

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO DE ALTA ALEACIÓN  
MEDIANTE SMAW CON DIVERSOS MATERIALES DE APORTE  
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

**PRESENTADO POR:**

Br. WALTER ALONSO SILVA PALMA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO METALÚRGICO**

**ASESOR:**

Mgt. ELÍAS TEODORO PEÑA PEÑA.

**CUSCO – PERÚ**

**2025**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor ELIAS T. PEÑA PEÑA  
..... quien aplica el software de detección de similitud al  
trabajo de investigación/tesis titulada: EVALUACIÓN DE LA SOLDABILIDAD DE UN  
ACERO DE ALTA ALEACIÓN MEDIANTE SMAW CON DIVERSOS MATERIALES  
DE APOORTE. (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)

Presentado por: WALTER ALONSO SILVA PALMA DNI N° 72274821 ;  
presentado por: ..... DNI N°: .....  
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el  
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de  
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 0.5 %.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	<input type="checkbox"/>
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	<input type="checkbox"/>

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**  
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 17 de ENERO de 2026



Firma

Post firma ELIAS T. PEÑA PEÑA

Nro. de DNI 23965618

ORCID del Asesor 0000-0003-452900665

### Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:547036630

# Walter Alonso Silva Palma

## EVALUACIÓN DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO DE ALTA ALEACIÓN MEDIANTE SMAW CON DIVERSOS MATERIALES D...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:547036630

Fecha de entrega

17 ene 2026, 5:54 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

17 ene 2026, 6:07 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS WALTER CORRECCIONES.pdf

Tamaño del archivo

8.4 MB

186 páginas

33.334 palabras

199.096 caracteres

# 5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




## Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

## Exclusiones


- N.º de coincidencias excluidas

## Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**  
33 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **PRESENTACIÓN**

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas e Ingeniería Metalúrgica.

Señores Docentes Miembros del Jurado:

Cumpliendo con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica y con el objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, pongo a vuestra disposición la tesis intitulada: “EVALUACIÓN DE LA SOLDABILIDAD DE UN ACERO DE ALTA ALEACIÓN MEDIANTE SMAW CON DIVERSOS MATERIALES DE APORTE. (INVESTIGACION TECNOLÓGICA)”.

El presente trabajo de investigación se centra en analizar y optimizar el comportamiento de un acero de alta aleación cuando se emplean diferentes electrodos en el proceso de soldadura por arco metálico con electrodo revestido (SMAW). Este estudio no solo identifica la mejor combinación de materiales de aporte para mejorar las propiedades mecánicas y la calidad del depósito de soldadura, sino que también aporta conocimientos valiosos sobre las condiciones ideales de soldabilidad para este tipo de acero en contextos industriales.

**Walter Alonso Silva Palma**

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo con el alma y el corazón a las personas que han sido mi fuerza, mi refugio y mi inspiración a lo largo de este camino.

A mis padres, Walter Silva y Sobeyda Palma, por ser el faro que ha iluminado mi ruta incluso en los momentos más oscuros. Gracias por su amor incondicional, por su apoyo silencioso pero firme, por sus sacrificios invisibles y por enseñarme que los sueños se alcanzan con trabajo, humildad y perseverancia. Todo lo que soy se lo debo a ustedes.

A mis abuelos, Ricardo Palma y Silvia Vega, por ser esa voz que me impulsó a seguir adelante cuando el cansancio me vencía. Gracias por sus abrazos sinceros, por su fe incansable en mí, y por enseñarme que el amor de familia es un motor poderoso que trasciende cualquier obstáculo.

Y a Morelia, mi compañera incansable, mi refugio en las tormentas. Gracias por tus palabras que sanan, por tu compañía silenciosa en las largas noches de esfuerzo, y por tu aliento constante que me dio fuerzas cuando creí que no podía más. Tu presencia ha sido mi paz y mi impulso.

A todos ustedes, les entrego este logro, porque sin su amor, su paciencia y su fe, nada de esto habría sido posible. Este proyecto es también suyo, con todo mi amor y gratitud eterna.

**Walter Alonso Silva Palma**

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A mis padres, Walter Silva y Sobeyda Palma, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi mayor inspiración. Este logro es fruto de su esfuerzo y confianza en mí.

A mis abuelos, Ricardo Palma y Silvia Vega, por sus sabios consejos y su aliento permanente que me impulsaron a no rendirme y seguir adelante.

A Morelia, por estar a mi lado en cada momento, por su apoyo emocional, su paciencia y su fe en mí incluso en los días más difíciles. Gracias por ser mi compañera de ruta.

A mi asesor de tesis, el Mgt. Elías Peña Peña, por su valiosa guía, por sus observaciones oportunas y su compromiso durante todo el desarrollo de esta investigación. Su acompañamiento fue fundamental para lograr este trabajo.

A todos los Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por compartir con pasión sus conocimientos, por su dedicación y por ser parte esencial de mi formación académica y profesional.

A todos los que me acompañaron en este camino, gracias de corazón. Este logro también es suyo.

**Walter Alonso Silva Palma**

## Índice

PRESENTACIÓN.....	I
DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
Índice.....	IV
Índice de tablas .....	IX
Índice de figuras.....	XI
SIMBOLOGIA .....	XIII
RESUMEN .....	XV
ABSTRACT.....	XVI
CAPITULO I .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1    Situación problemática.....	1
1.2. Formulación del Problema Objeto de Investigación .....	2
1.1.1    Problema General.....	2
1.1.2    Problemas Específicos .....	3
1.2    Justificación .....	3
1.2.1    Justificación Económica .....	3
1.2.2    Justificación Tecnológica.....	3
1.2.3    Justificación Social .....	4
1.2.4    Justificación Ambiental .....	4
1.3    Importancia de Trabajo de Investigación.....	4
1.5 Objetivos General y Específicos .....	5
1.5.1 Objetivo General.....	5
1.5.2 Objetivos Específicos .....	5
CAPITULO II.....	6
MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	6
2.1    Antecedentes de la investigación .....	6
2.1.1 Antecedentes Internacionales .....	6
2.1.2    Antecedentes Nacionales .....	8
2.2    Marco teórico .....	11
2.2.1    Acero.....	11



2.2.2	Clasificación de los Aceros.....	12
2.3	Aceros Austeníticos al Manganeso (Aceros Hadfield).....	17
2.3.1	Composición y Microestructura.....	18
2.3.2	Propiedades Mecánicas del Acero Hadfield .....	21
2.3.3	Efecto de Elementos Aleantes Sobre las Propiedades Mecánicas .....	23
2.3.4	Aplicaciones del Acero Astm A128 .....	33
2.4	Soldadura .....	33
2.4.1	Clasificación de los Procesos de Soldadura.....	34
2.4.2	Soldadura Por Arco con Electrodo Revestido (Smaw).....	35
2.4.3	Material de Aporte Para el Proceso SMAW .....	47
2.5	Posiciones de Soldeo en las Juntas Soldadas .....	52
2.6	Tipos de Juntas.....	54
2.7	Zonas Metalúrgicas de la Soldadura .....	55
2.7.1	Zona de Fusión.....	56
2.7.2	Zona Afectada por el Calor (ZAC) .....	57
2.7.3	El Metal Base.....	58
2.8	Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco	58
2.9	Zona Afectada Por El Calor (ZAC) .....	60
2.9.1	Cálculo del Ancho de la ZAC .....	61
2.10	Dilución.....	62
2.10.1	Relacionando con la Tasa de Deposición .....	63
2.11	Composición Química del Cordón de Soldadura.....	63
2.12	Discontinuidades en el Cordón de Soldadura .....	64
2.12.1	Fisuras .....	64
2.12.2	Falta de Fusión .....	70
2.12.3	Falta de Penetración en la Junta.....	72
2.12.4	Inclusiones .....	73
2.12.5	Porosidad.....	76
2.12.6	Mordeduras .....	79
2.12.7	Falta de Material de Aporte .....	80
2.12.8	Solapado.....	81
2.12.9	Convexidad .....	82

2.12.10	Sobremonta .....	83
2.13	Ensayos no Destructivos .....	83
2.13.1	Inspección Superficial.....	85
2.13.2	Inspección Visual.....	85
2.13.3	Inspección por Líquidos Penetrantes .....	87
2.14	Ensayos Destructivos .....	87
2.14.1	Ensayo de Doblado .....	88
2.15	Calificación del Procedimiento.....	92
2.15.1	Especificación del Procedimiento de Soldadura o WPS (Welding Procedure Specification).....	92
2.15.2	Registro de la Calificación del Procedimiento o PQR (Procedure Qualification Record) .....	92
2.15.3	El registro de la Calificación de la Habilidad del Soldador o WPQR (Welder Performance Qualification Record) .....	93
CAPITULO III.....		94
HIPOTESIS Y VARIABLES .....		94
3.1	Hipótesis General y Específicas .....	94
3.1.1	Hipótesis General .....	94
3.1.2	Hipótesis Específicas.....	94
3.2	Variable Dependiente e Independiente .....	94
3.2.1	Dependiente .....	94
3.2.2	Independientes .....	94
3.3	Matriz Operacionalización de variables:.....	95
CAPITULO IV.....		97
METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION .....		97
4.1	Localización política y geográfica .....	97
4.2	Enfoque, tipo y nivel de investigación.....	98
4.2.1	Enfoque de Investigación .....	98
4.2.2	Tipo de Investigación .....	98
4.2.3	Nivel de Investigación .....	99
4.3	Población y Muestra.....	99
4.3.1	Población .....	99
4.3.2	Muestra .....	100

4.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	100
4.4.1 Técnicas .....	100
4.4.2 Instrumentos .....	100
4.5 Procedimiento experimental .....	101
4.5.1 Preparación del material base: .....	101
4.5.2 Ejecución de los cordones de soldadura: .....	102
4.5.3 Preparación de probetas: .....	102
4.5.4 Realización de ensayos: .....	102
4.5.5 Registro y análisis de resultados: .....	103
CAPITULO V .....	104
METODO EXPERIMENTAL .....	104
5.1 Maquinaria y equipos .....	104
5.1.1 Fuente de poder .....	104
5.2 Material de Ensayo y de Aporte .....	107
5.2.1 Material de Ensayo .....	107
5.2.2 Material de Aporte .....	108
5.3 Soldabilidad de los Cupones .....	110
5.3.1 Caracterización de las Probetas .....	110
5.3.2 Propiedades Mecánicas de las Probetas .....	111
5.3.3 Preparación de las Probetas .....	111
5.4 Soldabilidad de las Probetas .....	113
5.5 Cálculo del Calor Neto Aportado .....	118
5.6 Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor .....	119
5.7 Cálculo de la Dilución .....	120
5.7.1 Cálculo de la dilución para la probeta PX .....	120
5.8 Determinación de la Composición Química .....	122
5.8.1 Determinación de la Composición Química de la Probeta PX: .....	123
5.8.2 Determinación de la Composición Química de la Probeta PY: .....	125
5.8.3 Determinación de la Composición Química de la Probeta PZ. ....	127
5.9 Control de Calidad de las probetas .....	129
5.9.1 Inspección Visual .....	129
5.9.2 Inspección con Tintes Penetrantes (Fluorescentes) .....	129

5.9.3 Ensayo de Doblado Guiado de Cara y Raíz .....	133
5.10 Registro de Calificación del Procedimiento (PQR).....	134
5.11 Calor Neto Aportado .....	137
5.12 Inspección Visual de las Probetas (ver tabla 20) .....	138
5.13 Inspección Por Tintas Penetrantes .....	139
5.14 Ensayo de Doble. ....	140
5.15 Dilución y Composición Química del Deposito .....	140
5.16 Perfiles de dureza .....	143
CAPITULO VI.....	145
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	145
6.1Comparación de la composición química de los depósitos con los antecedentes:.....	145
6.2Discusión sobre la dureza de los depósitos obtenidos: .....	146
6.3Discusión sobre la selección del electrodo más óptimo .....	147
6.3.1Compatibilidad metalúrgica .....	147
6.3.2Riesgo de fragilización .....	147
6.3.3Dureza adecuada.....	148
6.3.4Control de la dilución .....	148
6.4Síntesis general de la discusión.....	148
CONCLUSIONES .....	150
RECOMENDACIONES.....	153
REFERENCIAS.....	154

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Composiciones de aceros de bajo carbono y de aceros de baja aleación (Callister 2000) .....	13
<b>Tabla 2</b> Características mecánicas de aceros de bajo carbono y de aceros de baja aleación (Callister 2000) .....	13
<b>Tabla 3</b> Tramos de composición para aceros al carbono y aceros de baja aleación (Callister,1995) .....	16
<b>Tabla 4</b> Tipos de aceros Hadfield y su composición química. ....	19
<b>Tabla 5</b> Propiedades Mecánicas de los Aceros Austeníticos al Manganeso (Hadfield) .....	23
<b>Tabla 6</b> Comparación entre corriente continua y corriente alterna. ....	46
<b>Tabla 7</b> Ventajas y Desventajas del proceso SMAW. ....	47
<b>Tabla 8</b> Características de los diferentes tipos de electrodos. ....	49
<b>Tabla 9</b> Eficiencia térmica de los procesos de arco. ....	59
<b>Tabla 10</b> Métodos de examinación en relación con las discontinuidades. ....	84
<b>Tabla 11</b> Métodos de examinación en relación con el tipo de junta. ....	85
<b>Tabla 12</b> Criterios de aceptación del ensayo de inspección visual. ....	86
<b>Tabla 13</b> Criterio de aceptación para el ensayo de doblado de cara y raíz según el código AWS D1.1... ..	91
<b>Tabla 14</b> Características - trozadora .....	105
<b>Tabla 15</b> Composición química del deposito .....	108
<b>Tabla 16</b> Propiedades mecánicas del metal depositado .....	108
<b>Tabla 17</b> Composición química del deposito .....	109
<b>Tabla 18</b> Propiedades mecánicas del metal depositado .....	109
<b>Tabla 19</b> Composición química del deposito .....	110
<b>Tabla 20</b> Propiedades del metal depositado .....	110
<b>Tabla 21</b> Propiedades mecánicas. ....	111
<b>Tabla 22</b> Características de la junta a soldar. ....	112
<b>Tabla 23</b> Probeta PX.....	114
<b>Tabla 24</b> Probeta PY.....	115
<b>Tabla 25</b> Probeta PZ.....	116
<b>Tabla 26</b> Valores del calor aportado (J/mm) en la soldadura de las probetas.....	119
<b>Tabla 27</b> Valores de dilución de las probetas .....	122
<b>Tabla 28</b> Composiciones químicas del acero ASTM A128 y del electrodo E307 – 16. ....	123
<b>Tabla 29</b> Composición química del Primer deposito. ....	123
<b>Tabla 30</b> Composición química del metal base, metal de aporte y primer depósito. ....	124
<b>Tabla 31</b> composición química del segundo deposito .....	124
<b>Tabla 32</b> Composición química del primer y segundo depósito. ....	124
<b>Tabla 33</b> Composiciones químicas del acero ASTM A128 y del electrodo E-FeCr-Al. ....	125
<b>Tabla 34</b> Composición química del primer deposito .....	125
<b>Tabla 35</b> Composición química del metal base, metal de aporte y primer deposito .....	126
<b>Tabla 36</b> composición química del segundo deposito .....	126
<b>Tabla 37</b> Composición química del primer y segundo deposito. ....	126
<b>Tabla 38</b> Composiciones químicas del acero ASTM A128 y del electrodo E FeMn-B. ....	127
<b>Tabla 39</b> Composición química del primer deposito .....	127
<b>Tabla 40</b> Composiciones químicas del metal base,metal de aporte y de primer deposito .....	128
<b>Tabla 41</b> Composición química del segundo deposito .....	128

<b>Tabla 42</b> <i>Composición química del primer y segundo depósito.</i> .....	128
<b>Tabla 43</b> <i>Resultados del examen visual.</i> .....	129
<b>Tabla 44</b> <i>Visualización del examen por tintes penetrantes</i> .....	133
<b>Tabla 45</b> <i>Probeta PX</i> .....	135
<b>Tabla 46</b> <i>Probeta PY</i> .....	135
<b>Tabla 47</b> <i>Probeta PZ</i> .....	136
<b>Tabla 48</b> <i>Valores de calor neto aportado en la soldadura de las probetas.</i> .....	137
<b>Tabla 49</b> <i>Inspección visual de los cupones.</i> .....	138
<b>Tabla 50</b> <i>Resultados de la inspección visual por tintes penetrantes (fluorescentes).</i> .....	139
<b>Tabla 51</b> <i>Resultados del ensayo de dobléz.</i> .....	140
<b>Tabla 52</b> <i>Valores de dilución.</i> .....	140
<b>Tabla 53</b> <i>Composición química de la probeta PX.</i> .....	141
<b>Tabla 54</b> <i>Composición química de la probeta PY</i> .....	141
<b>Tabla 55</b> <i>Composición química de la probeta PZ</i> .....	142
<b>Tabla 56</b> <i>Valores del perfil de durezas.</i> .....	143

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b>	<i>Variación de las propiedades mecánicas según el contenido de carbono.</i>	11
<b>Figura 2</b>	<i>Clasificación de los aceros.</i>	12
<b>Figura 3</b>	<i>Microestructura del acero Hadfield grado A. 100X.</i>	20
<b>Figura 4</b>	<i>Microestructura acero Hadfield grado A, 200X.</i>	20
<b>Figura 5</b>	<i>Microestructura acero Hadfield grado A tratada térmicamente.</i>	21
<b>Figura 6</b>	<i>Solubilidad del carbono en un acero Hadfield.</i>	24
<b>Figura 7</b>	<i>Variación de la temperatura con el contenido de carbono y manganeso.</i>	24
<b>Figura 8</b>	<i>Influencia del carbono sobre las propiedades mecánicas de un acero Hadfield.</i>	25
<b>Figura 9</b>	<i>Influencia del manganeso sobre el acero austenítico al manganeso.</i>	26
<b>Figura 10</b>	<i>Influencia del cromo sobre las propiedades mecánicas.</i>	29
<b>Figura 11</b>	<i>Influencia del molibdeno sobre las propiedades mecánicas.</i>	30
<b>Figura 12</b>	<i>Influencia del níquel sobre las propiedades mecánicas.</i>	31
<b>Figura 13</b>	<i>Esquema principal de procesos de soldadura.</i>	34
<b>Figura 14</b>	<i>Soldadura por arco con electrodo revestido.</i>	35
<b>Figura 15</b>	<i>Diagrama del proceso SMAW.</i>	39
<b>Figura 16</b>	<i>Gas ionizado como conductor de corriente.</i>	40
<b>Figura 17</b>	<i>Características del acero y de la soldadura bajo diferentes condiciones.</i>	42
<b>Figura 18</b>	<i>Designación del electrodo – Según AWS.</i>	51
<b>Figura 19</b>	<i>Posiciones de soldadura en chapas a tope.</i>	52
<b>Figura 20</b>	<i>Posiciones de soldadura en chapas en ángulo.</i>	53
<b>Figura 21</b>	<i>Posiciones de soldadura en tubos a tope.</i>	54
<b>Figura 22</b>	<i>Tipos de junta.</i>	55
<b>Figura 23</b>	<i>Principales zonas de la soldadura.</i>	56
<b>Figura 24</b>	<i>Regiones de la zona de fusión.</i>	56
<b>Figura 25</b>	<i>Regiones de la zona afectada por el calor.</i>	57
<b>Figura 26</b>	<i>Zonas dentro de la ZAC.</i>	61
<b>Figura 27</b>	<i>Fisura longitudinal.</i>	66
<b>Figura 28</b>	<i>Fisura Transversal.</i>	66
<b>Figura 29</b>	<i>Fisura de garganta.</i>	67
<b>Figura 30</b>	<i>Fisura de raíz.</i>	68
<b>Figura 31</b>	<i>Fisura de tobillo.</i>	68
<b>Figura 32</b>	<i>Fisura de cráter.</i>	69
<b>Figura 33</b>	<i>Fisura debajo de las capas del cordón de soldadura.</i>	70
<b>Figura 34</b>	<i>Falta de fusión superficial</i> 17	71
<b>Figura 35</b>	<i>Falta de fusión entre el cordón y las paredes del material base (subsuperficial)</i> 18	71
<b>Figura 36</b>	<i>Falta de penetración.</i>	72
<b>Figura 37</b>	<i>Falta de penetración en la raíz de la junta.</i>	72
<b>Figura 38</b>	<i>Inclusión de escoria superficial.</i>	74
<b>Figura 39</b>	<i>Inclusión de escoria alargada (subsuperficial).</i>	74
<b>Figura 40</b>	<i>Inclusiones de tungsteno.</i>	76
<b>Figura 41</b>	<i>Porosidad dispersa.</i>	77
<b>Figura 42</b>	<i>Porosidad agrupada.</i>	77
<b>Figura 43</b>	<i>Porosidad alineada.</i>	78

<b>Figura 44</b> <i>Porosidad tubular o tipo gusano</i> .....	78
<b>Figura 45</b> <i>Mordeduras en soldadura a filete</i> .....	79
<b>Figura 46</b> <i>Falta de material de aporte</i> .....	80
<b>Figura 47</b> <i>Solapado</i> .....	81
<b>Figura 48</b> <i>Límite de convexidad en soldaduras a filete</i> .....	82
<b>Figura 49</b> <i>Convexidad en junta en “T”</i> .....	83
<b>Figura 50</b> <i>Inspección por líquidos penetrantes visibles</i> 48 .....	87
<b>Figura 51</b> <i>Ensayo de doblado de cara</i> .....	89
<b>Figura 52</b> <i>Ensayo de doblado de raíz</i> 58 .....	90
<b>Figura 53</b> <i>Ensayo de doblado de lado</i> .....	90
<b>Figura 54</b> <i>Mapa de Ubicación</i> .....	97
<b>Figura 55</b> <i>Fuente de poder</i> .....	104
<b>Figura 56</b> <i>Equipo de dobléz.</i> .....	105
<b>Figura 57</b> <i>Kit de tintes penetrantes</i> .....	106
<b>Figura 58</b> <i>Probetas de ensayo con su identificación</i> .....	111
<b>Figura 59</b> <i>Junta a tope en “V”</i> .....	112
<b>Figura 60</b> <i>Preparación de los pares de las probetas.</i> .....	113
<b>Figura 61</b> <i>Identificación de las probetas.</i> .....	113
<b>Figura 62</b> <i>Probetas soldadas</i> .....	118
<b>Figura 63</b> <i>Limpieza química del depósito de soldadura.</i> .....	130
<b>Figura 64</b> <i>Rociado con tinte penetrante.</i> .....	131
<b>Figura 65</b> <i>Aplicación del tinte revelador.</i> .....	131
<b>Figura 66</b> <i>Visualización de posibles discontinuidades.</i> .....	132
<b>Figura 67</b> <i>Selección de la probeta para la prueba de dobléz.</i> .....	134
<b>Figura 68</b> <i>Perfil de durezas</i> .....	144



**SIMBOLOGIA**

SAE =	Sociedad de ingenieros automotores (Society of automotive engineers).
AISI =	Instituto Americano del hierro y acero (American Iron and Steel Institute)
SMAW =	Shield metal arc welding (soldadura por arco electrodo revestivo)
AWS=	Sociedad americana de soldadura (American Welding Society)
mm =	Milimetro.
MIG =	Soldadura gas inerte (Metal inert gas)
MAG =	Soldadura gas active
TIG =	Tungsten inerte gas
CC =	Corriente continua.
CA=	Corriente alterna.
ANSI=	Instituto americano de normas nacionales (American national standards institute)
ZF =	Zona de fusión.
ZAC =	Zona afectada por el calor.
MB =	Metal base.
H=	Energía de soldeo, en J/mm
V =	Voltio
A =	Amperio
v =	Velocidad de soldeo.
Tmax =	Temperatura máxima
To =	Temperatura inicial de la chapa.
Tm =	Temperatura de fusión o temperatura del liquidus del metal a soldar.
C =	Calor específico del metal sólido.

$H_{net}$	=	Energía neta aportada.
$t$	=	Espesor de la chapa a soldar.
$\rho$	=	Densidad del material
$\rho C$	=	Calor específico volumétrico.
$Y$	=	Ancho de la zona afectada térmicamente.
$R$	=	Velocidad de enfriamiento en un punto sobre el eje central de la soldadura
$k$	=	Conductividad térmica del metal
$r$	=	Espesor relativo de la chapa.
$St$	=	Tiempo de solidificación.
$L$	=	Calor de fusión
$C$	=	Carbono equivalente.
$e$	=	Espesor de la pieza.
$T_p$	=	Temperatura de precalentamiento.
$CE$	=	Carbono equivalente.
$\%$	=	Porcentaje.
$CDEN$	=	Corriente directa electrodo al polo negativo.
$CDEP$	=	Corriente directa electrodo al polo positivo.
$HB$	=	Dureza Brinell
$h$	=	Altura.

## RESUMEN

La presente investigación titulada *“Evaluación de la soldabilidad de un acero de alta aleación mediante el proceso SMAW con diversos materiales de aporte”* tendrá como objetivo evaluar la influencia del tipo de electrodo revestido en la calidad de la unión y la resistencia mecánica de un acero de alta aleación soldado mediante el proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW). El enfoque de la investigación será cuantitativo, de tipo aplicada y de nivel explicativo, con un diseño experimental. La población estará constituida por todas las uniones soldadas que puedan realizarse en el taller de soldadura, mediante el proceso SMAW sobre acero de alta aleación, mientras que la muestra estará conformada por seis probetas soldadas con distintos electrodos revestidos, seleccionadas para evaluar la dureza del metal depositado y la calidad de la unión. La metodología contemplará la preparación de probetas, la selección de electrodos y parámetros de soldadura, así como la aplicación de ensayos no destructivos y pruebas de dureza en el metal depositado y en la zona afectada por el calor. Se concluye que el tipo de electrodo revestido influirá significativamente en la soldabilidad del acero de alta aleación, evidenciándose diferencias en la calidad de la unión soldada y en las propiedades mecánicas, lo que permitirá identificar el material de aporte que ofrezca mejores resultados para aplicaciones industriales.

**Palabras clave:** Soldabilidad, SMAW, Electrodo, Acero.

## ABSTRACT

The present research entitled “*Evaluation of the weldability of a high-alloy steel using the SMAW process with different filler materials*” will aim to evaluate the influence of the type of coated electrode on the joint quality and mechanical strength of a high-alloy steel welded by the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process. The study will adopt a quantitative approach, with an applied type and an explanatory level, using an experimental research design. The population will consist of all welded joints that can be produced in the Welding Workshop using the SMAW process on high-alloy steel, while the sample will comprise six welded specimens produced with different coated electrodes, selected to evaluate weld metal hardness and joint quality. The methodology will include specimen preparation, electrode and welding parameter selection, as well as non-destructive testing and hardness tests on the weld metal and the heat-affected zone. It is concluded that the type of coated electrode will significantly influence the weldability of high-alloy steel, resulting in variations in joint quality and mechanical properties, allowing the identification of the most suitable filler material for industrial applications.

**Keywords:** Weldability, SMAW, Electrode, Steel.

## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Situación problemática

En el ámbito internacional, la soldadura de aceros de alta aleación continúa siendo un desafío constante debido a su compleja composición química y a la sensibilidad térmica que presentan durante el proceso de unión. Diversos estudios han demostrado que la selección del electrodo revestido influye directamente en la microestructura del cordón soldado, afectando parámetros críticos como la dureza, ductilidad y susceptibilidad a la formación de grietas. Según Kou (2019), una elección inadecuada del material de aporte puede generar tensiones residuales elevadas y microestructuras frágiles, comprometiendo la integridad del componente soldado. Por su parte, la American Welding Society (AWS, 2021) señala que la industria exige un control más preciso de los insumos empleados en el proceso SMAW, principalmente en aceros con alto contenido de cromo, níquel u otros elementos aleantes. Esto se debe a que estos aceros tienden a presentar zonas afectadas por el calor con modificaciones bruscas en sus propiedades, lo que demanda electrodos específicos que garanticen estabilidad del arco, buena fusión y propiedades mecánicas adecuadas. En consecuencia, la evaluación comparativa de distintos electrodos se ha convertido en una necesidad para optimizar procesos, reducir fallas prematuras y asegurar un comportamiento mecánico confiable en aplicaciones industriales como calderería, minería, petroquímica y estructuras sometidas a esfuerzos críticos.

En el contexto peruano, la problemática se intensifica debido a la variabilidad en la disponibilidad y calidad de los electrodos importados y nacionales, así como por la limitada estandarización en los procedimientos de soldadura para aceros de alta aleación. Investigaciones

recientes muestran que muchas fallas en estructuras metálicas y componentes industriales se originan en procedimientos inadecuados de soldadura, especialmente cuando no se selecciona el electrodo adecuado para la composición del metal base (Córdova & Espinoza, 2022). Además, sectores productivos como la minería, metalmecánica y construcción recurren con frecuencia al proceso SMAW por su versatilidad y economía; sin embargo, la diversidad de marcas y tipos de electrodos genera incertidumbre respecto a su verdadero desempeño en campo. Reportes del Instituto Tecnológico de la Producción — ITP (2023) indican que un número significativo de reparaciones y reprocesos se debe a fallas en la unión soldada, relacionadas con el empleo de materiales de aporte que no cumplen con los requerimientos metalúrgicos del acero de alta aleación utilizado.

Esta situación evidencia la necesidad de realizar evaluaciones comparativas que permitan identificar el electrodo más adecuado, mejorando así la resistencia mecánica, la calidad del cordón y la vida útil de los componentes soldados en la industria nacional. Además, la diversidad de materiales de aporte puede influir significativamente en la integridad de la soldadura, afectando aspectos como la resistencia mecánica, la durabilidad y la resistencia a la corrosión. Por lo tanto, es esencial determinar cuáles materiales de aporte proporcionan los mejores resultados en términos de calidad de la unión soldada

## **1.2. Formulación del Problema Objeto de Investigación**

### ***1.1.1 Problema General***

¿Cómo influirá el tipo de electrodo revestido en la calidad de la unión y la resistencia mecánica de un acero de alta aleación soldado mediante el proceso SMAW?

### ***1.1.2 Problemas Específicos***

¿Qué diferencias presentarán los electrodos revestidos en cuanto a sus propiedades químicas y mecánicas cuando sean aplicados a la soldadura de aceros de alta aleación?

¿Cómo variará la calidad de la soldadura y la dureza del metal depositado y de la zona afectada por el calor al emplear distintos electrodos en el proceso SMAW?

¿Cuál de los electrodos evaluados proporcionará los mejores resultados en términos de propiedades mecánicas y calidad de la unión soldada en un acero de alta aleación?

## **1.2 Justificación**

### ***1.2.1 Justificación Económica***

La optimización de la soldabilidad de aceros de alta aleación mediante el proceso de soldadura SMAW con diversos materiales de aporte puede llevar a una reducción significativa en los costos de producción y mantenimiento. Al identificar los materiales de aporte más eficientes y económicos, se pueden minimizar los costos de reparación y prolongar la vida útil de las estructuras soldadas. Además, mejorar la calidad de las soldaduras reduce la necesidad de retrabajos y desperdicio de materiales, contribuyendo a una mayor eficiencia económica en la industria metalúrgica y de fabricación.

### ***1.2.2 Justificación Tecnológica***

Desde una perspectiva tecnológica, el estudio aporta conocimientos cruciales para mejorar las técnicas de soldadura y optimizar los parámetros de soldadura SMAW. Esto no solo aumenta la calidad y fiabilidad de las uniones soldadas, sino que también impulsa la innovación en el desarrollo de nuevos materiales de aporte y métodos de soldadura. La investigación puede conducir

a avances tecnológicos que potencien la competitividad de la industria en el mercado global, permitiendo la fabricación de productos más avanzados y duraderos.

### ***1.2.3 Justificación Social***

El impacto social de optimizar la soldadura de aceros de alta aleación es significativo. Al mejorar la integridad y seguridad de las estructuras soldadas, se protege la vida y bienestar de las personas que utilizan estos productos en su vida cotidiana. Ya sea en construcciones, transporte o infraestructura, las uniones soldadas de alta calidad contribuyen a la seguridad y durabilidad de instalaciones críticas. Además, al reducir costos de producción, se pueden ofrecer productos más accesibles y económicos a la sociedad, mejorando la calidad de vida.

### ***1.2.4 Justificación Ambiental***

Desde un punto de vista ambiental, optimizar el proceso de soldadura y seleccionar materiales de aporte adecuados pueden llevar a una disminución en el consumo de recursos y la generación de residuos. Al reducir la necesidad de retrabajos y reparaciones, se disminuye el impacto ambiental asociado con la extracción y procesamiento de materias primas. Asimismo, una mayor durabilidad de las estructuras soldadas implica menos frecuencias de reemplazo y, por ende, una reducción en la huella de carbono asociada a la producción y transporte de nuevos materiales. Promover prácticas de soldadura más eficientes y sostenibles es un paso importante hacia una industria más respetuosa con el medio ambiente.

## **1.3 Importancia de Trabajo de Investigación**

El estudio de la soldabilidad de aceros de alta aleación mediante el proceso SMAW con diferentes materiales de aporte resulta fundamental para mejorar la calidad y seguridad de las uniones soldadas, optimizando su resistencia y durabilidad. Esta investigación aporta al avance del



conocimiento técnico en el campo de la soldadura, impulsando la innovación en procesos y selección de materiales. Asimismo, permite optimizar los costos de producción al identificar opciones más eficientes y económicas, reduciendo desperdicios y necesidad de retrabajos.

Además, contribuye a la sostenibilidad ambiental mediante una mayor eficiencia en el uso de recursos y una menor generación de residuos. Su impacto también se extiende al ámbito social, ya que mejora la fiabilidad de infraestructuras clave en sectores como la construcción, energía y transporte. Finalmente, el desarrollo de técnicas de soldadura más efectivas fortalece la competitividad industrial, permitiendo a las empresas enfrentar los retos de un mercado global cada vez más exigente.

## **1.5 Objetivos General y Específicos**

### ***1.5.1 Objetivo General***

Realizar la evaluación comparativa de la soldabilidad de un acero de alta aleación mediante el proceso SMAW empleando diferentes electrodos revestidos, con el propósito de determinar cuál de ellos ofrece mejores resultados en términos de calidad de unión y resistencia mecánica.

### ***1.5.2 Objetivos Específicos***

- Analizar las características químicas y mecánicas de los diferentes electrodos revestidos aplicados en la soldadura del acero de alta aleación.
- Evaluar la calidad de las uniones soldadas mediante ensayos no destructivos y pruebas de dureza en el metal depositado y la zona afectada por el calor.
- Comparar los resultados obtenidos con cada electrodo para seleccionar el material de aporte que proporcione la mejor combinación de propiedades mecánicas y calidad de soldadura.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

#### 2.1 Antecedentes de la investigación

##### *2.1.1 Antecedentes Internacionales*

Verma, Kumar y Singh (2016) desarrollaron una investigación experimental orientada a evaluar la soldabilidad de uniones disímiles entre acero inoxidable dúplex 2205 y acero inoxidable austenítico AISI 316L mediante el proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW), empleando electrodos E2209 y E309L. El estudio se centró en analizar la influencia del tipo de electrodo en la microestructura, el balance ferrita-austenita, la dureza y las propiedades mecánicas de las uniones soldadas, utilizando ensayos metalográficos, análisis mediante microscopía electrónica y pruebas mecánicas. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en la distribución de fases y en el comportamiento mecánico de las uniones, observándose que el electrodo E2209 permitió obtener una microestructura más estable y mejores propiedades mecánicas. Se concluyó que la selección del electrodo influye directamente en la soldabilidad y en la integridad mecánica de aceros de alta aleación soldados mediante SMAW.

Abdel-Wanees, A. S., Mahmoud, T. S. e Ibrahim, I. M. (2020). Effect of electrode material on microstructural and mechanical characteristics of AISI 304 stainless steels plates joined using shielded metal arc welding. Modern Academy in Maadi y Benha University (Facultad de Ingeniería, Shoubra). Objetivo, evaluar la influencia del material del electrodo en el comportamiento microestructural y mecánico de placas de acero inoxidable austenítico AISI 304 soldadas mediante el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW). La metodología fue, el estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental, en el cual placas de acero

AISI 304 fueron soldadas utilizando electrodos E308L-16 y E312-17 conforme a la clasificación AWS; se realizaron ensayos mecánicos de tracción y dureza a temperatura ambiente, así como análisis macro y microestructural, con la finalidad de identificar los cambios en las fases, el tamaño de grano y el desempeño mecánico de las uniones soldadas. Los autores encontraron que las regiones soldadas presentaron una estructura de ferrita vermicular distribuida en una matriz austenítica, con variaciones en el tamaño de grano atribuibles a la distribución térmica durante el proceso de soldadura; asimismo, las uniones soldadas con electrodo E308L-16 evidenciaron menor eficiencia de junta y mayor elongación, mientras que las soldadas con electrodo E312-17 presentaron mayor dureza y mejor eficiencia de la unión. Conclusión: el tipo de electrodo empleado en el proceso SMAW influye de manera directa en la microestructura y en las propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI 304, por lo que la adecuada selección del material de aporte resulta determinante para optimizar la calidad y el desempeño de las uniones soldadas.

