones permisibles en las probetas están indicadas en la Tabla 2-21.

**Tabla 2-21:** Variaciones permisibles en dimensiones de probetas de impacto.

Muesca de longitud hasta el borde	$90^{\circ} \pm 2^{\circ}$
Los lados adyacentes deben estar a	$90^{\circ} \pm 10$ min
Dimensiones de la sección transversal	$\pm 0.075$ mm ( $\pm 0.003$ in)
Longitud de la muestra (L)	+0, -2.5 mm (+0, -0.100 in)
Centrado de muesca (L / 2)	$\pm 1$ mm ( $\pm 0.039$ in)
Ángulo de muesca	$\pm 1^{\circ}$
Radio de muesca	$\pm 0.025$ mm ( $\pm 0.001$ in)
Profundidad de muesca:	
Muestra Tipo A	$\pm 0.025$ mm ( $\pm 0.001$ in)
Muestras Tipo B y C	$\pm 0.075$ mm ( $\pm 0.003$ in)
Requisitos de acabado	2 $\mu$ m (63 $\mu$ in) en superficie ranurada y cara opuesta; 4 $\mu$ m (125 $\mu$ in) en las otras dos superficies

Realizado por: Autores

Fuente: (ASTM E23, p. 3)

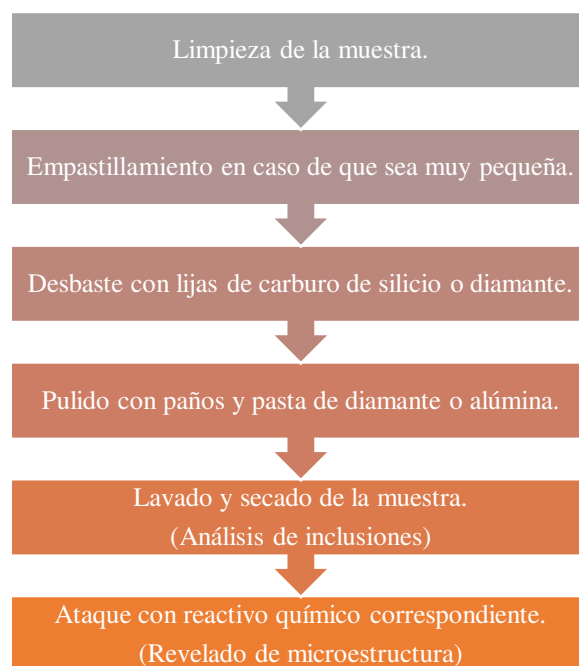
### 2.7.3 Control metalográfico

La metalografía es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación, buscando microestructura, inclusiones,

tratamientos térmicos a los que haya sido sometido, micro rechupes, con el fin de determinar si dicho material cumple con los requisitos para los cuales ha sido diseñado; además podemos hallar la presencia de material fundido, forjado y laminado. Podremos conocer la distribución de fases que componen la aleación y las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades (Federación de Enseñanza de CC.OO., 2011, pág. 1).

### 2.7.3.1 *Análisis microestructural*

El análisis microestructural se utiliza para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación con trabajos mecánicos, tratamientos térmicos y composición general. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales (Guzman, Análisis de aceros por microscopía óptica, 2013, pág. 16). La obtención de la microestructura se realiza a través de un microscopio, pueden ser microscopios metalográficos invertidos (luz) o microscopios electrónicos de barrido (electrones). Para que la microestructura sea observable es necesario realizar una preparación metalográfica previa (pulido espejo) en la muestra objeto de estudio, el proceso general se muestra en la Figura 2-59.



**Figura 2-59:** Preparación metalográfica – pulido espejo.

Fuente: Autores

Para el ataque químico existe una variedad de reactivos y su uso varía en función del material que se desea atacar, los principales reactivos se muestran en la Tabla 2-22.

**Tabla 2-22:** Reactivos utilizados para ataque químico.

Reactivo de ataque	Composición	Usos
Ácido nítrico (nital)	1-5 mL ácido nítrico blanco 100 mL alcohol metílico o etílico	En aceros al carbón para: a) oscurecer perlita y dar contraste entre colonias de perlita, b) para revelar las fronteras de perlita, c) para diferenciar la ferrita de la martensita.
Ácido pícrico (picral)	4 g ácido pícrico 100 mL de etil o alcohol de metilo	Para todos los grados de aceros al carbon recocidos, normalizados, templados, revenidor, esferoidizados y austenitizados. Para todos los aceros de baja aleación.
Villela's	5 mL ácido clorhídrico 1 g ácido pícrico 100 mL etanol	Aceros inoxidable. Acero de la serie 400: Fe, Cr (12-30), Ni(<6).
Ataque electrolítico	10 g ácido oxálico 100 mL agua	Aceros inoxidable. Acero de la serie 300: Fe, Cr (15-30), Ni(6-40), otros elementos (5%).
Cloruro férrico y ácido clorhídrico	5 g cloruro férrico 50 mL de ácido clorhídrico 100 mL de agua	Aceros austeníticos al níquel y aceros inoxidable.
Hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno	5 partes de hidróxido de amonio 5 partes de agua 2-5 partes de peróxido de hidrógeno	Generalmente empleado para cobre y sus aleaciones.
Persulfato de amonio	10 g persulfato de amonio 90 mL de agua	Cobre, laton, bronce, plata, níquel, bronce aluminico.
Reactivo de Palmerton	200 g óxido crómico 15 g sulfato de sodio 1000 mL agua	Reactivo general para zionc y sus aleaciones.
Molibdato de amonio	100 g ácido molíbdico (85%) 140 mL hidróxido de amonio 240 mL de agua 60 mL de ácido nítrico (luego de filtrar)	Ataque rapido para plomo y sus aleaciones, muy apropiado para remover la capa gruesa de metal trabajado.
Ácido hidrofúorico	0.5 mL ácido fluórico 99.5 mL de agua	Generalmente usado para aluminio y sus aleaciones.

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (Guzman, 2013, pp. 45-46)

### 2.7.3.2 *Análisis de inclusiones*

Determinar la cantidad de inclusiones y su tipo es de gran importancia, ya que estos agentes extraños y ajenos a la estructura metálica son el producto de la desulfuración y desoxidación del acero. Las inclusiones no permiten que el acero tenga una estructura uniforme y por tanto generan concentraciones de esfuerzos, en caso de existir zonas con gran número de inclusiones podría generarse el fallo del elemento al ser sometido a grandes esfuerzos (Lanas & Proaño, 2011, p. 60).

La cuantificación y clasificación de las inclusiones no metálicas se realiza acorde a la norma ASTM E45. La norma clasifica a las inclusiones en 4 tipos en base a su morfología (llamados tipos) y en 2 subcategorías en base a su diámetro o ancho (gruesa o delgada) (ASTM E45, 2005, p. 6). Los tipos se describen a continuación:

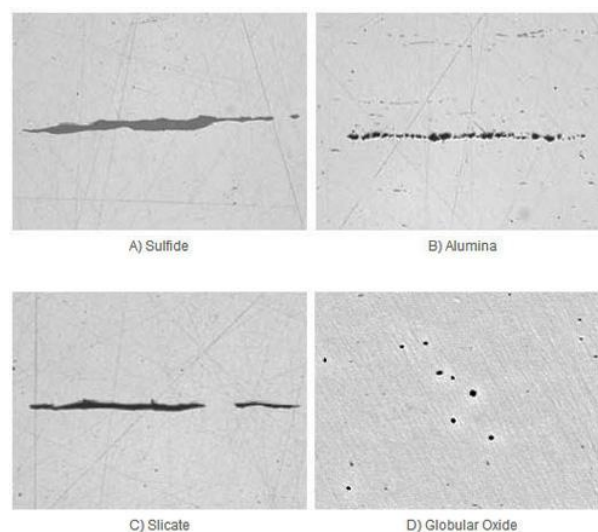
Tipo A (sulfuros): Comúnmente, los sulfuros se presentan como cadenas alargadas. Se diferencian de los otros tipos debido a su tonalidad ya que vistos con un microscopio y utilizando campo claro se ven en tonos grises, esto se debe a que los óxidos reflejan mucho menos luz que los sulfuros (Lanas & Proaño, 2011, pp. 60,61).

Tipo B (alúmina): Son cadenas discontinuas de partículas de óxidos, es decir agrupaciones de tres o más inclusiones alargadas en el plano de laminación. Este tipo de inclusiones tienen una desalineación menor a 15  $\mu\text{m}$  y una separación menor a 40  $\mu\text{m}$  (Lanas & Proaño, 2011, p. 61).

Tipo C (silicatos): Son cadenas continuas de partículas de óxidos, es decir inclusiones alargadas en el sentido de laminación (ASTM E45, 2005, p. 6).

Tipo D (óxidos globulares): Son de forma redondeada y se encuentran dispersos en la muestra, no forman cadenas (Lanas & Proaño, 2011, p. 62).

La diferencia entre los cuatro tipos de inclusiones se aprecia de manera clara en la Figura 2-60.



**Figura 2-60:** Tipos de inclusiones

a) Sulfuros, b) alúminas, c) silicatos, d) óxidos globulares.

**Fuente:** (Total Materia, 2012)



Para determinar si una inclusión corresponde a una subcategoría gruesa o delgada, se debe utilizar la tabla mostrada a continuación:

**Tabla 2-23:** Parámetros ancho y diámetro de inclusiones <sup>A</sup>

Tipo de inclusión	Serie delgada		Serie gruesa	
	Ancho min, $\mu\text{m}$	Ancho máx., $\mu\text{m}$	Ancho min, $\mu\text{m}$	Ancho máx., $\mu\text{m}$
A	2	4	>4	12
B	2	9	>9	15
C	2	5	>5	12
D	2	8	>8	13

A: Cualquier inclusión con dimensiones mayores que las máximas para la serie gruesa tiene que ser reportada como OVERSIZE acompañada de sus dimensiones.

Realizado por: Autores

Fuente: (ASTM E45, 2005, p. 7)

Existen 5 métodos de análisis de inclusiones, para los cuales es esencial utilizar un área de 160 mm<sup>2</sup> (0.25 in<sup>2</sup>).

**Método A (peores campos):** Se realizará un barrido en forma de S y se identificarán al menos 6 áreas a un aumento de 100X con el mayor número de inclusiones posibles (Lanas & Proaño, 2011, p. 62). Luego de la obtención de las imágenes, se debe medir o contar el número de inclusiones y clasificarlas acorde a su severidad y obtener un promedio Tabla 2-24.

**Tabla 2-24:** Números mínimos por niveles de severidad.

mm at 100X, o conteo				
Severidad	A	B	C	D <sup>C</sup>
0.5	3.7	1.7	1.8	1
1.0	12.7	7.7	7.6	4
1.5	26.1	18.4	17.6	9
2.0	43.6	34.3	32.0	16
2.5	64.9	55.5	51.0	25
3.0	89.8	82.2	74.6	36
3.5	118.1	114.7	102.9	49
4.0	149.8	153.0	135.9	64
4.5	189.8	197.3	173.7	81
5.0	223.0	247.6	216.3	100

C: La relación de aspecto máxima para inclusiones tipo D es 5:1.

Realizado por: Autores

Fuente: (ASTM E45, 2005, p. 7)

**Método B (longitud):** Se deberá medir y registrar todas las inclusiones con una longitud mayor o igual a 0.127 mm debe ser medida y registrada. La longitud de una inclusión debe ser redondeada a su inmediato inferior. Los resultados serán el promedio de la longitud de las inclusiones seguido de un superíndice que indique el número de inclusiones promediadas, excluyendo la más larga, que será reportada de forma individual

con un superíndice de *T* o *H* (delgado o grueso), una inclusión delgada tiene un ancho de 10  $\mu\text{m}$  o menor al 50% de la longitud total y una inclusión gruesa tiene un ancho de 30  $\mu\text{m}$  o mayor. Las inclusiones que no estén en el rango de 10 a 30  $\mu\text{m}$  no tendrán superíndice. Superíndices *d*, *vd* y *g* serán utilizados para inclusiones discontinuas, muy discontinuas o agrupadas respectivamente (ASTM E45, 2005, p. 14).

**Método C (óxidos y silicatos):** Se deberán examinar los campos en busca de la presencia de óxidos de alúmina no deformables y cadenas deformables de silicatos para clasificarlos por comparación. La cadena más larga de cada tipo de inclusión (*O* para óxidos de alúmina y *S* para silicatos) deberá ser reportada para cada muestra examinada (ASTM E45, 2005, p. 15).

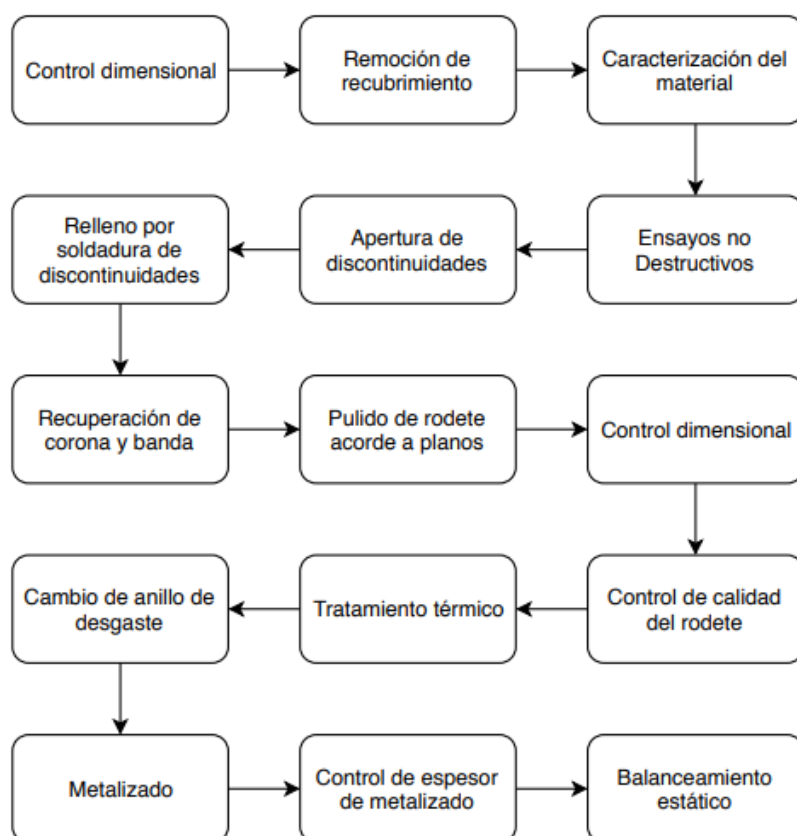
**Método D (bajo contenido de inclusiones):** Aplica para aceros con bajo contenido de inclusiones, los niveles de severidad deberán ser reportador en incrementos de  $\frac{1}{2}$ . La superficie se examinará en busca de inclusiones tipo A, B, C y D, y se comprará con los campos cuadrados de referencia. Los resultados de cada campo de comparación serán grabados y contabilizados (ASTM E45, 2005, p. 15).

**Método E (clasificación RAM):** Se utiliza para clasificar el contenido de inclusiones del acero de tal forma que refleje la severidad y frecuencia con que se encuentran los tipos de inclusiones B y D (ASTM E45, 2005, p. 17).

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

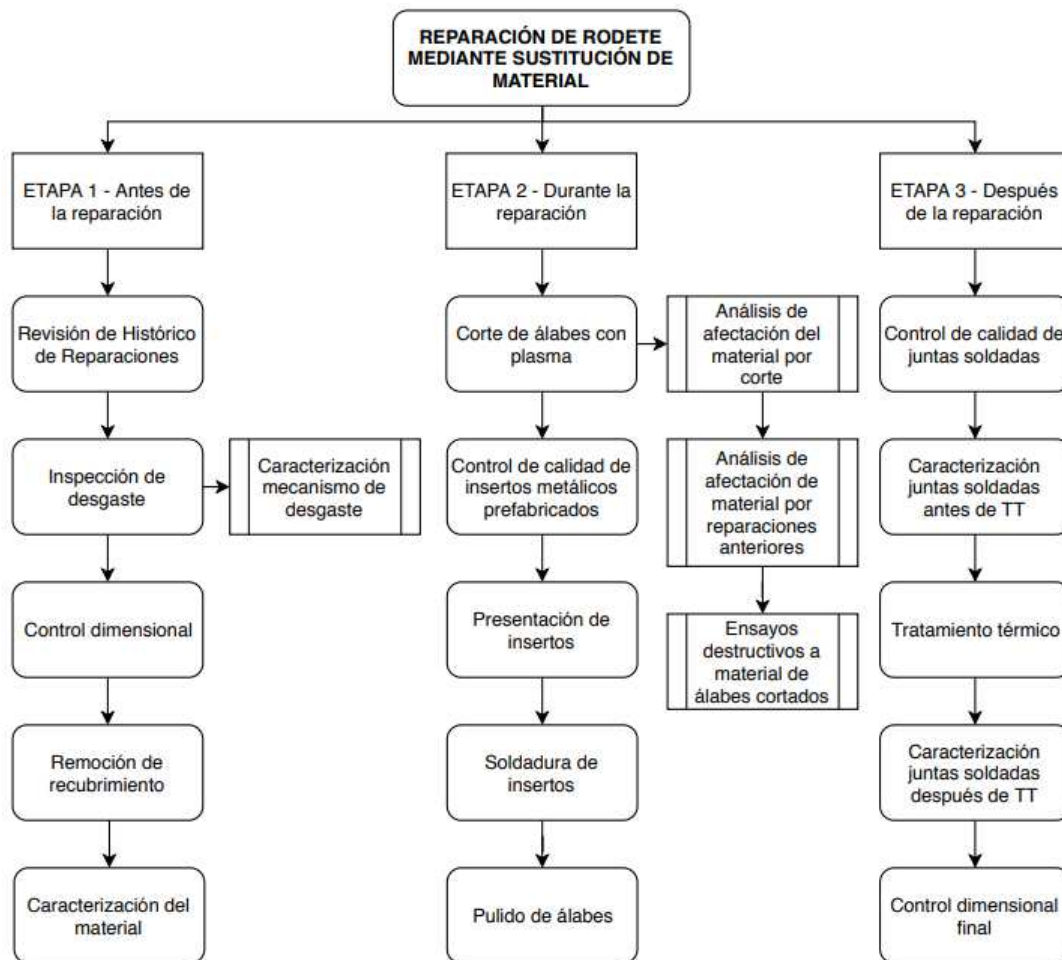
El proceso de reparación convencional de un rodete en el Centro de Recuperación de Turbinas y Partes Industriales CIRT, se indica en el Gráfico 3-1. Este proceso consiste en el relleno por soldadura de discontinuidades, el cual, como se indicó anteriormente es el más utilizado en esta industria. La presente investigación se centrará netamente en la reparación del rodete Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco mediante sustitución de material como una alternativa al método de reparación tradicional con la finalidad de incursionar en métodos más eficientes y que generen mejores resultados.



**Gráfico 3-1:** Procedimiento de reparación convencional de rodetes.

Fuente: Autores

Para este nuevo tipo de reparación se establecieron 3 etapas: antes de la reparación, durante la reparación y después de la reparación. El Gráfico 3-2, indica el diagrama de flujo del proceso de manera detallada y adicionalmente las actividades complementarias realizadas para sustentar la investigación en cada una de las etapas.



**Gráfico 3-2:** Procedimiento de reparación de un rodete por sustitución de material.

Fuente: Autores

### 3.1 Etapa 1: Antes de la reparación

La primera etapa comprende todas las actividades realizadas desde el momento en que el rodete es recibido en el CIRT hasta antes de iniciar la reparación. Esta etapa es de gran importancia, ya que previo a empezar la reparación del rodete es fundamental determinar el estado del mismo, basados en información de reparaciones anteriores y de controles como: inspección visual, control dimensional y caracterización del material (para realizar la caracterización es necesario retirar el metalizado). Cada una de las actividades de esta etapa es realizada bajo parámetros establecidos y registrada de manera adecuada.

#### 3.1.1 Revisión reparaciones previas en el rodete

**Propósito.-** La revisión del histórico de reparaciones es fundamental para conocer todos los trabajos que se han realizado previamente al rodete, estas reparaciones suelen ser

realizadas en campo. A continuación, se indicarán las reparaciones más relevantes realizadas en el rodete.

#### 3.1.1.1 *Reparación de fisura del álabe #04*

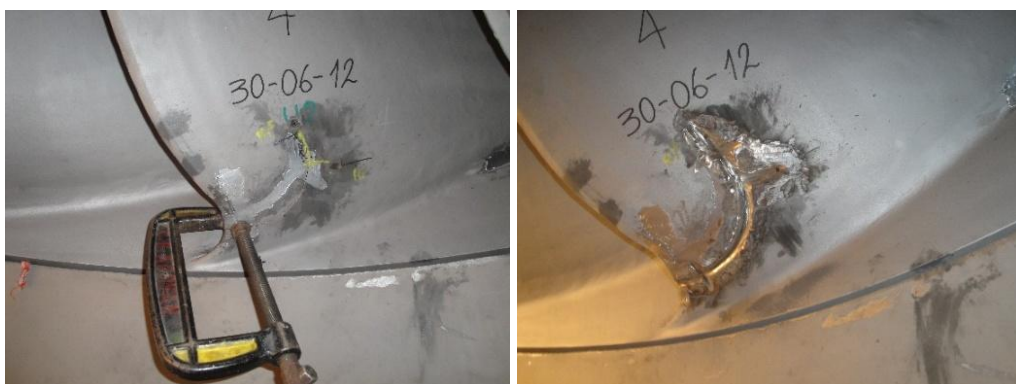
El álabe #4 presentó una fisura en la zona de la salida. La Figura 3-1 indica la fisura.



**Figura 3-1:** Fisura álabe #04 U2

**Fuente:** Central Hidroeléctrica San Francisco

En esta reparación, Figura 3-2, primero se determinó hasta donde se extiende la fisura en el material mediante ultrasonido y luego de ello se perforaron los extremos de la fisura para evitar su progreso. Luego de ello se sujetó la salida del álabe para evitar que al momento de la soldadura exista un desnivel entre las partes del álabe y finalmente se soldó y pulió la zona fisurada.



**Figura 3-2:** Reparaciones fisura álabe #04 U2

**Fuente:** Central Hidroeléctrica San Francisco

Luego de la reparación el material soldado no fue sometido a tratamiento térmico. Las zonas cavitadas del álabe alrededor de la fisura fueron rellenas con Belzona.

### 3.1.1.2 Reparación de fisura del álabe #08

El álabe # 8 presentó una fisura en la zona de la corona a la salida. En la reparación una vez determinada la extensión de la fisura en el material se procedió a la reparación mediante relleno por soldadura. En la Figura 3-3, se observa que se detectó mediante ensayos no destructivos una gran cantidad de discontinuidades pequeñas que fueron abiertas a la superficie para su posterior relleno.



**Figura 3-3 :** Reparación fisura álabe #08.

Fuente: Central Hidroeléctrica San Francisco

Al igual que en otras reparaciones, luego de la reparación el material soldado no fue sometido a tratamiento térmico.

### 3.1.1.3 Reparación de fisura del álabe #09

En el álabe #09 se encontró una fisura de gran longitud (310mm) en la zona de la salida. La figura Figura 3-4 indica la fisura.



**Figura 3-4:** Fisura álabe #09 U2

Fuente: Central Hidroeléctrica San Francisco



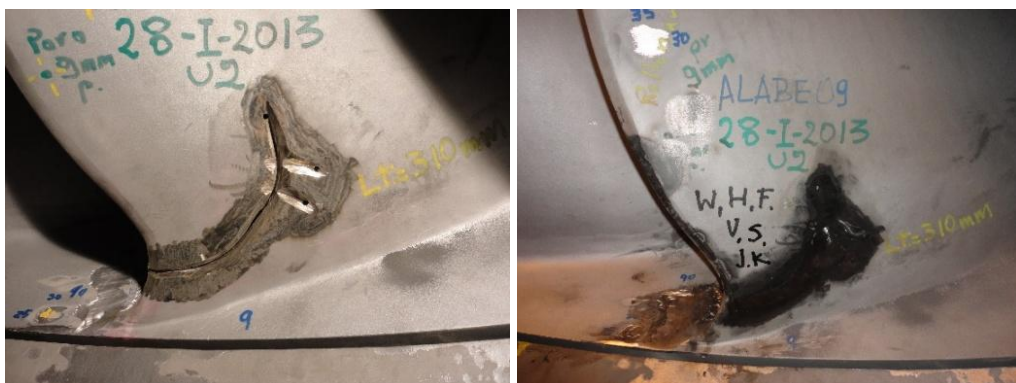
Durante la reparación se utilizaron END (tintas penetrantes y ultrasonido) para determinar la extensión de la fisura y perforar los extremos de esta con el objetivo de detener su avance.



**Figura 3-5 :** Determinación de extensión de fisura y perforación álabes #09 U2

Fuente: Central Hidroeléctrica San Francisco

Una vez determinada la zona de propagación de la fisura se procedió con la soldadura y pulido. Finalmente se colocó Belzona en la zona recuperada y zonas con cavitación cercanas a la reparación. Es importante señalar que no se realizó un tratamiento térmico luego de la reparación.



**Figura 3-6:** Reparación álabes #09 U2

Fuente: Central Hidroeléctrica San Francisco




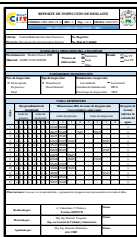
De 3 fisuras relevantes encontradas y reparadas en los álabes las tres se localizan en la zona cercana al borde de salida, lo cual es un indicio de que esta zona soporta el mayor daño en el rodete. Se conoce que estas fisuras han sido reparadas en múltiples ocasiones llegando a ser necesario el uso de “refuerzos”, para asegurar que la fisura no vuelva a aparecer por la acumulación de esfuerzos residuales en el material.

### 3.1.2 Inspección de desgaste

**Propósito.-** La inspección se realiza con la finalidad determinar la zona del rodete que han sufrido mayor desgaste y además observar si existe desprendimiento de metalizado en las diferentes zonas tanto en el lado de presión como de succión lo cual evidencia que dichas zonas son propensas al desgaste.

**Procedimiento.-** El procedimiento para la inspección está detallado en la Tabla 3-1.

**Tabla 3-1:** Procedimiento para inspección de desgaste.

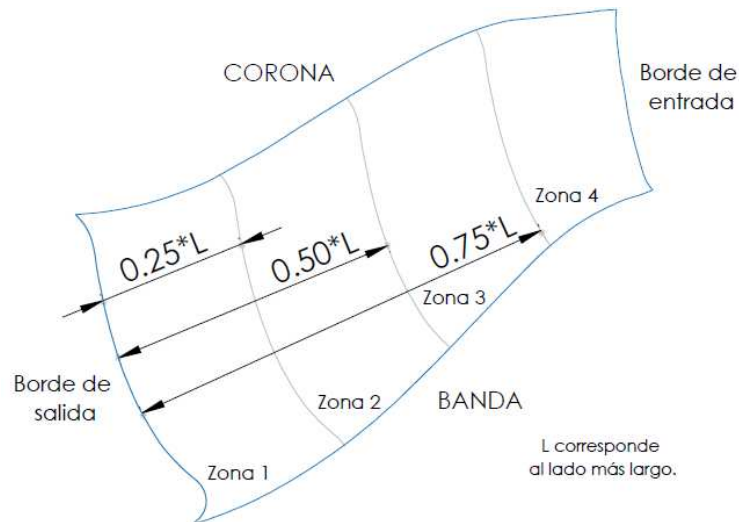
No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Limpieza	Remover todo tipo de impurezas, grasa y polvo.	Limpiador, guaípe.	5 min	
<i>Preparación del ambiente para el ensayo</i>					
2	Control de la iluminación	Conseguir la iluminación necesaria para ensayo general (160lx).	Luxómetro	5 min	
<i>Ejecución del ensayo</i>					
3	Posición de inspección	Inspeccionar el área con una separación máx. de 600mm y un ángulo mayor o igual a 30° con la horizontal.	Auxiliares visuales	2 min	
<i>Generación del reporte</i>					
4	Reporte	Tomar datos sobre desprendimiento de metalizado en lados de presión y succión. Anotar dimensiones H y L de desgates más representativos de las diferentes zonas.	Registro: CIRT-REG-ID-01.	60 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

**Zonas de inspección.-** El álabe se ha dividido en 4 zonas de acuerdo a la longitud máxima del mismo, en la Figura 3-7 se muestra la división.





