



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE INSPECCIÓN Y REPARACIÓN POR SOLDADURA DE
RODETES PELTON, PARA LA PLANTA HIDROELÉCTRICA AGUACAPA**

Ing. Daniel Ángel Figueroa García

Asesorado por el Mtro. Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz

Guatemala, abril de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE INSPECCIÓN Y REPARACIÓN POR SOLDADURA DE
RODETES PELTON, PARA LA PLANTA HIDROELÉCTRICA AGUACAPA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
ESCUELA DE POSTGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. DANIEL ÁNGEL FIGUEROA GARCÍA

ASESORADO POR EL MTRO. ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DEL MANTENIMIENTO

GUATEMALA, ABRIL DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López de López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Sandra Nineth Ramírez Flores
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE INSPECCIÓN Y REPARACIÓN POR SOLDADURA DE RODETES PELTON, PARA LA PLANTA HIDROELÉCTRICA AGUACAPA

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 01 de febrero de 2016.

Daniel Ángel Figueroa García

En mi calidad como Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento titulado: "IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE INSPECCIÓN Y REPARACIÓN POR SOLDADURA DE RODETES PELTON, PARA LA PLANTA HIDROELÉCTRICA AGUACAPA " presentado por el Ingeniero Mecánico Eléctrico Daniel Ángel Figueroa García quien se identifica con Carné 200515908, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"

Aguiar
Maestro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

Decano

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2019.

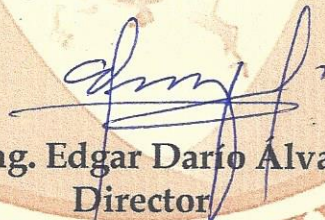
Cc archivo/LZ.L.A.

Ref.APT-2019-004

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado "IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE INSPECCIÓN Y REPARACIÓN POR SOLDADURA DE RODETES PELTON, PARA LA PLANTA HIDROELÉCTRICA AGUACAPA" presentado por el Ingeniero Mecánico Eléctrico Daniel Angel Figueroa García quien se identifica con Carné 200515908, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala




Guatemala, abril de 2019.

Cc: archivo/LZ.L.A.

Como Coordinadora de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE INSPECCIÓN Y REPARACIÓN POR SOLDADURA DE RODETES PELTON, PARA LA PLANTA HIDROELÉCTRICA AGUACAPA" presentado por el Ingeniero Mecánico Eléctrico Daniel Ángel Figueroa García quien se identifica con Carné 200515908.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Maestra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores
Coordinador(a) de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, abril de 2019.

Cc archivo/L.Z.L.A.

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Mecánico Eléctrico Daniel Ángel Figueroa García quien se identifica con carné No. 200515908 procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "IMPLEMENTACIÓN DE UN PLAN DE INSPECCIÓN Y REPARACIÓN POR SOLDADURA DE RODETES PELTON, PARA LA PLANTA HIDROELÉCTRICA AGUACAPA" quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Maestro. Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
Asesor(a)
Maestría en Docencia Universitaria

Ing. Hugo Ramírez
COL. No. 5543

Guatemala, abril de 2019.

Cc archivo/L.Z.L.A.

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por guiarme en el camino dándome vida, salud y sabiduría para alcanzar y culminar una de mis metas, por ser mi fuente de fuerzas, provisión y esperanza ante cualquier circunstancia.
- Mis padres** Daniel Gonzalo Figueroa Arévalo y Magda Lucinda García Velásquez, por apoyarme y creer en mí siempre; por enseñarme valores con su ejemplo, por su amor incondicional y ser un ejemplo de superación y perseverancia, de quienes me siento muy orgulloso.
- Mis hermanos** Jorge David, José Francisco y Laura, por apoyarme en todo momento y brindarme sus palabras de aliento y fortaleza.
- Mis abuelos** Jorge Américo Figueroa (q.e.p.d), Miguel Ángel Figueroa (q.e.p.d), Gonzalo Figueroa (q.e.p.d.), Elvira Quiñónez (q.e.p.d.) y Amada Arévalo de Figueroa, Gustavo García Estrada y María Fidelia Velásquez de García. Por sus cuidados y el amor con los que me han formado.
- Mi familia** Que con ansias ha esperado este momento.

Mi esposa

Shirley Pinzón, por compartir preciosos momentos,
por su cariño y apoyo.

Mi hija

Elizabeth Nohemí, por ser una bendición en mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme sabiduría, fortaleza y salud para alcanzar esta meta.
Mis padres	Daniel Gonzalo Figueroa Arévalo y Magda Lucinda García Velásquez. Por todos sus cuidados, principios, paciencia y amor.
Mis primos	Aaron, Yeimy y Francis. Por su apoyo.
Universidad de San Carlos de Guatemala	En especial a la Facultad de Ingeniería; gracias por ser la fuente de saber y brindarme las herramientas que me forjaron como profesional.
Mis catedráticos	Por brindarme sus conocimientos y orientación profesional.
Mi asesor	Ing. Hugo Leonel Ramírez, gracias por su apoyo, cariño y amistad.
Mi familia	Mardoqueo, Laureano, Miguel Ángel (q.e.p.d.), Amalia, Baudilio, Jorge Mario, Elmar, Belinda, Gustavo, Elder, Francis, Gladis, Selvin y Liuva, por su cariño y apoyo.

Mis amigos

Alexis, Josué, Marcos, Melzar, Luis Enrique, Carlos Suárez, Juan Carlos Davi, Mynor, Diego Erick y Estuardo, por su amistad, tiempo, apoyo y cariño.

Los profesionales

Pedro Agreda, Alba Guerrero, Sandra Ramírez, Aura Rodríguez, Lesly Aldana y Hugo Rivera, por compartir sus conocimientos y amistad.

La Facultad de Ingeniería

Con cariño.

1.3.	Procesos de soldadura aplicables para la reparación de rodetes Pelton	22
1.3.1.	Soldadura de arco manual - SMAW.....	22
1.3.2.	Electrodo.....	24
1.3.2.1.	Electrodo revestido.....	25
1.3.2.2.	Electrodo desnudo o sin revestimiento	26
1.3.3.	Soldadura semiautomática FCAW-GMAW-GTAW	27
1.3.3.1.	Eficiencia	28
1.3.3.2.	Densidad de corriente.....	28
1.3.3.3.	Posibilidad de soldar en diferentes posiciones.....	28
1.3.3.4.	Autoprotegido y protegido con gas.	29
1.3.4.	Tipos de alambres tubulares.....	30
1.3.4.1.	Alambre tubular sin costura	31
1.3.4.2.	Alambre tubular con costura.....	31
1.3.4.3.	Alambre tubular Metal Cored.....	32
1.3.5.	Gas de protección.....	32
1.3.5.1.	Bióxido de carbono (CO ₂).....	33
1.3.5.2.	Mezcla de argón y (CO ₂).....	33
1.3.6.	Resultados de dureza	36
1.3.7.	Ventajas del proceso.....	38
1.3.8.	Limitaciones del proceso.....	39
1.3.9.	Calificación del proceso ASME sección IX.....	40
1.3.10.	Calificación del soldador ASME Sección IX.....	47
1.3.11.	Selección de material de aporte.....	50

1.3.12.	Aceros inoxidables austeníticos	51
1.3.13.	Aceros inoxidables ferríticos.....	51
1.3.14.	Aceros inoxidables martensíticos	52
1.3.15.	Tratamientos térmicos ASME, Sección VIII, División 1.....	52
2.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICABLES A RODETES PELTON	57
2.1.	Calificación del inspector en ensayos no destructivos	57
2.1.1.	Nivel I	57
2.1.2.	Nivel II	58
2.1.3.	Nivel III	58
2.1.4.	Requisitos de educación, entrenamiento y experiencia para la calificación inicial en ensayos no destructivos	59
2.1.5.	Requisitos de examinación.....	60
2.2.	Ensayo visual.....	61
2.2.1.	Principio básico	61
2.2.2.	Criterio de aceptación	62
2.2.3.	Ventajas	62
2.2.4.	Limitaciones	62
2.3.	Ensayo de líquidos penetrantes.....	64
2.3.1.	Principios básicos.....	64
2.3.2.	Criterio de aceptación	64
2.3.3.	Ventajas contra otros métodos de inspección superficial	64
2.3.4.	Limitaciones de la aplicación.....	65
2.3.5.	Limitaciones contra otros métodos de inspección superficial	67

2.4.	Ensayo de partículas magnéticas.....	68
2.4.1.	Principios básicos	68
2.4.1.1.	Materiales ferromagnéticos (ferrosos)	68
2.4.1.2.	Materiales no magnéticos (No ferrosos y diamagnéticos).....	69
2.4.2.	Ventajas	69
2.4.3.	Limitaciones	69
2.4.4.	Procedimiento de aplicación	71
2.4.5.	Verificación de materiales y equipos.....	72
2.4.6.	Criterio de aceptación	73
2.5.	Ensayo de ultrasonido	74
2.5.1.	Principios básicos	74
2.5.2.	Aplicaciones.....	75
2.5.3.	Ventajas	75
2.5.4.	Limitaciones	76
2.5.5.	Criterios de aceptación	77
2.5.6.	Equipo.....	77
2.5.7.	Métodos de inspección	78
2.5.8.	Técnicas de inspección.....	79
2.5.8.1.	Pulso eco.....	79
2.5.8.2.	Picha y cacha	80
2.5.8.3.	Transmisión a través (<i>through</i> <i>transmission</i>)	81
2.5.8.4.	TOFD (<i>Time of flight diffraction</i>)	81
2.5.8.5.	Arreglo de fases	82
2.5.9.	Tipos de presentación ensayos de ultrasonido	83
2.6.	Ensayo de Rayos X	84

3.	PRINCIPALES RIESGOS DERIVADOS DE LA REPARACIÓN INADECUADA DE RODETES PELTON	85
3.1.	Zonas de riesgos	85
3.2.	Consecuencias de reparaciones inadecuadas	85
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	91
4.1.	Formato de Inspección de rodetes Pelton	91
4.2.	Instrucciones para aplicación de soldadura GTAW para rodetes Pelton.....	100
4.2.1.	Limpieza	101
4.2.2.	Rectificación de los daños considerables que se encuentren fuera de norma CCH 70-3	102
4.2.3.	Pre calentamiento	103
4.2.4.	Aplicación de soldadura	105
4.2.5.	Tiempo de permanencia.....	106
4.2.6.	Maquinado de unión aleada (soldadura material base)	108
4.2.7.	Pulido de unión aleada y revisión final	109
4.2.8.	Inspección y criterios de aceptación con ensayos no destructivos para la soldadura aplicada	111
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	115
	CONCLUSIONES	119
	RECOMENDACIONES	121
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de planta hidroeléctrica	2
2.	Esquema de planta hidroeléctrica	3
3.	Turbinas hidráulicas	4
4.	Esquema de planta Hidroeléctrica Aguacapa. Planta Aguacapa	4
5.	Rodete Pelton en operación de planta Aguacapa	6
6.	Erosión	8
7.	Erosión	9
8.	Fisuras- fatiga corrosión	10
9.	Acero Inoxidable vs acero al carbón	12
10.	Acero inoxidable vs acero al carbón	13
11.	Estructuras de aceros inoxidables	14
12.	Rodete Pelton con desgaste de la planta Hidroeléctrica Aguacapa	16
13.	Diagramas de Schaeffler	18
14.	Estructura de un acero inoxidable martensítico	19
15.	Microestructura del acero CA6NM en estado homogenizado	20
16.	Hoja técnica de electrodo UTPE 410 NiMo-15	21
17.	Varilla de aporte GTAW UTPE 410 NiMo-15 3/32"	21
18.	Equipo SMAW y arco eléctrico	23
19.	Identificación de códigos para material de aporte en soldadura SMAW	26
20.	Soldadura semiautomática FCAW-GMAW	27
21.	Soldadura semiautomática FCAW-GMAW	29

22.	Soldadura semiautomática GMAW de Planta Aguacapa.....	30
23.	Tipos de alambre tubular	31
24.	Gas de protección.....	33
25.	Gas de protección argón y (CO ₂)	34
26.	Ksi-transferencia de metal fundido Ar / CO ₂	35
27.	Zonas de soldadura con protección de gas	37
28.	Zonas de soldadura con protección de gas	38
29.	Estándar para la calificación de procedimientos de soldadura, soldadores y operadores	40
30.	Continuación, proceso de calificación del proceso ASME sección IX Diagrama de Flujo 1.....	41
31.	Proceso de calificación del proceso ASME sección IX Diagrama de flujo 1	42
32.	Continuación, proceso de calificación del proceso ASME sección IX Diagrama de Flujo 1.....	43
33.	Diagrama de flujo 2. Calificación del soldador de ASME, Sección IX-Proceso	48
34.	Soldador	49
35.	Equipo mínimo para soldador	49
36.	Equipo Mínimo para Soldador	53
37.	Relevado de esfuerzos	53
38.	Métodos de alivio de esfuerzos	55
39.	Medición de esfuerzos residuales en la superficie del material	56
40.	Técnicas empleadas de ensayo visual	63
41.	Procedimiento de aplicación de ensayos no destructivos.....	68
42.	Técnicas de magnetización	71
43.	Tipos de partículas magnéticas	72
44.	Verificación de los equipos y material empleado con partículas magnéticas	73

45.	Equipo de ultrasonido.....	78
46.	Equipo de ultrasonido.....	79
47.	Pulso eco	80
48.	Picha y catcha.....	80
49.	Transmisión a través.....	81
50.	TOFD	82
51.	Arreglo de fases	83
52.	Presentación de ultrasonido.....	84
53.	Zonas de deformación de rodete Pelton	86
54.	Zonas de deformación de rodete Pelton	87
55.	Desprendimiento de cangilón.....	88
56.	Daños por operación de rodetes	89
57.	Daños por operación de rodetes	89
58.	Norma CCH70-3	92
59.	Resultado de ensayos no destructivos a rodetes Pelton de Planta Aguacapa.....	93
60.	Partes del cangilón.....	94
61.	Plantillas de desgaste de cangilón de rodete Pelton.....	95
62.	Fisuras y desgaste en cangilón 16 en rodete Pelton de Planta Aguacapa.....	96
63.	Identificación del rodete Pelton de Planta Aguacapa 69592- I010171851	97
64.	Formato de revisión y seguimiento de rodetes utilizado del año 2013 al 2015	98
65.	Nuevo formato de Inspección, revisión y seguimiento de rodetes Pelton.....	99
66.	Diagrama de fases del acero inoxidable martensítico CA6NM	101
67.	Fresas de desgaste para rectificado de material.....	102

68.	Proceso de fresado y homogeneizado de superficie del rodete Pelton.....	102
69.	Preparación de daño previo a soldadura	103
70.	Pre calentamiento	104
71.	Cordón de soldadura	105
72.	Aplicación de soldadura.....	106
73.	Manta refractaria.....	107
74.	Colocación de manta refractaria para cumplir con el tiempo de permanencia	107
75.	Unión aleada.....	108
76.	Maquinado de unión aleada.....	109
77.	Pulido de unión aleada	110
78.	Revisión de perfiles con plantillas	110
79.	Ensayo no destructivo por líquidos penetrantes a soldadura.....	111
80.	Ensayo no destructivo por partículas magnéticas a soldadura	112
81.	Ensayo no destructivo por ultrasonido a soldadura	112
82.	Ensayo de dureza a Cangilón con soldadura aplicado	113

TABLAS

I.	Datos técnicos de las turbinas	6
II.	Dimensiones y pesos originales del rodete.....	7
III.	Proceso de soldadura con arco para tres tipos de electrodo	19
IV.	Síntomas, causas y soluciones de soldadura SMAW	24
V.	Problemas comunes en la calidad de la soldadura	39
VI.	ASME sección IX Tabla QW-253, para proceso SMAW, FCAW, GMAW, GTAW.....	43
VII.	Tabla QW-416, Variables para calificación del soldador.....	50

VIII.	Tabla UHA-32-1 Requerimiento para los tratamientos térmicos postsoldadura para aceros altamente aleados	54
IX.	Entrenamiento inicial y nivel de experiencia para calificación de END	60
X.	T-921 Requerimientos para el procedimiento de inspección visual.....	63
XI.	Requerimientos del procedimiento de inspección con líquidos penetrantes.....	66
XII.	Familias de líquidos penetrantes	67
XIII.	Requerimientos del procedimiento de inspección con partículas magnéticas	70
XIV.	Verificación de los equipos y material empleado con partículas magnéticas	75
XV.	Propuesta del plan de mantenimiento a implementar.....	114

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ASME	American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales)
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero)
A/mm²	Amperios por milímetro cuadrado
ASNT	Sociedad Americana de Ensayos no Destructivos
Ar	Argón
CO₂	Dióxido de carbon
CCH	Cahier Descharges specification for inspection of steel castings for hydraulic machines
Mm	Milímetros
Fig	Figura
PH	Endurecidas por precipitación
ISO	International Organization for Standarization (Organización Internacional de Normalización)
r.p.m.	Revoluciones por minuto
Cr	Cromo
C	Carbono
Fe	Hierro
Ni	Níquel
Max	Máximo

Mo	Molibdeno
m³	Metros cúbicos
m³/ seg	Metros cúbicos por segundo
MW	Megavatios
Km	Kilómetros
Kg	Kilogramos
M	Metros
SMAW	Soldadura de arco manual
FCAW-GMAW-GTAW	Soldadura semiautomática
ZAC	Zona afectada por el calor
Z	Impedancia acústica
QW	Quality Welding (soldadura de calidad)
WPS	Welding Procedure Specification (Especificacion del Procedimiento de Soldadura)
PQR	Procedure Qualification Records (Registro de Calificación de Procedimiento)
Hr/in	Hora/pulgada
°F	Grados Fahrenheit
°C	Grados centígrados

GLOSARIO

Abrasión	Desprendimiento de material, debido a la acción mecánica de rozamiento y desgaste.
Aleación	Acción de unir o combinar propiedades de dos o más metales.
Cangilones	Pueden ser piezas independientes o constituir una pieza única, están diseñados para recibir el empuje directo del chorro de agua. Su forma es similar a la de una doble cuchara, con una arista interior afilada y situada centralmente en dirección perpendicular hacia el eje, divide al cangilón en dos partes simétricas de gran concavidad.
Casa de máquinas	Espacio donde se encuentran instalados los equipos de generación.
Cavitación	Formación de cavidades por efecto de impacto de burbujas dentro del agua o cualquier otro fluido.
Corrosión	Deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.

Eficiencia	Relación que existe entre la energía que se produce en la salida de la planta entre la energía que ingresa inicialmente en la planta.
Embalse	Es la acumulación de agua de la cual se genera energía eléctrica. Esta generalmente cerrando la boca de un valle mediante un dique o presa.
Energía	Capacidad para realizar un trabajo en el tiempo.
Fatiga	Proceso de daño que se produce en los elementos mecánicos cuando se someten a cargas variables.
Mantenimiento	Actividad llevada a cabo para asegurar la confiabilidad de las funciones de la maquinaria.
Tubería Forzada	Es la tubería que conduce el agua a presión desde el canal o embalse hasta la entrada de la turbina. Está construida de acero para soportar altas presiones.
Turbina Pelton	Es la pieza clave donde se transforma la componente cinética de la energía del líquido en energía mecánica o, dicho de otra manera, en trabajo según la forma de movimiento de rotación. Está formado por una rueda motriz y cangilones.

Presa	Barrera fabricada generalmente de piedra u hormigón y tiene como finalidad embalsar agua en el cauce del río.
Rodete	Elemento móvil de la turbina, consiste en un disco perpendicular al eje de giro, compuesto por álabes o cangilones curvados en dirección contraria al movimiento.

RESUMEN

El propósito de realizar un estudio para determinar los procedimientos de inspección de los rodets utilizando la técnica de monitoreo de condición de los rodets Pelton, es asegurar la implementación de un plan de mantenimiento aplicando las normas CCH 70-3, ASTM, ASME, DIN, la operación constante de los equipos que se encuentran en la planta hidroeléctrica y con ello la disponibilidad de las unidades generadoras.

Una de las partes más importantes de las unidades de generación en la planta Hidroeléctrica Aguacapa es el rodete Pelton; la vida útil del rodete depende en gran parte del tipo de mantenimiento que se le realice o ejecute. Las inspecciones periódicas ayudan a controlar el estado en el que se encuentra. A través de un plan de inspección y reparación por soldadura GTAW, se puede realizar un mantenimiento preventivo, realizando reparaciones puntuales en las áreas indicadas por la norma CCH 70-3 para mantenimientos programados.

Las utilizaciones de técnicas de ensayos no destructivos son muy útiles para determinar defectos en la estructura de los rodets, así como la condición final después de las reparaciones por soldadura.

Se determinó que los rodets deberán inspeccionarse cada 4,000 horas o cada seis (6) meses, lo que ocurra primero, estas inspecciones permiten mejorar y aumentar la vida útil de los mismos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Problema:

En la Planta Hidroeléctrica Aguacapa, los rodetes Pelton se encuentran expuestos a daños como erosión y cavitación, entre otros; sus efectos, consecuencias y no tener establecido un plan de mantenimiento perjudican la entrega final de la energía eléctrica.

Descripción:

Las dificultades en el mantenimiento de la reparación del rodete Pelton son: el desconocimiento de un método apropiado para realizar las inspecciones y reparaciones; la falta de competencia y conocimientos técnicos generales y particulares en relación a la dureza, características, desempeño y propiedades del material con que fueron fabricados originalmente, dificultades que hacen que la reparación o procedimiento establecido no siempre sean los mejores.

Los rodetes Pelton son el punto de partida para la generación de energía eléctrica; son los que convierten la energía hidráulica en energía mecánica, para luego convertirse en energía eléctrica. Por la importancia que juegan estos en el proceso de generación de energía eléctrica, y su impacto consecuente en los sistemas y equipos, se estudian los efectos y sus consecuencias, debido a la pérdida de perfiles, lo que da un punto de partida para diagnosticar el mantenimiento preventivo y correctivo.

La Planta Hidroeléctrica Aguacapa es la tercera planta Hidroeléctrica más grande del país, perteneciendo al Instituto Nacional de Electrificación – INDE-, cuya función es generar energía eléctrica para su entrega en los

diferentes puntos de consumo. Por ser una hidroeléctrica nacional, además de generar energía eléctrica, cumple con una función social. Gran parte de la energía generada por las empresas generadoras de INDE, se distribuye a la tarifa social y a la reforestación de cuencas de las hidroeléctricas existentes de esa institución.

La importancia de suministrar el fluido eléctrico en los diferentes puntos del país conlleva a mantener las unidades generando la mayor parte del tiempo. Dada la necesidad de la energía eléctrica, se debe asegurar la operación constante de los equipos que se encuentran en la planta hidroeléctrica y la disponibilidad de las unidades generadoras.

Por lo que lleva a plantear las siguientes preguntas:

Pregunta general

¿Cómo prolongar la vida útil de rodets Pelton en la planta hidroeléctrica Aguacapa?

Preguntas específicas

1. ¿Cuáles son los procedimientos de inspección de condición para los rodets Pelton de la hidroeléctrica?
2. ¿Qué procedimiento de soldadura existe para aumentar el tiempo de operación de los rodets tipo Pelton en aceros inoxidables martensíticos similares al tipo GX5 Cr-Ni 134?

3. ¿Cuáles son los tiempos adecuados para realizar inspecciones en perfiles del rodete Pelton dentro del plan de mantenimiento?

OBJETIVOS

General

Implementar un plan de mantenimiento en inspección y reparación por soldadura a los rodets Pelton, aplicando las normas internacionales CCH 70-3, ASTM, ASME, DIN.

Específicos

1. Establecer el procedimiento de inspección de condición a los rodets Pelton de la hidroeléctrica.
2. Determinar el procedimiento de soldadura adecuado en rodets Pelton en aceros inoxidable martensíticos similares al tipo GX5 Cr-Ni 134.
3. Definir el plan de mantenimiento indicando la frecuencia de reparación y revisión de los rodets tipo Pelton.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El enfoque de la investigación es mixto, ya que considera áreas cuantitativas utilizando diagramas de shafer y normativas vigentes para la reparación de rodetes Pelton; además de considerar áreas cualitativas considerando que este diseño es no experimental, porque no se manipulan variables, su alcance es meramente descriptivo dando a conocer brevemente los elementos que conforman una planta hidroeléctrica, específicamente la turbina PELTON, que es una de las más conocidas dentro del campo de la generación de energía, se detallan ciertos lineamientos específicos del desempeño que tiene y las fichas técnicas, tanto para la turbina como para los rodetes. Además de los distintos problemas que se ven sometidos los rodetes PELTON dentro de su funcionamiento.

Las turbinas Pelton fueron desarrolladas para soportar alta caída de agua y bajo caudal de operación. El agua es transportada mediante una tubería forzada por las presiones que se manejan para pasar por válvulas esféricas, toberas o inyectores y llegar al rodete Pelton.

Los rodetes Pelton comúnmente se encuentran expuestos a desgaste, golpes, rayaduras, grietas o desprendimiento de material, que son ocasionados por erosión, impacto, abrasión, fatiga, cavitación y corrosión-fatiga. Para mitigar los efectos de estos en los cangilones del rodete, se pretende implementar un método de inspección utilizando ensayos no destructivos y reparación de los perfiles mediante soldadura TIG. Las inspecciones deberán de ser periódicas (cada 4000 horas) y si es necesario, la reparación de los rodetes cuando se

detecte una pérdida de perfiles del 20 % de su superficie e indicada por las plantillas, según las siguientes fases:

FASE 1

Se determinaron los procedimientos de inspección de condiciones técnicas de los rodets: por medio de plantillas, se establecieron las pérdidas que se generan en las áreas que comúnmente tienen el impacto del chorro de agua en los cangilones.