Azwinur, Rahman y Hashim (2022) evaluaron la influencia del tipo de electrodo en la calidad de la unión y en la resistencia mecánica de uniones soldadas entre acero inoxidable SA 240 TP 304 y acero al carbono SA 36 utilizando el proceso SMAW. La investigación comparó el desempeño de los electrodos E309L-16 y E7016, analizando su efecto en la resistencia a la tracción, dureza del metal depositado y composición química del cordón de soldadura. La metodología incluyó ensayos mecánicos y análisis metalúrgicos con el fin de determinar la compatibilidad del material de aporte con los metales base. Los resultados demostraron que el electrodo utilizado influyó significativamente en las propiedades mecánicas y en la calidad de la unión soldada, concluyéndose que una selección inadecuada del electrodo puede comprometer la

soldabilidad y el desempeño estructural de uniones disímiles soldadas mediante SMAW.

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales**

Quispe, J., & Ramos, L. (2022). Desempeño comparativo de electrodos E6013, E7018 e inoxidables en soldadura SMAW de aceros estructurales. El objetivo general: Analizar el comportamiento mecánico y la presencia de discontinuidades en uniones soldadas con diferentes electrodos utilizados en el sector metalmecánico peruano. La Metodología: Se elaboraron cordones de soldadura con los tres tipos de electrodos, bajo parámetros normalizados para aceros estructurales. Las uniones fueron evaluadas mediante ensayos no destructivos (líquidos penetrantes y ultrasonido), ensayos de tracción y mediciones de dureza. Los Resultados indican que el electrodo E7018 obtuvo el mejor desempeño, con cordones más limpios y menor presencia de defectos. Los electrodos E6013 mostraron mayor formación de escoria y discontinuidades superficiales, mientras que el electrodo inoxidable presentó buena resistencia, pero con mayor variabilidad en la dureza. Obteniendo como Conclusión: El electrodo E7018 es el más adecuado para lograr soldaduras confiables en aceros de media y alta aleación dentro del contexto industrial peruano.

Delgado, M. (2023). Evaluación de electrodos especiales de recargue en el proceso SMAW para aceros resistentes al desgaste en minería peruana. El Objetivo general: Era determinar el comportamiento metalúrgico y la dureza de distintos electrodos de recargue empleados en la reparación de componentes sujetos a desgaste en operaciones mineras. Cuya metodología: es el estudio utilizó electrodos de recargue con diferentes contenidos de cromo y manganeso, aplicados sobre placas de acero resistente al desgaste. Se realizaron macroataques, análisis metalográficos y ensayos de dureza Rockwell para comparar el rendimiento de cada electrodo. Cuyos resultados,

indican que los electrodos con mayor contenido de elementos aleantes generaron cordones más duros y uniformes, con una buena fusión y mínima presencia de grietas. Los electrodos de baja aleación presentaron menor dureza y microestructuras menos estables. La conclusión: indica que el uso de electrodos con alto contenido de aleantes mejora significativamente la resistencia al desgaste, lo que resulta esencial para equipos mineros que requieren mayor vida útil y menor frecuencia de mantenimiento.

Luna Tejada, R. (2015). Calificación del procedimiento de soldadura para uniones disímiles en sistemas de transporte de gas natural por ductos. El objetivo general: Calificar el procedimiento de soldadura para la unión disímil entre una brida y una tubería de acero, con el propósito de asegurar su correcta implementación en un sistema de transporte de gas natural. Su metodología: Evaluó la soldadura entre una brida ASTM A707 L5 F65 y una tubería API 5L X70 PSL1, ambas de 24 pulgadas de diámetro y 21,5 mm de espesor. Se emplearon dos procesos complementarios: GTAW para el pase de raíz y SMAW para los pases de relleno. Para verificar la idoneidad del procedimiento, se realizaron diversos ensayos de calificación, incluyendo: Ensayos de tracción (2 probetas), Ensayos de doblez lateral (4 probetas), Ensayos de impacto Charpy (9 probetas), Inspección visual del cordón, análisis de macrografía para evaluar la fusión y uniformidad. Las probetas sometidas a pruebas destructivas permitieron analizar la resistencia mecánica, ductilidad y comportamiento frente al impacto del material soldado. Cuyos resultados: Los ensayos no evidenciaron discontinuidades críticas en el cordón de soldadura. Las probetas de tracción alcanzaron valores adecuados de resistencia, las pruebas de doblez mostraron una ductilidad aceptable, y los ensayos de impacto demostraron la tenacidad requerida para este tipo de uniones sometidas a condiciones exigentes. La macrografía confirmó una buena fusión entre materiales disímiles y ausencia de defectos relevantes. Teniendo como conclusión: que el

procedimiento de soldadura evaluado fue satisfactoriamente calificado. En consecuencia, se establece que la unión entre la brida y la tubería debe ejecutarse siguiendo esta especificación de procedimiento, garantizando así un cordón seguro, confiable y apto para su uso en sistemas de transporte de gas natural por ductos.

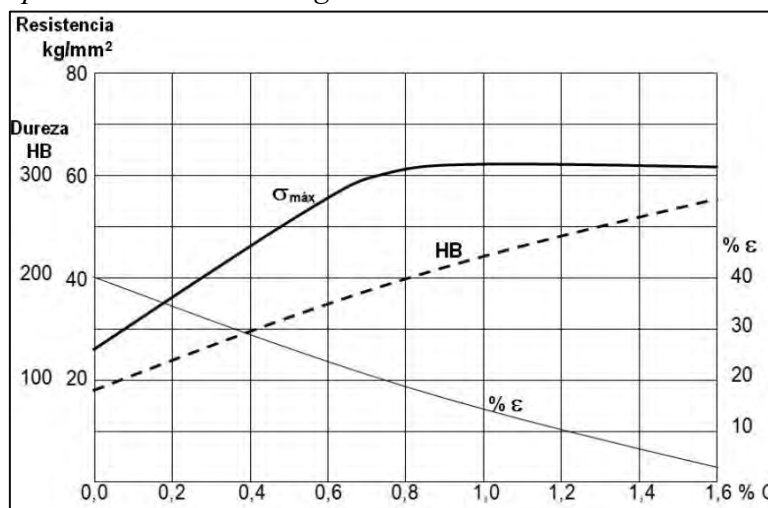
## 2.2 Marco teórico

### 2.2.1 Acero

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono que también incluyen cantidades apreciables de otros elementos. Existe una amplia variedad de tipos de acero, cada uno con composiciones químicas y/o tratamientos térmicos distintos. Sus propiedades mecánicas están fuertemente influenciadas por el contenido de carbono (Figura 1), el cual generalmente es menor al 1%. La soldabilidad de estos materiales está estrechamente relacionada con dicho contenido: cuanto mayor es el porcentaje de carbono, más difícil resulta soldarlos; por el contrario, un menor contenido favorece su soldabilidad. (Lena, 2008)

**Figura 1**

*Variación de las propiedades mecánicas según el contenido de carbono.*



Fuente: (Lena, 2008)

Mientras que los aceros al carbono solo contienen impurezas residuales además del carbono, los aceros aleados tienen elementos de aleación añadidos de forma deliberada en

concentraciones determinadas. La figura 2 presenta una clasificación detallada de los diferentes tipos de acero. (Callister, 2000)

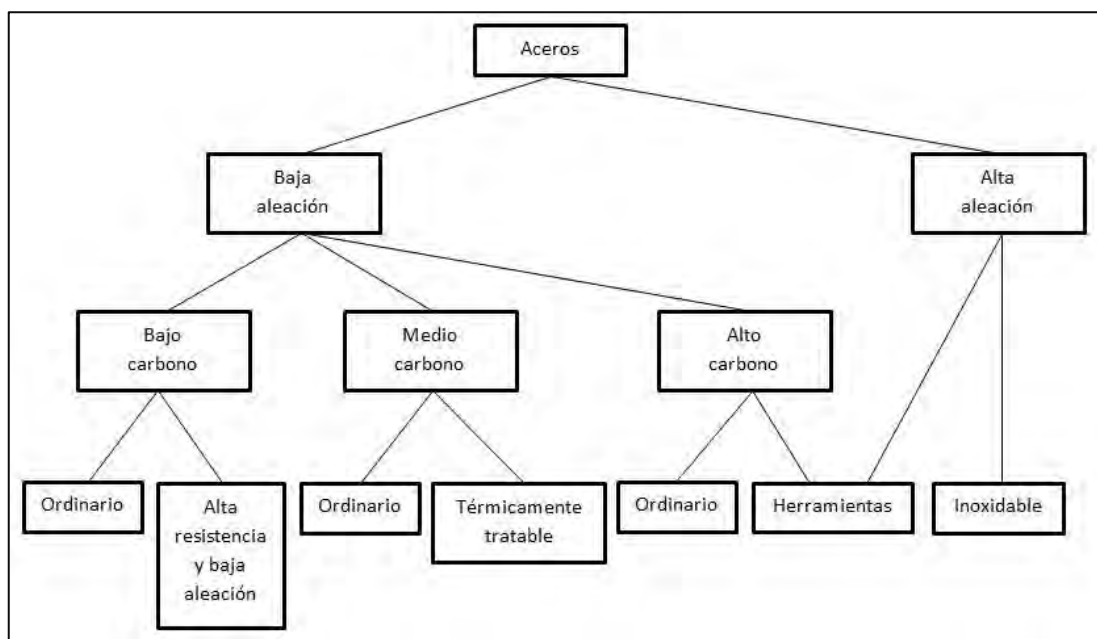
## 2.2.2 Clasificación de los Aceros

### 2.2.2.1 Aceros al carbono.

Son denominados simplemente aceros al carbono, cuando no se especifican ni se garantizan otros elementos aleantes que pudieran contener. Estos aceros obtienen sus propiedades específicamente de su contenido de carbono.

**Figura 2**

*Clasificación de los aceros*



Fuente: (Callister, 2000)

#### a) Aceros de bajo carbono

Este tipo de acero presenta un contenido de carbono inferior al 0.3% y no es apto para tratamientos térmicos destinados a formar martensita, aunque puede endurecerse por deformación en frío. Su microestructura está compuesta por ferrita y perlita.



Como resultado, se trata de aceros relativamente blandos y de baja resistencia, pero con una notable ductilidad y tenacidad. Asimismo, ofrecen buena maquinabilidad, excelente soldabilidad y un costo reducido. De manera típica, presentan un límite elástico cercano a 275 MPa, una resistencia a la tracción entre 415 y 550 MPa y una elongación aproximada del 25%. Las tablas 1 y 2 muestran las composiciones químicas y propiedades mecánicas de diferentes aceros de bajo carbono.

**Tabla 1**

*Composiciones de aceros de bajo carbono y de aceros de baja aleación (Callister 2000)*

Designación	Composición (% en peso)		
AISI/SAE o número ASTM	C	Mn	Otros
<b>Aceros bajos en carbono</b>			
1010	0.1	0.45	
1020	0.2	0.45	
A36	0.29	1	9.2 Cu (mín)
A516 Grado 70	0.31	1	0.25 Si
<b>Aceros de baja aleación y alta resistencia</b>			
A440	0.28	1.35	0.3 Si (máx), 0.2 C (mín)
A633 Grado E	0.22	1.35	0.3 Si, 0.08 V, 0.2 N, 0.03 Nb
A656 Grado 1	0.18	1.6	0.6 Si, 0.1 V, 0.2 Al, 0.015 N

Fuente: (Callister, 2000)

**Tabla 2**

*Características mecánicas de aceros de bajo carbono y de aceros de baja aleación (Callister 2000)*

AISI/SAE o número ASTM	Resistencia a la tracción [psi x 10 <sup>3</sup> (Mpa)]	Límite elástico [psi x 10 <sup>3</sup> (Mpa)]	Ductilidad (% Elongación)
<b>Aceros bajos en carbono</b>			
1010	47(325)	26(180)	28
1020	55(380)	30(205)	25
A36	58(400)	32(220)	23
A516 Grado 70	70(485)	38(260)	21
<b>Aceros de baja aleación y alta resistencia</b>			
A440	63(435)	42(290)	21
A633 Grado E	75(520)	55(380)	23
A656 Grado 1	95(655)	80(552)	15

Fuente: (Callister, 2000)

**b) Aceros de medio carbono**

Los aceros de medio carbono contienen entre 0.3% y 0.55% de carbono. Pueden ser sometidos a tratamientos térmicos como la austenización, el temple y el revenido para mejorar sus propiedades mecánicas. Se utilizan habitualmente en su estado revenido, con una microestructura de martensita revenida. Tienen baja templabilidad y solo pueden ser tratados con velocidades de temple muy rápidas. La adición de cromo, níquel y molibdeno mejora la capacidad de estos aceros para ser tratados térmicamente, ofreciendo una buena combinación de resistencia y ductilidad. Estos aceros, una vez tratados térmicamente, son más resistentes que los aceros de bajo carbono, aunque menos dúctiles y tenaces. Se emplean para fabricar componentes que requieren alta resistencia mecánica, resistencia al desgaste y tenacidad.

**c) Aceros de alto carbono**

Los aceros de alto carbono contienen más de 0.55% de carbono y son más duros, resistentes y menos dúctiles que otros aceros al carbono. Se utilizan principalmente en su estado templado y revenido, donde destacan por su alta resistencia al desgaste.

**d) Aceros de herramientas**

Estos aceros tienen entre 0.9% y 1.5% de carbono y generalmente contienen otros elementos de aleación que mejoran o proporcionan propiedades especiales. Contienen elementos como cromo, vanadio, tungsteno y molibdeno, que se combinan con el carbono para formar carburos muy duros y resistentes al desgaste. Se usan en herramientas de corte, matrices, cuchillos, navajas y hojas de sierra de alta resistencia.

### **2.2.2.2 Aceros aleados**

Bajo este término se agrupan todos los aceros que, además de contener un porcentaje específico de carbono, silicio, manganeso, azufre, fósforo y hierro, incluyen otros elementos que les confieren propiedades y características que no poseen los aceros ordinarios al carbono.

#### **a) Aceros de alta resistencia y baja aleación**

Conocidos también como aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA). Contienen elementos de aleación como cobre, vanadio, níquel y molibdeno en concentraciones combinadas menores al 10% y poseen mayor resistencia mecánica que los aceros de bajo carbono ordinarios. Son susceptibles a aumento de resistencia por tratamiento térmico; además son dúctiles y mecanizables. Expuestos a la atmósfera, los aceros HSLA son más resistentes a la corrosión que los aceros al carbono ordinarios, a los que suelen reemplazar en aplicaciones donde la resistencia mecánica es crítica, como es el caso de los recipientes a presión o las tuberías para transporte de hidrocarburos.

Su límite elástico se encuentra entre los 300 - 760 MPa y su resistencia a la tracción está en el rango de 420 - 830 MPa. La mayoría de estos aceros se emplea en estado de suministro (estado de laminación en caliente o normalizado). La mayor resistencia de este tipo de aceros se debe a una combinación de mecanismos de refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y endurecimiento sub-estructural (a través de los sub límites de grano de la ferrita). Debido a esto, estos aceros no requieren altos contenidos de carbono para alcanzar una mayor resistencia mecánica, por lo que su soldabilidad se ve favorecida.

La tabla 3, muestra la composición para aceros al carbono y aceros y aceros de baja aleación.

### 2.2.2.3 Aceros de alta aleación

Los aceros considerados como aceros de alta aleación son aquellos que contienen más del 5% de elementos de aleación distintos al hierro y al carbono

**Tabla 3**

*Tramos de composición para aceros al carbono y aceros de baja aleación (Callister, 1995)*

Designación AISI/SAE	Tramos de composición (% en peso de elementos aleantes distintos del C)			
	Ni	Cr	Mo	Otros
10xx, al carbono				0.08-0.33S
11xx, fácil mecanizado				0.1-0.33S
12xx, fácil mecanizado				0.04-0.12P
13xx				1.6-1.9Mn
40xx			0.2-0.3	
41xx		0.8-1.1	0.15-0.25	
43xx	1.65-2	0.4-0.9	0.2-0.3	
46xx	0.7-2		0.15-0.3	
48xx	3.25-3.75		0.2-0.3	

Fuente: (Callister, 2000)

Estos aceros se distinguen por su composición química específica, la cual les confiere propiedades mecánicas y físicas mejoradas en comparación con los aceros de baja y media aleación.

Algunos de los elementos de aleación comunes que se encuentran en los aceros de alta aleación incluyen:

- Cromo (Cr): Mejora la resistencia a la corrosión y la dureza.
- Níquel (Ni): Aumenta la tenacidad y la resistencia a la corrosión.
- Molibdeno (Mo): Mejora la resistencia a la tracción, la dureza y la resistencia al desgaste.
- Vanadio (V): Aumenta la dureza y la resistencia al desgaste.

- Tungsteno (W): Mejora la dureza y la resistencia a altas temperaturas.
- Cobalto (Co): Aumenta la dureza y la resistencia al desgaste, especialmente a altas temperaturas.
- Titanio (Ti): Mejora la resistencia a la corrosión y la estabilidad a altas temperaturas.
- Manganeseo (Mn): Incrementa la resistencia a la tracción y la dureza.
- Silicio (Si): Mejora la resistencia y la elasticidad.

Ejemplos de aceros de alta aleación incluyen:

- Aceros inoxidables: Contienen cromo (generalmente más del 10.5%) y, a menudo, níquel, lo que les proporciona una excelente resistencia a la corrosión.
- Aceros rápidos (HSS): Contienen altos niveles de tungsteno, molibdeno, cobalto y vanadio, lo que les confiere una gran dureza y resistencia al desgaste, especialmente a altas temperaturas.
- Aceros para herramientas: Suelen contener aleaciones como el cromo, vanadio, molibdeno y tungsteno, que les proporcionan alta dureza y resistencia al desgaste.

Estos aceros se utilizan en aplicaciones donde se requieren propiedades específicas como alta resistencia a la corrosión, alta dureza, resistencia al desgaste y la capacidad de mantener sus propiedades a altas temperaturas.

### **2.3 Aceros Austeníticos al Manganeseo (Aceros Hadfield)**

Se seleccionó este tipo de acero para el desarrollo de la presente investigación porque es considerado un acero de alta aleación (por contener más del 10% de Mn), es de amplio uso en los diferentes tipos de industria, principalmente en la minería, construcción y agricultura, por lo que se ha seleccionado para el presente estudio.

El acero austenítico al manganeso fue desarrollado por Sir Robert Hadfield en 1882, por lo que fue denominado acero Hadfield. Son aleaciones no magnéticas extremadamente tenaces en las cuales la transformación martensítica de endurecimiento ha sido suprimida por una combinación de alto contenido de manganeso y carbono, y la precipitación de carburos por una alta velocidad de enfriamiento desde temperaturas de austenización.

Estos aceros están caracterizados por sus propiedades mecánicas como son: alta resistencia a la tracción y a la compresión, alta ductilidad y excelente resistencia al desgaste. El acero Hadfield es el único que combina alta resistencia y ductilidad con gran capacidad de endurecimiento por deformación y, usualmente, buena resistencia al desgaste. Los aceros austeníticos al manganeso presentan ciertas propiedades que tienden a restringir su uso, por ejemplo, son difíciles de maquinar y usualmente tienen esfuerzos de fluencia de 345 a 415 MPa (50 a 60 Ksi). Consecuentemente no son aptos para partes que requieren alta precisión durante el maquinado o que deben resistir deformación plástica cuando son sometidos a altos esfuerzos durante el servicio. Los aceros Hadfield tienen una composición nominal de 1.2%C y 12 a 13%Mn como elementos esenciales. Las aleaciones comerciales usualmente varían en el rango de 1 a 1.4%C y 10 a 14%Mn como lo establece la norma ASTM A128. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 231)

### ***2.3.1 Composición y Microestructura***

Muchas variaciones de los aceros al manganeso originales han sido propuestas, pero solo unas pocas han sido adoptadas como mejoras significativas. Estas usualmente incluyen variaciones en el contenido de carbono y manganeso, con o sin elementos aleantes adicionales tales como cromo, níquel, molibdeno, vanadio, titanio y bismuto. Las composiciones más comunes establecidas por la norma ASTM A128 son resumidas en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Tipos de aceros Hadfield y su composición química.*

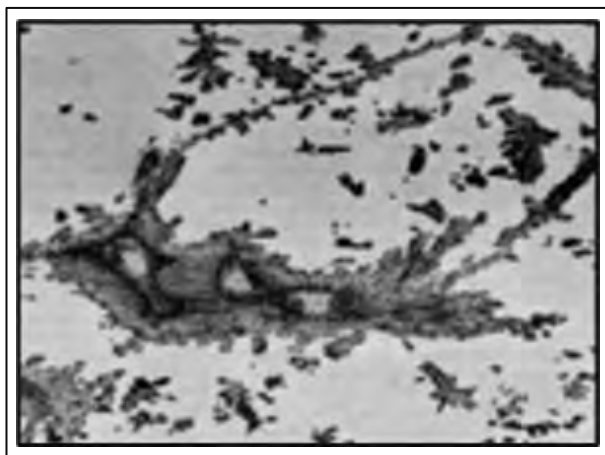
IDENTIFICACION		COMPOSICION QUIMICA							HB Dureza Brinell
Norma	Grado	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	% Mo	% P	
	A	1,05 - 1,35	11 mín.	1,00 máx				0,07 máx.	180
	B1	0,90 - 1,05	11,5 - 14,0	1,00 máx				0,07 máx	
	B2	1,05 - 1,20	11,5 - 14,0	1,00 máx				0,07 máx	
	B3	1,12 - 1,28	11,5 - 14,0	1,00 máx				0,07 máx	
ASTMA 128	B4	1,20 - 1,35	11,5 - 14,0	1,00 máx				0,07 máx	200
	C	1,05 - 1,35	11,5 - 14,0	1,00 máx		1,5 - 2,5		0,07 máx	
	D	0,7 - 1,30	11,5 - 14,0	1,00 máx	3,0 - 4,0			0,07 máx	
	E1	0,7 - 1,30	11,5 - 14,0	1,00 máx			0,9 - 1,2	0,07 máx	185
	E2	1,05 - 1,45	11,5 - 14,0	1,00 máx			1,8 - 2,1	0,07 máx	
	F	1,05 - 1,35	6,0 - 8,0	1,00 máx			0,9 - 1,2	0,07 máx	180

Fuente: (ASM Handbook, 1990)

Los aceros austeníticos al manganeso tienen microestructuras que son extremadamente sensibles al tamaño de la sección. Estos aceros son metaestables con solución sólida de carbono, manganeso y silicio en hierro gamma ( $\gamma$ ). Por lo tanto, el desarrollo de una microestructura simple de austenita depende de la rapidez y efectividad del temple en agua durante el tratamiento térmico. La microestructura es caracterizada por una matriz austenítica con carburos precipitados y pequeñas colonias de perlita resultado del rechazo del carbono por parte de la austenita durante el enfriamiento, En la figura 3, se observan granos de austenita (claro) con carburos precipitados (oscuro) atacada con picral al 4%. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007)

**Figura 3**

*Microestructura del acero Hadfield grado A. 100X.*

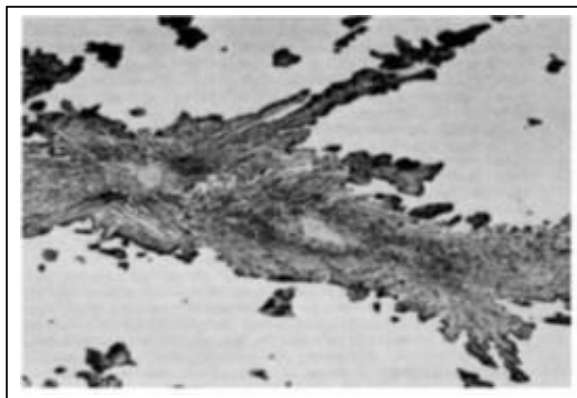


Fuente: (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 232),

Estos carburos nuclean en los límites de grano y en áreas Inter dendríticas dentro de los granos de austenita. Los carburos Inter dendríticos pueden ser masivos, especialmente en los puntos triples, y algunas veces son rodeados por zonas de carburos laminares en la que se observan carburos precipitados rodeados de carburos laminares. Ver figura 4, microestructura atacada con picral 4%.

**Figura 4**

*Microestructura acero Hadfield grado A, 200X.*



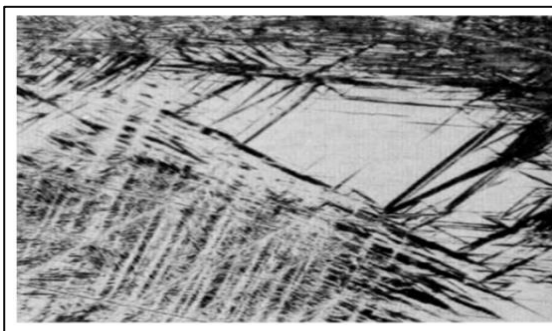


Fuente: (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 232)

Los aceros Hadfield son sometidos a tratamientos térmicos de endurecimiento, los cuales consisten en calentar a una temperatura lo suficientemente alta para disolver los carburos, seguido de un enfriamiento rápido en agua agitada a temperatura ambiente para retener una mayor cantidad de carbono en la solución sólida metaestable. Estas aleaciones son no magnéticas, sin embargo, debido a la pérdida de carbono y algo de manganeso desde la superficie durante la solidificación dentro del molde y durante el tratamiento térmico, algunas veces existe una capa magnética (martensita) sobre la superficie del metal, se observa en la figura 5 una capa de martensita formada durante la deformación como resultado de la descarburación de la austenita. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007)

### **Figura 5**

*Microestructura acero Hadfield grado A tratada térmicamente.*



Fuente: (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 232)

## **2.3.2 Propiedades Mecánicas del Acero Hadfield**

### **2.3.2.1 Resistencia al desgaste.**

Higuera y otros (2007). La principal propiedad mecánica de los aceros Hadfield es su gran resistencia al desgaste que fue atribuido a un rápido endurecimiento por deformación para lo cual se han propuesto varios mecanismos:

- Transformaciones que inducen tensiones como  $\gamma \rightarrow \alpha$  o  $\gamma \rightarrow \epsilon$ .
- Pares mecánicos.
- Interacción de dislocaciones con átomos de carbono en solución sólida, etc.

Su alta resistencia al desgaste está relacionada con la aleación con elementos de gran tendencia a la formación de carburos. Los aceros Hadfield son usualmente menos resistentes a la abrasión que las fundiciones blancas martensíticas o los aceros de alto carbono martensíticos, pero son mucho más resistentes que las fundiciones blancas perlíticas o aceros perlíticos.

### **2.3.2.2 Resistencia a la corrosión del acero hadfield.**

Una baja resistencia a la corrosión es una de las deficiencias de los aceros Hadfield pues se oxida rápidamente. Además, donde la corrosión y la abrasión están combinadas como son los ambientes mineros y ambientes de fábrica, el metal puede deteriorarse o ser disuelto a una velocidad ligeramente menor que un acero al carbono. Si la dureza o naturaleza no magnética de los aceros al manganeso es esencial para una aplicación marina, se debe proteger el metal con un galvanizado. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007)

Aunque se ha intentado mejorarlo con la adición de elementos como el cromo, no se obtuvieron resultados favorables debido a la formación y precipitación de carburos de cromo que conllevó a un deterioro en la resistencia al desgaste con una mejora no muy apreciable en la resistencia a la corrosión. La sustitución de carbono por nitrógeno provee una buena combinación de resistencia a esfuerzos y a la corrosión, sin embargo, se necesitaría una alta presión de nitrógeno gaseoso para alcanzar un contenido equivalente al del carbono en los aceros Hadfield. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007)

**Tabla 5***Propiedades Mecánicas de los Aceros Austeníticos al Manganeso (Hadfield)*

Dureza (HB)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Energía de Impacto (J)	Elongación (%)	Tenacidad (MPa.m <sup>1/2</sup> )
170 – 220	280 – 470	136	20-40	120

*Fuente:* (Bautista Rodríguez, López Baltazar, Martínez Gonzáles, Alvarado Hernández, & Baltazar Hernández, 2022)

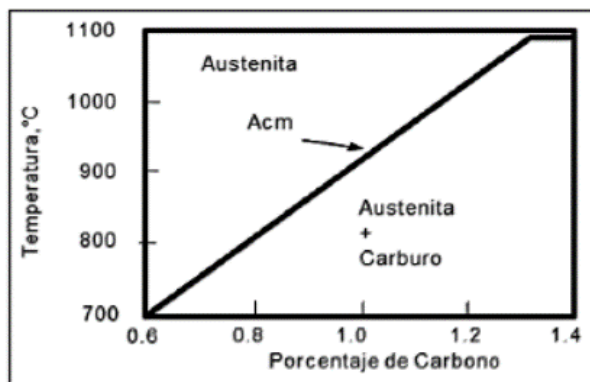
### **2.3.3 Efecto de Elementos Aleantes Sobre las Propiedades Mecánicas**

#### **a) Carbono y Manganeso.**

Las composiciones de la norma ASTM A128 no permite ninguna transformación austenítica cuando las aleaciones son templadas en agua desde temperaturas superiores a la línea Acm. Sin embargo, esto no restringe obtener menores valores de ductilidad en secciones gruesas debido a menores velocidades de temple. Esta pérdida de ductilidad de la aleación se debe a la formación de carburos a lo largo de los límites de grano y de otras áreas interdendríticas. Este fenómeno ocurre en casi todas las aleaciones comerciales excepto en las piezas muy pequeñas en las cuales las velocidades de enfriamiento son altas. La figura 6, muestra la temperatura Acm para un acero Hadfield con 13% de Mn con un contenido de carbono entre 0.6 y 1.4% C. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

**Figura 6**

*Solubilidad del carbono en un acero Hadfield.*

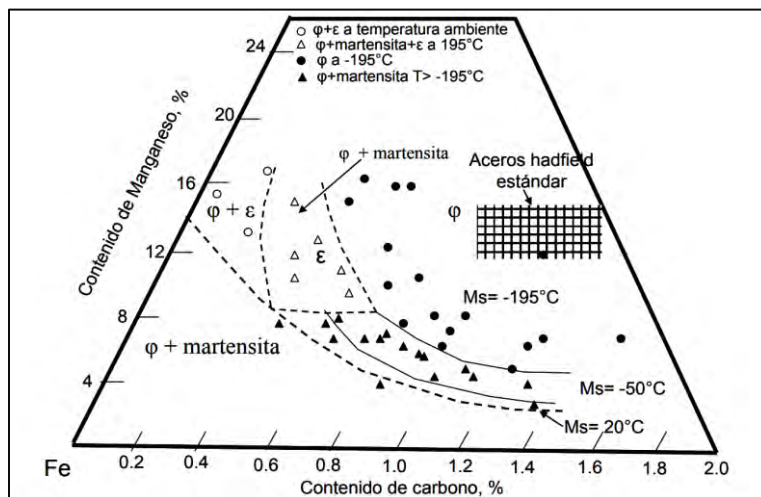


Fuente: (Higuera, Tristanco, & Florez, 2007, pág. 233)

En la figura 7, se muestra el efecto del carbono y manganeso sobre la temperatura  $M_s$ , temperatura en la cual comienza la transformación martensítica desde la fase austenítica con todo el carbono y el manganeso en solución sólida.

**Figura 7**

*Variación de la temperatura con el contenido de carbono y manganeso*



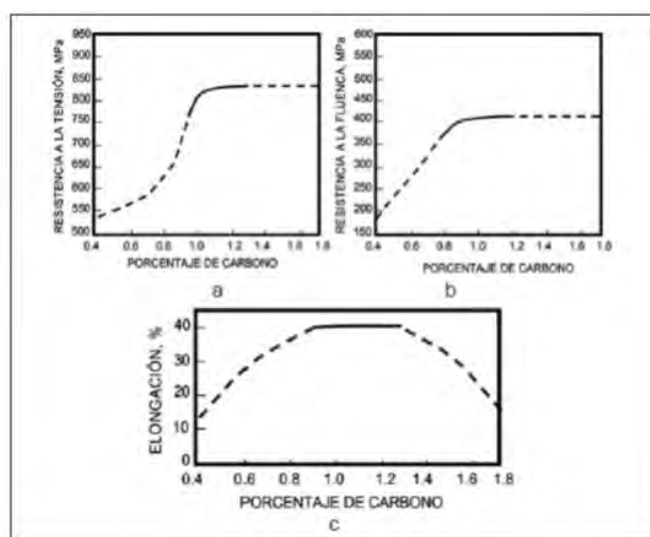
Fuente: (Higuera, Tristanco, & Florez, 2007, pág. 234)

El contenido de carbono incrementa la resistencia de los aceros austeníticos al manganeso por encima del rango del acero grado A de la norma ASTM A 128, hasta 1.05%C. En el rango entre 1.05 y 1.35%C se estabiliza la resistencia en 827 MPa (120Ksi), con un contenido de manganeso diferente, como se observa en la figura 8. Cualquier valor por fuera de este dato se atribuye al efecto del tamaño de grano en la fase austenítica.

El aumento en el porcentaje de carbono dificulta cada vez más la obtención de austenita saturada en carbono, por tanto, se van a presentar carburos en los límites de grano lo cual producirá reducción en la resistencia a la tensión y disminución en la ductilidad del material. Sin embargo, con el incremento en el porcentaje de carbono se aumenta la resistencia al desgaste del acero austenítico al manganeso. Si se disminuye simultáneamente el porcentaje de carbono y el de manganeso a rangos entre 0.53%C y 8.3% Mn o 0.62%C y 8%Mn el acero se endurece debido a la formación de martensita  $\alpha$  (BCC) Sin embargo, esta transformación no produce un aumento significativo en la resistencia al desgaste del material. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007)

### Figura 8

*Influencia del carbono sobre las propiedades mecánicas de un acero Hadfield.*



Fuente: (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 234)

El manganeso estabiliza la austenita retardando la transformación martensítica (pero no eliminándola).

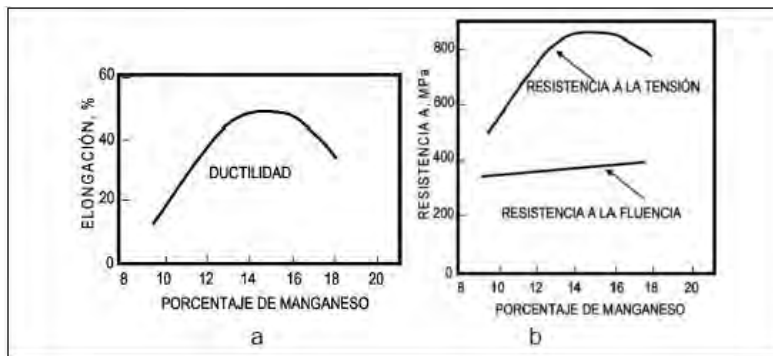
La Figura 9 muestra la influencia del contenido de manganeso sobre la resistencia y la ductilidad de un acero austenítico con un contenido de carbono de 1,15 %C. Se observa que el manganeso influye en baja proporción sobre la resistencia a la fluencia de los aceros austeníticos al manganeso. Sin embargo, en los ensayos de tracción, tanto la resistencia última como la ductilidad aumentan de manera significativa con el incremento del contenido de manganeso hasta aproximadamente un 14 %. Por encima de este valor, dichas propiedades presentan un leve decrecimiento (Higuera, Tristancho & Flórez, 2007).

El manganeso está presente en prácticamente todos los aceros comerciales y desempeña un papel fundamental en su comportamiento metalúrgico. Este elemento ensancha la región de estabilidad de la austenita ( $\gamma$ ), por lo que los aceros con contenidos superiores al 12 % de Mn presentan una estructura predominantemente austenítica. Asimismo, el manganeso disminuye la temperatura de formación de la perlita y reduce su contenido de carbono, al tiempo que incrementa la solubilidad del carbono en la austenita. Además, favorece la formación de carburos y endurece la ferrita, lo que conlleva una ligera reducción de su plasticidad. La solubilidad del manganeso en la austenita es prácticamente ilimitada, mientras que en la ferrita puede disolverse hasta

aproximadamente un 17 % (Higuera, Tristancho & Flórez, 2007).

### Figura 9

*Influencia del manganeso sobre el acero austenítico al manganeso.*



Fuente: (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 234).

