

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



TESIS

**INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN LA
SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A572-50 POR EL PROCESO SMAW**
(Investigación tecnológica)

PRESENTADO POR:

Br. Carmen Concepcion Basilio Avendaño

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

ASESOR:

Mgt. Elías Teodoro Peña Peña

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

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

El que suscribe, el Asesor Eduardo Pérez Peña, quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: Infuencia de la Tensión de Corriente en la soldadabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SAW II (Investigación Tecnológica).

Presentado por: Carmen Concepción Basilio Arellano, DNI N° 48178106; presentado por: DNI N°: Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ing. Metalúrgica.

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

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, 22 de enero de 2026.

Firma

Post firma..... Eduardo Pérez Peña

Nro. de DNI..... 33965618

ORCID del Asesor..... 0006-0063-4929-0665

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 2759 : 547686227

Carmen Consepcion Basilio Avendaño

TESIS 2026 CARMEN - FINAL.docx

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:547686227

177 páginas

Fecha de entrega

20 ene 2026, 1:42 p.m. GMT-5

30.399 palabras

Fecha de descarga

20 ene 2026, 2:08 p.m. GMT-5

166.546 caracteres

Nombre del archivo

TESIS 2026 CARMEN - FINAL.docx

Tamaño del archivo

8.1 MB

8% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de fuentes excluidas

Fuentes principales

4%	 Fuentes de Internet
2%	 Publicaciones
7%	 Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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 y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad el Cusco.

Señores Docentes Miembros del Jurado:

Cumpliendo con la disposición del Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, y con el objeto de optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, pongo a vuestra consideración la tesis individual intitulada:

**“INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN LA SOLDABILIDAD DEL
ACERO ASTM A572-50 POR EL PROCESO SMAW”**

(Investigación tecnológica)

El presente trabajo de investigación se realizó con el propósito de evaluar la soldabilidad del acero ASTM A572 Grado 50 mediante el proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW). El estudio busca no solo determinar el comportamiento de este acero estructural frente a los parámetros del proceso y las condiciones térmicas de soldadura, sino también aportar información técnica que contribuya al desarrollo de procedimientos más eficientes y confiables en la fabricación y reparación de estructuras metálicas. Asimismo, los resultados obtenidos permitirán optimizar la calidad de las uniones soldadas, promoviendo la mejora continua en la industria metalmecánica local y regional, fortaleciendo su competitividad y capacidad tecnológica en la ejecución de proyectos de infraestructura y manufactura.

Br. Carmen Consepcion Basilio Avendaño

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado principalmente a mis padres Merciano y Eusevia , quien me inspiran y me dan la fortaleza para seguir adelante en la búsqueda de uno de mis sueños más anhelados.

También quiero dedicarlo a mi hermano Diego por su confianza en mí y su apoyo emocional que me ha brindado a lo largo de todos estos años.

Dedicarlo a todos mis amigos quienes han sido compañeros de estudios y también compañeros de vida quienes siempre estuvieron presentes en este camino de estudios y hacerlo más llevadero formando una amistad incondicional y sincera.

Quiero dedicarlo a todas las mis profesores y asesor Elias Teodoro Peña Peña que me han brindado su apoyo y han contribuido al éxito de este trabajo, especialmente a aquellos que nos han brindado su colaboración, han abierto sus puertas y compartido sus conocimientos conmigo.

Br. Carmen Conception Basilio Avendaño

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios , por darnos la fortaleza, sabiduría y salud para la realización de este trabajo de investigación .

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis padres por su amor, esfuerzo y sacrificio a lo largo de todos estos años. Gracias a ellos, he logrado llegar a este punto y convertirme en la persona que soy hoy.

Agradecer finalmente a todas las personas que han contribuido a la realización de este trabajo. A mis amigos , familiares y compañeros de trabajo que han ofrecido su apoyo, consejo y aliento en momentos clave .A mis profesores y Asesor Ing. Elias Teodoro Peña Peña quien ha guiado mi investigación y me ha proporcionado valiosas orientaciones , y por último a todas aquellos que han creído en mí y en mi capacidad para llevar a cabo este proyecto de investigación .

Br. Carmen Conception Basilio Avendaño

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE	V
INDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
APÉNDICES	XVIII
SIGLAS Y ABREVIATURAS	XIX
RESUMEN.....	XXI
ABSTRACT	XXII
INTRODUCCIÓN	XXIII
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Problema General y Específicos.....	2
1.2.1. Problema General	2
1.2.2. Problemas Específicos.....	2
1.3. Justificación	2
1.3.1. Justificación Tecnológica	2
1.3.2. Justificación Económica	2
1.3.3. Justificación Social	3
1.3.4. Justificación Ambiental	3

1.3.5.	Importancia	3
1.4.	Objetivos.....	4
1.4.1.	Objetivo General.....	4
1.4.2.	Objetivos Específicos	4
	MARCO TEÓRICO.....	5
2.1.	Antecedentes de La Investigación	5
2.1.1.	Antecedentes Internacionales.	5
2.1.2.	Antecedentes Nacionales.	7
2.1.3.	Antecedentes Locales.	8
2.2.	Aceros Estructurales	9
2.2.1.	Acero Estructural ASTM A572-50.....	12
2.2.1.1.	Aplicaciones del Acero ASTM A572-50.....	12
2.2.1.2.	Forma de Presentación del Acero Estructural ASTM 572 -50.	12
2.2.1.3.	Propiedades Mecánicas y Composición Química del Acero Astm A572-50.	19
2.3.	Soldadura.....	19
2.3.1.	Definición.	19
2.3.2.	Clasificación Según la American Welding Society (AWS)	20
2.3.3.	Soldadura por Arco de Metal Protegido (SMAW).....	22
2.3.3.1.	Definición y Descripción General	22
2.3.3.2.	Principio de Funcionamiento	23
2.3.3.3.	Principales Variables de Soldeo del Proceso SMAW.....	27
2.4.	Tipos de Junta.....	33
2.5.	Posiciones de Soldadura	34

2.6.	Soldabilidad.....	35
2.7.	Electrodos revestidos.....	35
2.8.	Zonas Metalúrgicas de la Soldadura.....	36
2.8.1.	Zona de Fusión (ZF)	37
2.8.2.	Zona Afectada por el Calor (ZAC).....	37
2.8.3.	Metal Base (MB)	38
2.8.4.	Sistema Hierro Carbono.	38
2.8.4.1.	Diagrama Hierro – Carbono.....	38
	Ciclo Térmico de la Soldadura.	40
2.8.5.	Importancia del Ciclo Térmico.....	40
2.8.6.	Cambios de Temperatura Durante el Soldeo (Ciclo Térmico)	41
2.8.6.1.	Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco.	
	41	
2.8.7.	Temperatura Máxima en Cada Punto de la ZAC	43
2.8.8.	Cálculo del Ancho de La ZAC	44
2.8.9.	Velocidad de Enfriamiento	44
2.9.	Ensayos no Destructivos (End) y Destructivos	45
2.9.1.	Ensayos no Destructivos.....	45
2.9.1.1.	Inspección Visual.....	46
2.9.1.2.	Líquidos Penetrantes.....	47
2.9.2.	Ensayos Destructivos.....	50
2.9.3.	Prueba de Dureza.....	50
2.9.4.	Prueba de Doblez Guiado	52

2.10. Imperfecciones (Discontinuidades) en las Uniones Soldadas	52
2.10.1. Clasificación de las Discontinuidades	53
2.10.1.1. Discontinuidades Superficiales	53
2.10.1.2. Discontinuidades Internas	59
2.10. Calificación del Procedimiento	66
2.11.1. Especificación del Procedimiento de Soldadura o WPS (Welding Procedure Specification)	67
2.10.2 Registro de la Calificación del Procedimiento o PQR (Procedure Qualification Record)	67
2.10.3 El Registro de la Calificación de la Habilidad del Soldador o WPQR (Welder Performance Qualification Record)	67
HIPOTESIS	69
3.1. Hipótesis	69
3.1.1. Hipótesis General	69
3.1.2. Hipótesis Específicas	69
3.2. Variables	69
3.2.1. Dependiente	69
3.2.2. Independientes	69
3.2.3. Intervinientes o Externas	69
METODOLOGÍA	70
4.1. Nivel o Tipo de Investigación	70
4.1.1. Explorativo	70
4.1.2. Descriptivo	70

4.1.2.1. Correlacional.....	70
4.1.2.2. Explicativa	70
4.2. Viabilidad	70
4.3. Método y Diseño de Investigación.....	71
4.3.1. Método de Investigación por Objetivos.....	71
4.4. Población y Muestra	72
4.4.1. Población.....	72
4.4.2. Muestra.....	72
4.4.2.1. Fórmula para Tamaño de Muestra en Medias.....	72
4.4.2.2. Supuestos Numéricos Razonables	73
4.4.3. Justificación de Tamaño de Muestra	73
4.5. Técnicas e Instrumentos de Toma de Datos	74
4.5.1. Técnica.....	74
4.5.2. Equipos e Instrumentos.	74
4.6. Viabilidad de la Investigación.....	74
4.7. Selección de la Tecnología.....	74
4.8 Ámbito de Estudio.....	75
4.8.1. Ubicación Geográfica General	75
4.8.1.1. Localización Política y Geográfica.....	75
4.8.2. Lugar de investigación.....	75
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	77
5.1. Equipo y Maquinaria Usada para la Investigación.....	77
5.1.1. Máquina de Soldar.....	77

5.1.2.	Durómetro Digital Portátil.....	78
5.1.3.	Equipo para Ensayo de Doblez Guiado	79
5.2.	Materiales Utilizados en la Investigación.....	79
5.2.1.	Material Base	79
5.2.2.	Electrodo E-7018.....	81
5.2.3.	Kit de Líquidos Penetrantes.....	83
5.3.	Soldadura de las Probetas	84
5.3.1.	Limpieza de las Probetas	84
5.3.2.	Diseño de la Junta.....	84
5.3.3.	Condiciones de Soldabilidad para las Probeta.....	85
5.4.	Cálculos Realizados.....	92
5.4.1.	Cálculo del Calor Neto o Energía Neta Transferida a la Pieza.....	92
5.4.2.	Cálculo del Ancho de la Zona Afectada Térmicamente (ZAC)	94
5.4.3.	Cálculo de La Velocidad de Enfriamiento	95
5.4.4.	Tiempo de Solidificación.....	97
5.5.	Control de Calidad de las Uniones Soldadas.....	98
5.5.1.	Ensayos no Destructivos.....	98
5.5.1.1.	Inspección Visual de las Uniones Soldadas de las Probetas.....	98
5.5.1.2.	Inspección por Tintes Penetrantes.	98
5.5.2.	Ensayos Destructivos.....	101
5.5.2.1.	Ensayo de Prueba de Doblez.....	102
5.5.2.2.	Ensayo de Prueba de Dureza.....	107
	ANALISIS DE RESULTADOS	109

6.1.	Calor Neto Aportado y Ancho de la Zac	109
6.2.	Inspección Visual	109
6.3.	Inspección por Tintes Penetrantes	110
6.4.	Prueba de Doblez.....	111
6.5.	Prueba de Dureza.....	111
6.6.	Datos Experimentales	112
6.6.1.	Contexto Teórico	113
6.6.2.	Descripción de Variables y Datos Experimentales.....	113
6.7.	Diseño Experimental y Verificación de Supuestos	116
6.7.1.	Diseño Completamente al Azar con un Factor.....	116
6.7.2.	Verificación del Análisis Cuantitativo	117
6.8.	Análisis Cuantitativo: Regresiones Polinomiales.....	117
6.8.1.	Velocidad de Enfriamiento Versus Intensidad de Corriente	117
6.8.2.	Ancho de la Zona Afectada por el Calor Versus Intensidad	119
6.9.	Representación Gráfica de Relaciones	123
6.10.	Análisis de Varianza (ANOVA)	126
6.10.1.	Resultados de ANOVA para Velocidad de Enfriamiento	127
6.10.2.	Resultados de ANOVA para ZAC.....	127
6.10.3.	Resultados de ANOVA para Dureza de Acero	128
6.11.	Contrastación de Hipótesis de Investigación	128
6.11.1.	Hipótesis y Criterios de Contraste	129
6.11.2.	Resultados del Contraste	129
6.11.3.	Conclusión del Contraste	130

6.12. Síntesis e Interpretación Integral de Resultados	130
6.12.1. Implicaciones Termodinámicas	130
6.12.2. Implicaciones Geométricas y de Integridad Estructural.....	131
6.12.3. Implicaciones Mecánicas.....	131
6.12.4. Consecuencia General	132
6.13. Coherencia con Literatura y Estándares.	132
6.14. Contraste Explícito de Resultados Propios con Estudios Previos	134
CONCLUSIONES	137
RECOMENDACIONES	139
BIBLIOGRAFÍA.....	140
APÉNDICES	147

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación y algunas características de los aceros estructurales.....	11
Tabla 2 Propiedades mecánicas del acero ASTM A572-50	19
Tabla 3 Composición química del acero ASTM A572-50.....	19
Tabla 4 Comparación entre corriente continua y corriente alterna	32
Tabla 5 Eficiencia térmica de diferentes procesos de soldadura	42
Tabla 6 Especificaciones.	77
Tabla 7 Voltaje de salida para el proceso de soldadura.....	77
Tabla 8 Propiedades mecánicas del acero ASTM A572-50	80
Tabla 9 Composición química del acero ASTM A572-50.....	81
Tabla 10 Composición química del E-7018.....	82
Tabla 11 Propiedades mecánicas E-7018	82
Tabla 12 Composición química de metal depositado (%)	82
Tabla 13 Propiedades mecánicas del metal depositado, sin tratamiento térmico	82
Tabla 14 Parámetros de soldadura	91
Tabla 15 Valores de calor neto aportado	93
Tabla 16 Parámetros para el cálculo del ancho de la zona afectada por el calor (ZAC)	95
Tabla 17 Valores de velocidad de enfriamiento.	96
Tabla 18 Tiempo de solidificación (s).....	97
Tabla 19 Resultados de la inspección visual	98
Tabla 20 Defectos observados en el examen por tintes penetrantes	101
Tabla 21 Resultados de doblez.....	107

Tabla 22 Dureza de la probeta (HB)	108
Tabla 23 Resultado de cálculo de calor neto aportado y ancho de la ZAC	109
Tabla 24 Resultados de la prueba de inspección visual	110
Tabla 25 Resultados del examen de tintes penetrantes.....	110
Tabla 26 Descripción de variables experimentales.....	113
Tabla 27 Valores de las variables experimentales	114
Tabla 28 Coeficientes del modelo de regresión: Enfriamiento versus intensidad de corriente .	118
Tabla 29 Coeficientes del modelo de regresión: Zona afectada por el calor versus intensidad	120
Tabla 30 Coeficientes del modelo de regresión: Dureza versus intensidad de corriente	122
Tabla 31 Resultados de ANOVA para velocidad de enfriamiento.....	127
Tabla 32 Resultados de ANOVA para ancho de ZAC.....	127
Tabla 33 Resultados de ANOVA para dureza Brinell en ZAC (HB_ZAC).....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ángulo estructural en forma de “L”	15
Figura 2 Vigas en forma de “H”.....	15
Figura 3 Canales en forma de U	16
Figura 4 Perfiles en forma de “T”	16
Figura 5 Barras redondas lisas y pulidas	17
Figura 6 Pletina.....	17
Figura 7 Barra cuadrada	18
Figura 8 Barra hexagonal	18
Figura 9 Chapa.....	18
Figura 10 Clasificación de los procesos de soldadura	21
Figura 11 Elementos de circuito típico para soldadura por arco de metal protegido	25
Figura 12 Soldadura por arco con electrodo revestido	25
Figura 13 Representación gráfica de corriente continua	31
Figura 14 Representación gráfica de corriente alterna.....	31
Figura 15 Tipos de junta	33
Figura 16 Posiciones de la soldadura.....	34
Figura 17 Zonas metalúrgicas de la soldadura.....	36
Figura 18 Diagrama Hierro Carbono.....	40
Figura 19 Símbolos que describen la dureza Brinell	51
Figura 20 Exceso de penetración	53
Figura 21 Falta de penetración.....	54

Figura 22 Concavidades.....	55
Figura 23 Socavadura o mordedura de borde	56
Figura 24 Quemado.....	56
Figura 25 Salpicaduras	57
Figura 26 Discontinuidad en el cordón.....	57
Figura 27 Fisuras longitudinales	59
Figura 28 Fisuras en frío.....	61
Figura 29 Fisura de interrupción o arranque.....	62
Figura 30 Fisuras en frío.....	63
Figura 31 Desgarre laminar.....	63
Figura 32 Falta de penetración.....	64
Figura 33 Falta de fusión	65
Figura 34 Falta de fusión entre pasadas.....	66
Figura 35 Máquina de soldar Miller.....	78
Figura 36 Durómetro portátil.....	78
Figura 37 Equipo para ensayo de doblez guiado.....	79
Figura 38 Probetas elaboradas para realizar la investigación	80
Figura 39 Características del E-7018	81
Figura 40 Electrodo E-7018.....	83
Figura 41 Kit de Ensayo Líquidos penetrantes	83
Figura 42 Junta a tope en “V” simple	85
Figura 43 WPS Probeta N°1	86
Figura 44 WPS Probeta N°2	87

Figura 45 WPS Probeta N°3	88
Figura 46 WPS Probeta N°4	89
Figura 47 WPS Probeta N°5	90
Figura 48 Alineamiento de las probetas para su soldabilidad	91
Figura 49 Soldadura de las probetas	92
Figura 50 Probetas soldadas.....	92
Figura 51 Probeta cubierta con el líquido penetrante.....	99
Figura 52 Eliminación con un paño del exceso de penetrante.....	100
Figura 53 Probeta cubierta con el revelador Nota: Fotografía propia.....	100
Figura 54 Ensayo de doblez Nota: Fotografía propia	102
Figura 55 PQR Probeta N°2	103
Figura 56 PQR Probeta N°3	104
Figura 57 PQR Probeta N°4	105
Figura 58 PQR Probeta N°5	106
Figura 59 Puntos donde se tomó la dureza	108
Figura 60 Dispersión de valores de la Velocidad vs Intensidad.....	114
Figura 61 Dispersión de valores de la velocidad vs intensidad.....	115
Figura 62 Dispersión de valores de la velocidad vs intensidad.....	116
Figura 63 Tendencia entre velocidad de enfriamiento e intensidad de corriente.....	124
Figura 64 Tendencia entre dureza e intensidad de corriente.....	125
Figura 65 Tendencia entre ancho de ZAC e intensidad de corriente.....	126

APÉNDICES

<i>Apéndice 1</i>	<i>108</i>
<i>Apéndice 2</i>	<i>109</i>
<i>Apéndice 3</i>	<i>110</i>

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AISI: Instituto Americano del Hierro y el Acero (*American Iron and Steel Institute*)

ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Normalización (*American National Standards Institute*)

AWS: Sociedad Americana de Soldadura (*American Welding Society*)

CA: Corriente alterna

CC: Corriente continua

CDEN: Corriente directa con electrodo negativo (DCEN)

c: Calor específico del metal sólido J/(kg·K)

f: Eficiencia térmica del proceso de soldadura

GTAW: Soldadura por arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (*Gas Tungsten Arc Welding*)

H: Energía de soldeo / aporte térmico (J/mm)

h: Altura (mm)

Hnet: Calor neto suministrado al material (J/mm)

HRC: Dureza Rockwell C (HRC)

I: Intensidad de corriente (A)

K: Conductividad térmica del metal (W/(m·K))

L: Calor latente de fusión (J/kg)

MAG: Soldadura por arco con gas activo (*Metal Active Gas Welding*)

MB: Metal base

MIG: Soldadura por arco con gas inerte (*Metal Inert Gas Welding*)

PBI: Producto Bruto Interno

R: Espesor relativo de la chapa

SAE: Sociedad de Ingenieros Automotrices (*Society of Automotive Engineers*)

SAW: Soldadura por arco sumergido (*Submerged Arc Welding*)

SMAW: Soldadura por arco con electrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding*)

St: Tiempo de solidificación (s)

To: Temperatura inicial de la chapa (°C o K)

Tmax: Temperatura máxima alcanzada (°C o K)

Tm: Temperatura de fusión (*liquidus*) del metal (°C o K)

TIG: Soldadura por arco con electrodo de tungsteno y gas inerte (*Tungsten Inert Gas Welding*)

v: Velocidad de soldeo / velocidad de avance

V: Tensión eléctrica (V)

Y: Ancho de la zona afectada por el calor (mm)

ZAC: Zona afectada por el calor

ZF: Zona de fusión

ρc: Calor específico volumétrico (J/(m³.K))

RESUMEN

El propósito de este estudio fue examinar la manera en que la intensidad de corriente eléctrica afecta la soldabilidad del acero estructural ASTM A572-50, empleando el procedimiento de soldadura por arco metálico con electrodo revestido (SMAW). Este estudio tuvo como objetivo examinar el impacto de las fluctuaciones en la corriente sobre el calor neto que se transfiere al metal base, así como las propiedades del cordón de soldadura, la microestructura, la calidad metalúrgica de la unión y la profundidad de penetración. La experimentación permitió identificar la relación entre los parámetros eléctricos y el comportamiento térmico del material durante la soldadura.

Los resultados obtenidos contribuirán a determinar los parámetros óptimos de soldadura que garanticen una mejor eficiencia, resistencia y estabilidad en las juntas soldadas del acero A572-50, ampliamente empleado en estructuras metálicas y aplicaciones industriales. Se estableció que un aumento en la intensidad de corriente genera una ampliación del ancho de la zona impactada por el calor (ZAC). Por lo tanto, con una intensidad de 85 amperios se logró un ancho de 3.51 mm en la ZAC, y con 140 amperios el ancho fue de 6.4 mm

Palabras clave: Soldadura SMAW, Acero ASTM A572-50, Intensidad de corriente, Soldabilidad.

ABSTRACT

The purpose of this study was to examine how electrical current intensity affects the weldability of ASTM A572-50 structural steel using the coated metal arc welding (SMAW) procedure. This study aimed to examine the impact of fluctuations in current on the net heat transferred to the base metal, as well as weld bead properties, microstructure, metallurgical quality of the joint, and penetration depth.

The experimentation made it possible to identify the relationship between the electrical parameters and the thermal behavior of the material during welding.

The results obtained will contribute to determining the optimal welding parameters that guarantee better efficiency, resistance and stability in the welded joints of A572-50 steel, widely used in metallic structures and industrial applications. It was established that an increase in current intensity generates an expansion of the width of the heat-impacted zone (HAZ). Therefore, with an intensity of 85 amperes, a width of 3.51 mm was achieved in the HAZ, and with 140 amperes the width was 6.4 mm..

Keywords: SMAW Welding, ASTM A572-50 Steel, Current Intensity, Weldability.

INTRODUCCIÓN

La soldadura es un proceso fundamental para la creación, el arreglo y el mantenimiento de estructuras metálicas en la industria metalmecánica y de construcción. La soldadura por arco metálico con electrodo revestido (SMAW) sobresale de entre las distintas técnicas disponibles debido a su flexibilidad, a su bajo precio y a su gran capacidad de aplicación, convirtiéndose en una de las más empleadas en el campo laboral y en la industria. Su simplicidad operativa, junto con la facilidad para adaptarse a distintas condiciones de trabajo, la convierte en una tecnología fundamental para la unión de aceros estructurales, especialmente en entornos donde la movilidad y la practicidad del equipo resultan determinantes.

Dentro de este contexto, el acero estructural ASTM A572-50 ocupa un lugar relevante por su alta resistencia mecánica, buena conformabilidad y amplio uso en la construcción de puentes, plataformas, estructuras de soporte y componentes industriales. Sin embargo, su comportamiento durante la soldadura está muy influenciado por los parámetros eléctricos que se utilizan, especialmente por la intensidad de la corriente, que tiene un impacto directo en el calor neto que se le da al metal base. Esto afecta tanto a la fusión como a la penetración del cordón y a la calidad metalúrgica de la unión soldada.

En este marco, el propósito de la investigación es examinar cómo la intensidad de corriente afecta a la soldabilidad del acero ASTM A572-50, estudiando los impactos del calor neto añadido en las propiedades metalúrgicas y geométricas del cordón de soldadura. Para lograrlo, se llevaron a cabo ensayos de soldabilidad con un instrumento de soldadura SMAW, un durómetro digital para

medir la dureza en las distintas áreas impactadas por el calor y un equipo de doblez guiado para analizar la ductilidad y el rendimiento mecánico de las interconexiones.

Para correlacionar estos parámetros térmicos con el comportamiento metalúrgico y la calidad del cordón, también se realizaron cálculos de la velocidad de enfriamiento, el tiempo de soldadura, el tiempo de solidificación, además del calor neto aportado y el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC).

Por último, se realizó una revisión exhaustiva de la calidad de las uniones soldadas, utilizando ensayos destructivos y no destructivos con el objetivo de comprobar la uniformidad, la robustez y la integridad de las juntas en términos estructurales. Los hallazgos logrados posibilitaron la determinación precisa del impacto de la intensidad de corriente en la soldabilidad del acero ASTM A572-50, mostrando cómo los cambios en este parámetro influyen en el calor neto aportado, en las propiedades mecánicas de la unión y también en el desarrollo del cordón. Estos resultados ayudan a establecer estándares técnicos para modificar los parámetros de soldadura que aseguran una eficiencia, calidad y confiabilidad superiores en los procesos de unión de aceros estructurales.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

El acero estructural ASTM A572-50 se emplea frecuentemente en la industria constructora de estructuras como edificios, plataformas petroleras, anillos, tanques, carcassas, ruedas, plantillas, moldes y componentes. Las estructuras mencionadas anteriormente requieren, en gran parte de uniones por soldadura para su construcción. El proceso SMAW es el método de soldadura que ofrece más y mejores beneficios para alcanzar estructuras compactas y sólidas, especialmente gracias a su alta versatilidad.

Es crucial la calidad de la soldadura lograda en cualquier procedimiento. El proceso SMAW permite conseguir uniones que aseguren el ensamblaje perfecto, casi con las mismas propiedades que el metal base. Por estas consideraciones, el proceso SMAW, es el mas recomendado debido a su amplia utilización y muy eficaz en la construcción de las estructuras arriba mencionadas.

La soldadura del acero ASTM A572-50, en la mayoría de los casos prácticos, se realiza sin el debido análisis e importancia que tiene la intensidad de corriente, como variable relevante, para la eficiencia y eficacia del proceso de soldadura. En la presente investigación se analiza y se precisa la influencia de la intensidad de corriente en la soldabilidad del acero ASTM A 572-50 por el proceso SMAW.

La finalidad es evaluar el efecto de la intensidad de corriente en la obtención de uniones que reduzcan, minimicen y, si es posible, que eviten la formación de discontinuidades y de esta manera prevenir el colapso de las estructuras en las uniones soldadas y obtener calidad y eficiencia garantizadas.

1.2. Problema General y Específicos

1.2.1. Problema General

¿Cómo influye la intensidad de corriente en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW?

1.2.2. Problemas Específicos

- a) ¿Cómo influye la intensidad de corriente en la velocidad de enfriamiento en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW?
- b) ¿Cómo influye la intensidad de corriente en el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW?
- c) ¿Cómo influye la intensidad de corriente en la dureza del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW?