FASE 2

Se establecieron los procedimientos de soldadura adecuados en Rodetes Pelton aplicados a aceros inoxidable martensíticos, considerando sus características específicas y las instrucciones en la aplicación del proceso de soldadura GTAW para su reparación.

FASE 3

Mediante la utilización de las técnicas no destructivas líquidos penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido para examinar las áreas superficiales y sub superficiales de los rodets, se determinarán y limitarán las pérdidas del perfil original del rodete tipo Pelton. Con estos resultados en las inspecciones a los rodets Pelton, se definió el plan de mantenimiento indicando la frecuencia de reparación y revisión de los mismos.

INTRODUCCIÓN

Una de las partes más importantes de las unidades de generación en la planta Hidroeléctrica Aguacapa es el rodete Pelton; la vida útil del rodete depende en gran parte del tipo de mantenimiento que se le realice o ejecute. Las inspecciones periódicas ayudan a controlar el estado en el que se encuentra el rodete. A través del mantenimiento preventivo se pueden determinar los efectos y anomalías que pueden aparecer durante su aplicación o el tiempo de vida útil del mismo, la composición del rodete es acero inoxidable martensíticos, compuesto por una aleación de cromo, níquel y hierro (G-X 5 Cr Ni 13-4 con Cr= 12-13.5 %; Ni= 3.5-5 %), composición que hace aún más importante el estudio de los procedimientos para su reparación.

En la planta Aguacapa, los mecanismos más frecuentes de falla son erosión y cavitación, ocasionados por la explosión violenta de las burbujas de aire y partículas sólidas arrastradas por el agua en las superficies del rodete. Durante la operación el mayor riesgo de falla es por fatiga o corrosión-fatiga, dando como resultado el inicio y la propagación de grietas que dañan la integridad estructural de los rodetes Pelton.

La implementación de un plan de mantenimiento para las revisiones o reparaciones de estos rodetes aplicando métodos de prevención, disminuirán los gastos por reparaciones y efectos que se dan como pérdida de dureza y desgaste, además de prolongar la vida útil de los mismos.

En el capítulo I, se da a conocer brevemente los elementos que conforman una planta hidroeléctrica específicamente la turbina Pelton. Se detallan ciertos lineamientos específicos de su desempeño, metales que lo forman, procesos de soldadura aplicables para su reparación. Además de mencionar los distintos problemas a los que se ven sometidos los rodetes Pelton durante su funcionamiento.

En el capítulo II, se describen los ensayos no destructivos aplicables a los rodetes Pelton, para realizar un monitoreo de condición de los mismos, siendo estos inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido y rayos X, describiendo cada uno de ellos, sus ventajas, limitaciones y sus criterios de aceptación o rechazo.

En el capítulo III, se mencionan los principales riesgos que se pueden tener derivados de una inadecuada reparación de los rodetes las consecuencias de un mal procedimiento, así como la identificación de las zonas de cuidado extremo durante los mismos.

En el capítulo IV, se dan a conocer los resultados de forma detallada de las inspecciones y reparaciones realizados a los rodetes, así como la generación de un registro que documente los datos más importantes de las reparaciones hechas en dicho mecanismo.

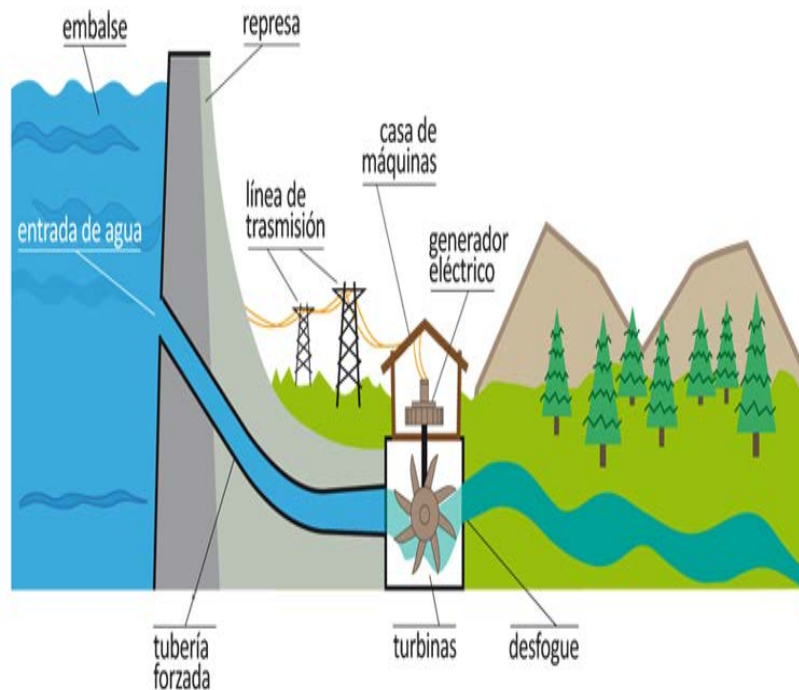
1. MARCO TEÓRICO

En esta sección se da a conocer brevemente los elementos que conforman una planta hidroeléctrica, a través de esquemas para un mejor conocimiento por parte del lector. Dentro de estos, se menciona la turbina PELTON que es una de las más conocidas dentro del campo de la generación de energía, se detallan ciertos lineamientos específicos del desempeño que tiene y las fichas técnicas, tanto para la turbina como para los rodets. Además de los distintos problemas que se ven sometidos los rodets PELTON. A continuación se brinda la información detalladamente.

1.1. Descripción de una planta hidroeléctrica

La siguiente figura muestra el esquema que presenta una planta hidroeléctrica, donde se puede observar cada una de las secciones que la conforman.

Figura 1. **Esquema de planta hidroeléctrica**

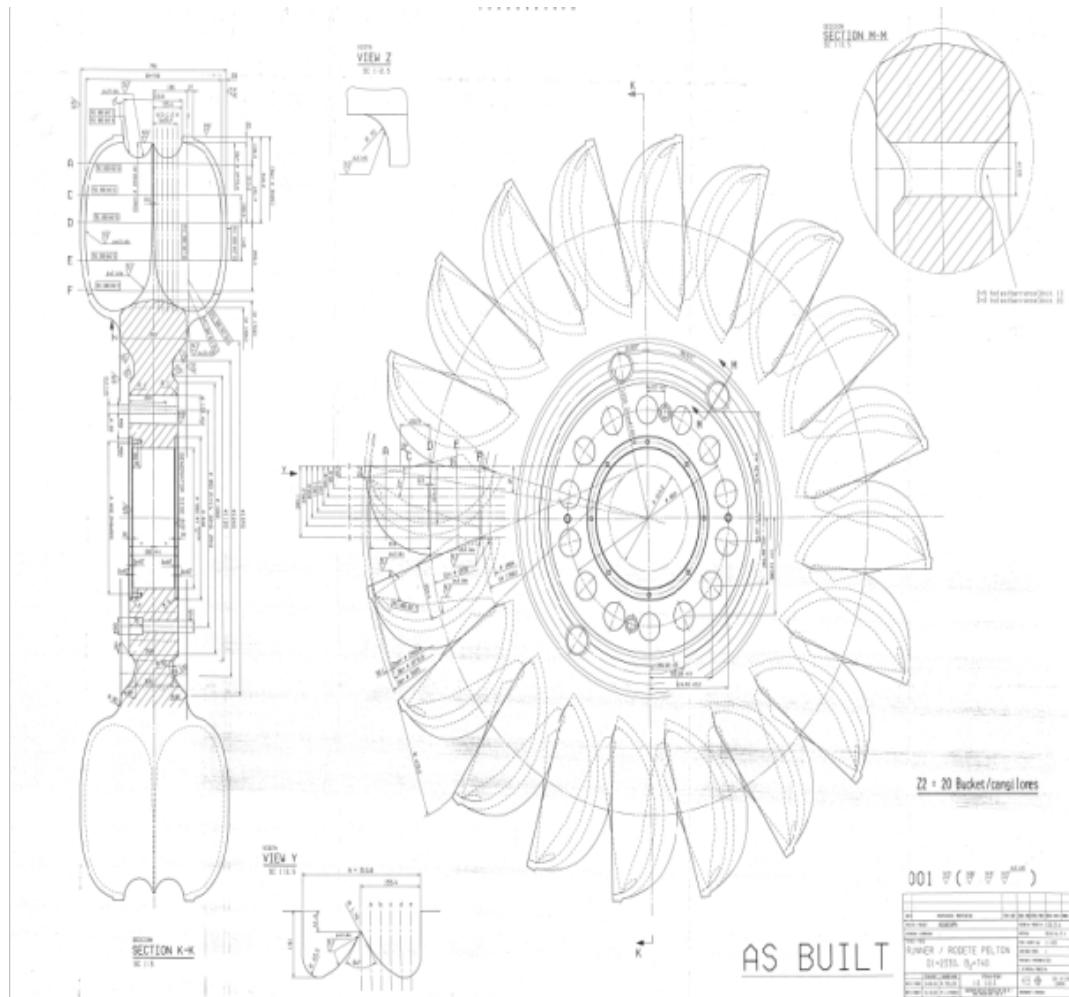


Fuente: Good energy, hidroeléctricas.

Las turbinas Pelton (figura 2) fueron desarrolladas para soportar alta caída de agua y bajo caudal de operación. El agua es transportada mediante una tubería forzada por las presiones que se manejan para pasar por válvulas esféricas, toberas o inyectores y llegar al rodete Pelton.

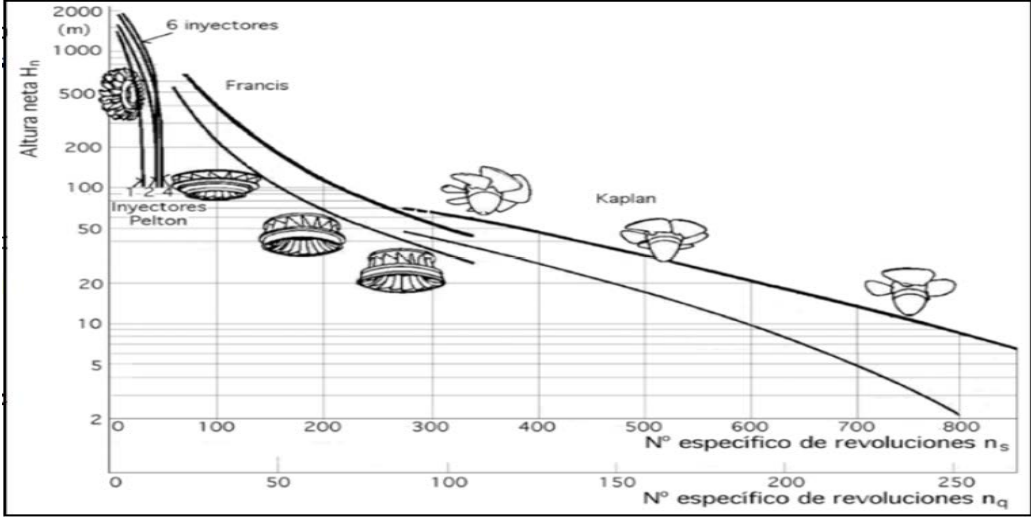
Las turbinas Pelton son (véase figura 3) en relación a los otros tipos de turbinas hidráulicas, las más eficientes, cuyo principio de operación es radial y de acción. La rueda posee cangilones (cucharas, palas o carpachos) en su borde o periferia, los cuales al recibir el chorro de agua en sus cucharas convierten el chorro de agua en energía mecánica rotacional.

Figura 2. Esquema de planta hidroeléctrica



Fuente: Plano 911000758, Planta Aguacapa. 1978.

Figura 3. Turbinas hidráulicas



Fuente: Renedo, J Carlos. S.E. T30.-Turbinas Hidráulicas. p.20.

Figura 4. Esquema de planta Hidroeléctrica Aguacapa. Planta Aguacapa



Fuente: esquema en planta Hidroeléctrica Aguacapa, 2015.

Para el caso particular de la planta Hidroeléctrica Aguacapa (Figura 4), se tiene una presa, un embalse de regulación diaria, un túnel de presión que tiene una longitud de 12.7 kilómetros, al final del túnel se une una válvula mariposa como dispositivo de seguridad entre la tubería forzada y el túnel de presión y seguido a la válvula mariposa; éste se une a la tubería forzada de 3.67 kilómetros de longitud con un diámetro de 2.96 metros; luego llega a otro dispositivo de seguridad, tal es el caso de la válvula esférica, para finalizar el recorrido del agua en las toberas de inyección o inyectores; éstos permiten el paso de salida del agua hacia el rodete Pelton. Estudio de prefactibilidad, Planta Aguacapa-salto María Linda, (1978).

Los rodetes Pelton (Figura 5) comúnmente se encuentran expuestos a desgaste, golpes, rayaduras, grietas o desprendimiento de material, que son ocasionados por erosión, impacto, fatiga, cavitación y corrosión-fatiga. En la Planta Aguacapa, los mecanismos más frecuentes de falla en los rodetes Pelton son erosión y cavitación, que son ocasionadas por la explosión violenta de las burbujas de aire y partículas sólidas arrastradas por el agua en las superficies del rodete. El que mayor riesgo de falla que ocurre durante la operación de los rodetes Pelton es la fatiga o la corrosión-fatiga, dando como resultado el inicio y la propagación de grietas que dañan la integridad estructural de los rodetes Pelton.

Figura 5. **Rodete Pelton en operación de planta Aguacapa**



Fuente: elaboración propia.

1.1.1. **Características técnicas de los rodetes Pelton**

Tabla I. **Datos técnicos de las turbinas**

Fabricante:	BELL MASCHINENFABRIK AG
Tipo de turbina:	Pelton
Posición del eje:	Horizontal
Caída neta nominal	490.6 m
Potencia nominal	31.70 MW
Velocidad nominal	400 r.p.m.
Velocidad de embalamiento	710 r.p.m. durante 3 min.
Caudal	7.33 m ³ /seg

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Dimensiones y pesos originales del rodete**

DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES Y PESO ORIGINAL DEL RODETE
RODETE	
a) Diámetro externo	3025 mm
b) Diámetro interno	660 mm
c) Diámetro al centro de los cangilones	2330 mm
d) Diámetro al inicio de la arista	740 mm
e) Diámetro a la raíz de los cangilones	1060 mm
f) Diámetro al eje de los bulones	850 mm
g) Ancho del rodete Pelton (interno al apoyo del eje)	222 - 260 mm
h) Peso del Rodete	11,600 Kg.
CANGILONES	
a) Ancho externo	796 mm
b) Ancho interno	735 mm
c) Espesor en orillas	20 – 35 mm
d) Escotadura	315 mm
e) Número de Cangilones	20

Fuente: BELL MASCHINENFABRIK AG. Diseño de turbina Pelton, Manual de Turbina Pelton, Planta Aguacapa. p.9

Los rodetes Pelton de Planta Hidroeléctrica Aguacapa están compuestos por una aleación de Cromo, Níquel y hierro (G-X 5 Cr Ni 13-4 con Cr= 12-13.5 %; Ni= 3.5-5 % . Manual de turbina Regulador (1978, pág. 21).

1.1.2. Principales problemas en rodetes Pelton

El cangilón es donde se presenta el mayor esfuerzo, se encuentra en el área de contacto con el agua.

1.1.3. Erosión

Este desgaste de los rodetes se identifica fácilmente, pues se evidencian surcos en la superficie del metal. La erosión surge de la gran cantidad de sólidos que lleva el agua, su velocidad y dureza. El desprendimiento de material en el cangilón dependerá del contenido de sólidos en suspensión en el agua, su forma, composición y granos que pueda contener (Figura 6). Kalpakjianj, Schmid (2008).

La erosión provoca normalmente:

- La disminución del espesor del cangilón que se manifiesta regularmente en la región del fondo y hacia la parte posterior.
- El desgaste local bajo la forma de golpes tipo gota que se manifiestan sobre la superficie del metal.
- Normalmente el desgaste por erosión se distribuye igual por todos los cangilones del rodete Pelton, y este propicia la cavitación por picadura (*pitting*).

Figura 6. **Erosión**



Fuente: elaboración propia.

1.1.4. Cavitación (*Pitting*)

Se debe al colapso de una burbuja de presión sobre el material del rodete Pelton, donde se destruye el metal especialmente por fatiga en la superficie del metal; además la cavitación se detecta en el momento en que aparecen sombras en el metal brillante, luego se ven porosidades que se van agrandando con el tiempo (Figura 7). Kalpakjian, Schmid (2008). La cavitación en las ruedas Pelton, se puede presentar por:

- Perfiles inadecuados
- Poros
- Daños propios de cangilones erosionados
- Mala alineación de chorros
- Agujas que presenten daños o desgastes

Las áreas y zonas en las que regularmente puede ocurrir el fenómeno de cavitación en planta hidroeléctrica Aguacapa son en la punta, en la parte trasera de los cangilones y en la superficie del cangilón.

Figura 7. **Erosión**



Fuente: elaboración propia.

1.1.5. Fisuras (*Cracks*)- Fatiga corrosión

Estas se evidencian normalmente en el borde de los cangilones. Se deben a fuertes desgastes o puntos en los que los cangilones, tienen menos resistencia, pues han disminuido su sección, presentan poros y evidencia zonas más dañadas. Se pueden clasificar en tres categorías: i) en el borde principal de los cangilones que en su mayoría no perjudican la función de seguridad y operación del rodete Pelton; ii) en el interior de la hendidura del cangilón que pueden llegar a ser críticas, y iii) fisuras dispuestas en las raíces del rodete por el efecto de la concentración de fuerzas, al presentarse una fisura inicia el proceso de corrosión en las grietas. (Figura 8)

Figura 8. Fisuras- fatiga corrosión



Fuente: elaboración propia.

1.2. Metal base usados en rodets Pelton

Se da una pequeña reseña histórica acerca de las aleaciones de acero y cómo el inventor logró realizarlas. Se proporcionaron los datos estadísticos y los elementos que conforman dicho metal. Además, se puntualiza en los distintos tipos de aceros y cómo cada uno de ellos está conformado, dentro de los cuales se resaltan los siguientes: acero ferrítico, austeníticos, martensíticos y dúplex todos estos inoxidable, entre otros, así como figuras de los distintos ensayos realizados.

1.2.1. Tipos de aceros inoxidables

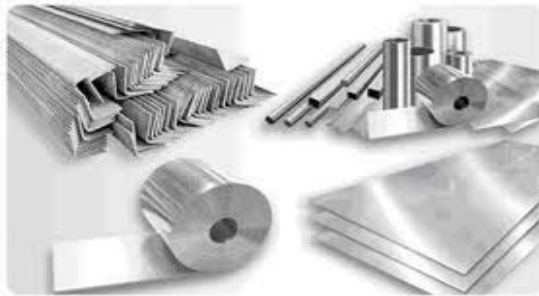
Estos surgieron cuando Harry Brearley combinaba metales, con el fin de encontrar aleaciones para la construcción de cañones de pistolas. Estuvo intentando durante muchos meses, aleaciones, las cuales no le funcionaban. Dentro de todas las muestras realizadas se dio cuenta que una de ellas, a diferencia de las demás, no se oxidaba. Aquella aleación que encontró de un 24 % de carbono, 12.8 % de cromo y 63.2 hierro, fue fabricada el 13 de agosto de 1913 y sigue considerada hasta la fecha como la primera aleación de acero inoxidable. Callister (2009).

El acero inoxidable (Figura 9) se compone por una aleación de hierro (Fe), Carbono (C) y Cromo (Cr). Al hacer el hierro sea “inoxidable” este debe contener al menos el 11.5 % de cromo. Además, se agregan otros elementos para proporcionar ciertas propiedades, debe considerar que el cromo es el elemento aleante indispensable, tanto en los aceros inoxidables serie 300 como en los de la 400, donde las propiedades de resistencia a la corrosión son de gran importancia. En la línea de producción es muy importante, debido a que la mayoría de productos tienen esta presentación, por lo que el correcto

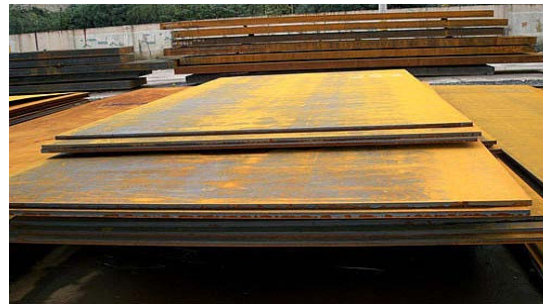
mantenimiento de la línea y su planeación durante cualquier paro es primordial, para evitar retrasos en producción o producto que no alcance el alto estándar de calidad. Callister (2009).

Figura 9. **Acero Inoxidable vs acero al carbón**

Acero inoxidable



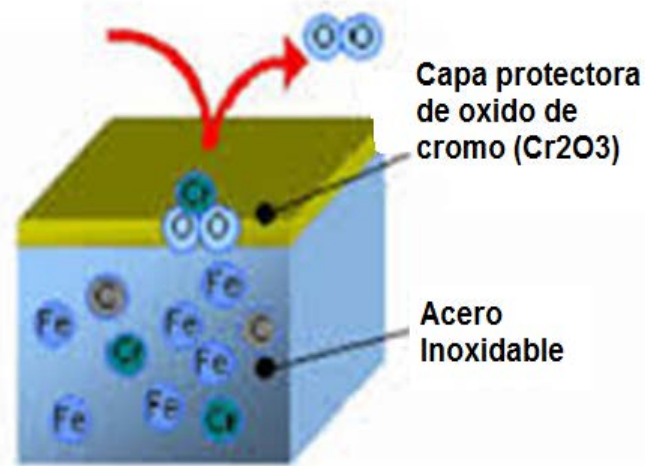
Acero al carbón



Fuente: elaboración propia.

Cuando se agrega al hierro cantidades iguales o mayores a 11.5 % de cromo, se forma una capa delgada, plateada y altamente adherente de óxido de cromo. La película que se forma ([Figura 10) cumple la función de una barrera que retarda la futura oxidación y corrosión. Consecuentemente, el acero se vuelve más resistente a oxidarse y de allí que su nombre sea ACERO INOXIDABLE. Callister (2009).

Figura 10. **Acero inoxidable vs acero al carbón**



Fuente: elaboración propia.

Los aceros inoxidables se dividen en tres grupos (Figura 11) principalmente, los cuales reciben el nombre de la fase metalúrgica que se encuentra a temperatura ambiente Callister (2009).

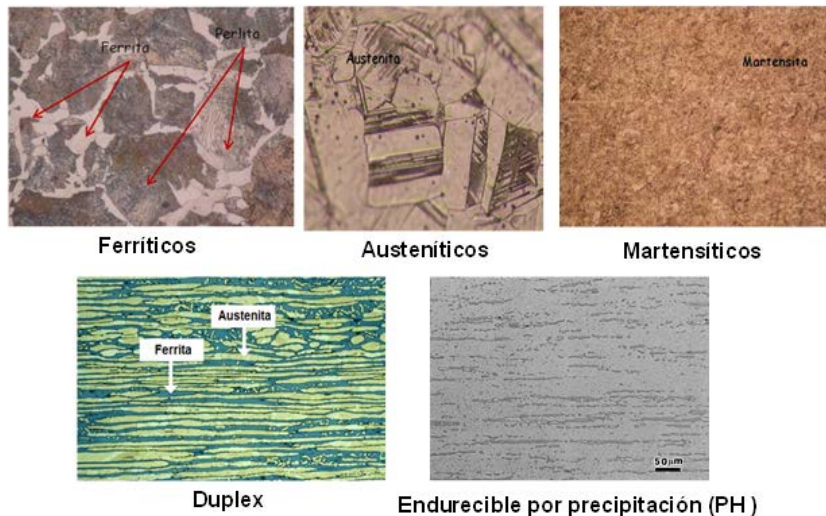
Ellos son:

- Ferríticos
- Austeníticos
- Martensíticos

Recientemente se han agregado dos tipos de acero inoxidable derivados de aplicaciones específicas:

- Dúplex
- Endurecidas por precipitación (PH)

Figura 11. **Estructuras de aceros inoxidables**



Fuente: elaboración propia.

1.2.2. **Aceros inoxidables ferríticos**

Los aceros inoxidables ferríticos contienen entre 17 % y 27 % de cromo, ejemplos de estos aceros son los AISI 405, 432, 442 y 446. Los aceros ferríticos tienen una soldabilidad frecuentemente mayor que los grados martensíticos, pero menor a los austeníticos, se pueden deformar fácilmente en frío, y tienen una resistencia a la corrosión algo superior a la de los aceros martensíticos, pero inferior a la de los grados austeníticos; sin embargo, su resistencia a la corrosión bajo tensión en ambientes de cloruros a altas temperaturas es superior a la de los aceros Austeníticos. Sus usos: tubos de intercambiadores de calor, tubos de escape de automóviles, radiadores, equipos con resistencia a la agrietamiento por corrosión de tensiones de cloruro, corrosión de medios acuosos, oxidación a alta temperatura, y corrosión por picadura o hendidura por medio de cloruro, artículos decorativos, entre otros. Callister (2009).

1.2.3. Aceros inoxidables austeníticos

Acá se tienen a los aceros cromo – níquel (tipo 3xx), como níquel manganeso (tipo 2xx). Estos son normalmente no magnéticos y no son tan fáciles de endurecer en el tratamiento térmico. Su contenido de cromo y níquel es como mínimo 23 % y es más fácil de trabajar en frío y caliente. Al trabajarlo en frío, este proceso les aporta variedad de propiedades mecánicas y se puede volver ligeramente magnético. Son resistentes al impacto y difíciles de maquinar. Es más resistente a la corrosión en relación a los aceros ferríticos o martensíticos, pero son más propensos al agrietamiento por corrosión en ambientes de cloruro. Algunos de los aceros austeníticos se pueden utilizar a temperaturas muy bajas de hasta $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se pueden utilizar en equipos de plantas, químicos, alimentos; además se utilizan en usos arquitectónicos. Callister (2009).