Además, incrementa la resistencia a la tracción, el límite elástico, la resistencia a la fatiga y a la fluencia lenta, la forjabilidad, la resistencia al desgaste, la resistencia al revenido, la fragilidad del revenido, la tendencia al embastecimiento de grano, la formación de carburos y la dilatación térmica. En cambio, disminuye la maquinabilidad, la embutibilidad, las conductividades térmica y eléctrica y la sensibilidad a la fractura frágil. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007)

El manganeso disminuye las velocidades críticas de enfriamiento durante el temple; con más de un 3%Mn, el enfriamiento al aire produce estructuras bainíticas y, si el contenido es mayor estructuras martensíticas; de ahí que su efecto sobre la templabilidad sea mayor que el de otros aleantes comunes. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007)

### b) Silicio y fósforo

Un contenido de silicio de 1 a 2% Si puede ser usado para incrementar moderadamente el esfuerzo de fluencia, pero desde el punto de vista operativo se prefieren otros elementos para este propósito. Cuando se adicionan porcentajes por encima de 2.2 % Si se presenta una pérdida abrupta

en el límite de fluencia de los aceros austeníticos al manganeso, pero si los niveles de silicio son inferiores al 0.1% Si producen un decrecimiento en la fluidez durante la colada.

En cuanto al fósforo se considera una impureza excepto en los aceros en los que es deseable su efecto sobre la maquinabilidad y la resistencia a la corrosión; en estos casos, el contenido de fósforo puede ser hasta de 0.12%. En general el contenido de fósforo se debe mantener inferior al 0.035%, aunque las últimas investigaciones han demostrado que, en muchas aplicaciones, porcentajes de hasta 0.08% no son dañinos. Sin embargo, los porcentajes mayores producen fragilidad en frío, dada su tendencia a originar estructuras groseras y segregadas. El fósforo aumenta la dureza, pero disminuye la ductilidad y la tenacidad.

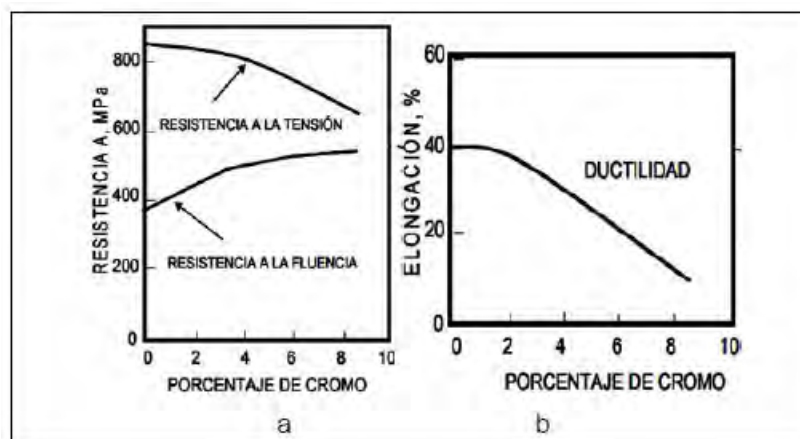
### **c) Cromo**

Adicionando a aceros con un contenido de carbono de 1.15%C, tanto el cromo como el molibdeno incrementan el esfuerzo de fluencia del material (ver figura 10). Aumentos muy significativos de cromo por encima del 2% reducen la ductilidad debido al incremento en la fracción en volumen de los carburos en la microestructura. El cromo provee resistencia a la corrosión atmosférica y al desgaste, sin embargo, el efecto no siempre es consistente y depende de aplicaciones individuales. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 234)



**Figura 10**

*Influencia del cromo sobre las propiedades mecánicas.*



Fuente: (Higuera, Tristanch, & Florez, 2007, pág. 235).

Debido al efecto estabilizante del cromo sobre los carburos de hierro, se deben utilizar temperaturas más altas durante los tratamientos térmicos con el fin de disolver los carburos previamente formados antes del temple en agua, en la figura 10 se observa la influencia del cromo sobre las propiedades mecánicas de un acero austenítico al manganeso con un contenido de carbono de 1.15%C. (Higuera, Tristanch, & Florez, 2007)

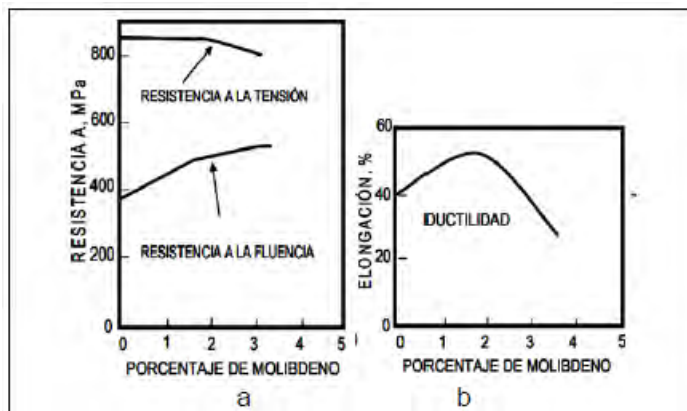
#### **d) Molibdeno**

Adiciones, usualmente de 0.5 a 2%Mo, son hechas para mejorar la dureza y resistencia al agrietamiento de aleaciones en condición de colada, además, sirve para aumentar el esfuerzo de fluencia (y posiblemente la dureza) de secciones sometidas a tratamientos térmicos. El molibdeno en solución efectivamente suprime la formación de carburos fragilizantes y de la perlita, aun cuando la austenita está expuesta a temperaturas por encima de 275°C durante la soldadura en servicio. El molibdeno en carburos primarios tiende a cambiar la morfología (ver figura 11), desde

las dendritas de austenita a una forma nodular menos perjudicial, especialmente cuando el molibdeno excede el 1.5%Mo. (Fabián, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 235)

### Figura 11

*Influencia del molibdeno sobre las propiedades mecánicas.*



Fuente: (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 235).

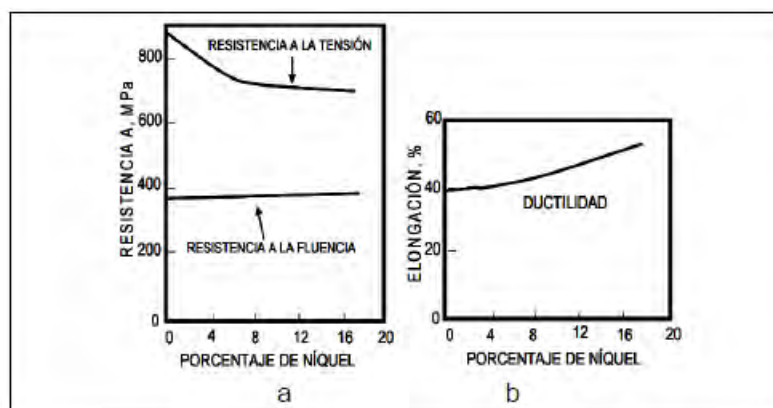
La adición de molibdeno en cantidades mayores al 1% puede incrementar la susceptibilidad de los aceros al manganeso a la fusión incipiente durante el tratamiento térmico. La fusión incipiente se refiere al fenómeno de licuefacción que ocurre debido a la presencia de constituyentes con bajo punto de fusión en áreas interdendríticas, esto puede ocurrir tanto dentro de los granos como a lo largo de los límites de grano. Esta tendencia es agravada por mayores niveles de fósforo ( $\%P > 0.05\%$ ), altas temperaturas (la cual promueve la segregación en la fundición) y altos niveles de carbono ( $\%C > 1.3\%$ ) en el acero. En la figura 11, se observa la Influencia molibdeno sobre las propiedades mecánicas de un acero austenítico al manganeso con un contenido de carbono de 1.15%C. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007)

### e) Níquel

En cantidades superiores al 4%, el níquel estabiliza la austenita debido a que es retenida en solución sólida. El níquel es particularmente efectivo para suprimir la precipitación de carburos laminares, los cuales se pueden formar entre 300 y 550°C. Por lo tanto, la presencia de níquel ayuda a retener las cualidades magnéticas en el acero, especialmente en las capas superficiales carburadas. Adiciones de níquel incrementan la ductilidad, disminuyen ligeramente el esfuerzo de fluencia y disminuye la resistencia a la abrasión de los aceros al manganeso. En la figura 12, se observa la influencia del níquel sobre las propiedades mecánicas de un acero austenítico al manganeso con un contenido de carbono del 1.15%C. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 234)

**Figura 12**

*Influencia del níquel sobre las propiedades mecánicas.*



Fuente: (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 235).

### f) Vanadio

Es un fuerte formador de carburos y su adición a los aceros al manganeso incrementa sustancialmente el esfuerzo de fluencia, pero con su correspondiente decrecimiento de la

ductilidad. El vanadio es usado en aceros al manganeso endurecibles por precipitación en cantidades de 0.5 a 2%. Debido a la estabilidad de los carbonitruros de vanadio, se recomienda utilizar temperaturas de austenización mayores 1120°C a 1175°C antes del envejecimiento (usualmente entre 500°C a 650°C).

#### **g) Cobre**

Como el níquel, el cobre en cantidades de 1 a 5% ha sido usado en aceros austeníticos al manganeso para estabilizar la austenita. El efecto del cobre sobre las propiedades mecánicas no ha sido claramente establecido. Algunos reportes indican que puede tener efectos fragilizantes el cual puede ser debido a la limitada solubilidad del cobre en la austenita. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 234)

#### **h) Bismuto**

Mejora la maquinabilidad de los aceros austeníticos al manganeso especialmente cuando el acero presenta niveles de manganeso superiores al 13%.

#### **i) Titanio**

Puede reducir el contenido de carbono en la austenita por la formación de carburos muy estables. El titanio puede también neutralizar un poco el efecto del fósforo. Altos niveles de este elemento pueden resultar en severas pérdidas de ductilidad.

#### **j) Azufre**

El contenido de azufre en los aceros al manganeso raramente influye en sus propiedades mecánicas debido a que el manganeso elimina el azufre en forma de inclusiones. Sin embargo, se recomienda mantener el azufre lo más bajo posible para minimizar el número de inclusiones en la

microestructura que serán sitios potenciales para la nucleación de grietas por fatiga en servicio. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

#### **2.3.4 Aplicaciones del Acero Astm A128**

El acero Hadfield se utiliza en los campos de movimiento de tierra, minería, perforación de pozos, siderurgia, trituradoras de roca, molinos, dientes de pala y bombas para manejar grava. También tiene usos militares en vehículos blindados, en piñones, engranajes, ruedas, cintas transportadoras, placas de desgaste y zapatas.

Entre las posibilidades de fabricación de piezas, repuestos, y recubrimiento de equipos tenemos: Conos y Mantos de Chancadoras, Recubrimientos de Equipos Pesados, Muelas, Tolvas, canales de transportación, Martillos y Platos de Trituradoras, Placas y Guías de desgastes, Vías de Ferrocarril, Carros Mineros, Secciones de Transición, Revestimientos de Molinos de alto impacto, Cargadores Frontales, Retroexcavadoras.

Sin embargo, la fabricación de mantos de chancadora cónica (Bowl – Mantle) han adquirido vital importancia, por su uso en la conminución de minerales; ya que las exigencias son mayores y las condiciones de chancado cada día son más extremas, necesitando que se manufacturen piezas de fundición de acero al manganeso de la más alta calidad, para un eficiente desempeño.

### **2.4 Soldadura**

La Sociedad Americana de Soldadura (AWS) define la soldadura como “una coalescencia localizada de metales o no metales producida mediante el calentamiento de los materiales a las temperaturas de soldadura requeridas. Con o sin la aplicación de presión, o mediante la aplicación de presión sola y con o sin el uso de metal de aportación”. En lenguaje menos técnico, una

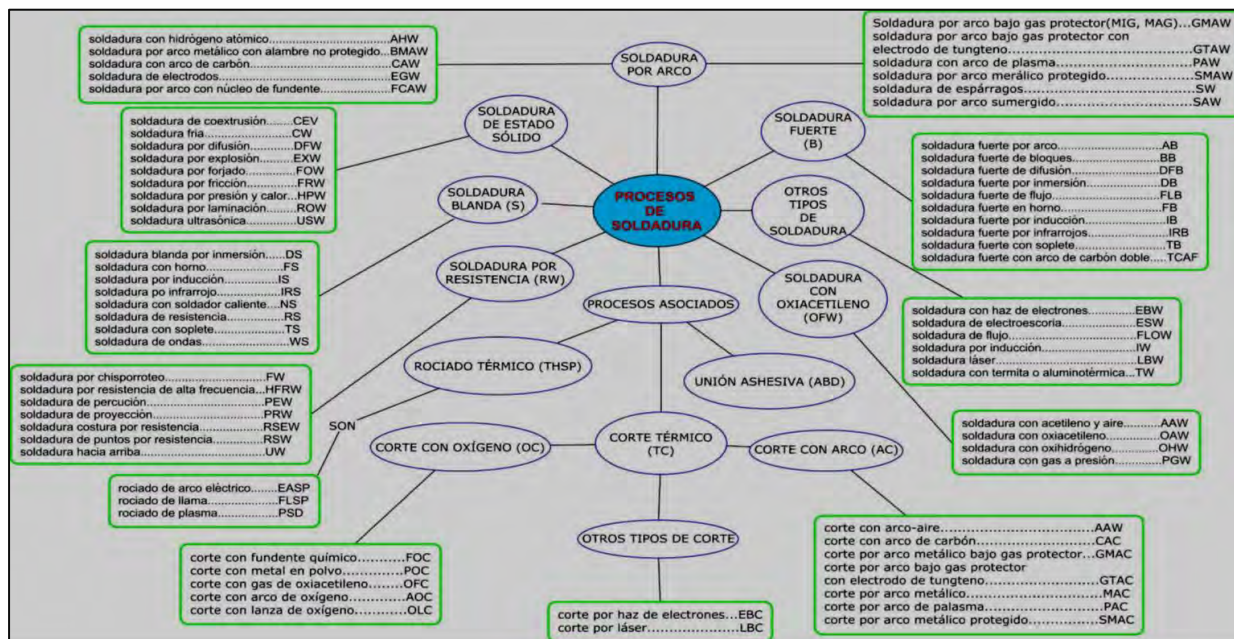
soldadura se produce cuando las piezas separadas de material que se van a unir se combinan y forman una pieza al ser calentadas a una temperatura lo suficientemente alta como para causar ablandamiento o fusión y fluyen juntas (Jeffus, 2009 , pág. 5). La soldadura no es sólo un proceso de unión, sino también, es un proceso de mantenimiento, reparación y corte de piezas. El material de aportación y/o los electrodos raramente tienen la misma o parecida composición química que el material base. (Society, 2012)

### 2.4.1 Clasificación de los Procesos de Soldadura

El número de procesos de soldadura ha crecido en los últimos años. Estos procesos se diferencian principalmente en el modo en que se aplican el calor, la presión o ambas cosas y en el tipo de equipo utilizado. En la figura 13 se muestra una clasificación general de los procesos de soldadura.

**Figura 13**

*Esquema principal de procesos de soldadura.*



Fuente: (Jeffus, 2009 , pág. 9)

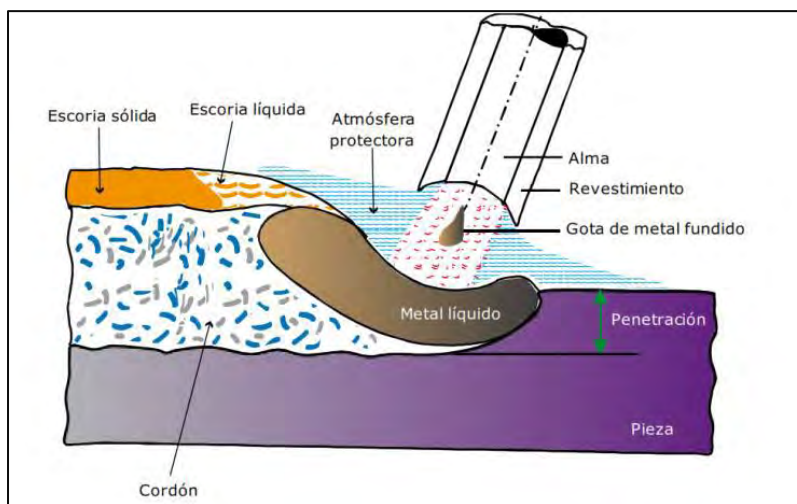
## 2.4.2 Soldadura Por Arco con Electrodo Revestido (Smaw)

### 2.4.2.1 Definición y antecedentes.

Según la AWS este proceso es denominado como SMAW, La soldadura manual es el más extendido entre todos los procedimientos de soldadura. La soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido o simplemente “soldadura eléctrica”, como la conocemos en nuestro medio, es un proceso de unión por fusión de piezas metálicas. Mediante el establecimiento de un circuito eléctrico cerrado al poner en contacto la pinza porta electrodos, conectada a un generador de corriente con el metal base. En la figura 14 se observa la soldadura por arco con electrodo revestido y el resto de sus componentes. (Rodríguez Pérez, 2013, pág. 37).

**Figura 14**

*Soldadura por arco con electrodo revestido.*



Fuente: (Alonso, 2012, pág. 39)

Los primeros electrodos revestidos fueron fabricados en 1912, unos años antes ya se soldaba con electrodos desnudos que no tenían ningún revestimiento, producían soldaduras de baja calidad y no se utilizaban mucho. En esas fechas tenía mejores prestaciones la soldadura

oxiacetilénica que todavía hoy se utiliza, pero en pocos años los electrodos revestidos se fabricaron en serie bajando su precio.

Actualmente no son muy distintos de aquellos: los fabricantes han mejorado mucho la composición del alma y revestimiento, pero básicamente es un objeto heredado del siglo pasado y las técnicas de utilización son semejantes. (Society, 2012)

#### **2.4.2.2 Usos y ventajas del soldeo por arco con electrodos revestidos.**

En el soldeo manual por arco con electrodos revestidos se pueden soldar no solo acero al carbono sino también, aceros aleados, aceros inoxidable, fundiciones de hierro y algunos metales más como aluminio, cobre, níquel.

- Ventajas:

- ✓ Sirven tanto para soldadura en espacios abiertos (siempre que no llueva o haga viento fuerte) como para naves cerradas o talleres.
- ✓ Los equipos necesarios no son tan caros y se fabrican tan pequeños que son muy cómodos de utilizar, comparados con los otros procesos manuales.
- ✓ Con la protección del revestimiento se puede prescindir de gases y otros sistemas auxiliares. El avance en las prestaciones del electrodo permite que se utilice en soldaduras de más alto nivel como el de recipiente y tuberías de alta presión.
- ✓ Se puede utilizar con espesores desde 1,5–2mm y es productivo hasta algo más de 30mm.
- ✓ Proceso versátil debido a la disponibilidad y variedad de electrodos.
- ✓ Se puede emplear en cualquier posición, en locales abiertos y en locales cerrados, incluso con restricciones de espacio. No requiere conducciones de agua de refrigeración, ni



tuberías o botellas de gases de protección, por lo que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía. (Society, 2012)

- Limitaciones:

- ✓ No es posible soldar metales de alta sensibilidad al oxígeno ya que los gases que desprende el revestimiento son insuficientes para su protección. Algunos de ellos titanio, circonio, tántalo, etc.
- ✓ No es posible soldar metales de bajo punto de fusión (con electrodo) como: plomo, estaño, zinc, etc.
- ✓ Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición y por la necesidad de retirar la escoria, por lo que en determinadas aplicaciones ha sido desplazado por otros procesos.
- ✓ Requiere gran habilidad por parte del soldador.
- ✓ No es aplicable a espesores inferiores a 1.5 mm
- ✓ La tasa de deposición es inferior a la obtenida por los procesos que utilizan electrodo continuo, como el soldeo con alambre tubular o soldeo MIG / MAG. Esto se debe a que el electrodo solo puede consumirse hasta una longitud mínima (unos 50 *mm*), cuando se llega a dicha longitud el soldador tiene que retirar la colilla del electrodo no consumida e insertar un nuevo electrodo.
- ✓ Aunque en teoría se puede soldar cualquier espesor por encima de 1.5 *mm* en el proceso. (Society, 2012)

#### **2.4.2.3 Principios del proceso.**

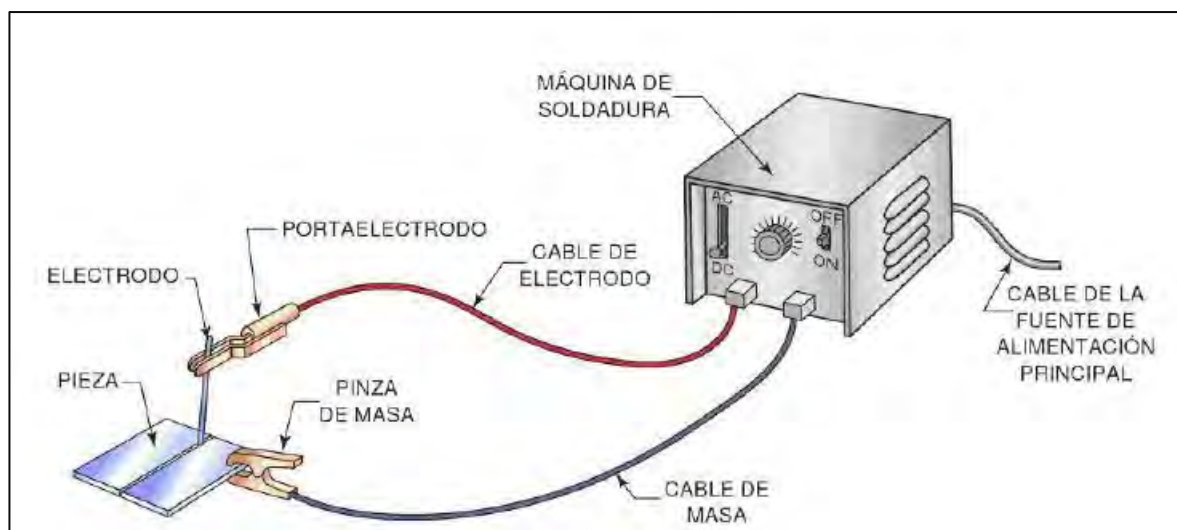
Para lograr la unión, se concentra el calor de un arco eléctrico establecido entre los bordes de las piezas a soldar y una varilla metálica, llamada electrodo, produciéndose una zona de fusión que, al solidificarse, forma la unión permanente.

El circuito se cierra momentáneamente, tocando con la punta del electrodo a la pieza de trabajo, y retirándola inmediatamente a una altura preestablecida,  $1,5 - 3\text{mm}$  formándose de esta manera un arco. El calor funde un área restringida del material base y la punta del electrodo, formando pequeños glóbulos metálicos, cubiertos de escoria líquida, los cuales son transferidos al metal base por fuerzas electromagnéticas, con el resultado de la fusión de dos metales y su solidificación a medida que el arco avanza, (Soldexa, 2021, pág. 22), según puede verse en la figura 15. Al establecerse el arco rascando el electrodo (como una cerilla) sobre el metal salta la chispa. La temperatura que se genera ronda los  $5000^{\circ}\text{C}$ , tanto el extremo del electrodo como la zona afectada de la pieza se funde. A medida que el electrodo se va consumiendo el soldador hace avanzar el baño de fusión a lo largo de la unión a soldar.

Mientras tanto el calor se va repartiendo por el metal base, bajando la temperatura por debajo del punto de fusión, por lo que la parte del baño que deja de estar bajo el arco se va solidificando, formando lo que llamamos cordón de soldadura.

Durante el tiempo de soldeo el electrodo se va fundiendo en forma de pequeñas gotas que se van aportando al baño de fusión consumido éste hasta que no queda de él.

Cuando por un material conductor pasa una corriente eléctrica, se produce en él un calentamiento. Los gases que se desprenden del revestimiento protegen el baño de fusión del contacto con el oxígeno y el nitrógeno del aire. En el interior del revestimiento está el alma o núcleo, una varilla que siempre ha de ser de la misma composición que el metal base y puede variar en longitud y diámetro. (Society, 2012)

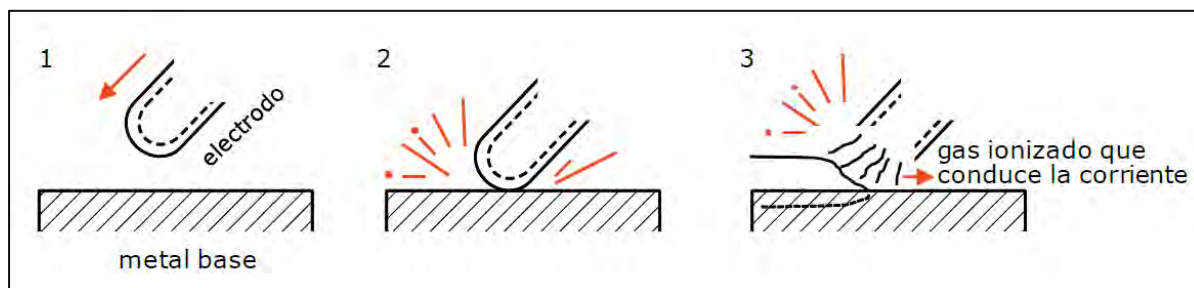
**Figura 15***Diagrama del proceso SMAW.*

Fuente: (Jeffus, 2009 , pág. 10)

El arco es la fuente de calor que utilizan muchos de los procesos de soldeo ya que proporciona altas concentraciones de calor y radiación. Podemos decir que es una descarga de corriente normalmente alta que se transmite desde el electrodo a la pieza a través de los gases que produce el revestimiento del electrodo. Esto se logra al raspar el electrodo sobre la pieza, el calentamiento que se produce ioniza el gas, se hace buen conductor. Al separar el electrodo, el gas ionizado permite el paso de la corriente estableciendo el arco. La presencia de materiales fácilmente ionizables como sodio y potasio en el revestimiento facilita esta reacción. El gas ionizado y conductor recibe el nombre de columna de plasma y la corriente la forman electrones constituyendo un flujo que sale del polo negativo del grupo de soldadura (cátodo) hacia el polo positivo del mismo (ánodo). Tal como se observa en la figura 16. (Society, 2012)

**Figura 16**

*Gas ionizado como conductor de corriente.*



Fuente: (Marcos, 2015, pág. 2)

#### **2.4.2.4 Transferencia metálica.**

Al fundirse el electrodo se forman una serie de gotas de metal fundido junto con el revestimiento de tamaño variable, en función del tipo de electrodo y del tipo de corriente. El tamaño de las gotas es fundamental para definir la calidad de soldadura del electrodo. Las gotas finas producen cordones de soldadura más lisos, cuanto más finas son, más estable es el arco. Esto es especialmente importante para soldadura con corriente alterna. Los electrodos que arden en forma de gotas finas funden más rápidamente, con lo que mejoran los tiempos de soldeo. Por otro lado, las gotas gruesas permanecen colgadas de la punta del electrodo más tiempo, con lo que se retarda su fusión. Esta característica hace aconsejable el uso de este tipo de electrodos para poder soldar aberturas anchas o soldar en posición vertical y en sentido descendente.

#### **2.4.2.5 Fuentes de poder.**

Son máquinas eléctricas, de las cuales se exige además de la suficiente potencia, las características favorables y necesarias para el fácil encendido y mantenimiento del arco eléctrico, características que son indispensables para una buena soldadura.

Estas características son:

- Asegurar una alimentación constante de corriente, que permita mantener el arco estable.
- Transformar el voltaje de la red eléctrica a un voltaje en vacío, que permita iniciar el arco (voltaje en vacío es el que suministra la maquina antes de iniciar el arco: varía de 30 a 90 *voltios*).
- Una vez iniciado el arco, debe permitir una conversión automática e instantánea del voltaje en vacío a un voltaje de trabajo, que permita mantener el arco (voltaje de trabajo es el que proporciona la maquina cuando el arco este encendido; varia de 17 a 45 *voltios*).
- Permitir la regulación de la intensidad de corriente o amperaje necesario para soldar; ese amperaje varía según diámetro, espesor de la pieza, posición del trabajo, diámetro del electrodo, etc.

Además de las características señaladas, una fuente de poder o máquina de soldar debe reunir las condiciones de resistencia y solidez, que le permita trabajar aun estando sometida a las más duras exigencias y según las condiciones en que se desenvuelve la labor del soldador. (Soldexa, 2011)

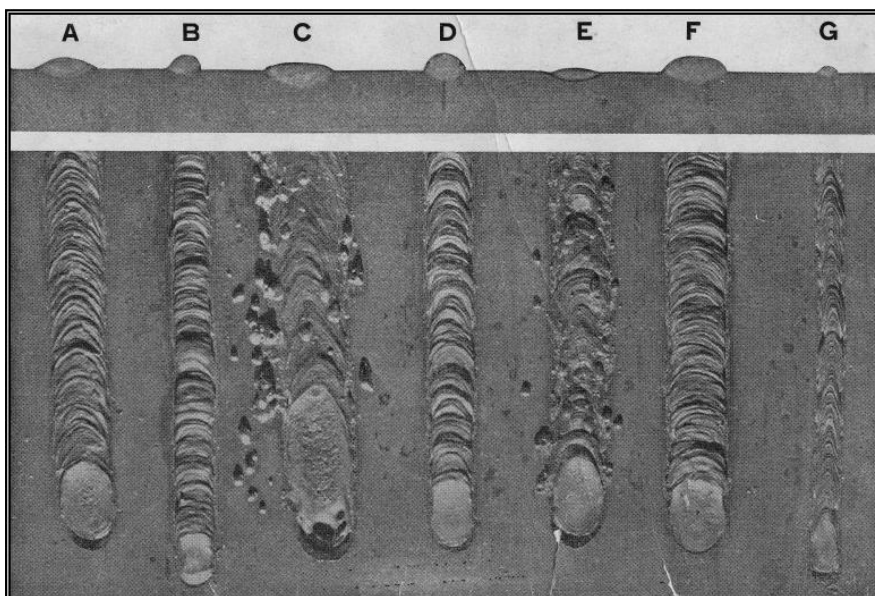
#### **2.4.2.6 Variables del proceso.**

Las Variables de soldadura son los factores que pueden ser ajustados para controlar una soldadura. Para obtener los mejores resultados en el proceso, es necesario conocer el efecto de cada variable sobre las diversas características o propiedades del proceso de soldadura, tal como se observa en la figura 17.

**Figura 17**

*Características del acero y de la soldadura bajo diferentes condiciones.*

	A	B	C	D	E	F	G
Amperaje	Normal	BAJO	ALTO	Normal	Normal	Normal	Normal
Voltaje	Normal	Normal	Normal	BAJO	ALTO	Normal	Normal
Velocidad	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	BAJA	ALTA
Fusión del electrodo	Buena	Buena	Profunda	Pobre	Se funde poco metal base	Normal	Normal



Fuente: (Oerlikon, 2008, pág. 71)

Caraballo (2014), indica que ciertas variables pueden ser continuamente reguladas o fácilmente medidas constituyen controles mejores que aquéllas que no pueden ser medidas o sólo pueden ser modificadas indirectamente, para iniciar el proceso de soldadura, es necesario definir previamente algunas de estas variables, a las que denominaremos:

- **Variables Preseleccionadas:** Entre ellas se encuentran el diámetro del alambre-electrodo, composición química del mismo. Los criterios que permiten una adecuada selección de estas variables son: tipo de material a ser soldado, su espesor, posición de soldadura, régimen de transferencia metálica deseada y propiedades mecánicas necesarias.

- **Variables Primarias:** Son las que controlan el proceso después que las Variables Preseleccionadas, controlan la forma del cordón, la estabilidad del arco, el régimen de soldadura (velocidad de aporte y cantidad de metal adicionado) y la calidad de soldadura. Estas variables son: tensión de arco, corriente de soldadura y la velocidad de avance. (Caraballo, 2014, pág. 2).

#### **2.4.2.7 Efecto de las variables en el proceso SMAW.**

Para poder realizar correctamente una soldadura hay que considerar varias variables que se deben ajustar antes de su realización.

##### **a) Diámetro del electrodo**

En general, se tenderá a seleccionar el mayor diámetro posible en función del espesor del material a soldar, la posición y el tipo de unión, que son los parámetros de los que depende la selección del diámetro del electrodo. Se consigue así un mayor aporte de material.

El aporte térmico depende, directamente de la intensidad, tensión del arco y velocidad de desplazamiento, parámetros dependientes del diámetro del electrodo; siendo mayor cuanto mayor es el diámetro del mismo, en las aplicaciones o materiales donde se requiera que el aporte térmico sea bajo se deberán utilizar electrodos de pequeño diámetro. En general, se deberán emplear:

- Electrodos de poco diámetro (2,2.5,3.25,4 *mm*) en: punteado, uniones de piezas de poco espesor, primeras pasadas, soldaduras en posición cornisa, vertical y bajo techo y cuando se requiera que el aporte térmico sea bajo.
- Electrodos de mayores diámetros para: uniones de piezas de espesores medios y gruesos, soldaduras en posición plana y recargues.

- La utilización de grandes diámetros puede dar lugar a un cordón de soldadura excesivo, innecesario y costoso económicamente, pudiendo también actuar como concentrador de tensiones debido a un perfil inadecuado. (Lincoln Electric, 2013, pág. 15)

#### **b) Intensidad de soldeo**

Esta variable es fundamental ya que condiciona el aporte térmico. Por ejemplo, en diámetros pequeños se necesitan intensidades menores y por lo tanto un menor aporte térmico. La intensidad es una variable que depende del tipo de junta y de la posición de soldeo. Una vez iniciado el arco, podemos ajustar la intensidad en función del tipo de baño que se obtenga:

- Si es grande quiere decir que hay un exceso de intensidad. Se deberá reducir.
- Si el baño es pequeño falta intensidad, que deberá aumentarse. (Alonso, 2012, pág. 70)

Cada electrodo, en función de su diámetro, posee un rango de intensidades en el que puede utilizarse, en ningún caso se deben utilizar intensidades por encima de ese rango ya que se producirían mordeduras, proyecciones, intensificación de los efectos del soplo magnético e incluso grietas. (Lincoln Electric, 2013, pág. 15)

#### **c) Longitud de arco**

La longitud del arco es la distancia entre la punta del electrodo y el metal que se va a soldar. La longitud del arco a utilizar depende del tipo de electrodo, su diámetro, la posición de soldeo y la intensidad. En general, debe ser igual al diámetro del electrodo, excepto cuando se emplee el electrodo de tipo básico, que deberá ser igual a la mitad de su diámetro.

Es conveniente mantener siempre la misma longitud del arco, con objeto de evitar oscilaciones en la tensión e intensidad de la corriente y con ello una penetración desigual. Un arco demasiado corto puede ser errático y producir cortocircuitos durante la transferencia de metal, un



arco demasiado largo perderá direccionalidad e intensidad, además el gas y el fundente generados por el revestimiento no son tan eficaces para la protección del arco y del metal de soldadura, por lo que se puede producir porosidad y contaminación del metal de soldadura con oxígeno e hidrógeno.

#### **d) Velocidad de soldeo**

No existe una regla matemática para regular la velocidad de desplazamiento ya que depende de la habilidad del soldador que debe equilibrar su velocidad de soldadura con el resto de los parámetros. No obstante:

- Cuanto mayor es la velocidad, menor es la anchura del cordón y menor su penetración, menor es el aporte térmico y más rápidamente se enfriará la soldadura, afectando su estructura metalúrgica final y como consecuencia directa a sus propiedades mecánicas finales (carga, rotura, impacto y durezas). (Alonso, 2012, pág. 50)
- Si la velocidad es excesiva se producen mordeduras, se dificulta la retirada de la escoria y se favorece el atrapamiento de gases (produciéndose poros). (Lincoln Electric, 2013, pág. 18)
- Con una baja velocidad el cordón será ancho y convexo y poca penetración, debido a que el arco reside demasiado tiempo sobre el metal depositado, (efecto “colchón”), en vez de concentrarse sobre el metal base.
- “En la práctica, hay que intentar que el arco vaya ligeramente adelantado al baño, pero depende de la posición de soldadura”. (Alonso, 2012, pág. 70)

### e) Corriente de soldadura

La selección del tipo de corriente en la soldadura depende principalmente del electrodo a utilizar, así como de la disponibilidad de energía en el lugar de trabajo. La corriente continua (CC) es la más empleada en soldadura, aunque actualmente existe un número creciente de electrodos diseñados para operar con corriente alterna (CA). En la Tabla 6 se presenta una comparación entre ambos tipos de corriente (Alonso, 2012, p. 70).