**Figura 3-7:** Zonas de inspección de desgaste de los álabes.




Fuente: Autores

### 3.1.3 Control dimensional




**Propósito.-** El control dimensional tiene como objetivo cuantificar el desgaste que han sufrido los álabes del rodete, específicamente en la entrada y salida.

**Procedimiento.-** El control dimensional es realizado a través de plantillas, el procedimiento detallado se muestra en la Tabla 3-2.

**Tabla 3-2:** Procedimiento para control dimensional.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Limpieza	Remover todo tipo de impurezas y dejar el rodete completamente limpio.	Guaípe, guantes.	10 min	
<i>Ejecución del ensayo</i>					
2	Señalado de puntos de control	Ubicar los puntos de control con ayuda de los planos o por medio de plantillas de control de perfil.	Juego de plantillas de control de perfil, marcador para metal, planos.	120 min	
3	Medición de luz entre álabes	En los puntos de control a la salida de los álabes medir con ayuda de un compás la distancia existente entre el lado de presión del álabe y el lado de succión del siguiente.	Compás.	120 min	

**Tabla 3-2 (Continúa):** Procedimiento para control dimensional.

4	Posicionamiento de plantillas para control	Posicionar las plantillas en los puntos de control, y marcar el nivel donde serán ubicadas las plantillas para cuantificar el desgaste.	Juego de plantillas de control de desgaste.	60 min	
5	Medición de holgura	Medir la holgura existente usando linternas, la holgura existente deberá ser uniforme en todo su contorno.	Juego de plantillas de control de desgaste, juego de linternas.	120 min	
<i>Generación del reporte</i>					
6	Reporte	Registrar las lecturas y holguras de los diferentes puntos de control.	Formato CIRT-REG-CD-01.	15 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia



### 3.1.4 Remoción del recubrimiento.

**Propósito.-** La remoción del recubrimiento tiene como objetivo limpiar y preparar la superficie para realizar los Ensayos No Destructivos respectivos en el rodete.








**Documento de referencia.-** La remoción del recubrimiento (metalizado) se debe realizar de acuerdo con el documento CIRT-PRO-SJ-01.

**Procedimiento.-** La remoción del recubrimiento del rodete es realizado mediante el uso de esponja abrasiva, el procedimiento detallado se muestra en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3:** Procedimiento para Remoción del Recubrimiento.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación del área de trabajo</i>					
1	Ubicación del rodete	Posicionar al rodete de forma que sea accesible a todas las áreas necesarias.	Puente grúa 30 Ton, correas,	15 min	
2	Área de trabajo	Sellar el lugar de trabajo, debido a que se desprenden partículas a altas velocidades.	-	15 min	

**Tabla 3-3 (Continúa):** Procedimiento para Remoción del Recubrimiento.

3	Ventilación / Aspiración	Adecuar los sistemas de ventilación para los operadores, y los sistemas de aspiración.	Sistema de ventilación y aspiración.	-	
<i>Preparación del equipo y ambiente para el ensayo</i>					
4	Equipo de Sponge-Jet / Reciclador	Inspeccionar las líneas neumáticas, los elementos de seguridad. Controlar que la presión del sistema no supere los 8.6 bar (125 psi).	Sponge-Jet, reciclador	10 min	
5	Boquilla	Seleccionar el número de boquilla en función del diámetro de la línea de aire.	Juego de boquillas, línea de aire	-	
6	Esponja abrasiva	Secar la esponja abrasiva Silver 30 con lámparas incandescentes.	Esponja abrasiva Silver 30, lámparas incandescentes	20 min	
7	Ubicación de la esponja	Ubicar la esponja abrasiva en la tolva del Sponge-Jet	Tolva, Sponge-Jet, Esponja Abrasiva		
<i>Ejecución del ensayo</i>					
8	Disparo de la esponja	Direccionar la esponja abrasiva, a una distancia de 15 cm de la superficie a ser limpiada, a una presión de 80 psi.	Sponge-Jet, esponja abrasiva	5 min	
9	Reutilización de la esponja	Recoger la esponja y ubicar en el reciclador.	Esponja abrasiva, reciclador	2 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.1.5 Caracterización del material

Caracterizar el material es de gran importancia antes de la reparación porque permite determinar el cambio que se ha producido en las propiedades del material luego de sus años de funcionamiento.




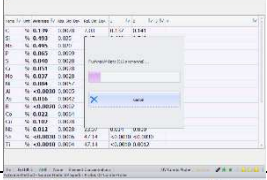

### 3.1.5.1 Espectrometría

**Propósito.-** La espectrometría es realizada para determinar si la composición química coincide con los datos proporcionados por el fabricante del rodete y comparar los datos obtenidos con los de la norma del material.

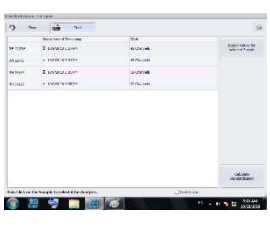


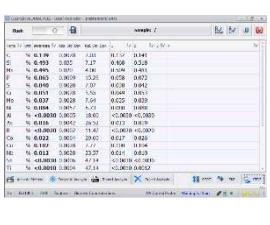
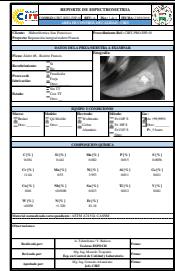
**Documento de referencia.-** El ensayo de espectrometría se debe realizar de acuerdo con el documento CIRT-PRO-ESP-01.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para este ensayo se muestran en la Tabla 3-4 de forma detallada.

**Tabla 3-4:** Procedimiento para espectrometría.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Limpieza de la muestra	Remover todo tipo de impurezas, grasa y polvo.	Removedor, guaipe.	5 min	
2	Pulido de la muestra	Pulir la superficie con un disco de zirconio para limpiarla totalmente y evitar que en los resultados aparezcan elementos producto de contaminación.	Disco Zr #120, amoladora.	5 min	
<i>Preparación del equipo</i>					
3	Revisión del equipo	Revisar las conexiones. Colocar el electrodo correspondiente al material a analizar.	Espectrómetro.	10 min	
4	Flushing	Encender el equipo y realizar una limpieza con argón durante 10 minutos.	Espectrómetro, argón >99.999%.	5 min	
5	Selección del método	Seleccionar el tipo de material a analizar: aleación de hierro, cobre o aluminio.	Espectrómetro.	2 min	

**Tabla 3-4 (Continúa):** Procedimiento para espectrometría.

6	Estandarización	Estandarizar el equipo utilizando patrones de calibración acorde al material a analizar. Asegurar que las mediciones realizadas tengan una desviación menor al 5%.	Espectrómetro, patrones de calibración.	60 min	
<i>Ejecución del ensayo</i>					
7	Posicionamiento	Colocar la boquilla de la pistola de tal forma que quede totalmente pegada y perpendicular a la superficie.	Espectrómetro.	2 min	
8	Disparo	Tomar la pistola de manera cómoda y realizar el disparo. Al terminar los datos se mostrarán en la pantalla del equipo.	Espectrómetro.	2 min	
9	Número de ensayos	Realizar el número de ensayos necesarios para que la desviación entre el porcentaje de los elementos no supere el 5%.	Espectrómetro, Software OES Elemental.Suite.	15 min	
<i>Generación del reporte</i>					
10	Reporte	Registrar los datos obtenidos.	Formato CIRT-REG-ESP-01.	2 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.1.5.2 Medición de dureza

**Propósito.-** El ensayo de dureza tiene por objetivo medir la dureza de un material para verificar que los valores obtenidos estén acorde a la norma respectiva.








**Normas de referencia.-** ASTM E110-14: Standard Test Method for Rockwell and Brinell Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers, y ASTM E18-15: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.





**Documento de referencia.-** La medición de dureza se debe realizar de acuerdo con el documento CIRT-PRO-DUR-01.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para este ensayo se muestran en la Tabla 3-5 de manera detallada.

**Tabla 3-5:** Procedimiento para medición de dureza con durómetro magnético.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la muestra</i>					
1	Pulido de la superficie*	Si la superficie es muy irregular realizar un pulido previo, para poder posicionar adecuadamente el equipo y evitar que el indentador sufra algún daño.	Amoladora, disco de Zr #120, EPP.	5 min	
<i>Ejecución del ensayo</i>					
2	Calibración	Calibrar el equipo utilizando el bloque de calibración respectivo.	Durómetro magnético Insize, bloque de calibración.	15 min	
3	Selección de la escala	Seleccionar la escala con la que trabajará el equipo (HRA).	Durómetro magnético Insize.	2 min	
4	Posicionamiento	Posicionar el durómetro en la superficie y asegurarlo imantando sus extremos.	Durómetro magnético Insize.	2 min	
5	Precarga	Girar la manecilla del durómetro hasta alcanzar una carga de 10 kgf, mantener la carga por 10 segundos.	Durómetro magnético Insize.	2 min	
6	Carga	Girar la manecilla del durómetro hasta alcanzar la carga correspondiente a la escala (HRA: 60kf) y mantenerla por 10 segundos hasta que el temporizador termine la cuenta regresiva.	Durómetro magnético Insize.	2 min	
7	Lectura	Regresar la manecilla del durómetro hasta que la medida se muestre en pantalla.	Durómetro magnético Insize.	2 min	

**Tabla 3-5 (Continúa):** Procedimiento para medición de dureza con durómetro magnético.

8	Mediciones	Desimantar el durómetro y moverlo a otra posición para realizar una nueva indentación. Realizar al menos 3 mediciones.	Durómetro magnético Insize.	2 min	
<i>Generación del reporte</i>					
9	Reporte	Registrar los datos obtenidos.	Formato CIRT-REG-DUR-01.	15 min	

\* En caso de ser necesario.

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.1.5.3 Metalografía en campo


**Propósito.-** La metalografía tiene como objetivo determinar las propiedades microestructurales del material luego de sus años de funcionamiento.

**Norma de referencia.-** ASTM E3: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, y ASTM E407: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.




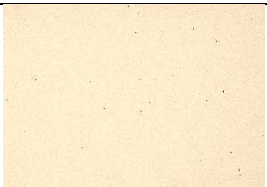


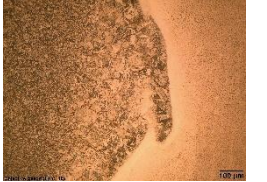
**Documento de referencia.-** La metalografía en campo se debe realizar de acuerdo con el documento CIRT-PRO-MET-01.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para este análisis se muestran en la Tabla 3-6 de manera detallada.

**Tabla 3-6:** Procedimiento para metalografía en campo.

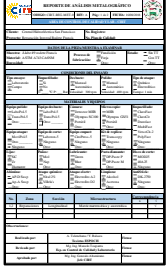
No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Limpieza	Limpiar la superficie para eliminar contaminantes como suciedad, grasa y aceites.	Removedor, guaipe.	5 min	

**Tabla 3-6 (Continúa):** Procedimiento para metalografía en campo.

<i>Desbaste y pulido</i>					
2	Desbaste	Desbastar la superficie utilizando lijas de granos entre 80 y 1500. Utilizar agua para facilitar el desbaste.	Máquina de desbaste TransPol-5, lijas #80-1500, agua, guantes.	60 min	
3	Pulido	Pulir la superficie con paños y pasta de diamante de 9-1 micras. Utilizar lubricante para facilitar el pulido.	Máquina de pulido TransPol-5, paño MD-Mol, lubricante azul, pasta de diamante 9-1 $\mu\text{m}$ , guantes.	30 min	
4	Pulido espejo	Pulir la superficie con alúmina hasta obtener una superficie con acabado espejo. Utilizar agua para facilitar el pulido.	Máquina de pulido TransPol-5, paño MD-Mol, alúmina 0.1 $\mu\text{m}$ , agua, guantes.	10 min	
<i>Análisis de la muestra</i>					
5	Análisis de inclusiones	Previo al ataque realizar un análisis de inclusiones de la muestra, ya que una vez atacada se revela la microestructura y ya no es posible realizarlo.	Microscopio y cámara portátil Struers, Software Stream Basic, guantes.	60 min	
6	Ataque	Atacar la superficie utilizando un algodón humedecido con reactivo durante el tiempo establecido. Lavar la superficie con alcohol y finalmente con agua. Secar la superficie con aire comprimido.	Reactivo (Villela's), algodón, agua, alcohol, aire comprimido, guantes.	5 min	
7	Análisis microestructural	Observar la microestructura del material. Realizar un barrido a través de la muestra en busca de zonas que tengan detalles significativos.	Microscopio y cámara portátil Struers, guantes.	30 min	
8	Obtención de imágenes	Obtener imágenes de las zonas relevantes a diferentes magnificaciones.	Microscopio y cámara portátil Struers, Software Stream Basic, guantes.	60 min	



**Tabla 3-6 (Continúa):** Procedimiento para metalografía en campo.

Generación del reporte					
9	Reporte	Registrar los datos obtenidos.	Formato CIRT-MET-01.	15 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.2 Etapa 2: Durante la reparación

La segunda etapa comprende todas las actividades realizadas después de que el rodete ha pasado la etapa de inspección y control inicial hasta que queda totalmente reparado.

Esta etapa es la más importante de todas ya que el éxito de la reparación dependerá de si los procedimientos son seguidos con rigurosidad. En esta etapa se procederá a intervenir el rodete, retirando los trozos de álabe más desgastados y sustituyéndolos por insertos nuevos prefabricados. Para esto se realizarán actividades como: corte de los álabes con plasma, presentación de insertos (luego de que pasen el control de calidad), soldadura de insertos y pulido de álabes. Adicionalmente, se repararán las zonas del rodete que presentan defectos mediante relleno por soldadura luego de su apertura.








#### 3.2.1 Corte de los álabes mediante plasma

**Propósito.-** El corte de los álabes se realiza con el objetivo de obtener el corte del acero inoxidable de los álabes basados en un área predeterminada.





**Documento de referencia.-** El corte de los álabes con plasma se debe realizar de acuerdo con el documento CIRT-PRO-PLA-01.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para el corte por plasma de un álabe se muestran en la Tabla 3-7 de manera detallada.

**Tabla 3-7:** Procedimiento para corte mediante plasma.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Definición del área a ser sustituida	Definir el área del álabe a sustituirse a través del histórico de reparaciones.	Histórico de reparaciones.	-	
2	Plantillaje	Marcar el área de corte con la ayuda de la plantilla.	Plantilla, spray.		
<i>Preparación del equipo y ambiente para el ensayo</i>					
3	Revisión del equipo	Revisar las conexiones, conectar el cable de trabajo a la pieza, controlar la presión de aire	Fuente de poder.	10 min	
4	Armado de la boquilla	Seleccionar los consumibles necesarios para armar la boquilla de corte.	Electrodo, difusor, tobera, porta tobera, protección y espaciador	20 min	
5	Ubicación de la guía de corte	Ubicar la guía de corte entre los álabes acorde al plantillaje realizado previamente.	Guía de corte.		
6	Aspiración	Encender el equipo de aspiración y obtener una adecuada ventilación.	Equipo de aspiración	5 min	
<i>Ejecución del ensayo</i>					
7	Velocidad de corte	Seleccionar la velocidad de corte en función del material a cortar, su espesor y la cantidad de corriente a usar.	CIRT-PRO-CP-01.	5 min	

**Tabla 3-7 (Continúa):** Procedimiento para corte mediante plasma.

8	Ubicación de la antorcha	Ubicar la pieza de corte final a la derecha con respecto a la dirección de corte.	-	2 min	
9	Corte	Mantener la punta entre 1/8" y 1/16" separada de la superficie a cortar y perpendicular a la misma	Separadores de corte.	20 min	
10	Sujeción de las partes	Asegurar las piezas a cortar, así como los segmentos que serán desprendidos.	Prensas	15 min	
11	Retirado la parte cortada del álabe	Una vez que el corte se ha realizado retirar el trozo de álabe desprendido.	Guantes.	2 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.2.2 Control de calidad de los insertos

**Propósito.-** Es realizado para verificar que los insertos metálicos prefabricados cumplan con las características microestructurales y dimensionales solicitadas se realizaron una serie de pruebas.

**Especificaciones técnicas requeridas.-** A continuación se detallan las especificaciones técnicas requeridas para los insertos metálicos prefabricados.

*Tipo de material:* Acero inoxidable martensítico forjado Gr. F6NM (Designación UNS S41500)

*Código de referencia:* ASTM A182.

*Composición química:* Acorde a la norma ASTM A182 (para el grado F6NM), se indica en la Tabla 3-8.

**Tabla 3-8:** Composición química solicitada – Insertos metálicos prefabricados.

%C <sub>máx</sub>	%Mn	%P <sub>máx</sub>	%S <sub>máx</sub>	%Si <sub>máx</sub>	%Cr	%Ni	%Mo
0.05	0.5 a 1	0.030	0.030	0.60	11.5 - 14	3.5 - 5.5	0.5 - 1

\*Los elementos no mencionados en esta tabla no se añadirán intencionalmente al acero sin el consentimiento del cliente.

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (ASTM A182, 1998, pág. 6)

*Propiedades mecánicas:* Acorde a la norma ASTM A182 (para el grado F6NM), se indica en la Tabla 3-9.

**Tabla 3-9:** Propiedades mecánicas solicitadas - Insertos metálicos prefabricados.

Propiedad	Resistencia a la fluencia, min ksi (MPa)	Resistencia a la tracción, min ksi (MPa)	Elongación en 2 in, min %	Reducción de área, min %	Dureza Brinell máx
Valor	90 (620)	115 (795)	15	45	295

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (ASTM A182, 1998, pág. 9)

*Número de insertos:* 13 insertos.

*Tratamiento térmico:* Acorde a la norma ASTM A182.

*Acabado superficial:* Maquinado basto, rugosidad N10 o superior.

*Dimensiones generales:* Las dimensiones deben estar estrictamente acorde al Modelo 3D, ya que el inserto es parte del álabe del rodete Francis y su geometría curva es compleja.

*Tolerancia geométrica:* -0mm, +0.5mm.

Todas las características pueden ser comprobadas excepto las propiedades mecánicas (debido a que no es posible realizar ensayos destructivos a los insertos), por cuanto se pidieron certificaciones de calidad.

Los insertos metálicos no pueden contener discontinuidades por tanto se realizaron END (tintas penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido) para confirmar que los certificados de calidad adjuntos sean correctos.

### 3.2.2.1 Caracterización del material de insertos metálicos prefabricados




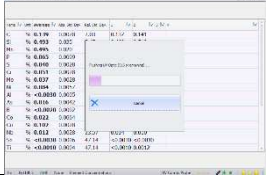

Para caracterizar el material se realizó el ensayo de espectrometría, determinando así si el material cumple con la composición química requerida, acompañado de dureza y metalografía que permiten conocer si el material coincide con el solicitado.

**Normas de referencia.-** Las normas utilizadas para la caracterización son: ASTM E3: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM E407: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, y ASTM E110-14: Standard Test Method for Rockwell and Brinell Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers.

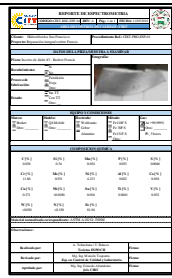





**Documentos de referencia.-** La caracterización del material se debe realizar de acuerdo con los documentos: CIRT-PRO-ESP-01, CIRT-PRO-DUR-01 y CIRT-PRO-MET-01.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para caracterizar el material de los insertos se muestra en la Tabla 3-10.




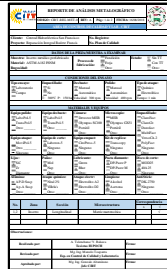
**Tabla 3-10:** Caracterización material de insertos metálicos prefabricados.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Recepción de los insertos</i>					
1	Desempaque	Retirar el empaque de los insertos de manera cuidadosa.	Estilete.	5 min	
2	Limpieza	Limpiar la goma del empaque que ha quedado adherida a la superficie del inserto.	Removedor, guaípe.	10 min	
<i>Espectrometría</i>					
3	Preparación de la superficie	Pulir una pequeña superficie con un disco de zirconio para limpiarla totalmente y evitar contaminación.	Disco Zr #120, amoladora.	5 min	
4	Preparación del equipo	Encender el equipo y realizar una limpieza con argón durante 10 minutos.	Espectrómetro, argón >99.999%.	10 min	
5	Ejecución y número de ensayos	Colocar la boquilla de la pistola de forma perpendicular a la superficie, y realizar el disparo. Efectuar el número de ensayos necesarios para que la desviación entre el porcentaje de los elementos no supere el 5%.	Espectrómetro, Software OES Elemental.Suite.	5 min	

**Tabla 3-10 (Continúa):** Caracterización material de insertos metálicos prefabricados.

6	Reporte	Realizar el reporte de las mediciones generando un documento.	Formato CIRT-REG-ESP-01.	15 min	
<i>Medición de dureza</i>					
7	Selección de la escala y posicionamiento	Seleccionar la escala HRA. Posicionar el durómetro en la superficie y asegurarlo imantando sus extremos.	Durómetro magnético Insize.	2 min	
8	Indentación	Girar la manecilla del durómetro hasta alcanzar la precarga, mantenerla por 10 segundos y luego alcanzar la carga acorde a la escala seleccionada.	Durómetro magnético Insize.	2 min	
9	Lectura y mediciones	Regresar la manecilla del durómetro hasta que la medida se muestre en pantalla y realizar al menos 3 mediciones.	Durómetro magnético Insize.	2 min	
10	Reporte	Registrar los datos obtenidos.	Formato CIRT-REG-DUR-01.	15 min	
<i>Análisis metalográfico</i>					
11	Desbaste y pulido	Desbastar la superficie utilizando lijas de diferentes granos. Pulir la superficie con paños y pasta de diamante. Pulir la superficie con alúmina hasta obtener una superficie con acabado espejo.	Máquina de desbaste y pulido TransPol-5, lijas #80-1500, paño MD-Mol, lubricante, pasta de diamante 9-1 µm, alúmina 0.1 µm, agua, guantes.	60 min	

**Tabla 3-10 (Continúa):** Caracterización material de insertos metálicos prefabricados.

12	Análisis de inclusiones	Previo al ataque realizar un análisis de inclusiones de la muestra, ya que una vez atacada se revela la microestructura y ya no es posible realizarlo.	Microscopio y cámara portátil Struers, Software Stream Basic, guantes.	60 min	
13	Ataque	Atacar la superficie utilizando un algodón humedecido con reactivo durante el tiempo establecido. Lavar la superficie con alcohol y finalmente con agua. Secar la superficie con aire comprimido.	Reactivo (Villela's), algodón, agua, alcohol, aire comprimido, guantes.	5 min	
14	Análisis microestructural	Observar la microestructura del material. Obtener imágenes de zonas relevantes luego de realizar un barrido a través de la muestra.	Microscopio y cámara portátil Struers, guantes.	30 min	
15	Reporte	Registrar los datos obtenidos.	Formato CIRT-MET-02.	15 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia




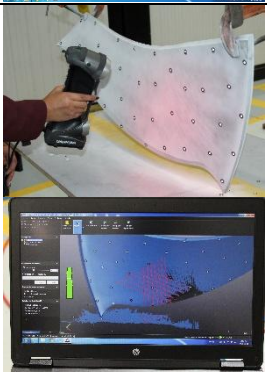
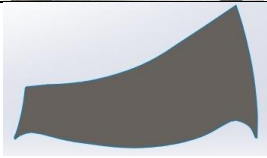
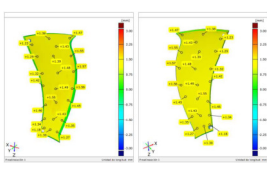
### 3.2.2.2 Control dimensional de insertos metálicos prefabricados

Para confirmar que la geometría del inserto sea la adecuada se utilizó escaneo 3D y la técnica de superposición, con ello se puede determinar con exactitud la desviación existente entre dimensiones en caso de que existiera.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para el control dimensional se muestra en la Tabla 3-11.



**Tabla 3-11:** Control dimensional mediante escaneo 3D.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
8	Preparación de la superficie	Aplicar una fina capa de revelador en el álabe para que el brillo del inserto no afecte el escaneo.	Revelador SKD-S2.	15 min	
9	Colocación de targets	Colocar los targets de tal manera que se formen triángulos a lo largo de la superficie a escanear. La distancia entre pegatinas no debe ser mayor a 10 cm.	Pegatinas circulares.	15 min	
10	Configuración de parámetros de escaneo	Introducir los parámetros de escaneo en el ordenador.	Escáner 3D, Software VX Elements.	10 min	
11	Escaneo de puntos y superficie	Escanear la superficie de manera que los targets sean registrados y luego escanear la superficie intentando que las geometrías más complejas como esquinas y bordes sean reconocidas. La velocidad de escaneo no debe ser mayor a 50 mm/s.	Escáner 3D, Software VX Elements.	30 min	
12	Generación de la malla	Una vez realizado el escaneo generar la malla para proceder con la superposición.	Software Geomagic Design X.	10 min	
14	Superposición	Sobreponer la malla del inserto escaneado y el sólido original solicitado para determinar la diferencia entre medidas existentes.	Software Geomagic Design X.	15 min	

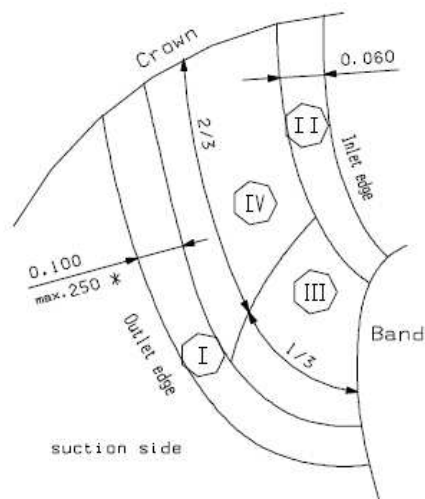
**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.2.2.3 Ensayos no destructivos en insertos metálicos prefabricados

**Zonas de inspección.-** Las zonas de inspección se toman de la hoja de especificación de calidad del rodete, la Figura 3-8 muestra la división del álabe en 4 zonas y las medidas de las mismas están en función del diámetro del rodete.





**Figura 3-8:** Zonas de inspección del álabe del Rodete Francis.

Fuente: (VATECH, 2005, pág. 6)

La Tabla 3-12 los niveles de calidad en función del área y del ensayo no destructivo a realizar en el rodete.

**Tabla 3-12:** Niveles de calidad para END.

Especificaciones Técnicas Niveles de Calidad CCH 70-4	ÁLABES DEL RODETE FRANCIS									
	Zonas		I		II		III		IV	
	F	M	F	M	F	M	F	M		
VT	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
PT	X	2	X	2	X	3	X	4		
MT	2	1	3	2	3	2	3	2		
UT 1 (Haz recto)	2	X	2	X	4*	X	4*	X		
UT 2 (Haz angular)	X	X	X	X	X	X	X	X		
F=Fundidor				M=Manufactura						

\*Para las áreas III y IV utilizar criterios de aceptación Nivel 2 para lado de banda y corona de 50 mm.

\*\*Poros abiertos  $\varnothing < 1\text{mm}$ .

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (VATECH, 2005, pág. 6)

**Norma de referencia.-** CCH 70-4: Specification for Inspection of steel castings for Hydraulic Machines.

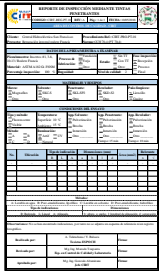
**Documentos de referencia.-** Los ensayos se deben realizar de acuerdo con los documentos: CIRT-PRO-PT-01, CIRT-PRO-MT-01 y CIRT-PRO-UT-01.

**Procedimiento tintas penetrantes.-** Los pasos ejecutados para este ensayo se muestran en la Tabla 3-13 de manera detallada.