1.2.4. Aceros inoxidables martensíticos

Contienen un porcentaje de cromo entre el 11.4 y 18 % como su principal elemento aleado. Dentro de estos aceros inoxidables encuentran los aceros AISI 410, 416, 420, 431, 501 y 502. Normalmente, se utilizan en piezas que requieren resistencia mecánica, a eso se debe que sean utilizados en álabes de las turbinas (Figura 12), rodets, piezas o fundiciones que sean resistentes a la corrosión, partes de válvulas, cuchillos, entre otros. Callister (2009).

Figura 12. **Rodete Pelton con desgaste de la planta Hidroeléctrica Aguacapa**



Fuente: elaboración propia.

1.2.5. Acero inoxidable dúplex

Estos contienen aleaciones de cromo, molibdeno y estabilizadores como níquel para que se pueda lograr el equilibrio de las fases ferrítica y austenítica (30 % y 70 % respectivamente), de donde deriva su denominación dúplex. Fueron desarrollados para combinar la resistencia a la corrosión de tensiones en ambientes de cloruro de los aceros ferríticos, y la excelente soldabilidad de los aceros austeníticos, ejemplos de estas aleaciones son los aceros grados 312, 318, 325 y 329, la aleación 2205 es la más ampliamente usada. Algunas aplicaciones típicas son: tuberías de intercambiadores de calor, oleoductos, plataformas de ultramar, pozos de gas, plantas de desalación, plantas petroquímicas, industria de la celulosa y de procesamiento químico. Callister (2009).

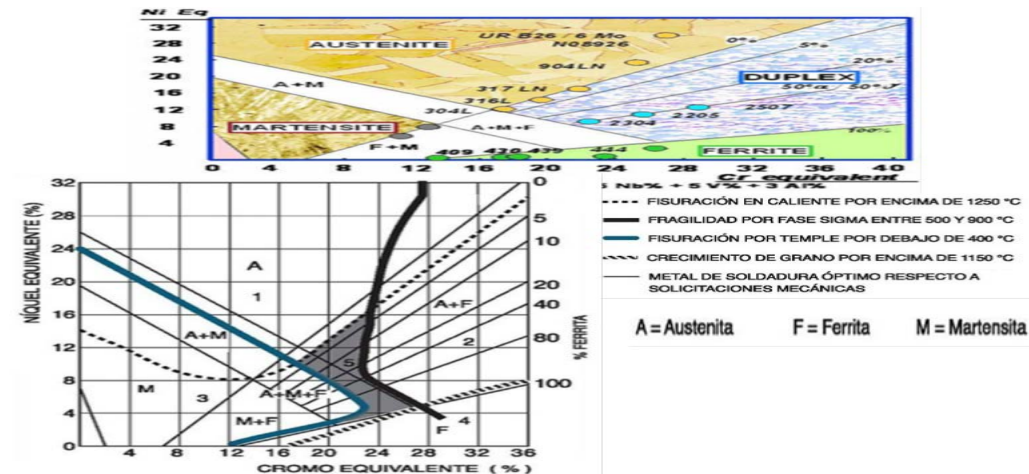
1.2.6. Acero inoxidable endurecido por precipitación (PH)

Contienen cromo alrededor del 12 % a 18 % y Ni entre 4 % a 9 %, además de Mo, Ti, Al, Nb o Ta y deben sus propiedades al endurecimiento de la estructura martensita. Su proceso se realiza al calentar el acero, luego se temple, con el fin de realizar la transformación de austenita a martensita. Con este método se adquieren propiedades mecánicas muy altas no importando que su aleación de acero tenga bajo contenido de carbono. Este acero inoxidable se utiliza en: Intercambiadores de calor, tubos para calderas de vapor, piezas aeroespaciales, tanques para transportar y almacenar combustible, piezas de bombas, entre otros. Callister (2009).

1.2.7. Diagrama de Schaeffler

Este diagrama (Figura 13) se usa principalmente, para predecir la estructura metalográfica resultante del proceso de soldadura en la unión de diferentes aceros inoxidables entre sí, o con aceros al carbón, con o sin aleación. Este diagrama fue obtenido de manera empírica por Al Schaeffler y es válido únicamente cuando los elementos se encuentran en proporciones no mayores a: C 0.2 % máx. Mn 1.0 % máx. Si 1.0 % máx. Mo 3.0 % máx. Nb 1.5 % máx. Callister (2009).

Figura 13. Diagramas de Schaeffler



Fuente: Rodríguez Galbarro H. Tutorial número 48 Soldadura de los Aceros Inoxidables. P.2

1.2.8. Estructura de un acero inoxidable martensítico

Considerando la composición química de una fundición martensítico tipo CA 6NM (Tabla III) y empleando el diagrama de Schaeffler, es posible predecir cuál será la microestructura en la unión soldada. En tabla III, se muestran los datos utilizando un proceso de soldadura de arco eléctrico manual y tres tipos de electrodos. Callister (2009).

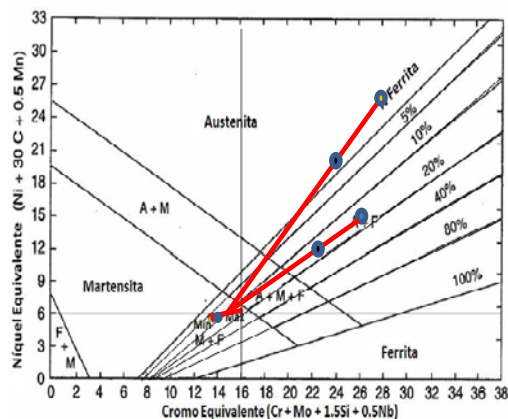
Tabla III. **Proceso de soldadura con arco para tres tipos de electrodo**

Material Base	Ni E	Cr E	Ni	C	Mn	Cr	Mo	Si	Nb	Clave
CA 6NM	6.8	16.5	4.5	0.06	1	14	1	1	0	● Max
	5.8	13.4	3.5	0.06	1	11.5	0.4	1	0	● Min
Material de Aporte										
E410NiMo-15	5.7	13.2	4.5	0.03	0.6	12.2	0.5	0.3	0	●
E 309L-16	15.0	25.8	13	0.04	1.5	23.5	0.75	1	0	●
E 310L-16	25.9	27.2	21.4	0.13	1.25	26	0.1	0.71	0	●
Proceso Soldadura	Dilución									
SMAW	30%									

Fuente: elaboración propia.

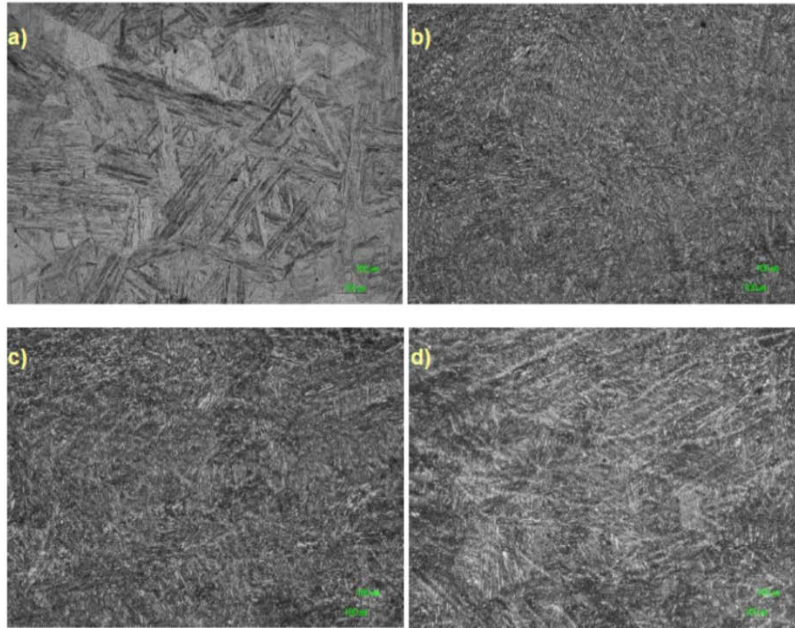
En el siguiente diagrama (figura 14) se observa que la unión resultante con un electrodo tipo 410 es martensita – ferrita con un 10 % de ferrita, mientras que la unión con electrodos tipo 309, resulta una estructura austenita – ferrita con poco menos del 20 % de ferrita, pero la unión con electrodo del tipo 310 resulta con una estructura solo de austenita (figura 15), por lo que el electrodo a utilizar en la reparación de rodetes Pelton será el E410 NiMo- 15 o su equivalente BÖHLER CN 13/4-IG (figuras 16 y 17).

Figura 14. **Estructura de un acero inoxidable martensítico**



Fuente: elaboración propia.


Figura 15. **Microestructura del acero CA6NM en estado homogenizado**



Fuente: elaboración propia.

Microestructura del acero CA6NM en estado homogenizado (a) y luego revenido a diferentes temperaturas con tiempo de sostenimiento de 3h. b) Revenido a 580 °C, c) Revenido a 620 °C, d) Revenido a 640 °C

Figura 16. Hoja técnica de electrodo UTP 410 NiMo-15


UTP 6635

Norma : AWS A5.4 E 410 NiMo-15

Electrodo especial con bajo contenido de hidrógeno. Gran resistencia a la erosión y cavitación. Rendimiento 130%

Campo de aplicación
 UTP 6635 es un electrodo especial para unir y revestir aceros inoxidables al cromo y aceros fundidos al CrNi. El depósito es resistente a la oxidación y posee elevada resistencia contra el desgaste por cavitación y erosión. Muy apropiado para trabajos en ruedas de turbinas tipo Peltron, Francis y Kaplan.

Características de la soldadura
 El electrodo UTP 6635 se puede soldar en todas las posiciones. La escoria se quita fácilmente y el depósito tiene poca tendencia a la fisuración. Rendimiento 130%


Propiedades mecánicas del depósito

Resistencia a la tracción Mpa	Límite de elasticidad MPa	Alargamiento %	Tratamiento térmico revenido
800	> 635	18	600-630°C

Composición del depósito

C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo
0.03	13	4	0.8	0.25	0.45

Instrucciones para soldar
 Siendo UTP 6635 un electrodo con fundente del tipo bajo contenido de hidrógeno, se recomienda secarlo inmediatamente antes de soldar durante 2-3 horas a 250-300°C. Mantener arco corto. Las temperaturas entre pases al soldar materiales base de composición similar, de cualquier espesor, deben ser de 150-200°C para evitar un endurecimiento.



Posición de soldaduras

Tipos de corriente: CC P(+)

Electrodos	Ø x L(mm)	3.2 x 350	4.0 x 450
Amperaje	A	100-130	130-170

Fuente: Norma AWS A5.4 E 410 NiMo-15. p.125.

Figura 17. Varilla de aporte GTAW UTP 410 NiMo-15 3/32"



Fuente: elaboración propia.

1.3. Procesos de soldadura aplicables para la reparación de rodets Pelton

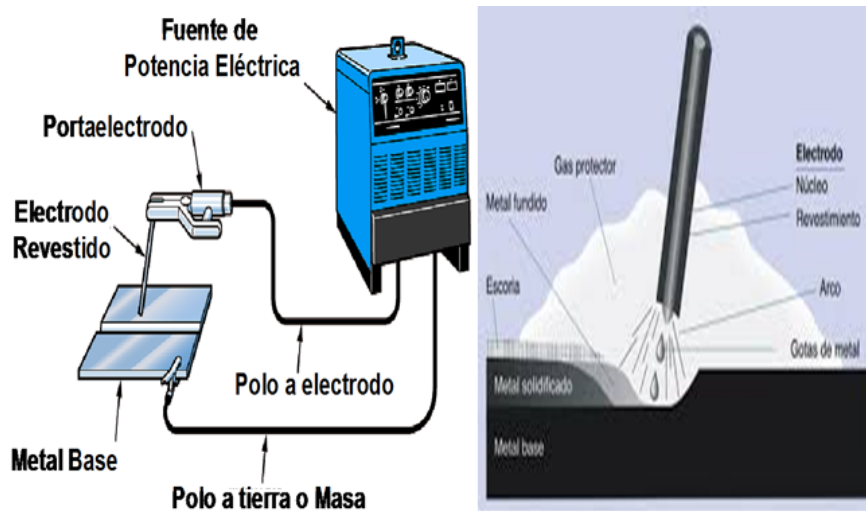
En este capítulo, se da la información adecuada acerca del proceso de soldadura para los rodets PELTON y los elementos que se conforman para dicha reparación y soldadura. Dentro de este proceso, se tiene la soldadura de Arco manual – SMAW y sus dispositivos que la conforman como se visualizan en la gráfica. Además, entra el tipo o los tipos de electrodos más usados y sus fichas técnicas. Como detalles específicos de la soldadura realizada. Cabe resaltar el equipo de seguridad industrial para cada trabajador que realiza dichas reparaciones. Destacando de la misma forma los tipos de alambre tubulares. Gráficas y resultados de las soldaduras. Groover (2007)

1.3.1. Soldadura de arco manual - SMAW

Este fenómeno físico es producido cuando hay paso de corriente eléctrica, mediante una ionización (masa gaseosa), lo cual genera en dicha zona una temperatura elevada, la cual se aprovecha como una fuente de calor en los procedimientos y procesos de soldadura conocida como arco eléctrico. Groover (2007).

También se conoce como Arco Voltaico al arco eléctrico, esto se debe a que aquí se transforma una energía elevada en forma de luz y calor, la que llega a alcanzar la temperatura de 4000°C ; físicamente se evidencia por el contacto eléctrico y una separación a una distancia fija entre los polos negativo y positivo (Figura 18).

Figura 18. **Equipo SMAW y arco eléctrico**



Fuente: manual de soldadura Indura. p. 29

Al darse una polaridad se afecta al calor que se libera, con lo cual se puede controlar la cantidad al metal por soldar. Si cambia la polaridad, se puede concentrar más calor en un área específica o donde sea necesario.

Normalmente, se desea más calor en el metal para soldar, para tener mayor área de trabajo para fundir un electrodo. Consecuentemente, para hacer depósitos de material en un metal, se debe tener más caliente el área de soldadura que el propio electrodo.

Cuando se trabaja con polaridad inversa se produce menos calor en el metal a soldar y más calor en el electrodo. Al hacer esto se tiene un resultado de depositar material rápidamente mientras no se calienta el metal a soldar. (Tabla IV).

Tabla IV. **Síntomas, causas y soluciones de soldadura SMAW**

Síntomas	Causas	Remedios
1. Arco inestable, se mueve, el arco se apaga, Salpicadura distribuida sobre el trabajo	1. Arco demasiado largo,	1. Acorte el arco para penetración correcta
2. La soldadura no penetra. El arco se apaga con frecuencia	2. Insuficiente corriente para el tamaño del electrodo	2. Aumentar corriente. Use electrodo más delgado
3. Sonido fuerte de disparo del arco. El fundente se derrite rápidamente. Cordón ancho y delgado. Salpicadura en gotas grandes	3. Demasiada corriente para el tamaño del electrodo. También podría haber humedad en revestimiento del electrodo.	3. Reducir corriente. Use electrodo más grande
4. La soldadura se queda en bolas. Soldadura pobre	4. Electrodo incorrecto para el trabajo	4. Use el electrodo correcto en el metal por soldar.
5. Es difícil establecer el arco. Poca penetración, dando una soldadura inadecuada	5. Polaridad incorrecta en porta electrodo. Metal no limpiado. Corriente insuficiente	5. Cambie polaridad o use corriente CA en vez de CD. O aumente la corriente.
6. Soldadura débil, Es difícil hacer el arco. El arco se rompe mucho	6. El metal por soldar no está limpio.	6. Limpie el metal por soldar. Quite toda la escoria de soldadura previa.
7. Arco intermitente. Puede que cause arcos en grapa para puesta en tierra.	7. Puesta a tierra inadecuada	7. Corrija la puesta a tierra. Mueva el electrodo más lentamente

Fuente: Aguilar Schafer, J. A. Manual de soldadura., pág. 44.

1.3.2. Electrodo

Es una varilla metálica con materiales adecuados, que realiza la función de material de aporte en aplicaciones de soldadura por arco (Figura 16). Su

composición puede ser de materiales no ferrosos y ferrosos, se encuentran en el mercado en dos tipos: no revestidos y de metal revestido. Groover (2007)

El electrodo se compone de núcleo que contiene el material que se va a aportar, su composición depende de las características del metal que se va a soldar. Su revestimiento se compone de sustancias químicas y cumple con las siguientes funciones:

- Le da dirección al arco y propicia una fusión de material uniforme y equilibrada.
- Permite la creación de gases de protección, los gases de protección evitan que el oxígeno y el nitrógeno contaminen el área soldada.
- Para evitar que se produzca un enfriamiento rápido, el revestimiento crea una escoria.
- Sus elementos químicos contribuyen a tener una buena fusión con los materiales base.
- Ayuda a estabilizar el arco eléctrico.

Condiciones de uso:

- Los electrodos deben mantenerse libres de humedad (en un lugar seco) y el núcleo debe estar concéntrico.

1.3.2.1. Electrodo revestido

Su núcleo es metálico, y su revestimiento se compone de sustancias químicas, un extremo no se encuentra revestido para sujetarlo con el portaelectrodo, Groover (2007)

1.3.2.2. Electrodo desnudo o sin revestimiento

Es un alambre laminado o trefilado, el cual solo puede ser usado en aplicaciones donde existe una protección externa, la cual impide que el oxígeno y nitrógeno puedan contaminar la soldadura. A eso se debe que se le llame proceso de Atmósfera Inerte. Para lograr esa protección externa utiliza gases como Argón, Helio, Dióxido de carbono o la mezcla de Argón y Dióxido de Carbono (Figura 19).

Figura 19. Identificación de códigos para material de aporte en soldadura SMAW

Material de aporte para soldadura
Clasificación de electrodos según la AWS para proceso SMAW para aceros al carbono

E-60 10

Electrodo
Resistencia a la tensión mínima 60,000 lb/pulg²
Todas posiciones
Tipo de corriente y recubrimiento C.D P.I. (porta electrodo al positivo) * Ver tabla 1

Para electrodo de baja aleación

E - 9018-B3

Electrodo
Resistencia a la tensión mínima 90,000 lb/pulg²
Todas posiciones
Tipo de corriente C.A. C.D. P.I.
Composición estándar del depósito * Ver tabla 2

Tipos de recubrimiento y corriente

DIGITO	TIPO DE RECUBRIMIENTO	CORRIENTE PARA SOLDAR
0	Sodio celulosa	CDPI
1	Potasio celulosa	CA o CDPI
2	Sodio titanio	CA o CDPD
3	Potasio titanio	CA o CD ambas polaridades
4	Titanio polvo hierro	CA o CD ambas polaridades
5	Sodio bajo hidrógeno	CDPI
6	Potasio bajo hidrógeno	CA o CDPI
7	Oxido de hierro polvo Fe	CA o CDPD
8	Bajo hidrógeno polvo Fe	CA o CDPI

POSICION

- Toda posición
- Piano y filete horizontal
- Toda posición más vertical descendente.

CA = Corriente alterna
CDPI = Corriente directa polaridad invertida (electrodo positivo)
CDPD = Corriente directa polaridad directa (electrodo negativo)

Composición química de electrodos de acero de baja aleación para proceso SMAW (AWS A5.5) electrodo revestido

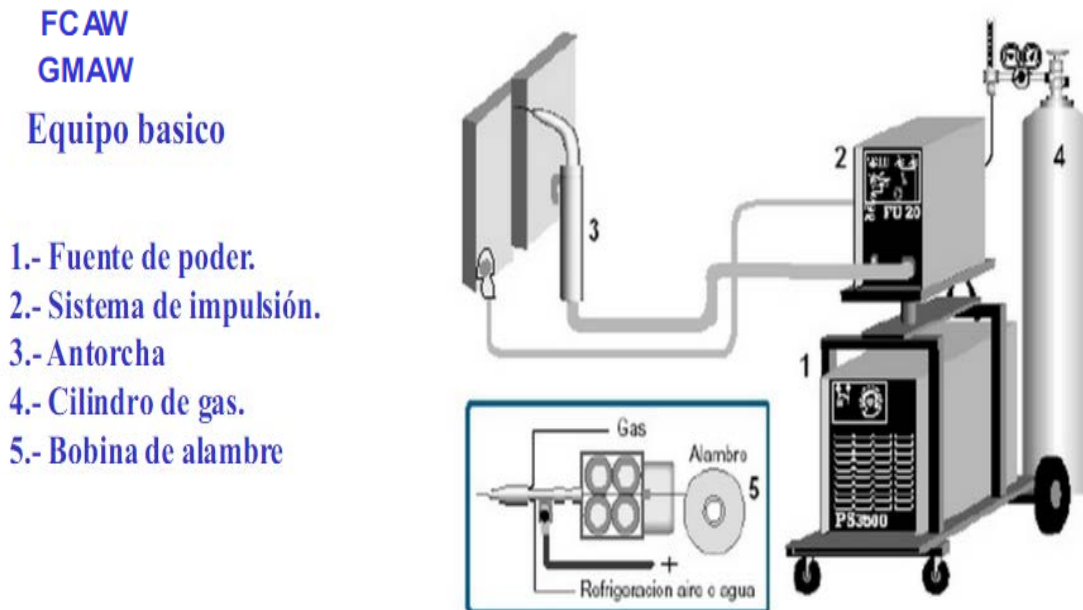
ELECTRODO	C CARBONO	Mn MANGANESO	SI SILICIO	P FÓSFORO	S Azufre	Cr Cromo	Mo Molibdeno	Ni Niquel
9016 B3	0.05 a 0.12	0.9	0.6	0.03	0.03	2.00 a 2.50	0.90 a 1.20	-----
9018 B3	0.05 a 0.12	0.9	0.8	0.03	0.03	2.00 a 2.50	0.90 a 1.20	-----
7018 A1	0.12	0.9	0.8	0.03	0.03	-----	0.04 a 0.65	-----
8018 B2	0.05 a 0.12	0.9	0.8	0.03	0.03	1.00 a 1.50	0.04 a 0.65	-----
8018 D3	0.12	1.0 a 1.8	0.8	0.03	0.03	-----	0.4 a 0.65	0.9
8018 B6	0.05 a 0.10	1.0	0.9	0.03	0.03	4.0 a 6.0	0.45 a 0.65	0.40

Fuente: elaboración propia.

1.3.3. Soldadura semiautomática FCAW-GMAW-GTAW

Se conoce a la soldadura FCAW como soldadura por arco metálico, a diferencia del proceso GMAW-GTAW el proceso FCAW tiene en su centro de alambre un fundente de donde proviene su nombre “soldadura con arco con núcleo fundente” (Figuras 20 y 22). Este tipo de soldadura se utiliza en aceros al carbono, inoxidable y se utiliza en metales con revestimiento duro (con protección contra el desgaste). Ahora bien, en los procesos GMAW-GTAW se utilizan alambres sólidos con protección de gas. Groover (2007).

Figura 20. Soldadura semiautomática FCAW-GMAW



Fuente: manual de Soldadura Indura. p. 122.

La soldadura puede ser automática o semiautomática. Existen varias diferencias entre el alambre sólido GMAW-GTAW y el alambre tubular FCAW, las cuales deben tomarse en cuenta al seleccionar uno u otro tipo.

1.3.3.1. Eficiencia

Se determina como el cociente entre el porcentaje de metal depositado entre el peso del consumible utilizado, este factor disminuye cuando existe formación de escoria y existencia de proyecciones. Para el caso de utilizar el alambre sólido su eficiencia media se encuentra alrededor del 98 y 100 %, con el alambre tubular metal cored una eficiencia entre el 96 y 98 %, tubular con fundente básico entre el 85 y 94 % y el alambre tubular con fundente rutilico entre el 83 y 92 %.

1.3.3.2. Densidad de corriente

Se define como la corriente o intensidad necesaria para fundir el alambre entre la sección metálica (efectiva) del mismo, para el caso del alambre tubular, por ser hueco su sección metálica (efectiva), es menor. Por ejemplo, al aplicar una corriente de 270 Amperios en un hilo tubular se tiene una corriente de 400 A/mm², mientras que en un alambre sólido 240 A/mm², lo cual indica que se necesita una mayor velocidad de fusión para un alambre tubular.

1.3.3.3. Posibilidad de soldar en diferentes posiciones

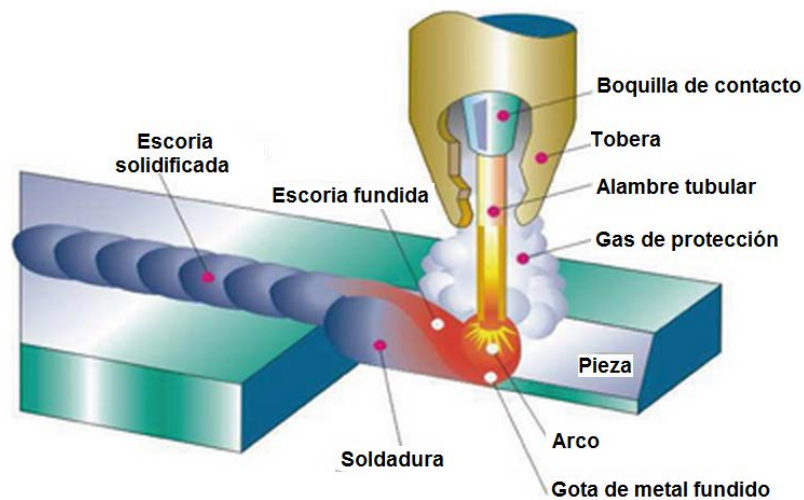
Para posiciones muy difíciles como por ejemplo, sobre cabeza o vertical ascendente es mejor el alambre tubular con escoria de Rutilio. Existen dos tipos

de proceso de alambre tubular, que dan lugar a propiedades mecánicas diferentes.