“Desde el punto de vista de los costes de soldadura, la CA es más barata, pero como este factor tiene cada vez menos importancia en el coste total, no tiene relevancia a la hora de seleccionar el tipo de corriente”. (Alonso, 2012, pág. 70)

**Tabla 6**

*Comparación entre corriente continua y corriente alterna.*

Parámetro	Corriente Alterna	Corriente Continua
Cebado de arco	No es fácil especialmente en diámetros pequeños, se debe añadir sustancias para facilitar el cebado.	Fácil
Mantenimiento del arco	Debido al cambio de polaridad es más difícil de mantener estable el arco.	Fácil de mantener el arco.
Tipo de electrodo	No se puede utilizar con todos los electrodos. El revestimiento debe contener sustancias que restablezcan el arco.	Válida para todo tipo de electrodos.
Caída de tensión en los cables	La caída de tensión es pequeña por lo que es especialmente adecuada para el punto de soldadura esté alejado de la fuente de alimentación.	Los cables han de ser tan cortos como sea posible por la gran caída de tensión.
Posiciones de soldeo	Especialmente adecuada para todas las posiciones con el electrodo adecuado.	Es de fácil uso en posición para secciones gruesas.
Salpicaduras	Es más abundante.	Escasas
Soplo magnético	Prácticamente inexistente.	El efecto es muy acusado, especialmente cerca de los bordes o de más. Aumenta con la intensidad.

Fuente: Alonso, C. (2012). Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto. Cano Pina Ceysa (pág. 56)

De una forma más genérica, las principales ventajas e inconvenientes de cada tipo de corriente son:

- Todos los tipos de electrodos pueden usarse con CC, no así los de CA.
- La soldadura de chapa fina es más difícil con CA.
- El transformador es menos caro que el correspondiente rectificador. Tiene una mayor eficiencia que el convertidor o rectificador y sus pérdidas en circuito abierto son muy pequeñas.
- En C.A. prácticamente es inexistente el efecto del soplo magnético.

“Actualmente existen electrodos en los que, salvo para altas intensidades, este efecto es relativamente pequeño”. (Soldexa, 2011, pág. 23)

#### 2.4.2.8 Ventajas y Desventajas del proceso SMAW.

En la tabla 7, se describen las ventajas y desventajas del proceso SMAW.

**Tabla 7**

*Ventajas y Desventajas del proceso SMAW.*

Proceso de soldadura (SMAW).	
No	Ventajas
1	Utiliza equipos simples, económicos y fácil de transportar
2	Los electrodos se encargan en suministrar el material de aporte y la protección del arco.
3	No es necesario de gases de protección adicional
4	No presenta sensibilidad a la corriente del aire, como se presenta en los que usan gases de protección.
5	Se realiza en área de acceso restringido.
6	Es amigable con la mayoría de los metales aleados.
Desventajas	
1	No es un proceso adecuado para metales o aleaciones que presenten un punto de fusión muy bajo como en el caso de plomo y el estaño.
2	Presenta limitaciones al soldar metales radiactivos como el titanio, zirconio, tantalio y columbio.
3	Es un proceso que depende de la habilidad del soldador para obtener una buena soldadura.
4	En algunas ocasiones hay un desperdicio de electrodos, ya que en algunos casos no se los consume en su totalidad.
5	El rendimiento es bajo, así como también su velocidad de depósito.

Fuente; American Welding Society. 2015.

#### 2.4.3 Material de Aporte Para el Proceso SMAW

En este proceso de soldadura se utilizan electrodos revestidos; según el material que están formados se clasifican en:

- **Según su núcleo:**

- ✓ Electrodos para aceros al carbón (bajo y alto).
- ✓ Electrodos para aceros inoxidable o de aleación especial.
- ✓ Electrodos para hierro fundido.
- ✓ Electrodos para metales no ferrosos (aluminio, bronce, etc.).

- **Según su revestimiento:**

- ✓ Celulósico. Es aquel que tiene alto contenido de celulosa en el revestimiento, se caracteriza por presentar máxima penetración, solidificación rápida, buenas características de resistencia, elasticidad y ductilidad.
- ✓ Rutílico. Su nombre se debe al alto contenido de rutilo (óxido de titanio) y se caracteriza por su mediana penetración, arco suave.
- ✓ Básico o de bajo hidrógeno. El revestimiento del electrodo no tiene humedad (hidrógeno) y se caracteriza por su alta penetración, máxima resistencia en los depósitos, alta ductilidad, alta resistencia a los impactos a baja temperatura.
- ✓ Hierro en polvo. Son parte de los electrodos que contienen una cantidad de hierro en polvo, se caracteriza por su alta penetración, relleno rápido, suaviza la energía del arco (Sandoval, 2019)

#### **2.4.3.1 Características de los diferentes tipos de electrodos.**

En la tabla 8, se resumen las características de los tipos de electrodos existentes.

**Tabla 8**

*Características de los diferentes tipos de electrodos.*

TIPO	VENTAJAS	INCONVENIENTES	APLICACIONES
Ácido	* Bajo coste * Arco estable * Corriente CA y CC * Escoria fácil de eliminar * Elevada desoxidación * Fácilmente conservables	* Baño fluido * Escaso efecto de limpieza * Elevado aporte de hidrogeno * Escoria no se puede refundir	* Soldaduras en horizontal * Aceros bajos en carbono y con poca presencia de impurezas * Soldaduras económicas y con características mecánicas suficientes (buena robustez pero riesgo de grietas)
Rutilo	* Bajo coste * Arco estable * Fácil cebado * Corriente CA y CC * Cordón estéticamente mejor * Fácilmente conservables	* Baño fluido * Escaso efecto de limpieza * Elevado aporte de hidrogeno	* Soldaduras en horizontal * Soldaduras en vertical y en esquinas para pequeños espesores * Aceros bajos en carbono y con poca presencia de impurezas * Soldaduras estéticamente buenas pero características mecánicas suficientes (buena robustez pero riesgo de grietas)
Celulósico	* Elevada penetración * Elevada manejabilidad * Escoria reducida	* Son necesarios generadores CC con elevada tensión en vacío * Cordón irregular * Elevado aporte de hidrogeno	* Soldaduras en todas las posiciones, incluida la vertical descendiente * Tubos o donde no sea posible el cordón al reverso * Soldaduras en las que el acceso del electrodo resulta crítico * Aceros bajos en carbono con escasa presencia de impurezas
Básico	* Óptima limpieza del material * Aporte de hidrogeno muy reducido * Baño frío	* Arco poco estable * Escoria no se puede refundir y de difícil eliminación * Arco corto y difícil de trabar * Cebado difícil * Generadores CC de difícil conservación	* Soldaduras en todas las posiciones, incluso con grandes espesores * Elevadas velocidades de depósito * Soldaduras de elevada calidad mecánica, incluso con materiales que contengan impurezas

Fuente; American Welding Society. 2015.

#### 2.4.3.2 Funciones del revestimiento.

Los electrodos tienen una gran importancia ya que interviene, fundamentalmente, en el proceso de soldadura desde distintos aspectos. (Alonso, 2012, pág. 39)

##### a) Físicos:

- Preserva el metal fundido de la contaminación de los componentes del aire (oxígeno y nitrógeno, fundamentalmente), ya sea por formación de gases protectores, o por formación de escoria que cubre las gotas y el baño.

- Permite la formación de escoria que, por diferencia de densidades, flota sobre el metal fundido y se solidifica rápidamente formando una “costra” que protege el baño y que, por ser mala conductora térmica, limita el enfriamiento solidificándose por encima del cordón. (Alonso, 2012, pág. 39)

Una soldadura irregular puede producir inclusiones de escoria dentro del cordón dando lugar a defectos de soldadura. Es fundamental, por lo tanto, que el soldador observe la evolución de la escoria para evitar posibles defectos.

#### **b) Metalúrgicos:**

- Afina el grano del metal fundido de la unión modificando sustancialmente el comportamiento mecánico de la unión.
- Controla la velocidad de enfriamiento del cordón evitando que sea muy rápido.

#### **c) Eléctricos**

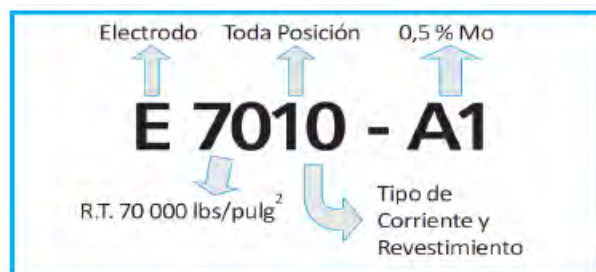
- Facilita el cebado del arco, ya que favorece el proceso ionizando el aire entre el electrodo y las piezas, mejorando así su conductividad.
- Facilita estabilidad al arco, que depende principalmente del estado de ionización de los gases comprendidos entre el electrodo y la pieza.

#### **2.4.3.3 Interpretación de las normas para electrodos.**

Cada uno de estos electrodos lleva un código impreso en el revestimiento. En la figura 18, se observa la designación según la norma norteamericana AWS.

## Figura 18

*Designación del electrodo – Según AWS.*



Fuente: (Soldexa, 2021, pág. 44).


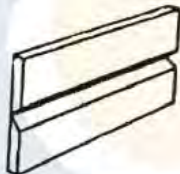

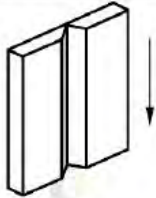
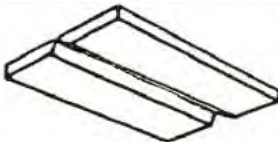
- La letra *E* designa el producto: Electrodo para soldadura eléctrica manual.
  - Los primeros 2 dígitos en un número de 4 dígitos o 3 dígitos en un número de 5 dígitos señalan la resistencia mínima a la tracción, sin tratamiento térmico post soldadura:
    - $E\ 60XX = 60\ 000\ lbs/pulg\ mínimo$
    - $E\ 70XX = 70\ 000\ lbs/pulg$
    - $E\ 110XX = 110\ 000\ lbs/pulg$
  - El último dígito, íntimamente relacionado con el penúltimo, es indicativo del tipo de corriente eléctrica y polaridad en la que mejor trabaja el electrodo e identifica a su vez el tipo de revestimiento, el que es calificado según el mayor porcentaje de materia prima contenida en el revestimiento; por ejemplo el electrodo *E-6010* tiene un alto contenido de celulosa en el revestimiento aproximadamente un 30% o más; por ello es que a este electrodo se le clasifica como un electrodo de tipo celulósico. Similar clasificación se da en los otros electrodos.
  - El tercer dígito indica la posición en la que se puede soldar satisfactoriamente con un electrodo.
- (Soldexa, 2021, pág. 45)

## 2.5 Posiciones de Soldeo en las Juntas Soldadas

En las figuras 19, 20 y 21, se muestra las diferentes posiciones de soldadura según las normas las normas EN ISO 4063 y AWS A3.0.

**Figura 19**

*Posiciones de soldadura en chapas a tope*

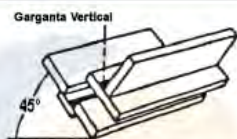
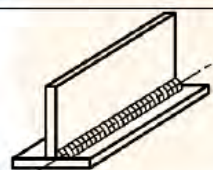

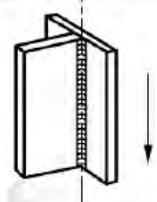
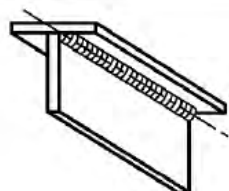
Soldaduras de chapas a tope			
Norma		Descripción	Croquis
EN ISO 4063	AWS A3.0.		
PA	1G	Chapa horizontal. Soldadura plana.	
PC	2G	Chapa vertical Soldadura en cornisa	
PF	3G ascendente	Chapa vertical Soldadura vertical ascendente	
PG	3G descendente	Chapa vertical Soldadura vertical descendente	
PE	4G	Chapa horizontal Soldadura bajo techo	

Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)



**Figura 20**

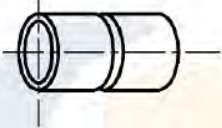
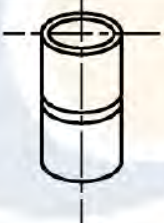
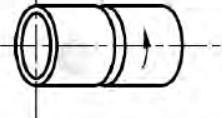
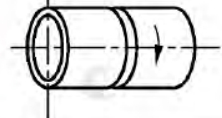
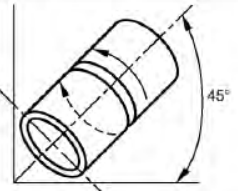
*Posiciones de soldadura en chapas en ángulo.*

Soldaduras de chapas en ángulo			
Norma		Descripción	Croquis
EN ISO 4063	AWS A3.0.		
PA	1F	Chapa inclinada 45°. Soldadura plana acunada.	
PB	2F	Chapa horizontal Soldadura en rincón	
PF	3F ascendente	Chapa vertical Soldadura vertical ascendente	
PG	3F descendente	Chapa vertical Soldadura vertical descendente	
PD	4F	Chapa horizontal Soldadura bajo techo	

Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

**Figura 21**

*Posiciones de soldadura en tubos a tope.*

Soldaduras de tubos a tope			
Norma		Descripción	Croquis
EN ISO 4063	AWS A3.0.		
PA	1G	Tubería horizontal rotando Soldadura plana	
PC	2G	Tubería vertical fija Soldadura en cornisa	
PH	5G ascendente	Tubería horizontal fija Soldadura plana, en vertical y bajo techo	
PJ	5G descendente	Tubería horizontal fija Soldadura plana, en vertical y bajo techo	
H-L045	6G ascendente	Tubería fija a 45° con la horizontal	

Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

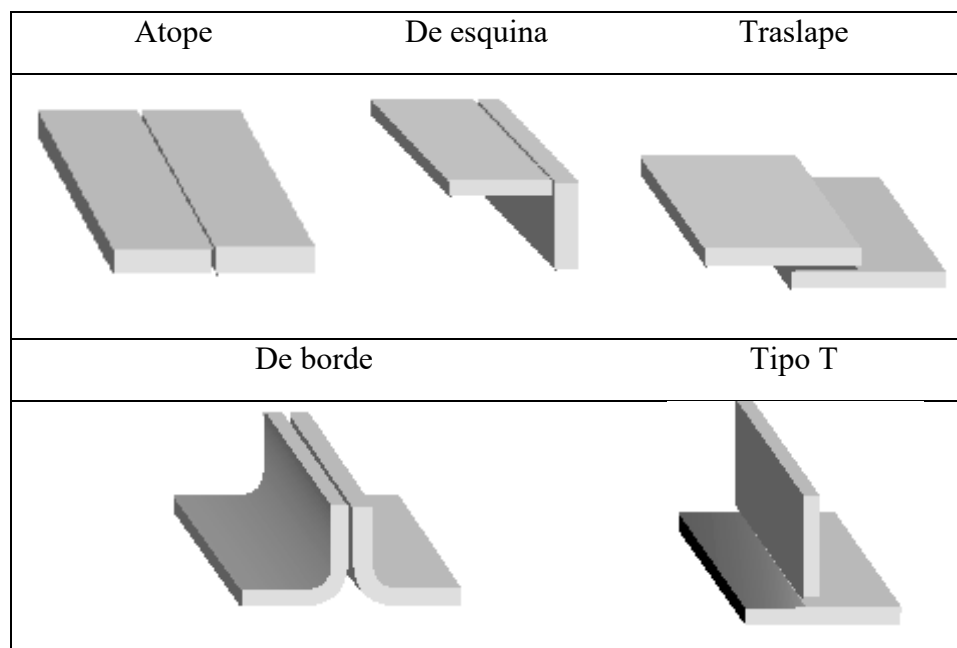
## 2.6 Tipos de Juntas

Cuando las piezas de acero son llevadas a la forma de junta, ellas pueden asumir una de las cinco configuraciones presentadas en la Figura 22. Los tipos de juntas son las descripciones de posiciones relativas de los materiales que van a ser unidos y no implica un tipo específico de

soldadura. (Masabanda, 2009)

**Figura 22**

*Tipos de junta.*



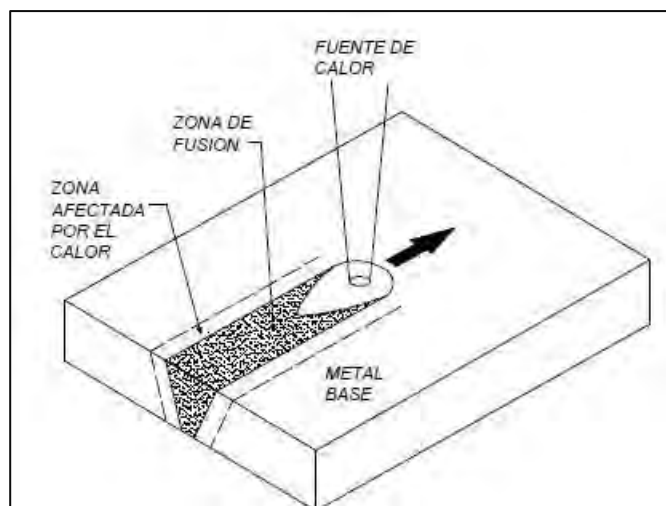
Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

## 2.7 Zonas Metalúrgicas de la Soldadura

“En soldadura se identifican tres zonas, estas son: Zona de Fusión (ZF), también conocida como metal de aporte; Zona afectada por el Calor (ZAC); y Metal Base (MB)”, estas zonas se observan en la figura 23. (Fosca, 2007).

**Figura 23**

*Principales zonas de la soldadura.*



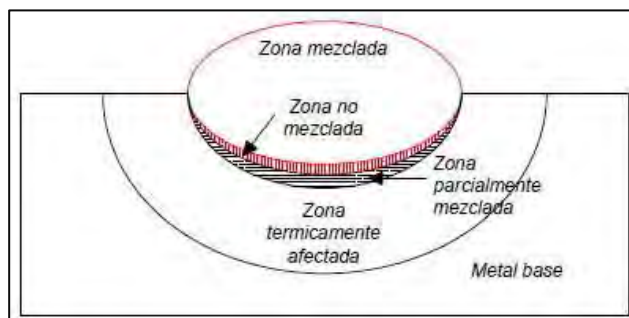
Fuente: (Pérez Cargua & Pullas Rea, 2009)

### **2.7.1 Zona de Fusión**

“Es la zona formada solamente por el metal que se solidifica desde el estado líquido. Durante la fusión se producen transformaciones químicas, físicas y estructurales. Se diferencian tres regiones en la zona de fusión”, ver la figura 24. (Fosca, 2007)

**Figura 24**

*Regiones de la zona de fusión.*



Fuente: (Pérez Cargua & Pullas Rea, 2009)

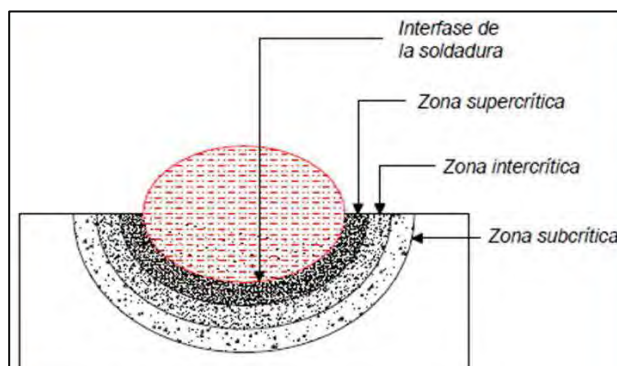
- Zona mezclada: Abarca la mayor parte del cordón de soldadura y es el resultado de la combinación completa del metal base con el metal de aporte en el poso de soldadura.
- Zona no mezclada: Es una capa adyacente a la línea de fusión. (Pérez Cargua & Pullas Rea, 2009)
- Zona parcialmente fundida: Se encuentra en el metal base. Esta región corresponde a la transición entre la ZAC y la ZF. (Fosca, 2007)

### 2.7.2 Zona Afectada por el Calor (ZAC)

En esta zona se producen cambios microestructurales en estado sólido debido a que experimenta temperaturas suficientemente altas. Estos cambios microestructurales afectan las propiedades mecánicas y metalúrgicas de la soldadura. La ZAC de la soldadura en un acero se divide en tres regiones: supercrítica, intercrítica y subcrítica, estas zonas se observan en la figura 25.

**Figura 25**

*Regiones de la zona afectada por el calor.*



Fuente: (Pérez Cargua & Pullas Rea, 2009)

“En ese sentido, el tamaño de la ZAC es una indicación de la magnitud de cambios estructurales. Para predecir las propiedades de esta zona, debe conocerse la cantidad, magnitud y crecimiento del grano y el ciclo térmico de la soldadura”. (Fosca, 2007)

Además, la región supercrítica se divide en dos regiones: el de crecimiento de grano y el de refinamiento de grano.

### **2.7.3 El Metal Base**

Es la región donde no ocurre cambio micro estructural, aunque el ciclo térmico impuesto por la soldadura puede producir tensiones residuales de contracción longitudinal y transversal.

## **2.8 Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco**

Los factores que influyen son:

### **a) Aporte de calor (heat input).**

“El input térmico es la energía aportada por un proceso de soldadura cuando se realiza un cordón por unidad de longitud, es expresado en Joules por milímetro (J/mm). Para procesos de soldadura por arco eléctrico, el input térmico es estimado por la ecuación 1.”. (Fosca, 2007)

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$H_{net}$  = Calor suministrado (j/mm)

$I$  = Intensidad de corriente (A)

$V$  = Tensión eléctrica (V)

$v$  = Velocidad de soldeo (mm/seg)

La ecuación 1 permite conocer la energía bruta aportada por la máquina ( $H$ ). Sin embargo, parte de ésta se pierde antes de llegar a la soldadura, debido a procesos de radiación, convección y conducción en el arco y en la pieza (A.Garcia, 2010). En ese sentido, es de interés el cálculo de la energía neta aportada ( $H_{net}$ ), que es el producto del input térmico bruto por el rendimiento del proceso de soldadura, como se muestra en la ecuación 2 (Fosca, 2007) .

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} \times f \quad Ec. 2.$$

Donde:

$f$ : Eficiencia térmica

La eficiencia térmica de los diferentes procesos se detalla en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Eficiencia térmica de los procesos de arco.*

Proceso	Eficiencia
GTAW	20 – 50 %
GMAW	70 – 85 %
SMAW	70-80 %
SAW	90 – 99 %

Fuente: García, 2010:84

**b) Temperatura inicial de la chapa (o temperatura de precalentamiento).**

Es la temperatura a la cual el metal ha de ser precalentado antes de soldar.

**c) Geometría de la soldadura.**

La geometría de la soldadura se refiere al espesor de la pieza, la forma y dimensión del depósito de soldadura y el ángulo entre las piezas a unir.

#### **d) Características térmicas del material.**

Está relacionado con la conductividad térmica del material.

- Cuanto más baja sea la conductividad térmica, más pronunciada será la distribución de temperaturas máximas. En otras palabras, la zona afectada térmicamente será menor.
- Cuanta más alta sea la conductividad térmica del metal, más rápido se enfriará después de la soldadura.
- Cuanta más alta sea la conductividad térmica, más corto será el tiempo de exposición a elevada temperatura

#### **e) Diámetro del electrodo.**

Para un diámetro mayor de electrodo se requerirá, mayor aporte de calor para fundirlo.

Este factor es de poca importancia, pero influye en el tamaño de la fuente de calor.

Finalmente, se debe tener en cuenta que determinados rangos de temperatura provocan en el metal transformaciones microestructurales que afectan las propiedades mecánicas de la unión soldada. Generalmente, para el caso de los aceros, los cambios metalúrgicos se producen tras la exposición a temperaturas entre la crítica inferior (723 °C) y la temperatura de fusión (1480°C). Cuando se realiza una soldadura, las regiones de la pieza que alcancen valores entre los límites arriba indicados, experimentarán cambios

### **2.9 Zona Afectada Por El Calor (ZAC)**

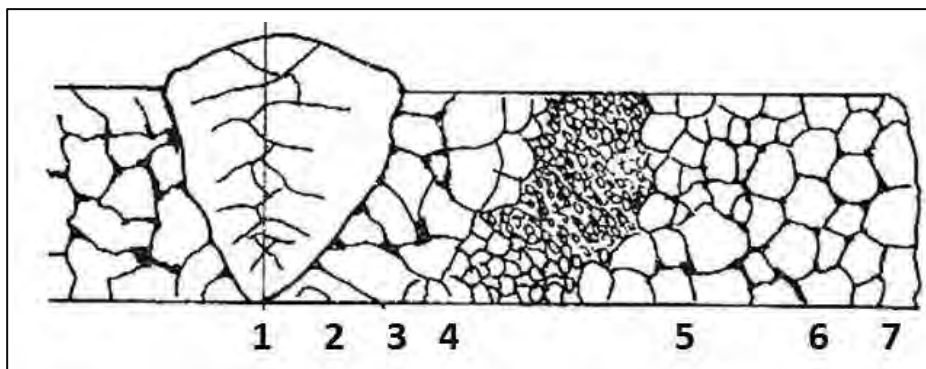
La zona afectada por el calor es una formación que se da por procesos de soldadura de metales en donde las temperaturas pico son demasiado bajas para fundir el material, pero también lo suficientemente altas para producir cambios significativos en la microestructura y por



lo tanto en las propiedades del material. En la figura 26, se observa las zonas dentro de la ZAC.

**Figura 26**

*Zonas dentro de la ZAC.*



Nota: En la figura se observa: 1) Metal depositado; 2) Fusión Incompleta; 3) Campo de sobrecalentamiento; 4) Campo de Normalizado; 5) Recristalización incompleta; 6) Zona de Recristalización 7) Zona de fragilidad azul.

### **2.9.1 Cálculo del Ancho de la ZAC**

Uno de los empleos más interesantes de la ecuación que nos da la temperatura máxima en un punto, es el cálculo de la anchura de la ZAC por la soldadura. Sin embargo, para calcular la anchura con exactitud debe identificarse, el extremo de la ZAC más alejado de la soldadura mediante un valor máximo de la temperatura en dicho extremo, este valor de la temperatura tiene, a su vez, que corresponder con algún cambio estructural o de las propiedades del material que se suelda.

A pesar de que la ecuación del máximo de temperatura es de gran utilidad, es importante no olvidar las limitaciones existentes sobre su aplicación. La ecuación se aplica en procesos de pasadas únicas de penetración completa, soldeo o corte térmico, con independencia del espesor de la chapa. De hecho, también se aplica a cualquier soldadura por arco de penetración completa con menos de 4 pasadas. La ecuación 3 puede aplicarse sobre la base de una por pasada, sin

embargo, la temperatura entre pasadas, aquella a la cual la zona de soldadura se enfría entre una y otra pasada, puede considerarse como un valor de  $T_0$  en la ecuación del máximo de temperatura. (Fosca, 2007)

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{T_{max} - T_0} \right) - \left( \frac{1}{T_{fusion} - T_0} \right) \right] \quad Ec. 3$$

## 2.10 Dilución

Durante la soldadura por fusión, el metal de cada una de las partes a unir y el aporte (si se utiliza) se funden conjuntamente formando el baño de fusión o metal de soldadura. Tras la posterior solidificación, el metal de soldadura resultante tendrá una sola fase o una mezcla de dos fases. Para cualquier composición de metal de aporte dada, los cambios en el procedimiento de soldadura pueden causar variaciones en la dilución. En la figura 21, se muestra esquemáticamente las zonas de un depósito de soldadura para el cálculo de la dilución. (Fosca, 2007)

Para calcular la dilución, también se puede relacionarla dilución con la tasa de deposición, muy útil para el proceso SMAW. La ecuación que relaciona es la siguiente:

$$Dilucion (\%) = \frac{W_b}{W_b + W_e} \times 100 \quad Ec. 4$$

Donde:

$W_b$  = masa del metal base fundido que se mezcla en el cordón

$W_e$  = masa del metal de aporte (electrodo) fundido depositado

### 2.10.1 Relacionando con la Tasa de Deposición

La tasa de deposición se refiere a la velocidad con la que el electrodo deposita metal útil sobre la unión, generalmente expresada en kg/h o g/s.

Si expresamos la masa del electrodo depositado por unidad de tiempo como:

$m_e$  = tasa de deposición (kg/s)

Y la masa del metal base fundido por unidad de tiempo como:

$m_b$  = tasa de fusión del metal base (kg/s)

Entonces la dilución puede expresarse así:

$$Dilucion (\%) = \frac{m_b}{m_b + m_e} \times 100 \quad Ec.5$$

## 2.11 Composición Química del Cordón de Soldadura

En cuanto a la composición química del cordón de soldadura es preciso conocer las relaciones de dilución y las composiciones químicas del metal base y de aporte.

En ese sentido la composición de un elemento de aleación específico en el cordón de soldadura diluido se calcula mediante la ecuación.

$$X_w = (D_A)X_A + (D_B)X_B + (1 - D_T)(D_F) \quad Ec.6$$

Donde:

$X_w$  = Porcentaje promedio del elemento X en el depósito de soldadura

$X_A$  = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base A

$X_B$  = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base B

$D_A$ = Porcentaje de dilución del metal base A, expresado en decimal

$D_B$  = Porcentaje de dilución del metal base B, expresado en decimal

$D_T$ = Porcentaje de dilución total, expresado en decimal.

Para pases subsiguientes (segundo, tercero,etc),aplicamos la relación siguiente:

$$X_w = (D_A)(X_A) + (D_B)(X_B)(1 - D_T) (X_F) \dots \dots \dots \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

$X_w$ = Es el porcentaje promedio del elemento X en el metal de soldadura.

$X_A$ = Es el porcentaje promedio del elemento X en el material base A.

$X_B$ = Es el porcentaje promedio del elemento X en el material base B.

$X_F$ = Es el porcentaje promedio del elemento X en el material base F.

$D_A$ = Es el porcentaje de dilución por el material base A, expresado como decimal.

$D_B$ = Es el porcentaje de dilución por el material base B, expresado como decimal.

$D_T$ = Es el porcentaje de dilución total por los materiales base A y B, expresado como decimal.

## **2.12 Discontinuidades en el Cordón de Soldadura**

### **2.12.1 Fisuras**

Las fisuras, es la discontinuidad más crítica debido a que se caracteriza por ser una discontinuidad lineal y sus extremos presentan geometrías agudas, por lo que tienden a crecer y propagarse, en especial en elementos sometidos a cargas de fatiga. Las fisuras se generan cuando las cargas aplicadas a los elementos soldados exceden su límite de resistencia a la rotura ( $S_{ut}$ ), esto

puede suceder al momento de soldar, inmediatamente después de soldar, o cuando el elemento es sometido a la carga que va a soportar, la presencia de concentradores de esfuerzos produce que la carga en ese punto supere el (Sut) del material y por consiguiente la aparición de una fisura, los concentradores de esfuerzos son generados por discontinuidades superficiales y Subsuperficiales.

#### **2.12.1.1 Fisuras en caliente y fisuras en frío.**

Las fisuras en caliente ocurren cuando el metal se encuentra en proceso de solidificación, encontrándose inicialmente a una elevada temperatura, la propagación de las fisuras es intergranular. Las fisuras en frío ocurren después de que el material se ha enfriado hasta llegar a la temperatura elemento soldado es sometido a condiciones de servicio, la propagación de las fisuras puede ser intergranular o transgranular.

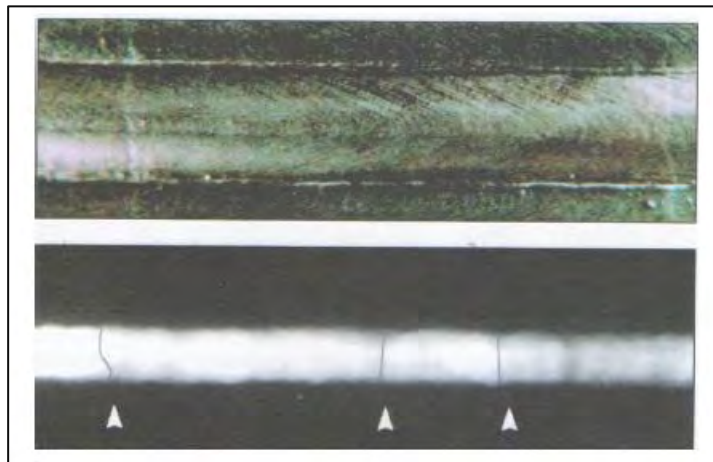
#### **2.12.1.2 Fisuras de acuerdo a la dirección de propagación.**

De acuerdo a la dirección respecto al eje longitudinal de la soldadura, las fisuras que se encuentran paralelas al cordón de soldadura se las denomina fisuras longitudinales, y las fisuras que se encuentran perpendiculares al cordón de soldadura se las denomina fisuras transversales. Las fisuras longitudinales pueden resultar de esfuerzos de contracción transversales en la soldadura o de esfuerzos asociados con las condiciones de servicio del elemento soldado, como se puede observar en la figura 27.

**Figura 27***Fisura longitudinal*

Fuente: (Bundy & Hobart, 2010)

Las fisuras transversales son ocasionadas generalmente por esfuerzos de contracción longitudinales en la soldadura, que actúan en metales base o en soldaduras de baja ductilidad. En la figura 28 se puede observar la radiografía de un cordón de soldadura que presenta fisuras transversales.

**Figura 28***Fisura Transversal.*

Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-4)

### 2.12.1.3 Fisuras de acuerdo a su ubicación.

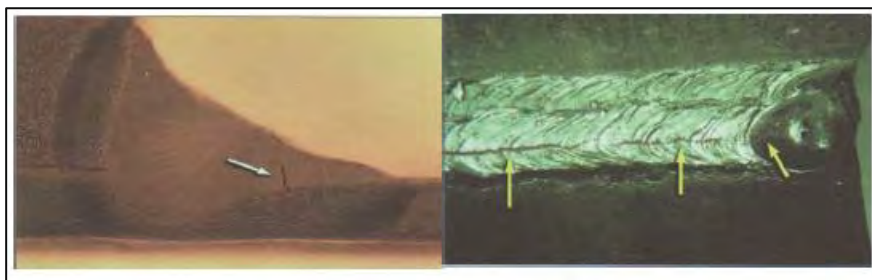
#### 2.12.1.3.1 Fisuras de garganta.

Se extienden a través de la soldadura a lo largo de la garganta del cordón o el camino más corto de la sección transversal del cordón, son fisuras longitudinales y se las considera generalmente fisuras en caliente.

En la figura 29 se puede observar una fisura de garganta que se extiende por todo el cordón de una soldadura a filete.

### Figura 29

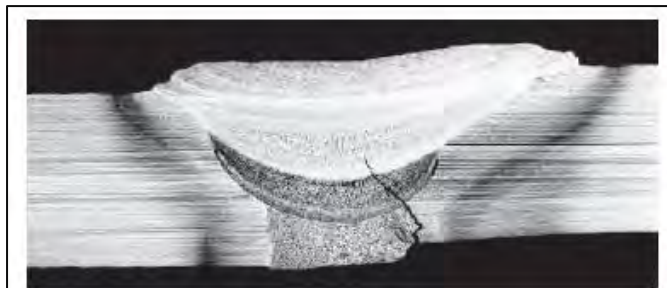
*Fisura de garganta.*



Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-5

#### 2.12.1.4 Fisuras de raíz.

Usualmente son longitudinales, su propagación puede ser en el material base como en el cordón de soldadura, se las denomina fisuras de raíz porque se inician en la raíz de la soldadura o en la superficie de la raíz del cordón de soldadura. Se consideran fisuras en caliente, ya que resultan de un inapropiado alineamiento o preparación de la junta, por ejemplo, grandes aberturas de raíz en las juntas producen concentración de esfuerzos que a su vez generan fisuras de raíz. En la figura 30 se puede apreciar una fisura de raíz producto de un inapropiado alineamiento entre los elementos a soldar.

**Figura 30***Fisura de raíz.*

Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008).

#### **2.12.1.5 Fisuras de tobillo.**

Son fisuras en el metal base, las cuales se propagan desde el tobillo del cordón de soldadura, varias son las causas que las provocan, juntas con exceso de sobremonta, convexidad en el cordón de soldadura, combinados con una microestructura menos dúctil en la zona afectada por el calor y junto con cargas de servicio a las que se somete el material provocan las fisuras de tobillo, como las de la figura 31.