1.3. Justificación

Se consideran, por la importancia de la soldadura, las siguientes justificaciones:

1.3.1. Justificación Tecnológica

Se está contribuyendo a la progresión del conocimiento y al progreso de los procedimientos. y método para la soldabilidad del acero ASTM A572-50, se permite mejorar la soldabilidad de las uniones soldadas para conseguir una alta calidad y asegurar que las estructuras metálicas soporten esfuerzos en condiciones de servicio.

1.3.2. Justificación Económica

Se pretende lograr uniones soldadas de excelente calidad en términos de soldabilidad y que sean capaces de resistir los esfuerzos. La durabilidad de la unión soldada se reforzará bajo condiciones de servicio y con una buena actuación. Esto producirá beneficios económicos a partir de los ahorros, pero también, principalmente, gracias a las ventajas directas e indirectas que

obtendrán los beneficiarios, los usuarios, el Estado y la sociedad en su conjunto. Por otro lado, tiene un impacto en la aportación al crecimiento del PBI a nivel regional y nacional.

1.3.3. Justificación Social

La investigación y el progreso de los métodos y procedimientos para soldar acero. ASTM A572-50 presentará a los profesionales y técnicos especializados en la edificación de estructuras soldadas la posibilidad de obtener nuevos conocimientos y habilidades que aumenten su formación para un mejor desempeño. Este hecho redundará en la disponibilidad y capacidad de personal calificado, así como en el progreso de la situación socioeconómica de las personas interesadas y su entorno.

1.3.4. Justificación Ambiental

El análisis de la soldabilidad ayuda a conseguir uniones soldadas del acero ASTM A572-50 con una calidad superior. Este elemento tan relevante ayudará a reducir la cantidad de residuos de acero como desechos industriales que no se desechan apropiadamente, lo que tiene un impacto negativo en el medio ambiente. En numerosas ocasiones, estos residuos no se reutilizan porque escasea la cultura de la reutilización o simplemente por el volumen que representan para las expectativas económicas de los trabajadores y/o empresarios del sector.

1.3.5. Importancia

Este trabajo es fundamental para el avance en el desarrollo y mejoramiento tecnológico del proceso de soldadura, particularmente en la región. Se analizo y evaluó el impacto de la intensidad de corriente en la soldabilidad del acero ASTM A572-50, lo cual ayudará a mejorar continuamente para conseguir soldaduras de gran calidad. Una buena soldabilidad en estructuras construidas con este acero aseguraría que estas tengan un buen desempeño y evitaría las consecuencias negativas y los peligros derivados (costos, beneficios, salud y seguridad, etc.).

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo General*

Evaluar el efecto de la intensidad de corriente en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- a) Evaluar la influencia de la intensidad de corriente en la velocidad de enfriamiento en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW.
- b) Evaluar la intensidad de corriente eléctrica en el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW.
- c) Evaluar la influencia de la intensidad de corriente en la dureza del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de La Investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales.

- a) Barrera Morales Juan Camilo, (2015), en su trabajo de investigación “*Estudio de la soldabilidad del acero estructural ASTM A572 grado 50 con proceso GMAW en junta en T, posición 3F progresión descendente, comparado con el proceso SMAW progresión ascendente*” Bogotá - Colombia, se llevó a cabo en la Institución Universitaria los Libertadores, ubicada en Bogotá, en el año 2015. Se propone como meta optimizar la producción de estructuras metálicas y hallar un beneficio financiero en el sector de la soldadura; se plantea comparar un proceso GMAW con uniones T, posición 3F, contra un proceso SMAW con progresión ascendente utilizando acero ASTM A572 grado 50. Con este propósito, se compararon los procesos SMAW y GMAW utilizando dispositivos de tecnología avanzada. Las probetas fueron sometidas a análisis de dureza, inspección visual, tamaño de la junta y micrografía, entre otros. Después se concluyó que las probetas soldadas con el método GMAW tienen más versatilidad.
- b) Ruiz (2016) en su investigación “*Soldabilidad de aceros ASTM A572 G-50 por el proceso GMAWLSC, utilizando 100% CO₂ como gas de protección en la aplicación de uniones de soldadura de filete en componentes para la industria pesada*” México DF - México, el propósito de este estudio, llevado a cabo en la Corporación Mexicana de Investigaciones Industriales en 2016, es investigar la soldabilidad de aceros HSLA de 6 mm de espesor en soldaduras de filete empleados en la industria pesada. Se unen utilizando el método GMAW-LSC con gas CO₂ al 100% como gas protector y se examina su impacto sobre las

propiedades mecánicas y metalúrgicas. Para esto, se emplean probetas de acero ASTM 572 GRADO 50. Las propiedades externas (contorno, forma, apariencia cosmética y resistencia mecánica), las propiedades de soldabilidad (fusión y penetración) y las características mecánicas (resistencia a la tensión y al esfuerzo cortante) son algunas de las variables que se incorporan en este análisis comparativo. Finalmente, se hicieron análisis minuciosos de las microestructuras creadas por los dos procesos, así como macroataques y ensayos de dureza en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) para establecer el efecto que tuvo la introducción del calor generado por los distintos parámetros de soldadura empleados en cada proceso. Para concluir, se constata que con la aplicación de la tecnología novedosa del proceso LSC, puede utilizarse gas CO₂ en vez de la combinación de gas Ar-CO₂, que es más cara (cuatro veces más).

- c) Sanchez Osorio & Rincon Reina (2017) en su tesis intitulada "***Análisis de soldabilidad del acero estructural ASTM A572 GRADO 50 con el proceso de soldeo al arco eléctrico con electrodo tubular autoprotegido (FCAW-S) y compararla con el proceso de soldadura al arco con electrodo metálico revestido (SMAW)***" Bogotá - Colombia, en la Fundación Universitaria los Libertadores, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Mecánica, se llevó a cabo un estudio cuyo propósito era examinar la capacidad de soldadura del acero estructural ASTM A 572 grado 50 con el proceso FCAW-S (soldadura al arco eléctrico con electrodo tubular auto protegido) y compararla con el SMAW (soldadura al arco con electrodo metálico revestido). Para ello, se usaron muestras de acero ASTM A572 que fueron sometidas a ambos procedimientos. Posteriormente, las muestras fueron caracterizadas para determinar su microestructura y dureza. Se concluyó que el acero es apto para ser soldado mediante los procesos FCAW y SMAW. Además, se determinó que

en el proceso FCAW la dureza es superior en la ZAC (zona afectada por el calor), lo cual implica una mayor resistencia.

2.1.2. Antecedentes Nacionales.

- a. Janampa Huancollo & Surco Alzamora (2015) en la tesis intitulada “*Estudio de la soldabilidad de acero ASTM A-36 con acero VCL mediante el proceso SMAW y posterior calificación del procedimiento de soldadura*” Arequipa – Perú, el objetivo de esta investigación, que se llevó a cabo en la Universidad San Agustín de Arequipa, es examinar la soldabilidad entre el acero VCL y el ASTM A-36 utilizando uniones por soldadura de filete. Asimismo, se planteó un proceso de soldadura (WPS) que esté alineado con la norma AWS D1.1. Los resultados mostraron que la evaluación de la soldabilidad es un elemento crucial para planificar y llevar a cabo el proceso de manera adecuada, subrayando que la temperatura de precalentamiento es un factor determinante porque está relacionada con el contenido de carbono. Se verificó que para el acero VCL bonificado solo es posible garantizar uniones que sean estructuralmente confiables y que cumplan con los estándares de calidad mediante una supervisión estricta antes, durante y después del proceso de soldadura.
- b. Quesada Ramos (2019) en la tesis intitulada “*Influencia del tratamiento termico post soldadura en las propiedades mecanicas de las uniones soldadas gtaw del acero ASTM A335 en la refineria de Talara – 2018*” Huacho – Peru, tuvo como objetivo realizar el tratamiento térmico post soldadura (PWHT) para evaluar su influencia en las propiedades mecánicas de las uniones GTAW del acero ASTM A335 en la refinería de Talara. Los hallazgos mostraron que la zona afectada por el calor (ZAC) tiene niveles altos de dureza, lo que hace que haya una disminución de la ductilidad y un aumento de la fragilidad. No

obstante, al aplicar el PWHT fue posible igualar la microestructura, reducir la dureza y las tensiones residuales, aumentar la elongación y recuperar en gran parte las propiedades iniciales del material base, lo cual asegura conexiones con calidad y conformes a norma.

2.1.3. Antecedentes Locales.

- a. Pumallica Molina (2022) en la tesis intitulada "***Influencia de la intensidad de corriente en la soldabilidad del acero ASTM A36 por el proceso TIG (Investigación tecnológica)***" *Cusco – Peru*, su propósito fue determinar el impacto de la polaridad y la intensidad de la corriente eléctrica, además de la velocidad de avance, sobre la soldabilidad del acero ASTM A36 a través del proceso TIG, con el fin de identificar una magnitud óptima de corriente que posibilitara lograr uniones metalúrgicamente apropiadas. Los resultados mostraron que el proceso de soldadura TIG es el más idóneo para el acero ASTM A36, puesto que posibilita la obtención de cordones con una calidad elevada. Se demostró que la corriente continua con polaridad directa produce un baño de fusión profundo y una penetración más eficaz. Del mismo modo, se notó que cuando se acelera la velocidad de pasada o se reduce la intensidad de corriente, el cordón de soldadura se vuelve más duro. Se determinó que la combinación ideal de parámetros para obtener uniones sin discontinuidades fue con una intensidad de 140 A, una tensión de 13.5 V y una velocidad de soldeo de 1.33 mm/s.
- b. Reyes Cereceda & Taco Taipe (2023) en su trabajo de investigación intitulado "***Efecto del calor de entrada en la microestructura y dureza en juntas soldadas por el proceso SMAW del acero microaleado HARDOX 450***" *Cusco - Peru*, buscó examinar cómo el calor de entrada producido en la soldadura SMAW afecta la microestructura y la capacidad de soldadura del acero microaleado de alta resistencia HARDOX 450, teniendo en cuenta varias condiciones de aporte térmico. Para esto, se estudió cómo influye el calor de entrada

en las uniones soldadas, tomando en cuenta la intensidad de corriente, la velocidad de avance y la composición química del metal base; además, se examinó cómo afecta el aporte térmico a las alteraciones microestructurales en la zona afectada por el calor (ZAC) y a la granulación hereditaria. El estudio concluyó que el aporte de calor en la soldadura del acero HARDOX 450 únicamente ocasiona ligeras alteraciones a nivel microestructural, sin alterar su dureza ni fomentar el crecimiento granular. Este acero mantiene un grano fino, una alta resistencia y tenacidad sin el peligro de fisuras ni la necesidad de precalentamiento debido a su escaso contenido de carbono (0.18%) y su buena soldabilidad.

2.2. Aceros Estructurales

El término acero estructural se utiliza de forma generalizada para referirse a un conjunto de aceros fabricados o elaborados específicamente con el propósito de construir una amplia variedad de estructuras, tanto para la edificación de infraestructuras físicas (edificios) como para la creación y producción de componentes y partes de maquinaria y equipo industrial.

- **Ventajas**

- ✓ Gran firmeza por cada unidad de peso: indica que el peso será el mínimo requerido. Este es un elemento crucial, especialmente en estructuras de puentes con claros extensos, lo que posibilita una elevada eficiencia estructural.
- ✓ Inalterable: las características del acero casi no se alteran con el tiempo, es decir, durante su uso.
- ✓ Durabilidad: el mantenimiento adecuado y oportuno de las estructuras permiten garantizar su duración por tiempo, prácticamente, indefinido.
- ✓ Ductilidad: resistir grandes esfuerzos en el rango de deformaciones plásticas, en otras palabras sin fallar cuando es sometido a elevados valores de esfuerzos.

- ✓ Tenacidad: alta tenacidad; por lo tanto, tiene una buena ductilidad y resistencia.
- **Desventajas**
 - ✓ Costo de mantenimiento: los aceros pueden corroerse si están expuestos de manera continua al aire y al agua; por esta razón, necesitan protección a través de recubrimientos, que son principalmente pintura. Por lo tanto, es necesario volver a pintarlos periódicamente.
 - ✓ Costo de la protección contra el fuego: las partes y componentes estructurales de este acero no son susceptibles al fuego (combustión); no obstante, cuando se expone a temperaturas elevadas, como durante un incendio, la resistencia disminuye significativamente. Este acero es la aleación más utilizada y elegida por sus propiedades para la construcción de estructuras metálicas de uso generalizado, a pesar de las desventajas mencionadas anteriormente.

Tabla 1

Clasificación y algunas características de los aceros estructurales

Designación de la ASTM	Tipo de acero	Formas	Usos recomendados	Esfuerzo mínimo de fluencia Fy (ksi)	Resistencia mínima especificada a la tensión Fu (ksi)
A36	Al carbono	Perfiles, barras y placas	Edificios, puertas y otras estructuras	36, pero 32 si su espesor es mayor de 8"	58 - 80
A529	Al carbono	Perfiles y placas de hasta ½"	Similar A36	42-50	60-100
A572	Columbio - vanadio de alta resistencia y baja aleación	Perfiles placas y barras de hasta 6"	Construcción soldada o atornillada. No apta para puentes soldados con Fy grado 55 o mayor	42 - 65	60-80
A242	De alta resistencia, baja aleación y resistente a la corrosión	Perfiles, placas y barras hasta de 5"	Construcciones atornilladas, soldadas o remachadas; técnica de soldado muy importante.	42-50	63-70
A588	De alta resistencia, baja aleación y resistente a la corrosión atmosférica.	Placas y barras hasta de 4"	Construcción atornillada	42-50	63-70
A852	Aleación templada y revenida.	Placas y barras hasta 4 pul.	Construcción soldada o atornillada, principalmente para puentes y edificios soldados. Proceso de soldadura de importancia fundamental.	70	90-110
A514	Baja aleación templada y revenida.	Placas solo de 2.5 – 6”.	Estructura soldada con gran atención a la técnica; no se recomienda si la ductilidad es importante.	90-100	100-130

Nota: (Aceros Arequipa, 2022)

2.2.1. *Acero Estructural ASTM A572-50*

Los aceros del grupo ASTM A572-50: son aceros estructurales que se utilizan en la industria de la construcción y para producir estructuras que están expuestas a esfuerzos. Se distinguen por su excelente capacidad de soldadura, resistencia mecánica y facilidad para manipularse. Se pueden encontrar en el mercado y, además, su precio es relativamente bajo; estas características les proporcionan propiedades apropiadas y favorables para ser usados en la producción de maquinaria y equipos para varios sectores industriales como el transporte ferroviario, automovilístico, naval o aeronáutico. También son relevantes para el avance social, como puentes o torres destinadas a la transmisión de energía eléctrica.

2.2.1.1. *Aplicaciones del Acero ASTM A572-50.*

Aceros Arequipa, (2022) señala en su catálogo que el acero ASTM A572-50 tiene una amplia variedad de usos y aplicaciones en las distintas áreas industriales, tal como se indicó previamente. Algunas de las aplicaciones son:

- Estructura para edificios. (Aceros Arequipa, 2022)
- Estructuras para instalaciones industriales y deportivas. (Aceros Arequipa, 2022)
- Cables para puentes (colgantes, atornilladas, remachados y soldados). (Aceros Arequipa, 2022)
- Estructuras para plataformas petroleras. (Aceros Arequipa, 2022)
- Estructuras de tanques, carcásas, moldes, matrices.
- Láminas plegadas para techos.
- Mallas electrosoldadas.
- Etc.

2.2.1.2. *Forma de Presentación del Acero Estructural ASTM 572 -50.*

El acero ASTM A572-50 se produce, básicamente, en las formas estructurales siguientes:

- Planchas
- Perfiles
- Tubos
- Barras
- Láminas
- Vigas
- Ángulos en forma de "L"

A continuación, se señalan las características principales de las anteriores presentaciones (Aceros Arequipa, 2022):

a) Ángulo estructural en forma de "L".- Los ángulos estructurales con forma de "L" son productos que se han laminado en caliente. Dos alas que forman un ángulo recto componen su sección transversal. La industria de la construcción, la automotriz, las grúas, las puertas, el arte en metal, los soportes, los techos, las torres de transmisión y las ventanas son solo algunas de las muchas aplicaciones que utilizan este tipo de perfil.

Este tipo de ángulo se muestra en la Figura 1. (Aceros Arequipa, 2022)

b) Canales en forma de U.- "Creado a través de la laminación en caliente. La sección transversal adopta una forma de "U". La fabricación de estructuras para vigas, viguetas, carrocerías, cerchas y canales es uno de los principales usos. La figura 3 muestra el producto. (Aceros Arequipa, 2022)

c) Perfiles en forma de "T".- Productos que se consiguen mediante el laminado en caliente. La sección transversal crea dos alas que forman un ángulo recto. Son muy apropiados y se utilizan mucho en el sector de la carpintería metálica y de la creación

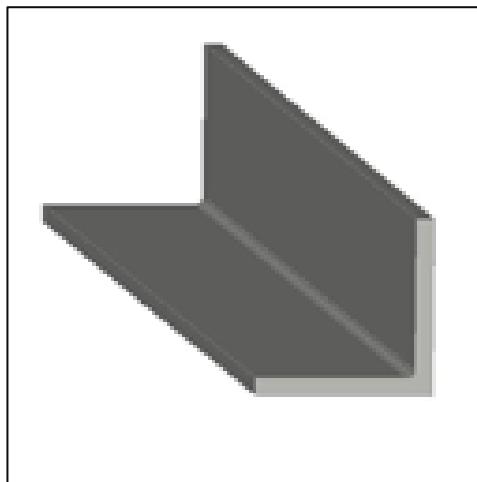
de estructuras para estanterías, carcásas, almacenes, puertas, ventanas, grúas, techos, bastidores, silos, rejas y otras aplicaciones. La Figura 4 presenta el producto. (Aceros Arequipa, 2022).

- d) **Barras redondas lisas y pulidas.**- El producto se produce mediante laminado en caliente, tiene una sección transversal circular y su superficie es lisa y pulida. Su implementación abarca estructuras para ventanas, puertas, cercos, rejas, componentes de máquinas, pernos y ejes; además incluye jeeps, pines y pasadores. La Figura 5 muestra este producto. (Aceros Arequipa, 2022).
- e) **Pletinas.**- "Producto que se obtiene mediante laminado en caliente. Muestra una sección transversal en forma rectangular. Para la elaboración de rejas, ventanas, puertas, estructuras metálicas y piezas forjadas, entre otros elementos, se utiliza principalmente. La Figura 6 muestra dicho producto. (Aceros Arequipa, 2022).
- f) **Barras de sección cuadrada.**- Producto que resulta de la laminación en caliente. "Su uso principal es en la elaboración de estructuras para ventanas, puertas, rejas y piezas forjadas". La Figura 7 muestra dicho producto. (Aceros Arequipa, 2022)
- g) **Barras hexagonales.**- Son generadas por medio de laminación en caliente. Tienen una sección transversal de forma hexagonal y una superficie suave. Se emplea, por lo general, para producir componentes de ensamblaje como ejes, pines, chavetas, tuercas, pernos y herramientas manuales (cinceles, puntas, barretas y más). Estos componentes pueden ser sometidos a tratamientos térmicos de revenido y temple, dependiendo de lo que se necesite. La figura 8 muestra dicho producto. (Aceros Arequipa, 2022).

h) Chapas.- El acero se lama para conseguir rollos de chapa con distintos grosos (espesor). "Se emplea en la fabricación de estructuras para la calderería y las carrocerías de vehículos automotores, entre otros". La figura 9 muestra este producto. (Aceros Arequipa, 2022).

Figura 1

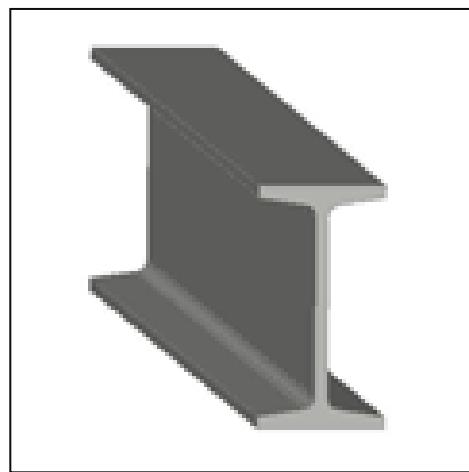
Ángulo estructural en forma de “L”



Nota: (Aceros Arequipa, 2022)

Figura 2

Vigas en forma de “H”



Nota: (Aceros Arequipa, 2022)

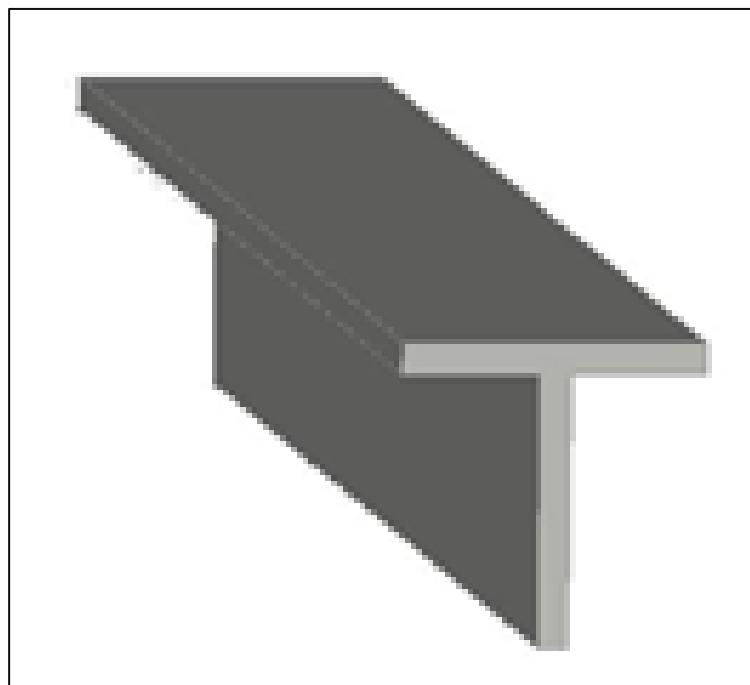
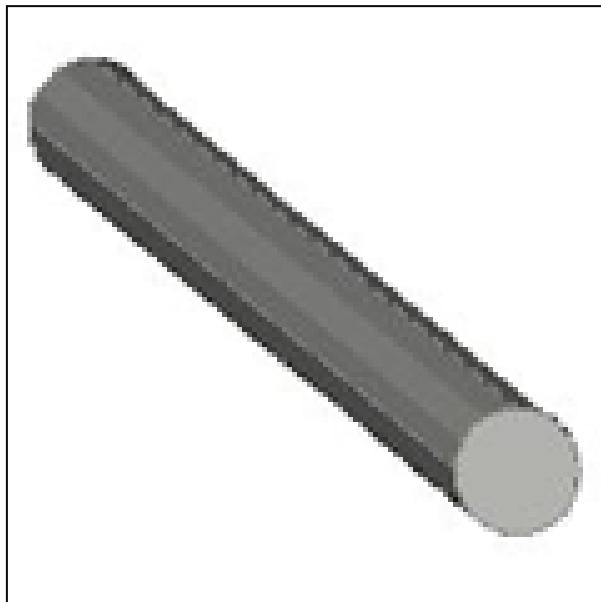
Figura 3*Canales en forma de U**Nota:* (Aceros Arequipa, 2022)**Figura 4***Perfiles en forma de "T"**Nota:* (Aceros Arequipa, 2022)

Figura 5

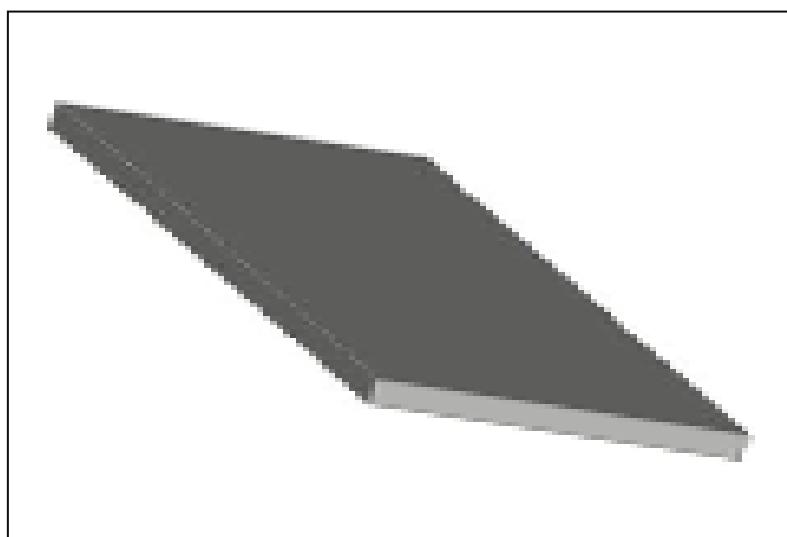
Barras redondas lisas y pulidas



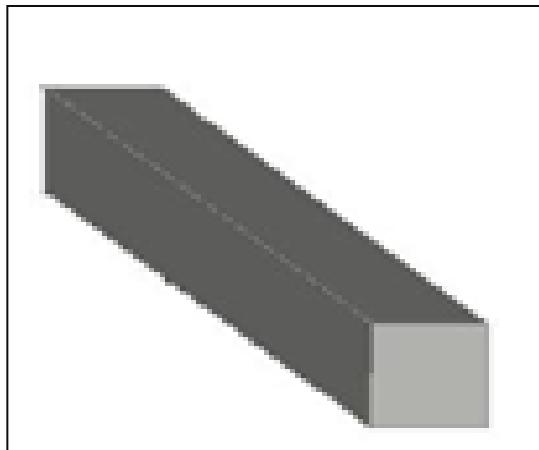
Nota: (Aceros Arequipa, 2022)

Figura 6

Pletina



Nota: (Aceros Arequipa, 2022)

Figura 7*Barra cuadrada**Nota:* (Aceros Arequipa, 2022)**Figura 8***Barra hexagonal**Nota:* (Aceros Arequipa, 2022)**Figura 9***Chapa**Nota:* Arequipa, A. (2020).

2.2.1.3. Propiedades Mecánicas y Composición Química del Acero Astm A572-50.

En la Tabla 2 se muestra las propiedades mecánicas y en la Tabla 3 la composición química.