1.3.3.4. Autoprotegido y protegido con gas

En el proceso autoprotegido se tiene la ventaja de que no se utiliza gas de protección externa, más bien se descompone el flux interno, el cual garantiza la no entrada de contaminantes en la soldadura depositada. (Figura 21).

Figura 21. **Soldadura semiautomática FCAW-GMAW**



Fuente: Miguel José María, Pérez Carlos. Artículo Hilos tubulares para unión de voestalpine Böhler Welding. p.1

Figura 22. **Soldadura semiautomática GMAW de Planta Aguacapa**

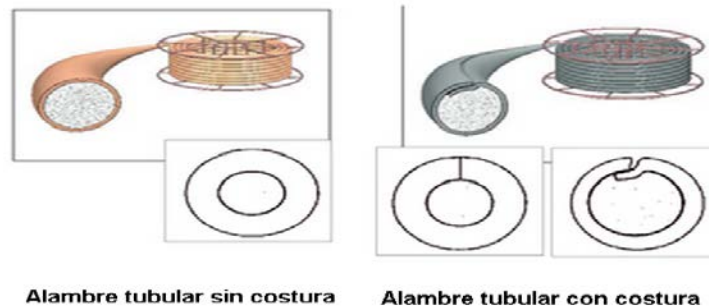


Fuente: elaboración propia.

1.3.4. Tipos de alambres tubulares

Existen dos tipos de alambres tubulares, según su procedimiento de fabricación (Figura 23), dando lugar a diferentes requerimientos de consumibles y un comportamiento frente a la soldabilidad también diferentes, así como características metalúrgicas y composiciones ligeramente diversas. Los tipos de alambres tubulares son: i) sin costura y cobreados y ii) con costura, y se diferencian uno de otro en su proceso de fabricación

Figura 23. **Tipos de alambre tubular**



Fuente: José María, M. Pérez, C. Artículo Hilos tubulares para unión de voestalpine Böhler Welding. p.1.

1.3.4.1. Alambre tubular sin costura

Al tener un espesor mayor, facilita la posición para aplicar una soldadura automatizada. También evita que existan desviaciones menores en el arco por ser un alambre rígido. Cuando es 100 % cobreado permite una transferencia de corriente alta y la soldadura tiene una alta resistencia a la corrosión. Se utiliza en aplicaciones donde existe humedad elevada ya que no es necesario resecar este alambre previo a su uso.

1.3.4.2. Alambre tubular con costura

Para este alambre se tiene el fundente 100 % homogéneo y distribuido en el interior del alambre, lo cual aporta propiedades de soldabilidad constante y mecánicas. Al ser un proceso de producción continuo lo vuelve más estable y le aporta calidad constante.

1.3.4.3. Alambre tubular Metal Cored

Estos tienen un relleno que posee polvo metálico con elementos desoxidantes, lo que evita la formación de escoria. Se usan para obtener depósitos sin poros no salpicaduras y cuando necesita soldaduras con una elevada velocidad. En estos electrodos, las apariencias de los cordones son muy buenas y no dan lugar a salpicaduras; además son muy eficientes para aplicaciones donde se realizan tratamientos térmicos.

1.3.5. Gas de protección

Cuando se realiza una soldadura con alambre tubular es importante tomar en cuenta como el gas de protección influye en el proceso (Figura 24). El gas modifica e influye en factores como:

- Transferencia
- Penetración
- Sanidad interna
- Vista del cordón
- Desoxidación
- Ductilidad
- Dureza

Además de la formación de escoria y óxido, los gases comúnmente empleados:

1.3.5.1. Bióxido de carbono (CO₂)

- Permite una profundidad de penetración muy alta.
- Se adquiere a un costo bajo.
- Permite o tiende a oxidar metales que se van a unir.

Figura 24. Gas de protección



Fuente: elaboración propia.

1.3.5.2. Mezcla de argón y (CO₂)

- Las mezclas más comunes son 75-25 y 80-20, ya que al aumentar el contenido de argón la capa de escoria se pierde (Figura 25).
- Con esta mezcla se aumenta la eficiencia en el fundente y se ayuda a la soldadura en aportar desoxidantes.
- Ayuda al soldador a realizar soldaduras difíciles (fuera de posición).

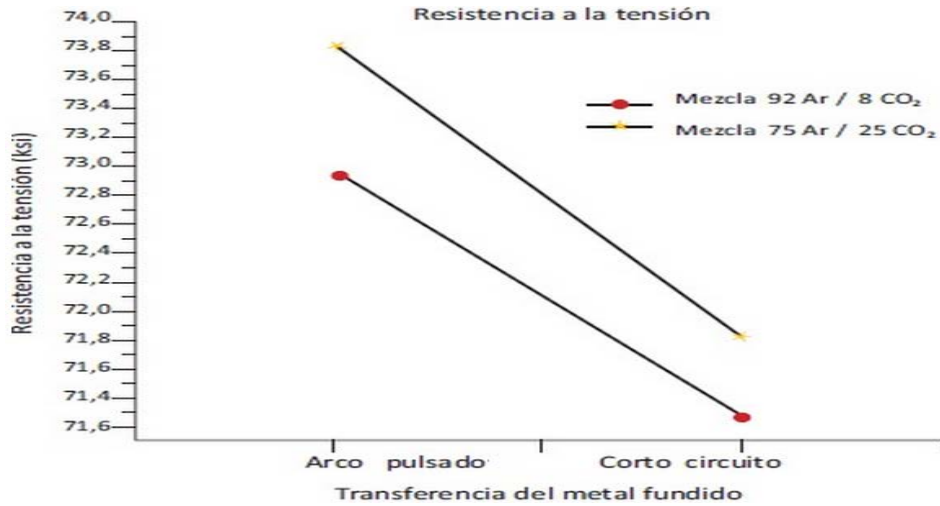
Figura 25. Gas de protección argón y (CO₂)



Fuente: elaboración propia.

La zona afectada por el calor es directamente proporcional a la entrada de calor. Cuando se transfiere el arco pulsado la ZAC es más pequeña que la entrada de calor a diferencia de la transferencia de corto circuito. Lo anterior se debe a que, en el arco pulsado, en el tiempo que se tiene una corriente base, el calor se disipa por conducción en períodos cortos. Lo anterior permite obtener mayor resistencia a la tensión en las piezas soldadas, y según su combinación de gases entre un 75 % Ar y 25 % CO₂ permite tener un grano fino (Figura 26).

Figura 26. Ksi-transferencia de metal fundido Ar / CO₂



Fuente: elaboración propia.

Al realizar un ensayo de fractura en uniones tipo T en donde se ha realizado un depósito en el filete, se puede evidenciar que son del tipo dúctil con un aspecto fibroso y opaco. Cuando se evidencian porosidades en el pie de la soldadura, luego del ensayo, ésta se debe al modo de transferencia de la mezcla de gas de protección.

En la ZAC, el acero la temperatura es superior a la Ac₃ del diagrama hierro – carbono; la ferrita y perlita original se transforman en austenita durante el calentamiento y, luego del enfriamiento de éstas, se transforman en ferrita y perlita que inicialmente presentan un tamaño de grano grueso que, al alejarse de la zona de soldadura, se refinan a un tamaño de grano más fino. Groover (2007).

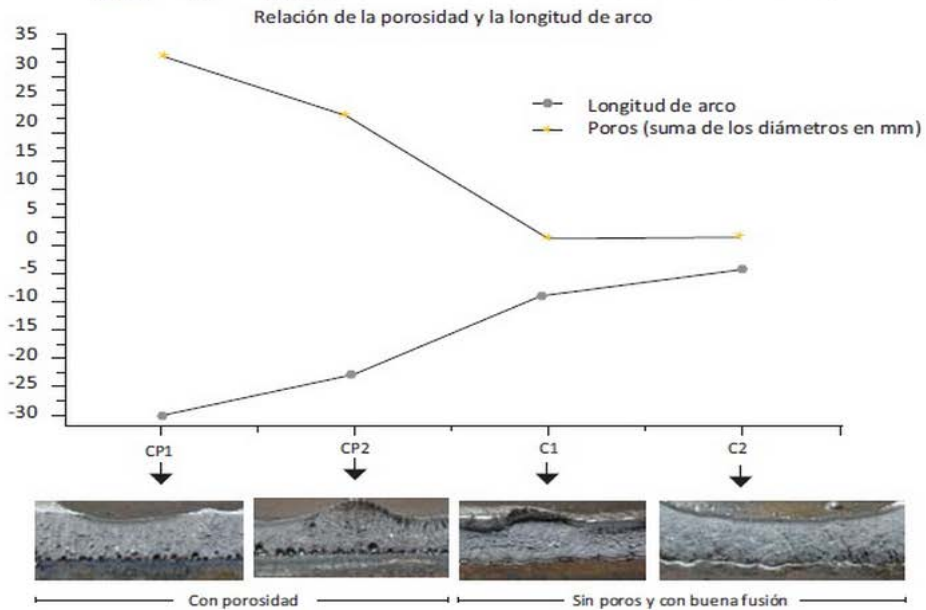
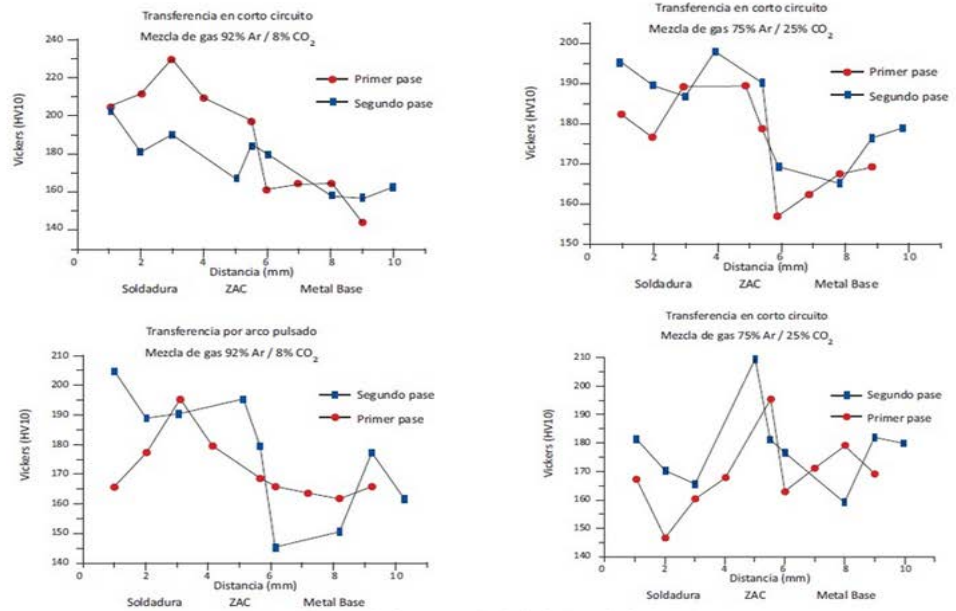
1.3.6. Resultados de dureza

En el primer pase de soldadura, el perfil de dureza en las uniones soldadas con la transferencia de arco pulsado presenta valores menores que en corto circuito, debido al sobre calentamiento recibido por la temperatura adicional, proveniente de la fusión del segundo pase; seguido de un enfriamiento más lento que en la transferencia de corto circuito, esto se debe a que, en el transcurso del tiempo, donde se aplica la corriente base el calor se disipa. Ahora bien, en la corriente de corto circuito, la corriente es estable y constante y el enfriamiento no es tan controlado como en la corriente base. Lo anterior ejemplifica cómo se da un alivio de tensiones internas y esto permite una disminución en la dureza cuando se da la transferencia de arco pulsado. Callister (2009).

En todas las uniones soldadas, el perfil de dureza de la ZAC se evidenció una distribución que va desde un valor alto del metal base hasta un valor bajo. Lo anterior obedece a que la zona que es adyacente a la línea de fusión (el punto más alto de dureza), existe aumento del grano.

En las muestras se evidencia poca diferencia en las durezas en sus zonas de soldadura. Se presentó una leve diferencia en los valores de dureza en las tres zonas de soldadura a excepción del tratamiento de menor resistencia a la tensión que corresponde al modo de transferencia en corto circuito con la mezcla de gas de protección 92% Ar / 8% CO₂. Este último, presenta una diferencia marcada entre las durezas de los dos pases en la región de soldadura, lo que crea tensiones residuales que pueden ser origen de agrietamiento (Figura 27).

Figura 27. Zonas de soldadura con protección de gas



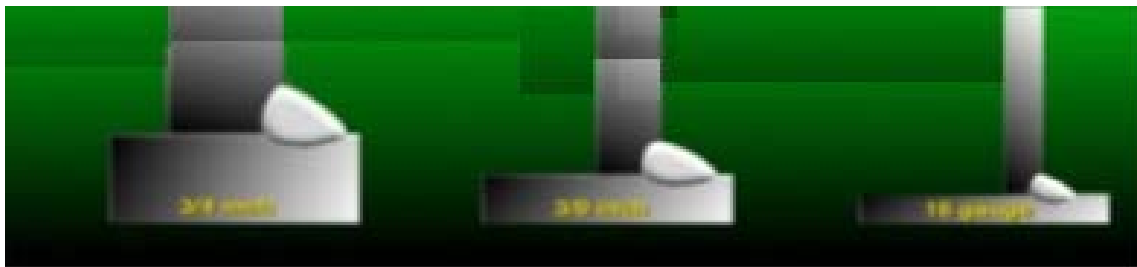
Porosidad en las uniones soldadas en filete rotación, CP1: modo de transferencia en arco pulsado, mezcla de gas 92%Ar/8%CO₂; CP2: modo de transferencia en arco pulsado, mezcla de gas 75%Ar/25%CO₂; C1: modo de transferencia en corto circuito, mezcla de gas 92%Ar/8%CO₂; C2: modo de transferencia en corto circuito, mezcla de gas 75%Ar/25%CO₂

Fuente: elaboración propia.

1.3.7. Ventajas del proceso

- Las uniones son de mayor calidad, con costos bajos y un proceso con menor esfuerzo que el SMAW.
- Es más flexible que el proceso GMAW y el de arco sumergido.
- La soldadura se deposita con calidad excelente.
- Los cordones son uniformes, y tienen una excelente apariencia (Figura 28).
- Se puede aplicar esta soldadura en un amplio rango de espesores en aceros específicos.
- Contiene una tasa alta de depósito.
- La eficiencia del electrodo es alta.
- En relación al proceso GMAW es más limpio inicialmente.
- El arco es visible y fácil de usar.
- Posee alta resistencia a agrietarse bajo el cordón.
- Se reduce la distorsión en relación con el proceso SMAW.
- Se puede aplicar sobre juntas de preparación económica.
- Arco visible, fácil de usar.

Figura 28. Zonas de soldadura con protección de gas



Fuente: elaboración propia.

1.3.8. Limitaciones del proceso

- Se encuentra limitado a materiales a base de níquel y ferrosos.
- La capa de escoria producida debe ser removida.
- Considerando el peso, los electrodos más costosos entre los tubulares y los sólidos son los tubulares.
- El equipo de soldadura es más caro y complicado en relación al equipo SMAW. (Tabla V)
- El aire puede afectar la protección del gas.

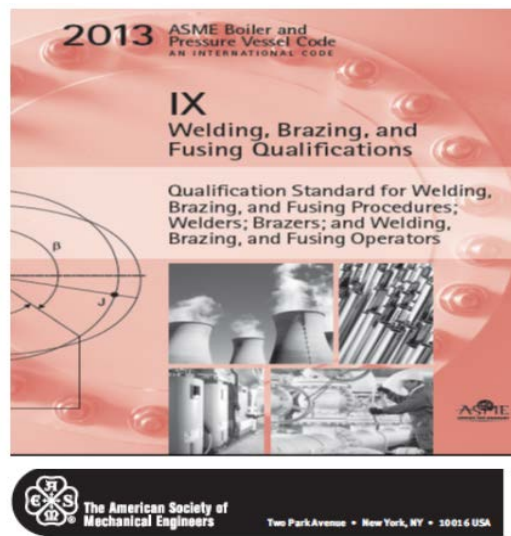
Tabla V. **Problemas comunes en la calidad de la soldadura**

Inclusiones de escoria	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Escoria presente en el cordón anterior ➤ Deficiente velocidad de avance o errática. ➤ Angulo no adecuado de avance.
Porosidad	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inadecuado flujo de gas de protección o insuficiente. ➤ Protección del gas por viento excesivo o ráfagas de viento.
Poros de agujero de gusano	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Lo produce la humedad o presencia de azufre en el acero ➤ Falta de limpieza en las juntas ➤ Para eliminar la humedad es necesario precalentar la pieza.
Socavado	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alto amperaje en la soldadura ➤ Alto voltaje en la soldadura ➤ Alta velocidad de avance
Fusión incompleta	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Excesiva corriente y voltaje ➤ Alta velocidad de avance ➤ Poco amperaje en la soldadura

Fuente: elaboración propia.

1.3.9. Calificación del proceso ASME sección IX

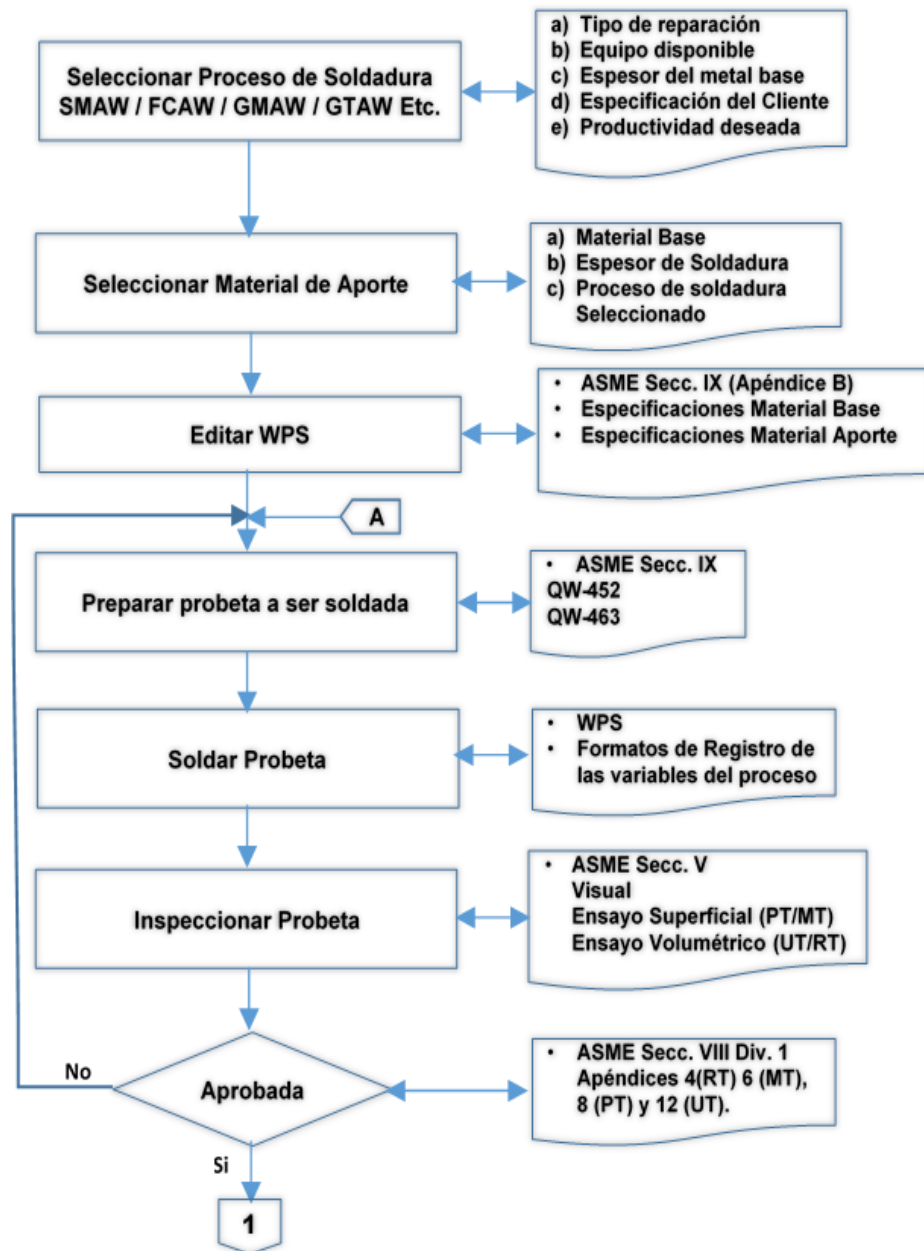
Figura 29. **Estándar para la calificación de procedimientos de soldadura, soldadores y operadores**



Fuente: Sección IX, ASME, 2013.

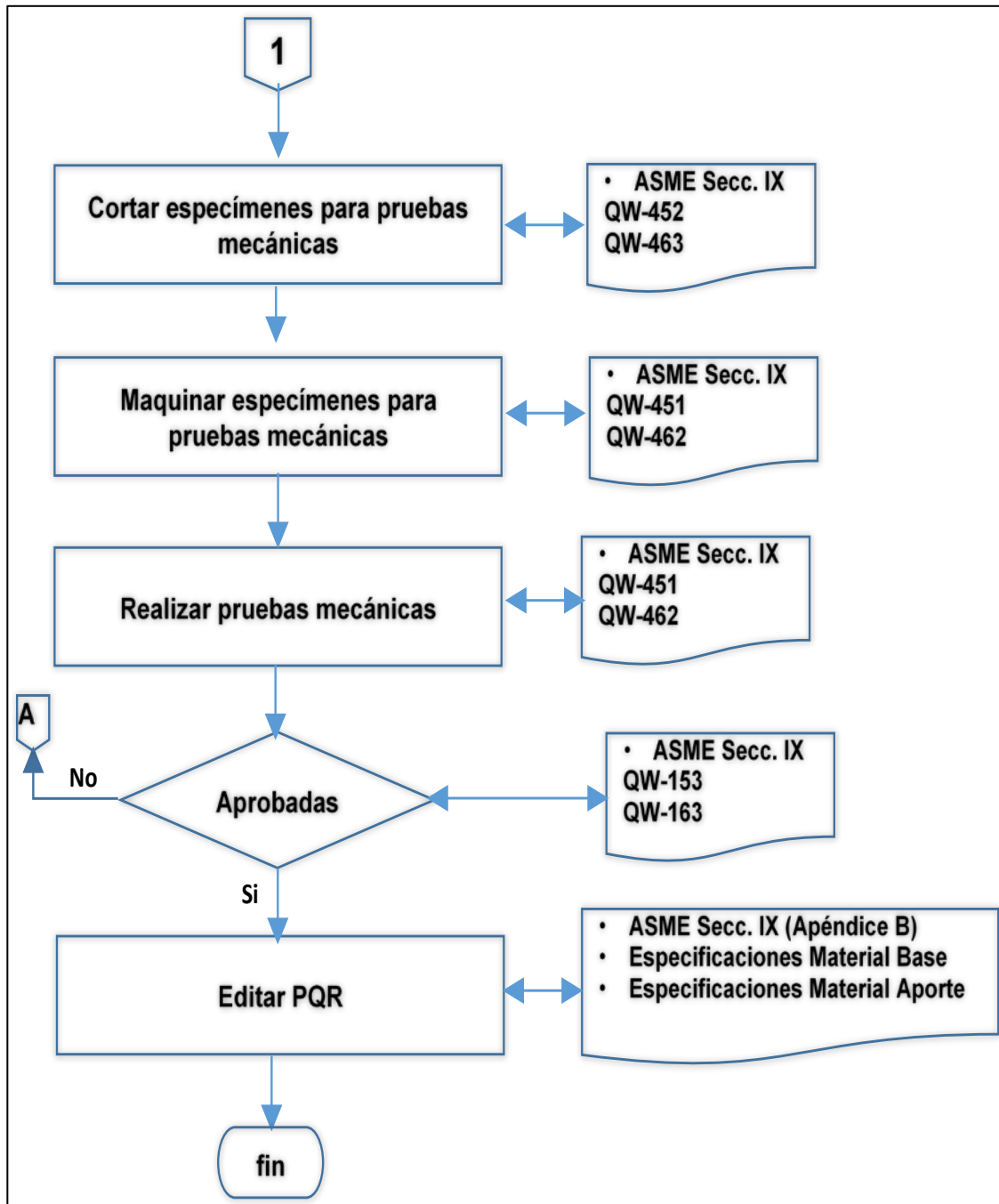
Como lo indica ASME Sección IX QW 200 “Cada fabricante y contratista debe preparar una especificación del proceso de soldadura “WPS” por escrito” (véase figura 29). El WPS debe contener todas las variables esenciales y no esenciales y cuando sea requerido también las variables suplementarias. En el apéndice no mandatorio B, se dan como guía formatos para documentar las calificaciones del proceso y las de los soldadores (Diagrama de flujo 1). Cuando un fabricante o contratista es adquirido por un nuevo propietario, el PQR y los WPS’s pueden ser usados por el nuevo que provienen del fabricante antiguo dueño sin recalificación, previendo el dueño tomar la responsabilidad para los WPS’s y PQR’s y la documentación que soporta a los PQR’s (Tabla VI). Al cambiar una variable esencial o suplementaria, se debe recalificar al proceso y al soldador. Cambios en las variables no esenciales no requieren recalificación del proceso, es necesario actualizar o rehacer uno nuevo.