**Figura 31***Fisura de tobillo.*

Fuente: (AWS, Visual Inspection Workshop, 2008, Pág. 2-16)

#### **2.12.1.6 Fisuras de cráter.**

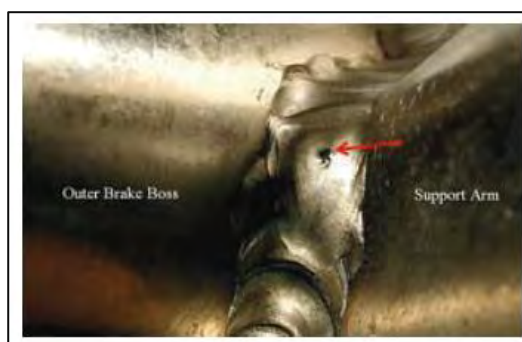
Se generan al finalizar el cordón de soldadura cuando la técnica para cortar el arco eléctrico no es la apropiada, el charco soldadura se solidifica de una manera inadecuada y se solidifica dando



la apariencia de un cráter por la contracción que sufre el metal al solidificarse, la geometría que se produce sumado los esfuerzos de contracción del metal forman fisuras en el cráter o a su vez redes de fisuras que tiene como punto de origen el centro del cráter con un arreglo radial que se las conoce comúnmente como fisuras tipo estrella. Ocurren al momento en el cual el metal soldado se encuentra en estado de solidificación, por tal motivo se las considera como fisuras en caliente. En la figura 32 se puede apreciar una fisura de cráter al final del cordón de soldadura.

### **Figura 32**

*Fisura de cráter.*



Fuente: (AWS, Visual Inspection Workshop)

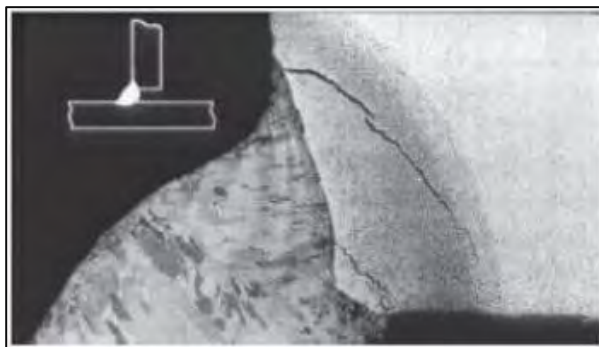
#### **2.12.1.7 Fisuras debajo del cordón.**

Estas se localizan en la zona afectada por el calor, y son discontinuidades subsuperficiales lo cual hace difícil detectarlas por inspección visual, sin embargo, tienden a propagarse hacia la superficie. Se las conoce como fisuras retardadas debido a que su propagación a la superficie se completa después de varias horas de terminado el cordón de soldadura, por lo tanto, la inspección se debe realizar después de 48 a 72 horas, en especial en aceros de alta dureza y baja ductilidad. Se originan por la presencia de Hidrógeno en el metal de soldadura, el cual proviene del material de relleno, material base, de la atmósfera que rodea el arco eléctrico o de contaminación orgánica en la superficie del metal. Cuando el metal está caliente puede retener una gran cantidad de iones de hidrógeno, pero al momento de solidificarse los iones tienden a moverse hacia los bordes de los

granos en la zona afectada por el calor, posteriormente se combinan entre sí y forman una molécula de hidrógeno, la cual ocupa un volumen mayor y si el material presenta una baja ductilidad, la presión causada por la molécula de hidrogeno puede producir una fisura debajo del cordón. En la figura 33 se puede apreciar las fisuras debajo del cordón de soldadura en una junta tipo “T”.

### **Figura 33**

*Fisura debajo de las capas del cordón de soldadura*



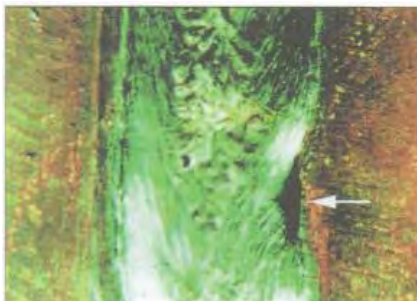
Fuente: (AWS, Visual Inspection Workshop)

#### **2.12.2 Falta de Fusión**

Es una discontinuidad en la cual como su nombre lo dice existe una fusión incompleta entre el metal de soldadura y las paredes del bisel del metal base o cordones de soldadura adyacentes, es una discontinuidad relevante debido a su geometría lineal y sus extremos en forma de punta. Es una discontinuidad que se la puede encontrar superficial o subsuperficial, debido a que puede existir falta fusión entre los cordones internos o subsuperficiales como se muestra en la figura 34 y la figura 35.

**Figura 34**

*Falta de fusión superficial*<sup>17</sup>



Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-9)

**Figura 35**

*Falta de fusión entre el cordón y las paredes del material base (subsuperficial)*<sup>18</sup>



Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-10)

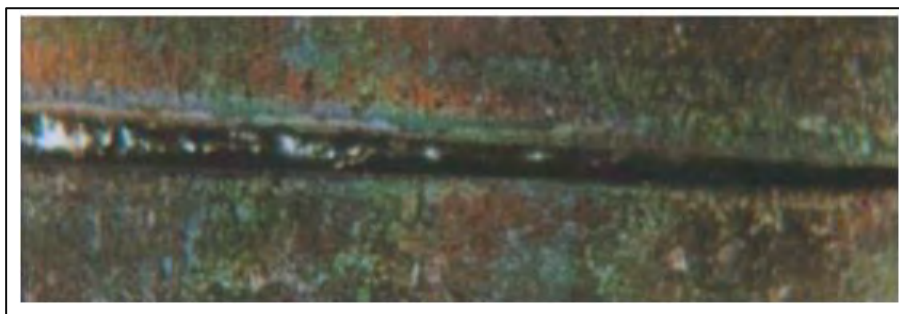
La causa más común de esta discontinuidad es la mala técnica del soldador al momento de realizar el cordón de soldadura, contaminación excesiva, como también una junta mal diseñada por ejemplo en juntas a tope con un ángulo muy agudo que dificulta la penetración del metal soldado ocasionando una falta de fusión en la raíz. La falta de fusión es difícil de detectar mediante radiografía, a menos que el ángulo de radiación este orientado en una manera adecuada. En el caso de que se detecte una falta de fusión mediante radiografía, estas discontinuidades se verán como líneas oscuras de mayor densidad.

### 2.12.3 Falta de Penetración en la Junta

Esta discontinuidad se produce cuando el metal soldado no llega a extenderse a través de toda la junta, es decir hay una falta de penetración. Se ubica adyacente a la raíz de la junta. Las causas son las mismas que se presentan en la falta de fusión: técnica inapropiada por parte del soldador, contaminación excesiva o juntas mal diseñadas. Lo que se puede observar en la imagen radiográfica es una línea que se ubica en el centro de la junta la cual es mucho más oscura que la que se observa en una falta de fusión, como se muestra en la figura 36 y figura 37.

**Figura 36**

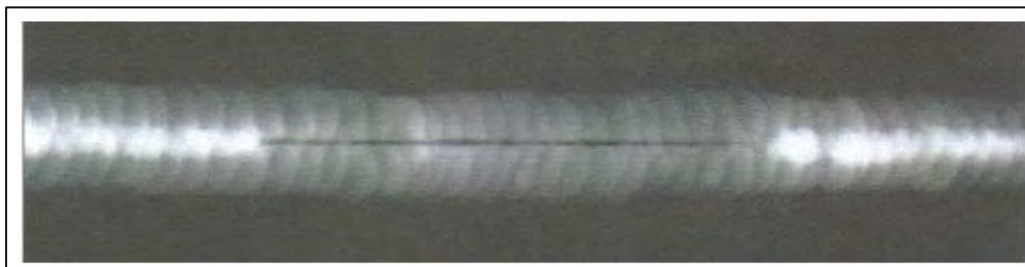
*Falta de penetración*



Fuente: (AWS, Visual Inspection Workshop, 2008, Pág. 2-7)

**Figura 37**

*Falta de penetración en la raíz de la junta*



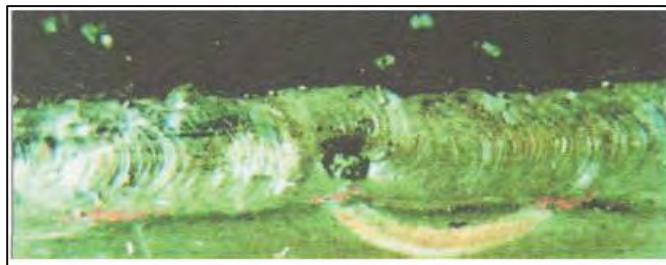
Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-11)

#### **2.12.4 Inclusiones**

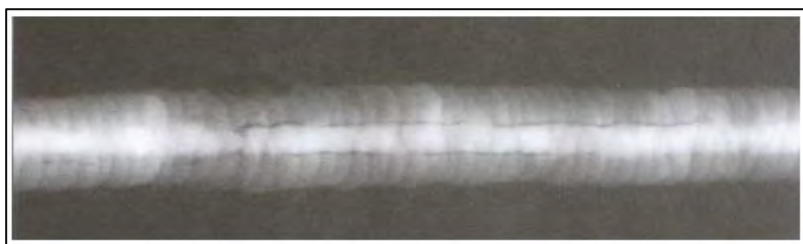
Una inclusión es un material extraño que queda atrapado en el cordón de soldadura, el cuál puede ser metálico o no metálico. Metálicos como inclusiones de tungsteno en el proceso GTAW (gas tungsten arc welding) y no metálicos como escoria. Las inclusiones que generalmente son escoria, producen que el cordón en ese sector sea más débil, ya que no se llegó a cubrir esa área con el metal de aporte por la presencia del material extraño. Las inclusiones al igual que la falta de fusión, se pueden encontrar en la superficie del cordón de soldadura como muestra la figura 43 o a su vez sub superficialmente entre los cordones internos de la junta como en la figura 44.

##### **2.12.4.1 Inclusiones de escoria.**

Las inclusiones de escoria son inclusiones no metálicas, las cuales se producen por una técnica inapropiada al momento de soldar, mala manipulación del electrodo o una falta de limpieza entre pases. Están asociadas con la falta de fusión, ya que en los sectores en los cuales hay falta de fusión, queda atrapada la escoria y si no existe una buena limpieza entre pases, al momento de soldar quedará una inclusión de escoria sub superficialmente. En el caso de que se detecte una inclusión de escoria mediante radiografía, estas discontinuidades son relativamente oscuras, ya que la densidad de la escoria es menor que la de la soldadura y del material base, presentan extremos irregulares, existen recubrimientos de electrodos que presentan casi la misma densidad que el material de aporte, para lo cual la detección de estas inclusiones mediante radiografía es más compleja.

**Figura 38***Inclusión de escoria superficial*

Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-11)

**Figura 39***Inclusión de escoria alargada (subsuperficial)*

Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-12)

#### **2.12.4.2 Inclusiones de tungsteno.**

Se encuentran asociadas casi siempre con el proceso de soldadura GTAW (Gas tungsten arc welding), el cual utiliza un electrodo no consumible de tungsteno para producir el arco, al momento en que el electrodo hace contacto con el charco de metal fundido, el arco se apaga y el metal se solidifica en la punta del electrodo de tungsteno, al remover el electrodo la punta de tungsteno se rompe ligeramente y si no se remueve del cordón de soldadura utilizando un esmeril, esta inclusión de tungsteno quedará en el cordón de soldadura.

Las inclusiones de tungsteno también se pueden producir cuando la corriente utilizada en GTAW está fuera del rango recomendado para ese diámetro de electrodo, para lo cual la corriente empieza a descomponer el electrodo y estos pedazos se depositan en el cordón de soldadura.

Otra causa es cuando al momento de afilar las puntas del electrodo de tungsteno se lo hace de tal manera que forman anillos alrededor de la misma, esto es inapropiado, ya que forman concentradores de esfuerzos y conjuntamente con la corriente que pasa por el electrodo puede llegar a romperse y posteriormente depositarse en el metal de soldadura.

Otras causas son:

- ✓ Contaminación del punta del electrodo de tungsteno con chisporroteo;
- ✓ Contacto del metal de aporte con la punta del electrodo;
- ✓ Mal posicionamiento del electrodo en la boquilla, más allá de lo normal, lo cual produce que se sobrecaliente el electrodo;
- ✓ Falta de ajuste de la boquilla porta electrodo;
- ✓ Inadecuado flujo del gas protector, o presencia de viento lo cual aleja el gas protector del electrodo, provocando que la punta del electrodo se oxide;
- ✓ Selección inadecuada del gas protector;
- ✓ Fisuras en el electrodo;
- ✓ Uso de un electrodo muy pequeño.

En el caso de que se detecte una inclusión de tungsteno mediante radiografía como en la figura 40, a estas discontinuidades se las verá indicaciones relativamente claras, ya que la densidad del tungsteno es mucho mayor que la del metal base y la del metal de aporte, es difícil detectar estas discontinuidades visualmente, a menos que el inspector inspeccione cada pase de soldadura que se realiza en el proceso, lo cual toma demasiado tiempo, por lo que la radiografía es el método más recomendado.

**Figura 40**

*Inclusiones de tungsteno.*



Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-13)

**2.12.5 Porosidad**

La porosidad es una discontinuidad producida por gas atrapado en el metal de soldadura durante el proceso de solidificación, formando cavidades en el cordón de soldadura. Debido a que su geometría es esférica, se considera que la porosidad es la discontinuidad menos perjudicial, sin embargo, en elementos soldados que van a almacenar gases o líquidos, la porosidad es más crítica ya que los poros pueden comprometer la hermeticidad del equipo.

Las causas de la porosidad son la presencia de contaminantes en el metal base o metal de aporte al momento de soldar, y la presencia de humedad en el electrodo o en el formen gases. Una inadecuada técnica al momento de soldar es una de las causas que también produce poros, por ejemplo, al momento de soldar con electrodos de bajo hidrógeno como el E7018 en el proceso SMAW, se producen poros si el arco formado entre el electrodo y la pieza es muy largo.

Al momento en el que se aprecie porosidad en el cordón es una señal de que el proceso de soldadura está fuera de control, se debe determinar cuál o cuáles son los factores que originan esto. En el caso de que se detecte porosidad mediante radiografía, a estas discontinuidades se las verá indicaciones oscuras debido a que en esos sectores existe menos material y por lo tanto menos densidad, se las diferencia claramente por su geometría circular en las películas radiográficas.

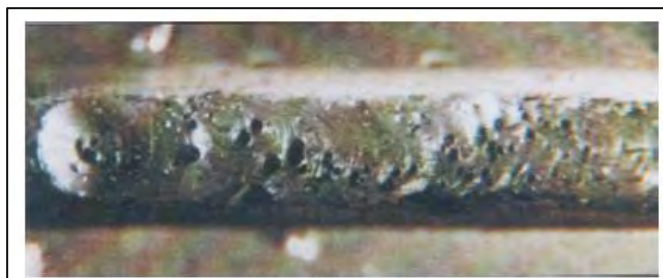


#### 2.12.5.1 Porosidad dispersa.

La porosidad dispersa se refiere a varias cavidades que se encuentran a lo largo del cordón de soldadura ubicadas entre ellas sin un patrón en particular, es decir aleatoriamente, como se observa en la figura 41.

**Figura 41**

*Porosidad dispersa.*



Fuente: (AWS, Visual Inspection Workshop, 2008, Pág. 2-2)

#### 2.12.5.2 Porosidad agrupada.

La porosidad agrupada o conocida como nido de poros, describe un grupo de cavidades agrupadas entre sí, como se puede apreciar en la figura 42.

**Figura 42**

*Porosidad agrupada*



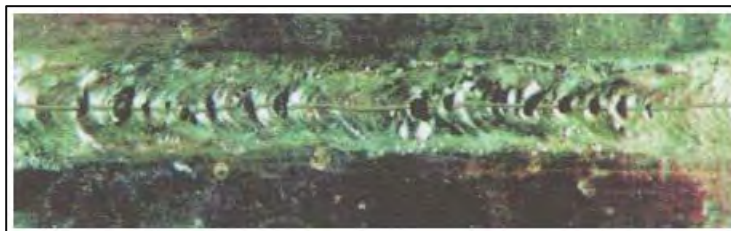
Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-15)

### 2.12.5.3 Porosidad alineada.

La porosidad alineada tal como su nombre lo indica, son un grupo de cavidades agrupadas entre sí en una línea recta, como se puede apreciar en la figura 43

**Figura 43**

*Porosidad alineada.*



Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-14)

### 2.12.5.4 Porosidad tubular o tipo gusano.

Es un tipo de porosidad en la cual las cavidades no tienen forma esférica como las anteriormente mencionadas, estas son alargadas, y son discontinuidades consideradas perjudiciales en elementos que son fabricados para almacenar gases o líquidos, ya que comprometen la hermeticidad del equipo, como se aprecia en la figura 44.

**Figura 44**

*Porosidad tubular o tipo gusano*



Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-15)

### 2.12.6 Mordeduras

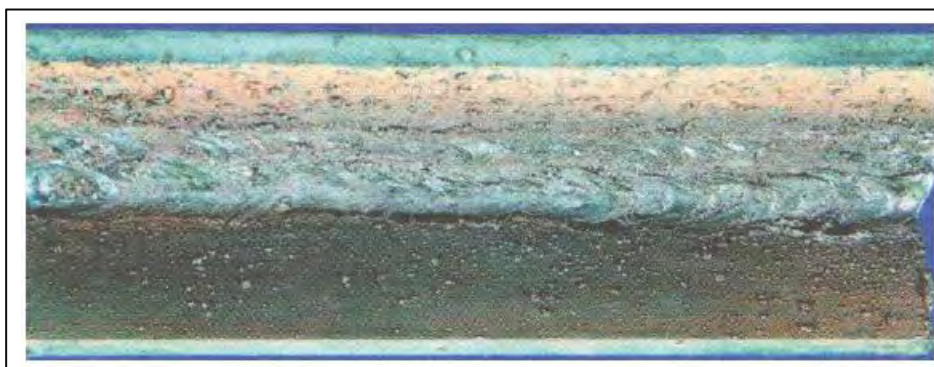
Las mordeduras son discontinuidades superficiales, las cuales ocurren en el material base adyacente al cordón de soldadura, se presenta como una depresión en la superficie del material base, debido a que el material base se derrite durante el proceso de soldadura y no es rellenado adecuadamente con material de aporte. Dado que es una discontinuidad superficial, se la considera como perjudicial para estructuras que están sometidas a cargas cíclicas, ya que son geometrías lineales en la superficie y actúan como concentradores de esfuerzos.

Las mordeduras se las puede encontrar en la cara de la soldadura, así como en la raíz, las causas son una inadecuada técnica al momento de soldar, por ejemplo si la velocidad de soldadura es demasiado rápida, el material de aporte no alcanza a llenar las depresiones causadas por el derretimiento del metal base, también las mordeduras se producen por un exceso de corriente, lo cual calienta demasiado el material base provocando el excesivo derretimiento del mismo, o cuando existe una mala manipulación del electrodo, como se aprecia en la figura 45.

No se recomienda utilizar la radiografía para detectar este tipo de discontinuidades, ya que no se nota claramente en la película radiográfica.

#### **Figura 45**

*Mordeduras en soldadura a filete*



Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-16)

### ***2.12.7 Falta de Material de Aporte***

Al igual que las mordeduras, la falta de material de aporte son discontinuidades superficiales, la cual como el nombre lo indica se produce por una falta de material de aporte. La diferencia con las mordeduras es que la falta de material de aporte se encuentra en el cordón de soldadura y no en el metal base. Puede encontrarse la falta de material de aporte ya sea en la raíz de la junta como en la figura 46 o en la cara de la junta.

**Figura 46**

*Falta de material de aporte*



Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-17)

En tuberías la falta de material de aporte en la raíz se lo conoce también como concavidad interna y una de las causas es el excesivo amperaje que posteriormente derrite la raíz de la junta al momento de aplicar el segundo pase del cordón de soldadura.

La principal causa es una técnica inadecuada por parte del soldador al momento de soldar, un exceso de velocidad no permite que el material de aporte rellene adecuadamente la junta al nivel deseado que debe ser siempre mayor al nivel del metal base.

### 2.12.8 Solapado

El solapado es una discontinuidad superficial que se caracteriza por ser un exceso de metal soldado la cual va más allá del tobillo del cordón de soldadura.

El solapado es una discontinuidad relevante, ya que en la unión del metal de soldadura con el metal base se puede apreciar que se forma una cavidad, esta geometría es un precursor de concentración de esfuerzos, dando lugar a una posterior fisura, en especial en estructuras sometidas a cargas de fatiga.

La causa más común es una inadecuada técnica por parte del soldador, cuando la velocidad de soldadura no es la suficiente, el material de soldadura quedará en exceso, dando lugar a estos excesos de metal soldado las cuales yacen en el material base sin fundirse, como se puede apreciar en la figura 47, un cordón solapado en una soldadura a filete.

La cavidad que se forma en el cordón de soldadura producto del solapado, producirá una celda galvánica y la humedad e impurezas quedarán atrapadas en este sector, provocando una corrosión acelerada.

**Figura 47**

*Solapado*



Fuente: (AWS, Visual Inspection Workshop, 2008, Pág. 2-10)

### 2.12.9 Convexidad

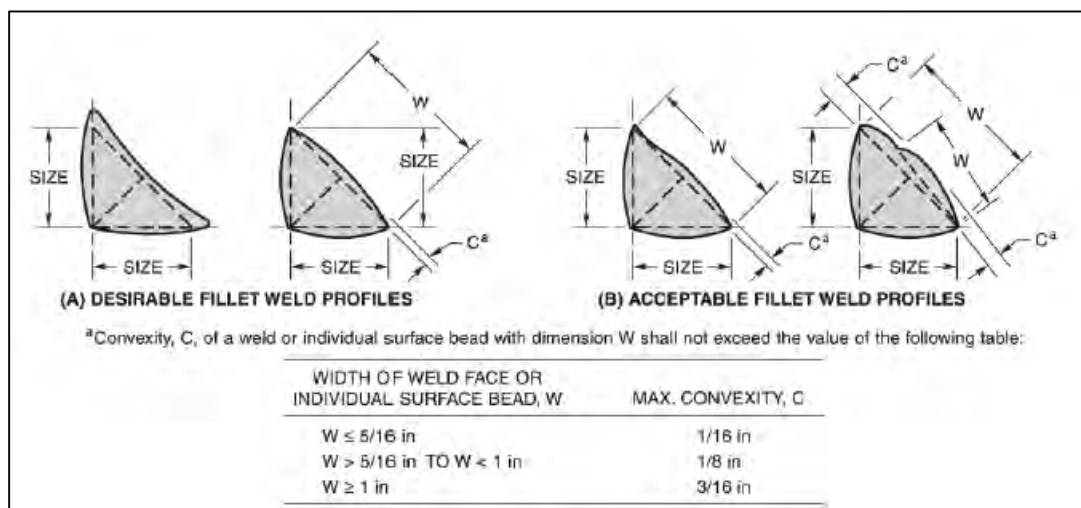
Convexidad es una discontinuidad que se presenta en soldaduras a filete, la cual se caracteriza por ser la distancia máxima que debe existir desde la cara de un cordón convexo hasta la línea que une los tobillos del cordón.

Existen límites de aceptación de convexidad, dependiendo del código aplicable, por ejemplo en la figura 48 en la cual se muestra el límite máximo de convexidad de la norma AWS D1.1 "código de soldadura para estructuras de acero", pero cuando excede estos límites, el problema no radica en la cantidad adicional de material depositado, sino que genera una geometría aguda en el tobillo del cordón, lo cual se considera como un concentrador de esfuerzos, es decir no existe una transición suave entre el cordón de soldadura y el material base, y esto es más crítico en estructuras que van a trabajar con cargas de fatiga.

La figura 49 muestra un cordón de soldadura con convexidad excesiva en una junta en "T".

**Figura 48**

*Límite de convexidad en soldaduras a filete*



Fuente: (AWS D1.1, Structural Welding Code, 2004, Pág. 198)

Las causas de la convexidad son: la insuficiente velocidad de avance al momento de soldar, bajos amperajes, presencia de contaminantes en la superficie del material base, o cuando la manipulación del electrodo no es la apropiada.

### **Figura 49**

*Convexidad en junta en “T”*



Fuente: (AWS, Welding Inspection Technology, 2008, Pág. 9-18)

#### **2.12.10 Sobremonta**

La sobremonta es el metal de aporte en exceso depositado en la junta de soldadura, se considera una discontinuidad cuando sobrepasa los límites de aceptación dependiendo del código con el que se esté realizando la inspección, es similar a la convexidad con la diferencia que se presenta en juntas a tope. Se localizan en la cara y en la raíz del cordón de soldadura.

Al igual que la convexidad el problema que genera la sobremonta es que la geometría que produce entre el talón del cordón y el material base es una transición que genera concentradores de esfuerzos, en especial en estructuras sometidas a cargas de fatiga.

#### **2.13 Ensayos no Destructivos**

En elementos soldados es de gran importancia determinar si las juntas soldadas presentan defectos, la criticidad depende del servicio que va a prestar la estructura y a las condiciones que

va a estar sometido, por ejemplo un recipiente a presión que opera a 500 psi y es fabricado con soldadura, soldadas con el tiempo, puede fallar y provocar daños graves, para prevenir esto se han desarrollado los ensayos no destructivos como una herramienta para asegurar la calidad y la confiabilidad de los elementos o estructuras en servicio y de esta manera prevenir accidentes.

Varios factores se deben tomar en cuenta el momento de escoger el método de ensayo no destructivo apropiado como: la compatibilidad del material con el método escogido, la geometría de la soldadura, el proceso de soldadura utilizado, nivel de criticidad de la soldadura, tipos de discontinuidades no aceptadas. En la tabla 10 se describen los tipos de ensayos con los tipos de discontinuidades que pueden detectar y en la tabla 11 se relaciona la aplicabilidad de los ensayos en función de los tipos de juntas. si existe algún defecto en las juntas

Para el presente trabajo solo se tomará en cuenta los ensayos siguientes: Inspección visual y líquidos penetrantes. (González Arias, 1995)

**Tabla 10**

*Métodos de examinación en relación con las discontinuidades.*

Discontinuidad	Radiografía	Ultrasonido	Líquidos Penetrantes	Partículas Magnéticas	Inspección Visual
Porosidad	A	M	A (1)	M (2)	A (1)
Inclusiones de escoria	A	M	A	M (2)	A (1)
Falta de fusión	M	A	U	M (2)	O (1)
Falta de penetración	A	A	U	M (2)	O (1)
Mordeduras	A	M	A	M	A
Solapado	U	M	A	A	M
Fisuras	M	A	A (1)	A (2)	A (1)
Laminaciones	U	A	A (3)	A (3)	A (3)

Nota:

A: Método aplicable

M: Método marginalmente aplicable (depende de otros factores como espesor del material, tamaño, orientación y ubicación de la discontinuidad)



Fuente: (AWS B1.10, 2009, Pág. 33)

**Tabla 11**

*Métodos de examinación en relación con el tipo de junta.*

Tipo de juntas	Radiografía	Ultrasonido	Líquidos Penetrantes	Partículas Magnéticas	Inspección Visual
Junta a tope	A	A	A	A	A
Junta en esquina	M	A	A	A	A
Junta en "T"	M	A	A	A	A
Juntas a traslape	M	M	A	A	A
Juntas de borde	M	M	A	A	A

Nota:

A: Método aplicable

M: Método marginalmente aplicable (depende de otros factores como espesor del material, tamaño, orientación y ubicación de la discontinuidad)

Fuente: (AWS B1.10, 2009, Pág. 33)

### ***2.13.1 Inspección Superficial***

Mediante estas técnicas de inspección, se puede determinar la integridad superficial del material, estas son:

- Inspección Visual (VT);
- Líquidos Penetrantes (PT);
- Partículas Magnéticas (MT);
- Electromagnetismo (ET).

### ***2.13.2 Inspección Visual***

La inspección visual es el primer ensayo no destructivo que se realiza en todo cordón de soldadura, y el más usado, es económico, simple, comúnmente aplicado a todas las soldaduras,

capaz de examinar varias zonas de soldadura al mismo tiempo, es un método de inspección superficial, es decir se examina la apariencia externa del cordón de soldadura, ancho y espesor, discontinuidades como: mordeduras, traslapes, solapado, fisuras, golpes de arco, inclusiones de escoria, porosidad superficial, si la garganta del cordón es la necesaria, el desalineamiento de las juntas. (González Arias, 1995)

### 2.13.2.1 Criterios de aceptación del ensayo de inspección visual.

**Tabla 12**

*Criterios de aceptación del ensayo de inspección visual*

No	Criterios
1	No se debe aceptar grietas de ninguna dimensión.
2	Todas las mordeduras presentes en la soldadura se deben completar hasta su sección transversal.
3	Debe haber una fusión completa entre el metal base y el metal de aporte. El refuerzo no debe superar los 3 mm.
4	El máximo valor de socavación debe ser de 1 mm.
5	No se acepta grietas, penetración inadecuada o fusión incompleta en la raíz de soldaduras de ranura con penetración completa de la junta (CJP).
6	La perforación por fusión o concavidad de raíz de un lado sin respaldo en soldaduras de ranura con penetración completa de la junta (CJP) deben ajustarse a lo siguiente: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si el espesor total de la soldadura es igual o mayor al metal base, la concavidad de raíz no debe superar los 2 mm.</li> <li>• La perforación por fusión no debe exceder los 3 mm.</li> </ul>

Fuente; American Welding Society. 2015.

### 2.13.3 Inspección por Líquidos Penetrantes

El ensayo no destructivo mediante tintas penetrantes tiene como propósito detectar discontinuidades superficiales presentes en el cordón de soldadura. En el presente estudio, este método se aplicó como complemento de la inspección visual.

La inspección por líquidos penetrantes es un método de inspección superficial, el principio por el cual funcionan los líquidos penetrantes es el de capilaridad, cuando existen discontinuidades en la superficie de los cordones de soldadura por mínimas que estas sean, el líquido penetra en estos espacios diminutos, después de un tiempo prudente se elimina el exceso superficial del penetrante y posteriormente se aplica un talco fino en la superficie conocido como revelador, la función del mismo es magnificar la indicación de la discontinuidad a tal punto de hacerla visible para el ojo humano como se observa en la figura 50. (González Arias, 1995)

**Figura 50**

*Inspección por líquidos penetrantes visibles*



Fuente: [http://www.globaltechltda.cl/paginas/mostrar\\_menu\\_servicios.php?id=167](http://www.globaltechltda.cl/paginas/mostrar_menu_servicios.php?id=167)

### 2.14 Ensayos Destructivos

Los ensayos destructivos son métodos de examinación directa cuyo propósito es analizar las propiedades mecánicas, químicas y metalúrgicas de la soldadura, para esto se sueldan probetas

de soldadura de las cuales se extraen ciertos especímenes los cuales son seleccionados y dimensionados de acuerdo a la norma de soldadura que se esté utilizando, a estos especímenes se los rompe, deforma o se los ataca químicamente. Se los utiliza para verificar la validez del procedimiento de soldadura, calificar la habilidad de soldadores y operadores, y verificar la calidad de las juntas soldadas.

#### ***2.14.1 Ensayo de Doblado***

Los ensayos de doblado sirven para determinar la ausencia de imperfecciones en la junta de soldadura, comprobar que exista una fusión completa, y ductilidad en la junta soldada. Usualmente se identifican discontinuidades, que se manifiestan en forma de fisuras, las cuales se consideran defectos cuando sobrepasan el límite dimensional de acuerdo a la especificación de la norma que se esté utilizando. Usualmente los especímenes se remueven de juntas soldadas a tope, en la cual el cordón se encuentra perpendicular al eje del espécimen como se puede apreciar en la imagen, a estos se los denomina ensayos de doblado transversales, también se los puede preparar con el cordón de soldadura longitudinal a las probetas, a estos se los denomina ensayos de doblado longitudinales, la diferencia entre los dos es que cuando los materiales a soldar tienen propiedades mecánicas similares se utilizan los ensayos transversales, y cuando se suelda materiales con diferentes propiedades mecánicas se realizan ensayos de doblado longitudinal. (González Arias, 1995)

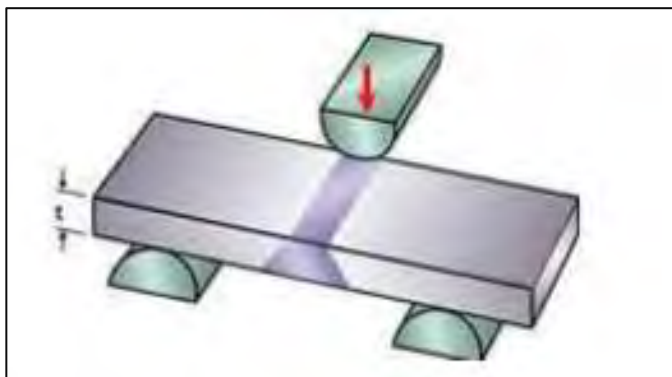
Existen tres tipos de ensayos de doblado:

#### 2.14.1.1 Doblado de cara.

El ensayo de doblado de cara consiste en determinar la ductilidad en la cara del cordón de soldadura, así como también la ausencia de defectos, para lo cual el punzón de doblado debe estar en contacto con la raíz del cordón, como se puede apreciar en la figura.51.

**Figura 51**

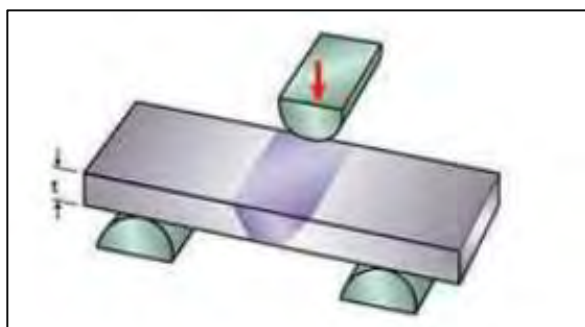
*Ensayo de doblado de cara*



Fuente: (TWI, 2020)

#### 2.14.1.2 Doblado de raíz.

El ensayo de doblado de raíz consiste en determinar la ductilidad en la raíz del cordón de soldadura, así como también la ausencia de defectos, para lo cual el punzón de doblado debe estar en contacto con la cara del cordón de soldadura, como se puede apreciar en la figura. Se diferencia claramente el doblado de raíz con el de cara debido a que el cordón es más pequeño en la raíz, por tanto en el doblado de raíz se notará claramente la superficie del cordón más pequeña que en el doblado de cara, como se aprecia en la figura 52.

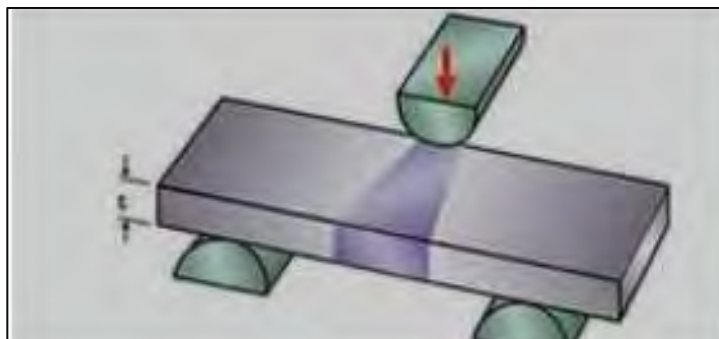
**Figura 52***Ensayo de doblado de raíz*

Fuente: (TWI, 2020)

**2.14.1.3 Doblado de lado.**

Los ensayos de doblado se los realiza cuando el material base supera los 10 mm de espesor de acuerdo a la norma ASME BPVC Sección IX, y los 12,5 mm de espesor de acuerdo a la norma API 1104.

Esto se debe a que cuando el espesor de los materiales es mayor a estos valores, el jig de doblado se verá sobrecargado, además mientras aumenta el espesor del material soldado, disminuye la ductilidad del mismo y por tanto aumentan las probabilidades de que se fisure y que el ensayo no sea válido. Un esquema del posicionamiento de la probeta se ilustra en la figura 53.

**Figura 53***Ensayo de doblado de lado*

Fuente: (TWI, 2020)

#### **2.14.1.4 Criterio de aceptación para ensayos de doblado.**

Los criterios de aceptación para este ensayo están en concordancia con el código AWS D1.1:2015, y facilitaran la evaluación de las probetas ensayadas. En la tabla 13, se indican las aceptaciones para una prueba de doblado.

**Tabla 13**

*Criterio de aceptación para el ensayo de doblado de cara y raíz según el código AWS D1.1.*

Criterios
1 El tamaño de las discontinuidades superficiales no debe de exceder 3 mm en cualquier dirección.
2 La suma de todas las discontinuidades que se encuentre en el rango de 1 mm a 3 mm no debe exceder a 10 mm.
3 La grieta de borde tendrá una dimensión máxima de 6 mm, excepto cuando se derive de una discontinuidad de fusión o una evidente inclusión de escoria donde tendrá un valor de 3 mm.
4 Las probetas con grietas de borde que excedan 6 mm sin evidencia de inclusiones de escoria u otra discontinuidad de fusión deben descartarse y se debe ensayar una probeta de reemplazo de la soldadura original.