Tabla 2

Propiedades mecánicas del acero ASTM A572-50

Esfuerzo de fluencia		Esfuerzo de tracción (kg/mm²)		Elongación
Min (kg/mm ²)	Min. (Mpa)	Min. (kg/mm ²)	Min (MPa)	Min. (%)
35	345	46	450	21

Nota: (Aceros Arequipa, 2022)

Tabla 3

Composición química del acero ASTM A572-50

C (máx. %)	Si (máx. %)	Mn (máx. %)	P (máx. %)	S (máx. %)	V (%)	Nb (%)
0.23	0.40	1.35	0.04	0.05	0.01– 0.15	0.005– 0.05

Nota: (Aceros Arequipa, 2022)

2.3. Soldadura

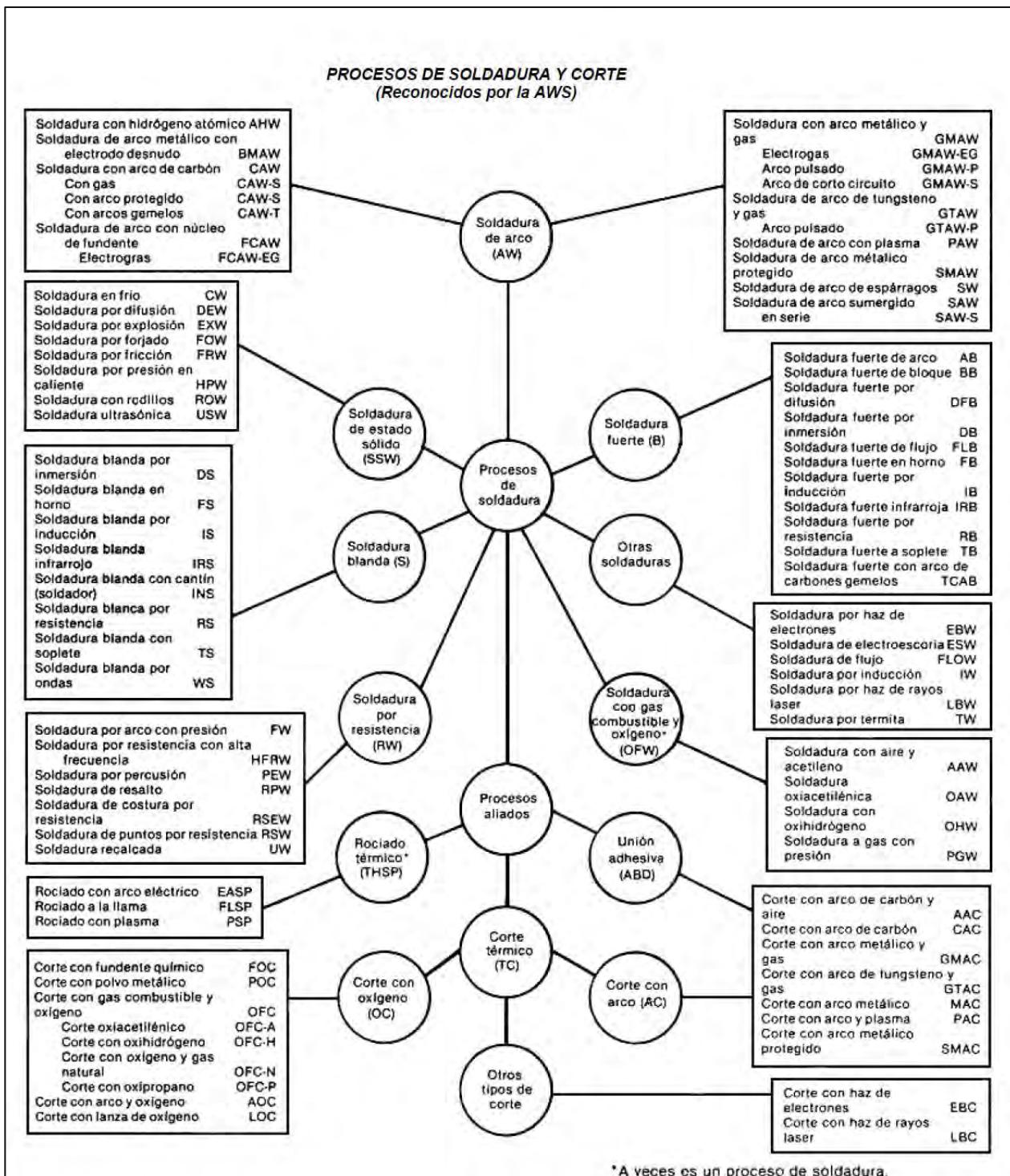
2.3.1. Definición.

La soldadura es el método de unión de metales o no metales a través del calentamiento de los materiales a las temperaturas requeridas para su unión, según la Sociedad Americana de Soldadura (AWS). Esto se consigue con o sin la aplicación de presión, junto con el empleo o no de metal adicional. De manera más sencilla, la soldadura se produce al calentar las piezas separadas

de material a una temperatura lo suficientemente alta para que se ablanden o se fundan, permitiendo que se unan y formen una sola pieza. (Jeffus, 2009 , pág. 5)

2.3.2. Clasificación Según la American Welding Society (AWS)

En años recientes, la cantidad de técnicas de soldadura ha crecido. La manera de aplicar la presión, el calor o ambos elementos, así como el tipo de equipo utilizado, son los factores que más diferencian estos métodos. La clasificación general de los diversos métodos de soldadura se presenta en la Figura 10. (Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión, 2012)

Figura 10*Clasificación de los procesos de soldadura*

Nota: (Asociacion Española de soldadura y tecnologias de union, 2012)

2.3.3. Soldadura por Arco de Metal Protegido (SMAW)

La soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés) es un procedimiento de soldadura que utiliza el arco eléctrico para fundir los metales. Esto se consigue a través del calor creado por el arco eléctrico que se forma entre la punta de un electrodo recubierto y la superficie del metal base en el punto donde se ha de soldar.

El núcleo del electrodo recubierto se forma por una varilla de metal sólido, la cual puede ser de material estirado o colado. Alternativamente, puede ser una varilla manufacturada que tiene metal en polvo dentro de un revestimiento de metal. Esta varilla central, además de guiar la corriente eléctrica para crear el arco, también proporciona metal extra a la unión que se está soldando. Por otra parte, la función principal del revestimiento del electrodo es estabilizar el arco y proteger el material fundido de la atmósfera, produciendo gases que se originan de la descomposición del revestimiento por el calor del arco.

La protección empleada, junto con otros elementos que se encuentran en la cobertura del electrodo y en el núcleo del alambre, son fundamentales para regular la composición química, las cualidades mecánicas y la estructura metalúrgica del metal soldado, además de las características específicas del arco del electrodo. La cobertura del electrodo es variable y depende de la clase de electrodo que se use.

“Al procedimiento de soldeo por arco, con electrodo revestido, se le conoce también con las siguientes denominaciones”: (Asociacion Española de soldadura y tecnologias de union, 2012).

- SMAW. Shielded metal arc welding (ANSI / AWS A3.0)
- Soldeo metálico por arco con electrodo revestido (UNE – EN ISO 4063)
- MMAW. Manual metal arc welding (Reino Unido)

2.3.3.1. Definición y Descripción General

La soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés) es un proceso de ensamble en el que se unen metales fundidos (tanto el metal base como el del aporte) a través del calor producido por el arco eléctrico que se establece y se mantiene entre la punta del electrodo recubierto y la superficie del metal base que está siendo soldado.

Una varilla metálica sólida, que puede ser estirada o colada, o creada a partir de la conformación de metal en polvo en un envoltorio metálico, es el componente central del electrodo revestido. Esta varilla en el núcleo es responsable de llevar la corriente eléctrica al arco y proveer el metal fundido a la unión durante el procedimiento de soldadura. Estabilizar el arco eléctrico y resguardar el metal fundido de la atmósfera, mediante los gases producidos cuando el recubrimiento se descompone a causa del calor que produce dicho arco, son dos de las funciones principales del revestimiento del electrodo.

La función de la protección del electrodo y los aditivos que se encuentran en el revestimiento del alambre del núcleo es regular factores como la composición química, las propiedades mecánicas y la microestructura del metal soldado, además de afectar las propiedades del arco eléctrico del electrodo. La composición concreta del recubrimiento de un electrodo es exclusiva para cada clase de electrodo que se emplea. (Society, American Welding, 2015).

2.3.3.2. *Principio de Funcionamiento*

El circuito eléctrico cerrado, como se ilustra en la (Figura 11), es el primer paso para llevar a cabo el proceso de soldadura. Se requiere una fuente de corriente eléctrica adecuada con dos terminales: uno que se conecte a un porta electrodo para fijar el electrodo revestido, y el otro que esté conectado a la parte que se va a soldar.

La creación del arco es el primer paso en el proceso de soldadura. Cuando la corriente atraviesa, el punto de contacto se calienta hasta llegar a la incandescencia, en particular en el extremo del electrodo. Este calor es bastante para que, al apartar el extremo del electrodo de la pieza, el metal de la punta libre produzca una emisión de electrones que se aceleran a causa de la tensión eléctrica. Estos electrones colisionan con los de otros átomos en el medio gaseoso, sacándolos de sus órbitas y generando una atmósfera ionizada que favorece la conducción de la corriente por el aire. Los electrones que el electrodo incandescente emite se combinan con la corriente de electrones que conduce, lo que produce una fusión parcial y la formación del arco al impactar en el ánodo. La temperatura que se produce excede el punto de fusión del metal.

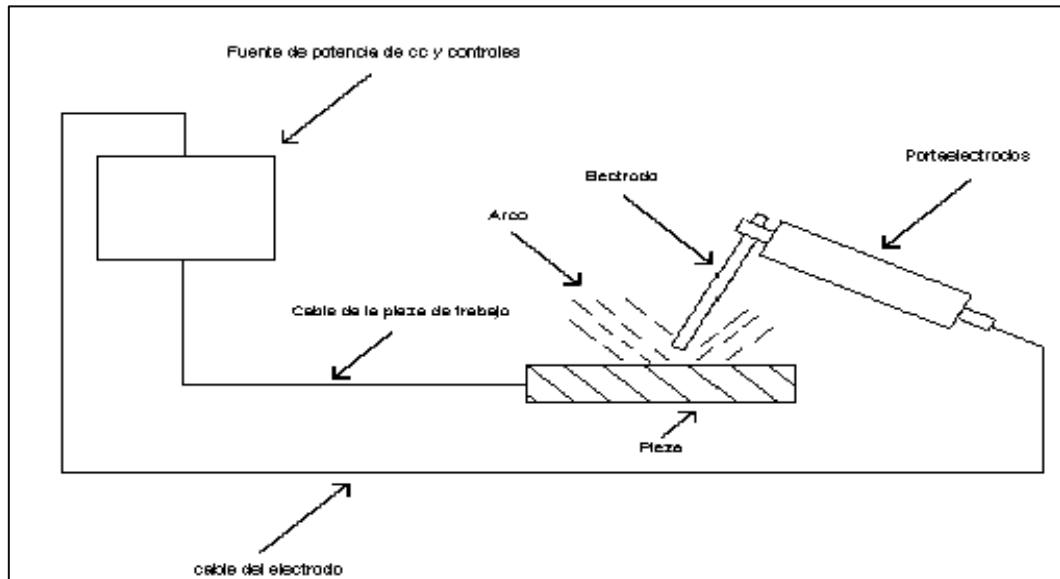
Del extremo del electrodo se desprenden pequeñas gotas de metal fundido, las cuales son lanzadas sobre el metal base, que también está en estado líquido. Ambos metales se fusionan para formar lo que se denomina baño de fusión (Figura 12).

Conforme se va agotando el electrodo, se progresiva a lo largo de la unión que se está soldando, mientras que el calor se esparce por el metal base todavía sólido, haciendo que la temperatura baje por debajo del punto de fusión del metal. Esto provoca que el área del baño fundido que ya no tiene contacto directo con el arco empiece a solidificarse.

Durante la soldadura, se continúa moviendo el electrodo para crear el metal soldado. Cuando el electrodo se agota totalmente, el arco se corta y esto provoca que la última parte del baño fundido se solidifique, formando de esta manera el cordón de soldadura que corresponde a ese electrodo específico. Se elimina la parte final del electrodo, que ya no es útil, y se sustituye por uno nuevo para proseguir con el proceso de soldadura, repitiendo el ciclo que se describió previamente. La soldadura, en sí misma, se forma por la secuencia de estos cordones de soldadura hasta que la unión queda completa. (Society, American Welding, 2015).

Figura 11

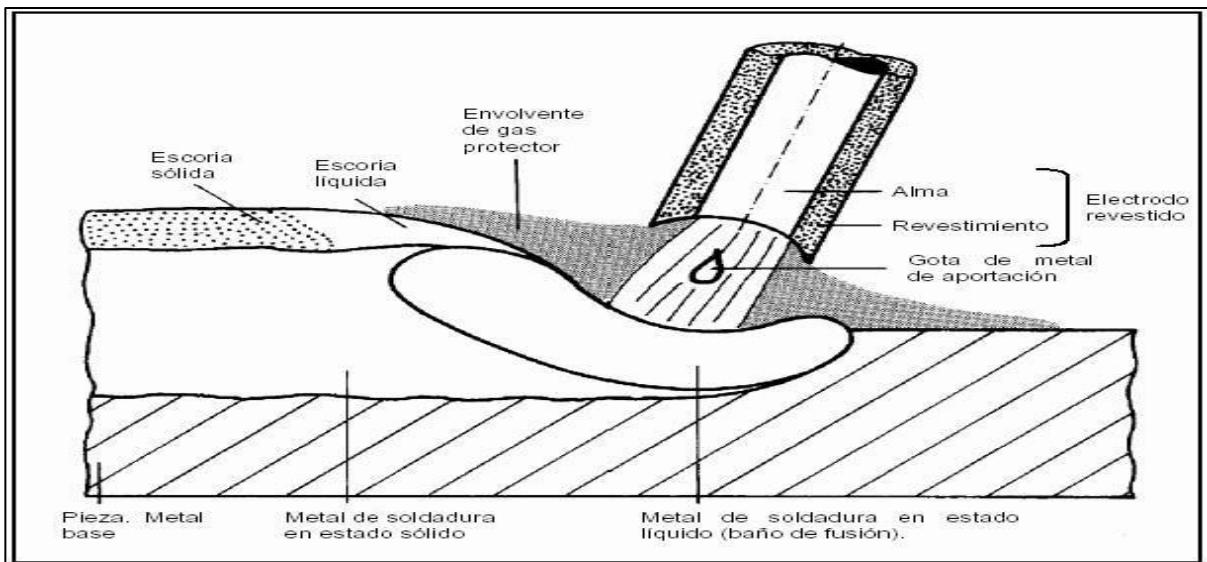
Elementos de circuito típico para soldadura por arco de metal protegido



Nota: (Society, American Wlding, 2015)

Figura 12

Soldadura por arco con electrodo revestido



Nota: Larry Jeffus "welding principles and applications", 1ra. Ed; 2009, p.48.

a) Ventajas

- El equipo de soldeo es relativamente sencillo, no muy oneroso y portátil. (Society, American Wlding, 2015)
- El electrodo revestido proporciona el metal de aporte y los métodos para protegerlo durante la soldadura. No es necesaria protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares. (Society, American Wlding, 2015)
- Es menos susceptible al viento y a las corrientes de aire que los procesos por arco con protección gaseosa. No obstante el proceso debe emplearse siempre protegido del viento, lluvia y nieve. (Society, American Wlding, 2015)
- Se puede utilizar en cualquier lugar, tanto en espacios abiertos como cerrados, incluso si hay limitaciones 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, American Wlding, 2015)
- Es aplicable a una amplia gama de espesores, normalmente superiores a 2 mm.
- Es aplicable a la mayoría de los metales y sus aleaciones. (Society, American Wlding, 2015)

b) Desventajas

- La escoria debe ser eliminada, lo que retrasa el proceso, así como la baja tasa de deposición. Como resultado de esto, en ciertas aplicaciones ha sido sustituido por otros procesos.
- Necesita que el soldador sea muy hábil y tenga mucha destreza.
- Esta técnica de soldadura no es apropiada para metales y aleaciones con puntos de fusión bajos, tales como el estaño, el plomo y el zinc, pues el calor del arco puede

dañarlos. De igual manera, no es aconsejable para aleaciones y metales que son muy sensibles a la oxidación, tales como el tantalio, niobio, titanio y zirconio, ya que la protección proporcionada no es suficiente para evitar que el oxígeno del aire contamine el proceso de soldadura.

- No es pertinente para espesores de menos de 2 mm.
- La deposición en la soldadura por arco con electrodo revestido es más lenta que en los procesos que emplean electrodo continuo, como el soldeo MIG/MAG o el del alambre tubular. La razón de esta diferencia es que, en el procedimiento de electrodo revestido, el electrodo se reduce únicamente hasta una longitud concreta (cerca de 5 cm). Cuando la longitud se ha alcanzado, el soldador está obligado a quitar el extremo usado del electrodo y sustituirlo por uno nuevo. Esto hace que el proceso de soldadura se detenga temporalmente.
- Teóricamente, es posible soldar cualquier grosor, incluso si es más de 1.5 mm; sin embargo, el procedimiento no es rentable para grosores superiores a 10 mm. (Society, American Welding, 2015)

2.3.3.3. *Principales Variables de Soldeo del Proceso SMAW.*

- a) **Intensidad de corriente.-** La soldadura por arco con electrodo revestido puede realizarse tanto con corriente continua como alterna, siempre que se emplee el electrodo correcto. La rapidez con la que se funden los electrodos revestidos depende de la polaridad, el tipo de corriente y los elementos del recubrimiento del electrodo. La cantidad de energía eléctrica que se le suministra al arco está vinculada directamente con la rapidez con la que se fusiona un electrodo específico. Una parte de esta energía

se usa para fundir el electrodo, mientras que la otra sirve para fundir una porción del metal base.

Los electrodos cubiertos que tienen una clasificación y un tamaño determinados pueden operar de manera apropiada a diversos niveles de amperaje, dentro de un rango específico. Este rango puede cambiar de manera ligera dependiendo del grosor y la composición del revestimiento del electrodo. El amperaje más adecuado para un electrodo de tipo y tamaño determinado depende de diferentes elementos, incluyendo la posición de soldadura y el tipo de unión. Para conseguir una adecuada fusión y penetración sin perder el control del charco de soldadura, es esencial que el amperaje sea suficiente. (Jeffus, 2009)

- b) Voltaje en el rco (Densidad de corriente).**- La distancia que existe entre la punta derretida en el núcleo del electrodo y la superficie del charco de soldadura es lo que se conoce como longitud del arco en soldadura. La transferencia de metal desde el extremo del electrodo hasta el charco de soldadura no es un proceso uniforme ni fluido. Incluso si la longitud del arco permanece invariable, el voltaje instantáneo de este puede fluctuar mientras las gotas de metal fundido se trasladan por él. Para sostener la longitud de arco adecuada, es fundamental tener un suministro constante y uniforme del electrodo. La longitud apropiada del arco depende de la clasificación del electrodo, su diámetro, el recubrimiento, el amperaje y la ubicación de soldadura.
- c) Velocidad de soldadura .-** La velocidad de la soldadura hace referencia a la rapidez del electrodo al moverse a través de la unión que se va a soldar. Una velocidad de soldadura apropiada es la que produce un cordón de soldadura con un perfil adecuado y un aspecto satisfactorio. Diversos elementos, como el amperaje, la polaridad y la

clase de corriente, la posición de soldadura, el grosor del material, la tasa de fusión del electrodo y el estado superficial del material base, entre otros, tienen un impacto en la velocidad de soldadura.

La cantidad de calor que se transfiere al metal base es considerablemente influenciada por la velocidad de soldadura. Esto, a su vez, tiene un efecto en las estructuras metalúrgicas del metal soldado y en el área expuesta al calor. El uso de velocidades bajas para soldar provoca un aumento en la cantidad de calor transferido, lo que genera una zona más amplia afectada por el calor y una reducción en la rapidez con la que se enfriá la soldadura. Por otra parte, las altas velocidades de soldadura pueden aumentar la dureza y resistencia de la soldadura en aceros endurecibles, a no ser que se haga un precalentamiento apropiado para prevenir el endurecimiento indeseado. (Fosca, 2003)

d) **Tipo de corriente**

Se distinguen dos tipos de corriente:

- **Corriente continua (CC).**- La corriente continua es la que mantiene invariable su polaridad; en otras palabras, el flujo de la carga eléctrica se dirige siempre en una misma dirección. La corriente continua uniforme es una clase concreta de corriente continua que se mantiene constante en el tiempo, conservando la misma tensión e intensidad mientras el generador de dicho tipo de corriente esté operando. Se puede ver en una representación gráfica como una línea recta que va horizontalmente a través del tiempo. Como se muestra en la Figura 13, en este tipo de corriente eléctrica, los electrones se desplazan a través de todo el circuito en una sola dirección. (Asociacion Española de soldadura y tecnologias de union, 2012)

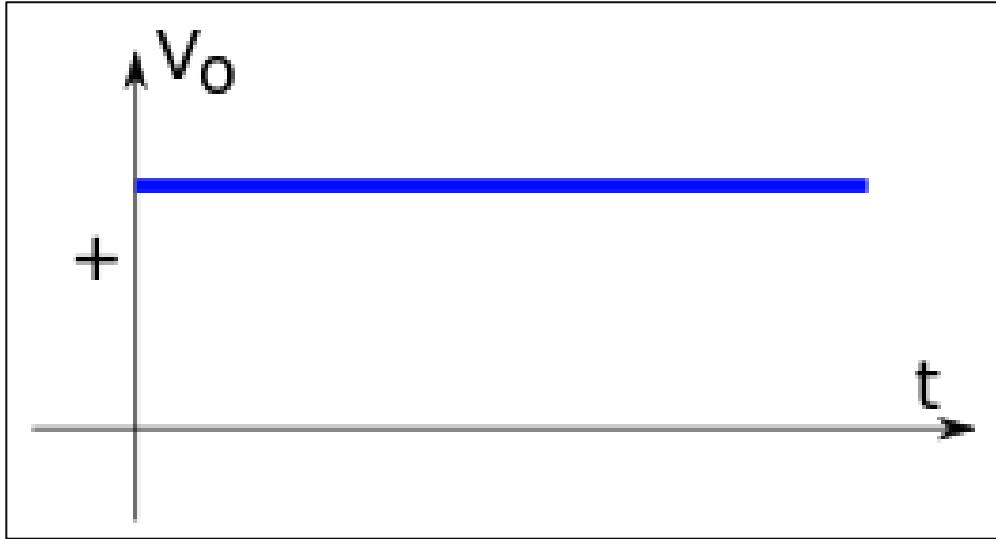
“En el tipo de corriente continua es necesario tener presente la polaridad, cuyos efectos son importantes en el funcionamiento de algunos circuitos electrónicos, y también en el comportamiento del arco eléctrico”. (Asociacion Española de soldadura y tecnologias de union, 2012)

- **Corriente alterna (CA)**

Las tensiones e intensidades de la corriente que fluye a través de los circuitos de corriente variable no son estables, sino que experimentan cambios a lo largo del tiempo. La corriente alterna (CA) es la forma más frecuente y simple de corriente variable en el tiempo, pues su dirección se altera de manera periódica. Los principios enunciados previamente sobre corriente continua se pueden usar, además, para circuitos de corriente alterna. La corriente alterna se ilustra en la Figura 14 como una onda sinusoidal que varía de dirección en breves periodos de tiempo. (Asociacion Española de soldadura y tecnologias de union, 2012)

Figura 13

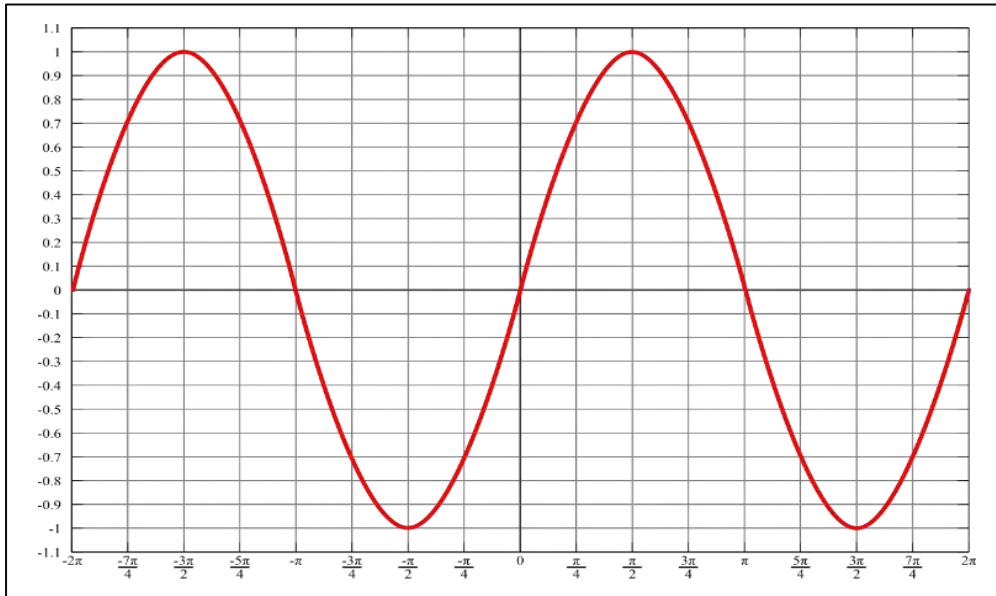
Representación gráfica de corriente continua



Nota: (Google, 2022)

Figura 14

Representación gráfica de corriente alterna



Nota: (Google, 2022)

En la Tabla 4, se muestra una comparación entre corriente continua y corriente alterna.

Tabla 4

Comparación entre corriente continua y corriente alterna

Parámetros	Corriente Continua	Corriente Alterna
Soldeo a gran distancia de la fuente de energía		Preferible
Soldeo con electrodos de pequeño diámetro que requieren bajas intensidades de soldeo.	La operación es más fácil.	Si no se toma en cuenta el problema con seriedad, es posible que el material se deteriore debido a la dificultad para encender el arco.
Cebado del arco	Resulta más fácil.	Particularmente más complicado cuando se utilizan electrodos de diámetro reducido.
Mantenimiento del arco.	Más fácil por la mayor estabilidad.	Específicamente más difícil cuando se emplean electrodos con un diámetro pequeño.
Soplo magnético.	Pueden ser problemáticos al soldar materiales ferromagnéticos.	No presentan problemas.
Posiciones de soldeo.	Se prefiere en el soldeo en posiciones verticales y bajo techo debido a que se requiere el uso de intensidades bajas.	Es factible realizar soldaduras en cualquier posición si se utilizan los electrodos apropiados.
Tipo de electrodo.	Es posible utilizarlo con cualquier clase de electrodo.	No es posible usarlo con cualquier electrodo. El revestimiento tiene que tener componentes que restauren el arco.
Espesor de la pinza.	Se prefiere para espesores delgados.	Se prefiere para espesores gruesos porque permite el uso de un electrodo con mayor diámetro y más intensidad, logrando así mayores rendimientos.