Figura 30. Continuación, proceso de calificación del proceso ASME sección IX Diagrama de Flujo 1



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Proceso de calificación del proceso ASME sección IX**
Diagrama de flujo 1



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Continuación, proceso de calificación del proceso ASME
sección IX Diagrama de Flujo 1

Tabla VI. ASME sección IX Tabla QW-253, para proceso SMAW, FCAW,
GMAW, GTAW

Variables de la especificación del proceso de soldadura (WPS) – Soldadura de arco manual (SMAW)				
Parágrafo	Variable	Esencial	Suplementaria	No Esencial
QW-402 Biseles	.1	Cambiar el diseño de la junta		X
	.4	Eliminar respaldo		X
	.10	Cambiar el espaciamiento en la raíz		X
	.11	Agregar o eliminar soportes		X
QW-403 Metal Base	.5	Cambiar el número de grupo	X	
	.6	Impacto en el límite del espesor	X	
	.8	Cambiar el espesor calificado	X	
	.9	Espesor del paso > 13 mm	X	
	.11	Cambiar el número P calificado	X	
QW-404 Material de Aporte	.4	Cambiar el número F	X	
	.5	Cambiar el número A	X	
	.6	Cambiar el diámetro		X
	.7	Cambiar el diámetro más de 6 mm		X
	.12	Cambiar la clasificación (sufijo G)		X
	.30	Cambiar el espesor	X	
QW-405 Posiciones	.33	Cambiar la clasificación		X
	.1	Agregar una posición		X
	.2	Cambiar la posición		X
	.3	Cambiar de posición ascendente a Posición descendente en soldadura vertical		X
QW-406 Pre calentamiento	.1	Reducirlo más de 55°C	X	
	.2	Cambiar el mantenimiento del pre calentamiento		X
	.3	Incrementarlo más de 55°C		X
QW-407 Tratamiento Térmico	.1	Cambiar el tratamiento térmico	X	
	.2	Cambiar el tratamiento térmico (temperatura y rango de temperatura)		X
	.4	Límites del tiempo de permanencia	X	
QW-409 Características Eléctricas	.1	Mayor Color de Entrada		X
	.4	Cambiar la corriente o la polaridad		X
	.8	Cambiar el rango de Amperaje y Voltaje		X
QW-410 Técnica	.1	Cambiar de arrastre por ondulación		X
	.5	Cambiar el método de limpieza		X
	.6	Cambiar el método de sacar raíz		X
	.9	Cambiar de pasos múltiples a un solo paso		X
	.25	Cambiar de manual o automática		X
	.26	Añadir o eliminar el martillado		X
	.64	Uso de procesos térmicos en materiales P11A y P11B	X	

Continuación de la tabla VII.

ASME Sección IX Tabla QW-253					
VARIABLES DE LA ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS) – SOLDADURA ALAMBRE TUBULAR Y SÓLIDO – FCAW & GMAW					
Parágrafo		Variable	Esencia l	Suplementari a	No Esencial
QW-402 Biseles	.1	Cambiar el diseño de la junta			X
	.4	Eliminar respaldo			X
	.10	Cambiar el espaciamiento en la raíz			X
	.11	Poner o eliminar soportes			X
QW-403 Metal Base	.5	Cambiar el número de grupo		X	
	.6	Impacto en el límite del espesor		X	
	.8	Cambiar el espesor calificado	X		
	.9	Espesor del paso > 13 mm	X		
QW-404 Material de Aporte	.11	Cambiar el número P calificado	X		
	.4	Cambiar el número F	X		
	.5	Cambiar el número A	X		
	.6	Cambiar el diámetro			X
	.12	Cambiar la clasificación (sufijo G)		X	
	.23	Cambiar la presentación del material de aporte	X		
	.24	Añadir, eliminar o cambiar características suplementarias	X		
	.27	Cambiar elementos de aleación	X		
	.30	Cambiar el espesor de la soldadura	X		
	.32	Límites de espesor (arco de corto circuito de bajo voltaje)	X		
QW-405 Posiciones	.33	Cambiar la clasificación			X
	.1	Agregar una Posición			X
	.2	Cambiar la Posición		X	
QW-406 Pre calentamiento	.3	Cambiar de Posición Ascendente a Posición Descendente en Soldadura Vertical			X
	.1	Reducirlo más de 55°C	X		
	.2	Cambiar el mantenimiento del pre calentamiento			X
QW-407 Tratamiento Térmico	.3	Incrementarlo más de 55°C		X	
	.1	Cambiar el tratamiento térmico	X		
	.2	Cambiar el tratamiento térmico (temperatura y rango de temperatura)		X	
QW-408 Gas	.4	Límites del tiempo de permanencia	X		
	.1	Agregar o eliminar gas de protección			X
	.2	Cambiar de simple a mezcla o %	X		
	.3	Cambiar la tasa del flujo			X
	.5	Agregar, eliminar o cambiar el flujo de respaldo			X
	.9	Eliminar respaldo o cambiar composición	X		
QW-409 Características Eléctricas	.10	Cambiar tipo de gas	X		
	.1	Mayor Color de Entrada		X	
	.2	Cambiar el modo de transferencia	X		
	.4	Cambiar la corriente o la polaridad		X	
	.8	Cambiar el rango de Amperaje y Voltaje			X

Continuación de la tabla VII.

QW-410 Técnica	.1	Cambiar de arrastre por ondulación			X
	.3	Cambiar orificio, copa o tamaño de boquilla			X
	.5	Cambiar el método de limpieza			X
	.6	Cambiar el método de sacar raíz			X
	.7	Cambiar la oscilación			X
	.8	Cambiar la distancia del tubo de trabajo			X
	.9	Cambiar de pasos múltiples a un solo paso		X	
	.10	Cambiar de electrodo individual a múltiples		X	
	.15	Cambiar el espaciamiento del electrodo			X
	.25	Cambiar de manual o automática			X
	.26	Añadir o eliminar el martillado			X
	.64	Uso de procesos térmicos en materiales P11A y P11B	X		

ASME Sección IX Tabla QW-253					
VARIABLES DE LA ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS) – SOLDADURA ALAMBRE TUBULAR Y SÓLIDO – FCAW & GMAW					
Parágrafo	Variable	Esencial	Suplementaria	No Esencial	
QW-406 Precalentamiento	.1	Reducirlo más de 55°C	X		
	.2	Cambiar el mantenimiento del precalentamiento		X	
	.3	Incrementarlo más de 55°C		X	
QW-407 Tratamiento Térmico	.1	Cambiar el tratamiento térmico	X		
	.2	Cambiar el tratamiento térmico (temperatura y rango de temperatura)		X	
	.4	Límites del tiempo de permanencia	X		
QW-408 Gas	.1	Agregar o eliminar gas de protección		X	
	.2	Cambiar de simple a mezcla 0 %	X		
	.3	Cambiar la tasa del flujo			X
	.5	Agregar, eliminar o cambiar el flujo de respaldo			X
	.9	Eliminar respaldo o cambiar composición	X		
QW-409 Características Eléctricas	.10	Cambiar tipo de gas	X		
	.1	Mayor Color de Entrada		X	
	.2	Cambiar el modo de transferencia	X		
	.4	Cambiar la corriente o la polaridad		X	
QW-410 Técnica	.8	Cambiar el rango de Amperaje y Voltaje		X	
	.1	Cambiar de arrastre por ondulación		X	
	.3	Cambiar orificio, copa o tamaño de boquilla		X	
	.5	Cambiar el método de limpieza		X	
	.6	Cambiar el método de sacar raíz		X	
	.7	Cambiar la oscilación		X	
	.8	Cambiar la distancia del tubo de trabajo		X	
	.9	Cambiar de pasos múltiples a un solo paso		X	
	.10	Cambiar de electrodo individual a múltiples		X	
	.15	Cambiar el espaciamiento del electrodo			X
	.25	Cambiar de manual a automática			X
	.26	Añadir o eliminar el martillado			X
.64	Uso de procesos térmicos en materiales P11A y P11B	X			

Continuación de la tabla VII.

ASME Sección IX Tabla QW-253					
Variables de la Especificación del Proceso de Soldadura (WPS) – Soldadura con Electrodo de Tungsteno – GTAW					
Parágrafo	Variable	Esencial	Suplementaria	No Esencial	
QW-402 Biseles	.1	Cambiar el diseño de la junta		X	
	.5	Agregar respaldo		X	
	.10	Cambiar el espaciamento en la raíz		X	
	.11	Poner o eliminar refuerzos		X	
QW-403 Metal Base	.5	Cambiar el número de grupo	X		
	.6	Impacto en el límite del espesor	X		
	.8	Cambiar el espesor calificado	X		
	.11	Cambiar el número P calificado	X		
QW-404 Material de Aporte	.3	Cambiar el tamaño		X	
	.4	Cambiar el número F	X		
	.5	Cambiar el número A	X		
	.12	Cambiar la clasificación		X	
	.14	Agregar o eliminar material de aporte	X		
	.22	Agregar o eliminar el inserto consumible			X
	.23	Cambiar la presentación del material de aporte	X		
	.30	Cambiar el espesor de la soldadura	X		
QW-405 Posiciones	.33	Cambiar la clasificación		X	
	.50	Agregar o eliminar el fundente		X	
	.1	Agregar una posición		X	
	.2	Cambiar la posición		X	
QW-406 Precaentamiento	.3	Cambiar de posición ascendente a Posición descendente en soldadura vertical		X	
	.1	Reducirlo más de 55°C	X		
	.3	Incrementarlo más de 55°C		X	
ASME Sección IX Tabla QW-253					
Variables de la Especificación del Proceso de Soldadura (WPS) – Soldadura con Electrodo de Tungsteno – GTAW					
Parágrafo	Variable	Esencial	Suplementaria	No Esencial	
QW-407 Tratamiento Térmico	.1	Cambiar el tratamiento térmico	X		
	.2	Cambiar el tratamiento térmico (temperatura y rango de temperatura)		X	
	.4	Límites del tiempo de permanencia	X		
QW-408 Gas	.1	Agregar o eliminar gas de protección		X	
	.2	Cambiar de simple a mezcla 0 %	X		
	.3	Cambiar rango del flujo		X	
	.5	Agregar, eliminar o cambiar el flujo de respaldo		X	
	.9	Eliminar respaldo o cambiar composición	X		
QW-409 Características Eléctricas	.10	Cambiar tipo de gas	X		
	.1	Mayor color de entrada		X	
	.3	Agregar, eliminar la corriente pulsada		X	
	.4	Cambiar la corriente o la polaridad		X	
	.8	Cambiar el rango de Amperaje y Voltaje		X	
	.12	Cambiar el electrodo de Tungsteno		X	

Continuación de la tabla VII.

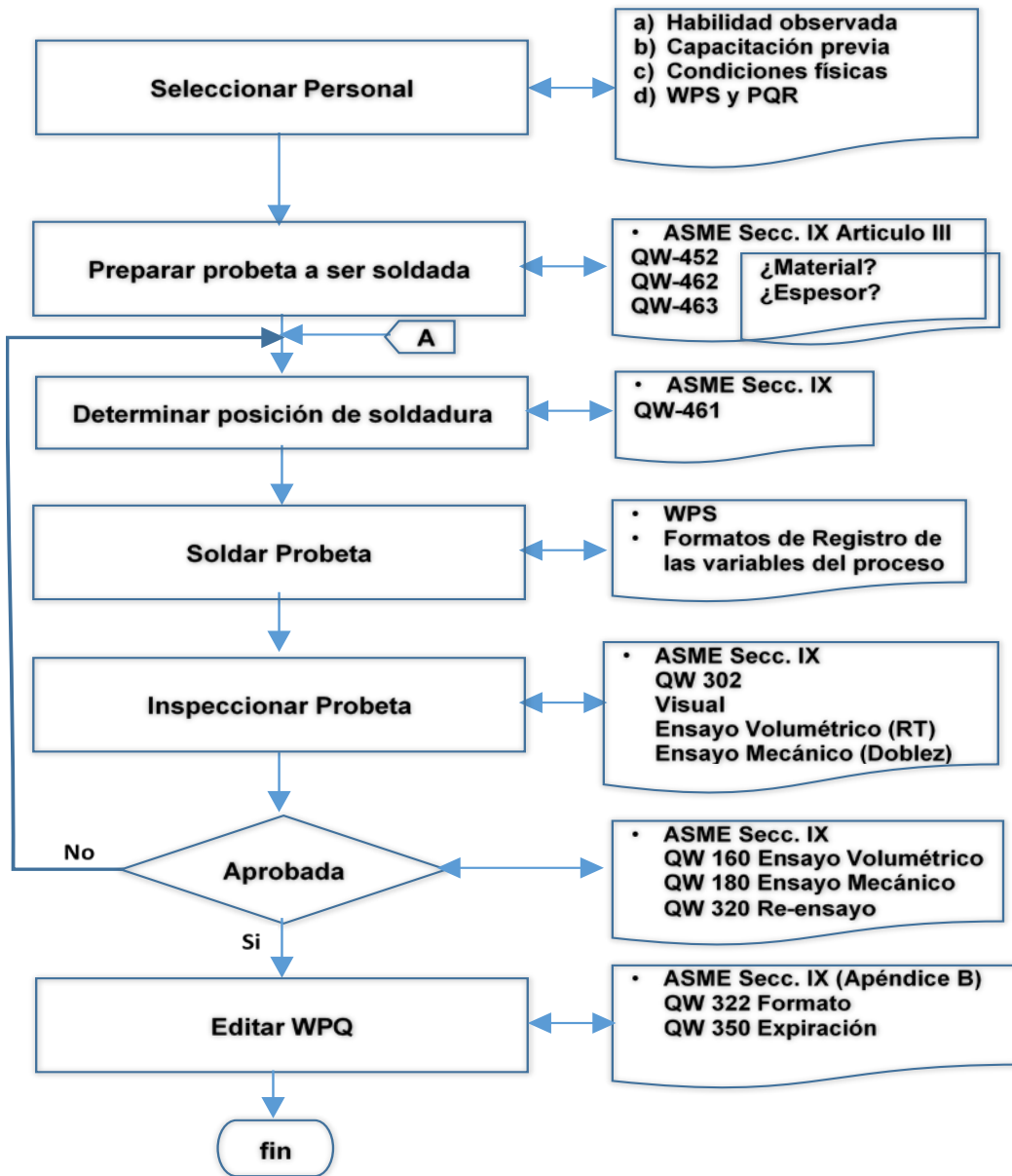
QW-410 Técnica	.1	Cambiar de arrastre por ondulación			X
	.3	Cambiar orificio, copa o tamaño de boquilla			X
	.5	Cambiar el método de limpieza			X
	.6	Cambiar el método de sacar raíz			X
	.7	Cambiar la oscilación			X
	.9	Cambiar de pasos múltiples a un solo paso		X	
	.10	Cambiar de electrodo individual a múltiples		X	
	.11	Cambiar de cámara cerrada a abierta	X		
	.15	Cambiar el espaciado del electrodo			X
	.25	Cambiar de manual o automática			X
	.26	Añadir o eliminar el martillado			X
	.64	Uso de procesos térmicos en materiales P11A y P11B	X		

Fuente: Estándar para la calificación de procedimientos de soldadura, soldadores y operadores, ASME, Sección IX, p. 54.

1.3.10. Calificación del soldador ASME Sección IX

Como lo indica ASME Sección IX, cada contratista debe preparar una especificación del soldador (Figura 30 y 31) en la especificación del proceso de Soldadura “WPS” por escrito (Diagrama de flujo 2), en el deben estar todas las competencias del soldador y su calificación, según competencia y habilidades (Tabla VII).

Figura 33. Diagrama de flujo 2. Calificación del soldador de ASME, Sección IX-Proceso



Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Soldador**



Fuente: Universidad Franco de Vitoria. Curso Homologado de soldador.

Figura 35. **Equipo mínimo para soldador**



Fuente: manual de soldadura Indura. p. 5

Tabla VII. **Tabla QW-416, Variables para calificación del soldador**

ASME Sección IX Tabla QW-416					
Variables para la Calificación del Soldador (WPQ)					
Parágrafo		Variable	Esencial		
			SMA W	FCAW/GMA W	GTA W
QW-402 Biseles	.4	Eliminar respaldo	X	X	X
	.7	Agregar respaldo			
QW-403 Metal Base	.2	Máximo calificado			
	.1 6	Cambiar diámetro de tubería	X	X	X
	.1 8	Cambiar el número P	X	X	X
	.9	Espesor del paso > 13 mm			
	.1 1	Cambiar el número P calificado			
QW-404 Material de Aporte	.1 4	Agregar o quitar aporte			X
	.1 5	Cambiar el número F	X	X	X
	.2 2	Agregar o quitar insertos			X
	.2 3	Cambiar la forma de presentación del material de aporte			X
	.3 0	Cambiar el espesor de metal soldado	X	X	X
	.3 1	Cambiar el espesor calificado			
	.3 2	Espesor límite para arco de corto circuito (bajo voltaje)		X	
QW-405 Posiciones	.1	Agregar una Posición	X	X	X
	.3	Cambiar de Posición Ascendente a Posición Descendente en Soldadura Vertical	X	X	X
QW-408 Gas	.7	Cambiar el tipo de gas			
	.8	Eliminar respaldo de gas inerte		X	X
QW-409 Características Eléctricas	.2	Cambiar el modo de transferencia		X	
	.4	Cambiar la corriente o la polaridad			X

Fuente: ASME, Sección IX. Estándar para la calificación de soldadores y Operadores. p.105.

1.3.11. Selección de material de aporte

Como ley fundamental, para elegir el material de aporte es importante considerar que dicho material debe ser mayor o igual a la aleación del metal base. Consecuentemente, aceros al carbón pueden soldarse con material de

aporte inoxidable, por ejemplo, un electrodo tipo E309. Ahora bien, un acero inoxidable no puede ser soldado con un material de aporte de acero al carbón por ejemplo un electrodo E7018.

1.3.12. Aceros inoxidables austeníticos

Regularmente estos son de los aceros inoxidables, es decir, los más soldables, pero son los que presentan mayores inconvenientes. Cuando se realiza soldadura en los aceros de este tipo, por ejemplo, presentan precipitación de carburos, que se evidencian en las zonas cercanas al cordón de soldadura, lo que permite que se presente corrosión intergranular. Que la precipitación no se evidencie es necesario no precalentar la pieza o en la medida de lo posible usar un material de aporte con un porcentaje de carbono menor al 0.03 % o electrodos estabilizados con Titanio, Niobio o Tántalo. Callister, (2009)

1.3.13. Aceros inoxidables ferríticos

En estos aceros inoxidables con alto contenido de cromo es necesario tomar las precauciones para minimizar el agrietamiento y fragilidad. Al realizar la soldadura puede aparecer una fase sigma (dura y frágil), si se mantiene mucho tiempo a temperaturas de alrededor de los 470°C. Además, son muy propensos a permitir el crecimiento del grano en temperaturas de 850°C - 900°C, por lo que es recomendable un post calentamiento entre 700°C y 800°C, seguido de un enfriamiento rápido. Callister, (2009)

1.3.14. Aceros inoxidables martensíticos

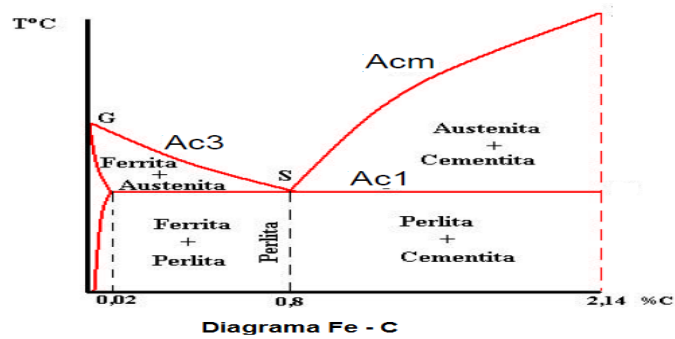
Las piezas o uniones soldadas de aceros martensíticos son propensas a tensiones y grietas, para lo cual es necesario tomar las precauciones necesarias. Para esto pueden utilizarse aleaciones austeníticas como electrodo E 309 y E310, con los cuales se absorben tensiones en la ZAC y mitigar la creación de grietas, pero al usar estos electrodos se pierden propiedades mecánicas, ya que su estructura metalográfica cambia. Para este tipo de aceros es necesario precalentar las piezas a soldar. Y al finalizar la soldadura es recomendable enfriar las piezas y realizarles un revenido. Callister,(2009)

1.3.15. Tratamientos térmicos ASME, Sección VIII, División 1

El relevado de esfuerzos es el proceso que tiene por objetivo liberar los esfuerzos residuales, los cuales se han acumulado en el proceso de fabricación de componentes soldados. El relevado de esfuerzos es realizado por calentamiento a una temperatura por debajo del punto crítico inferior (Ac_1) (Figura 35), y manteniéndola durante un tiempo preestablecido para lograr la deseada reducción de los esfuerzos residuales. Luego el acero es enfriado a una velocidad suficientemente lenta para evitar la formación de excesivos esfuerzos térmicos. No existen cambios microestructurales durante el proceso de relevado de esfuerzos.

Muy pocos o casi ningún esfuerzo es liberado a temperaturas menores a $260^{\circ}C$, y aproximadamente 90 % de los esfuerzos son liberados a $540^{\circ}C$. La máxima temperatura para un relevado de esfuerzos debe ser $30^{\circ}C$ por debajo de la temperatura de revenido usada después del temple.

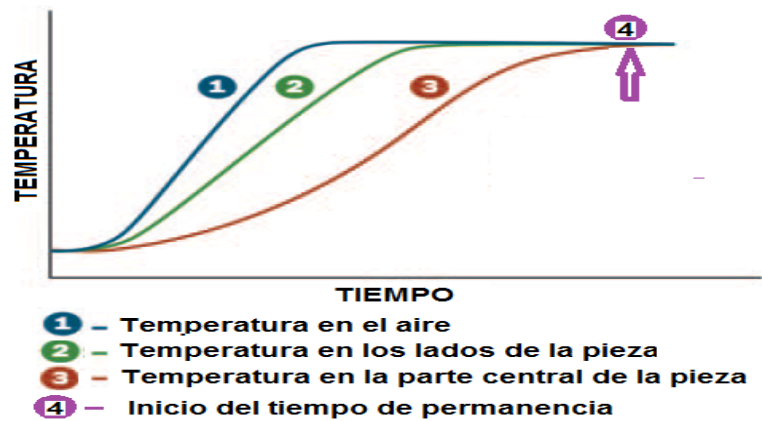
Figura 36. **Equipo Mínimo para Soldador**



Fuente: elaboración propia.

Una de las más importantes y críticas deficiencias en la mayoría de los hornos convencionales para el relevado de esfuerzos es la falta de uniformidad en la temperatura al inicio del proceso, como se ilustra en la Figura 36, donde se muestra que después de cierto tiempo se logra uniformizar las temperaturas en la atmósfera del horno y el material tratado, y entonces es cuando se debe iniciar el conteo del tiempo de permanencia.

Figura 37. **Relevado de esfuerzos**



Fuente: elaboración propia.

Las temperaturas mínimas para los tratamientos térmicos de alivio de esfuerzos están indicadas en las tablas UCS-56-1 a UCS-56-11 y Tablas UHA-32-1 a UHA-32-6 y en UNF-56, del código ASME Sección VIII División 1 (Tabla VIII).

Tabla VIII. **Tabla UHA-32-1 Requerimiento para los tratamientos térmicos post soldadura para aceros altamente aleados**

CÓDIGO ASME SECC. VIII DIV. 1 - TABLA UHA – 32 - 1				
REQUERIMIENTO PARA LOS TRATAMIENTO TÉRMICOS POSTSOLDADURA PARA ACEROS ALTAMENTE ALEADOS				
Material	Temperatura Normal de sostenimiento °F (°C) Mínimo	Tiempo mínimo de permanencia a la Temperatura Normal para Espesores Nominales		
		Hasta 2 in (50mm)	Sobre 2 in hasta 5 in (50 mm a 125 mm)	Arriba de 5 in (125 mm)
P No. 6 Gr. Nos. 1, 2, 3	1400 (760)	1 hr/in (25 mm), 15 minutos mínimo	2 hr más 15 min. por cada pulgada (25 mm), adicional a las 2 pulgadas (50 mm)	2 hr más 15 min. por cada pulgada (25 mm), adicional a las 2 pulgadas (50 mm)

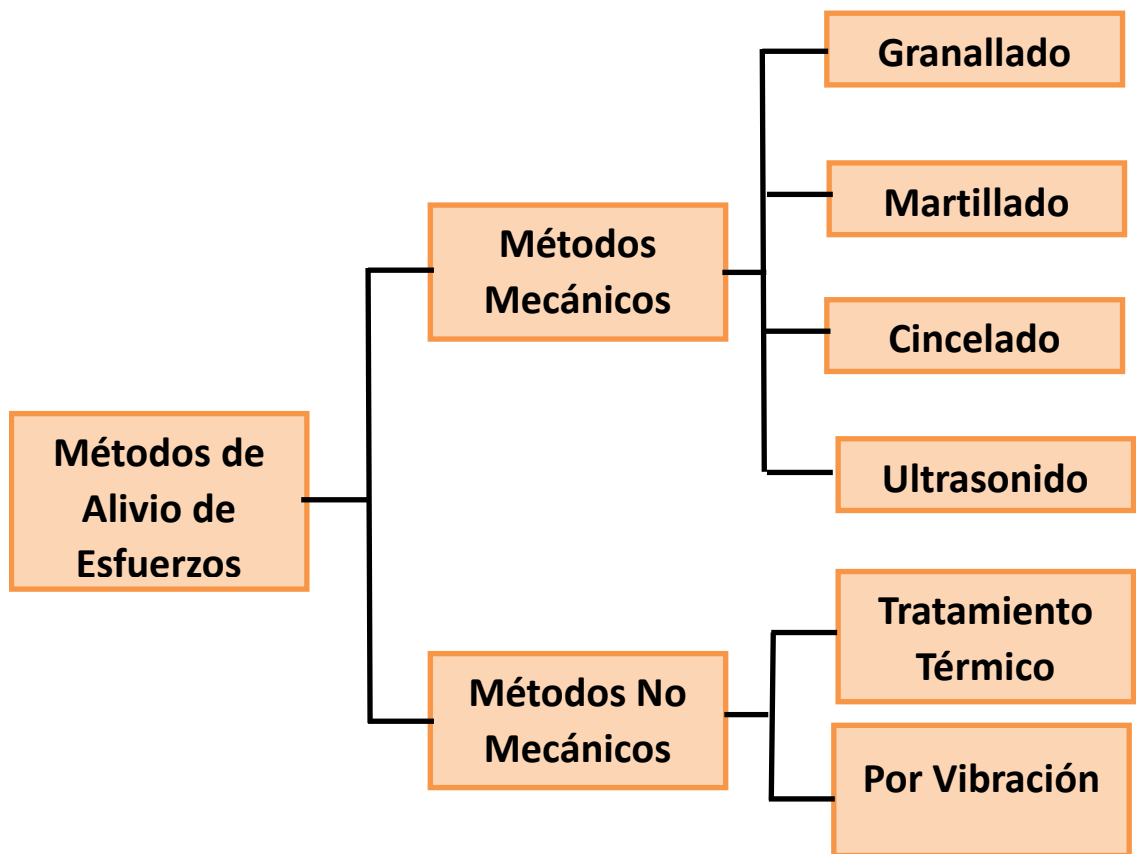
Fuente: ASME, Sección VIII. Estándar para la calificación de soldadores y operadores. p. 108

Los termocoples deben ser colocados en la parte inferior, central y superior o en otras zonas de posible variación de la temperatura, de tal manera de registrar la temperatura real de la pieza.