Fuente: (American Welding Society, 2015)

#### **2.14.1.5 Procedimiento para el ensayo de doblado.**

Este ensayo se realizó en el equipo que se encuentra en el taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

Se debe identificar el cordón de soldadura, luego colocar la probeta en la matriz de la plantilla guía con la soldadura en la mitad del vano. Las probetas de doblado de cara se deben colocar con la cara de la soldadura dirigida hacia la abertura y si es de raíz se coloca la raíz de la soldadura hacia la abertura.

El embolo debe forzar la probeta hacia la matriz hasta que la probeta forme una U. la soldadura debe estar centrada y completamente dentro de la parte doblada. (American Welding Society, 1991)

## **2.15 Calificación del Procedimiento**

Antes de realizar una soldadura de será establecido y calificado un documento detallado del procedimiento para garantizar que la soldadura presente adecuadas propiedades. La calidad de la soldadura debe ser probada por ensayos destructivos y no destructivos.

### ***2.15.1 Especificación del Procedimiento de Soldadura o WPS (Welding Procedure Specification)***

Documento preparado por el departamento técnico o de ingeniería de la empresa, en el cual se proyectan los valores numéricos de las variables para realizar una soldadura. Brinda información relevante para orientar al soldador u operador de soldadura y, para asegurar el cumplimiento de los requerimientos del código. Describe las variables esenciales, las no esenciales, y cuando se requiera las variables suplementarias esenciales de cada procedimiento de soldadura. Debe ser desarrollado en un formato en donde se diligencien todos los campos, y con la firma de validación por el responsable de soldadura.

### ***2.15.2 Registro de la Calificación del Procedimiento o PQR (Procedure Qualification Record)***

Documento que valida y califica un WPS; en él se registran los valores reales medidos de las variables del procedimiento de soldadura, mediante la ejecución de una soldadura de calificación en un cupón de prueba estandarizado; el PQR es el documento donde se registra los resultados a soldar y ensayar las probetas o cupones.



### ***2.15.3 El registro de la Calificación de la Habilidad del Soldador o WPQR (Welder Performance Qualification Record)***

Es un documento que registra los ensayos de calificación de desempeño requeridos por el código, para determinar la habilidad de los soldadores, para producir soldaduras sanas.

## CAPITULO III

### HIPOTESIS Y VARIABLES

#### 3.1 Hipótesis General y Específicas

##### *3.1.1 Hipótesis General*

El tipo de electrodo revestido influye significativamente en la calidad de la unión y la resistencia mecánica de un acero de alta aleación soldado mediante el proceso SMAW.

##### *3.1.2 Hipótesis Específicas*

- Los electrodos revestidos presentan diferencias en su composición química y propiedades mecánicas, lo cual afecta su comportamiento durante la soldadura del acero de alta aleación.
- Las uniones soldadas con diferentes electrodos muestran variaciones en la calidad de la soldadura y en los valores de dureza del metal depositado y la zona afectada por el calor.
- Existe al menos un tipo de electrodo revestido que proporciona mejores propiedades mecánicas y mayor calidad de unión en comparación con los demás, permitiendo su selección óptima para la soldadura del acero de alta aleación mediante SMAW.

#### 3.2 Variable Dependiente e Independiente

##### *3.2.1 Dependiente*

- Soldabilidad del acero de alta aleación.

##### *3.2.2 Independientes*

- Condiciones del proceso SMAW

## 3.3 Matriz Operacionalización de variables:

Variable Dependiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Definición de la Dimensión	Indicador	Unidad / Escala	Instrumento / Método	Nivel de medición
<b>Soldabilidad del acero de alta aleación</b>	“La soldabilidad es la capacidad de un material para ser unido mediante un proceso de soldadura conservando propiedades adecuadas en el metal base, el metal de aporte y la ZAC” — Kou (2003).	Se refiere a la calidad de la soldabilidad, la cual se determina midiendo la dureza del depósito, la dureza en la ZAC, la resistencia mecánica de la unión y la ausencia de defectos, obtenidos en las probetas soldadas con los electrodos E307-16, E-FeCr-Al y E-FeMn-B.	Propiedades mecánicas del cordón de soldadura	Conjunto de características que describen el comportamiento físico y mecánico del material depositado después del proceso SMAW.	<b>Dureza del depósito de soldadura</b>	Vickers (HV) o Rockwell (HRC)	Ensayo de dureza Vickers/Rockwell según norma ASTM/ISO	Ratio
					<b>Dureza en la ZAC</b>	Dureza en la ZAC (Zona Afectada por el Calor)	Dureza en la ZAC (Zona Afectada por el Calor)	Ratio
			Integridad de la unión soldada	Grado en el cual la soldadura presenta continuidad, resistencia y ausencia de discontinuidades.	<b>Resistencia a tracción</b>	MPa	Ensayo de tracción	Ratio
					<b>Presencia de defectos</b>	Aceptable / No aceptable	Ensayos NDT: inspección visual (VT), líquidos penetrantes (PT) o partículas magnéticas (MT), ultrasonido (UT); macro/micrografías	Nomina 1/ Ordinal

Variable Independiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Definición de la Dimensión	Indicador	Unidad / Escala	Instrumento / Método	Nivel de medición
<b>Condiciones del proceso SMAW</b>	“El proceso SMAW es la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido donde los parámetros eléctricos, el material de aporte y la técnica influyen sobre la calidad del cordón” — AWS (2017).	“Se refiere a las condiciones del proceso SMAW, las cuales se definen por el material de aporte seleccionado (E307-16, E-FeCr-A1 y E-FeMn-B) y por los parámetros eléctricos y operativos aplicados en la soldadura de las probetas PX, PY y PZ.”	Material de aporte	Elemento consumible que aporta el metal en fusión y determina la composición química final del cordón.	<b>Tipo de electrodo</b>	Clasificación (E7018, E7016, E6013...)	Ficha técnica del electrodo; registro experimental	Nominal
			Parámetros operativos del proceso SMAW	Variables que controlan la energía del arco eléctrico y afectan la microestructura del cordón y la ZAC..	<b>Composición química</b>	% en masa (%Ni, %Cr, %Mo, etc.)	Ficha técnica del proveedor; espectrometría (si se realiza)	Ratio
					<b>Corriente de soldeo</b>	Amperios (A)	Amperímetro; registro de la máquina	Ratio
					<b>Voltaje de arco</b>	Voltios (V)	Voltímetro; registro de la máquina	Ratio
					<b>Velocidad de avance</b>	mm/s o cm/min	Cronómetro + cinta métrica o equipo de desplazamiento	Ratio

## CAPITULO IV

### METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

#### 4.1 Localización política y geográfica

La presente investigación se desarrolló en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), específicamente en el Taller de soldadura, ubicado en la ciudad del Cusco, región Cusco, al sureste del Perú. Este espacio cuenta con equipamiento y maquinaria adecuada para la ejecución de prácticas de soldadura y ensayos metalúrgicos, lo que permitió realizar las pruebas experimentales del estudio en condiciones controladas y seguras.

#### Figura 54

##### *Mapa de Ubicación*



Nota: Fuente Google Earth

El Taller de soldadura de la escuela profesional de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, ubicado en el campus central de la Universidad Nacional de San

Antonio Abad del Cusco, se localiza aproximadamente en:

📍 Latitud:  $-13.5226$

📍 Longitud:  $-71.9670$

Estas coordenadas corresponden al sector donde se encuentran los talleres de ingeniería, lugar donde se desarrollaron las pruebas de soldadura y los ensayos del estudio.

## **4.2 Enfoque, tipo y nivel de investigación**

### ***4.2.1 Enfoque de Investigación***

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, debido a que busca medir y analizar de manera objetiva los efectos que producen distintos materiales de aporte y parámetros de soldadura sobre la dureza y la calidad de las uniones ejecutadas con el proceso SMAW. Según Hernández, Fernández y Baptista (2020), el enfoque cuantitativo se caracteriza por emplear mediciones numéricas, procedimientos estandarizados y análisis estadístico para responder preguntas de investigación de forma precisa. En este sentido, la evaluación de dureza, resistencia mecánica y discontinuidades requiere la obtención de datos medibles, lo cual se ajusta plenamente a los principios del enfoque cuantitativo. Además, este enfoque permite comparar resultados entre grupos experimentales, contribuyendo a identificar qué material de aporte ofrece un mejor desempeño en la soldadura de aceros de alta aleación.

### ***4.2.2 Tipo de Investigación***

El estudio corresponde a una investigación aplicada, dado que tiene como finalidad resolver un problema técnico real relacionado con la selección adecuada de electrodos y

parámetros de soldadura para mejorar la calidad de uniones metálicas. De acuerdo con Sampieri (2020), la investigación aplicada busca generar conocimientos orientados a la solución de necesidades o prácticas específicas en contextos profesionales o industriales. En la presente tesis, los resultados obtenidos se orientan directamente a mejorar procesos de soldadura en talleres, laboratorios y sector metalmeccánico, evidenciando su carácter práctico y orientado a la toma de decisiones técnicas.

#### ***4.2.3 Nivel de Investigación***

El nivel de investigación es explicativo, debido a que no solo describe las características de los electrodos o de la soldadura, sino que busca determinar la relación causa–efecto entre las variables manipuladas (tipo de material de aporte, parámetros de soldabilidad) y las variables resultantes (dureza y calidad de la unión). Hernández et al. (2020) indican que el nivel explicativo tiene como propósito identificar cómo una variable influye sobre otra, proporcionando evidencia para comprender los mecanismos o comportamientos involucrados.

En este caso, el estudio explica cómo el tipo de electrodo y los parámetros del proceso SMAW modifican la respuesta metalúrgica del cordón, permitiendo entender los factores que incrementan o reducen la calidad de la soldadura.

### **4.3 Población y Muestra**

#### ***4.3.1 Población***

La población de estudio está constituida por todas las uniones soldadas que pueden realizarse en el Taller de Manufactura de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, empleando el proceso SMAW sobre acero de alta aleación, utilizando distintos tipos de materiales

de aporte y parámetros de soldadura definidos en el plan experimental.

Para efectos operativos, se trabajó con una muestra intencional de probetas preparadas específicamente para la investigación. Estas probetas consisten en placas de acero de alta aleación, soldadas con diferentes electrodos y combinaciones de corriente, voltaje y velocidad de avance, de acuerdo con un diseño previamente establecido.

#### ***4.3.2 Muestra***

La muestra se define, entonces, como el conjunto de cordones de soldadura y probetas ensayadas que permiten evaluar la dureza del depósito y la calidad de la unión, representando adecuadamente las condiciones de trabajo del taller.

### **4.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

Para la recolección de datos se utilizaron principalmente técnicas de observación estructurada y medición directa, apoyadas en instrumentos de laboratorio y equipos de soldadura.

#### ***4.4.1 Técnicas***

Se usará la observación técnica del proceso de soldadura (características del arco, estabilidad, formación del cordón)., dado que las probetas serán objeto de ensayos no destructivos y destructivo. Esta información será sistematizada, analizada, procesada e interpretada para la obtención pertinente de las conclusiones inherentes al tema.

#### ***4.4.2 Instrumentos***

- Máquina de soldar SMAW: para la aplicación de los cordones con distintos electrodos y parámetros.



- Multímetro o equipo de lectura incorporado: para registrar la corriente (A) y el voltaje (V) utilizados en cada cordón.
- Cronómetro y cinta métrica: para estimar la velocidad de avance del electrodo durante la soldadura.
- Durómetro digital (Brinell o Rockwell): para medir la dureza del depósito de soldadura y de la zona afectada por el calor.

Equipo de ensayos no destructivos (por ejemplo, líquidos penetrantes o ultrasonido, según disponibilidad): para evaluar la presencia de discontinuidades superficiales o internas.

## **4.5 Procedimiento experimental**

El procedimiento experimental se desarrolló de manera ordenada y sistemática, siguiendo las normas básicas de seguridad en soldadura y las recomendaciones de los fabricantes de electrodos:

### ***4.5.1 Preparación del material base:***

Se seleccionaron placas de acero de alta aleación, específicamente acero austenítico grado A, con dimensiones adecuadas para la ejecución del proceso de soldadura. Previamente a la soldadura, se realizó una limpieza mecánica y/o química de las superficies, eliminando óxidos, grasa y contaminantes, con el fin de asegurar una adecuada fusión y calidad de la unión soldada. Asimismo, se llevó a cabo la selección de los electrodos revestidos definidos en la investigación como materiales de aporte. Finalmente, se establecieron las combinaciones de corriente, voltaje y velocidad de avance, de acuerdo con las recomendaciones técnicas del fabricante y el diseño experimental planteado.

#### **4.5.2 Ejecución de los cordones de soldadura:**

Los cordones de soldadura se realizaron en el Taller de Soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, empleando el proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW). Para cada cordón se registraron el tipo de electrodo, la corriente, el voltaje y la velocidad aproximada de avance. Asimismo, se controlaron las condiciones operativas del proceso, manteniendo una posición de soldadura horizontal, una longitud de arco adecuada y una técnica uniforme del operario, con el fin de reducir variaciones no deseadas y asegurar la reproducibilidad de los resultados.

#### **4.5.3 Preparación de probetas:**

A partir de las placas soldadas se cortaron probetas para los ensayos de dureza y, de ser aplicable, para ensayos adicionales (por ejemplo, tracción o dobléz).

Se identificó cada probeta con un código que vincula el tipo de electrodo y los parámetros utilizados.

#### **4.5.4 Realización de ensayos:**

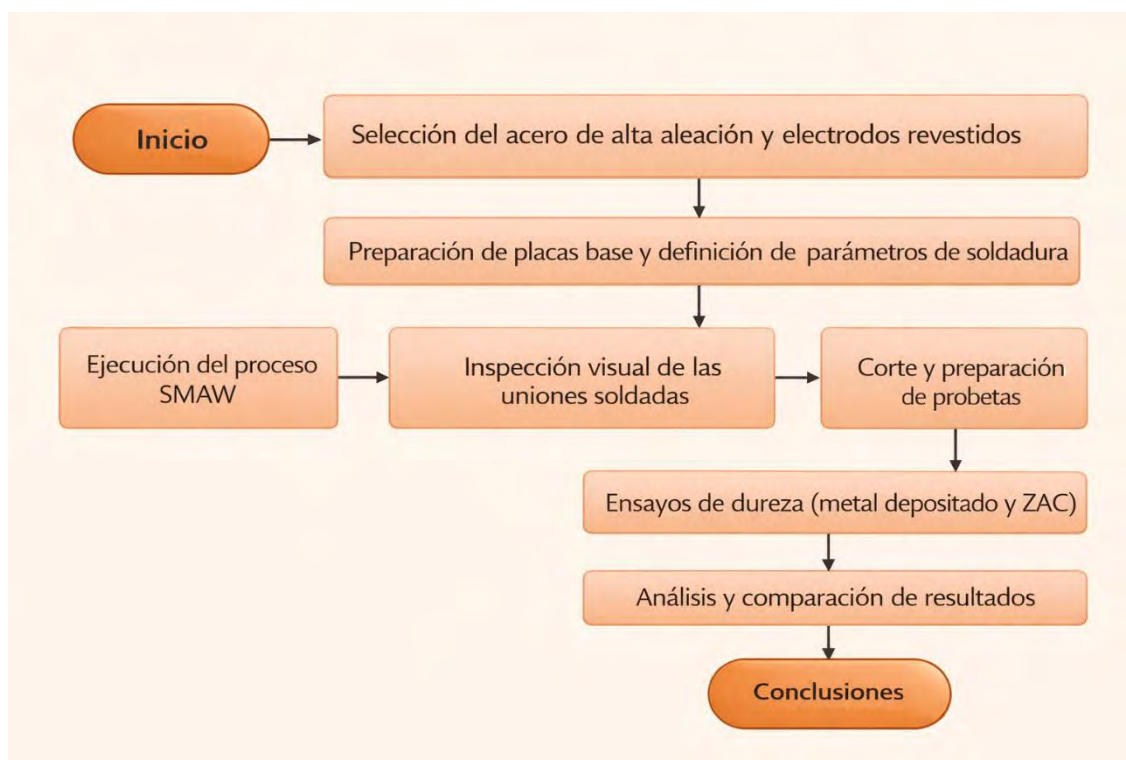
Se efectuaron ensayos de dureza en el metal depositado y en la zona afectada por el calor (ZAC), con el propósito de evaluar el comportamiento de la unión soldada en función del tipo de electrodo empleado. Asimismo, se realizó la inspección visual de los cordones de soldadura, registrándose la posible presencia de discontinuidades como porosidad, socavados, falta de fusión u otros defectos superficiales. De manera complementaria, cuando fue posible, se aplicaron ensayos no destructivos (END) para apoyar la evaluación de la calidad de las uniones soldadas. Los resultados de los ensayos realizados, correspondientes al metal depositado y a la ZAC, se presentan en forma de tablas en el Capítulo V, específicamente en los subapartados 5.5 al 5.16

mientras que la discusión e interpretación de dichos resultados se desarrollan en el Capítulo VI.

#### 4.5.5 Registro y análisis de resultados:

Todos los valores obtenidos (dureza, observaciones visuales, resultados de END) se registraron en tablas de datos. Posteriormente, estos valores se utilizaron para comparar el desempeño de cada tipo de material de aporte y parámetros de soldabilidad, en función de la dureza del depósito y de la calidad de la unión soldada.

##### *Diagrama del proceso:*



## CAPITULO V

### METODO EXPERIMENTAL

#### 5.1 Maquinaria y equipos

##### 5.1.1 Fuente de poder

Para la soldadura de las probetas se utilizó una máquina de soldar del taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, sus características son:

- Marca: MILLER
- Modelo: XMT 304 CC.
- Salida nominal de corriente: 300 Amperios
- Gama de Voltaje: 10 – 35 Voltios.
- Gama de Amperaje: 5 - 400
- Máx Voltaje de circuito abierto CD: 90 V.

En la figura 54, se puede observar la fuente de poder usada.

#### Figura 55

*Fuente de poder*



Fuente: Elaboración propia.

**a) Equipo de ensayo de doblez guiado en U.**

Este equipo es propiedad del taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. En la figura 55 se puede observar el equipo de ensayo de doblez, incorporado con un gato hidráulico de 20 toneladas de presión.

**Figura 56**

*Equipo de doblez.*



Fuente: Elaboración propia.

**b) Trozadora**

**Tabla 14**

*Características - trozadora*

Marca	Toolcraft
Potencia	2,100 W
RPM máximo	3,800 rpm
Largo	56 cm
Ancho	58 cm
Altura	35 cm
Peso	16.6 kg

Fuente: Elaboración propia.

**c) Materiales complementarios**

- Kit de tintes penetrantes en spray

Marca: Ambro-sol

Procedencia: Italia.

Son productos de pulverización que permiten detectar defectos tales como grietas causadas por deformación, picaduras, áreas porosas y ranuras de soldadura. El kit contiene:

Limpiador Cleaner X 400ML

Penetrante Rojo X 400ML

Revelador Detector Blanco X 400ML

En la figura 56 se observa el kit de tintes penetrantes.

**Figura 57**

*Kit de tintes penetrantes*



Fuente: Elaboración Propia.

- ✓ Disolvente químico (Thinner)
- ✓ Alcohol

✓ Franelas.

## **5.2 Material de Ensayo y de Aporte**

### ***5.2.1 Material de Ensayo***

#### **Acero ASTM A128 grado A.**

El material de ensayo utilizado en la presente investigación fue acero de alta aleación ASTM A128 grado A, correspondiente a un acero austenítico al manganeso, ampliamente empleado en aplicaciones industriales que requieren elevada resistencia al desgaste y buena tenacidad. Este acero se caracteriza por presentar un contenido elevado de manganeso, lo que le confiere una microestructura predominantemente austenítica a temperatura ambiente.

La composición química nominal del acero ASTM A128 grado A incluye un contenido de carbono comprendido entre 1,05 % y 1,35 %, un contenido mínimo de manganeso de 11 %, silicio con un valor máximo de 1,00 % y fósforo limitado a 0,07 % máximo, de acuerdo con la norma ASTM A128. En cuanto a sus propiedades mecánicas, este material presenta una dureza aproximada de 180 HB, lo que lo hace adecuado para estudios de soldabilidad y evaluación del comportamiento del metal depositado y la zona afectada por el calor.

La composición química y las propiedades mecánicas del acero empleado se detallan en la Tablas 4 del Capítulo II, las cuales sirven como base para el análisis comparativo del comportamiento del material frente a los distintos electrodos evaluados mediante el proceso de soldadura SMAW.

### 5.2.2 Material de Aporte

Para la presente investigación se han seleccionado tres tipos de electrodos, son los siguientes:

#### A. Electrodo E-307-16 AWS A5.1 (Citoriel)

Es un electrodo austenítico, auto endurecible hasta 50 HRC. El metal depositado posee una excelente tenacidad, así como una alta resistencia al impacto, abrasión y corrosión. Diseñado para unir y recargar piezas de acero al manganeso, para aceros al manganeso con aceros aleados o aceros al carbono. Ideal para recuperar piezas que han sufrido desgaste por fricción metálica, como vías férreas, ranas, cambios y cruces, para relleno de cadenas, tambores, bordes de cucharas, uñas de excavadoras, partes de molinos y pulverizadores. (ver ficha técnica en el anexo 1)

En la tabla 15 se observa la composición química del depósito y en la tabla 16 sus propiedades mecánicas.

**Tabla 15**

*Composición química del depósito*

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,08	4,00	0,40	máx. 0,025	máx. 0,020	0,50 1,50	9,50	19,70	-	-

Fuente: (Soldexa, 2021)

**Tabla 16**

*Propiedades mecánicas del metal depositado*

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (+20 °C) [J]
Sin tratamiento	> 590 (85 500)	350 (50 750)	> 30	> 80

Fuente: (Soldexa, 2021)



### B. Electrodo E-FeCr-A1 - AWS A5.4 (Citodur 1000)

Electrodo con alto contenido de carburos de cromo, el metal depositado es resistente a la abrasión severa e impacto moderado, corrosión y altas temperaturas (hasta 1000 °C). Muy usado en la industria minera, ladrilleras, cementeras, siderúrgicas, fundiciones, constructoras, agricultura, etc., para la protección de uñas, baldes, cucharas, paletas, prensas, ollas, etc. (ver ficha técnica en el anexo 2)

En la tabla 17 y 18, se observa la composición química del depósito y sus propiedades mecánicas.

**Tabla 17**

*Composición química del deposito*

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otras
4,00	1,10	0,60	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	36,00	-	-

Fuente: (Soldexa, 2021)

**Tabla 18**

*Propiedades mecánicas del metal depositado*

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]	Dureza
Sin tratamiento	-	-	-	-	58 - 62 HRC

Fuente: (Soldexa, 2021)

### C. Electrodo E FeMn-B AWS A5.13 (Citomangan)

Están específicamente formulados para soldar aceros con alto contenido de manganeso, como el ASTM A128. Ofrecen excelente resistencia al desgaste y permiten restaurar piezas

desgastadas o rotas, como mandíbulas de trituradoras o martillos de molinos. (ver ficha técnica en el anexo 3).

En las figuras 19 y 20 se observa la composición química del depósito y sus propiedades mecánicas.

**Tabla 19**

*Composición química del depósito*

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
1,00	12,00 14,00	0,50	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	-	-	-

Fuente: (Soldexa, 2021)

**Tabla 20**

*Propiedades del metal depositado*

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]	Dureza
Sin tratamiento Auto endurecido	-	-	-	-	19 - 28 HRC 50 - 60 HRC

Fuente: (Soldexa, 2021)

### 5.3 Soldabilidad de los Cupones

#### 5.3.1 Caracterización de las Probetas

Las probetas tienen las siguientes características:

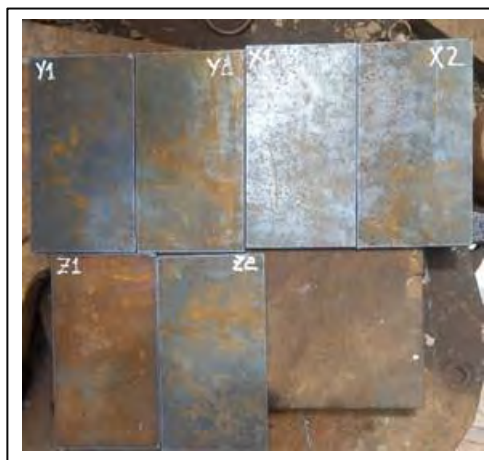
Dimensiones:

- Ancho: 120 mm
- Longitud: 120 mm
- Espesor: 6.35 mm

Para un mejor estudio las probetas se identificaron (ejemplo, probeta PX, constituido por las probetas 1X y 2B) como se muestra en la figura 57.

**Figura 58**

*Probetas de ensayo con su identificación.*



Fuente: Elaboración propia

### **5.3.2 Propiedades Mecánicas de las Probetas**

En la tabla 21, se observa las propiedades mecánicas de las probetas.

**Tabla 21**

*Propiedades mecánicas.*

Dureza (HB)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Energía de Impacto (J)	Elongacion (%)	Tenacidad (MPa.m <sup>1/2</sup> )
170 – 220	280 – 470	136	20-40	120

Fuente: Elaboración propia

### **5.3.3 Preparación de las Probetas**

#### **5.3.3. 1. Obtención de las probetas**

De una plancha de 2400x1200x6.35 mm, mediante corte por plasma se extrajeron 6 probetas, los cuales se sueldan en pares.

### 5.3.3.2. Limpieza de las probetas

Antes de la soldadura, los cupones deben estar libres de grasa, aceites, pintura y otras impurezas para evitar la contaminación de los depósitos y la formación de discontinuidades, también se eliminó las rebabas que quedaron producto del corte. La limpieza se llevó a cabo de forma manual mediante el uso de un disco abrasivo.

### 5.3.3.3. Preparación de la junta.

Las probetas se prepararon con las características que se muestra en la tabla 22.

**Tabla 22**

*Características de la junta a soldar.*

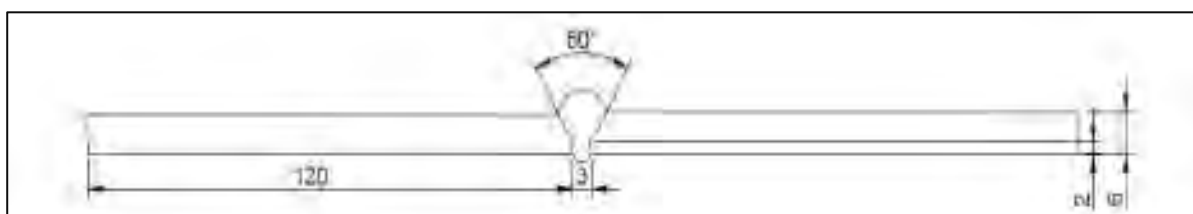
Símbolo	Descripción	Probeta de experimentación
a	Abertura o luz de la raíz	3 mm
e	Espesor nominal del material base o de la probeta.	6.35 mm
t	Altura de raíz o talón	2 mm
	Angulo de la ranura (bisel)	60°

Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones mencionadas se muestran esquemáticamente en la figura 58 y en la figura 59, se muestra el emparejamiento de las probetas.

**Figura 59**

*Junta a tope en “V”.*



Fuente: ANSI/AWS D1.1. (2000)

En la figura 60, se observa el bisel en las probetas antes de ser soldadas.

**Figura 60**

*Preparación de los pares de las probetas.*



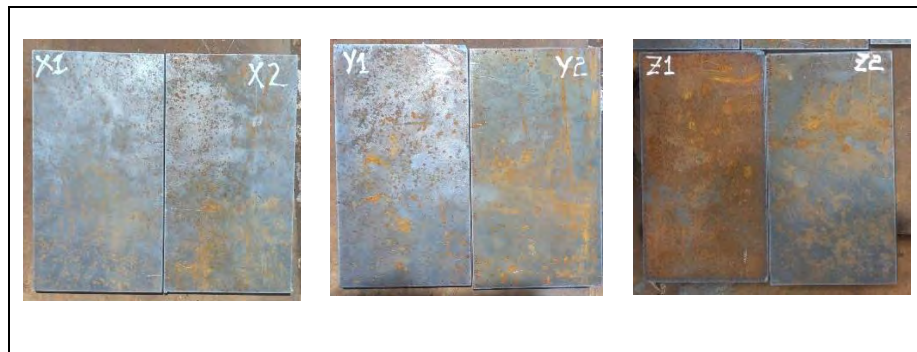
Fuente: Elaboración propia

- **Identificación de las probetas**

Para un mejor estudio, las probetas se identificaron letra y un dígito, como se muestra en la figura 58. Para la soldadura se emparejaron las probetas denominándose: PX ( $X1+X2$ ), PY ( $Y1+Y2$ ) Y PZ ( $Z1+Z2$ ).

**Figura 61**

*Identificación de las probetas.*




Fuente: Elaboración Propia.

#### **5.4.Soldabilidad de las Probetas**

Las condiciones de soldabilidad de las tres probetas, las condiciones de soldabilidad se detallan en los WPS.

**Tabla 23***Probeta PX*

Facultad de Ingeniería Geológica, minas y metalurgia Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica									
Especificación del procedimiento de soldadura								WPS	
Institución:	Particular					Identificación N°:	Probeta PX (X1-X2)		
Proceso de soldadura:			SMAW			Soporte N°:	PQR – 01		
Tipo:	Manual :	X	Automático:		Semiautomático:		Maquina:	Miller-XMT 304 CC	
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:			
Diseño de la junta.					Posición				
Tipo de junta:			A tope		Ranura:		Filete:		
Tipo de soldadura:			Ranura en “V”		Plancha:	1G	Tuboría:		
Abertura de raíz:			3 mm		Características eléctricas				
Talón altura de raíz o talón:			2 mm						
Angulo de bisel:			60°						
Soporte:			No		Corriente: proceso SMAW				
Material de aporte:			E-307-16		DC:		DCEP		
Limpieza de la raíz:					Pulso:				
Metal base					Técnica				
Datos					Aportación	Oscilación		Recta	X
Grupo:					Pase:	Múltiple		Simple	
Especificación	ASTM A128				Limpieza en pases	Escobilla de acero			
Grado:					Precalentamiento				
Espesor:	6.35 mm				Temperatura de precalentamiento:			-	---
Diámetro:					Temperatura interpase:			----	
					Postcalentamiento				
					Temperatura:	-----	Tiempo :	-----	
Metal de aporte					Protección				
Especificación:			AWS A5.1		Fundente:	--	Gas:	---	
Calificación AWS:					Composición	--	Composición	---	
Marca:			Oerlikon				Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:			----						
Procedimiento de soldadura									
N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento. (mm/seg)		
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)				
1	SMAW	E-307-16	1/8"	DC+	100	23	2.6		
2	SMAW	E-307-16	1/8"	DC+	120	24	3.00		
Detalles de la junta soldada									


			
Elaborado por:	Walter A. Silva Palma	Fecha.	12/01/2025
Revisado por:	Mgt. Elias T. Peña Peña	Institución:	UNSAAC

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 24**

*Probeta PY*

Facultad de Ingeniería Geológica, minas y metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica												
Especificación del procedimiento de soldadura										WPS		
Institución:		Particular				Identificación N°:		Probeta PY (Y1-Y2)				
Proceso de soldadura:			SMAW				Soporte N°:		PQR – 01			
Tipo:		Manual:	X	Automático:			Semiautomático:				Maquina:	Miller-XMT 304 CC
Revisión:		00	Fecha:		12 /01/2025			Revisado por:				
Diseño de la junta.						Posición						
Tipo de junta:				A tope		Ranura:				Filete:		
Tipo de soldadura:				Ranura en “v”		Plancha:		1G		Tubería:		
Abertura de raíz:				3 mm		Características eléctricas						
Talón altura de raíz o talón:				2 mm								
Angulo de bisel:				60°								
Soporte:				No		Corriente: proceso SMAW						
Material de aporte:				E-FeCr-A1		DC:				DCEP		
Limpieza de la raíz:						Pulso:						
Metal base						Técnica						
Datos						Aportación		Oscilación				Recta X
Grupo:						Pase:		Múltiple				Simpl e
Especificación		ASTM A128				Limpieza en pases		Escobilla de acero				
Grado:						Precalentamiento						
Espesor:		6.35 mm				Temperatura de precalentamiento:					- --	
Diámetro :						Temperatura interpase:					----	
						Postcalentamiento						
						Temperatura:		-----		Tiempo:		-----
Metal de aporte						Protección						
Especificación:				A5.4		Fundente:		--		Gas:		---


Calificación AWS:	A5.4	Composici ón	--	Composición	---		
Marca:	0erlikon			Vel. Flujo			
Tamaño de alambre:	-----						
Procedimiento de soldadura							
N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamien to. (mm/seg)
		Clase	Diámet ro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)		
1	SMAW	E-FeCr- Al	1/8"	DC+	100	23	2.6
2	SMAW	E-FeCr- Al	1/8"	DC+	120	24	3.00
Detalles de la junta soldada							
<div></div>							
Elaborad o por:	Walter A. Silva Palma		Fecha.	12/01/2025			
Revisado por:	Mgt. Elias T. Peña Peña		Institución:	UNSAAC			

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 25***Probeta PZ*

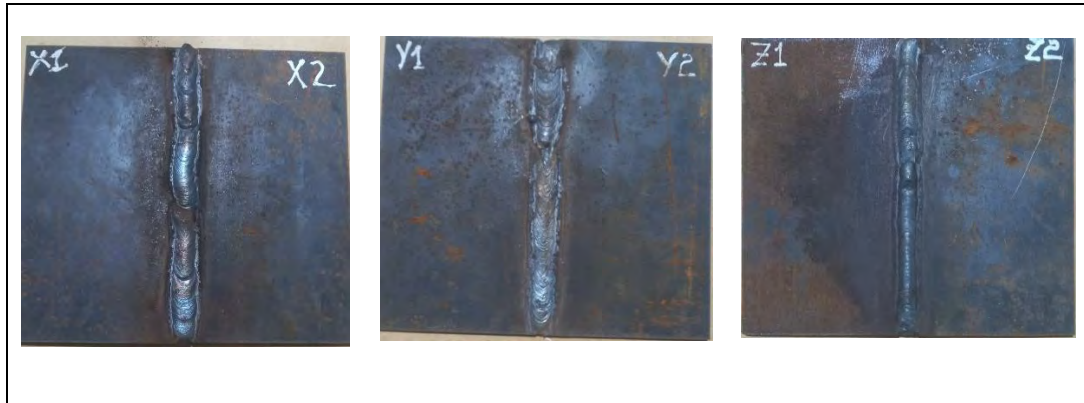
Facultad de Ingeniería Geológica, minas y metalurgia. Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica									
Especificación del procedimiento de soldadura									WPS
Institución:	Particular				Identificación N°:		Probeta PZ (Z1-Z2)		
Proceso de soldadura:			SMAW			Soporte N°:		PQR – 01	
Tipo:	Manual:	X	Automático:		Semiautomático:			Maquina:	Miller-XMT 304 CC
Revisión:	00	Fecha:	12 /01/2025			Revisado por:			
Diseño de la junta.					Posición				
Tipo de junta:			A tope	Ranura:				Filete:	
Tipo de soldadura:			Ranura en “v”	Plancha:		1G		Tubería:	
Abertura de raíz:			3 mm	Características eléctricas					
Talón altura de raíz o talón:			2 mm						
Angulo de bisel:			60°						
Soporte:			No	Corriente: proceso SMAW					



Material de aporte:		E-307-16	DC:			DCEP		
Limpieza de la raíz:			Pulso:					
Metal base			Técnica					
Datos			Aportación		Oscilación		Recta	X
Grupo:			Pase:		Múltiple		Simple	
Especificación	ASTM A128		Limpieza en pases		Escobilla de acero			
Grado:			Precalentamiento					
Espesor:	6.35 mm		Temperatura de precalentamiento:				-	---
Diámetro:			Temperatura interpase:				----	
			Postcalentamiento					
			Temperatura:	-----	Tiempo:	-----		
Metal de aporte			Protección					
Especificación:	A5.13	Fundente:	--	Gas:	---			
Calificación AWS:	A5.13	Composición	--	Composición	---			
Marca:	0erlikon			Vel. Flujo				
Tamaño de alambre:	-----							
Procedimiento de soldadura								
N.- de pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento. (mm/seg)	
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (a)			
1	SMAW	E FeMn-B	1/8"	DC+	100	23	2.6	
2	SMAW	E FeMn-B	1/8"	DC+	120	24	3.00	
Detalles de la junta soldada								
								
Elaborado por:	Walter A. Silva Palma		Fecha.	12/01/2025				
Revisado por:	Mgt. Elias T. Peña Peña		Institución:	UNSAAC				

Fuente: Elaboración Propia.