**Tabla 3-13:** Procedimiento para ensayo de tintas penetrantes.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Limpieza	Remover con solvente el polvo o grasa de la superficie a ser examinada. Secar la superficie para asegurar que el solvente no permanezca en los defectos superficiales.	Solvente (SKC-S), guaipe, aire comprimido, guantes.	5 min	
2	Medición de rugosidad	Medir la rugosidad y asegurar que esté acorde a la rugosidad permisible para el nivel de calidad.	Rugosímetro.	5 min	
<i>Ejecución del ensayo</i>					
3	Aplicación de penetrante	Aplicar el penetrante de manera uniforme en la superficie. El tiempo de penetración es de 15 minutos. La temperatura de la superficie deberá ser de entre 10 y 40°C.	Penetrante (SKL-SP2), pirómetro, guantes.	20 min	
4	Remoción de exceso de penetrante	Remover el exceso de penetrante con guaipe. Limpiar la superficie utilizando un paño libre de pelusa y solvente (no aplicarlo de manera directa en la superficie). Si se desea, acelerar el secado mediante aire comprimido.	Solvente (SKC-S), guaipe, liencillo, aire comprimido, guantes.	5 min	
5	Aplicación de revelador	Aplicar el revelador de manera uniforme, sin formar capas gruesas. Dejar que la superficie se seque mediante evaporación natural.	Revelador (SKD-S2), guantes.	5 min	
<i>Interpretación</i>					
6	Examinación	Observar la propagación del tinte en la superficie tan pronto como el revelador se seque.	-	15 min	
7	Evaluación	Comparar las indicaciones 10-20 minutos posteriores a la aplicación del revelador con los criterios de aceptación.	Regleta 10x10 cm.	15 min	

**Tabla 3-13 (Continúa):** Procedimiento para ensayo de tintas penetrantes.

Generación del reporte					
8	Reporte	Registrar los datos obtenidos.	Formato CIRT-REG-PT-01.	15 min	

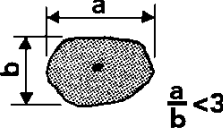
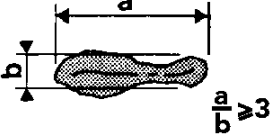
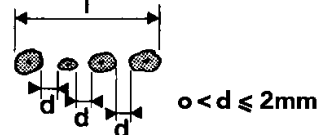
Realizado por: Autores

Fuente: Elaboración propia

**Criterios de evaluación.-** Para evaluar las discontinuidades encontradas mediante este ensayo se deberán utilizar los siguientes parámetros.

Las indicaciones significantes son indicaciones resultantes de las discontinuidades del material. En la Tabla 3-14, se muestran los tipos de discontinuidades que se pueden encontrar.

**Tabla 3-14:** Tipos de discontinuidades PT.

Redondeadas	Lineales	Alineadas
Las indicaciones redondeadas de forma circular o elíptica tienen una longitud menor a tres veces el ancho promedio	Las indicaciones lineales son aquellas que tienen una longitud mayor a 3 veces el ancho promedio.	Las indicaciones alineadas son 3 o más indicaciones en una línea separadas menos de 2 mm de borde a borde.
		

Realizado por: Autores

Fuente: (CCH 70-4, 2014, pág. 36)

La densidad de las indicaciones es el promedio (en %) de:

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

Las irregularidades de la superficie como señales de maquinado u otras características de superficie pueden producir indicaciones falsas. Toda indicación de origen incierto debe ser tratada como un defecto y ser re-examinada para determinar si son defectos genuinos. Antes de una re-examinación una preparación adicional de la superficie debe ser llevada a cabo.

Zonas extensas (que excedan más de 200 cm<sup>2</sup>) con muchas indicaciones, son llamadas áreas pigmentadas, incluso si están bajo el nivel de registro, deben ser consideradas como inaceptables, a no ser que sean aceptadas por el diseño de ingeniería (CCH 70-4, 2014, pág. 34).

Las indicaciones relevantes, pequeñas y aisladas están definidas para cada nivel de calidad en la Tabla 3-15.

**Tabla 3-15:** Criterios de aceptación PT.



Categoría	Criterios de aceptación
1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Indicaciones relevantes, pequeñas y aisladas: <b><math>a = 0.5mm</math></b></li> <li>2) Indicaciones no redondeadas con <b><math>a &gt; 2mm</math></b></li> <li>3) Indicaciones no lineales con <b><math>a &gt; 1mm</math></b></li> <li>4) Indicaciones no alineadas con <b><math>l &gt; 1mm</math></b></li> <li>5) Densidad de 0.65%. El área total de las indicaciones relevantes no debe exceder <b><math>6.5 mm^2</math></b>.</li> </ol>
2	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Indicaciones relevantes, pequeñas y aisladas: <b><math>a = 1mm</math></b></li> <li>2) Indicaciones no redondeadas con <b><math>a &gt; 3mm</math></b></li> <li>3) Indicaciones no lineales con <b><math>a &gt; 2mm</math></b></li> <li>4) Indicaciones no alineadas con <b><math>l &gt; 3mm</math></b></li> <li>5) Densidad de 1.6%. El área total de las indicaciones relevantes no debe exceder <b><math>16 mm^2</math></b>.</li> </ol>
3	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Indicaciones relevantes, pequeñas y aisladas: <b><math>a = 1.5mm</math></b></li> <li>2) Indicaciones no redondeadas con <b><math>a &gt; 4mm</math></b></li> <li>3) Indicaciones no lineales con <b><math>a &gt; 3mm</math></b></li> <li>4) Indicaciones no alineadas con <b><math>l &gt; 4mm</math></b></li> <li>5) Densidad de 4%. El área total de las indicaciones relevantes no debe exceder <b><math>40 mm^2</math></b>.</li> </ol>
4	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Indicaciones relevantes, pequeñas y aisladas: <b><math>a = 2mm</math></b></li> <li>2) Indicaciones no redondeadas con <b><math>a &gt; 6mm</math></b></li> <li>3) Indicaciones no lineales con <b><math>a &gt; 5mm</math></b></li> <li>4) Indicaciones no alineadas con <b><math>l &gt; 10mm</math></b></li> <li>5) Densidad de 10%. El área total de las indicaciones relevantes no debe exceder <b><math>100 mm^2</math></b>.</li> </ol>
5	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Indicaciones relevantes, pequeñas y aisladas: <b><math>a = 2mm</math></b></li> <li>2) Indicaciones no redondeadas con <b><math>a &gt; 8mm</math></b></li> <li>3) Indicaciones no lineales con <b><math>a &gt; 7mm</math></b></li> <li>4) Indicaciones no alineadas con <b><math>l &gt; 16mm</math></b></li> <li>5) Densidad de 25%. El área total de las indicaciones relevantes no debe exceder <b><math>250 mm^2</math></b>.</li> </ol>

Realizado por: Autores



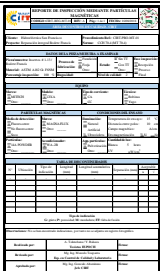
Fuente: (CCH 70-4, 2014, págs. 36-40)

**Procedimiento partículas magnéticas.-** Los pasos ejecutados para este ensayo se muestran en la Tabla 3-16 de manera detallada.

**Tabla 3-16:** Procedimiento para ensayo de partículas magnéticas.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Limpieza	Remover todo tipo de impurezas, grasa y polvo.	Limpiador, guaipe.	5 min	
2	Medición de rugosidad	Medir la rugosidad de la superficie y controlar que esté acorde al nivel de calidad.	Rugosímetro.	5 min	
<i>Preparación del equipo y ambiente para el ensayo</i>					
3	Revisión del equipo	Revisar las conexiones. Encender la lámpara de luz UV	Generador eléctrico, yugo	10 min	
4	Generación de luz UV	Encender la lámpara de luz UV	Lámpara de luz UV	5 min	
5	Ambiente	Obtener un lugar oscuro, con una máxima luminosidad de 20 luxes.	Luxómetro	10 min	
<i>Ejecución del ensayo</i>					
6	Magnetización de la superficie	Magnetizar la superficie, de modo que se obtenga el campo magnético necesario	Generador eléctrico, yugo, medidor de campo.	2 min/ posición	

**Tabla 3-16 (Continúa):** Procedimiento para ensayo de partículas magnéticas.

7	Aplicación de las partículas magnéticas	Aplicar las partículas mientras se va magnetizando la superficie	Partículas magnéticas	2 min/ posición	
8	Examinación de la superficie	Examinar la superficie con la ayuda de la luz UV, con una intensidad de luz UV $\geq 1000 \mu W/cm^2$	Medidor de luz UV	2 min/ posición	
<i>Generación del reporte</i>					
9	Reporte	Evaluar los resultados y generar el reporte de las diferentes discontinuidades	Registro: CIRT-REG-MT-01.	10 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

**Criterios de examinación, evaluación y aceptación.-** Las áreas magnetizadas se examinarán a simple vista o con poco aumento (máx. 3X). Si se utiliza productos fluorescentes, la zona de prueba se examina bajo luz ultravioleta con una intensidad de al menos  $1000 \mu W/cm^2$ , en un área oscura donde la intensidad de la luz blanca no exceda los 20 lx (CCH 70-4, 2014, pág. 45).

Para evaluar las discontinuidades encontradas mediante este ensayo se deberá tomar en cuenta que, debido a la acumulación de partículas magnéticas, las indicaciones falsas pueden ser causadas por irregularidades geométricas, rugosidad excesiva o excesiva magnetización (CCH 70-4, 2014, pág. 45).

Las indicaciones significantes son indicaciones resultantes de las discontinuidades del material y no son causadas por ninguna otra característica superficial o discontinuidad en la estructura, por lo que las grietas y la falta de fusión no son aceptables (CCH 70-4, 2014, pág. 45).

En la Tabla 3-17, se muestran los criterios de aceptación para cada nivel de calidad.

**Tabla 3-17:** Niveles de aceptación para reflectores con dimensiones medibles

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

(1) Nivel 1 = nivel especial (zonas críticas y altamente forzadas)

(2)  $\Sigma$ : superficie de referencia, correspondiente a las fotografías según ASTM E125, es decir, aprox. 100 mm x 160 mm.

(3) L: Longitud de la indicación más grande.



(4) En caso de duda y si el tipo de defecto no puede identificarse claramente, la indicación se evaluará como una discontinuidad lineal.

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (CCH 70-4, 2014, pág. 45)






**Procedimiento ultrasonido.-** Los pasos ejecutados para este ensayo se muestran en la Tabla 3-18 de manera detallada.

**Tabla 3-18:** Procedimiento para ensayo de ultrasonido.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Preparación de la superficie	Remover con solvente las partículas que pudieron haber quedado adheridas a la superficie a ser examinada y luego secarla.	Solvente (SKC-S), guaípe, guantes, aire comprimido.	5 min	
2	Medición de rugosidad	Medir la rugosidad y asegurar que esté acorde a la rugosidad permisible ( $R_a \leq 6.3$ ).	Rugosímetro.	5 min	




**Tabla 3-18 (Continúa):** Procedimiento para ensayo de ultrasonido.

<i>Preparación del equipo</i>					
3	Verificación del equipo	Comprobar que el equipo este completo y en condiciones de servicio. La sonda y el palpador serán utilizadas en función al requerimiento.	Olympus OmniScan MX2, sonda PA 5L16-A10, palpador SA10-0L.	5 min	
4	Calibración general	Calibrar mediante el uso de un bloque de calibración PA-SDH-2.4: sensibilidad, velocidad y retardo de suela.	Olympus OmniScan MX2, Software MXU 4.3-R2, bloque de calibración, gel ultrasónico.	60 min	
5	Calibración y comprobación de curva de dimensionamiento	Calibrar el equipo mediante la creación de una curva DGS con un bloque de calibración con agujeros del diámetro requerido. Comprobar que la curva creada sea correcta mediante inspección de agujeros con mayor y menor diámetro.	Olympus OmniScan MX2, Software MXU 4.3-R2, bloque de calibración, gel ultrasónico.	60 min	
<i>Ejecución del ensayo</i>					
6	Examinación para registro	Examinar la superficie deseada y registrar todas aquellas indicaciones que sobrepasen el nivel permisible en la norma. Marcas las indicaciones con un marcador para metal.	Olympus OmniScan MX2, Software MXU 4.3-R2, gel ultrasónico, marcador para metal.	120 min	
7	Examinación para evaluación	Volver a examinar todas las indicaciones que fueron registradas anteriormente y cambiar la posición de la zapata hasta determinar su amplitud máxima y compararla con la permisible en la norma.	Olympus OmniScan MX2, Software MXU 4.3-R2, gel ultrasónico.	120 min	



**Tabla 3-18 (Continúa):** Procedimiento para ensayo de ultrasonido.

Generación del reporte					
8	Reporte	Registrar los datos obtenidos.	Formato CIRT-REG-UT-01.	15 min	

Realizado por: Autores

Fuente: Elaboración propia

**Bloque de calibración.-** En base a la norma ASTM A609, se utilizará un bloque de calibración de propiedades similares a las del material a analizar (acero inoxidable), los reflectores serán SDH con un diámetro de 2.4 mm (ANEXO C).

**Criterios de inspección y evaluación.-** Para evaluar las discontinuidades encontradas mediante este ensayo se deberán utilizar los siguientes parámetros.

Los criterios de aceptación hacen referencia al tipo de defecto y a la altura de eco del defecto.

Es importante que a pesar de que se esté utilizando la técnica de arreglo de fases, el ángulo con el cual será realizada la evaluación de las discontinuidades será de 60°.

**Tabla 3-19:** Método DAC SDH - Niveles de inspección y evaluación (60°).

Nivel de calidad	Nivel de referencia 100% DAC SDH [mm]	Nivel de registro			Nivel de evaluación		
		Profundidad de la zona [mm]			Profundidad de la zona [mm]		
		≤ 50	> 50 – 100	> 100 – 250	≤ 50	> 50 – 100	> 100 – 250
1	2.4	DAC-9dB	No aplica		DAC-2dB	No aplica	
2	3	DAC-3dB	DAC-6dB		DAC+2dB	DAC-1dB	
3	3	DAC-3dB	DAC-6dB	DAC-10dB	DAC+9dB	DAC+6dB	DAC+2dB
4	5	DAC	DAC-3dB	DAC-7dB	DAC+12dB	DAC+9dB	DAC+6dB
5	5	DAC	DAC-3dB	DAC-7dB	DAC+16dB	DAC+13dB	DAC+9dB

Realizado por: Autores

Fuente: (CCH 70-4, 2014, p. 73)

Para determinar el número máximo de reflectores sin dimensiones medibles se utilizarán los criterios de la Tabla 3-20 y Tabla 3-21.

El número máximo de reflectores en un área de 100 cm<sup>2</sup> con dimensiones no medibles en función del nivel de calidad se muestra en la Tabla 3-20.

**Tabla 3-20:** Número máximo de reflectores no medibles.

Nivel de calidad	PROFUNDIDAD DE LA ZONA A SER EXAMINADA [mm]				Distancia aceptable entre 2 indicaciones $\geq$ [mm]
	$\leq 50$	$> 50 - 100$	$> 100 - 250$	$> 250 - 600$	
1	3	No aplica			12
2					
3		4	5	6	10
4					
5					
6					9

Realizado por: Autores

Fuente: (CCH 70-4, 2014, pág. 58)

El número máximo de reflectores con dimensiones medibles en un área de 1000 cm<sup>2</sup> en función del nivel de calidad se muestra en la Tabla 3-21.

**Tabla 3-21:** Niveles de aceptación para reflectores con dimensiones medibles

Niveles de calidad	PROFUNDIDAD DE LAS ZONAS A SER EXAMINADAS [mm]					
	Área individual S [cm <sup>2</sup> ]	Área cumulativa S [cm <sup>2</sup> ]	Profundidad de la zona [%]	Área individual S [cm <sup>2</sup> ]	Área cumulativa S [cm <sup>2</sup> ]	Profundidad de la zona [%]
	$\leq 50$			$> 50$ a 100		
1	Método DGS: DSR < 3mm o método DAC FBH D/R < 0.25			No aplica		
2	1	5	2	2	15	5
3	2	25	10	3	35	10
4	8	50	15	12	100	15
5	15	100	20	25	150	20
6	20	200	20	30	250	20
	$> 100$ a 250			$> 250$ a 600		
1	No aplica					
2						
3	15	100	10	40	200	10
4	25	150	15	60	300	15
5	40	200	20	100	350	20
6	50	300	20	200	400	20

Realizado por: Autores








Fuente: (CCH 70-4, 2014, pág. 59)

### 3.2.3 Presentación de insertos





**Propósito.-** La presentación es realizada con la finalidad de posicionar el inserto y fijarlo, controlando la luz entre alabes acorde al ANEXO E, previo a la soldadura.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para la presentación de los insertos se muestran en la Tabla 3-22.

**Tabla 3-22:** Presentación de insertos.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Pulido de bordes</i>					
1	Maquinado de bordes en torno CNC	Maquinar los bordes de las zonas de corte de los álabes en el torno CNC para obtener la geometría del inserto.	Torno vertical BOST y accesorios.	1 sem	
2	Pulido manual de bordes	Pulir manualmente los bordes de los alabes para tener la geometría requerida.	Durómetro magnético Insize.	1 sem	
<i>Preparación de insertos</i>					
3	Maquinado de sobrematerial en centro de mecanizado	Retirar el sobrematerial del inserto metálico prefabricado de acuerdo a análisis de acuerdo a inspección digital computarizada.	Centro de mecanizado y accesorios.	6 horas	
<i>Preparación de la junta</i>					
4	Preparación de la junta en el álabe	Preparar la junta en el álabe del rodete acorde al documento CIRT/18-WPS-01.	Pulidora, discos de debaste.	30 min	
5	Preparación de la junta en el inserto	Preparar la junta en el inserto acorde al documento CIRT/18-WPS-01.	Pulidora, discos de debaste.	30 min	
<i>Posicionamiento</i>					
6	Posicionamiento del inserto	Posicionar el inserto en el álabe controlando la luz y la distancia entre álabes.	Inserto prefabricado, compás, flexómetro.	15 min	
7	Retirado de material excedente*	En caso de que el inserto no se acople de manera adecuada, pulir el material en exceso.	Pulidora, discos de debaste.	15 min	

**Tabla 3-22 (Continúa):** Presentación de insertos.

8	Soldadura de los refuerzos horizontales	Soldar los refuerzos horizontales para alineación del alabe.	Refuerzos metálicos, máquina soldadora.	20 min	
9	Soldadura de los refuerzos verticales	Soldar los refuerzos verticales para sostener el alabe.	Refuerzos metálicos, máquina soldadora.	20 min	
10	Control de la luz entre álabes	Controlar de la luz entre álabes una vez soldados los refuerzos.	Compás.	10 min	
11	Soldadura de refuerzos en corona y banda	Soldar refuerzos en corona y banda.	Refuerzos metálicos, máquina soldadora.	20 min	

\*En caso de ser necesario.

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia


### 3.2.4 Soldadura de insertos

**Propósito.-** La soldadura del inserto al alabe tiene por objetivo unir ambos materiales en 3 zonas: inserto-alabe, inserto-banda e inserto-corona.








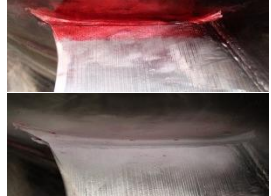
**Documento de referencia.-** El procedimiento de soldadura debe estar acorde a la especificación del procedimiento de soldadura CIRT/18-WPS-01.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para la presentación de los insertos se muestran en la Tabla 3-23.

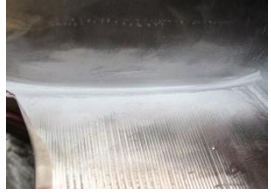



**Tabla 3-23:** Soldadura de insertos.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Limpieza	Limpiar la superficie para remover cualquier tipo de suciedad.	Grata de alambre trenzado inoxidable.	15 min	

**Tabla 3-23 (Continúa): Soldadura de insertos.**

<i>Pre calentamiento de la superficie</i>					
2	Pre calentamiento	Precalear la superficie a una temperatura de 80°C acorde a CIRT/18-WPS-01.	Antorcha, tanque de GLP.	5 min	
3	Medición de la temperatura	Medir la temperatura de la superficie y comprobar que se encuentre dentro del rango permisible.	Pirómetro.	2 min	
4	Soldadura del pase de raíz	Soldar el pase de raíz acorde al documento CIRT/18-WPS-01.	Máquina soldadora.	30 min	
5	Limpieza entre pases*	Limpiar adecuadamente la superficie entre pases para evitar atrapamientos de escoria.	Grata de alambre trenzado inoxidable, cepillo metálico.	10 min	
6	Soldadura de pases en caliente	Soldar los pases en caliente acorde al documento CIRT/18-WPS-01. Controlar que la temperatura no salga del límite permisible.	Máquina soldadora, pirómetro.	5 horas	
7	Preparación de la nueva junta	Preparar la nueva junta en el lado de baja presión acorde al documento CIRT/18-WPS-01.	Amoladora, freseta, discos de corte.	30 min	
8	Verificación las dimensiones de la junta	Verificar las dimensiones de la junta utilizando un calibrador acorde al documento CIRT/18-WPS-01.	Calibrador.	5 min	
9	PT en la junta preparada	Realizar ensayo de tintas penetrantes en la nueva junta preparada para evitar que queden discontinuidades en la raíz de la soldadura.	Kit de tintas penetrantes, liencillo, guaípe.	30 min	

**Tabla 3-23 (Continúa): Soldadura de insertos.**

10	Eliminar los defectos y realizar PT nuevamente**	Eliminar los defectos por medio de pulido hasta que en el ensayo de tintas penetrantes no se observen discontinuidades.	Amoladora, freseta, discos de corte.	15 min	
11	Soldadura de pases de relleno	Soldar los pases de relleno acorde al documento CIRT/18-WPS-01. Controlar que la temperatura no salga del límite permisible.	Máquina soldadora, pirómetro.	5 horas	
12	Soldadura de pases de capa final	Soldar los pases de capa final acorde al documento CIRT/18-WPS-01. Controlar que la temperatura no salga del límite permisible.	Máquina soldadora, pirómetro.	5 horas	
13	Control de la temperatura de enfriamiento	Durante el proceso de soldadura controlar la temperatura de enfriamiento utilizando mantas térmicas para evitar agrietamiento.	Manta térmica.	-	

\* Realizarlo siempre que sea necesario y después de cada pase.

\*\* En caso de ser necesario.

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.2.5 Pulido de los álabes acorde a los planos

Luego de la soldadura, es necesario pulir el material en exceso para lograr la geometría deseada acorde a los planos del rodete. La velocidad de pulido debe ser controlada para seguridad del operador. Luego del pulido es necesario medir la rugosidad y comprobar que esté acorde a los parámetros requeridos para realizar ensayos no destructivos.

Para comprobar que la geometría sea la adecuada se pueden utilizar plantillas de control de perfil, es importante aclarar que se trata de un trabajo netamente artesanal, pero a pesar de ello se debe intentar que el perfil sea lo más cercano al diseño posible.

### 3.3 Etapa 3: Después de la reparación

La tercera etapa comprende todas las actividades realizadas después de que el rodete ha sido reparado, es decir luego de que los insertos han sido soldados a los álabes y correctamente pulidos.

Esta etapa es fundamental para asegurar que la calidad de la reparación es buena y comprobar que los procedimientos han sido seguidos con rigurosidad en la etapa anterior.

En esta etapa se procederá a realizar el control de calidad de las juntas soldadas mediante inspección visual, tintas penetrantes y partículas magnéticas. Además de ello se realizará la evaluación del tratamiento térmico para el correspondiente alivio de tensiones, para ello el material debe ser caracterizado antes y después del tratamiento. Finalmente, se realizará el control dimensional del rodete.

#### 3.3.1 *Control de calidad de las juntas soldadas*

Después de terminar el proceso de soldadura de los insertos se debe realizar una inspección rigurosa en los cordones de soldadura con la finalidad de determinar si hay presencia de discontinuidades. Para inspeccionar las juntas es importante tomar en cuenta la especificación de calidad acorde a la Figura 3-8. La calidad que se tiene para la zona en donde están ubicadas las juntas para los diferentes ensayos se indica en la Tabla 3-12.

##### 3.3.1.1 *Inspección visual (VT)*

**Propósito.-** La inspección visual en esta etapa se realiza con el objetivo de encontrar discontinuidades o defectos visibles a simple vista, específicamente en las juntas soldadas y en las partes recuperadas mediante soldadura.




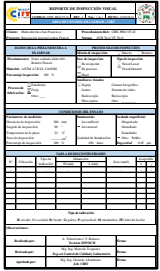
**Norma de referencia.-** CCH 70-4: Specification for Inspection of steel castings for Hydraulic Machines.

**Documento de referencia.-** La inspección visual se debe realizar de acuerdo con el documento CIRT-PRO-VT-01.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para este ensayo se muestran en la Tabla 3-24 de manera detallada.



**Tabla 3-24:** Procedimiento para ensayo de inspección visual.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Limpieza de la muestra	Remover todo tipo de impurezas, grasa y polvo.	Limpiador, guaipe.	25 min	
2	Control superficial	Medir la rugosidad de la superficie y controlar que esté acorde al nivel de calidad.	Rugosímetro, Amoladora	10 min	
<i>Preparación del ambiente para el ensayo</i>					
3	Control de la iluminación	Conseguir la iluminación necesaria: para ensayo general 160lx mín., y para ensayo local 500lx mín.	Luxómetro	10 min	
<i>Ejecución del ensayo</i>					
4	Posición de inspección	Inspeccionar el área con una separación máx de 600mm y un ángulo mayor o igual a 30° con la horizontal.	Auxiliares visuales	2 min	-
5	Examinación de la superficie	Medir las diferentes discontinuidades superficiales.	Calibrador	30 min	-
<i>Generación del reporte</i>					
6	Reporte	Evaluar la rugosidad y las discontinuidades superficiales y generar el reporte.	Registro: CIRT-REG-VT-01	15 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.3.1.2 Inspección con tintas penetrantes (PT)

**Propósito.-** La inspección con tintas penetrantes en esta etapa se realiza con el objetivo de encontrar discontinuidades o defectos superficiales específicamente en las juntas soldadas.



En la Etapa 2 se definieron las normas, criterios y procedimiento de inspección mediante tintas penetrantes Tabla 3-13, los cuales serán aplicados nuevamente en esta etapa de la reparación.



**Figura 3-9:** Ensayo de tintas penetrantes en junta soldada.

Fuente: Autores

### 3.3.1.3 *Inspección con partículas magnéticas (MT)*

**Propósito.-** La inspección con partículas magnéticas en esta etapa se realiza con el objetivo de encontrar discontinuidades o defectos superficiales y subsuperficiales en las juntas soldadas.

En la Etapa 2 se definieron las normas, criterios y procedimiento de inspección mediante partículas magnéticas Tabla 3-16, las cuales serán aplicadas nuevamente en esta etapa de la reparación.



**Figura 3-10:** Ensayo de partículas magnéticas en junta soldada.

Fuente: Autores

#### 3.3.1.4 Inspección con ultrasonido (UT)

**Propósito.-** La inspección con ultrasonido en esta etapa se realiza con el objetivo de encontrar discontinuidades o defectos superficiales específicamente en las juntas soldadas y en las partes recuperadas mediante soldadura.

En la Etapa 2 se definió el procedimiento de inspección mediante ultrasonido Tabla 3-18, el mismo que será aplicable en esta etapa de la reparación.



**Figura 3-11:** Ensayo de ultrasonido en junta soldada.

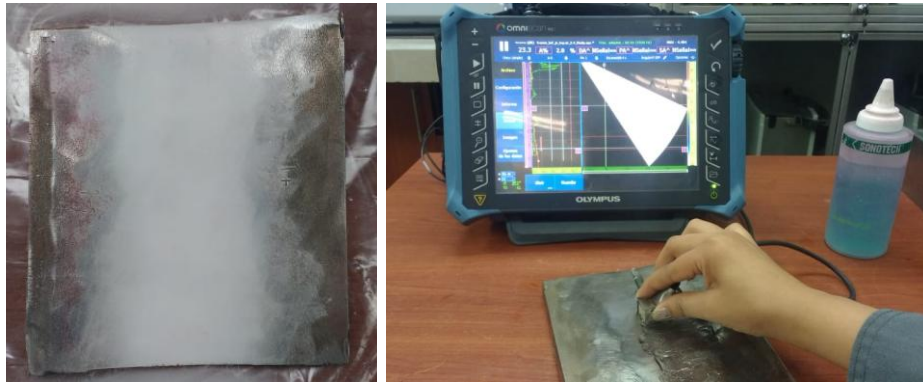
Fuente: Autores

#### 3.3.2 Caracterización de juntas soldadas pre tratamiento térmico

**Propósito.-** La caracterización se realiza con el objetivo de determinar las propiedades microestructurales y obtener un perfil de dureza del material de las juntas soldadas antes de ser sometido a un tratamiento térmico para aliviar las tensiones residuales producto de la soldadura.

Para la caracterización se utilizarán los procedimientos de preparación metalográfica en laboratorio descrito en la Tabla 3-26 y el procedimiento de medición de micro dureza detallado en la Tabla 3-25.

Debido a que el rodete no puede ser sometido a diferentes tratamientos térmicos con fines investigativos, se realizaron probetas para replicar el proceso de soldadura y posterior tratamiento de los álabes. Previo a realizar la caracterización de la probeta soldada se realizaron END a la junta siguiente los procedimientos descritos en la Tabla 3-13 para PT, Tabla 3-16 para MT y Tabla 3-18 para UT.