Cuando dos materiales de diferentes números P son unidos por soldadura, el tratamiento térmico de alivio de esfuerzos debe ser especificado de acuerdo al material que requiera la temperatura más alta. El tratamiento térmico de alivio de esfuerzos debe ser realizado después de cualquier

reparación (Figura 37). Las tensiones residuales pueden llegar a tener valores elevados y perjudiciales por lo que es necesario reducirlas o eliminarlas, existiendo diferentes métodos los cuales se agrupan en dos grandes campos.

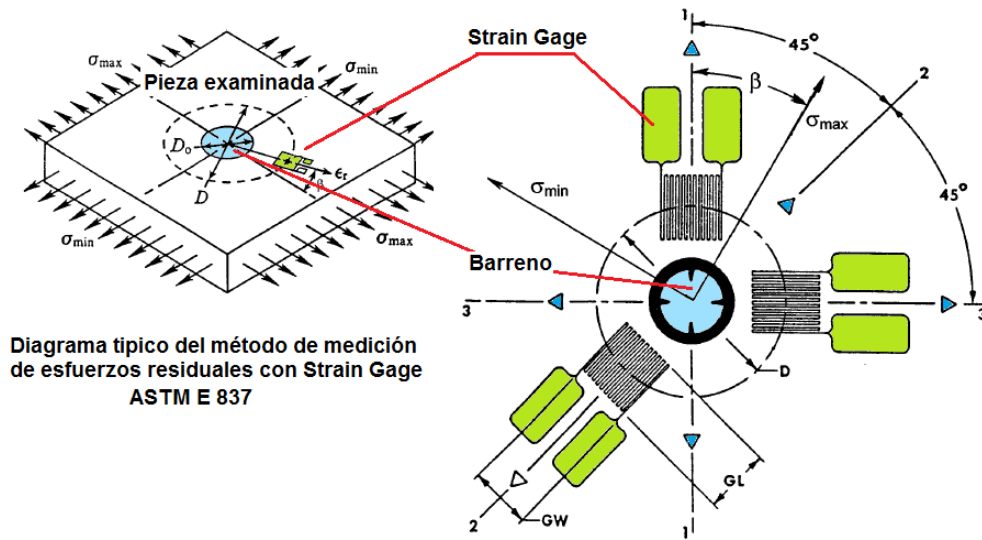
Figura 38. **Métodos de alivio de esfuerzos**



Fuente: elaboración propia.

La especificación ASTM E 387 establece el método para medir los esfuerzos residuales en la superficie del material (Figura 38).

Figura 39. **Medición de esfuerzos residuales en la superficie del material**



Fuente: ASTM E 387. p. 85

2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICABLES A RODETES PELTON

Los ensayos no destructivos son de gran importancia en los rodetes PELTON. Estos se realizan por medio de normas y certificaciones por la Sociedad Americana de Ensayos y los requerimientos establecidos. Se manejan los distintos niveles y sus respectivas calibraciones por medio de personal calificado y especializado en cada uno de estos, a través de la educación requerida. Resaltando los requisitos de examinación visual por medio del ensayo visual con ventajas y limitaciones. Ensayos de partículas magnéticas, verificación de materiales y equipos, métodos de inspección, técnicas de inspección.

2.1. Calificación del inspector en ensayos no destructivos

El documento SNT-TC-1A es la práctica recomendada por la Sociedad Americana de Ensayos No Destructivos “ASNT” para que las empresas por sí mismas puedan calificar y certificar a los inspectores que realizan inspecciones visuales, de líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido y otros ensayos no destructivos. Estas recomendaciones se basan en las horas de entrenamiento, experiencia y nivel de escolaridad del candidato, existiendo tres niveles básicos de calificación.

2.1.1. Nivel I

Individuo calificado para realizar calibraciones específicas del equipo, realizar ensayos específicos y evaluarlos con respecto a criterios específicos de

aceptación o rechazo de acuerdo a instrucciones escritas y de registrar los resultados bajo la supervisión de un Nivel II o III. El nivel I debe recibir las instrucciones necesarias o la supervisión de un Nivel II o III.

2.1.2. Nivel II

Individuo calificado para realizar las calibraciones de los equipos, para interpretar y evaluar los resultados con respecto a códigos, estándares y especificaciones. Debe estar completamente familiarizado con los alcances y limitaciones de los métodos de ensayo en los cuales fue calificado y debe ejercer la responsabilidad asignada para entrenar en el trabajo y guiar la capacitación del Nivel I. El nivel II debe ser capaz de organizar y reportar los resultados de los ensayos.

2.1.3. Nivel III

“Individuo capaz de desarrollar, calificar y aprobar procedimientos, establecer y aprobar técnicas, interpretar códigos, estándares y especificaciones y procedimientos” (Norma SNT-TC- 1ra edición 2006) Calificación y certificación de Personal en Pruebas no destructivas. Debe establecer los métodos y técnicas particulares de ensayos no destructivos a ser usados; debe ser responsable por las operaciones para las cuales fue calificado y asignado; debe ser capaz de interpretar y evaluar los resultados en términos de los códigos, estándares y especificaciones existentes; debe tener suficiente experiencia en materiales, tecnologías de fabricación y producción para establecer las técnicas y aconsejar para establecer los criterios de aceptación, cuando no estén estos disponible de alguna manera. Debe estar completamente familiarizado con otros métodos apropiados, y debe ser capaz

de entrenar y examinar a los niveles I y II en aquellos métodos en los que fue calificado.

2.1.4. Requisitos de educación, entrenamiento y experiencia para la calificación inicial en ensayos no destructivos

Los candidatos para la certificación en END, deben tener suficiente educación, entrenamiento y experiencia para asegurar su calificación en aquellos métodos en los cuales ellos están siendo considerados para su certificación. Educación: El documento ASNT-SNT-TC-1A-2011, no especifica los requisitos de educación para los niveles I y II, solo establece que deben cumplir con el entrenamiento y experiencia indicadas en la tabla 6.3.1, (tabla X). Para un Nivel III, el candidato debe haber cursado al menos cuatro años en algún colegio o universidad, la carrera de ingeniería o ciencias, más un año de experiencia como nivel II, en el método de ensayo, o haber completado al menos dos años los estudios de ingeniería o ciencias en algún colegio o universidad o escuela técnica más dos años de experiencia como nivel II, en el método de ensayo o tener cuatro años de experiencia como nivel II, en el método de ensayo aplicable.

Tabla IX. **Entrenamiento inicial y nivel de experiencia para calificación de END**

ASNT-SNT-TC-1A-2011 - Tabla 6.3.1A Entrenamiento Inicial y Nivel de Experiencia

Método de Ensayo	Nivel	Técnica	Horas de Entrenamiento	Experiencia	
				Mínimo de horas en el Método	Horas totales en END
Visual	I		8	70	130
	II		16	140	270
Líquidos Penetrantes	I		4	70	130
	II		8	140	270
Partículas Magnéticas	I		12	70	130
	II		8	210	400
Ultrasonido	I		40	210	400
	II		40	630	1200

Fuente: ASNT-SNT-TC-1A-2011 p. 50

2.1.5. Requisitos de examinación

- Examen de la vista, agudeza de visión cercana: el examen debe demostrar la agudeza natural o corregida en al menos un ojo, de tal manera que el candidato pueda ser capaz de leer una carta Jaeger No. 2 o equivalente en una distancia no menor a 30.5 cm. La habilidad de percibir un Ortho-Rater de 8 u otro patrón similar es también aceptable. Este examen de agudeza visual debe ser anual.
- Contraste de colores: el examen debe demostrar la habilidad para diferenciar los contrastes de color o sombras de grises usadas en el método. Este examen se debe hacer al inicio de la certificación y en intervalos posteriores de cinco años.
- Examen general: examen concerniente a principios básicos del método aplicable con el mínimo de preguntas indicadas en la tabla 8.3.4 del documento ASNT-SNT-TC-1A-2011

- Examen específico: examen concerniente al manejo del equipo, procedimientos operativos y técnicas de END empleadas en su lugar de trabajo. También debe cubrir los criterios de aceptación de especificaciones o códigos aplicables. El mínimo de preguntas está indicado en la tabla 8.3.4 del documento ASNT-SNT-TC-1A-2011.
- Examen práctico: examen concerniente a demostrar la familiaridad del candidato con su habilidad para operar el equipo, registrar y analizar la información de los resultados del método en particular.
- Calificación mínima aprobatoria: Promedio de los tres exámenes = 80 %, En cada tipo de examen = 70 %
- Expiración: para todos los niveles la certificación tiene un período de validez de cinco años, siempre y cuando se pueda demostrar continuidad no mayor a 6 meses.

2.2. Ensayo visual

2.2.1. Principio básico

Esta inspección es aquella que utiliza la porción visible que utiliza la energía del espectro electromagnético (Figura 39). Las diferentes variaciones en las propiedades de la luz al entrar en contacto con un objeto y estas propiedades pueden detectarse por el ojo humano en forma directa o por un equipo o sistema de inspección visual (remota). El método de detección puede hacerse con el uso de equipos, espejos, baroscopios y otros instrumentos ópticos. Delojo (2011)

2.2.2. Criterio de aceptación

El criterio de aceptación y rechazo establece el tamaño y tipo de discontinuidad aceptable, el espécimen puede ser dividido en zonas para permitir diferentes niveles de aceptación. Para fundiciones se puede usar las recomendaciones de la especificación SSP. Para soldaduras se pueden usar los criterios de AWS D1.1 D1, API 1104, o ASME Sección VIII Div.1

2.2.3. Ventajas

Las principales ventajas de la inspección visual son:

- Casi todo puede, en cierto grado, ser inspeccionado
- Muy bajo costo
- Equipo relativamente simple
- Mínima capacitación
- Amplio alcance en usos y en beneficios

2.2.4. Limitaciones

Las principales limitaciones de la inspección visual son:

- Solamente aplica para superficies
- Se requiere de una muy buena iluminación
- Es necesario el acceso a la superficie a ser examinada

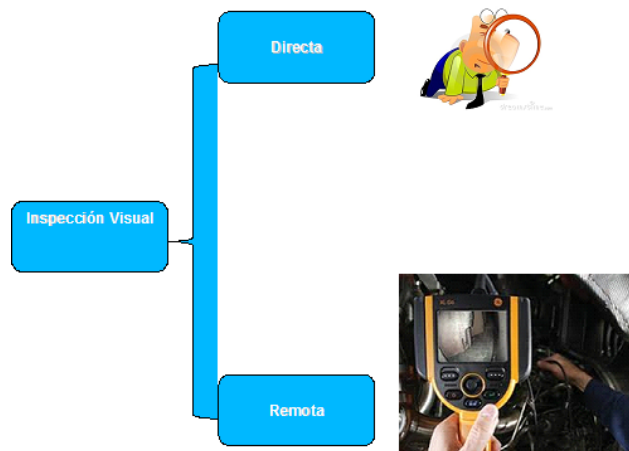
En el código ASME, Sección V, artículo 9, se establecen los requisitos para elaborar el procedimiento de inspección visual mínimo (Tabla XI).

Tabla X. **T-921 Requerimientos para el procedimiento de inspección visual**

Código ASME Sección V Tabla T-921 Requerimientos para el Procedimiento de Inspección Visual		
Requerimiento (según sea aplicable)	Esencial	No Esencial
Cambio en la Técnica usada		
Directa a Traslúcida o viceversa	X	
Directa a Remota	X	
Apoyos para Visual Remota	X	
Requerimientos al desempeño del personal, cuando sea requerido	X	
Decremento en la intensidad de la luz	X	
Configuración a ser examinado y forma de presentación del material base (Tubería, placa, forja, etc.)		X
Equipo de iluminación		X
Métodos o herramientas usadas en la preparación de la superficie		X
Equipo o accesorios usados para la técnica directa		X
Secuencia de examinación		X
Calificaciones del personal		X

Fuente: ASME sección V. p. 36.

Figura 40. **Técnicas empleadas de ensayo visual**



Fuente: elaboración propia.

2.3. Ensayo de líquidos penetrantes

2.3.1. Principios básicos

Esta inspección se define como: Un método de inspección no destructiva diseñada para detectar y exponer discontinuidades superficiales en los materiales. Con este método, la longitud de la discontinuidad puede ser exactamente determinada, pero no así su profundidad.

La inspección depende críticamente de la limpieza de la superficie a ser inspeccionada y de la habilidad del técnico, para cuidar los detalles y asegurar una técnica y observación de las indicaciones de forma adecuada. AEND (2011)

2.3.2. Criterio de aceptación

El criterio de aceptación y rechazo establece el tamaño y tipo de discontinuidad aceptable. El espécimen puede ser dividido en zonas para permitir diferentes niveles de aceptación. Para fundiciones se puede usar las recomendaciones de la especificación CCH 70-3 PT 70-3, para soldaduras se pueden usar los criterios de ASME Sección VIII Div.1 Apéndice 8 o EN ISO 23277.

2.3.3. Ventajas contra otros métodos de inspección superficial

- Bajo costo

- Se aplica para gran variedad de materiales
- No importa la forma o tamaño de los objetos
- Puede aplicarse en condiciones de medio ambiente adversas.
- No requiere de suministro de energía eléctrica
- Equipo sencillo (conjunto de botes a presión)

2.3.4. Limitaciones de la aplicación

- Solo pueden ser detectadas discontinuidades abiertas a la superficie
- Superficies rugosas la hacen difícil de aplicar
- No se puede determinar la profundidad de la discontinuidad
- No es aplicable para materiales porosos

En el código ASME Sección V artículo 6, se establecen los requisitos mínimos para elaborar el procedimiento de inspección con líquidos penetrantes (Tabla XII).

Tabla XI. **Requerimientos del procedimiento de inspección con líquidos penetrantes**

Fuente: ASME Sección V artículo 6. p. 16.

La familia de sustancias para realizar el ensayo de líquidos penetrantes se clasifica en función de la sensibilidad que dan al ensayo en los siete grupos (Tabla XIII).

Tabla XII. **Familias de líquidos penetrantes**

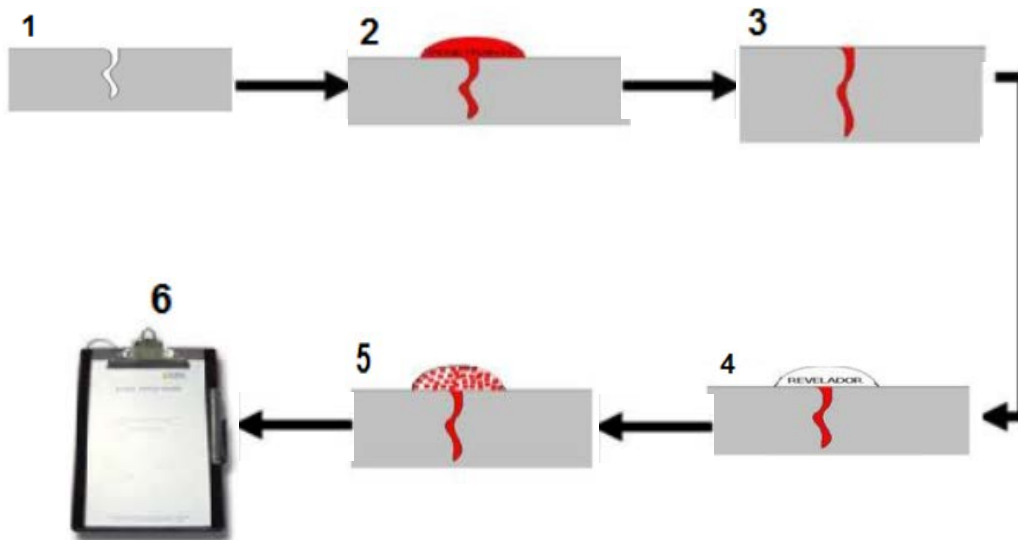
Grupo I	Penetrante con tinte visible removible con solvente (baja sensibilidad)
Grupo II	Penetrante con tinte visible post-emulsificable (baja sensibilidad)
Grupo III	Penetrante con tinte visible lavable con agua (baja sensibilidad)
Grupo IV	Penetrante con tinte fluorescente lavable con agua (baja sensibilidad)
Grupo V	Penetrante con tinte fluorescente post-emulsificable (media sensibilidad)
Grupo VI	Penetrante con tinte fluorescente post-emulsificable (alta sensibilidad)
Grupo VII	Penetrante con tinte fluorescente removible con solvente (la más alta sensibilidad)

Fuente: ASME. Sección V artículo 6, p. 22.

2.3.5. Limitaciones contra otros métodos de inspección superficial

- Preparación, limpieza y secado de la superficie, para eliminar grasa, polvo, óxidos, salpicaduras, etc.
- Aplicación de penetrante y tiempo de penetración (5 minutos mínimo).
- Remoción del exceso de penetrante (crítico: no aplicar directamente el solvente o agua)
- Aplicación del revelador (crítico: evitar espesores gruesos o áreas sin cubrir)
- Inspección de las indicaciones (después de aplicar el revelador el tiempo debe ser entre 10 a 60 minutos para dimensionar las manchas de sangrado)
- Reporte de indicaciones relevantes (Figura 40)

Figura 41. Procedimiento de aplicación de ensayos no destructivos



Fuente: elaboración propia.

2.4. Ensayo de partículas magnéticas

2.4.1. Principios básicos

Este método se basa en la inspección por partículas magnéticas cuyo principio es el "Magnetismo", (fuerza invisible de atracción y repulsión de materiales magnetizables) (Figura 41). Este método de inspección es un ensayo no destructivo que se emplea para detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales que pueden ser magnetizables. AEND (2009).

2.4.1.1. Materiales ferromagnéticos (ferrosos)

Cuentan con una facilidad para magnetizarse mucho mayor que el aire (permeabilidad arriba de 100) y pueden ser fácilmente magnetizables, algunos ejemplos son: acero, níquel, cobalto y sus aleaciones.

2.4.1.2. Materiales no magnéticos (No ferrosos y diamagnéticos)

Cuentan con una facilidad para magnetizarse ligeramente mayor que el aire (permeabilidad de 1), por lo que pueden ser magnetizados fuertemente, algunos ejemplos son: Aluminio, Magnesio, Platino, Litio, Cromo, Molibdeno, Estaño y algunos aceros inoxidable. Los materiales que tienen permeabilidad menor al aire son llamados diamagnéticos y son repelidos por el campo magnético, por lo que no pueden ser magnetizados, algunos ejemplos son: oro, plata, zinc, bismuto y otros.

2.4.2. Ventajas

Sus principales ventajas son:

- De bajo costo e inspección rápida.
- Equipo relativamente sencillo y portátil.
- Se requiere menor limpieza de la parte que para los líquidos penetrantes.
- Se pueden detectar discontinuidades no abiertas a la superficie.
- No requiere de lecturas electrónicas, mantenimientos o calibraciones excesivas.

2.4.3. Limitaciones

Las limitaciones del método por partículas magnéticas son:

- Aplica solo para materiales ferromagnéticos.
- Generalmente, se requiere de suministro de corriente eléctrica.

- No se pueden detectar discontinuidades ubicadas a grandes profundidades.
- La rugosidad de la superficie puede afectar el resultado.
- Generalmente se requiere desmagnetizar después de la inspección.
- Se pueden generar quemaduras en la superficie (Técnica de puntas de contacto).
- Capas de pintura o algún recubrimiento no magnético afectan la sensibilidad.

En el código ASME Sección V artículo 7, se establecen los requisitos para elaborar el procedimiento mínimo de inspección con líquidos penetrantes (Tabla XIV).

Tabla XIII. **Requerimientos del procedimiento de inspección con partículas magnéticas**

Código ASME Sección V Tabla T-721		
Requerimientos del Procedimiento de Inspección con Partículas Magnéticas		
Requerimiento	Esencial	No Esencial
Técnica de magnetización		
Tipo de corriente de magnetización o rango de amperaje de salida especificado en este artículo o como fue previamente calificado	X	
Preparación de la superficie	X	
Método de aplicación de la partícula	X	
Método de remoción del exceso de partículas	X	
Mínimo de la intensidad de iluminación	X	
Espesor de pintura mayor al demostrado	X	
Mejora del contraste de la superficie no magnética, cuando sea aplicable	X	
Demostración del desempeño, cuando sea requerido	X	
Temperatura de la superficie de la parte a ser examinada fuera de los rangos recomendados por el fabricante de las partículas o como fue previamente calificado	X	
Forma o tamaño del objeto a ser examinado		X
Equipamiento del mismo tipo		X
Temperatura (dentro de lo especificado por el fabricante o como fue previamente calificado)		X
Técnica de desmagnetización		X
Técnica de limpieza después de la examinación		X
Requerimientos de calificación del personal		X

Fuente: ASME. Sección V artículo 7. p. 8.

Figura 42. Técnicas de magnetización



Fuente: elaboración propia.

2.4.4. Procedimiento de aplicación

- Preparación, limpieza y secado de la superficie, para eliminar grasa, polvo, óxidos, salpicaduras, entre otros.
- Aplicación de material magnetizable ya sea partícula seca o partícula húmeda fluorescente (Figura 42).
- Aplicación de campo magnético para detectar la discontinuidad.

Figura 43. Tipos de partículas magnéticas



Partícula seca



Partícula húmeda fluorescente

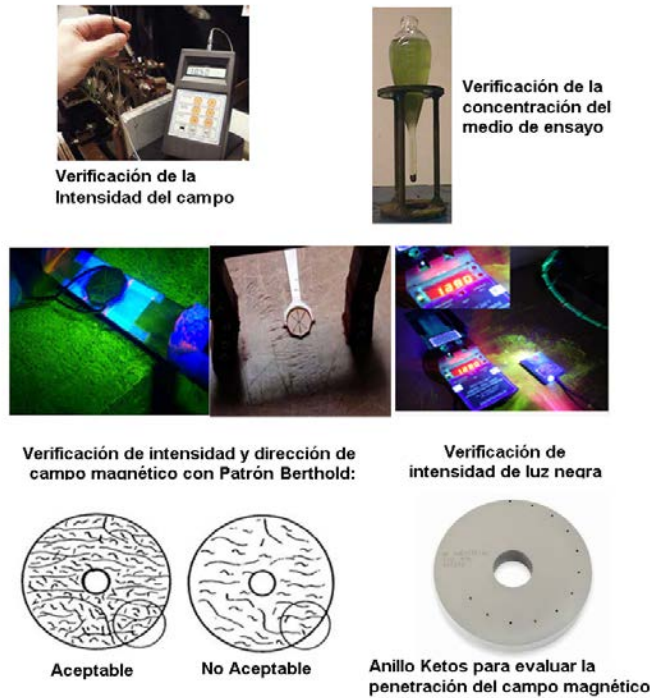
Fuente: elaboración propia.

2.4.5. Verificación de materiales y equipos

Para garantizar una aplicación correcta del método, se hace necesaria una verificación de los equipos usados (Figura 43), así como del material empleado, considerando los siguientes aspectos:

- Intensidad del campo magnético (30 a 60 gauss)
- Intensidad de lámpara de luz ultravioleta (1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ a una distancia de 15")
- Concentración de las partículas para vía húmeda (los rangos aceptables son 0.1 a 0.4 ml para partículas fluorescentes y 1.2 a 2.4 ml para partículas visibles).

Figura 44. **Verificación de los equipos y material empleado con partículas magnéticas**



Fuente: ASME. Sección VIII División 1. p. 85.

2.4.6. Criterio de aceptación

El criterio de aceptación y rechazo establece el tamaño y tipo de discontinuidad aceptable, el espécimen puede ser dividido en zonas para permitir diferentes niveles de aceptación. Para fundiciones se puede usar las recomendaciones de la especificación CCH 70-3 MT 70-3; para soldaduras se pueden usar los criterios de ASME Sección VIII Div.1 Apéndice 6 o EN ISO 23278.