Con los parámetros mencionados en el WPS, se llegaron a soldar las probetas, tal como se observa en la figura 75

**Figura 62***Probetas soldadas*

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.5 Cálculo del Calor Neto Aportado

Para el cálculo del aporte de calor, se calculó haciendo uso de la ecuación 1 del capítulo II, reemplazando en ella los valores que se hallan en el d WPS, se tiene:

- **Probeta PX**

- ✓ **Primer deposito**

$$H_{net} = \frac{100 \times 23}{2.6} \times 0.75 = 663,4 \text{ J/mm}$$

- ✓ **Segundo deposito**

$$H_{net} = \frac{120 \times 24}{3.0} \times 0.75 = 720.00 \text{ J/mm}$$

- **Probeta PY**

$$H_{net} = \frac{100 \times 23}{2.6} \times 0.75 = 663,4 \text{ J/mm}$$

## ✓ Segundo deposito

$$H_{net} = \frac{120 \times 24}{3.0} \times 0.75 = 720.00 \text{ J/mm}$$

## ✓ Probeta PZ

$$H_{net} = \frac{100 \times 23}{2.6} \times 0.75 = 663,4 \text{ J/mm}$$

## ✓ Segundo deposito

$$H_{net} = \frac{120 \times 24}{3.0} \times 0.75 = 720.00 \text{ J/mm}$$

Los valores del calor neto aportado para cada una de las probetas se detallan en la tabla 26.

**Tabla 26**

*Valores del calor aportado (J/mm) en la soldadura de las probetas*

Probeta	1er. pase	2do. Pase
PX	663.4	720.00
PY	663.4	720.00
PZ	663.4	720.00

Fuente: Elaboración Propia.

## 5.6 Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor

Para saber la influencia del calor aportado en la microestructura del metal base, se calcula el ancho de la zona afectada por medio de la ecuación 3, para las condiciones del trabajo experimental se tomaron los siguientes valores:

- $T_o = 16^\circ\text{C}$
- $T_{\text{fusión}} = 1420^\circ\text{C}$
- $\rho = 0.0785 \text{ gr/mm}^3$

- $C = 0.023 \text{ J/gr-}^{\circ}\text{C}$
- $\rho.C = 0.001747 \text{ j/mm}^3\text{-}^{\circ}\text{C}$ .
- $t \text{ (espesor)} = 6.35 \text{ mm}$
- $T_{\max} = 723 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- $K = \text{Conductividad térmica del acero } (0.052 \text{ J/mm-seg-}^{\circ}\text{C})$

**a) Primer pase o pase de raíz (X)**

✓ Probeta PX:

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 16} \right) - \left( \frac{1}{1420 - 16} \right) \right] \times \left[ \frac{720}{4,13 \times 0.001747 \times 6.35} \right] = 10.6 \text{ mm}$$

✓ Probeta PY:

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 16} \right) - \left( \frac{1}{1420 - 16} \right) \right] \times \left[ \frac{720}{4,13 \times 0.001747 \times 6.35} \right] = 10.6 \text{ mm}$$

✓ Probeta PZ:

$$Y = \left[ \left( \frac{1}{723 - 16} \right) - \left( \frac{1}{1420 - 16} \right) \right] \times \left[ \frac{720}{4,13 \times 0.001747 \times 6.35} \right] = 10.6 \text{ mm}$$

## 5.7 Cálculo de la Dilución

La dilución para los dos depósitos o pasadas se calculó en base a la ecuación 5, indicados en el capítulo II.

### 5.7.1 Cálculo de la dilución para la probeta PX

#### A. Parámetros de soldabilidad:

- Electrodo: E-307-16 (inoxidable austenítico + ferrítico, buena tenacidad y compatibilidad con ASTM A128)

- Diámetro: 1/8" (3.2 mm)
- Amperaje: 100 A
- Voltaje: 23 V
- Velocidad de soldeo: 2.6 mm/s = 15.6 cm/min
- Metal base: ASTM A128 (acero al Mn)
- Pase: Primer pase

### B. Calcular energía lineal (heat input)

$$Energia\ lineal\ \left(\frac{kJ}{cm}\right) = \frac{V \times I \times 60}{1000 \times velocidad\ \left(\frac{cm}{min}\right)} = \frac{23 \times 100 \times 60}{1000 \times 15.6\ \left(\frac{cm}{min}\right)} = 8.8\ kJ/cm$$

Estimar tasa de deposición del electrodo ( $m_e$ )

El E-307-16 a 100 A y 1/8" tiene una tasa de deposición estimada de:

$$m_e \approx 0.27\ g/s$$

(Este valor puede variar ligeramente según la marca del electrodo y técnica del operario, pero es confiable para estimar.)

### C. Estimar fusión del metal base $m_b$

Dado que es el primer pase y estás trabajando con un acero austenítico como el ASTM A128, que tiene baja conductividad térmica, la penetración suele ser moderada. Con 8.85 kJ/cm, estimamos:

$$m_b \approx 0.11\ g/s$$

#### D. Calcular dilución

$$Dilucion (\%) = \frac{0.11}{0.11 + 0.27} \times 100 = 28.9 \%$$

Los resultados del cálculo de la dilución de las probetas de experimentación se muestran en la tabla 27.

**Tabla 27**

*Valores de dilución de las probetas*

Electrodo	Energia lineal (Kj/cm)	Tasa de deposición del electrodo ( $m_e$ ) (g/s)	Fusión del metal base $m_b$ (g/s)	Primer pase	Segundo pase
	8.85	0.27	0.11	28.9 %	
E-307-16	9.6	0.30	0.03		13.1%
E-FeCr-	8.85	0.25	0.11	30.56 %	
A1	9.6	0.30	0.04		14,3%
E FeMn-	8.85	0.25	0.11	30.15%	
B	9.6	0.30	0.05		11,8%

Fuente: Elaboración Propia.

#### 5.8 Determinación de la Composición Química

La composición química calculamos con la ecuación 10:

$$X_w = (D_T) (X_A) + (1 - D_T) (X_F) \dots \dots \dots (Ec. 6)$$

Donde:

$X_w$  = Porcentaje medio del elemento X en el depósito (composición del metal base).

$X_A$  = Porcentaje medio del elemento X en el metal base A.

$X_F$  = Porcentaje medio del elemento X en el metal de aporte (a determinar)

$D_T$  = Porcentaje de dilución del metal base A expresado como un decimal.

### 5.8.1 Determinación de la Composición Química de la Probeta PX:

En la tabla 28 se muestra las composiciones químicas del acero ASTM128 y del material de aporte E307-16

**Tabla 28**

*Composiciones químicas del acero ASTM A128 y del electrodo E307 – 16.*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E 307-16
Carbono (C)	1.20 %	0.08%
Manganeso (Mn)	12.00 %	4.00 %
Fósforo (P)	-----	0.025 %
Azufre (S)	-----	0.020%
Silicio (Si)	-----	0.40%
Niquel (Ni)	-----	9.50 %
Cromo (Cr)	-----	19.70 %
Molibdeno (Mo)	1.00 %	1.00 %

Fuente: Elaboración Propia.

En base a los datos indicados en la tabla 28, la composición química del primer deposito resulta ser:

#### Composición química del Primer deposito:

**Tabla 29**

*Composición química del Primer deposito.*

$\%C = 0.2890 (1.20) + (1-0.2890) (0.08) = 0.40 \%$
$\%Mn = 0.2890(12.0) + (1-0.2890) (1) = 4.18 \%$
$\%Si = 0.2890(0) + (1-0.2890) (0.40) = 0.28 \%$
$\%P = 0.2890(0) + (1-0.2890) (0.025) = 0.018 \%$
$\%S = 0.2890(0) + (1-0.2890) (0.020) = 0.014\%$
$\%Ni = 0.2890(0) + (1-0.2890) (9.50) = 6.75\%$
$\%Cr = 0.2890(0) + (1-0.2890) (19.70) = 14.00\%$
$\%Mo = 0.2890(1.00) + (1-0.2890) (1.00) = 1.00\%$

Fuente: Elaboración Propia.

#### Composición química del Segundo deposito:

Teniendo las siguientes composiciones del metal base, metal de aporte y primer deposito, tal como se muestra en la tabla 30.

**Tabla 30**

*Composición química del metal base, metal de aporte y primer depósito.*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E 307-16	Primer deposito
Carbono (C)	1.20 %	0.08%	0.40%
Manganeso (Mn)	12.00 %	4.00 %	4.18%
Fósforo (P)	-----	0.025 %	0.018%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%
Silicio (Si)	-----	0.40%	0.28%
Niquel (Ni)	-----	9.50 %	6.75%
Cromo (Cr)	-----	19.70 %	14.00%
Molibdeno (Mo)	1.00 %	1.00 %	1.00%

Fuente: Elaboración Propia

Y aplicando la ecuación 7, se tiene la composición química del segundo deposito:

**Tabla 31**

*composición química del segundo deposito*

$$\begin{aligned}
 \%C &= 0.091(1.20) + 0.091(0.40) + (1-0.091)(0.08) = 0.22 \% \\
 \%Mn &= 0.091(12) + 0.091(4.18) + (1-0.091)(4.00) = 5.1 \% \\
 \%Si &= 0.091(0) + 0.091(0.28) + (1-0.091)(0.40) = 0.39 \% \\
 \%P &= 0.091(0) + 0.091(0.02) + (1-0.091)(0.018) = 0.019 \% \\
 \%S &= 0.091(0) + 0.091(0.03) + (1-0.091)(0.014) = 0.019 \% \\
 \%Ni &= 0.091(0) + 0.091(6.75) + (1-0.091)(9.50) = 9.25 \% \\
 \%Cr &= 0.091(0) + 0.091(14.0) + (1-0.091)(19.70) = 19.18\% \\
 \%Mo &= 0.091(1.00) + 0.091(1.00) + (1-0.091)(1) = 1.1\%
 \end{aligned}$$

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 32., se resume las composiciones químicas de los dos depósitos.

**Tabla 32**

*Composición química del primer y segundo depósito.*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E 307-16	Primer deposito	Segundo deposito
Carbono (C)	1.20 %	0.08%	0.40%	0.22%



Manganeso (Mn)	12.00 %	4.00 %	4.18%	5.1%
Fósforo (P)	-----	0.025 %	0.018%	0.19%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%	0.19%
Silicio (Si)	-----	0.40%	0.28%	0.39%
Níquel (Ni)	-----	9.50 %	6.75%	9.25%
Cromo (Cr)	-----	19.70 %	14.00%	19.18%
Molibdeno (Mo)	1.00 %	1.00 %	1.00%	1.1%

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.8.2 Determinación de la Composición Química de la Probeta PY:

En la tabla 33 se muestra las composiciones químicas del acero ASTM128 y del material de aporte E-FeCr-Al.

**Tabla 33**

*Composiciones químicas del acero ASTM A128 y del electrodo E-FeCr-Al.*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E-FeCr-Al
Carbono (C)	1.20 %	4.0 %
Manganeso (Mn)	12.00 %	1.10 %
Fósforo (P)	-----	0.020 %
Azufre (S)	-----	0.020%
Silicio (Si)	-----	0.60%
Cromo (Cr)		36.0%
Molibdeno (Mo)	1.0%	

Fuente: Elaboración Propia.

En base a los datos de la tabla 33, se calcula la composición química del primer deposito.

### Composición química del primer deposito:

**Tabla 34**

*Composición química del primer deposito*

$\%C = 0.3056 (1.20) + (1-0.3056) (1.0) = 1.06 \%$
$\%Mn = 0.3056(12.0) + (1-0.3056) (1.10) = 4.43 \%$
$\%Si = 0.3056(0) + (1-0.3056) (0.60) = 0.41 \%$
$\%P = 0.3056(0) + (1-0.3056) (0.020) = 0.014 \%$
$\%S = 0.3056(0) + (1-0.3056) (0.020) = 0.014 \%$

$$\%Mo = 0.3056(1.0) + (1-0.3056)(0) = 0.305\%$$

Fuente: Elaboración Propia.

### Composición química del segundo deposito:

Teniendo las siguientes composiciones del metal base, metal de aporte y primer deposito, tal como se muestra en la tabla 12.

**Tabla 35**

*Composición química del metal base, metal de aporte y primer deposito*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E-FeCr-A1	Primer deposito
Carbono (C)	1.20 %	4.0%	1.06 %
Manganeso (Mn)	12.00 %	1.10 %	4.43 %
Fósforo (P)	-----	0.020 %	0.014%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%
Silicio (Si)	-----	0.60%	0.41%
Molibdeno (Mo)	1.0%	-----	0.305%

Fuente: Elaboración Propia.

Y aplicando la ecuación 7, se tiene la composición química del segundo deposito:

**Tabla 36**

*composición química del segundo deposito*

$$\begin{aligned} \%C &= 0.143(1.20) + 0.143(1.06) + (1-0.143)(4.0) = 3.75 \% \\ \%Mn &= 0.143(12.0) + 0.143(4.43) + (1-0.143)(1.10) = 3.29 \% \\ \%Si &= 0.143(0) + 0.143(0.41) + (1-0.143)(0.60) = 0.57 \% \\ \%P &= 0.143(0) + 0.143(0.014) + (1-0.143)(0.014) = 0.014\% \\ \%S &= 0.143(0) + 0.143(0.014) + (1-0.143)(0.014) = 0.014 \% \\ \%Mo &= 0.143(1.0) + 0.143(0.305) + (1-0.143)(0) = 0.186 \end{aligned}$$

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 37, se resume las composiciones químicas de los dos depósitos.

**Tabla 37**

*Composición química del primer y segundo deposito.*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E-FeCr-A1	Primer deposito	Segundo deposito
----------	-----------------	---------------------------	-----------------	------------------

Carbono (C)	1.20 %	4.0%	1.06 %	3.75%
Manganeso (Mn)	12.00 %	1.10 %	4.43 %	3.29%
Fósforo (P)	-----	0.020 %	0.014%	0.014%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%	0.014%
Silicio (Si)	-----	0.60%	0.41%	0.57%
Molibdeno (Mo)	1.0%	-----	0.305%	0.186%

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.8.3 Determinación de la Composición Química de la Probeta PZ.

En la tabla 38 se muestra las composiciones químicas del acero ASTM128 y del material de aporte E FeMn-B

**Tabla 38**

*Composiciones químicas del acero ASTM A128 y del electrodo E FeMn-B.*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E FeMn-B
Carbono (C)	1.20 %	1.0 %
Manganeso (Mn)	12.00 %	13.0 %
Fósforo (P)	-----	0.020 %
Azufre (S)	-----	0.020%
Silicio (Si)	-----	0.50%
Molibdeno (Mo)	1.0 %	-----

Fuente: Elaboración Propia.

En base a los datos de la tabla 14, se calcula la composición química del primer deposito.

### Composición química del primer deposito:

**Tabla 39**

*Composición química del primer deposito*

$\%C = 0.3015 (1.20) + (1-0.3015) (1.0) = 1.07 \%$
$\%Mn = 0.3015(12.0) + (1-0.3015) (13.0) = 12.70 \%$
$\%Si = 0.3015(0) + (1-0.3015) (0.50) = 0.34 \%$
$\%P = 0.3015(0) + (1-0.3015) (0.020) = 0.014 \%$
$\%S = 0.3015(0) + (1-0.3015) (0.020) = 0.014\%$
$\% Mo = 0.3015(1) + (1-0.3015) (0) = 0.3015 \%$

Fuente: Elaboración Propia.

### Composición química del segundo pase:

Teniendo las siguientes composiciones del metal base, metal de aporte y primer depósito, tal como se muestra en la tabla 40.

**Tabla 40**

*Composiciones químicas del metal base, metal de aporte y de primer depósito*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E FeMn-B	Primer depósito
Carbono (C)	1.20 %	1.0%	1.07%
Manganeso (Mn)	12.00 %	13.0 %	12.70%
Fósforo (P)	-----	0.020 %	0.014%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%
Silicio (Si)	-----	0.50%	0.34%
Molibdeno (Mo)	1.0%	-----	0.315%

Fuente: Elaboración Propia.

Y aplicando la ecuación 7, se tiene la composición química del segundo depósito:

**Tabla 41**

*Composición química del segundo depósito*

$\%C = 0.118(1.20) + 0.118(1.07) + (1-0.118) (1.0) = 1.15 \%$
$\%Mn = 0.118(12.0) + 0.118(12.70) + (1-0.118) (13.0) = 14.38 \%$
$\%Si = 0.118(0) + 0.118(0.34) + (1-0.118) (0.50) = 0.48 \%$
$\%P = 0.118(0) + 0.118(0.014) + (1-0.118) (0.020) = 0.019 \%$
$\%S = 0.118(0) + 0.118(0.014) + (1-0.118) (0.020) = 0.019 \%$
$\%Mo = 0.118(1.00) + 0.118(0) + (1-0.118) (0) = 0.118 \%$

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 42 se resume las composiciones químicas de los dos depósitos.

**Tabla 42**

*Composición química del primer y segundo depósito.*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E FeMn-B	Primer depósito	Segundo depósito
Carbono (C)	1.20 %	1.0%	1.07%	1.15%

Manganeso (Mn)	12.00 %	13.0 %	12.70%	14.38%
Fósforo (P)	-----	0.020 %	0.014%	0.019%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%	0.019%
Silicio (Si)	-----	0.50%	0.34%	0.48%
Molibdeno (Mo)	1.0%	-----	0.315%	0.118%

Fuente: Elaboración Propia.

## 5.9. Control de Calidad de las probetas

### 5.9.1 Inspección Visual

Un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de inspección visual del cordón de soldadura de las tres probetas se ilustra en la Tabla 43

**Tabla 43**

*Resultados del examen visual.*

Junta soldada	Discontinuidades detectadas		Descripción	Clasificación según AWS D1.1
	Cara	Raíz		
PX(E 307-16)	No	Si	Falta de penetración al inicio de la junta. Discontinuidad en el cordón de soldadura.	Aprueba
PY(E-FeCr-Al)	No	No	Fisuras de crater de aprox. 2.5 mm de diámetro.	Aprueba
PZ(E-FeCr-Al)	Si	No	Falta de material de aporte al inicio y final del cordón.	Aprueba

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.9.2 Inspección con Tintes Penetrantes (Fluorescentes)

Procedimiento para realizar en ensayo de líquidos penetrantes:

### A. Limpieza de la superficie.

Para evitar lecturas erróneas causadas por contaminantes como grasa, polvo o escoria en el depósito, se realizó una limpieza previa. Esta se llevó a cabo mediante métodos mecánicos, utilizando una escobilla de acero inoxidable para eliminar la escoria y salpicaduras y aplicando un disolvente en aerosol, como se muestra en la Figura 62.

### Figura 63

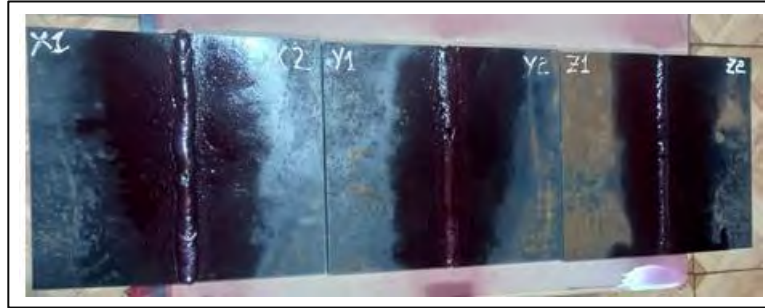
*Limpieza química del depósito de soldadura.*



Fuente: Elaboración Propia.

### B. Aplicación del tinte penetrante

Una vez comprobada la limpieza del depósito de soldadura, se procedió a aplicar el tinte penetrante. El envase se mantuvo a una distancia aproximada de 30 cm de la superficie, y la aplicación se realizó de manera paralela y uniforme a lo largo del área de soldadura a inspeccionar. Esta operación se muestra en la Figura 77.

**Figura 64***Rociado con tinte penetrante.*

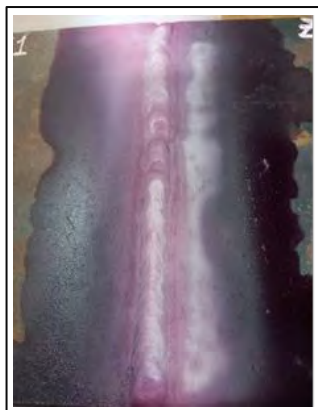
Fuente: Elaboración Propia.

**C. Remoción del exceso de tinte penetrante.**

Durante 10 minutos se deja actuar al penetrante, posterior a este lapso de tiempo, se limpia con un paño el exceso del líquido penetrante.

**D. Aplicación del tinte revelador.**

Se aplica una capa fina y uniforme del revelador sobre el área a inspeccionar, manteniendo una distancia aproximada de 20 a 30 cm entre el envase y la superficie de la soldadura. Luego, se deja actuar durante 15 minutos para permitir que las posibles discontinuidades se manifiesten visualmente. Esta etapa del proceso se muestra en la Figura 64.

**Figura 65***Aplicación del tinte revelador.*

Fuente: Elaboración Propia.

### E. Visualización del tinte revelador.

El revelador debe permanecer sobre la superficie de la muestra durante 15 minutos para permitir que el penetrante salga de cualquier defecto superficial.

**Figura 66**

*Visualización de posibles discontinuidades.*



Fuente: Elaboración Propia.

#### ✓ Limpieza del cupón.




La operación final de este proceso es una limpieza general del cupón.

#### ✓ Inspección e interpretación.

Una vez realizados los pasos anteriores se realizó las interpretaciones las que se muestran en la tabla 44.



**Tabla 44***Visualización del examen por tintes penetrantes*

Probeta	Imágenes.	Observación	Calificación según la AWS D1.1.
PX E-307-16		Se observó una discontinuidad en la reanudación de la soldadura de aproximadamente de 4 mm.	Aceptada
	Cara del cordon Raiz del cordon	No se observó Discontinuidad alguna,	
PY - E-FeCr- A1		Se observó fisuras de cráter 2.5 mm de diámetro.	Aceptada
	Cara del cordon Raiz del cordon	Se observó falta de fusión en una longitud de 4 mm al inicio del cordon.	
PZ  E- FeCr- A1		Se observó falta de material de Aporte al final del cordón.	Aceptada
	Cara del cordon Raiz del cordon	Se observó falta de material de Aporte al final del cordón.	

Fuente: Elaboración Propia.

**5.9.3 Ensayo de Doblado Guiado de Cara y Raíz**

Para realizar esta prueba las probetas deben seleccionarse. En la figura 66, se muestra cómo se obtiene las probetas para la prueba de doblez de cara y raíz. (AWS D1.1

**Figura 67**

*Selección de la probeta para la prueba de doblado.*



Fuente: Elaboración Propia.

En esta prueba, la probeta se apoya sobre dos puntos normalmente ubicados en sus extremos, mientras que un tercer apoyo (llamado punzón) ejerce la fuerza para provocar el doblado en la parte central de la probeta hasta doblar un Angulo de 180°.

#### ***5.10 Registro de Calificación del Procedimiento (PQR)***

El PQR, es un documento que valida y respalda el WPS. EL PQR contiene las variables reales de soldadura utilizadas en la prueba y los resultados del ensayo realizado sobre la soldadura para propósitos de calificar las especificaciones del procedimiento de soldadura. El PQR es el registro que documenta los resultados de soldar y ensayar las probetas. En las tablas siguientes se detallan los resultados de la prueba de doblado de las tres probetas:





Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	Variado	Voltaje		Veloc. de soldeo	Variado
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:	PY		
Norma aplicable:	AWS D1.1-2020			Fecha de elaboración:	26/03/2025		
Realizado por:	Bachiller Walter A. Silva Palma			Asesor:	Mgt. Ing. Elías Teodoro Peña		
Centro de estudio y análisis:		Taller de soldadura. Escuela Prof. De ing. Metalúrgica. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.					
Espesor de la probeta:		6.35 mm	Longitud de la probeta:			230 mm	
Resultados.							
Probeta		Lado dela prueba			Observaciones		
		Cara			No presenta discontinuidad		
		Raiz			Presenta discontinuidad		
Aprobación:				No aprueba			

Fuente: Elaboración Propia.

- **Probeta PZ**

**Tabla 47**

*Probeta PZ*

	Facultad de Ingeniería Geologica, Minas y Metalurgia Escuela profesional de Ingeniería Metalurgica.						
ENSAYO DE DOBLADO GUIADO.							PQR
Datos informativos de la probeta a ensayar							
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje	Variado	Voltaje		Veloc. de soldeo	Variado
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:	PZ		
Norma aplicable:	AWS D1.1-2020			Fecha de elaboración:	26/03/2025		
Realizado por:	Bachiller Walter A. Silva Palma			Asesor:	Mgt. Ing. Elías Teodoro Peña		
Centro de estudio y análisis:	Taller de soldadura. Escuela Prof. De ing. Metalúrgica. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.						
Espesor de la probeta:	6.35 m	Longitud de la probeta:			230 mm		

	m	
<b>Resultados.</b>		
Probeta	Lado dela prueba	Observaciones
1	Cara	No presenta discontinuidad
	Raiz	Presenta discontinuidad
Aprobación:		No aprueba

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.11 Calor Neto Aportado

Los resultados del calor neto aportado se muestran en la tabla 48.

**Tabla 48**

*Valores de calor neto aportado en la soldadura de las probetas.*

Probeta	1er. pase	2do. Pase
PX	663.4	720.00
PY	663.4	720.00
PZ	663.4	720.00

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a los resultados, podemos interpretar lo siguiente:

El aumento del amperaje en el proceso de soldadura influye directamente en el aporte de calor neto. En la soldadura del acero ASTM A128, un aumento en el amperaje tiene las siguientes implicaciones:

- Un aumento de la intensidad de corriente incrementa la cantidad de calor que se transfiere al metal base, lo cual es fundamental para fundir el material de aporte y las superficies del metal base que se van a unir, también produce una mayor profundidad de penetración, produce una mayor velocidad esto implica que puede fundir más material en un menor tiempo, pero esto debe manejarse con cuidado para evitar defectos de soldadura. Produce también un aumento de la ZAC lo que produce cambios microestructurales no deseados en el acero ASTM A128, lo que debilitaría la zona soldada.

## 5.12 Inspección Visual de las Probetas (ver tabla 20)

En la tabla 20 se observa los resultados de la inspección visual.

**Tabla 49**

*Inspección visual de los cupones.*

Junta soldada	Discontinuidades detectadas		Descripción	Clasificación según AWS D1.1
	Cara	Raíz		
PX (E 307-16)	No	Si	Falta de penetración al inicio de la junta. Discontinuidad en el cordón de soldadura.	Aprueba
PY(E-FeCr-A1)	No	No	Fisuras de cráter de aprox. 2.5 mm de diámetro.	Aprueba
PZ(E-FeCr-A1)	Si	No	Falta de material de aporte al inicio y final del cordón.	Aprueba

Fuente: Elaboración Propia.

Visto los resultados de la inspección visual, se afirma lo siguiente:

- **Probeta PX:**

La primera probeta presenta insuficiente penetración en la soldadura, esto se debe a un amperaje insuficiente durante la soldadura como también a una alta velocidad de soldadura y una deficiente preparación de las juntas. Por lo que se recomienda ajustar el amperaje y la velocidad de soldadura para asegurar una adecuada penetración y revisar la preparación de las superficies antes de realizar la soldadura.

- **Probeta PY:**

Se originan al finalizar el cordón de soldadura por una técnica inadecuada al cortar el arco, lo que causa una solidificación deficiente del charco. La contracción del metal genera fisuras en el

cráter, a veces con forma radial, conocidas como fisuras tipo estrella. Al producirse durante la solidificación, se consideran fisuras en caliente. Estas fisuras no ponen en riesgo la unión soldada.

- **Probeta PZ:**

La falta de material de aporte generalmente se debe a la mala técnica del soldador, no mantiene el electrodo en el lugar adecuado al iniciar y finalizar el cordón, deja zonas sin suficiente depósito de metal.

### 5.13 Inspección Por Tintas Penetrantes

Se realizaron pruebas de tintes penetrantes en tres probetas soldadas para detectar posibles discontinuidades superficiales. En la tabla 21 se presentan los resultados y observaciones para cada probeta:

**Tabla 50**

*Resultados de la inspección visual por tintes penetrantes (fluorescentes).*

Probeta	Observaciones	Defectos
PX	Presenta discontinuidad.	Falta de penetración
PY	No presenta discontinuidad.	Ninguna
PZ	No presenta discontinuidad	Ninguna

Fuente: Elaboración Propia.

- **Probeta PX: Insuficiente Penetración**

Probeta rechazada. La prueba de tintes penetrantes reveló insuficiente penetración en la soldadura. La insuficiente penetración indica que la soldadura no ha alcanzado la profundidad necesaria para asegurar una unión sólida y duradera. Este defecto puede comprometer la integridad estructural de la soldadura, por lo que esta probeta ha sido rechazada. Para evitar, se debe revisar y ajustar los parámetros de soldadura, tales como el amperaje y la velocidad de soldadura, para asegurar una penetración adecuada.

- **Probeta PY: Sin Discontinuidades**

Esta probeta es aceptada. La prueba de tintes penetrantes no reveló ninguna discontinuidad.

La soldadura de esta probeta es uniforme y no presenta defectos superficiales, lo que indica un proceso de soldadura correctamente ejecutado.

- **Probeta PZ: Sin Discontinuidades**

Esta probeta es aceptada. La prueba de tintes penetrantes no reveló ninguna discontinuidad.

La soldadura de esta probeta es uniforme y no presenta defectos superficiales, lo que indica un proceso de soldadura correctamente ejecutado.

#### 5.14 Ensayo de Doble.

En la tabla 51 se muestra los resultados obtenidos del ensayo de doble.

**Tabla 51**

*Resultados del ensayo de doble.*

Probeta	Doblado		Discontinuidad o defecto.	Calificación	
	Cara	Raíz		Cumple	No cumple
PX	X	X	No Presenta	X	
PY	X	X	No presenta	X	
PZ	X	X	No presenta	X	

Fuente: Elaboración Propia.

#### 5.15 Dilución y Composición Química del Deposito

En la tabla 52 se muestra la dilución obtenida en la soldabilidad de los tres electrodos.

**Tabla 52**

*Valores de dilución.*

Electrodo	Energía lineal (Kj/cm)	Tasa de deposición del electrodo ( $m_e$ ) (g/s)	Fusión del metal base $m_b$ (g/s)	Primer pase	Segundo pase
-----------	------------------------	--	-----------------------------------	-------------	--------------



E-307-16	8.85	0.27	0.11	28.9 %	9.1%
	9.6	0.30	0.03		
E-FeCr-A1	8.85	0.25	0.11	30.56 %	14,3%
	9.6	0.30	0.04		
E FeMn-B		0.25	0.11	30.15%	11,8%
	8.85				
	9.6	0.30	0.05		

Fuente: Elaboración Propia.

En las tablas 24, 25 y 26, se muestra la composición química de la probeta PX, PY y PZ.

**Tabla 53**

*Composición química de la probeta PX.*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E 307-16	Primer deposito	Segundo deposito
Carbono (C)	1.20 %	0.08%	0.40%	0.22%
Manganeso (Mn)	12.00 %	4.00 %	4.18%	5.1%
Fósforo (P)	-----	0.025 %	0.018%	0.19%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%	0.19%
Silicio (Si)	-----	0.40%	0.28%	0.39%
Niquel (Ni)	-----	9.50 %	6.75%	9.25%
Cromo (Cr)	-----	19.70 %	14.00%	19.18%
Molibdeno (Mo)	1.00 %	1.00 %	1.00%	1.1%

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 54**

*Composición química de la probeta PY*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E-FeCr- A1	Primer deposito	Segundo deposito
Carbono (C)	1.20 %	4.0%	1.06 %	3.75%
Manganeso (Mn)	12.00 %	1.10 %	4.43 %	3.29%
Fósforo (P)	-----	0.020 %	0.014%	0.014%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%	0.014%
Silicio (Si)	-----	0.60%	0.41%	0.57%
Molibdeno (Mo)	1.0%	-----	0.305%	0.186%

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 55***Composición química de la probeta PZ*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E FeMn-B	Primer deposito	Segundo deposito
Carbono (C)	1.20 %	1.0%	1.07%	1.15%
Manganeso (Mn)	12.00 %	13.0 %	12.70%	14.38%
Fósforo (P)	-----	0.020 %	0.014%	0.019%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%	0.019%
Silicio (Si)	-----	0.50%	0.34%	0.48%
Molibdeno (Mo)	1.0%	-----	0.315%	0.118%

Fuente: Elaboración Propia.

- **Electrodo ASW E307-16**

La composición química de los depósitos soldados revela una marcada influencia de la dilución entre el acero base ASTM A128 y el metal de aporte E307-16, especialmente en el primer depósito, donde elementos como el carbono y el manganeso, característicos del acero al manganeso, disminuyen significativamente respecto al metal base. Esto sugiere una alta dilución inicial, lo cual es típico cuando se realiza la primera pasada directamente sobre probeta. En contraste, el segundo depósito muestra una mayor similitud con la composición química del electrodo, indicando una menor dilución y mayor predominancia del material de aporte. Esta transición es importante, ya que el aporte de elementos como cromo (Cr) y níquel (Ni) en el segundo cordón contribuye a mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste, mientras que la disminución del carbono y manganeso reduce la posibilidad de endurecimiento por trabajo, característica deseada en ciertos casos para evitar fragilidades.

- **Electrodo AWS E-FeCr-A1**

El análisis químico de los depósitos obtenidos revela una significativa influencia del fenómeno de dilución, especialmente en el primer depósito. Esta influencia se manifiesta

principalmente en los contenidos de carbono y manganeso, dos elementos críticos para el comportamiento mecánico del recubrimiento.

El contenido de carbono en el primer depósito (1.07 %) se encuentra muy cercano al del acero base (1.20 %), lo cual indica una alta dilución del metal de aporte (4.0 % C) con el material base. En el segundo depósito, el contenido de carbono asciende a 3.75 %, valor mucho más próximo al del electrodo, lo cual sugiere una menor dilución y una mayor presencia del metal de aporte. Este comportamiento es coherente con el hecho de que las primeras pasadas tienen mayor contacto con el acero base y, por tanto, absorben más de su composición, mientras que las pasadas subsiguientes se depositan sobre metal previamente soldado.

- **Electrodo AWS E FeMn-B**

El análisis químico de los depósitos obtenidos evidencia una compatibilidad composicional elevada entre el metal de aporte y el material base, particularmente en lo que respecta al contenido de manganeso. Este hecho tiene implicancias significativas en el comportamiento mecánico en la soldabilidad, así como en su microestructura y dureza final.

### 5.16 Perfiles de dureza

En la tabla 56 se detallan los valores en HB de los perfiles de dureza de los cupones

**Tabla 56**

*Valores del perfil de durezas.*

Probeta	Metal base (lado izquierdo)	ZAC (lado izquierdo)	Deposito	ZAC (lado derecho)	Metal base (lado derecho)
PX (E307-16)	200	219	200	216	200

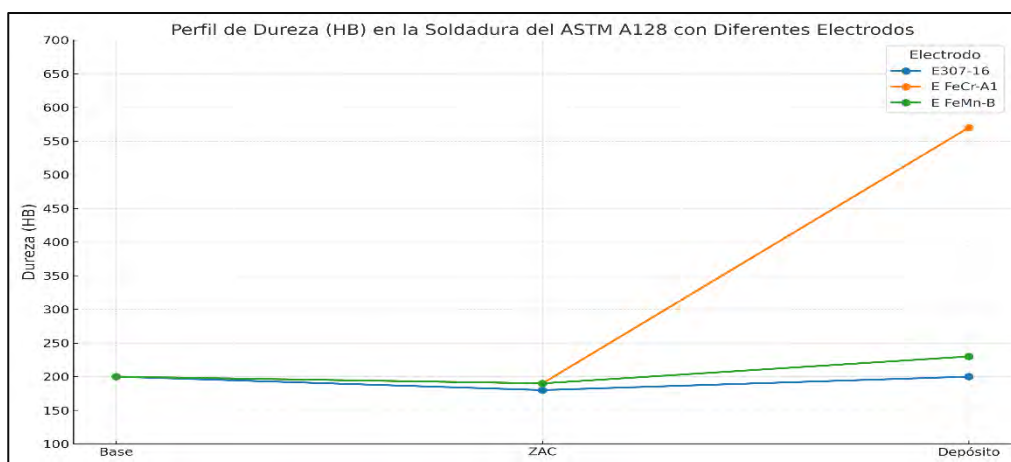
PY(E-FeCr-A1)	200	205	550	204	200
PZ(E FeMn-B)	200	277	220	280	200

Fuente: Elaboración Propia.