**Figura 3-12:** Junta soldada y END realizados previo a su caracterización.

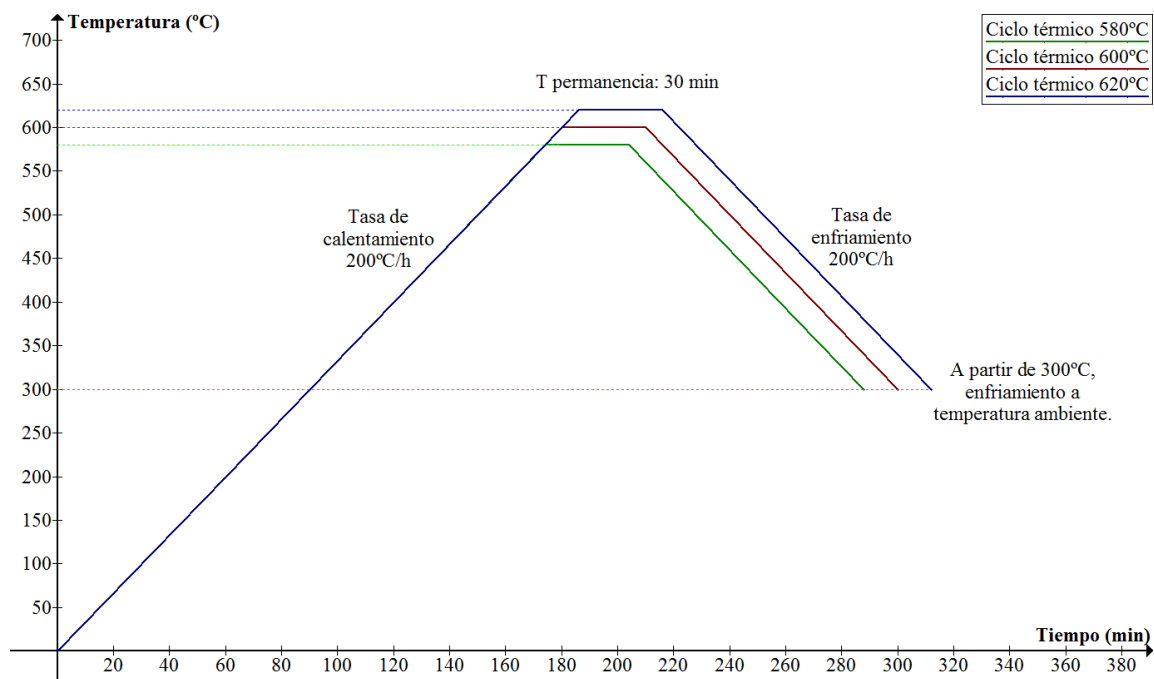
Fuente: Autores

### 3.3.3 *Tratamiento térmico*

La mayoría de bibliografía recomienda realizar el Tratamiento Térmico Post Soldadura en un rango aproximado de 565°C a 620°C, pero hay que tomar en cuenta que la (ASM Metals Handbook), recomienda evitar el Revenido en el intervalo de temperatura de 370°C a 595°C debido a la disminución de la resistencia al impacto, por lo que el rango de temperatura de tratamiento térmico recomendado sería de 595°C a 620°C. Con la finalidad de comparar los resultados a nivel microestructural y determinar la variación de dureza se ha decidido realizar probetas de la junta soldada para realizar el Tratamiento Térmico a 600°C y 620°C que están dentro del rango recomendado, pero también se realizará a 580°C debido a que es una temperatura crítica, ya que parte de la bibliografía lo toma como temperatura recomendada pero también existe bibliografía que la excluyen debido a la disminución de resistencia al impacto.

Con respecto al tiempo de permanencia, la bibliografía concuerda que debería ser una hora por cada pulgada de espesor, mientras que para media pulgada de espesor se recomienda entre 30 a 60 minutos, por lo cual se ha optado por los 30 minutos de permanencia debido a que el tiempo no debe ser excesivo para evitar la descarburación; mientras que la velocidad de enfriamiento debe ser controlada para evitar las tensiones térmicas que generan fragilización y fisuración por enfriamiento, teniendo una tasa de enfriamiento recomendada de 200°C/hora.

Los ciclos térmicos aplicados para el procedimiento de reparación se muestran en la Figura 3-13.



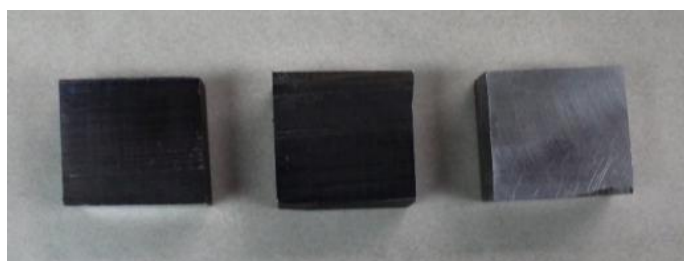
**Figura 3-13:** Ciclos térmicos para los tratamientos realizados en la reparación.

Fuente: Autores

### 3.3.4 Caracterización de juntas soldadas post tratamiento térmico

**Propósito.-** La caracterización se realiza con el objetivo de determinar el cambio en las propiedades microestructurales y de dureza del material de las juntas soldadas después de haber sido sometidas a un tratamiento térmico para aliviar las tensiones residuales producto de la soldadura.

Para la caracterización se utilizarán los procedimientos de preparación metalográfica en laboratorio descrito en la Tabla 3-26 y el procedimiento de medición de micro dureza detallado en la Tabla 3-25.



**Figura 3-14:** Probetas luego de ser sometidas a tratamiento térmico.

Fuente: Autores

### 3.4 Actividades adicionales

Estas actividades han sido realizadas con el objetivo de complementar la investigación y justificar determinados aspectos de la reparación.

#### 3.4.1 *Análisis afectación del material por corte con plasma*

Después de cortar los álabes con plasma se determinó la cantidad de material afectado por el corte, mediante la caracterización del borde de corte, medición de micro dureza y metalografía para analizar el cambio de propiedades a medida que aumenta la distancia al borde de corte.

##### 3.4.1.1 *Medición de micro dureza*



**Propósito.-** El análisis de micro dureza se realiza con el objetivo de determinar la dureza del material a medida que se aleja de la zona de corte, esto es un indicio de la afectación que sufre e por la temperatura a la que se ve expuesto durante el corte.

**Norma de referencia.-** ASTM E384-11: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials.


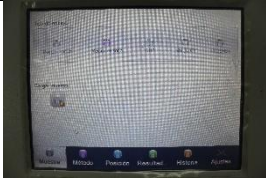




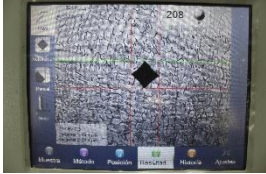
**Documento de referencia.-** La medición de microdureza se debe realizar de acuerdo con el documento CIRT-PRO-DUR-01.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para este análisis se muestran en la Tabla 3-25 de manera detallada.

**Tabla 3-25:** Procedimiento para el ensayo de micro dureza.


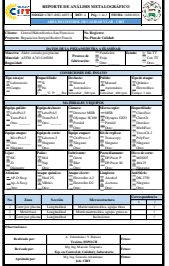
No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la muestra</i>					
1	Preparación de las caras*	Aplanar las caras de la muestra y hacerlas paralelas.	Amoladora, disco de desbaste	10 min	
2	Comprobación paralelismo	Utilizando un nivel, comprobar que las caras de la muestra sean paralelas.	Nivel digital Insize.	2 min	

**Tabla 3-25 (Continúa):** Procedimiento para el ensayo de micro dureza.

3	Preparación de la superficie	Realizar una preparación metalográfica de la superficie acorde al procedimiento CIRT-PRO-MET-01.	Máquina de pulido y desbaste LaboPol-5, lijas #80-1500, paños (tipo Mol), pasta de diamante 9-1 $\mu\text{m}$ , alúmina 0.1 $\mu\text{m}$ , lubricante azul, agua, guantes.	120 min	
<i>Configuración del equipo</i>					
4	Parámetros	Introducir los parámetros en el equipo: magnificación, escala, carga y tiempo de permanencia.	Micro durómetro DuraScan.		
5	Calibración	Calibrar el equipo utilizando el bloque de calibración respectivo.	Micro durómetro DuraScan, bloque de calibración.	10 min	
<i>Ejecución del ensayo</i>					
6	Posicionamiento	Colocar la muestra en la base del micro durómetro asegurando que la distancia entre la columna y la muestra sea suficiente para que el equipo realice el intercambio entre indentadores y lentes.	Micro durómetro DuraScan.	2 min	
7	Ubicación	Realizar un barrido a través de la muestra y seleccionar la zona en donde se desea realizar la medición.	Micro durómetro DuraScan.	15 min	
8	Proceso: Medir	Al seleccionar esta opción el equipo automáticamente aplicará la carga y permitirá observar las diagonales.	Micro durómetro DuraScan.	5 min	
9	Medición de diagonales	Medir las diagonales y obtener el valor de la medición.	Micro durómetro DuraScan.	5 min	



**Tabla 3-25 (Continúa):** Procedimiento para el ensayo de micro dureza.

10	Mediciones	Desplazarse a otra posición sobre la muestra y realizar una nueva indentación. Realizar al menos 3 mediciones.	Micro durómetro DuraScan.	5 min	
Generación del reporte					
11	Reporte	Registrar los datos obtenidos.	Formato CIRT-REG-DUR-01.	15 min	

\* En caso de ser necesario.

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

#### 3.4.1.2 Análisis metalográfico en laboratorio



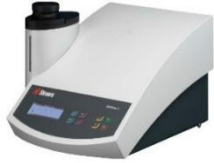




**Propósito.-** El análisis metalográfico se realiza con el objetivo de determinar la microestructura de material y su cambio a medida que se aleja de la zona de corte, esto es un indicio de la afectación que sufre e por la temperatura a la que se ve expuesto durante el corte.

**Norma de referencia.-** ASTM E3: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens y ASTM E407: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.

**Documento de referencia.-** El análisis metalográfico en laboratorio se debe realizar de acuerdo con el documento CIRT-PRO-MET-01.

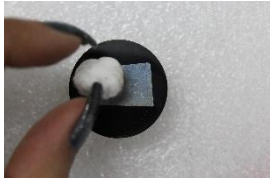


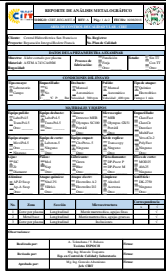
**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para este análisis se muestran en la Tabla 3-26 de manera detallada.

**Tabla 3-26:** Procedimiento para metalografía en laboratorio.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la muestra</i>					
1	Corte de la muestra*	Cuando la muestra tiene dimensiones muy grandes se procede al cortar la probeta (dimensiones recomendadas: aprox 1 in cuadrada o 1 in de diámetro).	Cortadora de precisión Laboton-5, disco de corte 40A25, refrigerante.	10 min	
2	Limpieza de la superficie	Limpiar la superficie para eliminar contaminantes como suciedad, grasa y aceites.	Removedor, guaipe.	5 min	
3	EMPastillado*	EMPastillar la muestra en una resina adecuada (la altura de la muestra debe ser suficiente para poder manejarla durante el pulido).	EMPastillador a CitoPress-5, Resina Polyfast, Anti-Stick.	10 min	
<i>Desbaste y pulido</i>					
4	Desbaste	Desbastar la superficie utilizando lijas de granos entre 80 y 1500. Utilizar agua para facilitar el desbaste.	Máquina de desbaste LaboPol-5, lijas #80-1500, agua, guantes.	60 min	
5	Pulido	Pulir la superficie con paños y pasta de diamante de 9-1 micras. Utilizar lubricante para facilitar el pulido.	Máquina de pulido LaboPol-5, paño (MD-Mol), lubricante azul, pasta de diamante 9-1 µm, guantes.	30 min	
6	Pulido espejo	Pulir la superficie con alúmina hasta obtener una superficie con acabado espejo. Utilizar agua para facilitar el pulido.	Máquina de pulido Labopol-5, paño MD-Mol, alúmina 0.1 µm, agua, guantes.	10 min	
<i>Análisis de la muestra</i>					
7	Análisis de inclusiones	Previo al ataque realizar un análisis de inclusiones de la muestra, ya que una vez atacada se revela la microestructura y ya no es posible realizarlo.	Microscopio electrónico de barrido, Software SmartSEM, Software Aztec, Software Stream Basic, guantes.	60 min	



**Tabla 3-26 (Continúa):** Procedimiento para metalografía en laboratorio.

8	Ataque	Atacar la superficie utilizando un algodón humedecido con reactivo durante el tiempo establecido. Lavar la superficie con alcohol y finalmente con agua. Secar la superficie con aire comprimido.	Reactivo (Vilella's), algodón, agua, alcohol, aire comprimido, guantes.	5 min	
9	Análisis microestructural	Observar la microestructura del material. Realizar un barrido a través de la muestra en busca de zonas que tengan detalles significativos.	Microscopio electrónico de barrido, Software SmartSEM, guantes.	30 min	
10	Obtención de imágenes	Obtener imágenes de las zonas relevantes a diferentes magnificaciones.	Microscopio electrónico de barrido, Software SmartSEM, guantes.	60 min	
<i>Generación del reporte</i>					
11	Reporte	Registrar los datos obtenidos.	Formato CIRT-REG-MET-01.	15 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia





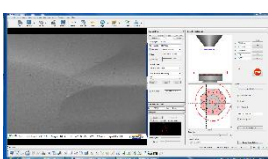
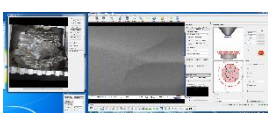
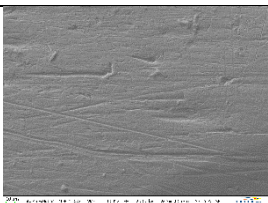
### 3.4.2 Análisis del mecanismo de desgaste mediante MEB

**Propósito.-** El análisis del mecanismo de desgaste se realiza con el objetivo de caracterizarlo mediante microscopia electrónica de barrido, es decir conocer cómo se observa el desgaste en un rodete de manera topográfica y composicional a nivel micro.


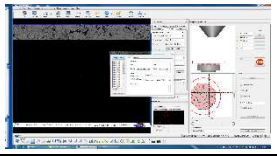
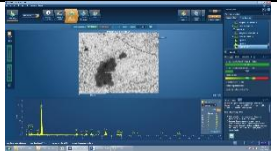

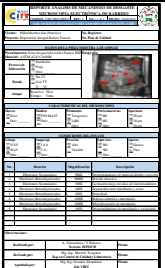
**Normas de referencia.-** ASTM E3: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens y ASTM E2104: Standard Test Methods for Rating and Classifying Inclusions in Steel Using the Scanning Electron Microscope.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para este análisis se muestran en la Tabla 3-27 de manera detallada.

**Tabla 3-27:** Procedimiento análisis mecanismo de desgaste mediante MEB.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la muestra</i>					
1	Limpieza de la muestra	De la muestra se deben remover todo tipo de impurezas sin afectar la superficie de análisis. Para ello se utilizará un cepillo de cerdas plásticas y se frotará suavemente la superficie.	Agua, cepillo de cerdas plásticas, guantes.	5 min	
2	Secado de la muestra	Colocar alcohol en la superficie y luego secar con aire comprimido.	Alcohol, aire comprimido, guantes, gafas.	2 min	-
3	Fijación de la muestra en el porta muestra	Colocar la muestra en el porta muestras Zeiss y fijarla utilizando un hexagonal.	Porta muestras Zeiss, llave hexagonal, guantes.	2 min	
<i>Correlación</i>					
4	Toma de fotografía para correlación	Ingresar al software SmartSEM y en la pestaña "Image Navigation" tomar una fotografía.	MEB, soporte de cámara, cámara.	5 min	
5	Fijación de la muestra en la cámara del MEB.	Despresurizar la cámara del microscopio e introducir la muestra para fijarla.	MEB, Software SmartSEM.	5 min	
	Obtención de imagen en el microscopio	Presurizar la cámara del microscopio. Jugando con las opciones de brillo y contraste obtener imagen. Enfocar la imagen ajustando la distancia de trabajo.	MEB, Software SmartSEM.	15 min	
6	Proceso de correlación	Por medio de "Image Navigation" establecer puntos de referencia para la correlación.	MEB, Software SmartSEM.	30 min	
7	Comprobación de correlación	Dar doble clic sobre puntos reconocibles en la imagen y comprobar que la correlación sea correcta.	MEB, Software SmartSEM.	5 min	-
<i>Análisis de la muestra</i>					
8	Barrido sobre la muestra	Desplazarse a través de la muestra en busca de puntos y regiones de interés para el análisis.	MEB, Software SmartSEM.	30 min	

**Tabla 3-27 (Continúa):** Procedimiento análisis mecanismo de desgaste mediante MEB.

9	Análisis de las regiones de interés	Revisar de las zonas de interés con varias magnificaciones para hacer un análisis minucioso.	MEB, Software SmartSEM.	60 min	
10	Toma imágenes de	Tomar fotografías a las distintas magnificaciones de análisis, ajustando la calidad y el tiempo de adquisición.	MEB, Software SmartSEM.	60 min	
<i>Microanálisis químico</i>					
12	Posicionamiento	Colocar la muestra a una distancia de trabajo de 8.5 mm.	MEB, Software SmartSEM, Software AZtec.	5 min	-
13	Imagen de barrido	Obtener la imagen en el software.	MEB, Software AZtec.	2 min	
14	Adquisición de espectros	Trazar regiones o puntos de interés para obtener la composición química.	MEB, Software AZtec.	30 min	
15	Confirmación de elementos	Realizar una revisión de los resultados e identificar posibles elementos erróneos dentro de la composición.	MEB, Software AZtec.	15 min	-
<i>Generación del reporte</i>					
16	Reporte	Registrar los datos obtenidos.	Formato CIRT-REG-MEB-01.	15 min	

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4.3 Ensayos destructivos del material ASTM A743 CA6NM

Los ensayos no destructivos del material retirado de los álabes ASTM A743 CA6NM son realizados con la finalidad de determinar la variación existente entre las propiedades mecánicas de un material nuevo (obtenidas de la norma respectiva) y un material que ha estado sometido a esfuerzos durante un determinado tiempo como parte de una turbina hidráulica.

### 3.4.3.1 Ensayo de tracción

**Propósito.-** El ensayo de tracción se realiza con el objetivo de obtener información acerca de la resistencia y la ductilidad de los materiales bajo tensiones de tracción.

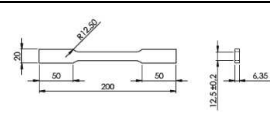



**Norma de referencia.-** ASTM E8: Standard Test Methods for Tension of Metallic Materials.

**Documento de referencia.-** El ensayo de tracción se debe realizar de acuerdo con el documento CIRT-PRO-TRA-01.


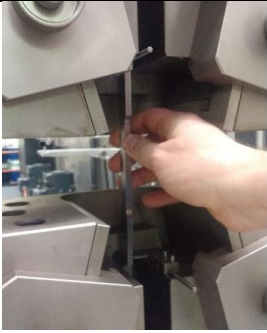


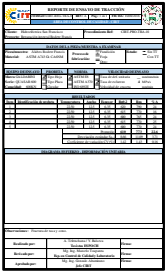
**Geometría de la probeta. -** La probeta de tracción utilizada en el ensayo de tracción acorde a la norma ASTM E8 corresponde a una probeta plana estándar tipo hoja, las dimensiones de la probeta se muestran en el ANEXO A.

**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para este ensayo se muestran en la Tabla 3-28 de manera detallada.

**Tabla 3-28:** Procedimiento para ensayo de tracción.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación de la superficie</i>					
1	Diseño de la probeta	Diseñar en base a la norma de aplicación (ASTM E8), y en función del material a ensayar	ASTM E8, Solid Works		
2	Mecanizado de la probeta	Mecanizar las secciones reducidas, obteniendo muestras libres de trabajo en frío, muescas, marcas de vibración, ranuras, rebabas o cualquier condición afecte negativamente las propiedades a medir	Fresadora CNC		
3	Medición de las dimensiones	Después del mecanizado se procederá a la medición de las dimensiones de la probeta (ancho y espesor)	Calibrador		
4	Marcado de la longitud de calibre	Marcar ligeramente con un punzón o dibujar con tinta según prefiera, las marcas estarán dentro de la longitud de calibre y estarán separadas 10mm	Calibrador, punzón, marcador		

**Tabla 3-28 (Continúa):** Procedimiento para ensayo de tracción.

<i>Preparación de la máquina</i>					
5	Arranque de la máquina	Encender la máquina universal y la computadora, posteriormente arrancar el programa Labtest.	Máquina universal, computadora		
<i>Ejecución del ensayo</i>					
6	Agarre de la probeta	Restringir el agarre de la probeta a la sección de agarre, de modo que el agarre no afecte los resultados de la prueba.	Mordazas según forma y dimensiones de la sección de agarre		
7	Configuración	Configurar el método de prueba según los parámetros que especifique la norma	Máquina universal, computadora, Programa Labtest		
8	Seleccionar la velocidad de prueba	Seleccionar la velocidad de prueba de acuerdo al método que especifique la norma, tomando en cuenta la sensibilidad a la velocidad de los materiales y los efectos de temperatura-tiempo	Norma ASTM E8		-
9	Llevar a cabo el ensayo	Aplicar la fuerza en la probeta hasta que se produzca la fractura de esta.	Máquina universal		
<i>Generación del reporte</i>					
10	Reporte	Llenar el formato de registro.	CIRT-REG-TRA-01		

Realizado por: Autores

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3.2 Ensayo de impacto

**Propósito.-** El ensayo de impacto se realiza con el objetivo de obtener información acerca de la tenacidad de un material, al ser sometido a un esfuerzo cortante.



**Norma de referencia.-** ASTM E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

**Documento de referencia.-** El ensayo de impacto se debe realizar de acuerdo con el documento CIRT-PRO-IMP-01.

**Geometría de la probeta.-** La probeta de impacto utilizada en el ensayo de impacto acorde a la norma ASTM E23 corresponde a una probeta de tipo V, las dimensiones de la probeta se muestra en el ANEXO B.



**Procedimiento.-** Los pasos ejecutados para este ensayo se muestran en la Tabla 3-29 de manera detallada.

**Tabla 3-29:** Procedimiento para el ensayo de impacto.

No.	Actividad	Descripción	Equipos y materiales	Tiempo	Fotografía
<i>Preparación del equipo</i>					
1	Revisión visual	Revisar que el equipo esté en condiciones óptimas de funcionamiento y no presente daño o desgaste.	Máquina de impacto	10 min	
2	Chequear la posición cero del péndulo	Elevar el péndulo a la posición trabada, mover el puntero hasta cerca de la capacidad máxima del rango utilizado, soltar el péndulo y leer el valor indicado. La lectura debe ser 0.	Péndulo Charpy, guantes.	5 min	-
3	Control de temperatura	Medir la temperatura a la cual se encuentra la sala en la que se realizara el ensayo. Se recomienda que la temperatura sea de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ .	Termómetro ambiental	2 min	



**Tabla 3-29 (Continúa):** Procedimiento para el ensayo de impacto.

<i>Ejecución del ensayo</i>					
4	Posicionamiento de la probeta	Colocar una muestra de prueba en la máquina, se recomienda utilizar pinzas autocentrantes.	Péndulo Charpy, pinzas autocentrantes, guantes.	10 min	-
5	Caída del péndulo	Levantar el péndulo a la posición trabada, establecer el indicador de energía en la lectura de la escala máxima y soltarlo.	Péndulo Charpy, guantes.	5 min	
6	Obtención de cantidad de energía absorbida	Observar en el indicador la cantidad de energía que ha absorbido la muestra y tomar datos.	Péndulo Charpy.	5 min	-
7	Retirado de la muestra	Asegurar el péndulo luego del ensayo y proceder a retirar la muestra con cuidado.	Péndulo Charpy, guantes.	5 min	
8	Revisión del equipo previa a repetir el ensayo	Si un espécimen se atasca en la máquina, ignorar los resultados y verificar a fondo la máquina en busca de daños o desalineación, lo que afectaría su calibración.	Péndulo Charpy, guantes.	5 min	-

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Elaboración propia

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta capítulo se presentan los resultados de las diferentes etapas de reparación y actividades adicionales realizadas para complementar la investigación.

#### 4.1 Resultados inspección de desgaste

En el Rodete Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco lo crítico ha sido la falta de adhesión del recubrimiento metálico (Figura 4-5), el mismo que al desprenderse debido al choque de partículas con gran ángulo de impacto (2.3.2.4), deja descubierta la superficie metálica y convirtiéndose así en una zona crítica debido a los efectos que produce el agua con alto contenido de partículas o materiales sólidos, generando así un área afectada por el corte por erosión (2.3.2.1) y la erosión por cavitación a la salida y en el lado de succión de los álabes (Figura 4-1), cabe aclarar que el desgaste por cavitación (2.3.3) existe en muy pocas zonas.



**Figura 4-1:** (1) Corte por erosión y (2) erosión por cavitación

Fuente: Propia

La diferencia entre erosión por abrasión (corte por erosión) y erosión por cavitación es muy notorio, con tan solo hacer una inspección visual de las partes afectadas, ya que las marcas de los desgastes son evidentes y muy distintas para cada caso. Las marcas solamente por abrasión de los sólidos finos son como los causados por golpes constantes de martillo y dejan una superficie opaca, mientras que los de la cavitación son como unas picaduras que al ser ocasionadas en el mismo punto hacen un desgaste mayor pero puntual y comúnmente se forman filos pronunciados.



#### 4.1.1.1 Resultados análisis mecanismo de desgaste mediante MEB

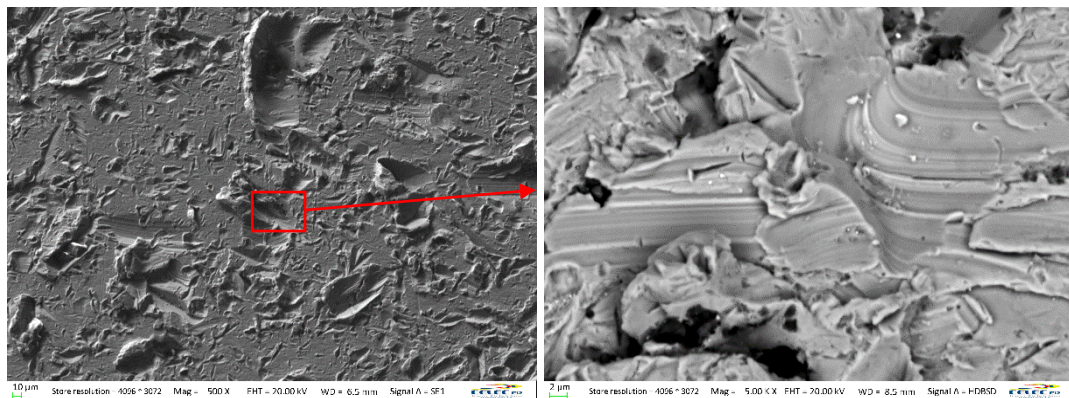
Mediante el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) se ha realizado un análisis a nivel micrométrico de una de las zonas desgastadas del álabe del Rodete Francis de la CHSF (Figura 4-2), donde se ha podido analizar la topografía del material debido a la erosión abrasiva, la erosión por cavitación, además de haber obtenido la transición entre el metalizado y el acero, y la micro fisuración del metalizado presente en ciertas zonas.



**Figura 4-2:** Zona desgastada del Rodete Francis de la CHSF.

Fuente: Propia

La Figura 4-3 (izq), se obtuvo en la superficie donde el metalizado se ha desprendido (lado de presión del álabe), se evidencia picadura del material metálico en el orden de los micrómetros, y a una mayor ampliación en Figura 4-3 (der) es posible observar la topografía ocasionada en la superficie del material, y se puede decir con certeza que se presenta el mecanismo de corte por erosión, comúnmente llamado erosión abrasiva, que tiene lugar cuando el ángulo de impacto de las partículas es bajo y lo que ocurre es que las partículas se deslizan generando un desprendimiento del material y dejando marcadas las zonas en la dirección que se deslizan.