Nota: (Asociacion Española de soldadura y tecnologias de union, 2012)

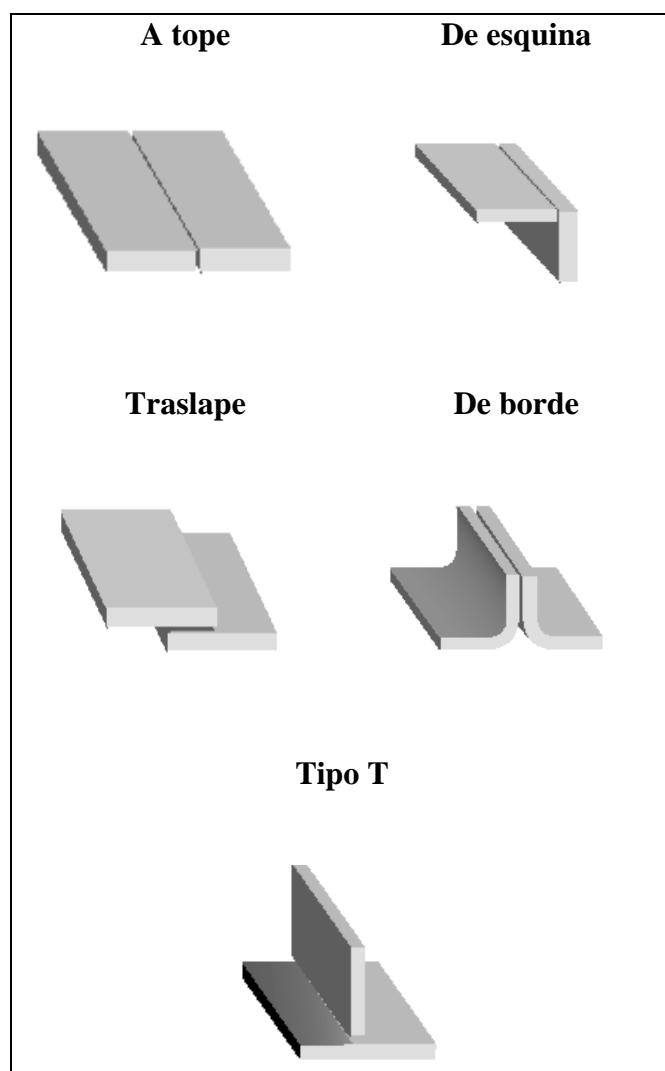
2.4. Tipos de Junta

Pérez, (2013) establece que "los tipos de juntas son las configuraciones relativas de las partes materiales que se van a unir, y no suponen un tipo concreto de soldadura".

Las piezas de metal, al ser transportadas para hacer juntas, pueden adoptar cualquiera de las cinco configuraciones que se muestran en la Figura 15.

Figura 15

Tipos de junta



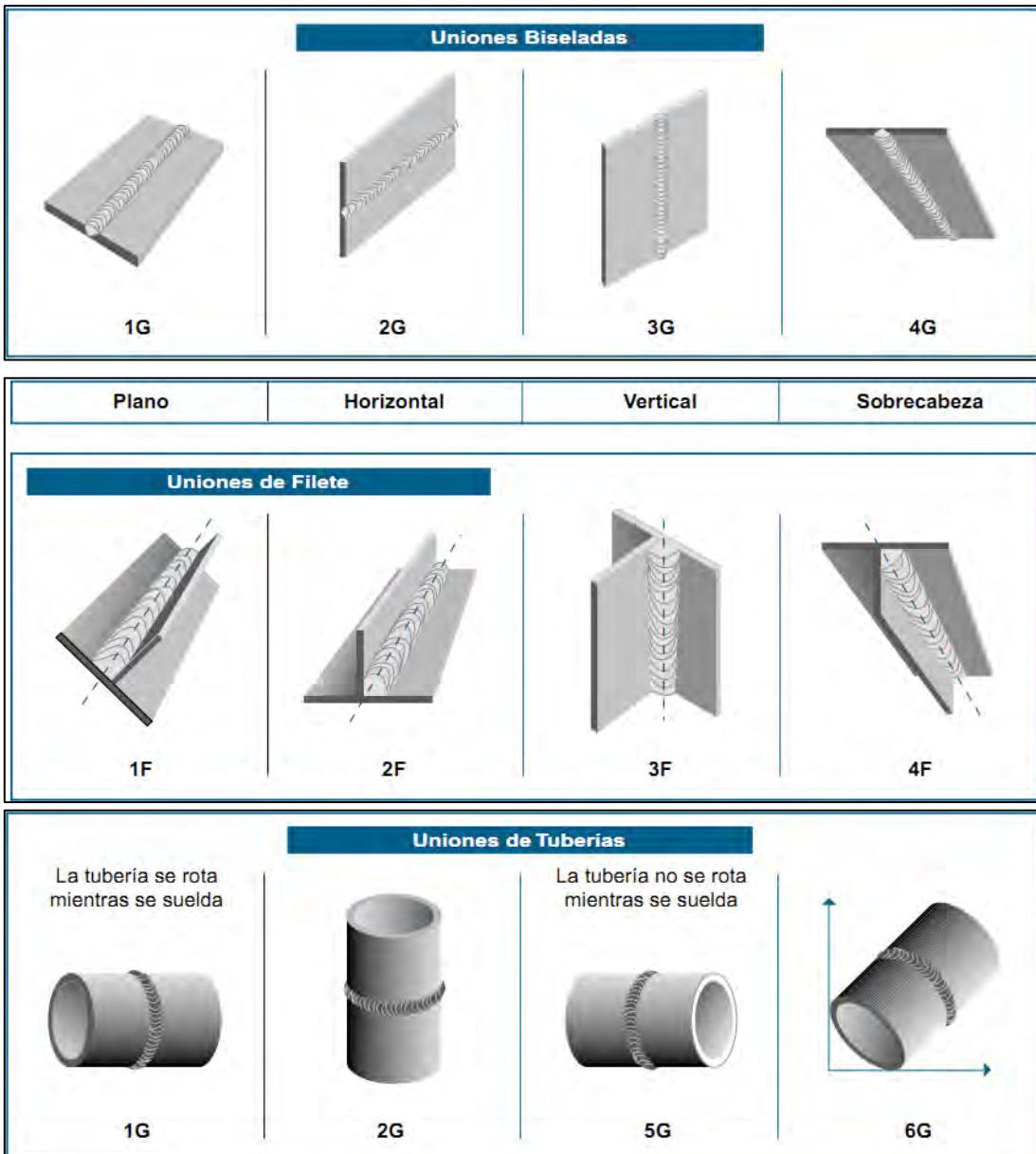
Nota: (Perez, 2013)

2.5. Posiciones de Soldadura

Pérez, (2013) Como se indica en la Figura 16, establece las posiciones de soldadura.

Figura 16

Posiciones de la soldadura



Nota: (Perez, 2013)

2.6. Soldabilidad.

La soldabilidad se define como el grado de facilidad o dificultad que presenta un acero o una aleación para ser unido mediante un proceso de soldadura. En este sentido, los aceros que ofrecen mayores dificultades durante la unión presentan baja soldabilidad, mientras que aquellos que pueden soldarse con mayor facilidad y sin comprometer sus propiedades mecánicas o metalúrgicas se consideran de alta soldabilidad.

La soldabilidad de un material es una característica de naturaleza compleja que, en muchos casos, está influenciada por sus variaciones metalúrgicas y por sus propiedades inherentes. En consecuencia, se considera que un material posee buena soldabilidad cuando es posible obtener una unión soldada con propiedades mecánicas y físico-químicas satisfactorias mediante distintos procesos de soldadura, sin requerir la aplicación de técnicas auxiliares adicionales.

2.7. Electrodos revestidos.

El componente esencial de este proceso de soldadura es el electrodo, ya que es el encargado de establecer el arco eléctrico, proteger el baño de fusión y, a medida que se consume, aportar el material que formará el cordón de soldadura al unirse con el metal fundido del metal base.

Los electrodos revestidos están constituidos por dos partes principales: el alma y el revestimiento. El alma es un alambre de sección circular uniforme, cuya composición suele ser similar a la del metal base. Por su parte, el revestimiento consiste en una capa cilíndrica concéntrica que recubre al alma, con un espesor variable y compuesta por diferentes sustancias. Estas cumplen funciones específicas que mejoran el desempeño del electrodo y reducen los inconvenientes propios del electrodo desnudo.

Las funciones más relevantes del revestimiento se detallan en secciones posteriores, donde también se compara el comportamiento del electrodo revestido frente al no revestido. En cuanto a

sus dimensiones, los electrodos comerciales presentan longitudes normalizadas de 150, 200, 250, 300 y 350 mm, mientras que la longitud del alma sin revestimiento es de 20 a 30 mm, facilitando su sujeción en la pinza porta electrodos.

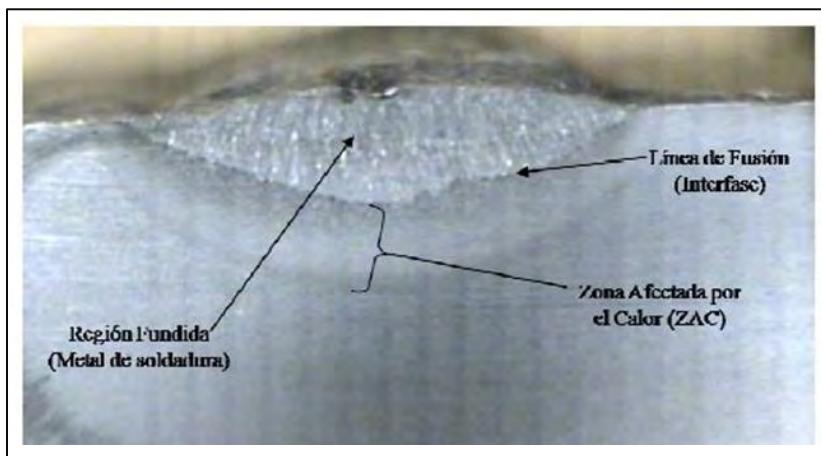
Los diámetros del alma también están estandarizados, siendo los más comunes 1,6; 2; 2,5; 3,25; 4; 5; 6; 6,3; 8; 10 y 12,5 mm, destacándose los valores más utilizados. De acuerdo con el espesor del revestimiento en relación con el diámetro del alma, los electrodos se clasifican en:

- **Revestimiento delgado.-** Ofrecen una protección limitada del metal fundido, por lo que su uso es frecuente en la enseñanza de las técnicas de soldadura.
- **Revestimiento medio.-** Proporcionan mayor estabilidad del arco, permiten soldar con corrientes más elevadas y mejoran la protección del metal depositado. La escoria recubre el cordón solidificado, disminuyendo la velocidad de enfriamiento y la oxidación.
- **Revestimiento grueso.-** Posibilitan obtener las mejores propiedades y calidad del metal soldado.

2.8. Zonas Metalúrgicas de la Soldadura.

Figura 17

Zonas metalúrgicas de la soldadura



Nota: (Ecuador Documents, 2022)

A medida que la fuente de calor interactúa con el material, se pueden identificar tres zonas principales en los procesos de soldadura. Las zonas son las siguientes: la zona de fusión (ZF), que también es conocida como metal de aporte; la zona afectada por el calor (ZAC); y la zona del metal base (MB). La Figura 17 permite observar estas áreas.

2.8.1. *Zona de Fusión (ZF)*

La fusión total del metal de aporte y del metal base ocurre en la zona de fusión, donde ambos se combinan completamente. Esta área es reconocida por la homogeneidad elevada de los elementos fundidos a lo largo del procedimiento de soldadura. La razón primordial por la que estos elementos se combinan es la convección que ocurre en el charco de soldadura fundido. En el proceso de soldadura, las superficies no fundidas de los componentes que se están uniendo crean lo que se conoce como "molde". Debido a la existencia de áreas con fusión parcial, esta interfase entre la región en estado sólido y la región fundida es la más susceptible a que se formen grietas.

2.8.2. *Zona Afectada por el Calor (ZAC)*

El área afectada por el calor (ZAC), también conocida como HAZ por sus siglas en inglés, se refiere al espacio o volumen del material de soldadura o cercano a este que ha sido afectado térmicamente y cuyas propiedades han sido modificadas debido a la temperatura. La soldadura por resistencia se basa en calentar dos piezas vecinas y, de manera inevitable, se genera una ZAC. El material que abarca la ZAC experimenta cambios en su estructura, los cuales pueden ser beneficiosos o no para las necesidades de la unión soldada. La composición química de la ZAC es igual a la del metal base; sin embargo, debido a que esta zona ha sido influenciada por el calor producido por la temperatura alcanzada en el proceso de soldeo, dicha influencia provoca un cambio en las propiedades y estructura.

El tamaño de las alteraciones metalúrgicas en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) está determinado por varios factores, entre ellos: la temperatura máxima que se alcanza, la cantidad de calor recibida, la cercanía a la zona de fusión, el tiempo de exposición a temperaturas elevadas, la velocidad con que se enfriá y las propiedades térmicas del material. Por lo general, el calor tiene un efecto negativo en las propiedades mecánicas de la zona que se ve afectada por él. En la ZAC, a menudo se producen fallos en la junta soldada. A medida que la distancia hasta el área de fusión aumenta, se llega a la zona de metal base original, sin alteraciones.

2.8.3. *Metal Base (MB)*

El metal base está formado por las partes que son sometidas a soldadura con el metal de aporte (electrodo) y es la zona/región donde no se produce una alteración metalúrgica; en otras palabras, la microestructura original permanece intacta y conservada, aunque el proceso de soldadura puede generar tensiones residuales de contracción a lo largo y a través del material.

2.8.4. *Sistema Hierro Carbono.*

El estudio del sistema hierro–carbono es de gran valor en la metalurgia y en la ingeniería de la soldadura, ya que no solo permite explicar y predecir las propiedades mecánicas, físicas y metalúrgicas de los aceros, sino que también constituye un medio fundamental para comprender las reacciones y transformaciones que ocurren en estado sólido.

2.8.4.1. *Diagrama Hierro – Carbono.*

Según Reed Hill (1980) El diagrama de equilibrio hierro–carbono es un diagrama completo, ya que está trazado para concentraciones de carbono expresadas en porcentaje en peso menores al 6,67 %, valor correspondiente a la composición del compuesto intermetálico Fe₃C o cementita, cuyos límites de solubilidad pueden considerarse despreciables. Este diagrama se caracteriza por la presencia de tres puntos invariantes fundamentales: el punto peritéctico,

localizado a 0,16 % de C y 1493 °C; el punto eutéctico, situado a 4,3 % de C y 1147 °C; y el punto eutectoide, que ocurre a 0,8 % de C y 723 °C.

La transformación peritéctica tiene lugar a temperaturas muy elevadas y en aceros con muy bajo contenido de carbono, ubicándose en la esquina superior izquierda del diagrama Fe–C. Como resultado de esta transformación, aceros con composiciones cercanas al 0,51 % de carbono solidifican en la fase gamma, conocida como austenita. De manera general, todas las aleaciones con contenidos de carbono inferiores al 2,06 % atraviesan la región austenítica durante el enfriamiento desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente.

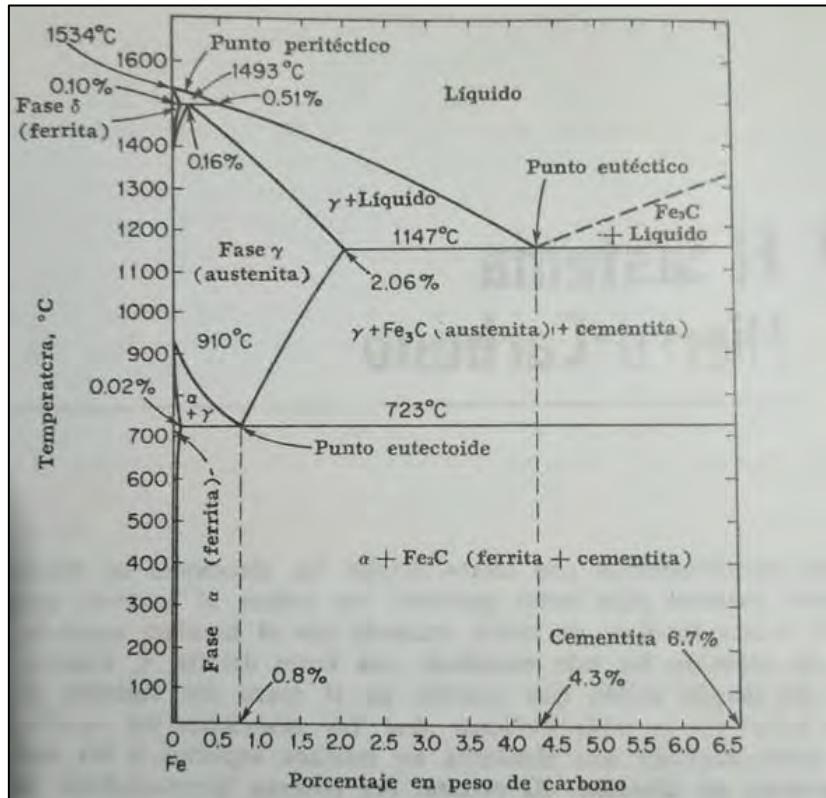
En términos generales, el diagrama hierro–carbono permite identificar las distintas fases y microconstituyentes presentes en los aceros, tales como ferrita, perlita, cementita, austenita y martensita. Cada una de estas fases posee propiedades mecánicas específicas que influyen directamente en el comportamiento del material, tanto en el metal base como en la zona afectada por el calor (ZAC) y la zona de fusión durante los procesos de soldadura.

- En la región **hipoeutectoide**, correspondiente a contenidos de carbono inferiores al 0,8 %, el acero está constituido principalmente por ferrita y perlita, lo que se traduce en una combinación favorable de ductilidad y buena soldabilidad.
- En contraste, en la región **hipereutectoide**, donde el contenido de carbono supera el 0,8 %, se incrementa la proporción de cementita, provocando un aumento significativo de la dureza y la fragilidad del material.

Finalmente, la austenita, que es estable a altas temperaturas, desempeña un papel clave en las transformaciones metalúrgicas asociadas a la soldadura. Durante el enfriamiento, esta fase puede transformarse en perlita, bainita o martensita, dependiendo de la velocidad de enfriamiento y de las condiciones térmicas impuestas por el proceso de soldeo ver Figura 18.

Figura18

Diagrama Hierro Carbono



Nota: (Reed Hill, 1980)

Ciclo Térmico de la Soldadura.

Fosca, C (2003)., establece que "es necesario fijar las condiciones térmicas del metal fundido y de las áreas cercanas (ZAC) para supervisar el proceso de soldadura". Con el propósito de este fin, es esencial saber:

- La propagación del pico o la temperatura máxima en el área que ha sido afectada térmicamente.
- La velocidad con la que se enfriá el metal fundido y su área afectada térmicamente.
- La velocidad con la que se solidifica el metal fundido.

2.8.5. Importancia del Ciclo Térmico.

Normalmente, la exposición de aleaciones y metales a variaciones de temperatura por debajo del punto de fusión resulta en alteraciones en su estructura microscópica. Cuando los materiales son sometidos a cargas, estos cambios a nivel microestructural pueden también provocar modificaciones en las propiedades mecánicas y afectar el comportamiento mecánico de los materiales.

“Los calentamientos y enfriamientos de los aceros permiten transformar, a conveniencia y alcanzar y conferirle propiedades mecánicas deseadas para las respectivas aplicaciones”. (Fosca, 2003)

2.8.6. Cambios de Temperatura Durante el Soldeo (Ciclo Térmico)

Fosca, C. (2003), establece que las áreas cercanas al metal, a la zona de soldadura, son sometidas a ciclos térmicos veloces, los cuales producen transformaciones metalúrgicas distintas y complejas en el área de soldadura.

2.8.6.1. Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco.

La distribución de temperaturas en el soldeo por arco manual con electrodos revestidos está influenciada por los siguientes factores: (Fosca, 2003)

a. Aporte de calor (Heat input)

El aporte de calor es la energía transferida a los componentes soldados o unidos por el proceso de soldadura. Este aporte de calor se determina por la ecuación 1.

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

Donde:

Hnet: Calor neto suministrado (J/mm)

- I: Intensidad de corriente (A)
 V: Tensión eléctrica (V)
 v: Velocidad de soldeo (mm/s)
 f: Eficiencia térmica

Tabla 5*Eficiencia térmica de diferentes procesos de soldadura*

Proceso de soldadura	Eficiencia térmica (%)
GTAW	20 - 50
GMAW	70 - 85
SMAW	70 - 80
SAW	90- 99

Nota: (Fosca, 2003)

Es necesario aclarar que la energía total proporcionada al proceso de soldadura solo una fracción se emplea para derretir las partes a unir mediante el soldeo, siendo la eficiencia dependiente del procedimiento de soldadura usado. La eficiencia térmica de diversos procedimientos de soldadura se muestra en la Tabla 5. (Fosca, 2003)

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

“Comprende el espesor, la forma y las dimensiones de la soldadura y el ángulo empleado entre las juntas a unir”. (Fosca, 2003)

d. Conductividad térmica material

“Consiste en la capacidad de la sustancia para transmitir el calor de sus moléculas a otras adyacentes que están en contacto”. (Fosca, 2003)

2.8.7. Temperatura Máxima en Cada Punto de la ZAC

Para prever o comprender los cambios metalúrgicos en una zona del metal sólido próxima a una soldadura, es necesario tener algún conocimiento sobre la temperatura máxima que se ha alcanzado en esa posición. Para estimar la distribución de temperaturas pico en el metal base adyacente a la soldadura se utiliza la ecuación 2 (Fosca, 2003)

$$T_{\max} = \frac{1}{\frac{4,13\rho C t Y}{H_{\text{neto}}} + \frac{1}{T_{\text{fusion}} - T_0}} + T_0 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

T_{\max} : Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$) a una distancia Y (mm) del extremo o contorno del metal fundido.

T_0 : Temperatura inicial de la chapa. ($^{\circ}\text{C}$)

T_m : Temperatura de fusión ($^{\circ}\text{C}$) (Temperatura del liquidus del metal a soldar)

C : Calor específico del metal sólido ($\text{J/g } ^{\circ}\text{C}$)

H_{neto} : Energía aportada neta (J/mm)

T : Espesor de la chapa a soldar (mm)

ρ : Densidad del material (g/mm^3)

ρC : Calor específico volumétrico ($\text{J/mm}^3 ^{\circ}\text{C}$)

Y : Ancho en mm de la zona afectada térmicamente

Con la ecuación establecida podemos determinar lo siguiente:

- Determinar la máxima temperatura en un punto.
- Determinar el ancho de la región de estudio.

- Determinar el efecto del precalentamiento en la región de la zona ZAC
- Velocidad de enfriamiento durante el proceso de soldadura realizado.

2.8.8. Cálculo del Ancho de La ZAC

La zona que se denomina "zona afectada por el calor" es aquella en la que las partes adyacentes del cordón de soldadura experimentan alteraciones microestructurales a causa del efecto del calor generado por el arco eléctrico. Determinar el ancho de esta área es crucial, ya que nos mostrará las alteraciones microestructurales que han tenido lugar. Este ancho se determina por la ecuación 3: (Fosca, 2003).

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_o} \right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_o} \right) \right] \times \left[\frac{H_{neto}}{4,13 \cdot \rho \cdot C \cdot t} \right] \quad \text{Ec. 3}$$

2.8.9. Velocidad de Enfriamiento

La energía térmica que se aplica en los procedimientos de soldadura se propaga a través de la conducción. La reducción de la temperatura en el periodo de enfriamiento ocurre porque se pierde calor hacia el ambiente y se transfiere al metal base y al metal de soldadura. De este modo, la rapidez con que se disipa la energía térmica determina la velocidad de enfriamiento en la soldadura.

Calcular las cantidades de precalentamiento requeridas es el uso más importante y práctico de la ecuación de velocidad de enfriamiento. Se puede estimar la velocidad de enfriamiento de la unión soldada en la línea central para placas con un espesor significativo empleando la Ec. 4:

$$R = \frac{2\pi K(T_c - T_o)^2}{H_{net}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

R: Velocidad de enfriamiento en un punto sobre el eje central de la soldadura ($^{\circ}\text{C/s}$) justo en el momento en que el punto se está enfriando a la temperatura de interés T_c .

K: Conductividad térmica del metal ($\text{J/mm s } ^{\circ}\text{C}$).

Para chapas delgadas la velocidad de enfriamiento, R, se calcula mediante la Ecuación 5.

$$R = 2\pi K\rho C \left[\frac{t}{H_{net}} \right]^2 \cdot (T_c - T_o)^3 \quad \text{Ec. 5}$$

No obstante, la velocidad de enfriamiento en las cercanías de la zona fundida es solo ligeramente inferior a la del eje central de la soldadura.

En consecuencia, se emplea la ecuación de la velocidad de enfriamiento para analizar el proceso de enfriamiento en toda la región soldada y en la zona térmicamente afectada más cercana.

Es necesario hacer ciertas aclaraciones para distinguir entre chapa delgada y gruesa. Cuando el flujo de calor es tridimensional y se extiende hacia los lados y hacia abajo de la soldadura, se emplea la ecuación para chapas gruesas. Por ejemplo, se usaría la ecuación para chapas gruesas en un cordón pequeño que se pone sobre una chapa de espesor significativo. Por otra parte, la fórmula para chapas delgadas se utilizaría en circunstancias como un único paso, una soldadura que penetra de manera completa o un corte por calor. A veces, debido a que los términos "gruesa" y "delgada" son relativos, puede ser difícil decidir si una chapa es gruesa o delgada. Por este motivo, es provechoso establecer una magnitud adimensional conocida como "espesor relativo de la chapa" (r), que se determina a través de la ecuación 6.

$$r = t \sqrt{\frac{\rho C(T_c - T_o)}{H_{net}}} \quad \text{Ec. 6}$$

Cuando el valor de r es superior a 0,9, se aplica la ecuación para chapas gruesas; en cambio, cuando es inferior a 0,6, se usa la ecuación para chapas delgadas. Si r está entre 0,6 y 0,9, la ecuación de las chapas gruesas generará una velocidad de enfriamiento excesiva y la ecuación de las chapas delgadas, por su parte, producirá una velocidad insuficiente. (Fosca, 2003).

2.9. Ensayos no Destructivos (End) y Destructivos

2.9.1. Ensayos no Destructivos

Echevarria, (2002), afirma que el END, o ensayo no destructivo, también llamado en inglés NDT (non-destructive testing), se refiere a toda clase de prueba que se lleva a cabo sobre un material sin provocar alteraciones en sus características mecánicas, físicas, químicas o dimensionales.

Los ensayos no destructivos se clasifican en:

- Inspección visual (VT)
- Líquidos Penetrantes (PT)
- Partículas Magnéticas (MT)
- Radiografía (RT)
- Ultrasonido (UT)
- Inspección visual (VT)

Para el presente trabajo solo se tomará en cuenta los ensayos de inspección visual y líquidos penetrantes.

2.9.1.1. Inspección Visual.

De acuerdo con la norma ANSI/AWS de 2000, la inspección visual es un método no destructivo esencial para el control del proceso. Este procedimiento posibilita que la soldadura sea evaluada desde su elaboración hasta su uso final conforme a requisitos particulares para asegurar su calidad. Esta valoración puede ser hecha en un principio por los soldadores mismos, los supervisores de soldadura, los inspectores de soldadura que las compañías han contratado, los inspectores de soldadura que han sido nombrados por los dueños y también los inspectores reguladores. Esta revisión visual se lleva a cabo antes, durante y después del procedimiento de soldadura, tomando en cuenta factores como:

- a. Acatamiento del procedimiento de soldadura que se ha indicado para la unión soldada.

- b. Control durante la preparación de la junta para soldar.
- c. Comprobación de las condiciones operativas de: los equipos de soldadura (que estén calibrados y en buen estado), los materiales consumibles y de aporte, así como los gases y los materiales base.
- d. Preparación de la raíz de la unión antes de soldar por el lado opuesto.
- e. Temperatura durante el precalentamiento y entre las pasadas.
- f. Secuencia de pasadas de soldadura
- g. Presentación de la soldadura y calidad de los cordones de relleno.
- h. Limpiar entre las pasadas.
- i. Aspecto y tamaño final de la soldadura.
- j. Deformación y distorsión producidas en el proceso de soldadura.
- k. Otros pormenores.
- l. tratamiento posterior a la soldadura.