Los valores de dureza obtenidos se grafican en la figura 67

### Figura 68

#### Perfil de durezas



Fuente: Elaboración Propia.

La figura 67, muestra el perfil de dureza (en HB) del acero ASTM A128 desde el material base, a través de la zona afectada por el calor (ZAC), hasta el depósito de soldadura, para tres tipos de electrodos: AWS E307-16, AWS E FeCr-A1 y AWS E FeMn-B. Se observa que el electrodo E FeCr-A1 genera un depósito con durezas mucho mayores, mientras que los otros dos mantienen valores cercanos al material base.

## CAPITULO VI

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La investigación permitió comparar el comportamiento de los electrodos E307-16, E-FeCr-A1 y E FeMn-B durante la soldadura SMAW aplicada al acero de alta aleación ASTM A128. Los resultados se relacionan de manera consistente con lo reportado en los antecedentes internacionales y nacionales, proporcionando fundamentos sólidos para la selección del material de aporte más adecuado.

#### **6.1 Comparación de la composición química de los depósitos con los antecedentes:**

Los distintos depósitos obtenidos mostraron variaciones significativas en su composición química respecto al metal base. Este comportamiento coincide con lo expuesto por Mandal y Bhattacharya (2020), quienes indicaron que las diferencias químicas entre electrodos pueden modificar la microestructura y las propiedades del cordón, especialmente cuando estos materiales poseen distintos contenidos de elementos aleantes.

En este estudio, se observó que:

El electrodo E307-16 aporta altos niveles de Cr y Ni, generando depósitos con características similares a aceros inoxidable austeníticos.

El electrodo E-FeCr-A1 introdujo un contenido elevado de carbono y cromo, incrementando la dureza pero alejándose de la composición del acero base.

El electrodo E FeMn-B mostró la mayor compatibilidad metalúrgica con el ASTM A128,

especialmente en manganeso y carbono.

Esta compatibilidad coincide con lo señalado por Delgado (2023), quien concluyó que, para aceros sometidos a desgaste, la similitud química entre metal base y metal de aporte favorece un mejor desempeño estructural, reduciendo tensiones y evitando microestructuras frágiles.

Asimismo, los niveles bajos de fósforo y azufre en el electrodo FeMn-B están alineados con lo planteado por López Ibarra (2012), quien destacó que estos elementos incrementan la fragilidad en zonas recargadas si no se controlan adecuadamente. En nuestro caso, el FeMn-B presentó menor riesgo de fragilización, reforzando su ventaja metalúrgica.

## **6.2 Discusión sobre la dureza de los depósitos obtenidos:**

Los valores de dureza registrados muestran variaciones claras entre los tres electrodos:

PX (E307-16) mantiene una dureza similar al metal base, indicando un comportamiento relativamente estable.

PY (E-FeCr-A1) alcanza el valor más alto de dureza (550 HB), reflejando su elevada capacidad endurecedora.

PZ (E FeMn-B) presenta durezas moderadas (220 HB en el depósito y hasta 280 HB en la ZAC), lo que representa un equilibrio entre tenacidad y resistencia al desgaste.

Estos resultados guardan relación directa con los hallazgos de Kumar, Singh y Verma (2021), quienes demostraron que los electrodos de mayor aleación pueden generar microestructuras más duras, pero no necesariamente más estables para aplicaciones industriales

donde se requiere resistencia sin fragilización.

Mientras que el E-FeCr-A1 produjo la mayor dureza, se debe considerar que valores extremadamente altos pueden generar tensiones internas que comprometan la integridad del cordón. Por el contrario, el FeMn-B obtuvo una dureza suficiente para resistir desgaste, pero sin exceder los límites que podrían inducir agrietamiento o pérdida de tenacidad.

Este balance coincide con los estudios nacionales de Quispe y Ramos (2022), quienes concluyeron que los electrodos técnicamente compatibles muestran una dureza adecuada y homogénea, lo cual favorece la confiabilidad de la unión soldada.

### **6.3 Discusión sobre la selección del electrodo más óptimo**

El análisis comparativo de la soldabilidad entre los tres electrodos lleva a determinar que el E FeMn-B es el más apropiado para el acero ASTM A128. Los criterios evaluados coinciden con las conclusiones de diversos antecedentes:

#### ***6.3.1 Compatibilidad metalúrgica***

La similitud química entre el FeMn-B y el ASTM A128 coincide con las conclusiones de Delgado (2023), quien señala que la compatibilidad entre metal base y de aporte garantiza recubrimientos más estables y resistentes.

#### ***6.3.2 Riesgo de fragilización***

La baja presencia de P y S en el FeMn-B refleja menor riesgo de fragilidad, tal como lo menciona López Ibarra (2012), quien recalca que estos elementos deben mantenerse bajos para

evitar fallas prematuras.

### ***6.3.3 Dureza adecuada***

Los valores obtenidos confirman un equilibrio entre dureza y tenacidad. Este comportamiento es coherente con lo expuesto por Mandal y Bhattacharya (2020), quienes indican que un electrodo adecuado no solo debe endurecer, sino mantener la cohesión y resistencia del cordón.

### ***6.3.4 Control de la dilución***

La dilución moderada encontrada en los depósitos del FeMn-B coincide con lo indicado por investigaciones previas, que señalan la importancia de controlar la mezcla entre metal base y metal de aporte para evitar variaciones bruscas en propiedades mecánicas.

## **6.4 Síntesis general de la discusión**

Al comparar los resultados experimentales con los antecedentes:

El comportamiento químico de los electrodos concuerda con estudios internacionales sobre variación microestructural por tipo de recubrimiento.

Las diferencias en dureza se corresponden con la literatura que advierte sobre la influencia de aleantes como Cr, Ni y Mn.

La selección del electrodo FeMn-B como la mejor alternativa está en línea con las recomendaciones de investigaciones nacionales que destacan la compatibilidad metalúrgica como criterio fundamental.

En conjunto, los resultados experimentales no solo respaldan los antecedentes consultados,



sino que aportan evidencia práctica para la soldadura del acero ASTM A128 bajo condiciones reales de taller.

## CONCLUSIONES

**Primera:** Los electrodos utilizados presentan diferentes composiciones químicas y propiedades mecánicas en comparación al metal base (ASTM A128), que hacen se obtenga depósitos con diferentes composiciones químicas, como se muestra en las tablas siguientes:

- *Composición química de la probeta PX.*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E 307-16	Primer deposito	Segundo deposito
Carbono (C)	<b>5.20</b>	0.08%	0.40%	0.22%
Manganeso (Mn)	12.0	4.0	4.18%	5.1%
Fósforo (P)	-----	0.25	0.018%	0.19%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%	0.19%
Silicio (Si)	-----	0.40%	0.28%	0.39%
Niquel (Ni)	-----	9.50	6.75%	9.25%
Cromo (Cr)	-----	19.70	14.00%	19.18%
Molibdeno (Mo)	1.00 %	1.00 %	1.00%	1.1%

Fuente: Elaboración Propia.

- *Composición química de la probeta PY*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E-FeCr-A1	Primer deposito	Segundo deposito
Carbono (C)	1.20 %	4.0%	1.06 %	3.75%
Manganeso (Mn)	12.00 %	1.10 %	4.43 %	3.29%
Fósforo (P)	-----	0.020 %	0.014%	0.014%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%	0.014%
Silicio (Si)	-----	0.60%	0.41%	0.57%
Molibdeno (Mo)	1.0%	-----	0.305%	0.186%

Fuente: Elaboración Propia.

- *Composición química de la probeta P.*

Elemento	Acero ASTM A128	Metal de aporte E FeMn-B	Primer deposito	Segundo deposito
----------	-----------------	--------------------------	-----------------	------------------

Carbono (C)	1.20 %	1.0%	1.07%	1.15%
Manganeso (Mn)	12.00 %	13.0 %	12.70%	14.38%
Fósforo (P)	-----	0.020 %	0.014%	0.019%
Azufre (S)	-----	0.020%	0.014%	0.019%
Silicio (Si)	-----	0.50%	0.34%	0.48%
Molibdeno (Mo)	1.0%	-----	0.315%	0.118%

Fuente: Elaboración Propia.

**Segunda:** Los depósitos de soldadura obtenidos con los electrodos muestran diferentes valores de dureza, como la mostrada en la siguiente tabla:

Probeta	Metal base (lado izquierdo)	ZAC (lado izquierdo)	Deposito	ZAC (lado derecho)	Metal base (lado derecho)
PX (E307-16)	200	219	200	216	200
PY(E-FeCr-A1)	200	205	550	204	200
PZ(E FeMn-B)	200	277	220	280	200

Fuente: Elaboración Propia.

**Tercera:** En base al análisis comparativo realizado entre los tres electrodos (E307-16, E-FeCr-A1 y E FeMn-B) para la soldabilidad del acero ASTM A128, el electrodo E FeMn-B se presenta como la opción más óptima. Esto se debe a varios factores entre los cuales podemos citar:

- ✓ **Compatibilidad metalúrgica:** El E FeMn-B tiene una composición más similar al acero base ASTM A128, especialmente en su contenido de manganeso (Mn) y carbono (C), lo que facilita la fusión y reduce la posibilidad de defectos en la unión soldada.
- ✓ **Bajo riesgo de fragilización:** Este electrodo presenta los niveles más bajos de fósforo (P) y azufre (S), lo que minimiza los riesgos de fragilización en la zona de soldadura y mejora la tenacidad del recubrimiento.

- ✓ **Dureza adecuada:** El E FeMn-B ofrece una dureza considerable debido a su contenido de carbono y manganeso, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren resistencia al desgaste sin comprometer la integridad estructural.
- ✓ **Control sobre la dilución:** La dilución en los depósitos de este electrodo es moderada, lo que permite mantener una composición química favorable en la zona afectada por el calor (ZAC), reduciendo la posibilidad de formaciones no deseadas que podrían afectar la resistencia de la soldadura.

Por lo tanto, E FeMn-B sobresale como la mejor alternativa para aplicaciones que demandan un buen balance entre resistencia al desgaste, tenacidad, y compatibilidad metalúrgica con el acero ASTM A128.

## RECOMENDACIONES

**Primera:** Se recomienda elegir el material de aporte considerando no solo la composición química similar al metal base, sino también las propiedades mecánicas requeridas en el servicio y las condiciones de operación (temperatura, carga, ambiente corrosivo, etc.).

**Segunda:** Es importante ajustar parámetros como la intensidad de corriente, la velocidad de soldeo y el tipo de electrodo para minimizar defectos, controlar la dilución y obtener una microestructura favorable que garantice una buena soldabilidad.

**Tercera:** Se sugiere realizar pruebas adicionales como ensayos de impacto, análisis de dureza en diferentes zonas (depósito, ZAC y metal base) y análisis metalográfico para una evaluación más completa de la soldabilidad y el comportamiento del material.

**Cuarta:** Se recomienda capacitar permanentemente al personal de soldadura en técnicas específicas para trabajar con aceros de alta aleación, ya que su manipulación requiere mayor control y conocimiento técnico.

## REFERENCIAS

- A.Garcia, A. J. (2010). Estudio tribologico de aceros austeniticos tipo hadfield, influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste. *Metalurgia*, 46, 47-52. Obtenido de [https://www.academia.edu/11560942/Estudio\\_tribol%C3%B3gico\\_de\\_aceros\\_austen%C3%ADti cos\\_tipo\\_Hadfield\\_influencia\\_del\\_manganeso\\_en\\_su\\_respuesta\\_frente\\_al\\_desgaste](https://www.academia.edu/11560942/Estudio_tribol%C3%B3gico_de_aceros_austen%C3%ADti cos_tipo_Hadfield_influencia_del_manganeso_en_su_respuesta_frente_al_desgaste)
- Alonso, C. (2012). *Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto*. Cano Pina Ceysa.
- American Welding Society. (1991). *Welding Handbook Materials and applications*.
- American Welding Society RI. (26 de Agosto de 2009). *Manual de Soldadura*. Obtenido de pdfcoffee.com: <https://pdfcoffee.com/manual-de-soldadura-vol-1-aws-pdf-free.html>
- ANSI/AWS D1.1. 2000. (05 de Julio de 2000). *Sociedad americana de soldadura*. Obtenido de <https://studylib.net/doc/26313809/ansi-aws-d1-1>
- ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys*. <https://tajhizkala.ir/doc/ASM/ASM%20Handbook%20Vol%201.pdf>.
- ASTM International. (16 de Agosto de 2017). *Métodos de prueba estándar para dureza Rockwell y dureza superficial Rockwell de materiales metálicos*. Obtenido de [www.astm.org](https://www.astm.org/e0018-03.html): <https://www.astm.org/e0018-03.html>
- Bautista Rodríguez, E., López Baltazar, E., Martínez Gonzáles, C., Alvarado Hernández, F., & Baltazar Hernández, V. (2022). *RESISTENCIA AL DESGASTE EN DEPÓSITOS DE SOLDADURA CON ALTO CONTENIDO DE Cr SOBRE UN ACERO ASTM A128*. FIAU. Obtenido de <https://revistas.uss.edu.pe/index.php/ING/article/view/2167>
- BFMéxico. (14 de Febrero de 2022). *Cedulacion de parámetros para soldadura*. Obtenido de [bfmx.com](https://bfmx.com/soldadura/parametros-de-soldadura-que-debes-regular/): <https://bfmx.com/soldadura/parametros-de-soldadura-que-debes-regular/>
- Bravo Calvo, E. F. (27 de Enero de 2022). *Imperfecciones En Soldadura Y Tipos De Discontinuidades Introducción*. Obtenido de [www.academia.edu](https://www.academia.edu/33510097/Imperfecciones_En_Soldadura_Y_Tipos_De_Discontinuidades_Introducci%C3%93n): [https://www.academia.edu/33510097/Imperfecciones\\_En\\_Soldadura\\_Y\\_Tipos\\_De\\_Discontinuidades\\_Introducci%C3%93n](https://www.academia.edu/33510097/Imperfecciones_En_Soldadura_Y_Tipos_De_Discontinuidades_Introducci%C3%93n)
- Bundy, J., & Hobart, H. (8 de septiembre de 2010). *El agrietamiento de la soldadura no tiene por qué ser un enigma*. Obtenido de OEM OFF-HIGHWAY: <https://www.oemoffhighway.com/drivetrains/hardware/article/10169444/hobart-brothers-weld-cracking-can-seriously-impact-a-companys-productivity-and-product-reliability>
- Callister, W. (2000). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Madrid: Reverté.
- Cárdenas, R. S. (2023). *ESTUDIO DE SOLDABILIDAD APLICADO A LA RECUPERACIÓN DE*. Lima.
- CC.OO, F. d. (2011). *Ensayos destructivos metalurgicos*. Federacion de enseñanza de CC.OO, Andalucía. España.

- Chambi Paucar, H. G. (2014). Análisis De La Recuperación Del Pestillo De Compuerta De Cucharón De Pala Mecánica 3800-4100 Por Proceso De Soldadura Smaw. *Tesis Pregrado*. Universidadnacionaldesanagustín De Arequipa, Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2645/IMchpahg.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chang, B. J. (2015). *RECONSTRUCCIÓN Y/O REPARACIÓN DE PIEZAS DE FUNDICION GRIS, POR MEDIO DE SOLDADURA AL ARCO (SMAW)*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- David, E. A. (2015). "ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO EN EL PROCESO DE UNIÓN DE TUBERÍAS DE AGUA DE HIERRO NODULAR MEDIANTE SOLDADURA SMAW CON ELECTRODO REVESTIDO AWS ENiFe – C Y SU INCIDENCIA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA JUNTA SOLDADA". Universidad tecnica de Ambato, Ambato - Ecuador.
- De Maquinas. (2018). *¿Qué es la Soldadura SMAW?* Obtenido de De maquinas y herramientas: <https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/soldadura-smaw-que-es-y-procedimiento>
- Delgado, L. C. (2018). Obtenido de repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/9003/IMabdelc.
- Destructivos, A. d. (2009). Ensayos no destructivos- Líquidos penetrantes. *Ensayos no destructivos- Líquidos penetrantes*. Asociacion despañola de ensayos no destructivos, Madrid.
- Doctor Welding. (26 de Junio de 2020). *Las posiciones en soldadura*. Obtenido de <https://doctorwelding.com/como-se-clasifican-los-metales/>
- Echevarria, R. (2002). *Defectologia*. Universidad Nacional de Comahue, Santiago de Chile, Chile.
- Ecuador Documents. (2020). *Introducción A La Metalurgia De La Soldadura*. Obtenido de fdocuments.ec: <https://fdocuments.ec/document/introduccion-a-la-metalurgia-de-la-soldadura-56645fa627950.html?page=17>
- (2015). *EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA DE LA UNIÓN DISÍMIL ENTRE ACEROS API 5L X70 PSL1 Y ASTM A707 L5 F65*. Lima.
- Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía. (2011). Ensayos Destructivos Metalúrgicos. *Revista digital para profesionales de la enseñanza.*, 1-14. Obtenido de <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8427.pdf>
- Fosca, C. (2007). Introducción a la metalurgia de la soldadura. *Introduccion a la metalurgia de la soldadura*. PUCP, Lima, Peru. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/476338671/Introduccion-a-la-Metalurgia-de-la-Soldadura-Carlos-Fosca-pdf>
- García, A., Varela, Á., Mier, J., Camba, C., & Barbadillo, F. (2010). Estudio tribológico de aceros austeníticos tipo hadfield, influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste. *Metalurgia*, 46, 47-52. Obtenido de [https://www.academia.edu/11560942/Estudio\\_tribol%C3%B3gico\\_de\\_aceros\\_austen%C3%ADcos\\_tipo\\_Hadfield\\_influencia\\_del\\_manganeso\\_en\\_su\\_respuesta\\_frente\\_al\\_desgaste](https://www.academia.edu/11560942/Estudio_tribol%C3%B3gico_de_aceros_austen%C3%ADcos_tipo_Hadfield_influencia_del_manganeso_en_su_respuesta_frente_al_desgaste)

- González Arias, A. (1995). *Laboratorio de ensayos industriales* (14 ed.). Ediciones Letina. Obtenido de <https://es.slideshare.net/slideshow/laboratorio-y-ensayos-industriales-por-gonzalez-arias/105037838>
- Higuera, O. F., Trisancho, J. L., & Florez, L. C. (2007). *Fundamentos teóricos de los aceros auténticos al manganeso (aceros hadfield)*. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- Ingemecánica. (12 de Octubre de 2022). *Medición de la Dureza de los Materiales*. Obtenido de ingemecanica.com: [https://ingemecanica.com/tutoriales/tabla\\_dureza.html](https://ingemecanica.com/tutoriales/tabla_dureza.html)
- Jeffus, L. (1 de Julio de 2009 ). *Soldadura. Principios y aplicaciones*. Obtenido de books.google.com.pe: [https://books.google.com.pe/books/about/Soldadura\\_Principios\\_y\\_aplicaciones.html?id=rHynAxzh0iEC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/Soldadura_Principios_y_aplicaciones.html?id=rHynAxzh0iEC&redir_esc=y)
- Lena, P. (2008). *Introducción a la Ingeniería de Materiales*. Lima: Pontificia Universidad Católica, Fondo Editorial.
- Lincoln Electric. (2013). *Soldeo manual con electrodos revestidos*. Lincoln Electric. Obtenido de [https://www.academia.edu/7303830/Manual\\_Lincol\\_Electrodos](https://www.academia.edu/7303830/Manual_Lincol_Electrodos)
- Lopez Ibarra, A. (2012). Influencia del coeficiente de dilucion sobre la dureza de la capa aportada en el relleno superficial. *Influencia del coeficiente de dilucion sobre la dureza de la capa aportada en el relleno superficial*. Universidad Autonoma de Zacatecas, Mexico.
- Luna Tejada, R. A. (2015). *EVALUACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA DE LA UNIÓN DISÍMIL ENTRE ACEROS API 5L X70 PSL1 Y ASTM A707 L5 F65*. Lima.
- Mamani Alanoca, M. A. (2018). *“ESTUDIO DE PARÁMETROS DE SOLDABILIDAD EN LA RECONSTRUCCIÓN DE PIEZAS DE HIERRO FUNDIDO GRI*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Puno.
- Marcos, C. A. (2015). *Manual de prácticas de soldadura*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Oerlikon. (2008). *Manual de Soldadura & Catálogo de Productos*. Lima: Exsa. Obtenido de <https://www.soldaceros.com.pe/wp-content/uploads/2015/09/Manual-de-Soldadura-OERLIKON.pdf>
- Pérez Cargua, M. A., & Pullas Rea, L. M. (2009). Influencia De La Utilización De Insertos De Varilla Corrugada Sobre Las Soldaduras De Perfil Estructural. *Tesis de posgrado*. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf>
- Perez Cepeda, J. A. (2011). *Perez Cepeda, Jaime Andres*. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7853>
- Radeva, V. (2014). Ciencia De Los Materiales Manual De Prácticas. *Ciencia De Los Materiales Manual De Prácticas*. Instituto Tecnológico De Santo Domingo, Santo Domingo. Obtenido de [https://www.academia.edu/27978069/CIENCIA\\_DE\\_LOS\\_MATERIALES\\_MANUAL\\_DE\\_PR%C3%81CTICAS](https://www.academia.edu/27978069/CIENCIA_DE_LOS_MATERIALES_MANUAL_DE_PR%C3%81CTICAS)
- Rojas, J. (6 de Noviembre de 2011). *Proceso de Soldadura SMAW*. Obtenido de <http://instructorjrp.blogspot.com/2011/11/proceso-de-soldadura-smaw.html>



- SlidePlayer. (2014). *Tecnologías de unión*. Obtenido de <http://slideplayer.es/http://slideplayer.es/slide/26599/>
- Society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.
- Soldadura. (2010). *Posiciones de soldadura*. Obtenido de <http://www.scalofrios.es/soldadura/pag/pdf/Posiciones%20de%20soldadura.pdf>
- Soldadura Mupes . (2017). *Uniones y simbolización*. Obtenido de <https://soldadura-mupes.blogspot.com/p/uniones-y-simbolizacion.html>
- Soldexa. (2011). *Manual de Soldadura y Catálogo de Productos*. Oerlikon. Obtenido de <https://es.slideshare.net/RonPincu/manual-soldadura-soldexa-15139801>
- Soldexa. (2021). *Catálogo de Consumibles*. Lima: Nazca Electrodo Soldexa. Obtenido de [https://www.syhrep.com/wp-content/uploads/2021/06/Catalogo\\_Soldexa\\_NAZCA\\_sp\\_pe\\_rev0\\_v4.pdf](https://www.syhrep.com/wp-content/uploads/2021/06/Catalogo_Soldexa_NAZCA_sp_pe_rev0_v4.pdf)
- TWI. (2020). *Bend testing*. Obtenido de <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/bend-testing-073>
- Walteros Larrotta, G. (10 de Abril de 2010). *Manual de Soldadura Und 5 Tipos de Uniones*. Obtenido de [es.scribd.com: https://es.scribd.com/doc/29706904/Manual-de-Soldadura-Und-5-Tipos-de-Uniones](https://es.scribd.com/doc/29706904/Manual-de-Soldadura-Und-5-Tipos-de-Uniones)

# ANEXOS

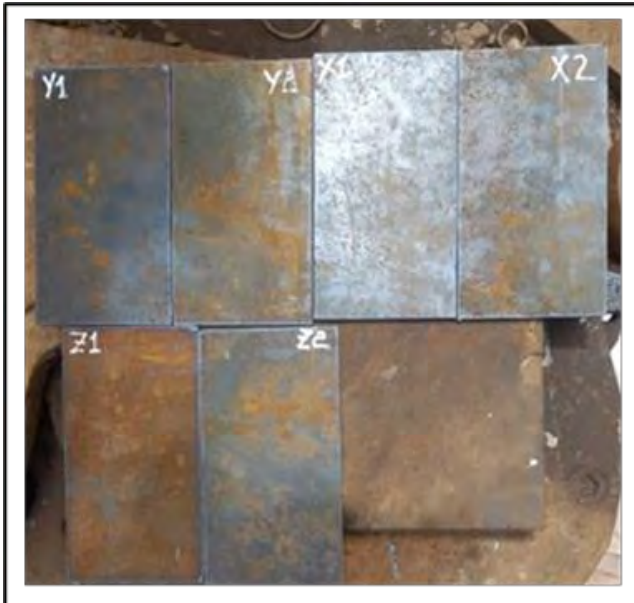
### Anexo 01: Matriz de consistencia

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Dependiente/Dimensiones	Metodología
¿Cómo influirá el tipo de electrodo revestido en la calidad de la unión y la resistencia mecánica de un acero de alta aleación soldado mediante el proceso SMAW?	Realizar la evaluación comparativa de la soldabilidad de un acero de alta aleación mediante el proceso SMAW para determinar cuál de ellos ofrece mejores resultados en calidad de unión y resistencia mecánica.	El tipo de electrodo revestido influye significativamente en la calidad de la unión y la resistencia mecánica de un acero de alta aleación soldado mediante el proceso SMAW.	Evaluación de la soldabilidad del acero de alta aleación  <b>Dimensiones:</b> - Propiedades mecánicas del cordón de soldadura. - Integridad de la unión soldada.	<b>Enfoque de Investigación:</b> Cuantitativo;  <b>Tipo de investigación:</b> Aplicada  <b>Nivel de investigación:</b> Explicativo  <b>Diseño de investigación:</b> Experimental; ensayos de dureza y END.
Problemas específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variables Independientes/Dimensiones	
<ul style="list-style-type: none"> <li>¿Qué diferencias presentarán los electrodos revestidos en cuanto a sus propiedades químicas y mecánicas cuando sean aplicados a la soldadura de aceros de alta aleación?</li> <li>¿Cómo variará la calidad de la soldadura y la dureza del metal depositado y de la zona afectada por el calor al emplear distintos electrodos en el proceso SMAW?</li> <li>¿Cuál de los electrodos evaluados proporcionará los mejores resultados en términos de propiedades mecánicas y calidad de la unión soldada en un acero de alta aleación?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analizar las características químicas y mecánicas de los diferentes electrodos revestidos aplicados en la soldadura del acero de alta aleación.</li> <li>Evaluar la calidad de las uniones soldadas mediante ensayos no destructivos y pruebas de dureza en el metal depositado y la zona afectada por el calor.</li> <li>Comparar los resultados obtenidos con cada electrodo para seleccionar el material de aporte que proporcione la mejor combinación de propiedades mecánicas y calidad de soldadura.</li> </ul>	<p>Los electrodos revestidos presentan diferencias en composición química y propiedades mecánicas, afecta en la soldadura del acero de alta aleación.</p> <p>Las uniones soldadas con diferentes electrodos varían en la calidad de la soldadura y dureza del metal depositado y la zona afectada por el calor.</p> <p>De los resultados obtenidos existe al menos un tipo de electrodo que mejora las propiedades mecánicas y la calidad de soldadura de acero de alta aleación mediante SMAW.</p>	<p>Condiciones del proceso SMAW</p> <p><b>Dimensiones:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Material de aporte (electrodo revestido)</li> <li>Parámetros operativos del proceso SMAW</li> <li>Condiciones térmicas del proceso de soldadura</li> <li>Estabilidad y control del arco eléctrico</li> <li>Compatibilidad metalúrgica electrodo-metal base</li> <li>Tendencia a la generación de defectos de soldadura</li> <li>Eficiencia del electrodo en el proceso SMAW</li> </ul>	<p><b>Población:</b> Constituida por todas las uniones soldadas que pueden realizarse en el Taller de Manufactura por el proceso SMAW sobre acero de alta aleación</p> <p><b>Muestra:</b> Conjunto de cordones de soldadura en 06 probetas que permiten evaluar la dureza del depósito y la calidad de la unión.</p> <p><b>Técnicas de Investigación:</b> Observación Preparación de probetas Ensayos de laboratorio Selección de electros Selección de corriente Ensayos no destructivos Dureza</p>

Fuente: Elaboración Propia.

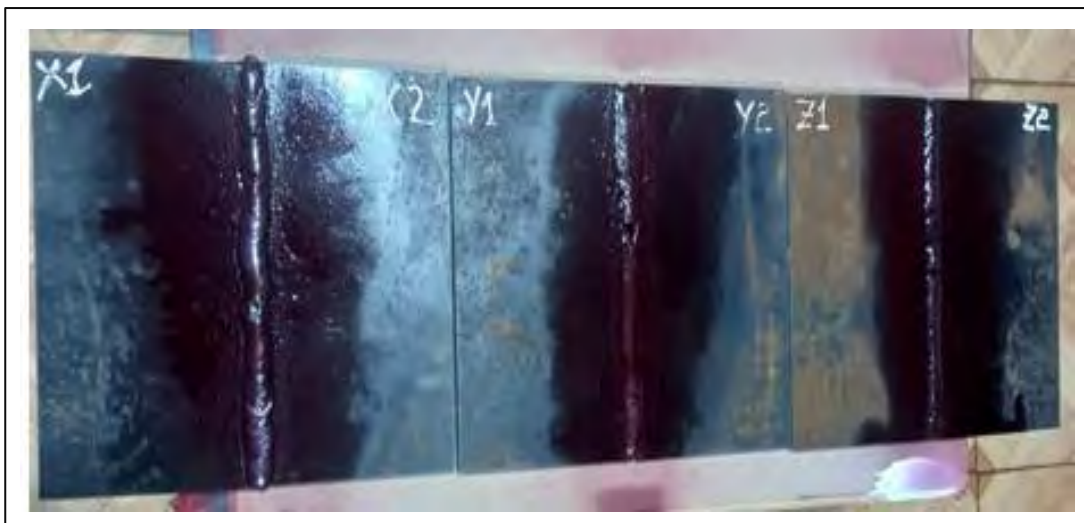
**Anexo 01**

Elección y preparación (biselado) de probetas para la soldadura con los diferentes electrodos revestidos



**Anexo 02**

Probetas soldadas, preparación de líquido penetrante, tinte revelador.





### Anexo 03

Corte de probetas para la prueba de doblado.



## Anexo 04

Prueba de doblado.



## Anexo 05

### Ficha técnica CITODUR 1000

#### SMAW

#### Recubrimiento Protector



#### CITODUR 1000

Electrodo para recargue de gran resistencia a la corrosión oxidación y abrasión severa. El material depositado es una fundición blanca con alto contenido de cromo (36%), por lo que, se recomienda aplicar 2 pases para que el relleno no se desprenda. En la mayoría de los casos, para obtener las características deseadas, es recomendable usar una cama cojín apropiada en función a las características del material base o los desgastes presentes. Gracias a su alto contenido de carburos de cromo, el depósito conserva la resistencia a la abrasión severa aún a temperaturas elevadas (hasta 1000°C). Los cordones que deposita son perfectamente lisos, libres de poros, sin salpicaduras ni inclusiones de escoria. El material de aporte es no maquinable, pero puede ser forjado y templado.

Clasificación	
AWS A5.13 / ASME SFA-5.13	EFeCr-A8
DIN 8555	E10 - UM 60 CGRZ

#### Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
4,00	1,10	0,60	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	36,00	-	-

#### Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]	Dureza
Sin tratamiento	-	-	-	-	58 - 62 HRC

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantener en un lugar seco y evitar humedad.</li> <li>No requiere almacenamiento bajo horno.</li> <li>Resecado de 300°C a 350°C por 2 horas.</li> </ul>

Posiciones de Soldadura

#### Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo	-	-	120	150	180	-	-
Amperaje máximo	-	-	140	160	230	-	-

#### Aplicaciones

- Para recuperar y recubrir piezas que están expuestas a desgaste por abrasión severa y bajo impacto.
- Usado en la industria minera, siderúrgica, construcción, ladrillera, cementera, agrícola y todas aquellos sectores donde los materiales están expuestos a desgaste abrasivo severo.
- Ideal para la recuperación y protección de dientes, cucharas, baldes y cubos de draga, sinfines de transporte, paletas de mezcladoras, uñas de palas, bombas de arena, aletas de ventiladores, etc.
- Para ollas, moldes y bordes de cucharas de fundición, que sufren desgaste por abrasión o erosión de escorias o metal líquido a temperatura elevadas.




## Anexo 06

### Ficha técnica CITORIEL 801

**SMAW**

**Acero Inoxidable**



CITORIEL 801

Electrodo austenítico de tipo 18/8 con 4% Mn. El contenido de Mn le confiere la capacidad de autoendurecerse en trabajo hasta 50 HRC. CITORIEL 801 tiene excelentes propiedades mecánicas (alta tenacidad) y alta resistencia al fusuramiento. Así mismo, posee alta resistencia a los desgastes combinados de impacto, fricción metal-metal, abrasión, corrosión y altas temperaturas. El depósito es libre de fisuras y poros, y presenta muy buen acabado, sin chisporroteo y con pocas pérdidas por salpicaduras.

Clasificación	
AWS A5.4 / ASME SFA-5.4	E307-16


**Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]**

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,08	4,00	0,40	máx. 0,025	máx. 0,020	0,50 1,50	9,50	19,70	-	-

**Propiedades Mecánicas del Metal Depositado**

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin tratamiento	> 590 (85 500)	350 (50 750)	> 30	> 80

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantener en un lugar seco y evitar humedad.</li> <li>Almacenamiento bajo horno: 50°C</li> <li>Resaca de 280°C a 300°C por 1 hora.</li> </ul>

Posiciones de Soldadura
P, H, Va, Sc. 

**Parámetros de Soldado Recomendados**

Para corriente continua (DC): Electrodo al positivo DCEP								
Diámetro	[mm]	1,60	2,00	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	5/64	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo	-	-	50	70	90	130	-	-
Amperaje máximo	-	-	75	120	140	180	-	-

**Aplicaciones**


- Diseñado para unir y recargar piezas de acero al carbono, aceros de baja aleación y aceros al manganeso.
- Usado para unir aceros al manganeso con aceros aleados o aceros al carbono.
- Para recuperar piezas que han sufrido desgaste por fricción metal-metal como: vías férreas, ranas, cambios y cruces de rieles.
- Para relleno de cadenas, catalinas (sprockets), tambores, coronas dentadas, etc.
- Para bordes de cucharas de draga, dientes de excavadoras, partes de molinos y pulverizadores.
- Muy usado en la industria papelera como base para los sinfines y transportadores de bagazo.
- Para la recuperación de dientes de engranaje (como recubrimiento final), reparación de válvulas, turbinas, etc.

## Anexo 07

### Ficha técnica CITOMANGAN.

# SMAW

## Recubrimiento Protector



CITOMANGAN

Electrodo que deposita un acero al manganeso con 12,0 – 14,0% Mn. Presenta excelente comportamiento frente a abrasión e impacto severo. El material depositado posee una estructura austenítica de gran tenacidad, que le permite absorber los golpes durante el trabajo. Por las características del CITOMANGAN, requiere estar expuesto a impacto severo para que la superficie se autoendurezca y llegue a una dureza final de 55 HRC. Usar una técnica de soldadura que garantice el mínimo aporte de calor y cuidar que la pieza no sobrepase los 250°C (riesgo de cristalización). Es susceptible al fisuramiento en caliente, riesgo que se incrementa por las elevadas contracciones que presenta este material. Cuando se trata de rellenos considerables, es necesario el empleo de cordones alternados, alivio de tensiones mecánico y de ser necesario soldar en tinas de agua para extraer el calor aportado.

Clasificación	
DIN 8555	E 7 - UM - 200 KP

**Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]**

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
1,00	12,00 14,00	0,50	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	-	-	-



**Propiedades Mecánicas del Metal Depositado**

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]	Dureza
Sin tratamiento Auto endurecido	-	-	-	-	19 - 28 HRC 50 - 60 HRC

**Conservación del Producto**

- Mantener en un lugar seco y evitar humedad.
- No requiere almacenamiento bajo horno.
- Resecado de 300°C a 350°C por 2 horas.

**Posiciones de Soldadura**

**Parámetros de Soldado Recomendados**

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo	-	-	-	110	140	170	-
Amperaje máximo	-	-	-	135	175	220	-

**Aplicaciones**

- Para recubrimiento de aceros que van a estar expuestos a desgaste abrasivo combinado con impacto severo.
- Utilizado con frecuencia en equipos de minería, movimiento de tierra, construcción y ferrocarril.
- Para unir y rellenar piezas de acero al manganeso (13%)
- Las aplicaciones principales son: Relleno de dientes de excavadoras, mandíbulas de trituradoras, forros de molino, cilindros de trapiche, rieles, cruces y desvíos de vías férreas, baldes de draga, zapatas para orugas, etc.

Observaciones: El éxito de la aplicación dependerá de la técnica de soldadura seguida, para lo cual, comuníquense con SOLDEXA para que le brindemos asesoramiento técnico.