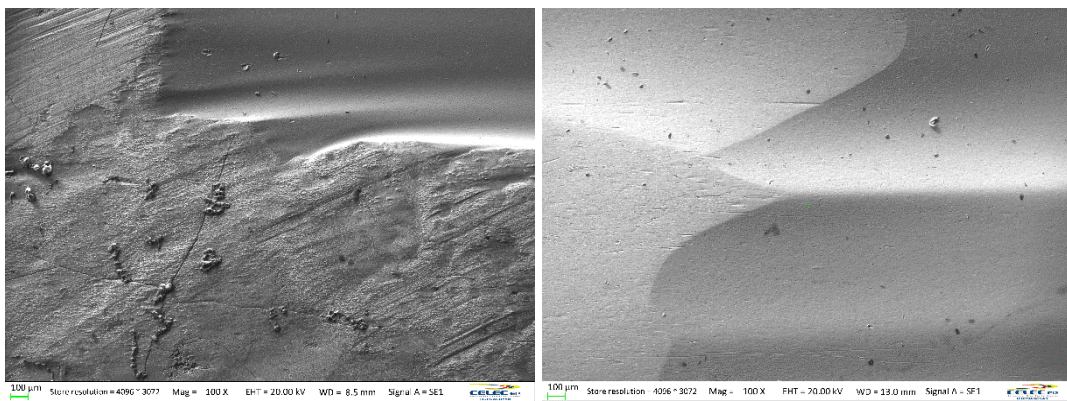


**Figura 4-3:** Topografía de erosión abrasiva en el Acero ASTM A743 Gr. CA6NM.

Nota: (izq: SE1 a 500X, der: HDBSD a 5000X)

Fuente: Propia

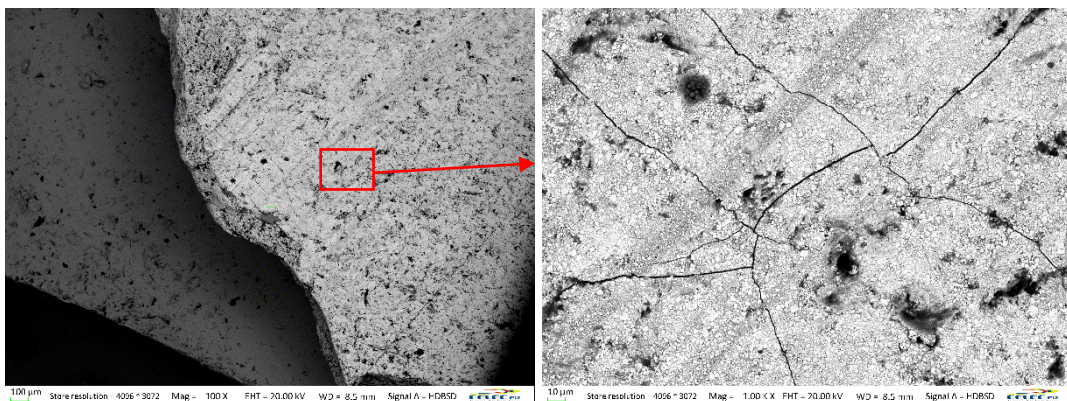
En la Figura 4-4 (izq), en la parte inferior de la se observa el progreso del daño del álabe. Una vez fisurada la capa de metalizado se produce el desprendimiento del mismo, dejando cada vez esta capa más delgada y permitiendo la picadura del material. En la parte superior derecha se observa el estado en que queda la superficie luego de años de desgaste y la formación de geometrías cóncavas. Asimismo, en la Figura 4-4 (der) la superficie que observamos es el producto final de la erosión por cavitación, por lo que ya no se observa gran cantidad de picadura en el material. Con el paso del tiempo el material arrancado se desprende en su totalidad formando concavidades de gran tamaño y aspecto liso en la superficie del álabe.



**Figura 4-4:** Topografía progreso de desgaste.

**Nota:** (izq: SE1 a 100X, der: SE1 a 100X)

**Fuente:** Propia



**Figura 4-5:** Mala adherencia del Carburo de Tungsteno en el acero.

**Nota:** (izq: HDBSD a 100X, der: HDBSD a 1000X)

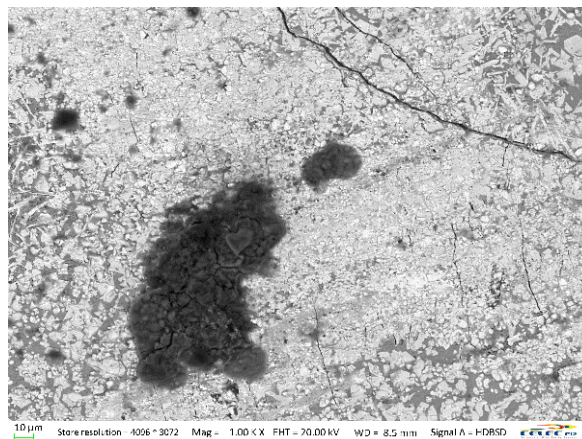
**Fuente:** Propia

En la Figura 4-5 (izq) se observa una diferencia de tonalidad entre el acero y el metalizado, lo cual se produce debido a que el carburo de tungsteno es más pesado y por tanto se observa en un tono más claro con el detector HDBSD, siendo posible notar una

separación entre estos materiales lo cual es un indicio del problema. Al no existir una adherencia adecuada de la capa de metalizado tiende a fisurarse como lo muestra la Figura 4-5 (der) y posteriormente a desprenderse.

La micro fisuración de la capa de metalizado se debe al impacto de partículas a gran velocidad y con un alto ángulo de impacto, lo cual desencadena en su posterior desprendimiento, dejando así al álabe desprotegido y acelerando su proceso de desgaste.

En la Figura 4-6, se muestra una imagen obtenida en la superficie del álabe que aún contaba con metalizado, encontrando partículas de color oscuro que se asume que son Belzona ya que luego de las reparaciones en sitio se procedía a colocar una capa de recubrimiento de este material para proteger al rodete.



**Figura 4-6:** Superficie del álabe con metalizado.

**Nota:** (izq: HDBSD a 100X, der: HDBSD a 1000X)

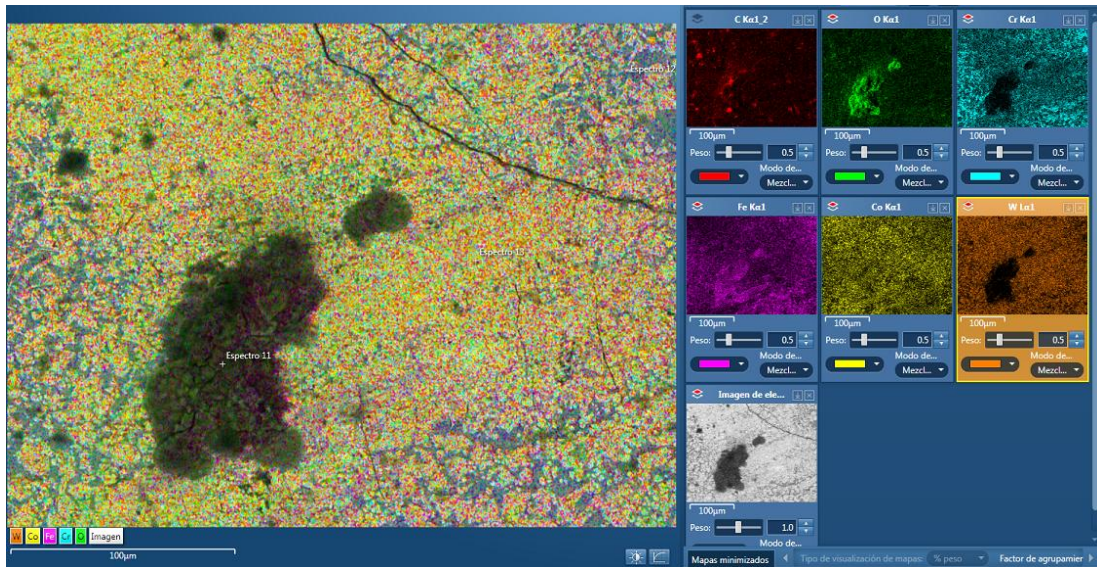
**Fuente:** Propia

Para constatar que se los elementos que se observan sobre la muestra corresponden a carburo de tungsteno o Belzona se realizó un microanálisis composicional en una imagen obtenida sobre la muestra a una magnificación de 1000X con electrones retrodispersados, mediante un mapeo se determinaron elementos como W, Co, Fe, Cr, O y C en la muestra,

Figura 4-7.

Luego del mapeo se realizó un análisis puntual, obteniendo así las composiciones aproximadas de la capa de metalizado y de la Belzona sobre la muestra, mostradas en la Tabla 4-1.





**Figura 4-7:** Mapeo zona de análisis mecanismo de desgaste.

Fuente: Propia

**Tabla 4-1:** Composición química recubrimientos aplicados a elementos hidráulicos.

<b>Metalizado</b>		<b>Belzona</b>	
Elemento	Porcentaje (%)	Elemento	Porcentaje (%)
W	71.4	Al	51.5
Co	8.6	O	34.4
Fe	6.7	Fe	9.5
Cr	5.5	Ti	2.3
O	4.5	Cr	2.1
Sr	3.2	C	0.1
C	0.1		

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

Estas composiciones son una buena aproximación a la composición real de los componentes y confirman que las zonas más claras obtenidas en imágenes anteriores son carburo de tungsteno, mientras que las partículas oscuras ubicadas sobre esta capa son Belzona. Es importante indicar que elementos como hierro y cromo aparecen debido a que como el recubrimiento está fisurado y los electrones pasan a través de este hasta llegar al acero, mostrando los elementos que lo componen. En el caso del elemento carbono no es posible cuantificarlo de manera exacta mediante microanálisis composicional debido al tipo de tecnología que se utiliza.

#### 4.2 Resultados control dimensional

Dentro del control dimensional realizado estuvieron: Control de luz entre álabes mediante la medición de la distancia existente entre álabes conocida como luz; y Control de

desgaste a la entrada y salida del rodete mediante la medición de la holgura existente al utilizar las plantillas correspondientes.

#### 4.2.1 Control de luz entre álabes

La medida comprendida entre álabe y álabe se conoce como luz, dicha medida se toma en cinco puntos específicos según lo especifica el

ANEXO E, dichos valores se han tabulado en la Tabla 4-3, para después compararlos con el rango permisible de la Tabla 4-2, cabe mencionar que la tolerancia que especifican los planos de diseño es +3% de del total de la apertura, que representa aproximadamente 4mm, pero se ha determinado la tolerancia de +2mm bajo la directriz del Especialista Técnico en Reparación de Turbinas, quien fue el encargado de dirigir dicha reparación.

**Tabla 4-2:** Rango de luz permisible entre álabes del Rodete Francis de la CHSF.

Punto	Dimensión	Tolerancia	Rango	
1	133.56	+2/-0	135.56	133.56
2	149.67	+2/-0	151.67	149.67
3	146.54	+2/-0	148.54	146.54
4	145.32	+2/-0	147.32	145.32
5	144.15	+2/-0	146.15	144.15

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

**Tabla 4-3:** Luz entre álabes Rodete Francis de la CHSF antes de la reparación.

No. Álabe	Puntos de control														
	1	x	√	2	x	√	3	x	√	4	x	√	5	x	√
Álabe 1	134		√	151		√	148		√	148	x		146		√
Álabe 2	134.5		√	151		√	146.5		√	147		√	146		√
Álabe 3	134		√	151		√	147		√	146		√	145		√
Álabe 4	135		√	152	x		147.5		√	146		√	147	x	
Álabe 5	135		√	150		√	148		√	146.5		√	146		√
Álabe 6	134		√	151		√	147		√	147		√	147	x	
Álabe 7	135		√	150		√	147		√	146.6		√	146		√
Álabe 8	134.5		√	150		√	147.5		√	147		√	146		√
Álabe 9	134.5		√	150.5		√	148		√	147		√	146.5	x	
Álabe 10	134		√	151		√	148		√	146		√	147	x	
Álabe 11	134		√	150		√	147.5		√	146.5		√	146.5	x	
Álabe 12	135		√	150		√	148		√	148	x		147	x	
Álabe 13	134.5		√	151.5		√	146.5		√	147		√	146		√

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

Se puede observar pequeñas variaciones (pequeñas <1mm) en diferentes álabes y en diferentes puntos de control, dicha desviaciones se cree que son producto de reparaciones en campo realizadas a dichos álabes, aunque cabe recalcar que la variación es sobre el límite superior, teniendo así una mayor área de salida en el rodete y es posible que se vea afectado el rendimiento de la turbina.

#### 4.2.2 Control de desgaste

Para el control de desgaste se utilizan las plantillas mostradas en el ANEXO D, las cuales se ubican a la entrada del rodete en 3 puntos específicos y a la salida del rodete en los 5 puntos de control de luz (ANEXO E), dicha holgura no debe sobrepasar 1mm ya sea a la entrada o la salida del rodete. Los resultados de dicho control se presentan en la Tabla 4-4y en la Tabla 4-5.

**Tabla 4-4:** Holgura a la entrada del Rodete Francis de la CHSF.

No. Álabe	Holgura en puntos de control - Entrada								
	1	x	√	2	x	√	3	x	√
Álabe 1	1.80	x		1.05	x		1.25	x	
Álabe 2	2.30	x		1.20	x		1.05	x	
Álabe 3	1.40	x		0.95		√	1.5	x	
Álabe 4	1.60	x		0.90		√	1.55	x	
Álabe 5	1.95	x		1.10	x		1.5	x	
Álabe 6	1.85	x		1.00		√	1.35	x	
Álabe 7	1.25	x		0.80		√	1.8	x	
Álabe 8	1.50	x		1.30	x		1.45	x	
Álabe 9	1.65	x		0.95		√	1.2	x	
Álabe 10	1.90	x		1.25	x		1.35	x	
Álabe 11	1.65	x		1.15	x		1.45	x	
Álabe 12	1.80	x		1.05	x		1.5	x	
Álabe 13	1.35	x		1.00		√	1.25	x	

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

**Tabla 4-5:** Holgura a la salida del Rodete Francis de la CHSF.

No. Álabes	Holgura en puntos de control - Salida														
	1	x	√	2	x	√	3	x	√	4	x	√	5	x	√
Álabe 1	0.95		√	1.00		√	1.55	x		1.60	x		2.35	x	
Álabe 2	0.75		√	0.90		√	1.15	x		1.65	x		1.75	x	
Álabe 3	0.40		√	0.95		√	1.60	x		2.05	x		2.10	x	
Álabe 4	0.30		√	1.00		√	1.85	x		1.70	x		2.40	x	
Álabe 5	0.25		√	0.60		√	1.65	x		1.55	x		2.45	x	
Álabe 6	0.45		√	0.45		√	1.60	x		1.50	x		2.60	x	
Álabe 7	0.20		√	0.65		√	1.70	x		2.15	x		2.50	x	
Álabe 8	0.10		√	0.25		√	1.25	x		1.65	x		2.10	x	
Álabe 9	0.25		√	0.10		√	1.65	x		2.35	x		1.90	x	
Álabe 10	0.15		√	0.15		√	0.20		√	1.20	x		0.95		√
Álabe 11	0.10		√	1.55	x		1.60	x		1.80	x		2.20	x	
Álabe 12	1.35	x		1.95	x		2.50	x		2.60	x		3.20	x	
Álabe 13	0.20		√	0.90		√	1.20	x		1.30	x		2.10	x	

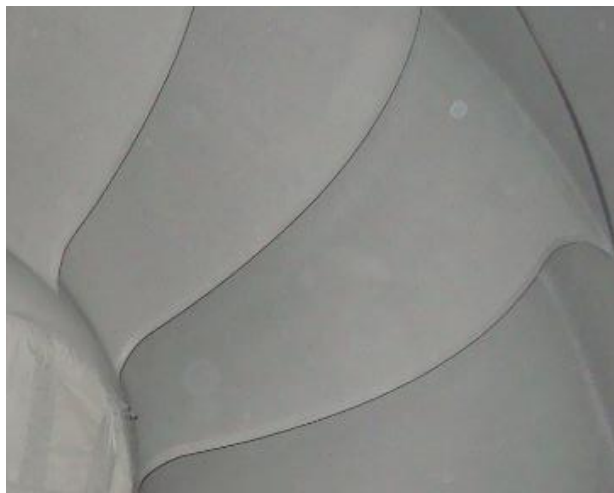
**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Propia

Existe gran cantidad de material perdido tanto en las entradas como en las salidas, por lo cual la holgura en las plantillas excede el límite permisible, esto se debe al desgaste producido por la erosión abrasiva y la erosión por cavitación en el material.

#### 4.3 Resultados remoción de recubrimiento

La remoción del recubrimiento mediante SpongeJet dio como resultado una rugosidad correspondiente a 3.18 Ra, lo cual es adecuado para realizar ensayos no destructivos.



**Figura 4-8:** Superficie luego de la remoción del recubrimiento

**Fuente:** Autores

#### 4.4 Resultados caracterización del material – Etapa 1

##### 4.4.1 Resultados espectrometría

De los 13 álabes del Rodete Francis de la Central Hidroeléctrica San Francisco se eligió una muestra del 25%, en este caso 3 álabes a los cuales se realizó la espectrometría, y los valores de composición química con los elementos relevantes se presenta en la Tabla 4-6.

**Tabla 4-6:** Resultados espectrometría - Álabes 4, 8 y 9 del Rodete Francis CHSF.

Álabe	Elementos químicos							
	%C	%Cr	%Ni	%Si	%Mn	%P	%S	%Mo
4	0.029	11.67	4.535	0.371	0.419	0.01	0.0038	0.47
8	0.03	11.64	3.953	0.441	0.682	0.015	0.0036	0.53
9	0.027	11.33	4.282	0.469	0.544	0.014	<0.0035	0.52
$\bar{x}$	<b>0.029</b>	<b>11.547</b>	<b>4.257</b>	<b>0.427</b>	<b>0.548</b>	<b>0.013</b>	<b>0.004</b>	<b>0.507</b>
$S_{n-1}$	0.002	0.188	0.292	0.050	0.132	0.003	0.000	0.032
CV	5.329	1.630	6.856	11.821	23.992	20.352	3.822	6.345

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

Al comparar los valores promedio obtenidos en el ensayo de espectrometría en los álabes del Rodete Francis de la CHSF mostrados en la Tabla 4-6, con los valores especificados en la Norma (ASTM A743) mostrados en la Tabla 2-3, se puede apreciar que todos los valores están acorde a los requerimientos de la norma.

##### 4.4.2 Resultados medición de dureza

La medición de dureza se ha realizado a la misma muestra de los álabes del Rodete Francis que se realizó espectrometría y dichos valores se presenta en la Tabla 4-7.

**Tabla 4-7:** Medición de dureza - Álabes 4, 8 y 9 del Rodete Francis CHSF.

Álabe	Dureza	
	HRA	HB
4	67.7	324
8	66.5	306
9	65.8	295
$\bar{x}$	66.667	308.333
$S_{n-1}$	0.961	14.640
CV	1.441	4.748

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

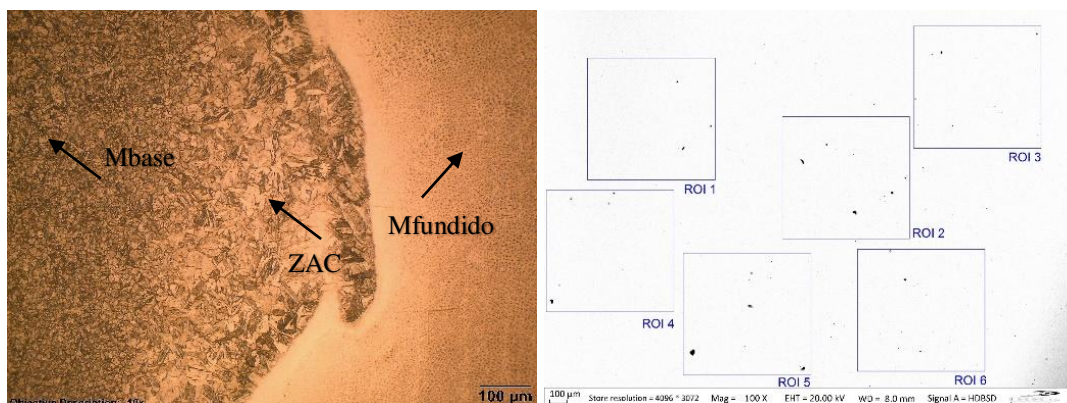
Teniendo en cuenta que el valor promedio de dureza Brinell de lo álabes es de 254HB (ANDRITZ Hydro, 2011), se puede apreciar un aumento de 54HB aproximadamente, y



dicho aumento de dureza se debe a las reparaciones realizadas en sitio, cabe mencionar que el valor promedio obtenido supera la dureza máxima permisible de este material que es 285HB (ASTM A743), por lo que se ve la necesidad de buscar algún proceso alternativo de reparación en sitio para evitar el endurecimiento elevado del material y así la fragilización del mismo.

#### 4.4.3 Resultados metalografía

La metalografía se ha realizado en las zonas de reparación en sitio del álabe #09 de la Central Hidroeléctrica San Francisco, en la Figura 4-9 se muestra la microestructura producto de la soldadura realizada en dicha reparación. Es posible diferenciar las diferentes zonas de la soldadura: metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y metal fundido (MF), a través de esta micrografía se puede determinar que las reparaciones realizadas en campo antes de que el rodete salga de funcionamiento eran realizadas con aporte austenítico, por lo cual no se revela la microestructura en la muestra al ser atacada con Villela's. El tamaño de grano del metal base es mucho más pequeño que el de la zona afectada por el calor como es de esperarse ya que luego de estas reparaciones el material no fue sometido a tratamiento térmico. Además, se ha realizado un análisis de inclusiones como se muestra en la Figura 4-9. Se ha determinado que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 24 y gruesos 4, teniendo así un total de 28; además se encontraron silicatos delgados con longitudes de 21.78 $\mu$ m.



**Figura 4-9:** Análisis microestructural e inclusiones reparaciones en sitio álabe #09.

Fuente: Propia

#### 4.4.4 Ensayos destructivos

Los resultados de ensayos destructivos nos han ayudado a determinar los valores de propiedades mecánicas como son: esfuerzo a la fluencia, esfuerzo último a la tracción, porcentaje de alargamiento y resistencia al impacto. En la Tabla 4-8 se muestran los resultados del ensayo de tracción, mientras que en la Tabla 4-9 los resultados de impacto.

**Tabla 4-8:** Resultados Ensayo de Tracción en Acero ASTM A743 Gr. CA6NM.

Ítem	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Rp0.2 (MPa)	Rm (MPa)	%A (en 50mm)
1	12.5	6.35	620	790	24
2	12.5	6.35	615	770	16
3	12.5	6.35	600	765	24
4	12.5	6.35	615	770	25
5	12.5	6.35	600	770	24
Promedio			<b>610</b>	<b>773</b>	<b>22.6</b>
Desviación estándar S <sub>n-1</sub>			8.66	11.09	3.71
Coeficiente de variación CV (%)			1.42	1.43	0.16

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

**Tabla 4-9:** Resultados del Ensayo de Impacto.

Probeta	Sección transversal de la probeta			Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto, KCU (J/cm <sup>2</sup> )
	Altura (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )		
1	0.836	1.002	0.83767	176.95	211.24
2	0.828	1.005	0.83214	163.87	196.926
3	0.829	1.002	0.83066	171.58	206.559
Promedio				170.800	204.908
Desviación estándar S <sub>n-1</sub>				6.575	7.298
Coeficiente de variación CV (%)				3.849	3.562

Realizado por: Autores

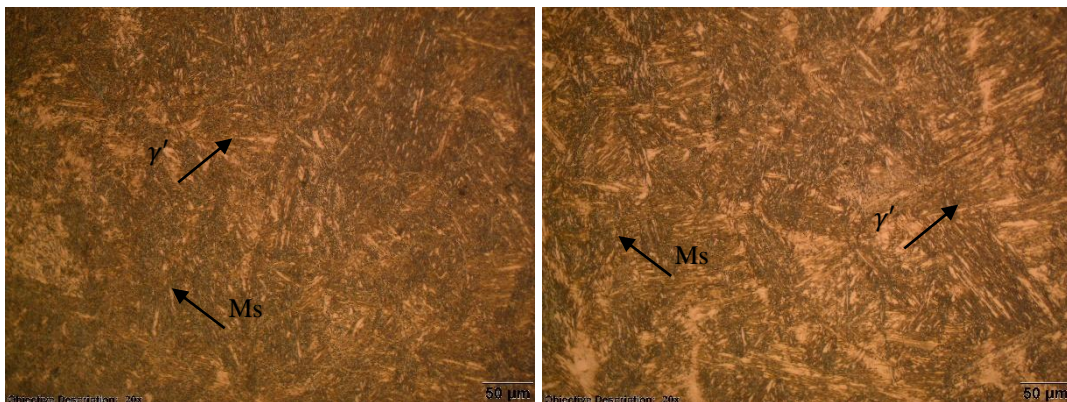
Fuente: Propia

Los valores obtenidos de esfuerzo a la fluencia (Rp<sub>0.2</sub>) y último esfuerzo a la tracción (Rm) se encuentra dentro de los valores establecidos en la Tabla 2-4; cabe mencionar que (ANDRITZ Hydro, 2011) establece unos valores promedio de Rp<sub>0.2</sub> = 708MPa, Rm= 863MPa, %A= 18 y KCU= 199 J/cm<sup>2</sup>, y que al comparar los resultados de la Tabla 4-8 y Tabla 4-9 con dichos valores se encuentra una pérdida de esfuerzo a la fluencia del 13%, mientras que del esfuerzo último a la tracción de 10% y una aumento en los valores tanto de alargamiento del 25% y de resistencia al impacto del 3%.

#### 4.5 Resultados corte de los álabes con plasma

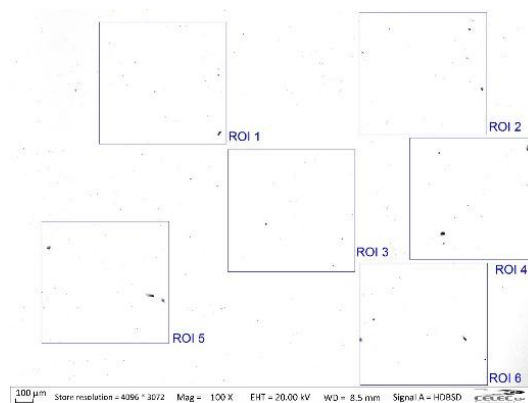
##### 4.5.1 Cambios a nivel microestructural del material

La metalografía realizada permite observar que a nivel microestructural existen cambios significativos. En la Figura 4-10 (izq.), es posible reconocer una matriz de martensita revenida formada por agujas muy finas, por lo cual los bordes de grano no son claramente reconocibles. La cantidad de martensita frente a la cantidad de austenita retenida (zonas claras) es muy elevada producto del corte con plasma. En la Figura 4-10 (der.), se reconoce de igual manera una matriz martensítica pero con agujas de mayor tamaño que en la zona cercana al corte, podemos hablar de agujas medianas. Los bordes de grano son reconocibles. La cantidad de martensita disminuye en gran cantidad en el metal que no ha sufrido afectación por el corte, por lo cual se observa mayor presencia de austenita retenida (zonas claras).



**Figura 4-10:** Análisis microestructural e inclusiones de material cortado por plasma

Fuente: Propia



**Figura 4-11:** Análisis de inclusiones de material cortado por plasma.

Fuente: Propia

Del análisis de inclusiones se determinó que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 19 y gruesos 3, teniendo así un total de 14. Adicionalmente, se encontraron silicatos gruesos con una longitud total de 49.60  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, la severidad del área es 2.