2.5. Ensayo de ultrasonido

2.5.1. Principios básicos

Todos los materiales presentan diferentes “impedancias acústicas”. La impedancia acústica (Z) Es la resistencia que oponen los materiales a la propagación del sonido (Tabla XIII). Y está dada por el producto de su densidad (ρ) y la velocidad acústica (V), del tipo de onda en el material. AEND (2009)

$$Z = \rho V$$

$$Z = \text{gramos/cm}^2\text{-segundo}$$

$$\rho = \text{gramos/cm}^3$$

$$V = \text{cm/segundo}$$

En la inspección de ultrasonido el método básico es, en donde una onda ultrasónica se transmite y se propaga dentro de una pieza, hasta que esta onda es reflejada y regresa al receptor, con lo cual se obtiene información del recorrido, tomando como base la energía reflejada y la distancia que recorre (es acá donde se determina la ubicación y el tamaño de la discontinuidad). En la tabla siguiente, se dan los valores de las velocidades de sonido, tanto para ondas longitudinales (a) transversales, (b) superficies, (c) para algunos aceros, así como su densidad e impedancia acústica.

Tabla XIV. **Verificación de los equipos y material empleado con partículas magnéticas**

Material	Densidad σ	Velocidad del Sonido 10^5 (cm/s)			Impedancia acústica Z
	(g/cm ³)	V _l (a)	V _t (b)	V _s (b)	10 ⁶ (g/cm ² xsegundo)
Acero al carbón, aleado	7.85	5.94	3.24	3.0	4.66
Fundiciones gris	6.95 a 7.35	3.5 a 5.6	2.2 a 3.2	2.4 a 4.0
Acero Inoxidable 302	7.9	5.66	3.12	2.8	4.47
Acero Inoxidable 304L	7.9	5.64	3.07	2.7	4.46
Acero Inoxidable 347	7.91	5.74	3.1	2.8	4.54
Acero Inoxidable 410	7.67	5.39	2.99	2.16	4.13
Acero Inoxidable 430	7.7	6.01	3.36	3.02	4.63

Fuente: ASME. Sección VIII División 1. p. 90

2.5.2. Aplicaciones

La inspección por ultrasonido se utiliza para determinar la calidad, el control e inspección de materiales en la industria. Las aplicaciones más importantes son:

- Caracterización y determinación de discontinuidades.
- Conocer el grado de corrosión y medir espesores.
- Evaluar las diferentes variables internas en el material.
- Definir características de enlaces (uniones de moléculas).

2.5.3. Ventajas

Las principales ventajas del método de inspección por ultrasonido son:

- Inspección de grandes espesores.
- Detección de discontinuidades extremadamente pequeñas.

- Gran exactitud al determinar la posición, tamaño, orientación y forma de las discontinuidades.
- Se requiere de una sola superficie de acceso.
- La interpretación de resultados es inmediata.
- Equipos sin peligros o riesgos de operación.
- Equipos portátiles.
- La inspección no afecta en operaciones posteriores.
- La capacidad de algunos equipos permite el almacenamiento de la información, la cual puede ser procesada digitalmente para caracterizarla en cualquier momento.

2.5.4. Limitaciones

Las limitaciones del método de inspección por ultrasonido incluyen las siguientes:

- Se requiere de técnicos experimentados y con fuertes conocimiento en los procedimientos de inspección.
- La inspección es difícil para partes muy rugosas, irregulares, muy delgadas o pequeñas.
- Se necesita poseer un material acoplador.
- Es necesario conocer patrones de referencia con discontinuidades parecidas o conocidas.

2.5.5. Criterios de aceptación

El criterio de aceptación y rechazo establece el tamaño y tipo de discontinuidad aceptable, el espécimen puede ser dividido en zonas para permitir diferentes niveles de aceptación. Para fundiciones se puede usar las recomendaciones de la especificación CCH 70-3 UT 70-3, para soldaduras se pueden usar los criterios de ASME Sección VIII Div.1 Apéndice 12 o EN ISO 23279

2.5.6. Equipo

Es necesario contar con un sistema de inspección de ultrasonido o ultrasónico (Figura 44), el cual tiene como componentes básicos:

- Generador de la señal eléctrica.
- Conductor de la señal eléctrica (cable coaxial).
- Transductor que convierte la señal eléctrica en mecánica y/o viceversa.
- Material acoplante para transferir la energía acústica a la pieza y viceversa.
- Patrón de calibración.

Figura 45. **Equipo de ultrasonido**



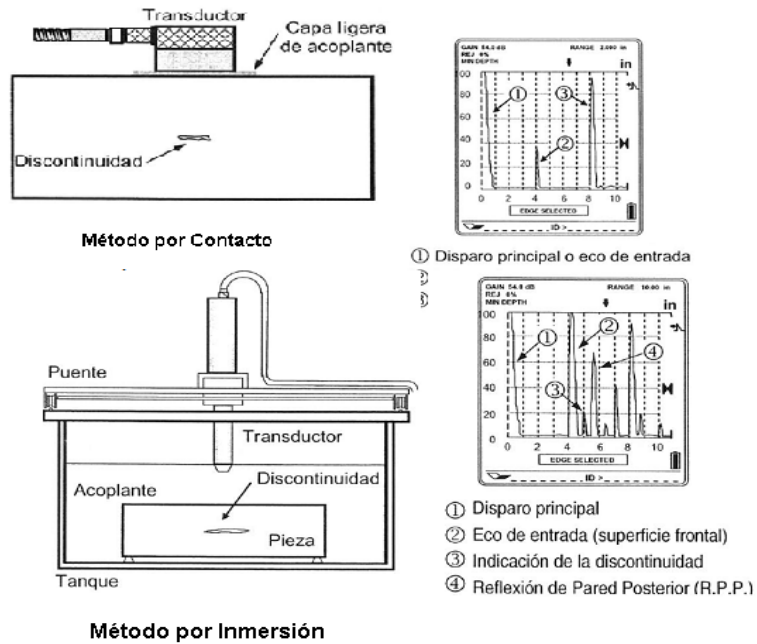
Fuente: elaboración propia.

2.5.7. **Métodos de inspección**

Existen básicamente dos tipos de inspección (Figura 45):

- Contacto
- Inmersión

Figura 46. **Equipo de ultrasonido**



Fuente: ASME. Sección VIII Div.1 Apéndice 12. p. 4.

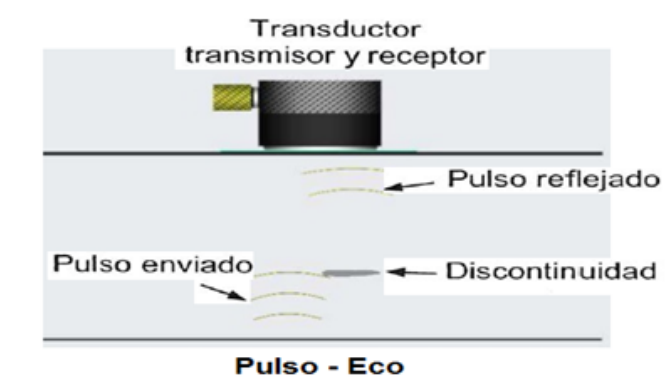
2.5.8. Técnicas de inspección

En general para la inspección de materiales en el campo industrial, se usan alguna de las siguientes técnicas existentes hoy en día.

2.5.8.1. Pulso eco

Se usa un solo transductor que envía y recibe el pulso (Figura 46).

Figura 47. **Pulso eco**

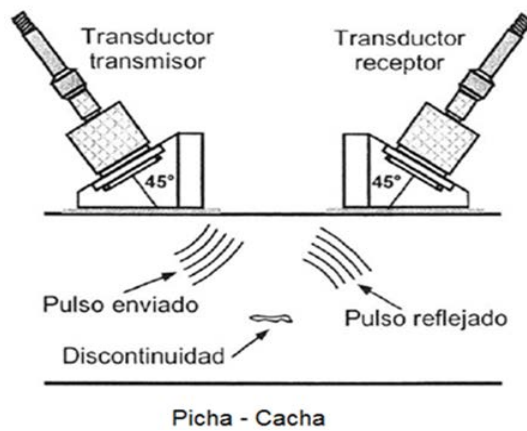


Fuente: Fuente: ASME. Sección VIII Div.1 Apéndice 12. p.5.

2.5.8.2. Picha y cacha

Se usan dos transductores, uno envía y el otro recibe el pulso, ambos en la misma superficie (Figura 47).

Figura 48. **Picha y cacha**

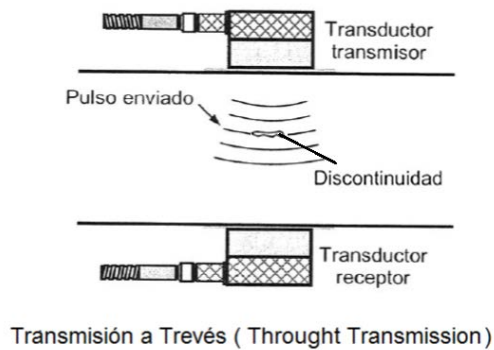


Fuente: ASME. Sección VIII Div.1 Apéndice 12. p.7.

2.5.8.3. Transmisión a través (*through transmission*)

También se usan dos transductores, uno envía y el otro recibe el pulso, solo que en este caso se encuentran localizados en superficies opuestas. Con esta técnica la alineación de los transductores es crítica (Figura 48).

Figura 49. Transmisión a través

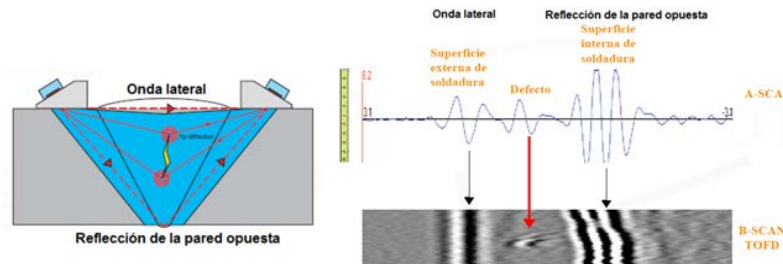


Fuente: ASME. Sección VIII Div.1 Apéndice 12. p.9.

2.5.8.4. TOFD (*Time of flight diffraction*)

Es una técnica automatizada para inspección de soldaduras, muy utilizada mundialmente en el sector petroquímico, minero y nuclear. Esta técnica posee dos zonas muertas, por lo que el ensayo debe combinarse con técnicas convencionales (Figura 49).

Figura 50. TOFD

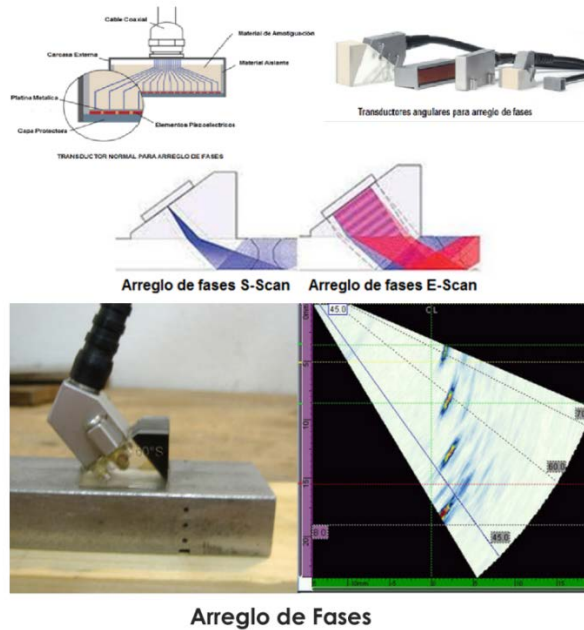


Fuente: ASME. Sección VIII Div.1 Apéndice 12. p.11.

2.5.8.5. Arreglo de fases

El ultrasonido con arreglo de fases es una técnica de inspección computarizada de última generación que deja registro y tiene alta probabilidad de detección. Los principios físicos de funcionamiento son similares al ultrasonido convencional pulso eco, con la diferencia que se puede controlar mediante software: parámetros como ángulo de refracción, punto de salida del haz, enfoque en una zona determinada, etc. Este transductor puede tener un patrón programado y contienen una serie de elementos (de 16 a 256). Pueden ser cuadrados, redondos, rectangulares y sus frecuencias de operación se encuentran entre 1 a 10 MHz (Figura 50).

Figura 51. Arreglo de fases

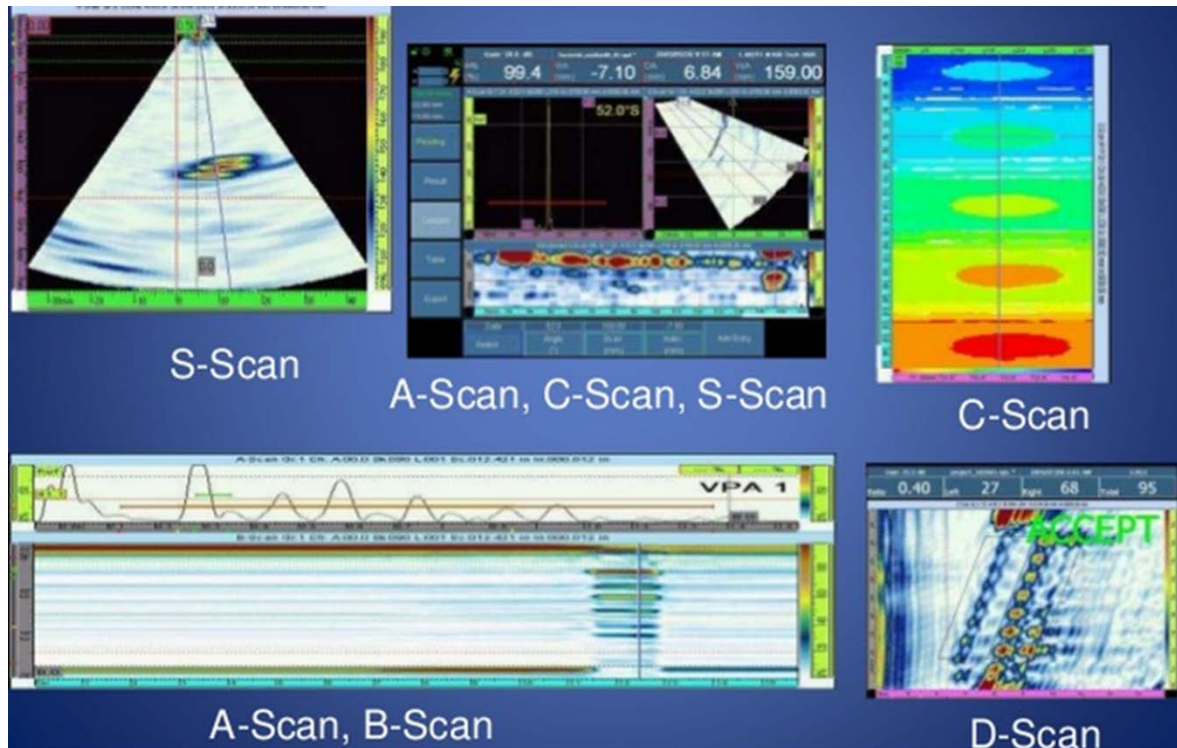


Fuente: ASME. Sección VIII Div.1 Apéndice 12. p.15.

2.5.9. Tipos de presentación ensayos de ultrasonido

La información puede ser presentada en cualquiera de las siguientes maneras (Figura 51):

Figura 52. Presentación de ultrasonido



Fuente: ASME. Sección VIII Div.1 Apéndice 12. p.19.

2.6. Ensayo de Rayos X

La radiografía es un método de ensayo no destructivo que se basa en el principio de transmisión de radiación o absorción, su principio es que la radiación que pasa a través de un objeto formará una imagen contrastada sobre la película receptora de radiación. Para el estudio y alcance de esta investigación por tratarse de una reparación en sitio, este ensayo no es aplicable a la reparación de rodets Pelton. AEND (2009).

3. PRINCIPALES RIESGOS DERIVADOS DE LA REPARACIÓN INADECUADA DE RODETES PELTON

Cada proceso de reparación conlleva un riesgo en los rodets. Por eso es necesario seguir las especificaciones técnicas para las máquinas hidráulicas y sus reparaciones. Porque de estas puede surgir deformación, por la presión del agua al colisionar con los rodets. Por ello es importante cumplir con los ensayos establecidos y rigurosos, así como la limpieza adecuada luego de una soldadura en una zona de trabajo de un rodete. Estos aspectos por resaltar algunos son de gran importancia y en cada etapa se debe asegurar un mantenimiento óptimo y de calidad, para garantizar el funcionamiento de la turbina y cada una de sus partes mecánicas.

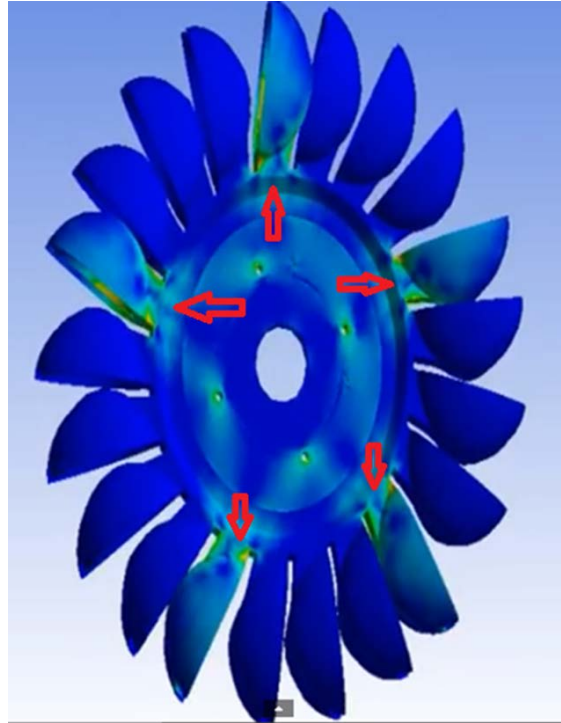
3.1. Zonas de riesgos

En la especificación para maquinas hidráulicas CCH 70-3 se señalan las zonas de ensayo y los criterios de aceptación para rodets Pelton.

3.2. Consecuencias de reparaciones inadecuadas

En un rodete Pelton con dos toberas, se puede apreciar en las zonas de la raíz de los cangilones, la deformación sufrida por la presión del chorro de agua al chocar (Figura 76).

Figura 53. **Zonas de deformación de rodete Pelton**



Fuente: elaboración propia.

La excavación de una fisura en la zona de raíz de un cangilón, véase figura 77, la cual no fue eliminada por completo (ver mancha roja del sangrado del ensayo de líquidos penetrantes al fondo de la excavación), daño debido al aumento de dureza de la raíz del cangilón.

Figura 54. Zonas de deformación de rodete Pelton



Fuente: elaboración propia.

Parte de la boca de un cangilón fue desprendida, debido a una deficiente remoción de una fisura durante su reparación por soldadura y zonas con manchas de escoria atrapada, debido a una deficiente limpieza del aporte de soldadura (Figura 78).

Figura 55. Desprendimiento de cangilón



Fuente: elaboración propia.

Diferentes tipos de daños, sufridos durante la operación del rodete, causados por fallas en el material del rodete o deficiencias en los procesos de reparación (Figuras 79 y 80).

Figura 56. **Daños por operación de rodetes**



Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Daños por operación de rodetes**



Fuente: Rodete desmontado 01.02.2016 Planta Aguacapa.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo es de gran importancia, porque es la razón de esta implementación y reparación de los rodets Pelton en la hidroeléctrica Aguacapa. Se dan a conocer los procedimientos de inspección para determinar las condiciones de los rodets, indicando como el desgaste del metal ocurre con el tiempo y las horas de uso o vida útil de los mismos, destacando las partes que conforman un cangilón y sus regiones con sus respectivas plantillas, así como la generación de un registro que documente los datos más importantes de las reparaciones hechas en dicho mecanismo.

Se presentan además procedimientos para la aplicación de la soldadura en los rodets, su limpieza, rectificación, pulido de unión, inspección final y criterios de aceptación para los ensayos no destructivos.

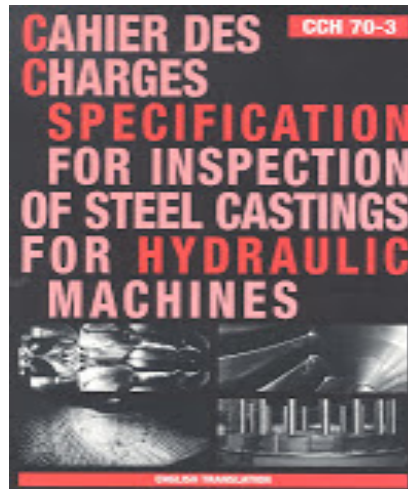
Finalmente se define el plan de mantenimiento indicando monitoreos de condición y frecuencias de reparación.

A continuación se detallan cada uno de estos resultados

4.1. Formato de Inspección de rodets Pelton

Las inspecciones de condición se realizaron según las especificaciones para maquinas hidráulicas CCH 70-3 (Figura 57) que señala las zonas de ensayo y los criterios de aceptación para rodets Pelton.

Figura 58. Norma CCH70-3



Fuente: CCH 70-3. Especificación para la inspección de piezas de fundición de acero de máquinas hidráulicas. Edición 3, junio 2006.

Basado en condiciones de los rodets Pelton, según el registro y seguimiento de ensayos no destructivos aplicables (partículas magnéticas, líquidos penetrantes y ultrasonido) (Figura 58) realizados cada seis meses, con mediciones de plantillas del fabricante y registros de desgaste a los rodets instalados en las unidades generadoras, se determina el desgaste provocado en cada uno.

Figura 59. **Resultado de ensayos no destructivos a rodetes Pelton de Planta Aguacapa**

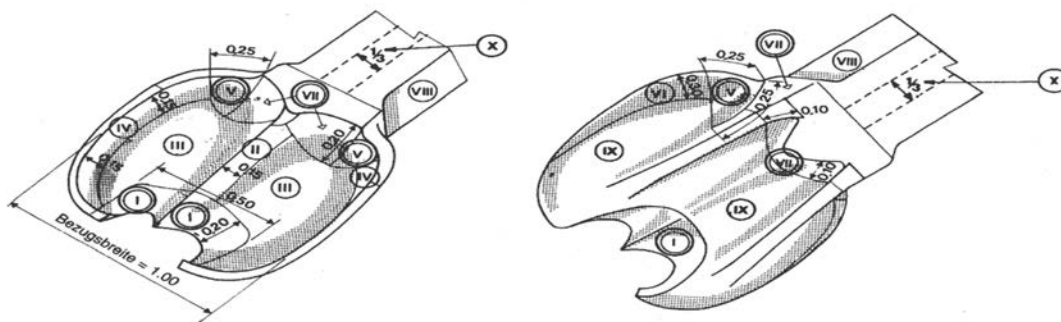


Fuente: informe de ensayos no destructivos Unidad #3 19.10.2015 Planta Aguacapa.

El desgaste en los cangilones del rodete Pelton varía en relación al tiempo de operación y uso, la frecuencia de revisión e inspección de cada rodete está recomendada a cada 4,000 horas de operación, tiempo suficiente para identificar posibles daños y desgaste en las partes del cangilón, según el Manual de Turbina Regulador, (1978, pág. 19), la frecuencia de cambio de los rodetes tipo Pelton es de aproximadamente cada 7 años, Manual de Turbina Regulador, (1978, pág. 21), tiempo en el que se detiene el proceso de generación aproximadamente quince días, considerando que se han tenido pérdidas de aproximadamente un 25 % y 30 % de perfiles de los rodetes Pelton, debido al daño provocado por erosión, impacto, fatiga, cavitación y corrosión-fatiga.

En la especificación para máquinas hidráulicas CCH 70-3 se señalan las zonas de ensayo dentro de las cuales se encuentran las partes del cangilón. Sus partes principales son: raíz, punta, escote, cuello y cresta (Figura 59).

Figura 60. Partes del cangilón



- | | | | |
|------------------------|------------------------|-----------------------|------------|
| I. Escote | II. Cresta | III. Cangilón Interno | |
| IV. Laterales cangilón | v. Lado final cangilón | VII. Cuello | VIII. Raíz |

Fuente: elaboración propia.

Para cada región y sus partes identificadas, se define un tipo de plantilla con lo que se determinará el desgaste provocado en los intervalos de operación de 4,000 horas. A la fecha, las inspecciones se realizan cada seis meses considerando bajos caudales para generación hidroeléctrica y disponibilidad por parte del Administrador del Mercado Mayorista, quien regula la compraventa de energía. En cada inspección semestral se determinan los daños y desgastes que tienen los veinte (20) cangilones de los rodets Pelton y se le realizan

ensayos no destructivos y medición de pérdida de perfiles con las plantillas. (Figura 60).

Figura 61. **Plantillas de desgaste de cangilón de rodete Pelton**



Fuente: elaboración propia.

Los resultados que reflejan los ensayos no destructivos determinan los daños superficiales y subsuperficiales que posee el rodete Pelton, que van desde poros, granos, cavitación, corrosión, fisuras y en el peor de los casos fracturas o desprendimiento de material (Figura 61).

Figura 62. **Fisuras y desgaste en cangilón 16 en rodete Pelton de Planta Aguacapa**



Fuente: elaboración propia.