2.9.1.2. *Líquidos Penetrantes.*

Según Echevarria, (2002), el ensayo se emplea para hacer una inspección visual con el propósito de identificar cualquier interrupción o defecto en la superficie de los materiales. Esta técnica es una de las más frecuentemente empleadas para detectar discontinuidades en materiales sólidos no porosos y puede ser utilizada tanto en materiales magnéticos como no magnéticos.

Los líquidos penetrantes ofrecen a la industria una variedad de técnicas y sensibilidades que los hacen aptos para adaptarse a diferentes formas y tamaños de materiales que se van a analizar. Su alta polivalencia los hace especialmente útiles para llevar a cabo inspecciones en áreas remotas. Además, son adecuados para ambientes de producción de componentes pequeños en intervalos de tiempo relativamente cortos. (Echevarria, 2002)

Las características distintivas de los líquidos penetrantes son:

1. Los líquidos penetrantes fluorescentes tienen un tinte que emite fluorescencia al ser expuesto a luz ultravioleta o negra.
2. Los líquidos penetrantes no fluorescentes tienen un colorante con alto contraste cuando se exponen a la luz blanca.

Los dos líquidos se aplican de la misma manera y tienen las fases que se indican a continuación:

- Primera limpieza de la pieza.
- Empleo del líquido penetrante.
- Periodo de penetración.
- Supresión del líquido excedente.
- Uso del líquido revelador.
- Análisis de la pieza.
- Limpieza final del componente.

Los aspectos resaltantes de cada uno de las fases son:

Limpieza inicial de la pieza

Es importante confirmar que la pieza a examinar esté limpia y sin ninguna sustancia extraña, como aceites, escorias, grasas, pinturas u óxidos, antes de aplicar el líquido penetrante. Los productos utilizados para la limpieza incluyen detergentes, disolventes, decapantes y otros. Es imprescindible que el componente a analizar esté completamente seco antes de aplicar el líquido penetrante, después de que se haya terminado la limpieza.

El líquido penetrante puede aplicarse de tres formas diferentes: inmersión en un baño, pulverización (spray) sobre la pieza o con una brocha, generalmente utilizando un pigmento rojo

para facilitar la detección. Para que un líquido penetrante sea ideal para propósitos de inspección, debe cumplir con las siguientes características:

- Resistencia frente a la evaporación.
- De fácil uso en la superficie.
- Capacidad para penetrar en orificios y aberturas muy angostas y diminutas.
- Habilidad de permanecer en aperturas grandes.
- Conservar el color o la fluorescencia.
- Es difícil eliminar la discontinuidad.
- Capacidad para expandirse en capas muy delgadas.
- La discontinuidad es fácilmente absorbida.
- Tiene que ser: no tóxico, sin color, anticorrosivo, no inflamable, estable en condiciones de almacenamiento y con un precio razonable.

Tiempo de penetración.- Es fundamental conceder el tiempo apropiado para que el líquido penetrante se infiltre y alcance las imperfecciones de la pieza que se está examinando. Para asegurar que la inspección sea efectiva, es esencial supervisar el tiempo de penetración que se indica en las instrucciones del producto.

Eliminación del líquido sobrante.- Se puede suprimir el líquido penetrante sobrante aplicado sumergiendo, pulverizando o esparciendo la pieza en un baño de líquido limpiador.

Aplicación del líquido revelador.- Con precaución, debido a que es un líquido muy volátil, se aplica el líquido revelador, normalmente de color blanco, a la pieza utilizando pulverización, rociado o inmersión. Después de aplicar el revelador, los residuos del líquido penetrante serán visibles a simple vista en el objeto, lo que hace más fácil su observación.

Examen de la pieza.- Las imperfecciones presentes en la pieza se pueden identificar de forma clara, nítida y precisa. Para observar líquidos fluorescentes, se emplean lámparas de mercurio o tubos de luz violeta como fuente de iluminación. Por otro lado, en los líquidos normales se utilizan las luces naturales y es posible notar manchas rojas en las zonas con defectos.

Limpieza final de la pieza.- Se extirpa cualquier residuo de líquido, revelador o penetrante, que se haya aplicado a la pieza en ensayo para terminar el ensayo con líquidos penetrantes. Se utilizan detergentes, disolventes y otros productos para la limpieza.

2.9.2. *Ensayos Destructivos*

Echevarria, (2002), establece que los ensayos destructivos son pruebas que se llevan a cabo en la pieza o material usando máquinas o herramientas que prácticamente inutilizan el componente objeto de la prueba, de ahí su nombre. Estos ensayos cambian o alteran de manera irreversible la geometría, las propiedades mecánicas y la composición química, así como sus dimensiones. En esta investigación se analizará exclusivamente la dureza mediante el método Rockwell C.

2.9.3. *Prueba de Dureza*

Echevarria, (2002) afirma que la dureza es la habilidad que tiene un material de soportar ser penetrado por un objeto más duro, lo cual ocurre a nivel microscópico a través de una punta.

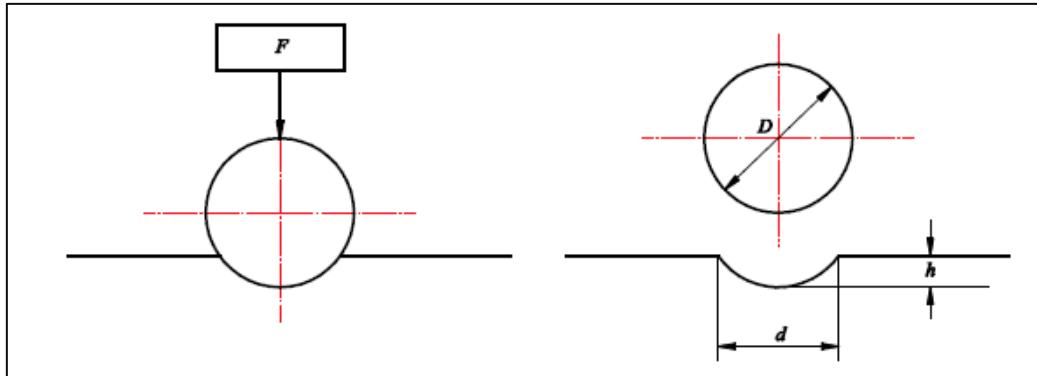
Los ensayos de dureza más utilizados son:

- Ensayo Martens
- Ensayo Shore
- Ensayo Mohs
- Ensayo Brinell
- Ensayo Vickers
- Ensayo Rockwell

- Ensayo Poldi
- Ensayo Knoop.
- Dureza Brinell

Figura 19

Símbolos que describen la dureza Brinell



Nota: (Ingemecánica, 2022)

Según Echevarria, (2002), la metodología de ensayo por indentación se define como el procedimiento de aplicar fuerza a una bola endurecida con una máquina calibrada, siguiendo condiciones particulares, sobre la superficie del material que se encuentra en prueba. Después, se mide el diámetro de la impresión dejada tras haber quitado la carga, tal como se ilustra en la Figura 19.

La dureza brinell se calcula con la ecuación siguiente:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{Ec. 7}$$

$$f = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

f = Valor numérico de la fuerza (N)

D = Diámetro de la bola (mm)

d = Diámetro de la huella (mm)

2.9.4. Prueba de Doblez Guiado

Society A. w.,(2007) la prueba de doblez guiado se define como la aplicación de una carga a una probeta estándar utilizando un punzón, con el fin de conseguir que el material se doble 180° en forma de "U" (Society A. W., 2007). Las medidas de los punzones y las probetas han sido establecidas en los diversos códigos de referencia empleados.

La ductilidad de los materiales y las uniones soldadas se evalúa mediante la prueba de doblez guiado. Esta prueba se lleva a cabo utilizando varias formas de doblez guiado, las cuales son:

- Doblez de raíz.
- Doblez de cara.
- Doblez lateral.
- Doblez transversal, entre otros.

Los resultados de la prueba de doblez se pueden utilizar para verificar el rendimiento de los materiales o examinar cuán efectivos son los métodos de soldadura y qué tan hábiles son los soldadores.

2.10. Imperfecciones (Discontinuidades) en las Uniones Soldadas

Las anomalías o desviaciones que se presentan en la estructura de una unión soldada son consideradas defectos si su tamaño o localización pueden ocasionar el fracaso de dicha unión (Ortiz, Defectos y discontinuidades en soldadura, 2018). Una posible razón de estas imperfecciones es una inadecuada:

- Preparación, organización o limpieza de las partes a unir.
- Realización de la soldadura.

- Soldabilidad del metal base.

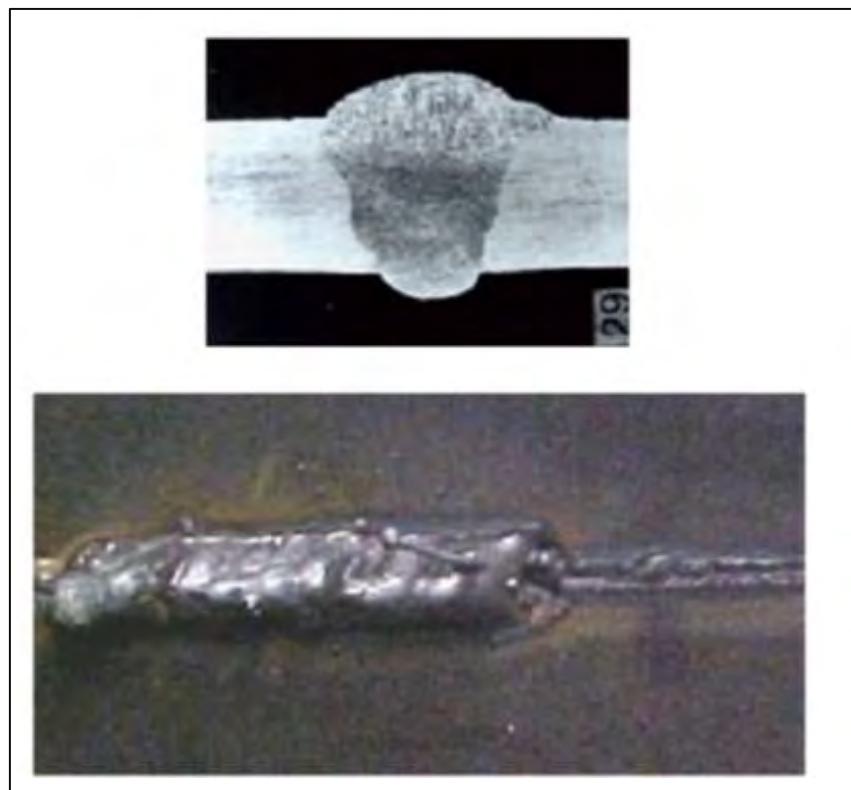
2.10.1. Clasificación de las Discontinuidades

Una forma simple de clasificar las discontinuidades y los fallos en la soldadura es separándolos en superficiales e internos.

2.10.1.1. Discontinuidades Superficiales.

Figura 20

Exceso de penetración



Nota: (Echevarria, 2002)

- **Exceso de penetración**

Este fenómeno se produce por el movimiento que genera la inserción del electrodo en los bordes biselados, que están localizados en esas áreas. Esto provoca que el material se traslade

hacia adentro, lo cual puede incluir la retención de escoria en su interior o no, como se ilustra en la Figura 20. (Echevarria, 2002)

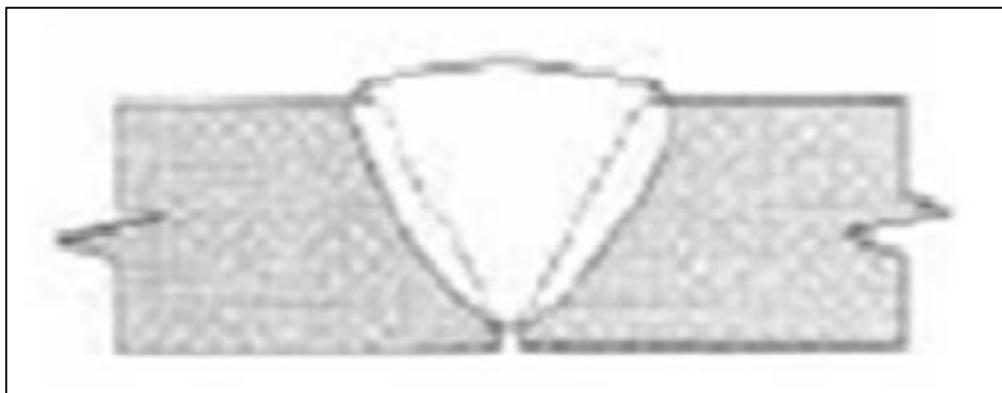
- **Falta de penetración**

Como las uniones en forma de U o V son visibles desde la cara posterior, este defecto puede ser considerado superficial. Frecuentemente, la raíz de la soldadura queda vacía porque no se llena el espacio con el metal de manera adecuada.

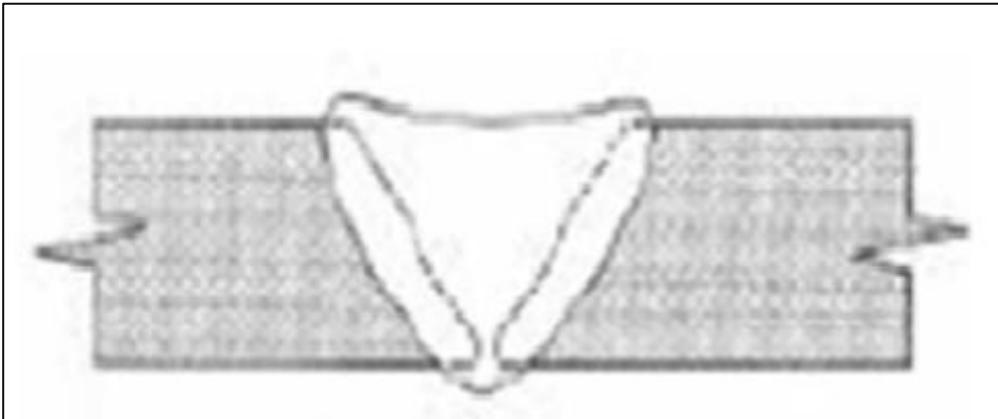
Esto podría ser resultado de una separación mínima en la raíz, de un electrodo demasiado grueso, de una corriente de soldadura que no es suficiente, de una velocidad del proceso de soldadura que es excesiva o bien de una penetración equivocada en la ranura. En general, esta imperfección no satisface los criterios de aceptación y normalmente exige eliminar el cordón de soldadura anterior para repetir el procedimiento. La Figura 21 muestra este defecto.(Echevarria, 2002).

Figura 21

Falta de penetración



Nota: (Echevarria, 2002)

Figura 22*Concavidades*

Nota: (Echevarria, 2002)

- **Concavidades**

Otro tipo de discontinuidades en la superficie son las concavidades. Se conoce como concavidad externa o escasez de material de aporte, lo que provoca una disminución del refuerzo externo y un depósito mínimo de material de aporte en el relleno del cordón. La discontinuidad se puede ver en la Figura 22.(Echevarria, 2002)

- **Socavadura o mordedura de borde**

La socavadura es una depresión que se forma en el metal base, cerca de la raíz de la soldadura o de la sobremonta, y no está ocupada por el metal de soldadura. La Figura 23 muestra esta discontinuidad. (Echevarria, 2002)

Causas y corrección

- Exceso de calor

Elegir y/o corregir la intensidad de corriente adecuada en la máquina de soldar.

- Electrodo inadecuado

Seleccionar debidamente el electrodo

- Manipulación inapropiada

Mejorar el movimiento manual

- Arco muy intenso

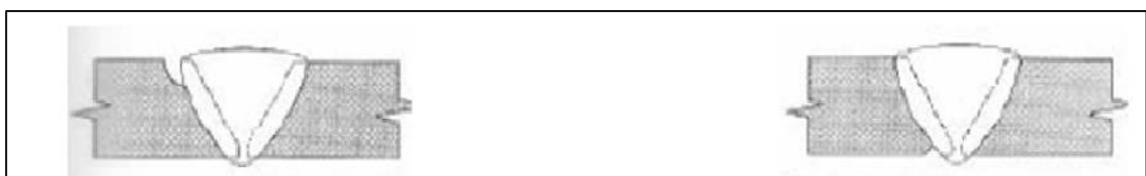
Controlar el arco

- Velocidad inadecuada

Mejorar la velocidad y corregir el movimiento del electrodo. (Echevarria, 2002)

Figura23

Socavadura o mordedura de borde



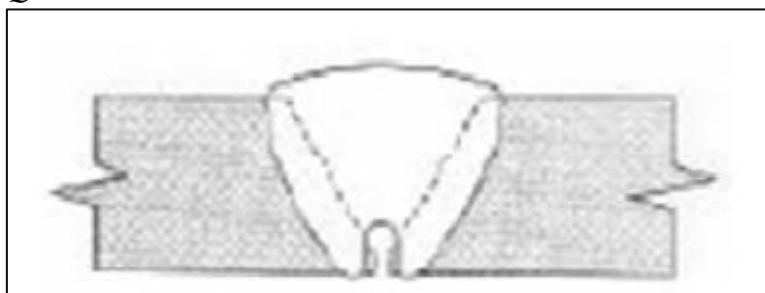
Nota: (Echevarria, 2002)

- **Quemado**

Se presenta en la zona de la raíz de la soldadura, donde una penetración excesiva provoca que el material de soldadura penetre en el área por soplando. La figura 24 ilustra este fenómeno. Se produce debido a factores que aumentan la temperatura en esa área, tales como una corriente muy elevada, un movimiento del electrodo lento o el manejo inadecuado del electrodo. Implica la completa eliminación de los biseles. (Echevarria, 2002).

Figura 24

Quemado



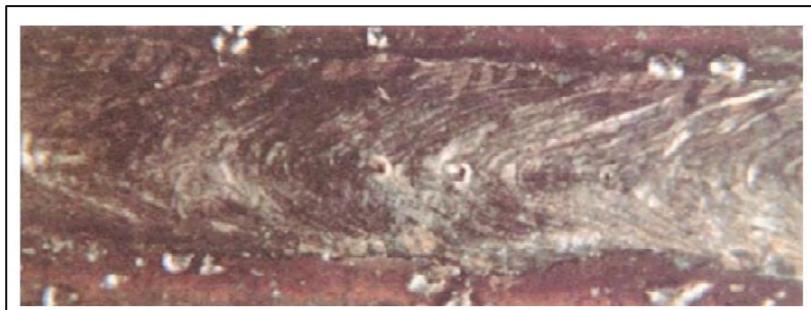
Nota: (Echevarria, 2002)

- **Salpicaduras**

Estas imperfecciones se componen de diminutas gotas de metal fundido que son depositadas de forma aleatoria sobre el cordón de soldadura y su entorno cercano. Su origen puede estar relacionado con la humedad presente en el revestimiento del electrodo. Aunque las salpicaduras son visibles en la Figura 25, no tienen relevancia significativa en cuanto a la calidad de la soldadura.(Echevarria, 2002)

Figura 25

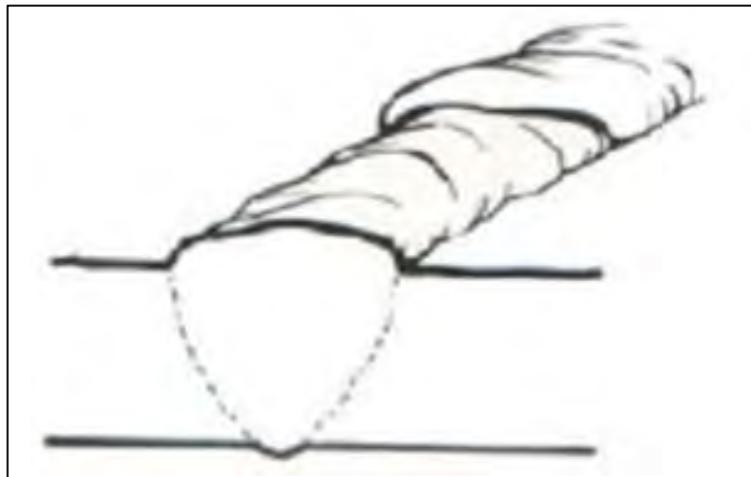
Salpicaduras



Nota: (Echevarria, 2002)

Figura 26

Discontinuidad en el cordón



Nota: (Echevarria, 2002)

- **Discontinuidad en el cordón**

Este defecto surge cuando el soldador detiene la soldadura y luego no logra reanudar el cordón de manera adecuada. Su gravedad varía ampliamente: a veces puede ser interpretado como falta de fusión transversal significativa, mientras que en otros casos consiste simplemente en surcos normales al eje del cordón. Este aspecto se visualiza en la Figura 26. (Echevarria, 2002)

- **Imperfecciones diversas**

Erosiones y huellas

Es un grupo de defectos que tienen origen en causas mecánicas, tales como abrasión, deformación o arranque de material que, a su vez pueden dividirse en: (Echevarria, 2002)

- ✓ **Exceso de rebajado**

Esta falla sucede cuando se lleva a cabo un mecanizado o esmerilado en exceso del cordón de soldadura, dejándolo con una concavidad leve. En radiografías, se observa como áreas un poco más oscuras que el área circundante, con bordes borrosos y complicados de distinguir, que siguen el camino del cordón de soldadura.

- ✓ **Huellas de esmerilado o burilado**

Son signos o impresiones que se encuentran en la superficie del metal base o en el cordón de soldadura, originados por el uso incorrecto de un buril o una muela. En una radiografía, estas marcas se observan como sombras algo oscuras, rectas y que van en paralelo.

- ✓ **Huellas de mecanizado**

Estas erosiones se producen por el uso inadecuado de utensilios para la preparación de soldadura o por un mal mecanizado. Estas erosiones aparecen en una radiografía como líneas apenas oscuras, paralelas y bien definidas entre sí.

- ✓ **Martillazos o golpes en general**

Se trata de modificaciones locales que son el resultado de impactos en el metal base o en el cordón de soldadura. En las radiografías, se pueden ver curvas tenues y oscuras con bordes marcados y más densos; de allí emanan la mancha y las marcas, como puntos o granetazos que se parecen a poros, entre otros.

✓ **Restos de electrodo**

Este defecto ocurre en el proceso de soldadura automatizada con aparatos de atmósfera inerte y electrodo continuo, cuando los restos del alambre-electrodo sobresalen al hacer el cordón de penetración, extendiéndose a veces por varios centímetros desde la base de la unión soldada. En una radiografía, estos desechos aparecen como diminutos componentes claros que se extienden desde el centro del cordón. También puede ocurrir la presencia de restos de electrodos si estos han sido abandonados dentro de una tubería, apareciendo en la radiografía como material sobrepuerto, fácilmente separable y eliminable al no estar unido firmemente a la unión.

2.10.1.2. Discontinuidades Internas.

Figura 27

Fisuras longitudinales



Nota: (Echevarria, 2002)

Estas discontinuidades se clasifican en: (Echevarria, 2002)

- **Fisuras longitudinales**

Pueden ocurrir en la parte central del cordón (normalmente debido a movimientos durante o después de la soldadura) o en la interfaz entre el material base y el material de aporte (debido al enfriamiento rápido o a un precalentamiento insuficiente, si se trata de espesores grandes). La Figura 27 permite observar esta situación.

- **Fisuras transversales**

Este tipo de fisuras se manifiestan generalmente en aceros duros a causa de la combinación de elementos que al enfriarse hasta la temperatura normal producen el fisuramiento, la misma que puede o no prolongarse hasta el metal base. Se pueden dar: (Echevarria, 2002)

- ✓ Fisuras en caliente

Sucedan mientras se lleva a cabo la solidificación de la unión. Los motivos fundamentales que originan este defecto en los aceros al carbono de baja aleación o no aleados son:

- Tenor de carbono medio o alto en el metal base.
- Un porcentaje elevado de impurezas, en particular P y S, en el metal base.
- Tensiones de contracción muy altas (dependen de qué tan plástico es el material de la unión).

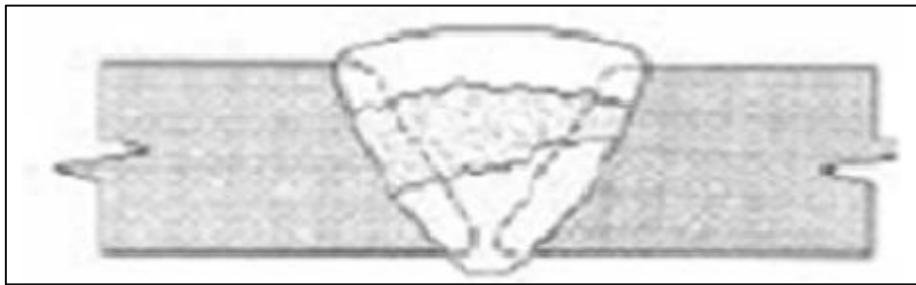
Las fisuras en caliente pueden aparecer en cualquier tipo de material, ya sea metálico, ferroso o no ferroso. Son intergranulares y pueden tener orientaciones diversas. (Echevarria, 2002)

- ✓ Fisuras en frío

Se producen cuando el material está cerca o llega a la temperatura del entorno. La figura 28 muestra esta clase de fisura.

Figura 28

Fisuras en frío



Nota: (Echevarria, 2002)

Causa para el fisuramiento en frío:

- En particular, la alta cantidad de hidrógeno en el área fundida.
- Rápido enfriamiento.
- Tensiones que el enfriamiento causa sobre el cordón.
- En uniones soldadas de aceros dulces y de baja aleación con manganeso, así como microaleados.

Las fisuras son muy pequeñas (llamadas fisuras de hidrógeno) y frecuentemente se reagrupan en un cierto número en la misma zona fundida de la junta.

En aceros de alta resistencia, como los bonificados, las fisuras suelen ser más amplias y pueden atravesar todo el cordón en dirección transversal.