#### 4.5.2 Cambios de dureza del material

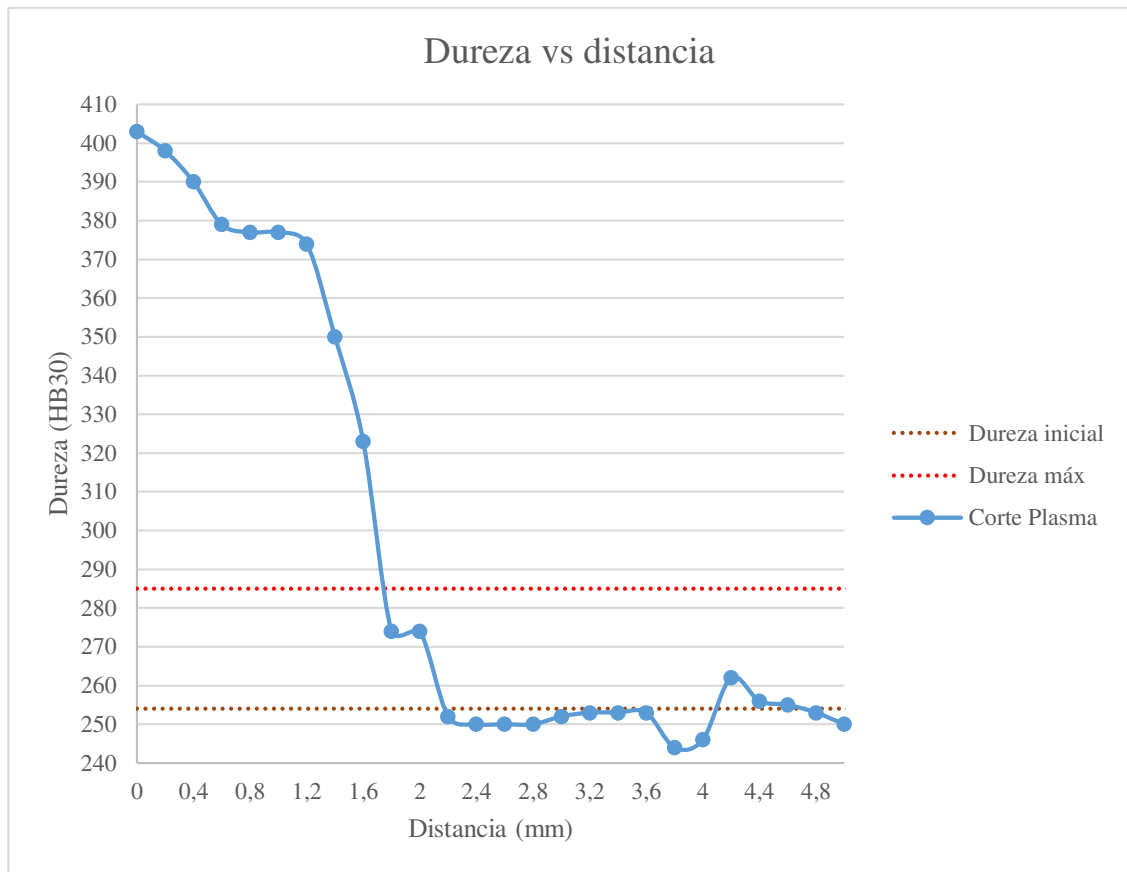
La variación producida por el corte mediante plasma se ha determinado mediante la medición del perfil de Micro dureza Vickers (HV 0.3/10) para luego transformarla a dureza Brinell (HB 30), dichos valores se pueden apreciar en la Tabla 4-10; la medición se ha realizado empezando desde el borde de corte, y en dirección perpendicular a la dirección de corte y de manera que las indentaciones estén distanciadas 200 $\mu\text{m}$ . Se ha realizado la medición hasta obtener una estabilidad en los valores de medición y lo más próximo a 254HB (4.4.2), que es el valor promedio de dureza Brinell que tenían los álabes antes de realizar el corte por plasma.

**Tabla 4-10:** Valores micro dureza medida a partir del borde de corte por plasma.

Indentación	distancia (mm)	HV 0,3/10	HB 30
1	0.20	421	398
2	0.40	412	390
3	0.60	400	379
4	0.80	398	377
5	1.00	398	377
6	1.20	395	374
7	1.40	369	350
8	1.60	341	323
9	1.80	289	274
10	2.00	289	274
11	2.20	265	252
12	2.40	263	250
13	2.60	263	250
14	2.80	263	250
15	3.00	265	252
16	3.20	266	253
17	3.40	266	253
18	3.60	266	253
19	3.80	255	244
20	4.00	259	246
21	4.20	277	262
22	4.40	269	256
23	4.60	268	255
24	4.80	266	253
25	5.00	263	250

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Propia



**Gráfico 4-1:** Dureza en función de la distancia al borde cortado con plasma

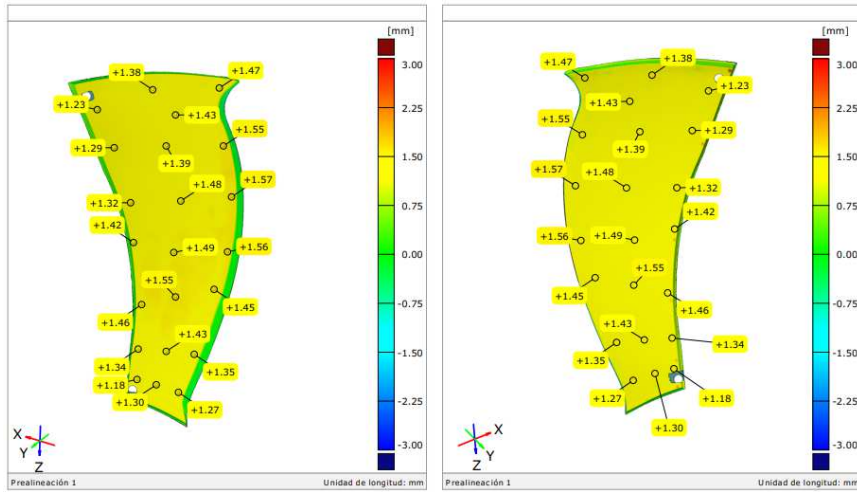
Fuente: Propia

Teniendo en cuenta que el valor promedio de dureza Brinell de los álabes es de 254HB (ANDRITZ Hydro, 2011), y que la dureza máxima permisible de este material es 285HB (ASTM A743), se puede apreciar en el Gráfico 4-1 que el corte por plasma genera una afectación en el material de 2mm, siendo esta la zona afectada por el calor generada por el corte por plasma en el Acero ASTM A743 Gr. CA6NM, dicho valor es tomado a partir del borde del corte por plasma.

#### 4.6 Control de calidad de los insertos

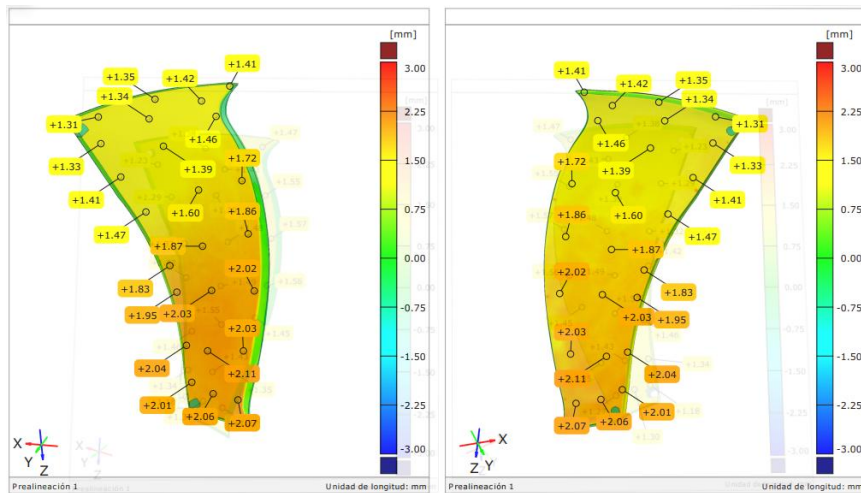
##### 4.6.1 Resultados escaneo 3D

Al igual que para el análisis de composición química, de los 15 insertos adquiridos se eligió una muestra del 25%, en este caso 4 insertos, los cuales fueron escaneados y analizados. A continuación se muestran los resultados obtenidos luego del escaneo y superposición de los 4 álabes tomados como referencia.



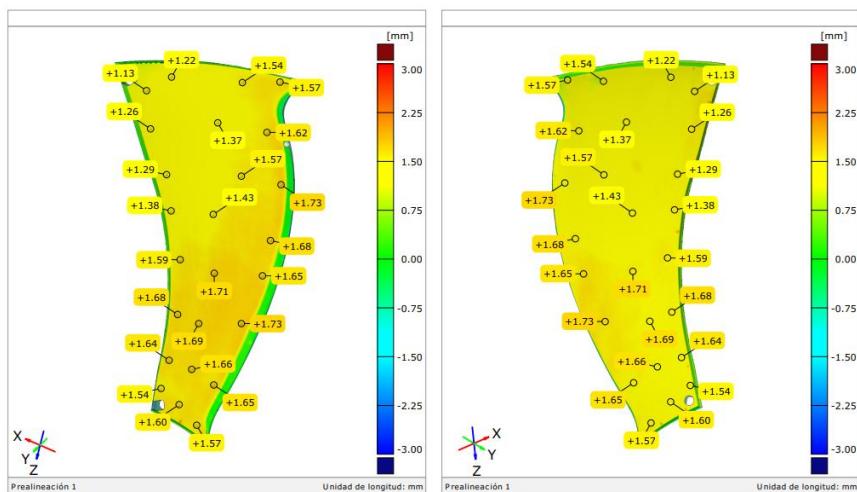
**Figura 4-12:** Inspección dimensional computarizada – Inserto #03

Fuente: CIRT – Comparación recepción #03



**Figura 4-13:** Inspección dimensional computarizada – Inserto #07.

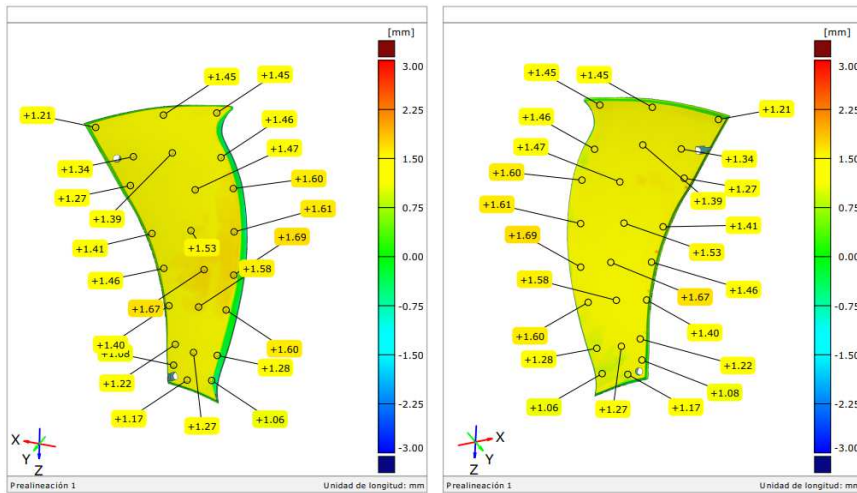
Fuente: CIRT – Comparación recepción #07



**Figura 4-14:** Inspección dimensional computarizada – Inserto #09

Fuente: CIRT – Comparación recepción #09





**Figura 4-15:** Inspección dimensional computarizada – Inserto #13

Fuente: CIRT – Comparación recepción #13

Del análisis se obtiene que los álabes tienen ligeras variaciones en las medidas solicitadas, siendo la mayor 2.11 milímetros. La desviación es simétrica en el lado de presión y de succión del inserto en los puntos de análisis. Debido al exceso del material fue necesario maquinar los insertos, previo a iniciar con la reparación para evitar trabajo posterior y posibles desigualdades en la geometría obtenida por pulido manual.

#### 4.6.2 Resultados espectrometría

Al igual que los álabes del Rodete Francis, se tomó una muestra del 25% más próximo al entero del número de insertos metálicos prefabricados (15), en este caso 4 insertos, a los cuales se realizó espectrometría y dichos valores de composición química con los elementos relevantes se presenta en la Tabla 4-11.

**Tabla 4-11:** Resultados espectrometría insertos metálicos prefabricados 3, 7, 9 y 13.

Inserto	Elementos químicos							
	%C	%Cr	%Ni	%Si	%Mn	%P	%S	%Mo
3	0.036	11.86	4.213	0.34	0.654	0.033	0.0046	0.551
7	0.03	11.76	4.182	0.354	0.709	0.037	<0.0035	0.56
9	0.027	11.74	3.928	0.354	0.669	0.034	<0.0035	0.528
13	0.032	12.05	4.168	0.342	0.649	0.034	0.004	0.555
$\bar{x}$	<b>0.031</b>	<b>11.853</b>	<b>4.123</b>	<b>0.348</b>	<b>0.670</b>	<b>0.035</b>	<b>0.004</b>	<b>0.549</b>
$S_{n-1}$	0.004	0.142	0.131	0.008	0.027	0.002	0.000	0.014
CV (%)	12.080	1.196	3.182	2.173	4.057	5.020	9.867	2.580

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

Al comparar los valores promedio obtenidos en el ensayo de espectrometría en los insertos metálicos prefabricados mostrados en la Tabla 4-11, con los valores

especificados en la Norma (ASTM A182, 1998) mostrados en la Tabla 2-5, se puede apreciar que todos los valores están acorde a los requerimientos de la norma, a excepción del contenido de fósforo, que sobrepasa 0.005% del valor máximo determinado por la norma.

#### 4.6.3 Resultados medición de dureza

La medición de dureza se ha realizado a la misma muestra de los insertos metálicos prefabricados que se realizó espectrometría y dichos valores de dureza se presenta en la Tabla 4-12.

**Tabla 4-12:** Medición de dureza de insertos metálicos prefabricados 3, 7, 9 y 13.

Inserto	Dureza	
	HRA	HB
03	59.5	219
07	59.7	220
09	59.9	222
13	60	223
$\bar{x}$	<b>59.775</b>	<b>221.000</b>
$S_{n-1}$	0.222	1.826
CV (%)	0.371	0.826

**Realizado por:** Autores

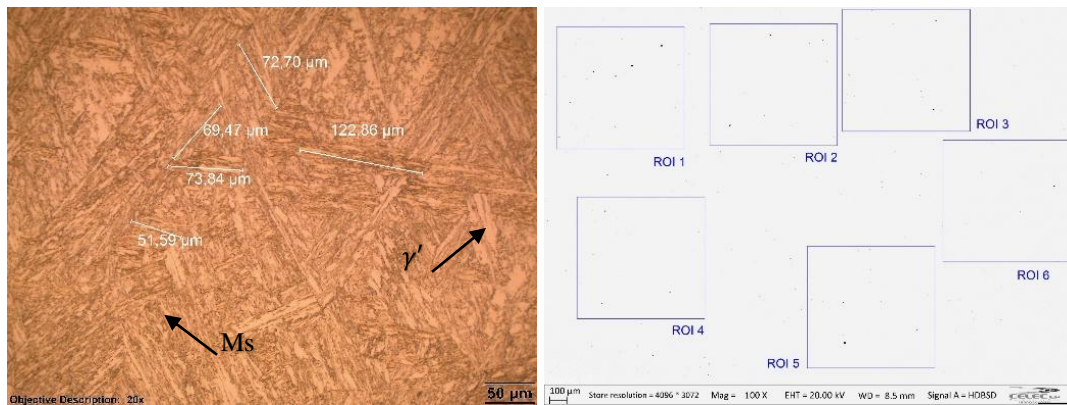
**Fuente:** Propia

El valor de dureza que se obtuvo en el ensayo de dureza es 221HB, cabe mencionar que dicho material está dentro de los parámetros que exige la norma, que especifica que la dureza no debe exceder los 295HB (ASTM A182, 1998, pág. 7).

#### 4.6.4 Resultados metalografía

Como resultado del análisis metalográfico de los insertos fabricados de material ASTM A182 Gr. F6NM, se observó que a nivel microestructural el acero presenta una matriz de martensita revenida (Ms) de forma acicular, con listones gruesos paralelos ordenados en paquetes y límites de grano bien definidos; se observa austenita retenida como fase secundaria ( $\gamma'$ ). Se procedió a medir las agujas de martensita de la Figura 4-16, tomando 5 medidas, obteniendo como resultado un promedio de 78.10 $\mu$ m. Del análisis de inclusiones se determinó que, en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 17 y gruesos 3, teniendo así un total de 20 y por lo tanto, la severidad del área es 2.





**Figura 4-16:** Análisis microestructural e inclusiones acero ASTM A182 Gr. F6NM.

Fuente: Propia

#### 4.6.5 Resultados inspección con tintas penetrantes (PT)

Al realizar el ensayo de tintas penetrantes sobre los insertos metálicos prefabricados, se tuvo resultados satisfactorios, ya que a pesar de que en los insertos #2 y #09 se encontró una indicación en cada uno, al dimensionarlas se determinó que se trataba de una pequeña discontinuidad, que es aceptable bajo la Norma (CCH 70-4, 2014).

#### 4.6.6 Resultados inspección con partículas magnéticas (MT)

Al realizar el ensayo de partículas magnéticas sobre los insertos metálicos prefabricados, se tuvo resultados satisfactorios, ya que no se encontró ninguna discontinuidad subsuperficial.

#### 4.6.7 Resultados inspección con ultrasonido (UT)

Al realizar el ensayo de ultrasonido sobre los insertos metálicos prefabricados, se tuvo resultados satisfactorios, ya que no se encontró ninguna discontinuidad interna.

### 4.7 Control de Calidad de la junta soldada del álabe #01

Debido a contratiempos dentro de la empresa no se terminó con la reparación en el tiempo previsto, por lo cual se terminó con la reparación total del primer álabe para que sea tomado como referencia para la investigación y en base a esta muestra se levanten procedimientos y se realicen estudios que puedan ayudar en la corrección de aspectos de la reparación, en caso de requerirse.

#### 4.7.1 *Resultados PT - Junta soldada del álabe #01*

Al realizar el ensayo de tintas penetrantes sobre la junta soldada del álabe #01 del Rodete Francis reparado, se tuvo resultados satisfactorios, ya que no se encontró ninguna discontinuidad superficial.

#### 4.7.2 *Resultados MT - Junta soldada del álabe #01*

Al realizar el ensayo de partículas magnéticas sobre la junta soldada del álabe #01 del Rodete Francis reparado, se tuvo resultados satisfactorios, ya que no se encontró ninguna discontinuidad subsuperficial.

#### 4.7.3 *Resultados UT - Junta soldada del álabe #01*

Al realizar el ensayo de partículas magnéticas sobre la junta soldada del álabe #01 del Rodete Francis reparado, se encontraron 8 discontinuidades, de las cuales 3 son defectos ya que sobrepasan el límite permisible. Las discontinuidades encontradas son: poros, escoria y faltas de fusión.

#### 4.8 Control de Calidad de la junta soldada placa

Para estudiar el efecto de los tratamientos térmicos en la junta soldada, se replicó el procedimiento de soldadura en una probeta y se procedió con el estudio.

##### 4.8.1 *Resultados PT - Junta soldada placa*

Al realizar el ensayo de tintas penetrantes sobre la placa soldada, se tuvo resultados satisfactorios, ya que no se encontró ninguna discontinuidad superficial; ya que a pesar de que se encontró dos indicaciones, al dimensionarlas se determinó que se trataba de pequeñas discontinuidades, que es aceptable bajo la Norma CCH 70-4.

##### 4.8.2 *Resultados MT - Junta soldada placa*

Al realizar el ensayo de partículas magnéticas sobre la placa soldada, se tuvo resultados satisfactorios, ya que no se encontró ninguna discontinuidad subsuperficial.

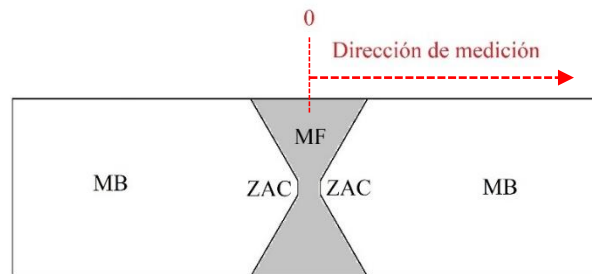
#### 4.8.3 Resultados UT - Junta soldada placa

Al realizar el ensayo de tintas penetrantes sobre la placa soldada, se tuvo resultados satisfactorios, ya que no se encontró ninguna discontinuidad interna.

#### 4.9 Caracterización de juntas soldadas pre y post tratamiento térmico

##### 4.9.1 Cambios de dureza de la junta

Se procedió a medir la dureza de la junta, como lo muestra Figura 4-17, donde el punto de inicio es a la mitad del cordón de soldadura, definiendo así las tres zonas de la junta: Metal Fundido (MF), Zona Afectada por el Calor (ZAC) y el Metal Base (MB); las probetas a medir la dureza son: sin tratamiento térmico y después de haber aplicado el Tratamiento Térmico Post Soldadura a las tres temperaturas definidas: 580°C, 600°C y 620°C, dichos valores de dureza se muestran en la Tabla 4-13.



**Figura 4-17:** Medición de dureza de la junta soldada.

**Nota:** La medición de dureza se ha realizado en la parte superior de la junta

**Fuente:** Propia

**Tabla 4-13:** Dureza Brinell Junta soldada con TT a diferentes temperaturas.

Zona	Distancia (mm)	Sin TT	580°C	600°C	620°C
METAL FUNDIDO (MF)	0	406	312	308	301
	0.2	414	340	306	301
	0.4	392	314	304	306
	0.6	392	314	304	309
	0.8	365	319	313	304
	1	365	314	308	310
	1.2	357	317	300	305
	1.4	368	318	313	304
	1.6	371	323	301	301
	1.8	392	318	305	297
	2	365	312	299	306
	2.2	383	295	314	294
	2.4	397	310	312	306
	2.6	368	308	313	297
	2.8	370	309	305	300
3	385	312	301	306	

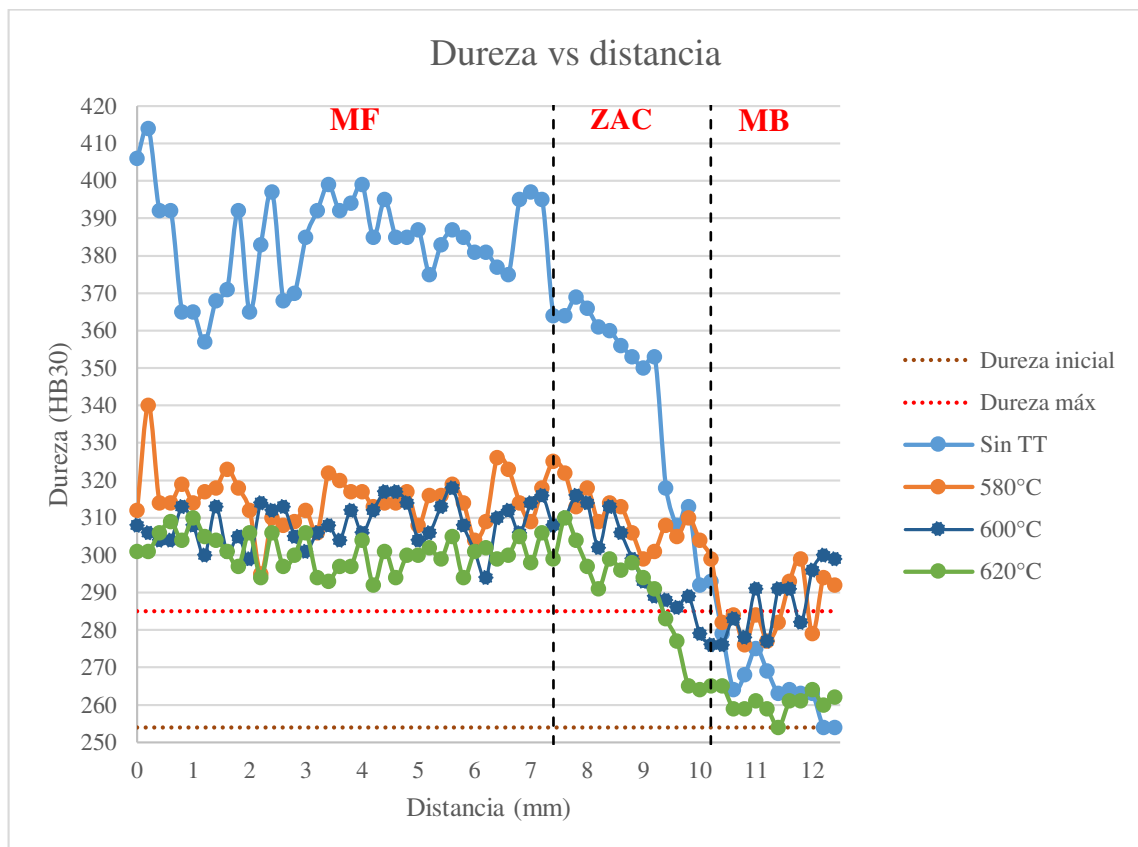
**Tabla 4-13 (Continúa): Dureza Brinell Junta soldada con TT a diferentes temperaturas.**

METAL FUNDIDO (MIF)	3.2	392	306	306	294
	3.4	399	322	308	293
	3.6	392	320	304	297
	3.8	394	317	312	297
	4	399	317	306	304
	4.2	385	313	312	292
	4.4	395	314	317	301
	4.6	385	314	317	294
	4.8	385	317	314	300
	5	387	308	304	300
	5.2	375	316	306	302
	5.4	383	316	313	299
	5.6	387	319	318	305
	5.8	385	314	308	294
	6	381	304	301	301
	6.2	381	309	294	302
	6.4	377	326	310	299
	6.6	375	323	312	300
	6.8	395	314	306	305
	ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC)	7	397	309	314
7.2		395	318	316	306
7.4		364	325	308	299
7.6		364	322	310	310
7.8		369	313	316	304
8		366	318	314	297
8.2		361	309	302	291
8.4		360	314	313	299
8.6		356	313	306	296
8.8		353	306	299	298
9		350	299	293	294
9.2		353	301	289	291
9.4		318	308	288	283
9.6		308	305	286	277
9.8	313	310	289	265	
METAL BASE (MB)	10	292	304	279	264
	10.2	293	299	276	265
	10.4	279	282	276	265
	10.6	264	284	283	259
	10.8	268	276	278	259
	11	275	284	291	261
	11.2	269	277	277	259
	11.4	263	282	291	254
	11.6	264	293	291	261
	11.8	263	299	282	261
12	263	279	296	264	
12.2	254	294	300	260	
12.4	254	292	299	262	

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

Una vez obtenido los valores de dureza Brinell se presenta para una mejor apreciación en el Gráfico 4-2.



**Gráfico 4-2:** Variación dureza zonas junta soldada con TT diferentes temperaturas.

Fuente: Propia

Basándonos en la dureza promedio del material base que es 254HB (4.4.2), se observa en el Gráfico 4-2 una variación de dureza de aproximadamente 150HB que se obtiene después de haber realizado la junta soldada, por lo que se puede hablar de un endurecimiento excesivo del material, siendo necesario aplicar un Tratamiento Térmico Post Soldadura después de la reparación para disminuir la dureza y aliviar tensiones térmicas, evitando así la fragilización del material. Al evaluar la dureza obtenida después de haber aplicado los Tratamientos Térmicos a diferentes temperaturas, se establece que la temperatura conveniente para aplicar el Tratamiento Térmico Post Soldadura es 620°C, ya que así existe una gran disminución de dureza, en comparación con la temperatura de 580°C y 600°C, y corroborando lo mostrado en la Figura 2-41, que a 620°C al presentar la mayor disminución de dureza, presenta la mayor resistencia al impacto del acero.

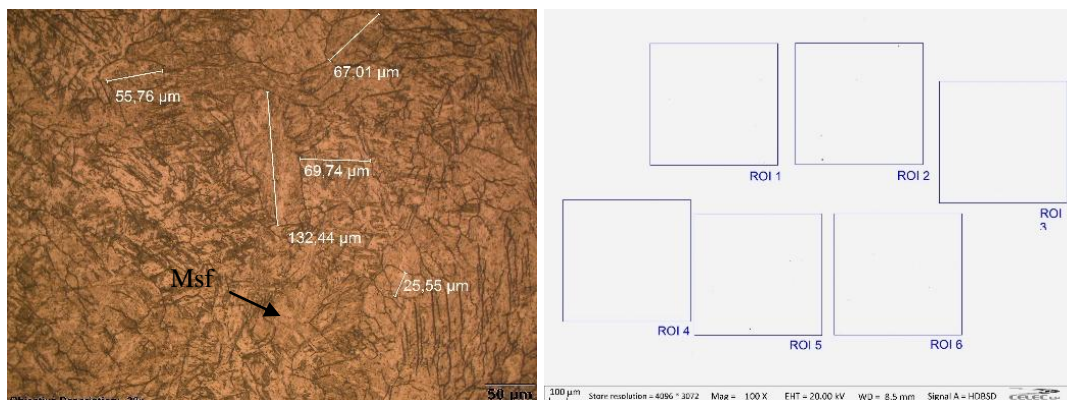
A las temperaturas de 580°C y 600°C se muestra algo en común con respecto al material base, que es un aumento de dureza después del Tratamiento Térmico a dichas temperaturas, por lo que no sería conveniente realizar el Tratamiento a dichas temperaturas, debido a la fragilización del material base, y por otro lado su baja disminución de la dureza en el MF y en la ZAC como ya se habló anteriormente; además, a la temperatura de 580°C se puede observar en el Gráfico 4-2, que después del tratamiento térmico parte de la ZAC permanece con la dureza que tenía sin TT, por lo que se presente una mayor fragilidad, que comparando con la bibliografía representa la disminución de la resistencia al impacto, corroborando la teoría de (ASM Metals Handbook), que determina que el tratamiento térmico no debe llevarse a cabo a temperaturas menores a 595°C debido a que la dureza no disminuye lo suficiente y por ende el material mantiene su fragilidad, disminuyendo su resistencia al impacto.