El seguimiento correspondiente debe de realizarse llevando un registro y datos de cada cangilón y de cada rodete (Figura 62), debidamente identificados por su numeración y su código o registro respectivamente. A partir del año dos mil trece se tiene un registro de los ensayos no destructivos realizados a los rodetes operando, en los cuales basados en la especificación para máquinas hidráulicas CCH 70-3, indica las partes a inspeccionar; sin embargo, no se tiene definido un formato de inspección para generar y documentar el desgaste que puede darse en los rodetes derivado de la cavitación, fatiga, erosión y/o abrasión que posee el agua, para generar un registro que se documente de la siguiente manera:

- Identificación del rodete
- Ciclo de operación
- Condición estructural (resultados de los END) y medición de plantillas
- Calificación procesos de soldadura
- Calificación de los soldadores
- Calificación de los inspectores
- Certificados de material base y materiales de aporte utilizados
- Mapeo de reparaciones
- Tratamientos térmicos
- Esfuerzos residuales
- Balanceo

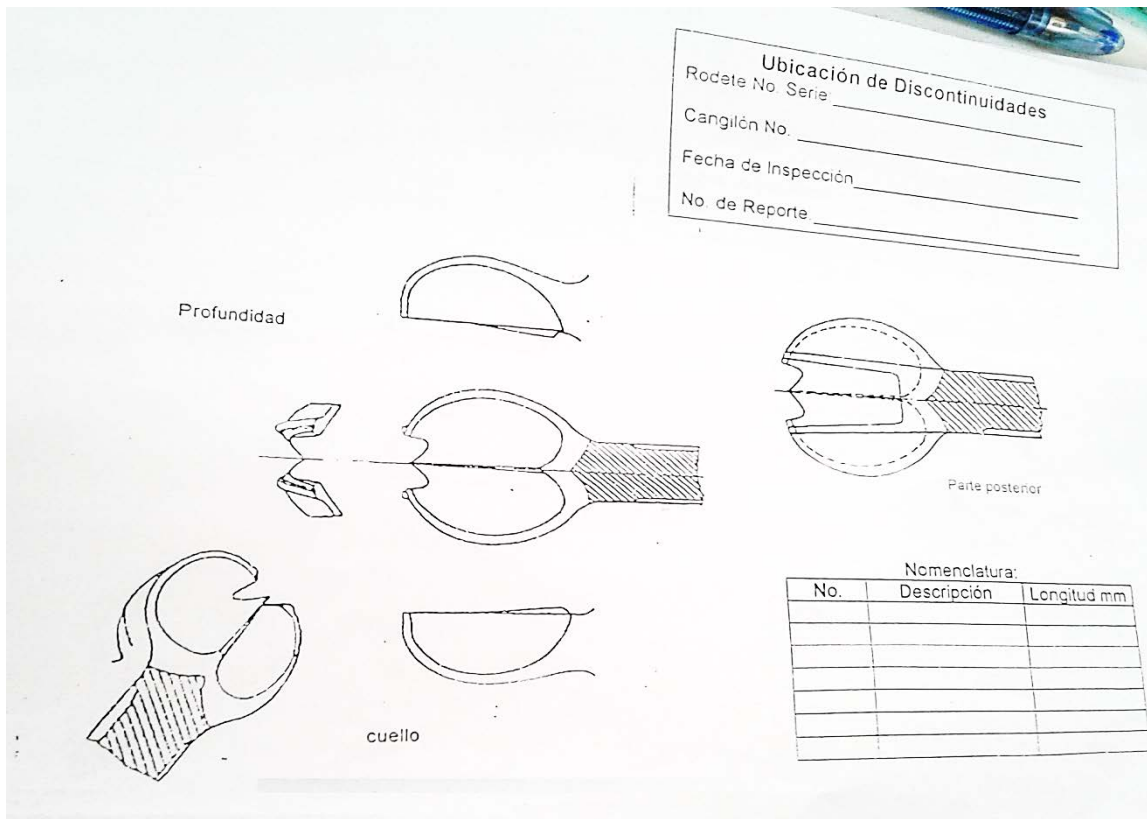
Figura 63. **Identificación del rodete Pelton de Planta Aguacapa 69592-I010171851**



Fuente: elaboración propia.

Considerando los datos tomados a en las hojas de revisión y seguimiento de los rodets utilizadas del año 2013 al 2015 (Figura 63).


Figura 64. Formato de revisión y seguimiento de rodets utilizado del año 2013 al 2015



Fuente: elaboración propia.

Se define y estandariza el nuevo formato de inspección, revisión y daños del rodete Pelton de la siguiente manera (Figura 64).

Figura 65. Nuevo formato de Inspección, revisión y seguimiento de rodetes Pelton



INDE - EGEE
PLANTA HIDROELECTRICA AGUACAPA

(clave ISO)
(revisión ISO)


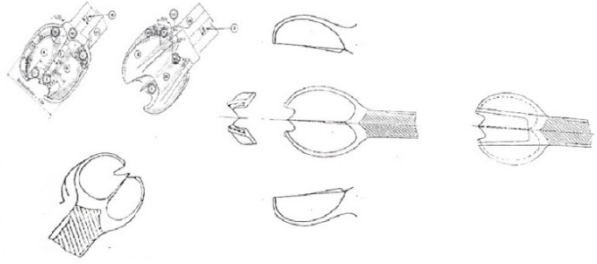
Folio: C12001416AGU
del _____ al _____

Generó: _____
Revisó: _____
Autorizó: _____
Responsable: DANIEL FIGUEROA
Generó: _____

Fecha y hora de recepción : _____
Fecha y hora de devolución : _____
Duración aproximada: _____

Inspección de Rodete Pelton **Codigo de Identificación:** _____

Ciclo de operación: _____
Condición estructural (resultados de los END): _____
Calificación procesos de soldadura: _____
Calificación del soldador: _____
Calificación del inspector: _____
Certificados de material base y materiales de aporte utilizados: _____
Mapeo de reparaciones: _____
Tratamientos térmicos: _____
Esfuerzos residuales: _____
Balanceo: _____

Nomenclatura			
Cargión	Descripción de falla	Ubicación de la falla	Longitud
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Febrero 28, 201 01:34 pm

Página 1 de _____

(clave ISO) (revisión ISO)

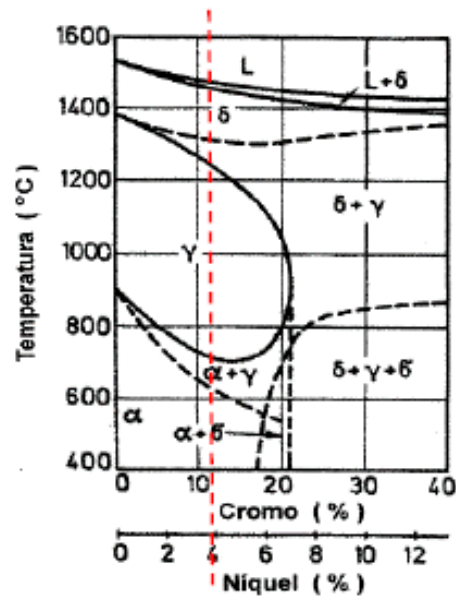
Fuente: elaboración propia.

El documento de la figura 64 servirá de base para la inspección y revisión de los efectos producidos por el impacto del agua en el cuerpo del rodete y la deformación sufrida por la presión del chorro de agua al chocar.

4.2. Instrucciones para aplicación de soldadura GTAW para rodetes Pelton

Basados en la información de la inspección y revisión, se define el proceso de reparación por soldadura considerando la evidencia o pérdida de perfiles en el rodete Pelton, tomando en cuenta que el proceso de reparación se realizará con soldadura semiautomática GTAW (TIG). Para ello es necesario hacer lo indicado en la norma ASTM A743, Section S12, donde indica la composición del material de aporte. Para el caso particular de los rodetes de Aguacapa, se utilizó la varilla de aporte UTPE 410-NIMO-15, para una aleación de cromo, níquel y hierro G-X 5 Cr Ni 13-4 con Cr= 12-13.5%; Ni= 3.5-5% (CA6NM). Según la ASTM, el acero inoxidable CA6NM es una aleación de la categoría martensítica de bajo carbono, designación que aporta información inicial sobre su composición química: C: Indica que es una aleación resistente a la corrosión a temperaturas inferiores a 650 °C; A: Indica la relación entre los contenidos de Cr y Ni, el número 6 indica el porcentaje máximo de carbono multiplicado por 100 y la presencia de otros elementos como el níquel y molibdeno determinado por las últimas letras.

Figura 66. Diagrama de fases del acero inoxidable martensítico CA6NM



Fuente: Santos, A.. Desenvolvimento de procedimento de reparo por soldagem em aços inoxidáveis martensíticos, com metal de adição similar sem TTP. 2000, pág. 13.

Los pasos por seguir para el procedimiento de soldadura son los siguientes:

4.2.1. Limpieza

Se debe limpiar el área de aporte con solvente para asegurar que agentes externos no provoquen daños o imperfecciones no deseadas.

4.2.2. Rectificación de los daños considerables que se encuentren fuera de norma CCH 70-3

Se realizará con fresas de desgaste (Figura 66), con la finalidad de homogenizar el área de contacto (Figura 67) y eliminar oxido-corrosión que pueda existir en el defecto del material base (Figura 68).

Figura 67. **Fresas de desgaste para rectificado de material**



Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Proceso de fresado y homogeneizado de superficie del rodete Pelton**



Fuente: elaboración propia.

Figura 69. **Preparación de daño previo a soldadura**



Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Precaentamiento

Como se ha mencionado, en los tratamientos térmicos se debe realizar un precaentamiento para eliminar tensiones residuales, y no provocar cambios en la microestructura del material base del rodete. La norma establece que se debe realizar un precaentamiento a 350 grados centígrados [UCS-56-1 a UCS-56-11 y Tablas UHA-32-1 a UHA-32-6 y en UNF-56, del código ASME Sección VIII División 1] para preparar la microestructura del material base y que se pueda adherir correctamente el material de aporte, el precaentamiento se realiza con una antorcha y gas propano (Figura 64). Según Schoefer E. (Steel

Founders Society of America, 2004 pág. 16), la aleación CA6NM normalmente puede ser precalentada en el intervalo de 100-350 °C para soldaduras en secciones sometidas a grandes esfuerzos.

Figura 70. **Pre calentamiento**



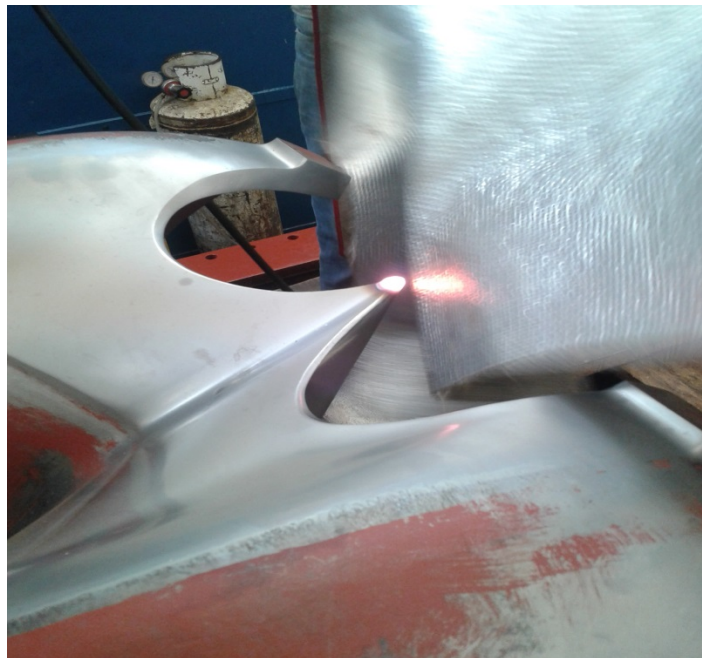
Fuente: elaboración propia.

La soldadura del acero martensítico CA6-NM requiere el control de la temperatura, cuyo valor debe estar por debajo de la temperatura de transformación martensítica (M_s), para asegurar que el cordón de soldadura transforme a martensita antes que el siguiente cordón sea depositado permitiendo el efecto de revenido.

4.2.4. Aplicación de soldadura

Una vez que el cangilón se encuentre a la temperatura de precalentamiento, se puede empezar a soldar. Los cordones que se realicen deben ser aplicados en forma continua y bien juntos entre sí, teniendo especial cuidado que la temperatura intermedia no sobrepase la exigida (350 °C); de allí la importancia de vigilar la temperatura de precalentamiento. El proceso de soldadura se realiza de forma continua en cada cavidad hasta rellenarla completamente y en algunas zonas cercanas, para aprovechar el precalentamiento aplicado (Figura 69). La posición del electrodo debe ser perpendicular a la superficie, con el fin de darle facilidad de movimiento a la mano para poder efectuar cordones continuos (Figura 71).

Figura 71. **Cordón de soldadura**



Fuente: elaboración propia.

Figura 72. **Aplicación de soldadura**



Fuente: elaboración propia.

4.2.5. Tiempo de permanencia

El tiempo de permanencia, como lo indica la Tabla XX: Tabla UHA-32-1 Requerimiento para los tratamientos térmicos postsoldadura, para aceros altamente aleados, dependerá del tamaño en pulgadas o milímetros del área de trabajo. Para el caso que se muestra es de 1.5 mm. Este tiempo de permanencia de temperatura es de 20 minutos, en el cual se tendrá que utilizar una manta refractaria para mantener esa temperatura por los 20 minutos y luego se dé un enfriamiento natural (Figuras 72 y 73).

Figura 73. **Manta refractaria**



Fuente: elaboración propia.

Figura 74. **Colocación de manta refractaria para cumplir con el tiempo de permanencia**



Fuente: elaboración propia.

4.2.6. Maquinado de unión aleada (soldadura material base)

Luego que se ha adherido correctamente el material sin defectos internos en la soldadura (unión aleada) (Figura 74), se realiza el maquinado del sobrematerial utilizando amoladoras y fresas (Figura 75) realizando un maquinado manual utilizando plantillas para devolverle el perfil original al rodete.

Figura 75. Unión aleada



Fuente: elaboración propia.

Figura 76. Maquinado de unión aleada



Fuente: elaboración propia.

4.2.7. Pulido de unión aleada y revisión final

Luego de corroborar que los perfiles se encuentran con sus dimensiones establecidas por el plano y plantillas (Figura 60), se realiza un pulido para eliminar defectos menores y asegurar una adecuada finalización al proceso de reparación (Figura 75).

Figura 77. **Pulido de unión aleada**



Fuente: elaboración propia.

Figura 78. **Revisión de perfiles con plantillas**



Fuente: elaboración propia.

4.2.8. Inspección y criterios de aceptación con ensayos no destructivos para la soldadura aplicada

Luego de corroborar perfiles y haber corroborado que se encuentra un perfil adecuado se realizan los ensayos no destructivos de líquidos penetrantes (Figura 78), partículas magnéticas (Figura 79), ultrasonido (Figura 80) a la soldadura y cangilones del rodete, para asegurar que no existen daños superficiales y subsuperficiales por la adherencia y calentamientos que provoca la soldadura y el precalentamiento en el rodete Pelton y ensayos de dureza (Figura 81), para dar por finalizado el proceso de soldadura; además de esto, se debe tomar en consideración los criterios de aceptación por área de trabajo que establece la norma CCH70-3.

Figura 79. **Ensayo no destructivo por líquidos penetrantes a soldadura**



Fuente: elaboración propia.

Figura 80. **Ensayo no destructivo por partículas magnéticas a soldadura**



Fuente: elaboración propia.

Figura 81. **Ensayo no destructivo por ultrasonido a soldadura**



Fuente: elaboración propia.

Figura 82. **Ensayo de dureza a Cangilón con soldadura aplicado**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Propuesta del plan de mantenimiento a implementar**

PROCEDIMIENTO INICIAL	DETERMINACIÓN DE CONDICIONES	REACONDICIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS	INSPECCIÓN FINAL
Determinación de condición estructural inicial	Inspección de aceptación o rechazo	Rectificación de daños estructurales	Verificación de condiciones finales del rodete
Aplicar Formato de Inspección de rodets Pelton	Limpieza de los equipos Utilizar Plantillas de desgaste de cangilón de rodete Pelton	Aplicación de soldadura GTAW. Rectificación de los daños considerables	Inspección y criterios de aceptación con Técnicas de pruebas no destructivas .
Ensayos no destructivos a rodets Pelton para determinar su condición estructural	Seguimiento de Formato de revisión y seguimiento de rodets	Pre calentamiento Aplicación de soldadura Tiempo de permanencia Maquinado de unión aleada Pulido de unión aleada	Aplicación Líquidos penetrantes Partículas magnéticas Ultrasonido y dureza a Cangilón

Fuente elaboración propia.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con la implementación de la inspección y reparación de los rodets Pelton efectivamente se tuvo un efecto importante dentro de su vida útil, al comparar la situación “antes” y “después” de la implementación del plan de inspección y reparación, así como de la aplicación de un monitoreo de condición y reparación requerida, el cualitativo expresa claramente significados y resultados favorables tales como el mejoramiento de su funcionalidad, aumento de vida útil del rodete, alivio de tensiones, zonas de influencia al desgaste y zonas de impacto mejor distribuidas daños frecuentes que sufre durante su operación sin una inspección, medición y cuantificación

Asimismo, al momento de tratar de cuantificar el indicador de desgaste, se tuvo la limitante de aislar el proceso de reparación por soldadura SMAW, antes de la implementación del plan de inspección y reparación del desgaste a los cangilones, un aumento de dureza en las partes internas de los cangilones en el rodete, originados por el proceso de soldadura SMAW aplicado sin el tratamiento térmico debido, ya que no se cuenta con un horno para este uso de gran tamaño, por esta razón los efectos que genera el no inspeccionar el rodete frecuentemente acelera el daño en las zonas de influencia del desgaste con soldadura SMAW.

Los resultados confirman lo que se señala en la norma CCH 70-3 (1998), la cual indica que zonas de influencia e impacto sufren mayor daño, al estar en operación el rodete Pelton, fomentando una compatibilidad entre las actividades de implementación de inspección y la reparación por soldadura, resaltando los beneficios potenciales al emplearlos conjuntamente.

Al calificar al proceso de soldadura y a los soldadores calificados, el plan de reparación crea grupos de tratamiento y de control comparables, que aportan beneficio en el resultado del mejoramiento de vida útil de los rodets. Se trata de un resultado muy convincente, porque en teoría, los resultados generados por la calificación del procedimiento de soldadura y calificación de soldadores, sirven como un escenario perfecto, sin la dificultad de la selección de prueba y error, y agrega que la principal ventaja de esta técnica es la simplicidad en la interpretación de los resultados, puesto que el efecto del correcto procedimiento de soldadura y la correcta operación del soldador, da como resultado un plan de reparación adecuado y fiable para la implementación a cualquier rodete Pelton, bajo condiciones similares a la de Planta Hidroeléctrica Aguacapa.

El procedimiento recomendado por las normas ASME. Sección IX (2013), es muy similar al método seguido en la presente tesis, pues existe un “antes” del cual no se tenía una reparación por el método de soldadura GTAW y un “después” que está representado por el rodete Pelton sometido al plan de inspección y reparación, determinándose los impactos mediante pruebas cualitativas. Adicionalmente, es meritorio subrayar que se ha utilizado el plan de inspección y reparación al momento de la medición *in situ* de la muestra, en este caso del rodete Pelton que muestra superficies adecuadas para que el impacto en la zona de influencia del chorro no sufra un desbalance y aumente su consumo de agua, manteniendo la eficiencia del rodete y con esto su correcto funcionamiento.

Es importante mencionar que es muy limitada la literatura que aborda el tema de la integración del plan de inspección y reparación por soldadura, y la poca que existe no precisa como debe utilizarse la inspección y las diferentes técnicas que aplican. La literatura actual está más encaminada a defender

temas de otro tipo de turbinas y resultados cuantitativos y cualitativos diferentes.

No obstante, los resultados alcanzados evidencian sólidos beneficios al emplearse ambos planes en la evaluación de impactos que estén relacionados con rodets Pelton, es conveniente hacer notar que también su aplicación está rodeada de limitaciones que podrían ser imprácticas en la evaluación; una de esas limitaciones es reparar por soldadura el rodete con el método SMAW pero puede resultar muy costoso; el empleo conjunto de los planes de inspección y reparación por soldadura puede suponer demasiado tiempo, debido a que las inspecciones se realizan cada trimestre, a que los investigadores carezcan de adiestramiento suficiente en ambos tipos de planes para utilizar los dos y, porque el método predominante recomendado por el fabricante es utilizar el rodete hasta llegar al fin de su vida útil.

Utilizar ambos planes (de inspección y reparación por soldadura), trae consigo una serie de otras ventajas además de prolongar su vida útil, no se seguiría teniendo la cultura del mantenimiento correctivo por el desgaste de los rodets Pelton en operación. La Planta Hidroeléctrica Aguacapa dispondría de un marco metodológico claro y consistente para emprender las evaluaciones de impacto por el desgaste de los rodets. Al implementar este plan de mantenimiento se podrá determinar además si los recursos utilizados en la reparación por soldadura en rodets Pelton fueron empleados con eficacia y eficiencia; además permitirá que se cuente con información para diseñar en forma adecuada los futuros proyectos de inspección y reparación por soldadura a rodets Pelton en otras plantas de generación hidroeléctrica.

CONCLUSIONES

1. Se implementó un plan de mantenimiento en inspección y reparación por soldadura según normas establecidas CCH 70-3, ASME y ASTM, incrementando la vida útil, eficiencia y disponibilidad en los rodets instalados en las unidades generadoras de la hidroeléctrica.
2. El establecimiento de un proceso de inspección de condición a los Rodetes Pelton de la hidroeléctrica, mediante técnicas de ensayos no destructivos, proporcionó información importante para determinar su condición estructural y proceder a la correspondiente reparación.
3. Se determinó el procedimiento de soldadura adecuado para realizar las reparaciones de los Rodetes Pelton aplicados a los aceros inoxidables martensíticos similares a GX% Cr-Ni 134.
4. Se definió, autorizó e implementó el plan de mantenimiento indicando la frecuencia revisión y reparación de los rodets Pelton de la Hidroeléctrica Aguacapa.

RECOMENDACIONES

1. Antes del proceso de inspección con ensayos no destructivos, y del proceso de reparación, tanto el soldador como el proceso de soldadura se limiten a lo establecido en la norma ASME. Sección IX (2013), esto con tal de que la revisión, la calificación del soldador y el proceso de soldadura generen una orden de trabajo fiable y confiable, además se deberá utilizar el formato previamente establecido para reportar nuevos daños.
2. Los técnicos encargados de la aplicación de los ensayos no destructivos inspección visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido, deberán utilizar los lineamientos de criterios de aceptación o rechazo en la aplicación de los mismos.
3. Antes del proceso de reparación es imperante que el soldador y el proceso de soldadura se limiten a lo establecido en la norma ASME. Sección IX (2013), Los soldadores deben ser calificados adecuadamente, con suficiente experiencia para asegurar el proceso de soldadura.
4. En el plan de inspección y reparación, se deberá llevar un control en relación a la dimensión de cada cangilón con una periodicidad trimestral o semestral; todas las medidas deben ser archivadas y registradas para considerar o no la reparación próxima o futura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASM Metal Handbook, Vol 1. Properties and selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. 1990.
2. ASME. Sección IX, estándar para la calificación de procedimientos de soldadura, soldadores y operadores. 2013.
3. ASME. Sección VIII División 1, tratamientos térmicos. 2013.
4. ASTM A743. Section S12. 1999.
5. ASTM S12. Especificación estándar para colada de hierro-cromo, hierro-cromo-níquel, la corrosión resistente, para aplicaciones generales; 1999.
6. Bell. Estudio de Prefactibilidad Planta Aguacapa-Salto María Linda. 1978.
7. Bell. Diseño de turbina Pelton, Manual de Turbina Pelton, Planta Aguacapa, BELL MASCHINENFABRIK AG, pág. 9,1978.
8. Bell. Manual de turbina Regulador, Planta Hidroeléctrica Aguacapa. 1978
CCH 70-3. Specification for inspection of Steel Casting for Hydraulic Machines. 1998.

10. Edwards Maurizio, Donoso J., Estay S.. ESTUDIO DE VIDA RESIDUAL DE RODETES PELTON, Ciencia de Materiales. Universidad Técnica Federico Santa María, CONAMET/SAM-2008. 2008.
11. Moubray John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. 4ª. ed. 2004.
12. Renedo Despachos Carlos J. Sistemas Energéticos, Turbinas Hidráulicas. ETSN 236/ETSIIT S-3 28. 2008.
13. Rivera Guirola G. R. Reacondicionamiento de los álabes directrices de una turbina Hidráulica tipo Francis en Hidroeléctrica Los Esclavos y su análisis de costos. USAC. 2009.
14. Vargas Ávila M. Metodología para el análisis de Integridad Estructural de Rodetes Pelton. ISAGEN (Colombia). 2005.
15. Gabriel Delojo Morcillo. INSPECCIÓN VISUAL. Niveles II y III. Fundación Confemetal Editorial Madrid 2011.
16. AEND. Asociación Española de Ensayos no destructivos. LÍQUIDOS PENETRANTES. Nivel II. Fundación Confemetal Editorial. Madrid, 2009.
17. AEND. Asociación Española de Ensayos no destructivos. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS. Nivel II. Fundación Confemetal Editorial. Madrid, 2009.

18. AEND. Asociación Española de Ensayos No Destructivos. ULTRASONIDOS. Nivel II. Fundación Confemetal Editorial. Madrid 2009.
19. AEND. Asociación Española de Ensayos No Destructivos. ULTRASONIDOS. Nivel II. Fundación Confemetal Editorial. Madrid 2009.
20. AEND. Asociación Española de Ensayos No destructivos. RAYOS X. Nivel II. Fundación Confemetal Editorial. Madrid, 2009.
21. Groover Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. McGraw-Hill Interamericana.México. 2007.
22. Callister William D. Ciencia e Ingeniería de los materiales. Editorial Revertè, S.A. México 2009.
23. Kalpakjian Serope , Schmid Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Educación, México, 2008.