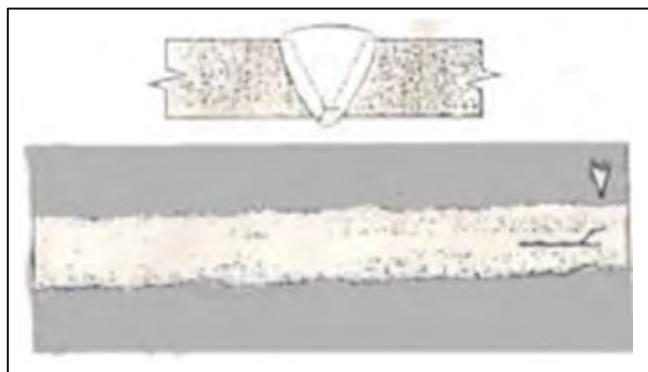
Se observa radiográficamente como una línea fina muy negra y recortada, de poca ondulación y transversal al cordón soldado. (Echevarria, 2002)

- **Fisura de interrupción o arranque (o de cráter)**

Se forman como estrellas debido a que el material se enfriá y recalienta de manera abrupta (son fisuras que ocurren en caliente). Se aprecia en la Figura 29 (Echevarria, 2002)

Figura 29

Fisura de interrupción o arranque



Nota: (Echevarria, 2002)

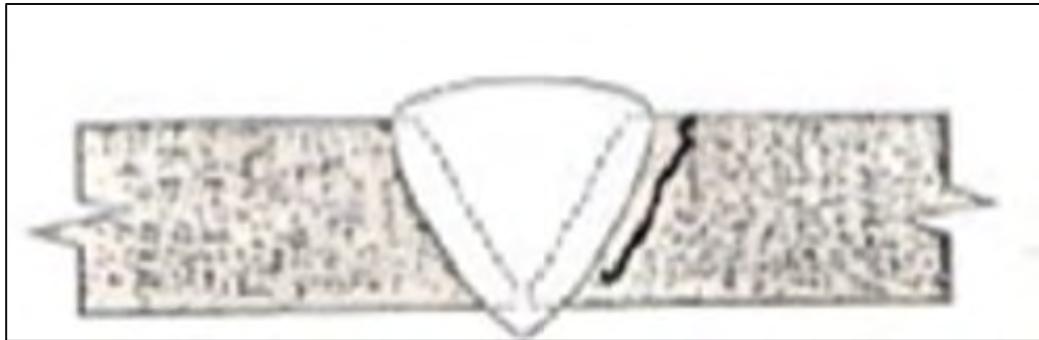
- **Fisuras alrededor del cordón (ZAC)**

- **Fisuras en frío**

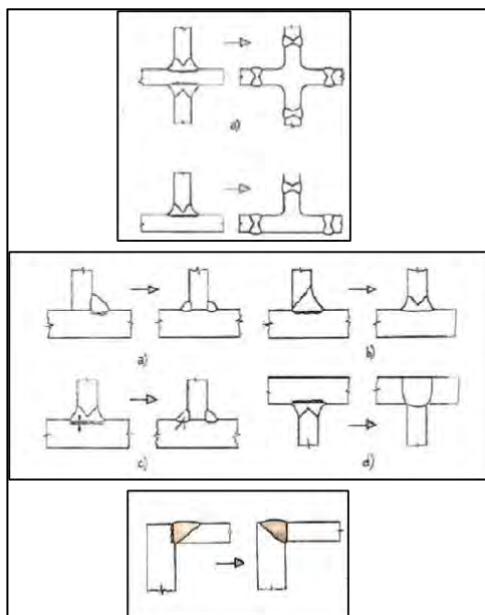
Sucede por la ausencia de precalentamiento (que es fundamental para algunos tipos de acero), en aceros gruesos o duros (estructura martensítica en ZAC debido al ciclo térmico de soldadura).

Siempre aparecen en los granos más gruesos de la ZAC del acero. La causa de esto es el efecto del hidrógeno disuelto que libera el electrodo (humedad o solidificación del metal). Para prevenirlo, se puede utilizar electrodos básicos o precalentar y mantener el material soldado a una temperatura cercana a los 200 °C durante un periodo específico. Las tensiones que se producen como consecuencia de la contracción de la junta o geometrías con entallas también tienen un impacto, y suelen ser de dirección longitudinal. A veces, pueden ser transversales o internas (debajo del cordón de soldadura), o bien aparecer junto al cordón.

La imagen radiográfica presenta líneas negras, con escasa ondulación, algo más gruesas que el cabello y en la zona contigua al cordón de soldadura. Obsérvese sus características en la Figura 30 (Echevarria, 2002)

Figura 30*Fisuras en frío*

Nota: (Echevarria, 2002)

Figura 31*Desgarre laminar*

Nota: (Echevarria, 2002)

➤ Desgarre laminar

Son grietas que pueden aparecer en aceros dulces y de baja aleación, a menudo vinculadas con soldaduras tensadas, cuya estructura genera tensiones perpendiculares al plano de laminación

sobre el metal base. Suelen estar presentes a menudo bajo la ZAC (material base no afectado) y son comunes en las juntas en forma de T o L.

Los factores más importantes que causan estos defectos son:

1. Tensiones de enfriamiento que varían en intensidad según la rigidez de la estructura.
2. Geometría de la unión, de modo que la solicitud tenga un efecto negativo en el metal base.

Las Figuras 30, 31 y 32 respectivamente muestran (las flechas señalan la mejor disposición).

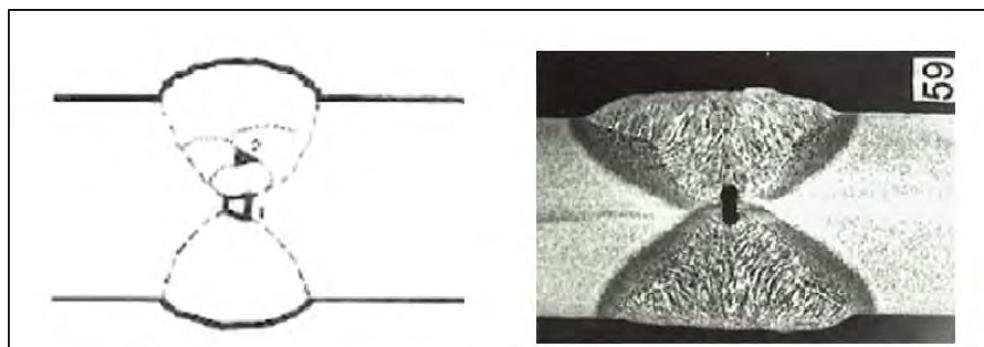
3. Material base laminado de medio y alto espesor (9 – 20 mm) susceptibles a desgarrarse.
- (Echevarria, 2002)

➤ Falta de penetración

Cuando el metal fundido no penetra correctamente, se da una falta de penetración en la zona de raíz. Si la unión es en X o K, la raíz se sitúa en el corazón mismo del cordón y carece de metal de aporte en esa área; por lo tanto, es estrictamente interna. Se puede apreciar este defecto en la figura 32 (Echevarria, 2002).

Figura 32

Falta de penetración



Nota: (Echevarria, 2002)

Principales causas para el origen de este defecto:

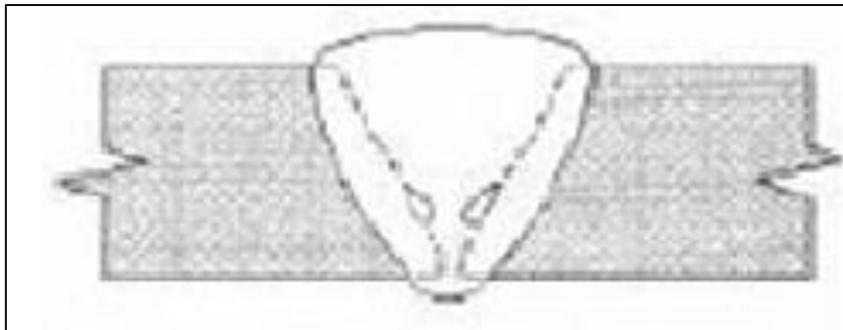
1. Temperatura insuficiente.
2. Exceso de velocidad de soldeo.
3. Falta de habilidad del soldador.

➤ **Falta de fusión**

Normalmente provocada por una temperatura insuficiente para derretir el metal base o el cordón anterior, que ya se encuentra sólido. Obsérvese este defecto en la Figura 33.

Figura 33

Falta de fusión



Nota: (Echevarria, 2002)

Según su ubicación pueden ser:

- Falta de fusión en el bisel
Entre el metal de soldadura y el metal base.
- Falta de fusión de un bisel en la raíz (talón u hombros)

Que se produce:

1. Cuando la temperatura no es suficientemente alta y el orificio de la raíz (intersticio) está ausente.
2. Debido a un mal alineamiento de los componentes que se están soldando.
3. Debido a errores en la preparación.

4. Debido a distintas dimensiones de diámetro o espesor.
5. Por deficiente penetración por parte del soldador al realizar la primera pasada. (Echevarria, 2002)

➤ **Falta de fusión entre pasadas**

Esto se presenta en la interfaz de soldadura, donde las capas metálicas contiguas, es decir, el metal base y el metal de soldadura, no se unen adecuadamente. Por lo general, esto ocurre a causa de una delgada capa de óxido en las superficies.

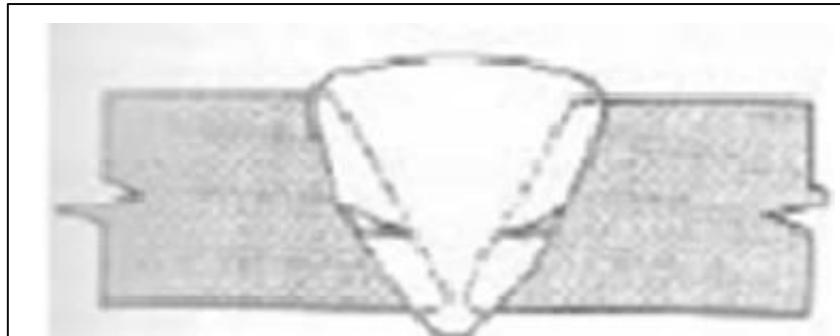
Surge debido a una capa de óxido de hierro que se forma por un calentamiento inadecuado del metal base.

Además, puede deberse a que la intensidad de corriente es insuficiente o a que el arco eléctrico está mal situado dentro de los biseles y se produce más en uno, dejando al otro sin fundir.

Defecto que se puede observar en la Figura 34 (Echevarria, 2002)

Figura 34

Falta de fusión entre pasadas



Nota: (Echevarria, 2002)

2.10 Calificación del Procedimiento

Antes de realizar una soldadura se establecerá y calificará un documento detallado del procedimiento para garantizar que la soldadura presente adecuadas propiedades. La calidad de la soldadura tiene que ser evaluada a través de ensayos destructivos y no destructivos.

2.11.1. Especificación del Procedimiento de Soldadura o WPS (Welding Procedure Specification)

Documento elaborado por el departamento técnico o el de ingeniería dentro de la compañía, que presenta los valores numéricos proyectados para las variables necesarias para llevar a cabo una soldadura. Ofrece información pertinente para guiar al soldador u operador de soldadura y garantizar que se cumplan los requisitos del código. Especifica las variables fundamentales, las que no son esenciales y, cuando sea necesario, las adicionales esenciales de cada proceso de soldadura. Se debe elaborar en un formato que incluya todos los campos llenos y la firma de validación del encargado de soldadura.

2.10.2 Registro de la Calificación del Procedimiento o PQR (Procedure Qualification Record)

El PQR es un documento que califica y valida un WPS. En este se anotan los valores reales de las variables del proceso de soldadura, a través de la realización de una soldadura de calificación en un cupón de prueba estandarizado.

2.10.3 El Registro de la Calificación de la Habilidad del Soldador o WPQR (Welder Performance Qualification Record)

Es un documento que anota las pruebas de calificación de rendimiento exigidas por el código, con el objetivo de evaluar la capacidad de los soldadores para realizar soldaduras adecuadas.

CAPÍTULO III

HIPOTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

- La intensidad de corriente influye en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW.

3.1.2. Hipótesis Específicas

- a) La intensidad de corriente influye en la velocidad de enfriamiento en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW.
- b) La intensidad de corriente influye en el ancho de la zona afectado por el calor (ZAC) en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW.
- c) La intensidad de corriente influye en la dureza del acero ASTM A572-50 soldado por el proceso SMAW

3.2. Variables

3.2.1. Dependiente

Soldabilidad del acero ASTM A572-50

3.2.2. Independientes

- Intensidad de corriente
- Voltaje en el arco
- Velocidad de soldeo

3.2.3. Intervinientes o Externas

- Humedad ambiental
- Composición química del acero ASTM A572-50.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1. Nivel o Tipo de Investigación

4.1.1. Explorativo.

Se examinará cada detalle del trabajo con gran profundidad, analizando todos los parámetros de investigación, formulando hipótesis y determinando las variables que son relevantes para la investigación.

4.1.2. Descriptivo.

En esta investigación se aborda la descripción del problema en un contexto espacial específico. Debido a su importancia y evolución durante el proceso de investigación, esta metodología es la más adecuada para tratar el problema estudiado.

4.1.2.1. Correlacional.

El propósito de este tipo de estudio es determinar el nivel de asociación o relación no causal entre dos o más variables, analizando la hipótesis que puede ser verificada.

4.1.2.2. Explicativa.

La investigación tiene como objetivo examinar un aspecto de la realidad, resaltando su relevancia dentro de una teoría fundamental que se concentra en entender las causas detrás de los eventos mediante la creación de relaciones de causa y efecto.

4.2. Viabilidad.

La investigación se lleva a cabo con los medios existentes, la posibilidad de acceder a talleres en el entorno local y la disponibilidad del taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la universidad. Por lo tanto, no hay prácticamente obstáculos para alcanzar los objetivos establecidos en el presente estudio.

Dicho de otra manera, se cuenta con los equipos fundamentales requeridos (máquina de soldadura y accesorios, electrodos, disponibilidad del acero ASTM A572-50 para la elaboración de las muestras o probetas que se necesitan para el experimento, herramientas para controlar la calidad, entre otros).

4.3. Método y Diseño de Investigación.

4.3.1. Método de Investigación por Objetivos

El método de investigación por objetivos es una perspectiva metodológica que guía el avance del estudio a partir de los objetivos propuestos y define un vínculo directo entre estos y las hipótesis formuladas. Este método tiene como objetivo preservar la coherencia lógica entre las conclusiones que se obtienen en el proceso científico, las hipótesis planteadas, los objetivos y el problema investigado.

Según Hernández Sampieri, Fernández y Baptista (2014), es necesario que toda investigación se organice de tal forma que los objetivos específicos orienten tanto la recopilación como el análisis de datos, lo que garantiza que cada etapa del estudio ayude a alcanzar el objetivo general. En este sentido, el diseño por objetivos permite organizar la investigación en niveles jerárquicos: objetivo general (OG), objetivos específicos (Oe), hipótesis general (HG) e hipótesis específicas (He).

Cada objetivo específico (Oe) se relaciona con una hipótesis específica (He), que puede ser verificada o refutada mediante la contrastación empírica. A su vez, el conjunto de estas relaciones contribuye a validar o rechazar la hipótesis general (HG), lo que finalmente conduce a una conclusión final (CF) coherente con el objetivo general. Ello se puede representar la siguiente relación:

$$\text{OG}\{(\text{Oe1} \rightarrow \text{He1}), (\text{Oe2} \rightarrow \text{He2}), (\text{Oe3} \rightarrow \text{He3})\} \text{HG} \rightarrow \text{CF}$$

Donde:

OG: Objetivo general

Oe 1; Oe 2 Y Oe 3: Objetivos específicos 1, 2, 3

He 1; He 2; He 3: Hipótesis específicas 1, 2, 3

HG: Hipótesis general

CF: Conclusión final

4.4. Población y Muestra

4.4.1. Población.

La población de estudio de la presente investigación está constituida por todas las uniones soldadas de acero estructural ASTM A572-50 que se ejecutan mediante el proceso de soldadura por arco metálico protegido (SMAW) bajo condiciones similares a las empleadas industrialmente en estructuras metálicas. En términos inferenciales, se asume que las probetas ensayadas representan al conjunto de cordones y juntas que podrían fabricarse con este mismo acero, utilizando electrodos de clasificación equivalente (por ejemplo, E7018), espesores y configuraciones de junta comparables, de modo que los resultados obtenidos sobre velocidad de enfriamiento, ancho de la zona afectada por el calor y dureza sean extrapolables a la población de soldaduras realizadas en campo bajo parámetros análogos.

4.4.2. Muestra.

4.4.2.1. Fórmula para Tamaño de Muestra en Medias

Para estimar una media poblacional con precisión EE (error máximo admisible) y nivel de confianza $1-\alpha$, la fórmula clásica es:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha}/2^{\sigma}}{E} \right)^2 \quad Ec. 9$$

Donde $Z\alpha/2$ es el valor crítico de la distribución normal estándar, σ es la desviación estándar poblacional (o una estimación preliminar) y E es el margen de error tolerado.

4.4.2.2. Supuestos Numéricos Razonables

Para procesos de soldadura similares se han reportado desviaciones estándar de dureza en ZAC del orden de 4–6 HB y desviaciones estándar de ancho de ZAC alrededor de 0.05–0.10 mm cuando se trabaja con parámetros bien controlados. Suponiendo:

- Nivel de confianza: 95% $\Rightarrow Z0.025 \approx 1.96$
- Desviación estándar preliminar de dureza: $\sigma=5$ HB
- Error máximo admisible en la media de dureza: $E=4$ HB se tiene:

$$n = \left(\frac{1.96 * 5}{4} \right)^2 = \left(\frac{9.8}{4} \right)^2 = 6$$

Si se usa un valor algo menor de desviación estándar, por ejemplo $\sigma=4.5$ HB (lo que es consistente con procesos muy controlados), el cálculo queda:

$$n = \left(\frac{1.96 * 4.5}{4} \right)^2 = \left(\frac{8.82}{4} \right)^2 = 4.9$$

Redondeando al entero superior, se obtiene $n=5$ probetas por condición, que es el tamaño de muestra adoptado en tu estudio. Con estos supuestos, cinco probetas permiten estimar la media de dureza (o de ancho de ZAC) con un error máximo de aproximadamente ± 4 HB (o el error equivalente en milímetros) al 95% de confianza, manteniendo un equilibrio adecuado entre precisión estadística y costos experimentales, en línea con prácticas habituales de diseño de experimentos en soldadura de aceros estructurales

4.4.3. Justificación de Tamaño de Muestra

El tamaño de muestra de cinco probetas de acero ASTM A572-50 se justifica porque permite cumplir con los requisitos mínimos para aplicar análisis de varianza de una vía (ANOVA)

y ajustar modelos de regresión con un número adecuado de grados de libertad, manteniendo a la vez la viabilidad técnica y económica del estudio. Además, al tratarse de un proceso de soldadura altamente controlado, en el que se mantienen constantes el tipo de electrodo, el espesor, la posición y el voltaje, la variabilidad experimental se reduce y hace posible obtener estimaciones estables de la media y de la variabilidad con un número relativamente pequeño de observaciones, tal como se ha reportado en investigaciones previas sobre soldabilidad de aceros estructurales donde se han utilizado tamaños muestrales similares por condición experimental.

4.5. Técnicas e Instrumentos de Toma de Datos

4.5.1. *Técnica.*

La investigación se llevará a cabo utilizando la técnica de “observación directa” mediante la percepción y análisis de los fenómenos en su contexto real.

4.5.2. *Equipos e Instrumentos.*

Los equipos que se usarán son:

- Soldadura por arco eléctrico manual
- Equipo de ensayo de doblez.
- Instrumentos de medición.

4.6. Viabilidad de la Investigación.

Se considera factible realizar el presente trabajo de investigación porque se cuenta con los equipos, insumos y materiales que se requieren para llevar a cabo las pruebas experimentales y los procedimientos de control de calidad apropiados.

4.7. Selección de la Tecnología.

La decisión de optar por el proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW) en este estudio se fundamenta en su gran dependencia del calor neto y la corriente eléctrica, elementos

determinantes para la soldabilidad del acero estructural A572-50. Este procedimiento hace posible la evaluación precisa del impacto que tienen las fluctuaciones de la intensidad y el tipo de corriente en la calidad del cordón de soldadura, la penetración, la microestructura y la energía térmica transferida. Además, el SMAW se emplea frecuentemente para unir aceros de construcción, lo que permite llevar a cabo investigaciones sobre soldabilidad que sean representativas y aplicables a situaciones reales de mantenimiento y fabricación. El estudio del comportamiento del calor neto y su influencia en la solidificación y fusión al unir metales ayuda a entender mejor los procesos metalúrgicos y térmicos que definen la resistencia y calidad de las juntas soldadas.

4.8 Ámbito de Estudio

La localización política de Cusco se define por su estatus como departamento (o región) del sur del Perú, dividido en 13 provincias y 108 distritos. La capital es la ciudad del Cusco, que a su vez es capital de la provincia del mismo nombre.

Nivel Regional: Cusco es uno de los 24 departamentos que conforman el Perú,

Nivel Provincial: El departamento se subdivide en 13 provincias, cada una con su respectiva capital:

4.8.1. Ubicación Geográfica General

4.8.1.1. 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 Manufactura, 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.

4.8.2. Lugar de investigación

Se realizo en el Taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica UNSAAC – Cusco.

CAPÍTULO V

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.1. Equipo y Maquinaria Usada para la Investigación.

El procedimiento experimental de la soldabilidad del acero ASTM A572-50 se realizó en probetas, las mismas están especificadas en el acápite 3.2.1. Los detalles de la maquinaria y equipo se detallan a continuación.

5.1.1. Máquina de Soldar.

La máquina de soldar fue el modelo Miller XMT 425 CC/CV 208-575.

Tabla 6

Especificaciones.

Características de la máquina de soldar	
Tensión en vacío (V)	83
Rango de intensidad de corriente (A)	10-200
Tensión	220±10%
Fases	1
Frecuencia (Hz)	50/60

Nota: Elaboración propia

Tabla 7

Voltaje de salida para el proceso de soldadura.

Ciclo de trabajo (%)	Intensidad de corriente de salida (A)	Tensión de salida (V)	Proceso de soldadura
40	200	28	SMAW
100	126	25	SMAW
40	200	18	GTAW
100	126	15	GTAW

Nota: Elaboración propia

La fuente de poder se puede ver en la Figura 35.

Figura 35

Máquina de soldar Miller



Nota: Fotografía propia

5.1.2. Durómetro Digital Portátil

El durómetro portátil se muestra en la figura 36.

Figura 36

Durómetro portátil



Nota: Fotografía propia

- **Características:**

- ✓ Botón SNAP para una captura rápida de imágenes.

- ✓ Ajuste manual del enfoque de 50x a 1600x.
- ✓ 8 LED con ajuste de intensidad de brillo.
- ✓ Compatibilidad con sistemas Windows Vista, XP, 7, 8, 10 (32 y 64 bits).
- ✓ Resolución de imagen: estándar 1600*1200p, 1280*960p, 640*480p, 480*360.
- ✓ Resolución de vídeo: estándar 1600*1200p, 1280*960p, 640*480p, 480*360.
- ✓ Rango de ampliación: 20x - 1600x.
- ✓ Rango de enfoque: manual de 8 mm a 1000 mm.

5.1.3. Equipo para Ensayo de Doblez Guiado

El taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica alberga este equipo. El equipo para el ensayo de doblado, que puede lograr una presión de trabajo de 20 toneladas, se muestra en la figura 37.

Figura 37

Equipo para ensayo de doblez guiado



Nota: Fotografía propia

5.2. Materiales Utilizados en la Investigación

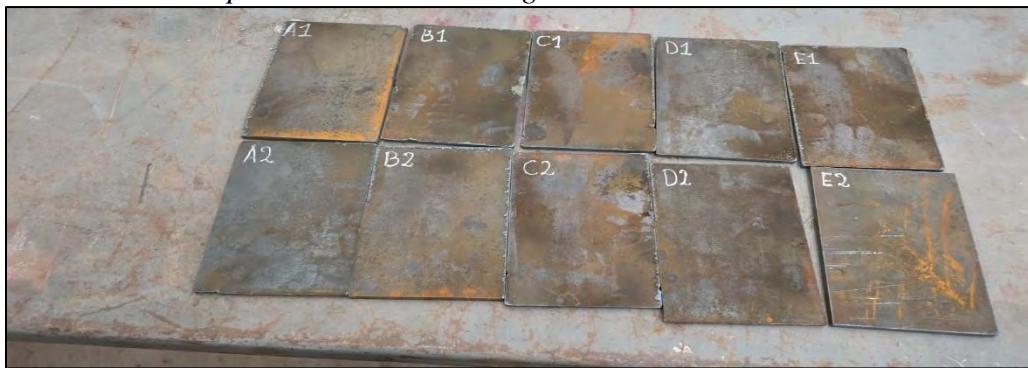
5.2.1. Material Base

Se emplearon 10 probetas de acero ASTM A572-50 (consultar la figura 38) en este estudio, las cuales se acoplaron para ser soldadas.

- Ancho(mm): 100.00
- Longitud (mm): 130.00
- Espesor (mm): 6.35
- Su conductividad térmica (K) equivale: 0.028 J/mm x s x °C.

Figura 38

Probetas elaboradas para realizar la investigación



Nota: Fotografía propia

Las Tablas 8 y 9 presentan las características mecánicas y la composición química de las probetas, que son el material de ensayo.

Tabla 8

Propiedades mecánicas del acero ASTM A572-50

Esfuerzo de fluencia	Esfuerzo de tracción	Elongación	Dureza		
Min. (kg/mm ²)	Min. (Mpa)	Min. (kg/mm ²)	Min. (MPa)	Min. (%)	HB
35	345	46	450	21	133

Nota: Elaboración propia

Tabla 9

Composición química del acero ASTM A572-50

C (%) (máximo)	Si (%) (máximo)	Mn (%) (máximo)	P (%) (máximo)	S (%) (máximo)	V (%)	Nb (%)
0.23	0.40	1.35	0.04	0.05	0.01–0.15	0.005–0.05

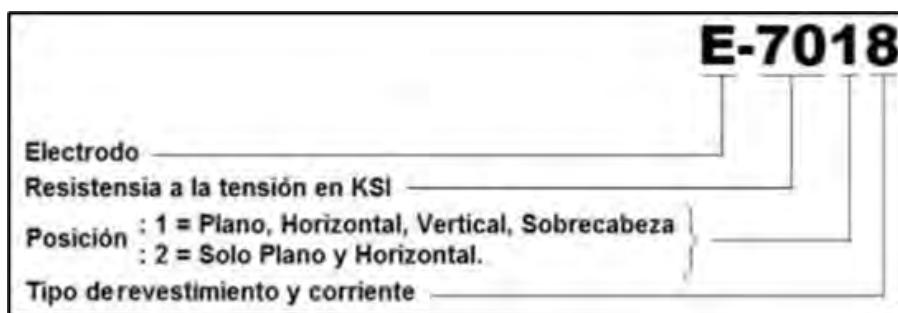
Nota: Elaboración propia

5.2.2. *Electrodo E-7018.*

Es el tipo de electrodo que se eligió para soldar o unir el acero ASTM A572-50 (ver la ficha técnica en el apéndice número 2). El revestimiento de dicho electrodo es básico y tiene una baja cantidad de hidrógeno. Se emplea corriente alterna (mínimo 78 OCV) o corriente directa con polaridad positiva (+). Por el contenido de polvo de hierro, presenta un alto índice de deposición y una baja pérdida por salpicadura. El extremo de arco gratificado proporciona una excelente calidad para el encendido. Se emplea en estructuras con una tensión de resistencia de hasta 70.000 Lb/pulg² y se aplica a calderas, tuberías, tanques a presión, vagones ferroviarios, entre otros.

Figura 39

Características del E-7018



Nota: Seguridad laboral (2019)

Las Tablas 10 y 11 contienen un desglose de la composición química y las propiedades mecánicas del metal de aporte.

Tabla 10*Composición química del E-7018*

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	V
0.15	1.60	0.75	0.035	0.035	0.30	0.30	0.20	0.08

Nota: Eca Electrodos**Tabla 11***Propiedades mecánicas E-7018*

Resistencia a la tracción [MPa(psi)]	Límite elástico (MPa)	Elongación (%)	Impacto a 30°C (J)
490 (70000)	400 (58000)	22	27

Nota: Eca Electrodos**Tabla 12***Composición química de metal depositado (%)*

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0.05	1.00	0.60	Max. 0.020	Max. 0.020	-	-	-	-	-

Nota: Elaboración propia**Tabla 13***Propiedades mecánicas del metal depositado, sin 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)]
520-610 (75400-88450)	Min. 400(58000)	Min. 23	[-30°C(-22°F)] MIN. 70(57)

Nota: Elaboración propia

Figura 40

Electrodo E-7018



Nota: Fotografía propia

5.2.3. Kit de Líquidos Penetrantes

Se trata de insumos consumibles que se utilizan en cada ensayo, tales como el penetrante, el revelador y el limpiador. El kit de líquidos penetrantes que se utilizó para llevar a cabo el ensayo está mostrado en la Figura 41.