#### 4.9.2 Análisis metalográfico probetas junta soldada sin TT y con TTPS

En las 4 probetas estudiadas se analizó las tres zonas principales encontradas en la soldadura: metal fundido, zona afectada por el calor y metal base.

##### 4.9.2.1 Probeta sin tratamiento térmico

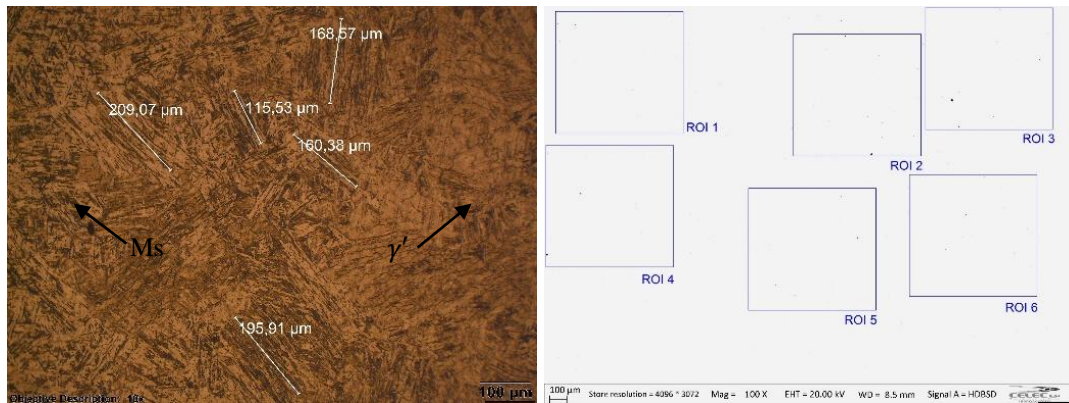
En el metal fundido se tiene una matriz dendrítica formada por martensita fresca (Msf), se midieron los granos de martensita y como resultado se obtuvo un tamaño promedio de 70.10  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se obtuvo que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 5 y gruesos 0, teniendo así un total de 5. Por lo tanto, la severidad del área es 1.



**Figura 4-18:** Análisis microestructural e inclusiones metal fundido – Probeta sin TT.

Fuente: Propia

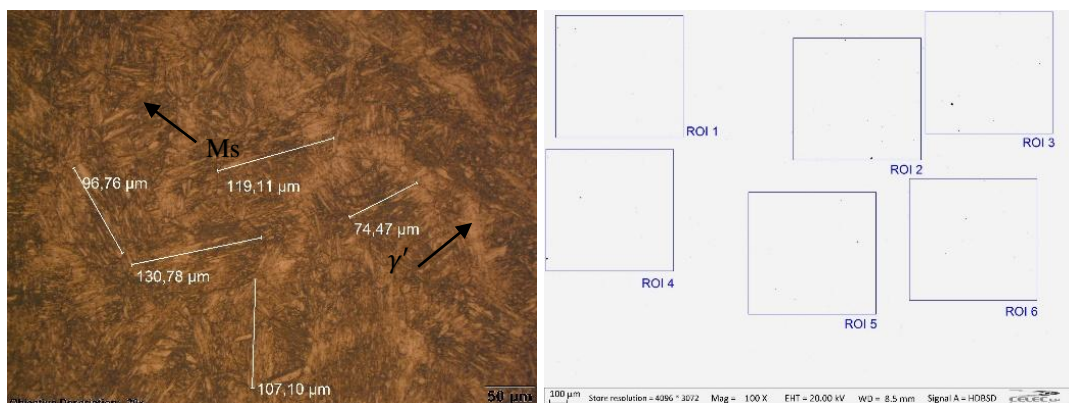
En la zona afectada por el calor se tiene una matriz formada de martensita revenida (Ms) con morfología acicular gruesa y fase secundaria austenita retenida ( $\gamma'$ ), se midieron las agujas de martensita y como resultado se obtuvo un tamaño promedio de 169.89  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se obtuvo que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 24 y gruesos 1, teniendo así un total de 25. Por lo tanto, la severidad del área es 2 ½.



**Figura 4-19:** Análisis microestructural e inclusiones ZAC – Probeta sin TT.

Fuente: Propia

En el metal base se observa una matriz de martensita revenida (Ms) con morfología acicular mediana y discretos espacios de austenita retenida ( $\gamma'$ ), se midieron los granos de martensita y como resultado se obtuvo un tamaño promedio de 112.69  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se obtuvo que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 24 y gruesos 1, teniendo así un total de 25. Por lo tanto, la severidad del área es 2 ½.



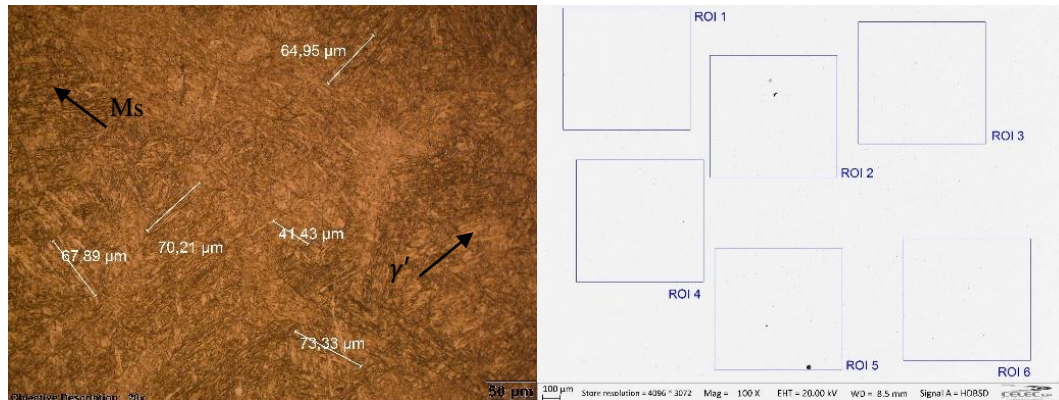
**Figura 4-20:** Análisis microestructural e inclusiones MB – Probeta sin TT.

Fuente: Propia



#### 4.9.2.2 Probeta con tratamiento térmico a 580°C

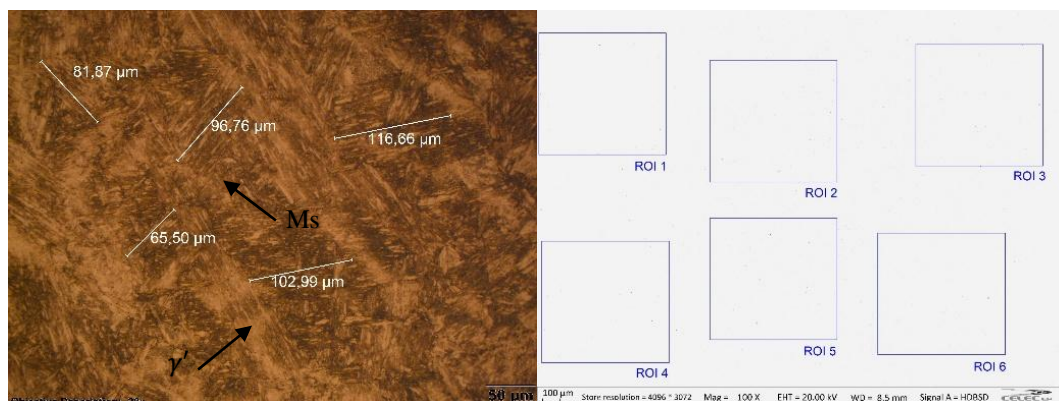
Se observa una matriz de martensita revenida con morfología acicular fina y fase secundaria austenita retenida ( $\gamma'$ ). El tamaño promedio de las agujas de martensita corresponde a 63.56  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se obtuvo que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 5 y gruesos 1, teniendo así un total de 6. Por lo tanto, la severidad del área es 1.



**Figura 4-21:** Análisis microestructural e inclusiones MF – Probeta TT 580°C.

Fuente: Propia

En la zona afectada por el calor se observa una matriz formada por martensita revenida (Ms) con morfología acicular mediana y fase secundaria austenita retenida ( $\gamma'$ ), se midieron los granos de martensita y se obtuvo un tamaño promedio de 92.76  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se tiene que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 5 y gruesos 0, teniendo así un total de 5. Por lo tanto, la severidad del área es 1.

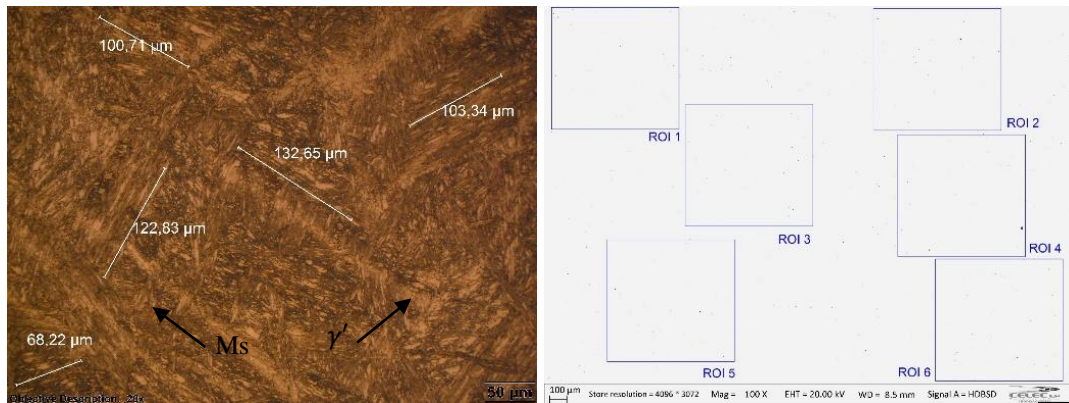


**Figura 4-22:** Análisis microestructural e inclusiones ZAC – Probeta TT 580°C.

Fuente: Propia



En el metal base se observa una matriz muy similar a la de la zona afectada por el calor, contiene una matriz formada por martensita revenida (Ms) con morfología acicular mediana y fase secundaria austenita retenida ( $\gamma'$ ), se midieron los granos de martensita y se obtuvo un tamaño promedio de 105.55  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se tiene que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 22 y gruesos 0, teniendo así un total de 22. Por lo tanto, la severidad del área es 2.

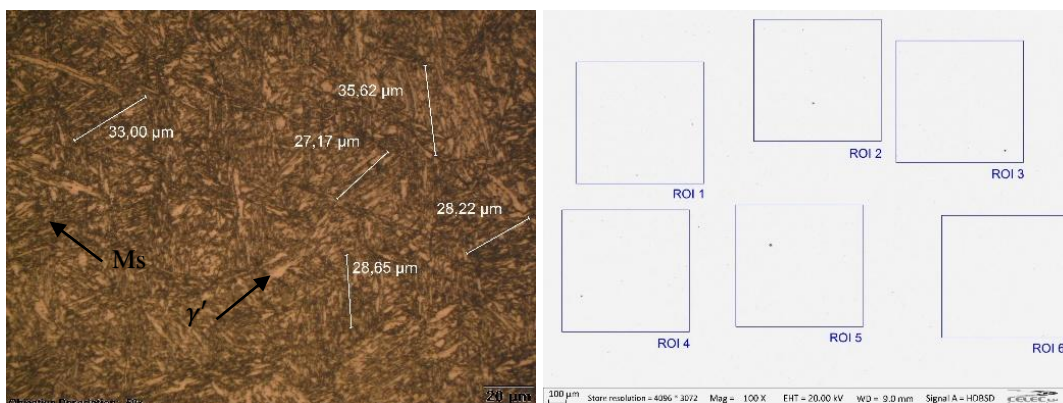


**Figura 4-23:** Análisis microestructural e inclusiones MB – Probeta TT 580°C.

Fuente: Propia

#### 4.9.2.3 Probeta con tratamiento térmico a 600°C

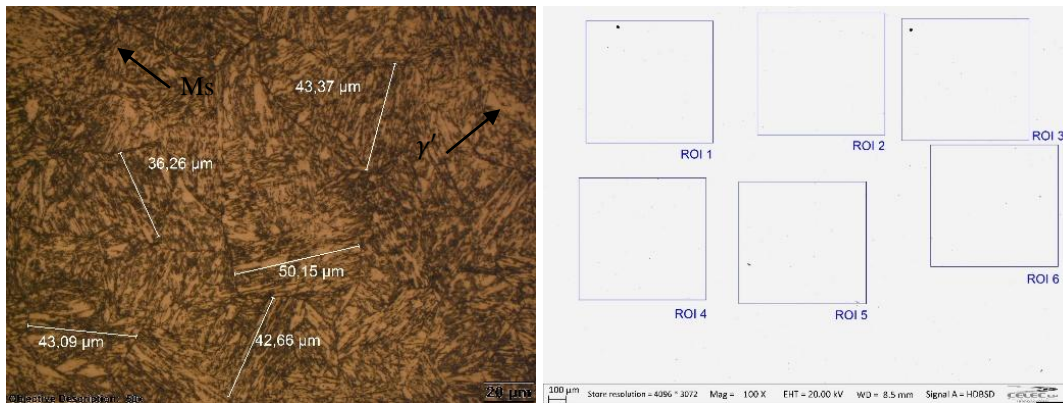
En la probeta con tratamiento térmico a 600°C se analizó las 3 principales zonas de la soldadura. En el metal fundido se observa una matriz formada por martensita revenida (Ms) de forma acicular muy fina y fase secundaria austenita retenida ( $\gamma'$ ), se midieron los granos de martensita y se obtuvo un tamaño promedio de 30.53  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se tiene que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 5 y gruesos 1, teniendo así un total de 6. Por lo tanto, la severidad del área es 1.



**Figura 4-24:** Análisis microestructural e inclusiones MF – Probeta TT 600°C.

Fuente: Propia

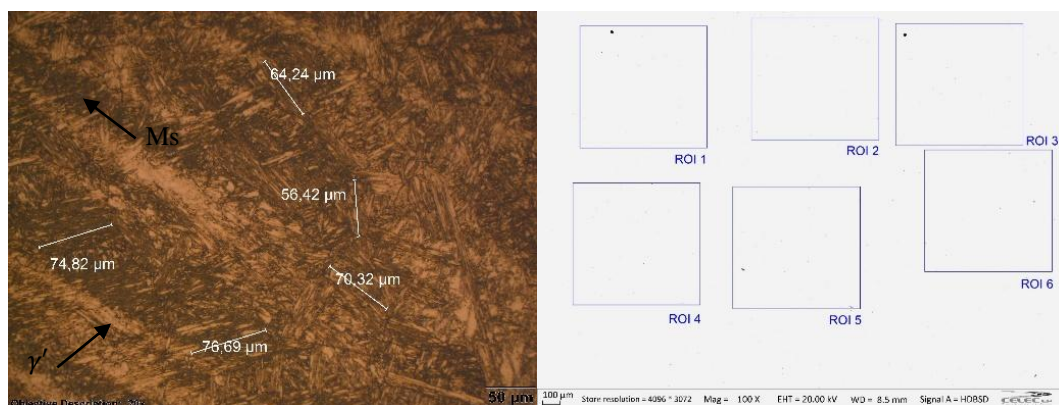
En la zona afectada por el calor se observa una matriz formada por martensita revenida (Ms) con morfología acicular fina y fase secundaria austenita retenida ( $\gamma'$ ), se midieron los granos de martensita y se obtuvo un tamaño promedio de 43.11  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se tiene que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 4 y gruesos 0, teniendo así un total de 4. Adicionalmente, se encontraron silicatos gruesos con una longitud total de 10.56  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, la severidad del área es 1.



**Figura 4-25:** Análisis microestructural e inclusiones ZAC – Probeta TT 600°C.

Fuente: Propia

En el metal base se observa una matriz formada por martensita revenida (Ms) con morfología acicular mediana y fase secundaria austenita retenida ( $\gamma'$ ), se midieron los granos de martensita y se obtuvo un tamaño promedio de 68.47  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se tiene que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 22 y gruesos 1, teniendo así un total de 23. Adicionalmente, se encontraron silicatos gruesos con una longitud total de 25.63  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, la severidad del área es 2.

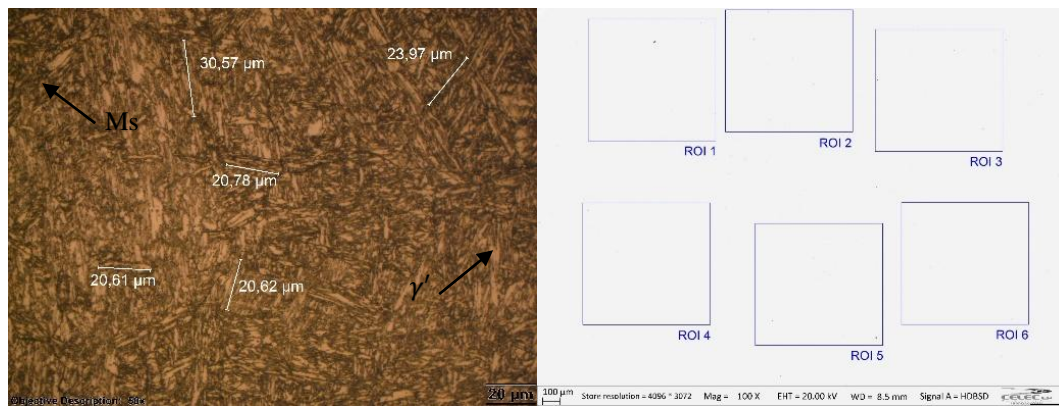


**Figura 4-26:** Análisis microestructural e inclusiones MB – Probeta TT 600°C.

Fuente: Propia

#### 4.9.2.4 Probeta con tratamiento térmico a 620°C

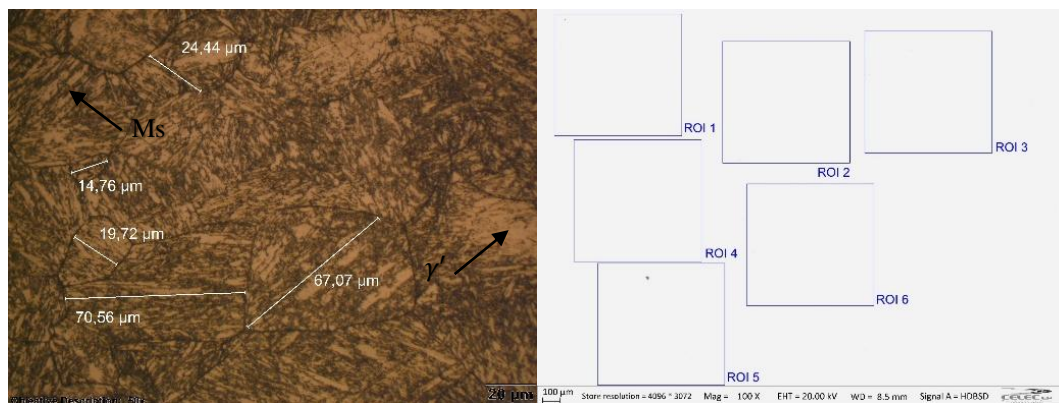
En la probeta con tratamiento térmico a 620°C se analizó las 3 principales zonas de la soldadura. En el metal fundido se observa una matriz formada por martensita revenida (Ms) de forma acicular muy fina y fase secundaria austenita retenida ( $\gamma'$ ), se midieron los granos de martensita y se obtuvo un tamaño promedio de 23.31  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se tiene que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 5 y gruesos 0, teniendo así un total de 5. Por lo tanto, la severidad del área es 1.



**Figura 4-27:** Análisis microestructural e inclusiones MF – Probeta TT 620°C.

Fuente: Propia

En la zona afectada por el calor se observa una matriz formada por martensita revenida (Ms) con morfología acicular fina y fase secundaria austenita retenida ( $\gamma'$ ), se midieron los granos de martensita y se obtuvo un tamaño promedio de 39.31  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se tiene que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 1 y gruesos 0, teniendo así un total de 1. Por lo tanto, la severidad del área es  $\frac{1}{2}$ .

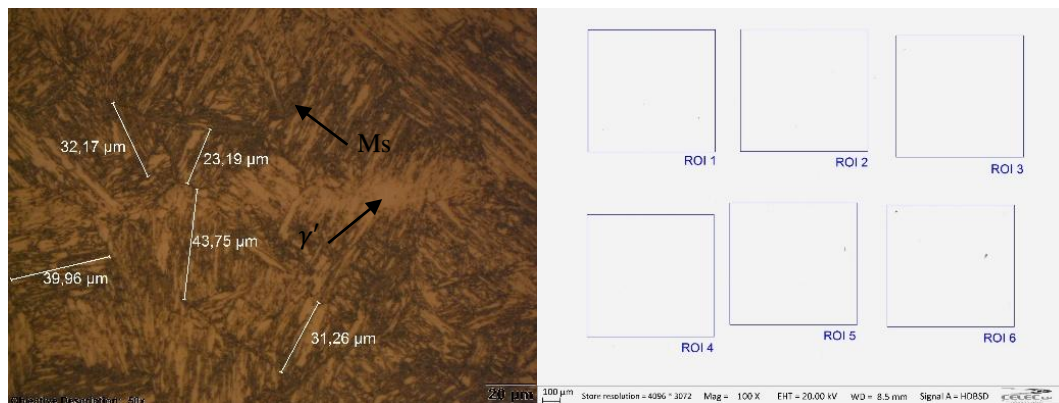


**Figura 4-28:** Análisis microestructural e inclusiones ZAC – Probeta TT 620°C.

Fuente: Propia



En el metal base se observa una matriz muy similar a la de la zona afectada por el calor, formada por martensita revenida (Ms) con morfología acicular fina y fase secundaria austenita retenida ( $\gamma'$ ), se midieron los granos de martensita y se obtuvo un tamaño promedio de 34.07  $\mu\text{m}$ . Del análisis de inclusiones se tiene que en promedio la cantidad de óxidos globulares delgados es 4 y gruesos 0, teniendo así un total de 4. Adicionalmente, se encontraron silicatos gruesos con una longitud total de 25.63  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, la severidad del área es 1.



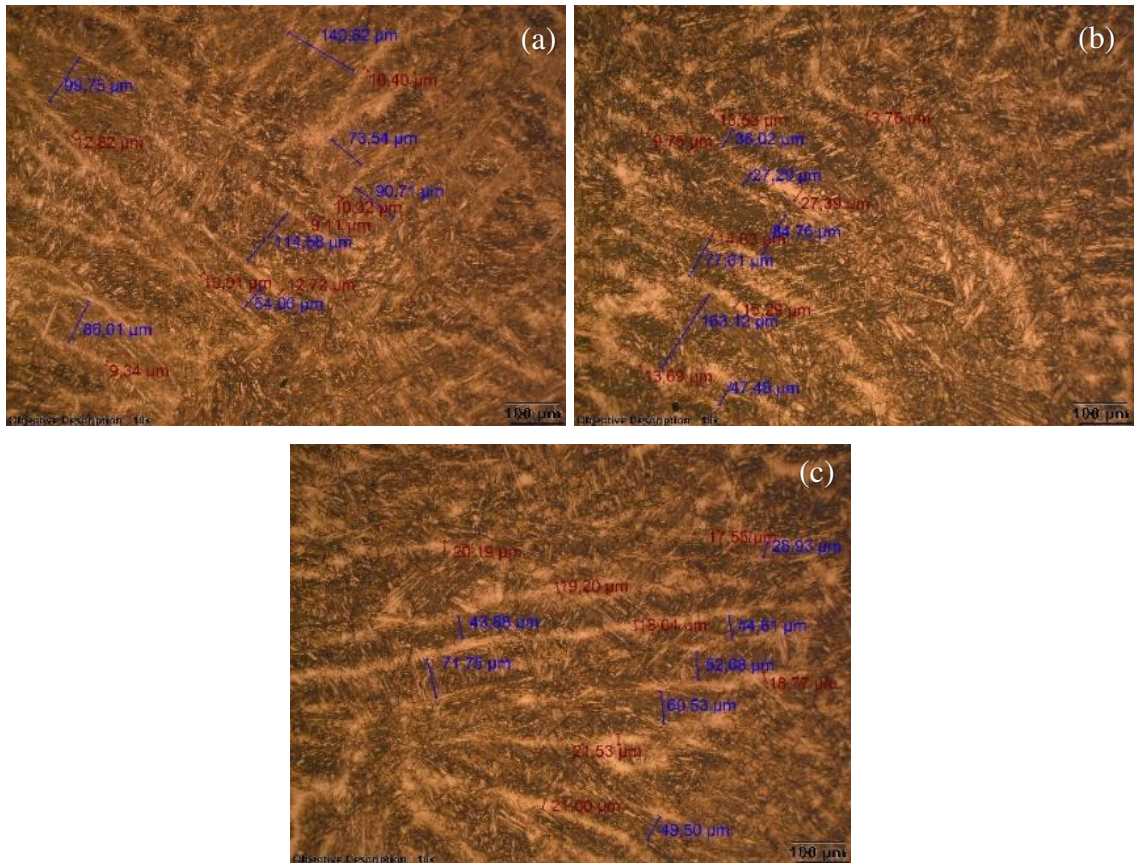
**Figura 4-29:** Análisis microestructural e inclusiones MB – Probeta TT 620°C.

Fuente: Propia

#### 4.9.2.5 Medición de bandas en metal base de probetas con TT

En las 3 muestras sometidas a tratamientos térmicos se cuantificó el tamaño de las bandas que aparecen en el metal base, Figura 4-30. Las bandas se diferencian de manera muy clara por su tonalidad, las martensíticas son oscuras y las austeníticas claras.

De la cuantificación se obtiene para la probeta con tratamiento térmico a 580°C que el tamaño promedio de bandas martensíticas es 94.18  $\mu\text{m}$  y de bandas austeníticas 10.67  $\mu\text{m}$ . Para la probeta con tratamiento térmico a 600°C, bandas martensíticas de 67.14  $\mu\text{m}$  y bandas austeníticas de 15.43  $\mu\text{m}$ . Finalmente, para la probeta de 620°C se obtiene un tamaño promedio de bandas martensíticas de 50.27  $\mu\text{m}$  y de bandas austeníticas 19.47  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4-30:** Bandas en MB de muestras sometidas a tratamiento térmico.

a) TT 580°C, b) TT 600°C, c) TT 620°C.

Fuente: Propia

#### 4.9.3 Resumen análisis microestructural de la junta con y sin TT

Un resumen de la medición de agujas o granos de martensita de las diferentes probetas sin tratamiento térmico y sometidas a tratamientos térmicos de 580°C, 600°C y 620°C, se muestra en la Tabla 4-14.

Como resultado de los tratamientos térmicos realizados se observa que a nivel microestructural se presenta una reducción del tamaño de las agujas de martensita a medida que se eleva la temperatura del tratamiento térmico y además de una tendencia de las diferentes zonas a homogeneizarse.

Los mejores resultados se obtienen con el tratamiento térmico de 620°C porque la estructura de las zonas es similar y el tamaño de las agujas no difiere en gran medida si lo comparamos con los tratamientos realizados a otras temperaturas.

**Tabla 4-14:** Tamaño de agujas de martensita en la junta soldada.

	Material fundido		Zona Afectada por el Calor		Material Base	
	Unitaria ( $\mu\text{m}$ )	Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Unitaria ( $\mu\text{m}$ )	Promedio ( $\mu\text{m}$ )	Unitaria ( $\mu\text{m}$ )	Promedio ( $\mu\text{m}$ )
Sin TT	132.44	<b>70.10</b>	209.07	<b>169.89</b>	96.76	<b>112.69</b>
	55.76		115.53		119.11	
	69.74		168.57		130.78	
	67.01		160.38		107.1	
	25.55		195.91		109.68	
TT 580°C	64.95	<b>63.56</b>	81.87	<b>92.76</b>	100.71	<b>105.55</b>
	70.21		96.76		132.65	
	67.89		65.5		122.83	
	41.43		102.99		103.34	
	73.33		116.66		68.22	
TT 600°C	35.62	<b>30.53</b>	42.66	<b>43.11</b>	64.24	<b>68.47</b>
	33		43.37		56.42	
	27.17		36.26		70.2	
	28.22		50.15		76.69	
	28.65		43.09		74.82	
TT 620°C	30.57	<b>23.31</b>	24.44	<b>39.31</b>	32.17	<b>34.07</b>
	23.97		67.07		23.19	
	20.78		70.56		43.75	
	20.62		19.72		31.26	
	20.61		14.76		39.96	

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

**Tabla 4-15:** Ancho de bandas martensíticas y austeníticas a diferentes temperaturas.

#	Tamaño de banda martensítica ( $\mu\text{m}$ )			Tamaño de banda austenítica ( $\mu\text{m}$ )		
	TT a 580°C	TT a 600°C	TT a 620°C	TT a 580°C	TT a 600°C	TT a 620°C
1	99.75	84.76	28.93	10.4	13.76	20.19
2	140.62	36.02	44.61	12.82	13.53	17.55
3	73.54	27.29	52.68	10.32	9.75	19.2
4	90.71	77.61	60.53	9.11	27.39	18.04
5	114.58	33.69	43.88	12.72	14.63	18.77
6	54.06	163.12	71.75	10.01	15.29	21.53
7	86.01	47.48	49.5	9.34	13.69	21
$\bar{x}$	<b>94.18</b>	<b>67.14</b>	<b>50.27</b>	<b>10.67</b>	<b>15.43</b>	<b>19.47</b>

Realizado por: Autores

Fuente: Propia

Al medir las bandas martensíticas y austeníticas se puede ver claramente que entre las dos bandas tienen una relación inversa, ya que al aumentar la temperatura de TT la banda martensítica disminuye su ancho, mientras que la banda austenítica aumenta, a esto se debe la gran disminución de dureza a 620°C, como lo menciona (Baena, 2008, pág. 12): “la caída de dureza se asocia fundamentalmente al contenido de austenita retenida en el

material después del revenido, encontrando una mayor cantidad de austenita retenida a 620°C”.

#### 4.9.4 Resumen análisis de inclusiones

Los valores de severidad de las diferentes probetas se muestran en la Tabla 4-16 y Tabla 4-17.

**Tabla 4-16:** Número de severidad de las diferentes probetas de la junta soldada.

	Severidad		
	MB	MF	ZAC
<i>Sin TT</i>	2.5	1	1
<i>TT a 580°C</i>	2	1	1
<i>TT a 600°C</i>	2	1	1
<i>TT a 620°C</i>	1	1	0.5

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Propia

En la junta soldada se observa que a medida que la temperatura del tratamiento térmico aumenta se produce una disminución de la cantidad de inclusiones presentes en las muestras, esto puede deberse a que por efecto de la temperatura las inclusiones se mueven hacia los límites de grano. Obteniendo con una temperatura de 620°C los mejores resultados, la disminución en el número de severidad es favorable ya que las inclusiones pueden tomarse como discontinuidades que causan concentración de esfuerzo.

**Tabla 4-17:** Número de severidad obtenida en diferentes procesos.

	Severidad
<i>ASTM A182 Gr. F6NM (insertos)</i>	2
<i>Corte con plasma (ASTM A743 Gr. CA6NM)</i>	2.5
<i>Reparaciones previas de los álabes</i>	2

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** Propia

Si se compara la severidad de un material nuevo (insertos) se observa que posee menor cantidad de inclusiones que el material que ha sido sometido a diferentes procesos como soldadura o corte por plasma. Estas inclusiones se conocen como exógenas y su aumento se deriva de atrapamiento de elementos pertenecientes a fuentes externas propias de los procesos al que se somete el material.

## CONCLUSIONES

Al inspeccionar visualmente se pudo observar que existe daño tanto en el lado de presión como en el de succión del álabe, siendo el lado de presión el más crítico como es de esperarse, además la zona cercana al borde de la salida presentó el mayor desgaste.

Mediante microscopía electrónica de barrido se pudo reconocer el mecanismo de desgaste presente en los álabes, en donde se observa la cavitación en sus diferentes etapas, desde la picadura hasta el desprendimiento del material por erosión, dejando así superficies cóncavas y lisas.

Mediante el análisis con electrones retro dispersados se observó la fisuración de la capa de metalizado producida por el impacto de partículas a gran velocidad y ángulo de impacto debido a la mala adherencia generada por la falta de fusión con el material base, lo cual conlleva a su futuro desprendimiento, dejando al material del rodete desprotegido y acelerando su desgaste por erosión abrasiva y erosión por cavitación.

Las reparaciones en sitio realizadas mediante relleno de soldadura incrementaron la dureza del material de los álabes, por lo que el material pierde tenacidad y es propenso a fisurarse, esto se comprobó mediante el análisis metalográfico que reveló una gran diferencia entre el tamaño de grano martensítico en las diferentes zonas de soldadura.

Mediante la medición del perfil de micro dureza del corte por plasma en el Acero ASTM A743 Gr. CA6NM, se ha determinado que dicho proceso genera una Zona Afectada por el Calor de 2mm.

En el control de calidad de los insertos metálicos prefabricados se encontró que cumplen con los requerimientos técnicos solicitados en cuanto a composición química, dureza, microestructura, uniformidad del material, pero mediante el escaneo 3D y la técnica de superposición se determinó la presencia de exceso de material por lo cual se tuvo que mecanizar los insertos para obtener la geometría deseada previo al proceso de reparación.

Mediante control de calidad de la junta soldada en el álabe #01, se determinó el buen estado de la junta, debido a que no existieron discontinuidades superficiales (VT y PT), ni subsuperficiales (MT), pero si se encontraron discontinuidades a nivel interno (UT),



entre ellas se encontraron porosidades, inclusiones de escoria y faltas de fusión siendo 3 de estas, defectos.

En el Tratamiento Térmico Post Soldadura a 620°C existe una gran disminución de dureza, en comparación con la temperatura de 580°C y 600°C, existiendo una mayor tenacidad dándole así mayor resistencia al impacto del acero, por otro lado, a la temperatura de 580°C parte de la ZAC permanece con la dureza inicial (sin TT), por lo que se presente una mayor fragilidad de la junta, disminuyendo la tenacidad.

Mediante la medición del perfil de dureza en la junta soldada a diferentes temperaturas de TT se determinó que la temperatura conveniente para aplicar el Tratamiento Térmico Post Soldadura es 620°C con una tasa de calentamiento de 200°C/h, un tiempo de permanencia de 1 hora por cada pulgada de espesor y un enfriamiento a una tasa de 200°C/h hasta una temperatura de 300°C y posterior enfriamiento al aire.

Desde el punto de vista microestructural el tratamiento de 620°C es el óptimo ya que a esta temperatura se logra homogeneizar el tamaño de las agujas de martensita en las 3 zonas principales de la soldadura, además de ello se logra reducir en mayor medida el tamaño de las agujas frente a los otros tratamientos térmicos; además se obtiene una reducción del tamaño de bandas martensítica y crecimiento de las bandas austeníticas a una temperatura de 620°C frente a los otros tratamientos, por lo que se concluye que a mayor presencia de austenita en el material se tendrá una disminución de dureza y por tanto una mayor tenacidad.

Cuando el material es sometido a diferentes procesos que generan un cambio brusco de temperatura en el material, pueden aparecer inclusiones exógenas debido al atrapamiento de elementos propios de estos procesos, dichas inclusiones representan un problema ya que se consideran como concentradores de esfuerzos.

Se ha determinado que la severidad de inclusiones de una muestra disminuye a medida que se eleva la temperatura del tratamiento térmico, esto se debe a que las inclusiones por efecto de la temperatura se mueven hacia los límites de grano, reduciendo así la severidad, por lo que se ha obtenido la menor cantidad de inclusiones a una temperatura de 620°C

Mediante los ensayos de tracción y de impacto, se pudo observar una pequeña variación en las propiedades mecánicas, concluyendo que el Acero ASTM A743 Gr. CA6NM se

ha ablandado luego de los años de funcionamiento, ya que disminuyeron los valores de tracción y aumentó la resistencia al impacto, y a pesar de la variación de las propiedades, el material está dentro de los parámetros establecidos de la Norma ASTM A743.

## **RECOMENDACIONES**

Debido al gran aumento de dureza en el material en reparaciones realizadas en sitio, se recomienda implementar nuevos procesos de reparación que no fragilicen el material, o si lo hacen, que lo hagan en menor proporción del proceso actual, ya que se evidenció un aumento de 54HB aproximadamente.

Al realizar el corte por plasma en el Acero ASTM A743 Gr. CA6NM sin un TT posterior a este proceso, se recomienda realizar el corte con una sobremedida de al menos 2mm, para después retirarlo mediante maquinado (Recomendado) o pulido; además se deberá realizar un Ensayo de Partículas Magnéticas para detectar algún agrietamiento producido al realizar dicho corte.

Solicitar al fabricante de insertos metálicos mayor precisión en cuanto a las dimensiones del inserto se refiere, para evitar trabajos de mecanizado innecesarios.

La reparación por soldadura generó un aumento de dureza de aproximadamente 150HB, por lo que se recomienda un Tratamiento Térmico Post Soldadura en el Proceso de Reparación por soldadura para aliviar los esfuerzos residuales en el material.

Se recomienda realizar una limpieza de la superficie a soldar después del precalentamiento, debido al hollín generado en la combustión del GLP, y controlar los ambientes de reparación del rodete para evitar la contaminación del material y posible apareamiento de inclusiones.

Para solucionar los problemas que causan falta de fusión, inclusiones de escoria y porosidades, se recomienda seguir adecuadamente el procedimiento de soldadura recomendado, mantener la posición apropiada y limpiar la superficie de la soldadura en cada pase y evitar el contacto entre electrodo y metal líquido.

Se recomienda calificar la especificación del procedimiento de soldadura (WPS) y los procedimientos de inspección mediante Ensayos No Destructivos (VT, PT, MT y UT), y además se trabaje en la certificación del personal de todas las áreas del CIRT para garantizar y asegurar una buena práctica de reparación.

Se recomienda realizar el ensayo de fatiga al material nuevo de los álabes, para obtener el número de ciclos que soporta a fatiga y obtener así un dato estándar, con el objetivo de realizar una comparación entre el valor inicial y el número de ciclos que puede soportar dicho material después de años de funcionamiento.

Se recomienda realizar un estudio para determinar la orientación de las agujas de martensita en el material de los álabes y determinar la relación entre las propiedades mecánicas y el ángulo entre las agujas de martensita, antes y después del Tratamiento Térmico Post Soldadura a diferentes temperaturas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**ACUÑA, M., & LOZADA, M.** Estudio de la soldabilidad del acero inoxidable martensítico AISI 420. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito. 2013. pp.

**Akhiate, A.** “Carbon content and heat treatment effects on microstructures and mechanical properties of 13%Cr-4%Ni martensitic stainless steel”. *Conference of Metallurgist*. (2014), (Canadá) pp.

**ALMEIDA, S., & VILLENA, C.** Soldadura fuerte de acero inoxidable austenítico. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito. 2009. pp.

**American Welding Society.** *Welding Handbook*. Novena edición. Volumen IV. Miami, 2011.

**ANDRITZ Hydro.** *SAN FRANCISCO - Francis Runner Spare Parts - Comm. Nr. C320.00760 Certificates*. 2011.

**Askeland, D.** *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Madrid: International Thomson. 1998, pp.

**ASM INTERNATIONAL.** *Stainless Steel Casting Alloys: Metallographic Techniques and Microstructures*. Décima edición. Volumen IX. Ohio, USA: ASM International, 1998, pp.

**ASM Metals Handbook.** *Tratamiento Térmico*. Volumen IV.

**ASTM A165-95.** *Standard test method for liquid penetrant examination*.

**ASTM A182-98.** *Standard Specification for Forged or Rolled Alloy-Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service*.

**ASTM A743-10.** *Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application*.

**ASTM E10-15.** *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*.

**ASTM E18-15.** *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*.

**ASTM E23-10.** *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.*

**ASTM E384-11.** *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials.*

**ASTM E45-5.** *Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel.*

**ASTM E8/E8M-13.** *Standard Test Methods for Tension of Metallic Materials.*

**AUZ, Juan.** (2017). Estudio del Tratamiento Térmico Post Soldadura del Acero Inoxidable Martensítico ASTM A743 grado CA-6NM y su incidencia en las Propiedades Mecánicas del Material aplicado a la Recuperación de Rodetes Hidráulicos. (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Ambato. 2017. pp

**Avellan, F.** “Introduction to cavitation in hydraulic machinery”. *The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics.* (2004), (Timisoara) pp.

**Avner, Sydney.** *Introducción a la Metalurgia Física.* Segunda edición. México: McGraw Hill, 1988, pp.

**AYUSO, P.** (2004). *Detección de cavitación en turbina francis.* (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universitat Politècnica de Catalunya, Enginyeria Industrial, Barcelona. 2004

**BAENA, J.** Interdependencia entre las condiciones de operación y el desgaste en rodets tipo pelton fabricados en acero ASTM A743 Grado CA6NM. (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín. 2008. pp.

**Belzona.** *Reparaciones poliméricas de reparación Belzona.* 2012. [Consulta: 17 de Enero de 2019]. Disponible en:

[https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/222666/Reparacion--769-n-para-Maquinaria-y-Equipos.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/222666/Reparacion--769-n-para-Maquinaria-y-Equipos.pdf)

**Belzona.** *Pioneering polymer technology.* 2013. [Consulta: 16 de Enero de 2019].

Disponible en: <https://www.belzona.com/assets/data/literature/newsletters/in-focus/en/in-focus-hydropower.pdf>

**Belzona.** *Belzona Serie 1000.* [Consulta: 17 de Enero de 2019]. Disponible en: <https://www.belzona.com/es/products/1000.aspx>

**BHADESHIA, H.** (1979). The theory and significance of retained austenite in steels. (Trabajo de titulación) (Doctorado). Universidad de Cambridge. United Kingdom. 1979. pp.

**Bhushan, B., & Gupta, B.** *Handbook of tribology: Materials, Coatings and Surface Treatments*. Michigan: McGraw Hill, 2007, pp.

**Brennen, C.** *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford University, 1994, pp.

**BSSA.** *F6NM 1.4313 S41500*. [Consulta: 23 de Noviembre de 2018]. Disponible en: [https://www.bssa.org.uk/get\\_campaign.php?id=340](https://www.bssa.org.uk/get_campaign.php?id=340)

**Buitrago, G.** *Defectos en soldadura*. 2009. [Consulta: 10 de Enero de 2019]. Disponible en:

[http://www.mnve.mil.ve/web/index.php?option=com\\_content&task=view&id=116&Itemid=1](http://www.mnve.mil.ve/web/index.php?option=com_content&task=view&id=116&Itemid=1)

**CAICEDO, M.** Manual técnico de procedimientos para la ejecución de un mantenimiento. (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad Politécnica del Ejército, Carrera de Ingeniería Mecánica. Sangolquí. 2009. pp.

**CAISAGUANO, D.** Desarrollo de procedimientos de soldadura, calificación de soldadores y control de calidad de estructuras soldadas de acuerdo con AWS D1.1. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba. 2013. pp.

**Calle, G., & Henao, E.** *Dureza rockwell*. 2009. [Consulta: 18 de Enero de 2019].

Disponible en:

<http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/durezarockwell.pdf>

**Callister, W.** *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Reverté.

**CAMPAÑA, C.** Desarrollo de procedimientos y metodologías para detección de defectos de soldadura utilizando Scan B. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba. 2010. pp.

**CAÑIZARES, C., & QUINCHUELA, J.** (2017). Tecnologías para la recuperación por soldadura de álabes de turbinas hidráulicas construidas de acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM (UNS J91540). (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba. 2017. pp.

[Consulta: 2017-09-21]. Disponible en:  
**dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/6977/1/15T00666.pdf**

Carrouge, D. (2002). Microstructural change in high temperature heat-affected zone of low carbon weldable "13 %Cr" martensitic stainless steels. En *Stainless Steel World*. Londres: Oil & Gas.

**CCH 70-4.** *Specification for inspection of steel casting for hydraulic machines.*

**CELEC EP.** *Termopichincha.* 2013. [Citado: 18 de Enero de 2019]. Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/noticias/55-en-el-pais-existen-23-proyectos-de-generacion-hidrica>

**Crawford, J.** "CA-6NM". *29th Annual Steel Founder's Society of America Technical an Operating Conference.* Steel Foundry Facts, (1974).

**Duncan, W.** *Turbine Repair.* Denver. 2000. pp.

**Federación de enseñanza de CC.OO.** *Ensayos destructivos metalúrgicos.* 2011.

**Federación de Enseñanza de CC.OO.** *Metalografía.* 2011.

**Fernández, A.** *Discontinuidades, defectos, aplicación de normas.* 2017. [Citado: 17 de Febrero de 2019]. Disponible en:  
<http://www.aendur.ancap.com.uy/eventos/2002/PAYEND%202005/DISCONTINUIDADES,%20DEFECTOS,%20NORMAS%20-%20PAYEND%202005.DOC>.

**Garrido, J., Zafra, Á., & Vázquez, F.** *Modelado y simulación de centrales hidráulicas.* 2009. [Citado: 20 de Septiembre de 2017]. Disponible en:  
[https://www.ecosimpro.com/wp-content/uploads/2015/02/CEA\\_2007\\_28JA\\_1.pdf](https://www.ecosimpro.com/wp-content/uploads/2015/02/CEA_2007_28JA_1.pdf)

**GLOBAL Hydro.** *Turbina Kaplan: mundialmente célebre y extremadamente eficiente.* [Citado: 07 de enero de 2019]. Disponible en: <https://www.global-hydro.eu/es/productos/kaplan-turbine/>

**Gordo, A., & Piris, N.** *Ciencia de materiales para ingenieros.* Madrid: Pearson, 2012, pp.

**Gulich, J., & Rosch, A.** (1988). *World Pumps: Cavitation Erosion in Centrifugal Pumps.* 1988, pp. 164-168



**GUZMAN, F.** Análisis de aceros por microscopía óptica. (Trabajo de titulación) (Maestría). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Mexico DF. 2013. pp.

**HOYOS, E.** Efecto de la Técnica de Pases de Revenido en las Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A743: Grado CA6NM. (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Medellín. 2009. pp.

**INDURA S.A.** *Manual Aceros Inoxidables*. 2010. Santiago de Chile: 2M Impresores Ltda. [Citado: 28 de noviembre de 2018]. Disponible en: <http://www.indura.cl/Descargar/Manual%20de%20Aceros%20Inoxidables?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fcl%2Fbiblioteca%2Fd7a1a8fe99fe4b6a9fbed6412df7e93c.pdf>

**ISO 148-1.** *Metallic materials - Charpy pendulum impact test*.

**Kuo, S.** *Welding metallurgy*. Segunda edición. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003, pp.

**LAIN, S., GARCÍA, M., AVELLAN, F., QUINTERO, B., & ORREGO, S.** Simulación Numérica de Turbinas Francis. UAO. 2011. pp.

**Lain, S., García, M., Quintero, B., & Orrego, S.** “Simulación numérica del flujo en turbomáquinas hidráulicas”. *REVISTA Universidad EAFIT* [en línea], 2008, (Colombia) 44(152), pp. 90-114. [Consulta: 20 de agosto de 2017]. Disponible en : [https://www.researchgate.net/profile/Manuel\\_Garcia19/publication/277165391\\_Simulacion\\_numerica\\_del\\_flujo\\_en\\_turbomaquinas\\_hidraulicas\\_Estado\\_del\\_arte\\_y\\_fuentes\\_de\\_error\\_Aplicacion\\_a\\_turbinas\\_francis/links/55b8cced08ae092e965a7a6e/Simulacion-numerica-del-f](https://www.researchgate.net/profile/Manuel_Garcia19/publication/277165391_Simulacion_numerica_del_flujo_en_turbomaquinas_hidraulicas_Estado_del_arte_y_fuentes_de_error_Aplicacion_a_turbinas_francis/links/55b8cced08ae092e965a7a6e/Simulacion-numerica-del-f)

**LANAS, L., & PROAÑO, S.** Desarrollo de procedimientos para ensayos de micrografía, dureza, espectrometría de rayos X y análisis de la microestructura de productos laminados para la mejora del control de calidad en la empresa NOVACERO S.A. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politecnica del Ejercito, Carrera de Ingeniería Mecánica. Sangolquí. 2011. pp.

**Laufgang, S.** *Aceros inoxidables: Tratamiento térmico de soldadura - Prueba hidráulica de gasoductos*. Buenos aires: Termo Soldex S.A., 2003, pp.

**LAZO, David.** Análisis de ciclo de vida y energético de las centrales hidroeléctricas Agoyán Y Paute. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito. 2015. pp.

**Lippold, J.** *Welding Metallurgy and Weldability*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2015, pp.

**LÓPEZ, V., & RAMÍREZ, W.** Diseño de un horno para tratamiento térmico del rodete de la turbina francis (CELEC Unidad de Negocio Hisroagoyán). (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba. 2011. pp.

**LUDEÑA, J.** Diseño de un sistema de control automático para el sistema óleo hidráulico de la turbina en la Central Hidroeléctrica San Francisco. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito. 2009. pp.

**Marchegiani, A.** *Cavitación*. 2006

**MARTÍNEZ, L.** Análisis técnico-económico del mantenimiento de turbina francis de la Central Hidroeléctrica-Gino Bianchini-Huampani con asistencia de computadora. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima. 1989. pp.

**MEDRANO, J.** Mejoramiento de las propiedades mecánicas de las juntas soldadas de aceros inoxidable austeníticos mediante tratamientos térmicos. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Escuela de Ingeniería Mecánica. Quito. 2006. pp.

**Mesa, D., & Sinatora, A.** (2003). “El desgaste de materiales, enfrentarlo o dejarlo de lado y asumir los riesgos”. *Scientia et Technica*, 2, 22 (2003), pp. .

**Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.** *Proyectos de Generación Eléctrica*. 2017. [Citado: 21 de Septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.energia.gob.ec/proyectos-emblematicos-2/>

**Mitutoyo.** *Medidores de Dureza - Guía de selección*. 2010. [Citado: 24 de Agosto de 2018]. Disponible en: <http://www.cecummaq.com/pdf/Mitutoyo/Durometros/Vickers.pdf>

**MOHAMED, E. W.** Caracterización termodinámica de aceros inoxidable austeníticos AISI 304. (Trabajo de titulación) (Doctorado). Universitat Poletècnica de Catalunya, Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Barcelona. 2002. pp.

**Monge, C.** *Defectos de las uniones soldadas*. 2007. [Citado: 10 de Enero de 2019]. Disponible en: <http://estructurasacero.blogspot.com/2007/06/pueden-ser-de-varios-tipos-y-producidos.html>

**MORA, C.** Análisis de la eficiencia de una turbina tipo Francis con características similares a la de la Central Hidroeléctrica San Francisco - Ecuador. (Trabajo de titulación) (Maestría). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito. 2018. pp.

**Morales, S., Corredor, L., Paba, J., & Pacheco, L.** (2014). Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación. *DYNA*, 81, 184 (2014), pp. 178-185.

**Morral, F., Jimeno, E., & Molera, P.** *Metalurgia general*. Barcelona: Reverté, 2004, pp.

**NEOPANE, H.** Sediment Erosion in Hydraulic Turbines. (Trabajo de titulación) (Doctorado). Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology. Norway. 2010. pp.

**Nicolet, C., Arpe, J., & Francois, A.** "Identification and modeling of pressure fluctuations of Francis turbine scale model at part load operation". *Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, (2004), (Stockholm): ResearchGate. pp.14

**Ordóñez, S.** *Técnicas Experimentales en Metalurgia*. 2003. [Citado: 24 de Agosto de 2018]. Disponible en: [http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/2.\\_ensayos\\_mecanicos\\_-\\_stella\\_ordonez.pdf](http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/2._ensayos_mecanicos_-_stella_ordonez.pdf)

**OSINERGMIN.** *Programa de mantenimiento mayor de CC.HH.* 1997. [Citado: 21 de Septiembre de 2017]. Disponible en: <http://www2.osinerg.gob.pe/procreg/tarifasbarra/ProcNov03-Abr04/pdf/pre-est-tec/vol2/4.pdf>

**Ospina, R., Aguirre, H., & Parra, H.** Soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disimiles. *XIII*, 34(2007). Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4807972.pdf>

**Pástor, M.** *Introducción a la metalurgia de la soldadura*. Riobamba: ESPOCH, 2004, pp.

**Pérez, G.** *Espectrometría de emisión*. [Citado: 18 de Enero de 2019]. Disponible en: [https://www.espectrometria.com/espectrometra\\_de\\_emisin](https://www.espectrometria.com/espectrometra_de_emisin)

**Phillips, D.** *Welding Engineering, An Introduction: Welding metallurgy of stainless steels*. Chichester: Wiley, 2016, pp.

**Rheingans, W.** “Cavitation in Hydraulic Turbines”. *Symposium on Erosion and Cavitation*, (1962), pp. 17-31.

**Rimoldi, C., & Mundo, L.** *Ensayo no destructivo por método de ultrasonido*. 2012. [Citado: 18 de Enero de 2019]. Disponible en: [https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras//A0006/descargar.php?secc=0&id=A0006&id\\_inc=33957](https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras//A0006/descargar.php?secc=0&id=A0006&id_inc=33957).

**Rodríguez, O.** *Metalurgia de la Soldadura*. La Habana: Editorial Universitaria, 2013, pp.

**ROJAS, J.** Identificación y cuantificación de fases en acero inoxidable ASTM A743 grado CA6NM mediante la técnica de difracción de rayos X. (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellin. 2009. pp.

**ROMERO, B., & PROBOSTE, F.** Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura. (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería Mecánica. 2013

**SAGÑAY, B., & PILAMUNGA, L.** 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. (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba. 2012. pp.

**SANTOS, A.** Desenvolvimento de procedimento de reparo por soldagem em Aços Inoxidáveis Martensíticos, com Metal de Adição Similar sem TTP. (Trabajo de titulación) (Maestría) Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2000. pp.

**SENATI.** *Metalurgia de la Soldadura*. 2013. [Citado 21 de diciembre de 2018]. Disponible en: <file:///C:/Users/DELL/Downloads/89001475%20METALURGIA%20DE%20LA%20SOLDADURA.pdf>

**Serna, A., Pedraza, A., & Ángel, L.** *Soldadura-metalurgia de la soldadura-procesos de soldadura-soldabilidad*. 2015. [Citado: 11 de Enero de 2019]. Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/capitulo-18-soldadura-metalurgia-de-la-soldadura-procesos-de-soldadura-soldabilidad/>

**Serrano, R.** *Ensayos no destructivos: líquidos penetrantes*. 2007. [Citado: 17 de Enero de 2019]. Disponible en: [http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/ciencias\\_t8.3\\_liq\\_penetrantes.pdf](http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/ciencias_t8.3_liq_penetrantes.pdf)

**Sheila, C.** *Ensayos destructivos y no destructivos*. 2011. [Citado: 18 de Enero de 2019]. Disponible en: <https://china128sheila.wordpress.com/2011/07/17/ensayos-destructivos-y-no-destructivos/>

**Sinclair, J., & Rodrigue, P.** “Cavitation pitting mitigation in hydraulic turbines”. *Cavitation review and assessment, II*.

**Smith, W., & Hashemi, J.** *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Volumen. IV. México: McGraw Hill, 2006, pp.

**Steel Founders Society of America.** *Steel Castings Handbook Supplement 7 Welding of High Alloy Castings*. Volumen VII. Ohio, 2004.

**THAPA, B.** Sand erosion in hydraulic machinery. (Trabajo de titulación) (Doctorado) University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Trondheim. 2004. pp.

**THAPA, B.** *Sediment in Nepalese hydropower projects*. (Trabajo de titulación) (Doctorado) Norwegian University of Science and Technology. pp.

**Toapanta, M.** Plan de control y aseguramiento de la calidad para la recuperación de un rodete de turbina Francis de una central hidroeléctrica. *Energía*, 15 (2019), pp. 181-190.

**Total Materia.** *The Origins of Oxide Inclusions*. 2012. [Citado: 07 de Enero de 2019]. Disponible en: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=378>

**TOVAR, M.** Estudio del fenómeno de erosión por cavitación en materiales metálicos. (Trabajo de titulación) (Maestría) Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México. 2012. pp.

**VATECH.** *Plan de inspección y pruebas Rodete Francis-Proyecto Hidroeléctrico San Francisco*. Hoja de calidad , Baños, 2005

**ZEGARRA, R.** Análisis y simulación fluidodinámica del fenómeno de cavitación en una turbina francis. (Trabajo de titulación) (Mestría) Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Lima. 2015. pp.