Figura 41

Kit de Ensayo Líquidos penetrantes



Nota: Fotografía propia

- **Características:**

- ✓ Marca Cantesco

- ✓ Origen: Canada
- ✓ Presentaciones: 400 ml

Un kit de tintes penetrantes generalmente está compuesto por:

- ✓ Líquido penetrante (material consumible).
- ✓ Removedor/limiador (material consumible).
- ✓ Revelador (material consumible).

5.3. Soldadura de las Probetas

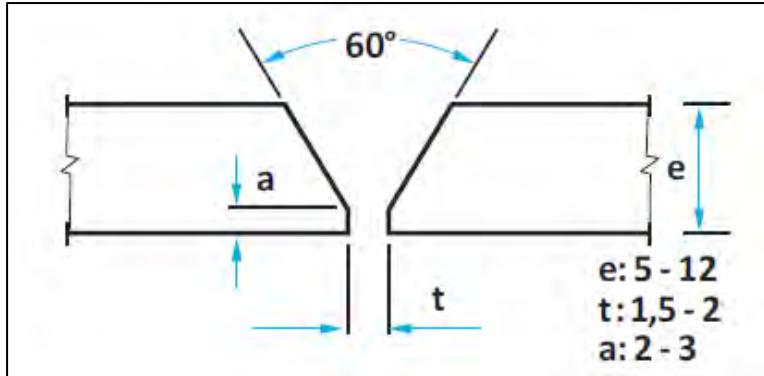
Para llevar a cabo la soldadura de las probetas, que corresponde a la realización de pruebas experimentales, se realizaron antes las siguientes operaciones:

5.3.1. Limpieza de las Probetas

Para asegurar una calidad óptima de la soldadura, es esencial que las probetas no tengan pintura, grasa, óxidos ni ninguna otra clase de contaminantes. Se eliminan estas impurezas a través de procesos químicos y/o mecánicos, asegurando una superficie apropiada para la unión.

5.3.2. Diseño de la Junta

Es imprescindible determinar y crear la geometría de la unión para soldar las probetas, la cual depende directamente del grosor del material base. Se eligió una unión a tope en "V" sencilla porque el grosor del material de las probetas es de $\frac{1}{4}$ " (6.35 mm). La Figura 42 muestra las propiedades de esta junta.

Figura 42*Junta a tope en "V" simple**Nota: Elaboración propia*

Donde:

- a (talón): 1.5 mm
- t (abertura o luz de la raíz): 2 mm
- e (espesor nominal del material base): 6.35 mm

5.3.3. Condiciones de Soldabilidad para las Probeta

Las condiciones de soldabilidad de las probetas se detallan en los WPS que se indica:

Figura 43*WPS Probeta N°1*

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA								
ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) WPS N° 001									
Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco Según Norma: AWS DI.3/2008				WPS No.: 001 PQR de Soporte No.: 001 Fecha: 12/05/2025 Realizado por: Carmen C. Basilio A. Revisado por: Ing. Elías Peña Peña.					
JUNTA UTILIZADA			POSICIÓN DE SOLDADURA						
Tipo de junta:	A Tope		Posición de Soldadura:	1G					
Abertura raíz (e):	2mm (+/- 0,2)		Progresión:						
Talón (c):	2mm (+/- 0,2)								
Angulo de ranura (β):	60°								
Placa de respaldo:	Sí:	No: X							
Cordón de respaldo:	Sí:	No: X	Técnica:	Un pase					
Preparar bisel:	Sí:	No: X							
METAL BASE			PRECALENTAMIENTO						
Especificación:	ASTM A572-50		Temperatura:	N/A					
Espesor (t):	6.35 mm		Temperatura entre pases:	N/A					
METAL DE APORTE			TÉCNICA DE SOLDADURA						
Proceso:	SMAW (eficiencia 75%)		Soldadura de:	RANURA					
Especificación (AWS)	AWS A.5.1		Proceso de soldadura:	SMAW					
Diámetro:	3.175 mm.		Tipo de Soldadura:	Manual					
Denominación AWS:	E 7018		Cordón de respaldo:	Sí:	No: x				
Marca:	Nazca		Pase múltiples o simples (por lado)	Simple					
Velocidad de alimentación (m/min)			Electrodos Múltiples o únicos	Único					
			Cordón Recto u Oscilante	Recto					
			Limpieza: cepillo metálico						
			Primer pase	N/A					
GAS DE PROTECCIÓN			Pases siguientes:	N/A					
Tipo: Caudal:	CO2 (100%) 12~20tt/min		Pase de respaldo:	N/A					
NOTAS									
<ul style="list-style-type: none"> Asegurar limpieza de las partes, Verificar alineación de la junta, La velocidad de enfriamiento después de la soldadura debe ser lenta. 									
DETALLE DE LA JUNTA									
CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN									
Nº DE PASE	Material De Aporte		Corriente		Tensión detrabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/seg)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo de polaridad	Intensidad (amperios)				Oscilado	Recto
1	E 7018	3.175	DCEP	80	24	2.6	Descendente		X

Nota: Elaboración propia

Figura 44*WPS Probeta N°2*

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA								
ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) WPS N° 002									
Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco Según Norma: AWS DI.3/2008			WPS No.: 001 PQR de Soporte No.: 001 Fecha: 12/05/2025 Realizado por: Carmen C. Basilio A. Revisado por: Ing. Elias Peña Peña.						
JUNTA UTILIZADA			POSICIÓN DE SOLDADURA						
Tipo de junta:	A Tope	Abertura raíz (e):	2mm (+/- 0,2)	Posición de Soldadura:	1G				
Talón (c):	2mm (+/- 0,2)	Angulo de ranura (β):	60°	Progresión:					
Placa de respaldo:	sí: No: X	Cordón de respaldo:	sí: No: X	Técnica:	Un pase				
Preparar bisel:	sí: No: X								
METAL BASE			PRECALENTAMIENTO						
Especificación:	ASTM A572-50	Espesor (t):	6.35 mm	Temperatura:	N/A				
				Temperatura entre pases:	N/A				
METAL DE APORTE			TÉCNICA DE SOLDADURA						
Proceso:	SMAW	Especificación (AWS)	AWS A.5.1	Soldadura de:	RANURA				
Diámetro:	3.175 mm.	Denominación AWS:	E 7018	Proceso de soldadura:	SMAW				
Marca:	Nazca			Tipo de Soldadura:	Manual				
Velocidad de alimentación (m/min)				Cordón de respaldo:	Si: No: x				
				Pase múltiples o simples (por lado)	Simple				
				Electrodos Múltiples o únicos	Único				
				Cordón Recto u Oscilante	Recto				
				Limpieza: cepillo metálico					
				Primer pase	N/A				
GAS DE PROTECCIÓN			Pases siguientes:						
Tipo: Caudal:	CO2 (100%) 12~20tt/min			Pase de respaldo:	N/A				
NOTAS									
<ul style="list-style-type: none"> Asegurar limpieza de las partes, Verificar alineación de la junta, La velocidad de enfriamiento después de la soldadura debe ser lenta. 									
DETALLE DE LA JUNTA									
CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN									
Nº DE PASE	Material De Aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/seg)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo de polaridad	Intensidad (amperios)				Oscilado	Recto
1	E 7018	3.175	DCEP	95	25	2.6	Descendente		X

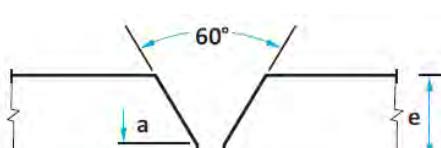
Nota: Elaboración propia

Figura 45*WPS Probeta N°3*

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA									
ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) WPS N° 003										
Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco Según Norma: AWS DI.3/2008			WPS No.: 001 PQR de Soporte No.: 001 Fecha: 12/05/2025 Realizado por: Carmen C. Basilio A. Revisado por: Ing. Elías Peña Peña.							
JUNTA UTILIZADA	POSICIÓN DE SOLDADURA									
Tipo de junta:		A Tope								
Abertura raíz (e):		2mm (+/- 0,2)								
Talón (c):		2mm (+/- 0,2)								
Angulo de ranura (β):		60°								
Placa de respaldo:		Sí: No: X								
Cordón de respaldo:		Sí: No: X								
Preparar bisel:		Sí: No: X								
METAL BASE	PRECALENTAMIENTO									
Especificación:		ASTM A572-50								
Espesor (t):		6.35 mm								
METAL DE APORTE	TÉCNICA DE SOLDADURA									
Proceso:		SMAW								
Especificación (AWS)		AWS A.5.1								
Diámetro:		3.175 mm.								
Denominación AWS:		E 7018								
Marca:		Nazca								
Velocidad de alimentación (m/min)										
		Electrodos Múltiples o únicos								
		Único								
		Cordón Recto u Oscilante								
		Recto								
		Limpieza: cepillo metálico								
		Primer pase								
		N/A								
GAS DE PROTECCIÓN	PASES SIGUIENTES:									
Tipo: Caudal:		CO2 (100%) 12~20tt/min								
NOTAS										
<ul style="list-style-type: none"> Asegurar limpieza de las partes, Verificar alineación de la junta, La velocidad de enfriamiento después de la soldadura debe ser lenta. 										
DETALLE DE LA JUNTA										
CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN										
Nº DE PASE	Material De Aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/seg)	Progresión	Técnica de soldadura		
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo de polaridad	Intensidad (amperios)				Oscilado	Recto	
1	E 7018	3.175	DCEP	110	25	2.8	Descendente		X	

Nota: Elaboración propia

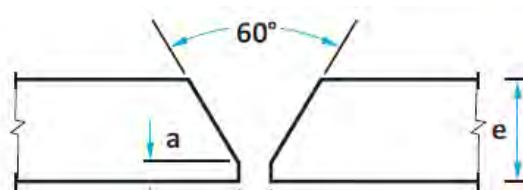
Figura 46*WPS Probeta N°4*

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA								
ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) WPS N° 004									
Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco Según Norma: AWS DI.3/2008			WPS No.: 001 PQR de Soporte No.: 001 Fecha: 12/05/2025 Realizado por: Carmen C. Basilio A. Revisado por: Ing. Elías Peña Peña.						
JUNTA UTILIZADA			POSICIÓN DE SOLDADURA						
Tipo de junta:	A Tope		Posición de Soldadura:	1G					
Abertura raíz (e):	2mm (+/- 0,2)		Progresión:						
Talón (c):	2mm (+/- 0,2)								
Angulo de ranura (β):	60°								
Placa de respaldo:	Sí: No: X		Técnica:	Un pase					
Cordón de respaldo:	Sí: No: X								
Preparar bisel:	Sí: No: X								
METAL BASE			PRECALENTAMIENTO						
Especificación:	ASTM A572-50		Temperatura:	N/A					
Espesor (t):	6.35 mm		Temperatura entre pases:	N/A					
METAL DE APORTE			TÉCNICA DE SOLDADURA						
Proceso:	SMAW		Soldadura de:	RANURA					
			Proceso de soldadura:	SMAW					
Especificación (AWS)	AWS A.5.1		Tipo de Soldadura:	Manual					
Diámetro:	3.175 mm.		Cordón de respaldo:	Si: No: x					
Denominación AWS:	E 70718		Pase múltiples o simples (por lado)	Simple					
Marca:	Nazca		Electrodos Múltiples o únicos	Único					
Velocidad de alimentación (m/min)			Cordón Recto u Oscilante	Recto					
			Limpieza: cepillo metálico						
			Primer pase	N/A					
GAS DE PROTECCIÓN			Pases siguientes:	N/A					
Tipo: Caudal:	CO2 (100%) 12~20tt/min		Pase de respaldo:	N/A					
NOTAS									
<ul style="list-style-type: none"> Asegurar limpieza de las partes, Verificar alineación de la junta, La velocidad de enfriamiento después de la soldadura debe ser lenta. 									
DETALLE DE LA JUNTA									
									
CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN									
Nº DE PASE	Material De Aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/seg)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo de polaridad	Intensidad (amperios)				Oscilado	Recto
1	E 7018	3.175	DCEP	125	27	2.8	Descendente		X

Nota: Elaboración propia

Figura 47

WPS Probeta N°5

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA								
ESPECIFICACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) WPS N° 001									
Institución: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco Según Norma: AWS DI.3/2008				WPS No.: 001 PQR de Soporte No.: 001 Fecha: 12/05/2025 Realizado por: Carmen C. Basilio A. Revisado por: Ing. Elias Peña Peña.					
JUNTA UTILIZADA				POSICIÓN DE SOLDADURA					
Tipo de junta:	A Tope		Posición de Soldadura:		1G				
Abertura raíz (e):	2mm (+/- 0,2)		Progresión:						
Talón (c):	2mm (+/- 0,2)		Técnica:		Un pase				
Angulo de ranura (β):	60°		PRECALENTAMIENTO						
Placa de respaldo:	SÍ: No: X		Temperatura:	N/A					
Cordón de respaldo:	SÍ: No: X		Temperatura entre pases:	N/A					
Preparar bisel:	SÍ: No: X		TÉCNICA DE SOLDADURA						
METAL BASE				Soldadura de:	RANURA				
Especificación:	ASTM A572-50		Proceso de soldadura:		SMAW				
Espesor (t):	6.35 mm		Tipo de Soldadura:		Manual				
METAL DE APORTE				Cordón de respaldo:	Si: No: X				
Proceso:	SMAW		Pase múltiples o simples (por lado)		Simple				
Especificación (AWS)	AWS A.5.1		Electrodos Múltiples o únicos		Único				
Diámetro:	3.175 mm.		Cordón Recto u Oscilante		Recto				
Denominación AWS:	E 7018		Limpieza: cepillo metálico						
Marca:	Nazca		Primer pase		N/A				
Velocidad de alimentación (m/min)			Pases siguientes:		N/A				
			Pase de respaldo:		N/A				
NOTAS									
<ul style="list-style-type: none"> Asegurar limpieza de las partes, Verificar alineación de la junta, La velocidad de enfriamiento después de la soldadura debe ser lenta. 									
DETALLE DE LA JUNTA									
									
CUADRO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN									
Nº DE PASE	Material De Aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De Avance (mm/seg)	Progresión	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo de polaridad	Intensidad (amperios)				Oscilado	Recto
1	E 7018	3.175	DCEP	140	27	2.8	Descendente		X

Nota: Elaboración propia

Tabla14

Parámetros de soldadura

Nº de Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Velocidad de desplazamiento (mm/s)	Material de aporte	Eficiencia térmica del proceso (%)
1	80	24	2.60	E7018	75
2	95	25	2.60	E7018	75
3	110	25	2.80	E7018	75
4	125	27	2.80	E7018	75
5	140	27	2.80	E7018	75

Nota: Elaboración propia

Las probetas listas para el proceso de soldadura se muestran en la Figura 48, en la 49 está el desarrollo del proceso de soldadura, y en la 50 se muestra las probetas totalmente soldadas.

Figura 48

Alineamiento de las probetas para su soldabilidad



Nota: Fotografía propia

Figura 49*Soldadura de las probetas**Nota: Fotografía propia***Figura 50***Probetas soldadas**Nota: Fotografía propia*

5.4. Cálculos Realizados

A partir de la soldadura de las probetas, se efectuaron los cálculos necesarios para obtener la información requerida en la evaluación de la soldabilidad, los cuales se detallan a continuación:

5.4.1. Cálculo del Calor Neto o Energía Neta Transferida a la Pieza

La Ecuación 1, que se encuentra en el Marco Teórico (Capítulo II) de la investigación actual, es utilizada para calcular el calor neto. En este marco, se determina el parámetro f , que está

relacionado con la eficacia del proceso de soldadura. Este se calcula por separado para cada una de las probetas analizadas, f (eficiencia): Para el trabajo de investigación se ha 75%, en promedio.

Probeta N° 1

$$H_{net} = \frac{24 \times 80}{2.60} \times 0.75 = 554.0 \text{ J/mm}$$

Probeta N° 2

$$H_{net} = \frac{25 \times 95}{2.60} \times 0.75 = 685.0 \text{ J/mm}$$

Probeta N° 3

$$H_{net} = \frac{25 \times 110}{2.80} \times 0.75 = 737.0 \text{ J/mm}$$

Probeta N° 4

$$H_{net} = \frac{27 \times 125}{2.80} \times 0.75 = 904.0 \text{ J/mm}$$

Probeta N° 5

$$H_{net} = \frac{27 \times 140}{2.80} \times 0.75 = 1013.0 \text{ J/mm}$$

En la tabla 15 se observa el resumen del cálculo de calor neto aportado.

Tabla15

Valores de calor neto aportado

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Velocidad de desplazamiento (mm/s)	Eficiencia térmica del proceso (%)	Calor neto(J/mm)
1	80	24	2.60	75	554.0
2	95	25	2.60	75	685.0
3	110	25	2.80	75	737.0
4	125	27	2.80	75	904.0
5	140	27	2.80	75	1013.0

Nota: Elaboración propia

5.4.2. Cálculo del Ancho de la Zona Afectada Térmicamente (ZAC)

Con el fin de calcular el valor del ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) de cada probeta, se emplea la Ecuación 3, que permite establecer los efectos del calor generado por la fuente de poder.

Los valores establecidos son:

$$T_{\text{fusion}}: 1480 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{max}}: 723 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_0: 16 \text{ }^{\circ}\text{C} (\text{temperatura ambiente})$$

$$\rho: 7.85 \text{ g/cm}^3 = 0.00785 \text{ g/mm}^3$$

$$C: 0.134 \text{ cal/g }^{\circ}\text{C} (C = 0.561 \text{ J/g }^{\circ}\text{C})$$

$$\rho C: \rho \times C = 0.00785 \times 0.561 = \mathbf{0.0044} \text{ J/mm}^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t: 6.35 \text{ mm}$$

A continuación, se desarrolla los cálculos para cada una de las probetas.

Probeta N° 1:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 16} \right) - \left(\frac{1}{1480 - 16} \right) \right] x \left[\frac{554}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 3.51 \text{ mm}$$

Probeta N° 2:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 16} \right) - \left(\frac{1}{1480 - 16} \right) \right] x \left[\frac{685.0}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 4.34 \text{ mm}$$

Probeta N° 3:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 16} \right) - \left(\frac{1}{1480 - 16} \right) \right] x \left[\frac{737.0}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 4.67 \text{ mm}$$

Probeta N° 4

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 16} \right) - \left(\frac{1}{1480 - 16} \right) \right] x \left[\frac{904.0}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 5.73 \text{ mm}$$

Probeta N° 5

$$Y = \left[\left(\frac{1}{723 - 16} \right) - \left(\frac{1}{1480 - 16} \right) \right] x \left[\frac{1013.0}{4.13 \times 0.0044 \times 6.35} \right] = 6.4 \text{ mm}$$

En la Tabla 16 se resume los cálculos de ancho de la ZAC.

Tabla16

Parámetros para el cálculo del ancho de la zona afectada por el calor (ZAC)

Probeta	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Velocidad de desplazamiento (mm/s)	H _{net} (J/mm)	Ancho de la ZAC (mm)
1	80	18.5	2.66	862.78	3.51
2	95	18.75	2.66	925.16	4.34
3	110	19.00	2.66	964.28	4.67
4	125	19.25	2.66	1004.11	5.73
5	140	19.5	2.66	1044.64	6.4

Nota: Elaboración propia

5.4.3. Cálculo de La Velocidad de Enfriamiento

Para calcular la velocidad de enfriamiento, primero se debe determinar si el material que se está analizando es una plancha delgada o gruesa. Para ello, se utiliza la Ecuación 6 y se hace uso de los valores representativos del acero que se emplea en las probetas. Se obtiene el resultado que se muestra a continuación al sustituir estos valores en la ecuación:

$$r = 6.35 \sqrt{\frac{0.0044(550-16)}{737}} = 0.358$$

El resultado obtenido fue $r = 0.358$, valor característico de una plancha delgada. Con este parámetro, se procedió a calcular la velocidad de enfriamiento de cada una de las probetas empleadas, aplicando la Ecuación 5.

Probeta N° 1:

$$R = 2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times \left[\frac{6.35}{554} \right]^2 \times (550 - 16)^3 = 15.12 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

Probeta N° 2:

$$R = 2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times \left[\frac{6.35}{685} \right]^2 \times (550 - 16)^3 = 10.1 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

Probeta N° 3:

$$R = 2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times \left[\frac{6.35}{737} \right]^2 \times (550 - 16)^3 = 8.75 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

Probeta N° 4:

$$R = 2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times \left[\frac{6.35}{904} \right]^2 \times (550 - 16)^3 = 5.81 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

Probeta N° 5:

$$R = 2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times \left[\frac{6.35}{1013} \right]^2 \times (550 - 16)^3 = 4.63 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

La tabla 17 resume de los valores establecidos para la velocidad de enfriamiento.

Tabla 17

Valores de velocidad de enfriamiento.

Probeta N°	Velocidad de enfriamiento (°C/s)
1	15.12
2	10.10
3	8.75
4	5.81
5	4.63

Nota: Elaboración propia

5.4.4. Tiempo de Solidificación

Durante el proceso de soldadura, la rapidez con la que se solidifica el metal fundido condiciona el tiempo que tarda en enfriarse, lo cual tiene un impacto directo en su microestructura y, por ende, en sus propiedades mecánicas. Este período de solidificación se basa en la contribución neta de calor. Tomando en cuenta que el calor de fusión del acero es de 2 J/mm³, se computaron los tiempos de solidificación para cada probeta y se obtuvieron las cifras siguientes:

$$\text{Probeta 1 : St} = \frac{2 \times 554}{2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times (1480 - 16)^2} = 0.67 \text{ s}$$

$$\text{Probeta 2 : St} = \frac{2 \times 685}{2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times (1480 - 16)^2} = 0.83 \text{ s}$$

$$\text{Probeta 3 : St} = \frac{2 \times 737}{2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times (1480 - 16)^2} = 0.88 \text{ s}$$

$$\text{Probeta 4 : St} = \frac{2 \times 904}{2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times (1480 - 16)^2} = 1.10 \text{ s}$$

$$\text{Probeta 5 : St} = \frac{2 \times 1013}{2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times (1480 - 16)^2} = 1.22 \text{ s}$$

En la tabla 18, se resumen los resultados del cálculo de tiempo de solidificación.

Tabla 18

Tiempo de solidificación (s)

Probeta	Tiempo de solidificación (s)
1	0.67
2	0.83
3	0.88
4	1.10
5	1.22

Nota: Elaboración propia

5.5. Control de Calidad de las Uniones Soldadas

5.5.1. *Ensayos no Destructivos*

5.5.1.1. *Inspección Visual de las Uniones Soldadas de las Probetas.*

El método de ensayo no destructivo, preliminar y de aplicación directa es el ensayo de inspección visual. Gracias a que este método es visualmente accesible, se pueden identificar discontinuidades que impactan la superficie de las probetas soldadas.

Se mantuvo un control antes y después de la soldadura de las probetas a lo largo del proceso. Las uniones soldadas fueron verificadas visualmente en el marco del control de calidad, con el fin de comprobar si se había aplicado y ejecutado correctamente el procedimiento de soldadura. Se constató que la superficie tenía cordones homogéneos y de buena presentación, además de que el depósito del cordón era uniforme y su grosor en la cara y raíz de la junta.

La tabla 19 resume los hallazgos de la inspección visual.

Tabla 19

Resultados de la inspección visual

Probeta	Resultado final del control
1	No aceptada
2	Aceptada
3	Aceptada
4	Aceptada
5	No Aceptada

Nota: elaboración propia

5.5.1.2. *Inspección por Tintes Penetrantes.*

Este ensayo sigue los siguientes pasos:

a) Preparación y Limpieza Previa de la Superficie a Ensayar

Antes de aplicar el líquido penetrante, se limpió la superficie con thinner para eliminar cualquier impureza o residuo que pudiera perjudicar el proceso de penetración.

b) Aplicación del Líquido Penetrante

Antes de comenzar la limpieza, es necesario que la superficie de la soldadura esté totalmente seca. Después de que la superficie se ha secado y limpiado de impurezas, se aplica el líquido penetrante. Con este objetivo, la probeta es sumergida en un baño de líquido penetrante por un periodo de 30 minutos. Esta operación se presenta en la Figura 51.

Figura 51

Probeta cubierta con el líquido penetrante



Nota: Fotografía propia

c) Eliminación del Exceso de Líquido Penetrante de la Superficie de la Probeta de Ensayo

Después de que el líquido penetrante ha sido aplicado y ha pasado el tiempo de penetración, se procede a eliminar el sobrante del producto, garantizando así que no se produzcan indicios falsos. Sin embargo, se evita quitar el líquido penetrante que haya entrado en los eventuales defectos. La figura 52 ilustra este procedimiento.

Figura 52

Eliminación con un paño del exceso de penetrante



Nota: Fotografía propia

d) Aplicación del Revelador

El revelador se aplica mediante pulverización, colocando el spray a una distancia de entre 15 y 30 cm. Previamente, se debe agitar el envase para homogenizar su contenido y garantizar la formación de una capa fina y uniforme sobre la unión soldada de la probeta. El tiempo de revelado es de 15 minutos. La figura 53 ilustra la probeta recubierta con el revelador.

Figura 53

Probeta cubierta con el revelador



Nota: Fotografía propia

e) Indicaciones para el Uso del Revelador

Es necesario que el revelador se mantenga en la superficie de la muestra a fin de posibilitar que el penetrante emerja y pueda identificarse cualquier tipo de fallo superficial. Si se requieren detectar fallas muy estrechas, el tiempo de permanencia puede aumentar considerablemente; en condiciones normales es de 15 minutos.

f) Inspección y Evaluación

Después de que el tiempo calculado para la revelación haya terminado, se lleva a cabo la inspección, que debe hacerse dentro de los 30 minutos siguientes a la aplicación del revelador.

g) Limpieza Final

Después de que se efectuó la prueba con líquidos penetrantes, se llevó a cabo el último paso: una limpieza detallada para eliminar todo el revelador que había sido aplicado en la superficie de las piezas consideradas aceptables. Las discontinuidades que se han detectado en las probetas se muestran en la tabla 20.

Tabla 20

Defectos observados en el examen por tintes penetrantes

Probeta	Defecto	Causa
1	Falta de fusión	Intensidad de corriente baja
2	No presenta	Ninguna
3	No presenta	Ninguna
4	No presenta	Ninguna
5	No presenta	Socavaduras

Nota: Elaboración propia

5.5.2. Ensayos Destructivos

5.5.2.1. *Ensayo de Prueba de Doblez.*

Las probetas que fueron investigadas en este estudio se sometieron a ensayos de doblez, tanto de raíz como de cara. Los ensayos mencionados implican doblar la probeta a 180° mediante matrices estandarizadas (ver figura 54). Esta clase de prueba, que es cualitativa, posibilita una evaluación simple de la calidad de la soldadura por medio de su resistencia a las grietas o cualquier otra anomalía superficial que pueda ocurrir durante el procedimiento de doblado.

Figura 54

Ensayo de doblez



Nota: Fotografía propia

En los PQR se presentan de manera detallada los resultados obtenidos en la prueba de doblez.

Figura 55

PQR Probeta N°2

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.									
	ENSAYO DE DOBLEZ						PQR-2			
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR										
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje (A)	0	Voltaje (V)	5	Vel. de soldeo (mm/seg)	2.60			
Tipo de estudio:	De laboratorio			Identificación de la probeta:			02			
Norma aplicable:	ASTM E18			Fecha de elaboración:			12/05/2025			
Realizado por:	Carmen C. Basilio Avendaño			Asesor de tesis:	Ing. Mg. Elías T. Peña Peña					
Centro de estudio y análisis:	Taller de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.									
Responsable del taller	Ing. Leonardo Avilés Hinojosa									
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:	200 mm							
Material de aporte	E-7018	Metal base			ASTM A572-50					
RESULTADO										
Probeta	Lado de la prueba				Observación					
2	Cara				Cumple					
	Raiz				Cumple					

Nota: Elaboración propia

Figura 56*PQR Probeta N°3*

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.											
ENSAYO DE DOBLEZ						PQR-3						
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR												
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje (A)	0	Voltaje (V)	5	Vel. de soldeo (mm/seg)	2.80					
Tipo de estudio:	De laboratorio			Identificación de la probeta:			02					
Norma aplicable:	ASTM E18			Fecha de elaboración:			12/05/2025					
Realizado por:	Carmen C. Basilio Avendaño		Asesor de tesis:		Ing. Mg. Elías T. Peña Peña							
Centro de estudio y análisis:	Taller de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.											
Responsable del taller	Ing. Leonardo Avilés Hinojosa											
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm							
Material de aporte	E-7018	Metal base			ASTM A572-50							
RESULTADO												
Probeta	Lado de la prueba				Observación							
3	Cara				Cumple							
	Raiz				Cumple							

Nota: Elaboración propia

Figura 57*PQR Probeta N°4*

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.											
ENSAYO DE DOBLEZ						PQR-4						
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR												
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje (A)	0	Voltaje (V)	5	Vel. de soldeo (mm/seg)	2.80					
Tipo de estudio:	De laboratorio			Identificación de la probeta:			02					
Norma aplicable:	ASTM E18			Fecha de elaboración:			12/05/2025					
Realizado por:	Carmen C. Basilio Avendaño		Asesor de tesis:		Ing. Mg. Elías T. Peña Peña							
Centro de estudio y análisis:	Taller de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.											
Responsable del taller	Ing. Leonardo Avilés Hinojosa											
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm							
Material de aporte	E-7018	Metal base			ASTM A572-50							
RESULTADO												
Probeta	Lado de la prueba				Observación							
4	Cara				Cumple							
	Raiz				Cumple							

Nota: Elaboración propia

Figura 58*PQR Probeta N°5*

	FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.											
ENSAYO DE DOBLEZ						PQR-5						
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR												
Proceso de soldado	SMAW	Amperaje (A)	0	Voltaje (V)	5	Vel. de soldeo (mm/seg)	2.80					
Tipo de estudio:	De laboratorio			Identificación de la probeta:			02					
Norma aplicable:	ASTM E18			Fecha de elaboración:			12/05/2025					
Realizado por:	Carmen C. Basilio Avendaño		Asesor de tesis:		Ing. Mg. Elías T. Peña Peña							
Centro de estudio y análisis:	Taller de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.											
Responsable del taller	Ing. Leonardo Avilés Hinojosa											
Espesor de la probeta:	6.35 mm	Longitud de la probeta:			200 mm							
Material de aporte	E-7018	Metal base			ASTM A572-50							
RESULTADO												
Probeta	Lado de la prueba				Observación							
5	Cara				No Cumple							
	Raiz				No Cumple							

Nota: Elaboración propia

Los resultados del ensayo de doblez se sintetizan en la tabla 21.

Tabla 21

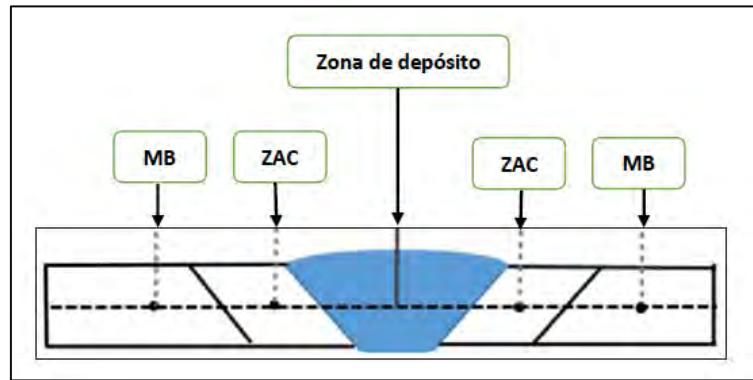
Resultados de doblez

Probeta	Posición	
	Resultado de cara	Resultado de raíz
2	Cumple	Cumple
3	Cumple	Cumple
4	Cumple	Cumple
5	No cumple	No cumple

Nota: Elaboración propia

5.5.2.2. *Ensayo de Prueba de Dureza.*

Se establecieron puntos en el metal base (MB), la zona de depósito (DP) y la zona afectada por el calor (ZAC) para medir la dureza, y se dibujó una línea central horizontal en la probeta, como se ilustra en la Figura 59.

Figura 59*Puntos donde se tomó la dureza**Nota:* Elaboración propia

MB : Metal base,

ZAC = Zona afectada por el calor.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 22 .

Tabla22*Dureza de la probeta (HB)*

Probeta	MB	ZAC (lado izquierdo)	Zona de depósito	ZAC (lado derecho)	MB
2	130	132	135	133	130
3	130	135	140	135	130
4	131	140	147	140	131
5	131	152	160	153	131
Promedio	131	140	146	140	131

Nota: Elaboración propia

CAPÍTULO VI

ANALISIS DE RESULTADOS

6.1. Calor Neto Aportado y Ancho de la ZAC

Según la experimentación, podemos afirmar que la intensidad de corriente tiene un gran impacto en el calor suministrado para fundir el metal base y el consumible, así como también en el ancho de la ZAC. La contribución de calor y el ancho de la ZAC aumentarán a medida que los valores de intensidad de corriente sean más altos. De esta manera, la probeta 5 tiene un ancho que excede en un 82 % al de la ZAC de la probeta 1, en un 63 % al de la probeta 4, en un 33 % al de la probeta 3 y en un 27 % al de la probeta 2. También se puede afirmar que la ZAC ha crecido. La tabla 23 presenta los resultados del ancho de la ZAC y el calor suministrado.

Tabla 23

Resultado de cálculo de calor neto aportado y ancho de la ZAC

Probeta	Intensidad de corriente (A)	H _{net} (J/mm)	Ancho de la ZAC (mm)
1	80	862.78	3.51
2	95	925.16	4.34
3	110	964.28	4.67
4	125	1004.11	5.73
5	140	1044.64	6.4

Nota: Elaboración propia

6.2. Inspección Visual

La inspección visual de las juntas soldadas reveló que no hay señales significativas en las probetas 2, 3 y 4 (consulte la tabla 24) que puedan perjudicar la calidad y las propiedades de las soldaduras.

Tabla 24

Resultados de la prueba de inspección visual

Probeta	Defecto	Causa	Criterio de evaluación
1	Falta de fusión	Intensidad de corriente baja	No aceptada
2	No presenta	Ninguna	Aceptada
3	No presenta	Ninguna	Aceptada
4	No presenta	Ninguna	Aceptada
5	No presenta	Socavaduras	No Aceptada

Nota: Elaboración propia

6.3. Inspección por Tintes Penetrantes

Del examen realizado por líquidos penetrantes, se ha verificado que las probetas 2, 3, 4 y 5, no presenta grietas. (ver tabla 25)

Tabla 25

Resultados del examen de tintes penetrantes.

Probeta	Observación	Defecto
1	Presenta discontinuidad	Falta de fusión
2	No presenta discontinuidad	Ninguno
3	No presenta discontinuidad	Ninguno
4	No presenta discontinuidad	Ninguno
5	No presenta discontinuidad.	Ninguno

Nota: Elaboración propia

Los ensayos de líquidos penetrantes revelan que únicamente la probeta 1 mostró una discontinuidad superficial de tipo falta de fusión, mientras que las probetas 2, 3, 4 y 5 no evidenciaron indicios significativos. Esto indica una alta calidad superficial en las soldaduras en la mayor parte de los casos.

La escasa fusión que se encontró en la probeta 1 puede explicarse por el escaso amperaje (80 A) de la corriente empleada en la soldadura, ya que esta no entregó suficiente energía para conseguir una fusión total entre el metal base y el material de aporte. Por otro lado, las corrientes superiores contribuyeron a una mejor penetración y coalescencia, suprimiendo este tipo de defecto.

En general, los hallazgos muestran que incrementar con control la intensidad de corriente mejora la calidad de la superficie y la integridad de las uniones soldadas, disminuyendo el surgimiento de discontinuidades debido a una fusión deficiente.

6.4. Prueba de Doblez

Las probetas soldadas con intensidades de corriente que oscilan entre 80 A y 125 A mostraron un buen desempeño mecánico según los resultados de las pruebas de doblado. Esto se comprobó al cumplir satisfactoriamente tanto en la prueba de raíz como en la prueba de cara, lo que sugiere una fusión apropiada, ductilidad adecuada y falta de discontinuidades internas o externas relevantes en las uniones soldadas.

Sin embargo, la probeta 5, correspondiente a la mayor intensidad de corriente (140 A), no cumplió en ninguna de las posiciones. Esto sugiere que el exceso de energía de soldadura generó sobrecalentamiento y mayor dilución, lo que pudo provocar microfisuras, tensiones residuales elevadas o formación de estructuras frágiles (como martensita dura y quebradiza) tanto en la ZAC como en el depósito.

6.5. Prueba de Dureza

Los valores de dureza se muestran en la tabla 20 se muestran los valores obtenidos en las probetas. La dureza medida en las diferentes áreas de las probetas muestra un aumento a medida que se incrementa la intensidad de corriente durante el proceso de soldadura SMAW.

En las condiciones experimentales, la dureza promedio del metal base (MB) se mantiene prácticamente constante (≈ 131 HB), lo cual indica que el efecto térmico del proceso no modificó significativamente la microestructura del material base fuera de la ZAC.

En contraste, tanto la zona afectada por el calor (ZAC) como la zona de depósito muestran un incremento progresivo de dureza conforme aumenta la intensidad de corriente:

- En la ZAC, la dureza pasa de 132 HB (probeta 2) a 152 HB (probeta 5).
- En la zona de depósito, el valor aumenta de 135 HB (probeta 2) a 160 HB (probeta 5).

Este comportamiento está directamente relacionado con un aumento de la dilución entre el metal base y el material de aporte, así como con una mayor cantidad de calor neto proporcionado por la soldadura (H_{net}). A medida que la corriente aumenta, el baño fundido es más extenso y alcanza temperaturas más elevadas, promoviendo una mezcla más completa entre ambos materiales y generando una microestructura con mayor contenido de fases endurecidas (como martensita o carburos complejos) en la zona fundida y la ZAC.

Por otro lado, el mayor ancho de la ZAC observado (de 3.51 mm a 6.40 mm) sugiere un aumento en la extensión térmicamente afectada, lo que produce zonas de transformación parcial y refinamiento o endurecimiento localizado. Este efecto es consistente con la mayor dureza medida, especialmente en las probetas soldadas con corrientes de 125 A y 140 A.

6.6. Datos Experimentales

Esta sección presenta los datos experimentales obtenidos en las distintas corridas de soldadura, organizados en tablas que recogen los valores de intensidad de corriente, parámetros de proceso y variables de respuesta medidas. Su función es proporcionar la base cuantitativa sobre la cual se desarrollan posteriormente los análisis estadísticos, las regresiones y la discusión de resultados.

6.6.1. Contexto Teórico

La soldabilidad del acero puede definirse como su capacidad de ser soldado bajo condiciones específicas de manera que se obtenga una junta que cumpla con los requisitos funcionales y de integridad estructural establecidos por normas técnicas y criterios de diseño (Afzal, 2024). En procesos SMAW, la intensidad de corriente (expresada en amperios) determina de manera directa el aporte térmico (heat input), el cual regula el equilibrio entre penetración, geometría del cordón, ciclos térmicos y transformaciones microestructurales en la zona afectada por el calor (Gangwar & Kumar, 2023).

Gangwar y Kumar (2023) subrayan que la selección adecuada de la intensidad de corriente constituye un factor crítico para garantizar la soldabilidad del acero ASTM A572-50 mediante SMAW, especialmente en relación con la integridad de la ZAC. De manera análoga, Ukanibo y Okoro (2023) demuestran que la relación entre corriente de soldadura y parámetros térmicos puede ser modelada mediante ecuaciones polinomiales, permitiendo optimización sistemática de parámetros.

6.6.2. Descripción de Variables y Datos Experimentales

Tabla 26

Descripción de variables experimentales

Variable	n	Rango observado	Unidad
Intensidad de corriente	5	80 - 140	Amperios (A)
Velocidad de enfriamiento	5	4.63 - 15.12	°C/s
Ancho de ZAC	5	3.51 - 6.40	mm
Dureza	5	132 - 160	HB (Dureza Brinell)

Nota: Elaboración propia

Tabla 27

Valores de las variables experimentales

n	Intensidad de corriente	Velocidad de enfriamiento	Ancho de ZAC	Dureza
1	80	15.12	3.51	132
2	95	10.1	4.34	135
3	110	8.75	4.67	140
4	125	5.81	5.73	147
5	140	4.63	6.4	160

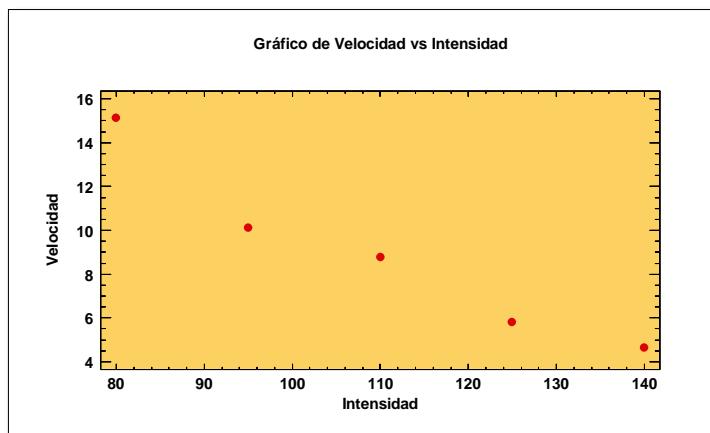
Nota: Elaboración propia

El conjunto de datos experimental comprende cinco niveles de intensidad de corriente eléctrica (80, 95, 110, 125 y 140 A), seleccionados en incrementos de 15 A para capturar de manera uniforme la variabilidad en el rango de interés. Para cada nivel de intensidad, se registraron tres variables de respuesta de naturaleza física y mecánica (Ver tablas 26 y 27).

Velocidad de Enfriamiento:

Figura 60

Dispersión de valores de la Velocidad vs Intensidad



Nota: Minitab 19

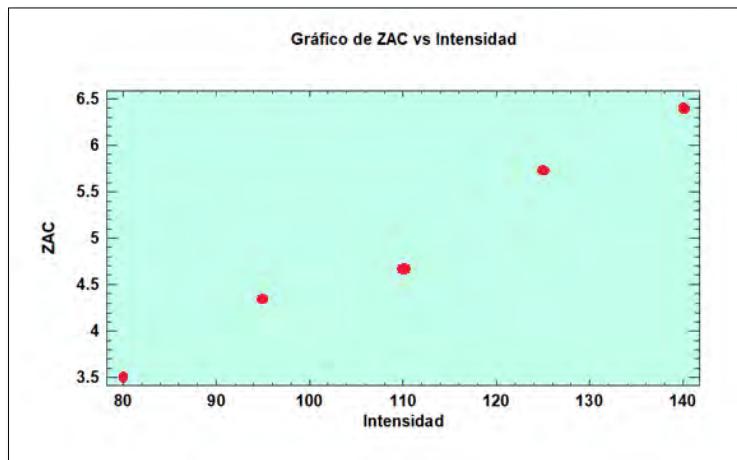
Disminuye monótonamente de 15.12 a 4.63 °C/s, reflejando un aumento progresivo del calor neto y prolongación de los ciclos térmicos (ver Figura 60), conforme con la física de transferencia de calor en soldadura (Afzal, 2024).

Ancho de la ZAC

En la Figura 61, se observa el incremento de 3.51 a 6.40 mm, evidenciando que mayores aportes térmicos expanden la región de material afectado por transformaciones microestructurales (Gangwar & Kumar, 2023).

Figura 61

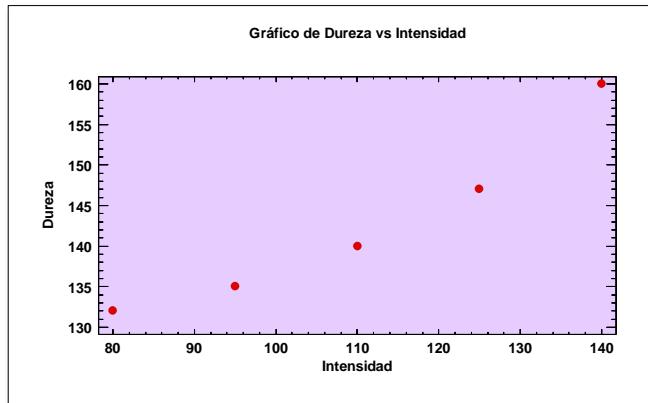
Dispersión de valores de la velocidad vs intensidad



Nota: Minitab 19

Dureza Brinell

Aumenta de 132 a 160 unidades, como se observa en la Figura 3 e indica cambios en la microestructura de la junta y la ZAC compatibles con ciclos térmicos más severos y tasas de enfriamiento controladas (Díaz Ávila et al., 2023).

Figura 62*Dispersión de valores de la velocidad vs intensidad**Nota:* Minitab 19

Estos patrones, que revelan relaciones claramente no lineales entre variables, justifican la aplicación de modelos polinomiales de segundo orden como metodología de análisis (Roustaei & Ghaderi, 2024).

6.7. Diseño Experimental y Verificación de Supuestos

6.7.1. Diseño Completamente al Azar con un Factor

El experimento se estructuró bajo un diseño completamente al azar de un solo factor, en el que la intensidad de corriente (I) se fijó en siete niveles discretos: 80, 95, 110, 125 y 140 A. Para cada nivel se soldaron, prepararon y se ensayó una probeta independiente, lo que produjo un tamaño muestral total $N = 5$ observaciones por cada una de las variables dependientes: velocidad de enfriamiento (V_{enf}), ancho de ZAC (W_{ZAC}) y dureza en ZAC (HB_{ZAC}). Este número mínimo de probetas es recomendado por Afzal et al. (2024) y por Saputro et al. (2024) para asegurar poder estadístico adecuado en ANOVA de procesos de soldadura de aceros HSLA.

Las corridas experimentales se realizaron en orden aleatorio para evitar efectos de tendencia, variaciones térmicas ambientales o sesgos asociados al operador. La configuración de soldadura (tipo de electrodo, diámetro, espesor de placa, posición, preparación de junta, voltaje y

velocidad de soldeo) se mantuvo constante para todas las probetas, de modo que las diferencias observadas pudieran atribuirse principalmente a la variación controlada de la intensidad, en línea con la metodología seguida en investigaciones sobre la soldabilidad del acero ASTM A572 (Gangwar & Kumar, 2023).

6.7.2. Verificación del Análisis Cuantitativo

Se consideró apropiado aplicar ANOVA de una vía para cada variable de respuesta, con un nivel de significancia de 5 %, complementando el análisis con modelos de regresión y correlación para cuantificar la magnitud e intensidad de las relaciones entre la corriente y las respuestas evaluadas. Este enfoque integra el análisis clásico de varianza con técnicas de modelado predictivo, tal como sugieren los trabajos de optimización de parámetros de soldadura en aceros ASTM A572 (Afzal et al., 2024; Gangwar & Kumar, 2023).

Para el procesamiento y análisis estadístico de los datos experimentales se empleó el software Statgraphics Centurion 19, versión 19.7.01, el cual permitió calcular de manera eficiente las medidas descriptivas, las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, así como los modelos de regresión y los análisis de varianza (ANOVA) presentados en este estudio.

6.8. Análisis Cuantitativo: Regresiones Polinomiales

El presente apartado desarrolla un análisis cuantitativo basado en modelos de regresión polinomial que permiten describir con mayor precisión la relación entre la intensidad de corriente y las variables de respuesta del proceso de soldadura. A diferencia de los modelos lineales simples, las regresiones polinomiales capturan posibles curvaturas en el comportamiento de la velocidad de enfriamiento, el ancho de la ZAC y la dureza, aportando herramientas predictivas más flexibles para el diseño y la optimización de los parámetros de soldeo.

6.8.1. Velocidad de Enfriamiento Versus Intensidad de Corriente

El modelo polinomial de segundo orden ajustado para la velocidad de enfriamiento (variable dependiente V) en función de la intensidad de corriente (variable independiente I) es:

$$V = 49.9367 - 0.5938 \cdot I + 0.00193333 \cdot I^2$$

Análisis de Bondad de Ajuste:

Desde el punto de vista físico, la forma cuadrática indica una disminución acelerada de la velocidad de enfriamiento a medida que aumenta la intensidad, coherente con el incremento del aporte térmico. Esta tendencia se alinea con los ciclos térmicos característicos de aceros estructurales (Ukanibo & Okoro, 2023; Roustaei & Ghaderi, 2024).

Tabla 28

Coeficientes del modelo de regresión: Enfriamiento versus intensidad de corriente

Parámetro	Estimado	Error	Estadístico	
		Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	49.9367	11.8449	4.2159	0.0519
Intensidad	-0.5938	0.221208	-2.68435	0.1153
Intensidad ²	0.00193333	0.00100223	1.92902	0.1935

Nota: Elaboración propia

- R-cuadrada = 97.904 porcento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.8079 porcento
- Error estándar del est. = 0.843754
- Error absoluto medio = 0.4208
- Estadístico Durbin-Watson = 3.32253 (P=0.7342)
- Autocorrelación de residuos lag 1 = -0.697514

El análisis de varianza (ANOVA) indica que el modelo global es estadísticamente significativo con $F=46.71$ y $p=0.021<0.05$ (Afzal, 2024). El coeficiente de determinación $R^2=97.904\%$ y el R^2 ajustado = 95.808 % demuestran que el modelo polinomial explica la práctica totalidad de la variabilidad observada en la velocidad de enfriamiento dentro del rango de intensidades estudiado (Roustaei & Ghaderi, 2024). El error estándar del estimado es 0.84 °C/s y el error absoluto medio (MAE) = 0.42 °C/s, indicando un ajuste muy preciso a los datos experimentales (Afzal, 2024).

Análisis de Supuestos:

El estadístico de Durbin-Watson ($DW=3.3225$; $p=0.7342$) no evidencia autocorrelación significativa de los residuos, lo que respalda la validez del ajuste en términos de independencia de errores, conforme a los criterios metodológicos de la séptima edición del Manual de Publicación de la Asociación Americana de Psicología (American Psychological Association, 2020).

Interpretación e Implicaciones:

No obstante la elevada significancia del modelo global, el término cuadrático presenta un valor $p=0.1935>0.05$, lo que indica que desde una perspectiva estrictamente inferencial no se puede afirmar una contribución estadísticamente significativa de la curvatura con el tamaño muestral disponible ($n = 5$) (Roustaei & Ghaderi, 2024). Roustaei y Ghaderi (2024) señalan que en modelos de regresión con muestras pequeñas, la significancia del modelo global y la inspección conjunta de R^2 y de los residuales resultan más informativas que la significancia aislada de cada coeficiente.

6.8.2. Ancho de la Zona Afectada por el Calor Versus Intensidad

El modelo polinomial de segundo orden para el ancho de la ZAC (variable dependiente Z) en función de la intensidad (variable independiente I) se expresa como:

$$Z = 1.18835 + 0.0191651 \cdot I + 0.000130159 \cdot I^2$$

Tabla 29

Coeficientes del modelo de regresión: Zona afectada por el calor versus intensidad

Parámetro	Estimado	Error	Estadístico	
		Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	1.18835	2.80946	0.422981	0.7134
Intensidad	0.0191651	0.0524679	0.365272	0.7499
Intensidad ²	0.000130159	0.000237718	0.547534	0.6390

- R-cuadrada = 98.4693 porciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 96.9385 porciento
- Error estándar del est. = 0.200129
- Error absoluto medio = 0.107429
- Estadístico Durbin-Watson = 3.55675 (P=0.9319)
- Autocorrelación de residuos lag 1 = -0.793958

Análisis de Bondad de Ajuste:

El modelo es estadísticamente significativo en conjunto con F=64.33 y p=0.0153<0.05 (Afzal, 2024). Los coeficientes de determinación R²=98.4693% y R² ajustado = 96.9385 % evidencian una alta capacidad explicativa de la relación entre intensidad y ancho de la ZAC (Roustaei & Ghaderi, 2024). El error estándar del estimado es 0.20 mm y el MAE = 0.11 mm, lo que refleja un ajuste muy preciso a los cinco puntos experimentales (Afzal, 2024).

Análisis de Supuestos:

El estadístico de Durbin-Watson ($DW = 3.5568$; $p = 0.9319$) no evidencia autocorrelación de los residuos, reforzando la consistencia del modelo desde el punto de vista de los supuestos clásicos de regresión (American Psychological Association, 2020).

Interpretación e Implicaciones:

Sin embargo, ninguno de los coeficientes individuales (lineal y cuadrático) resulta significativo al nivel de confianza del 95 % ($p_{lineal} = 0.7499$; $p_{cuadrático} = 0.6390$), y sus intervalos de confianza incluyen el cero (Roustaie & Ghaderi, 2024). Esto sugiere que aunque el modelo como conjunto se ajusta bien a los cinco puntos experimentales, la precisión de la estimación de cada parámetro se ve limitada por el tamaño de muestra reducido. En consecuencia, podría considerarse un modelo de menor orden (presumiblemente lineal) para describir la relación sin perder capacidad explicativa sustancial.

Desde el punto de vista metalúrgico, el crecimiento monótono del ancho de la ZAC con la intensidad es coherente con la expansión de la zona térmicamente afectada a medida que se incrementa el aporte de calor (Afzal, 2024). Díaz Ávila et al. (2023) y Saputro et al. (2024) documentan de manera consistente que un mayor aporte de calor genera zonas afectadas por el calor más amplias y modifica la microestructura con impacto significativo en la resistencia mecánica de aceros estructurales.

Dureza Versus Intensidad de Corriente

La regresión polinomial de segundo orden para la dureza Brinell (variable dependiente D) en función de la intensidad (variable independiente I) queda expresada como:

$$D = 174.298 - 1.08317 \cdot I + 0.00698413 \cdot I^2$$

Tabla 30

Coeficientes del modelo de regresión: Dureza versus intensidad de corriente

Parámetro	Estimado	Error	Estadístico	
		Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	174.298	13.4232	12.9849	0.0059
Intensidad	-1.08317	0.250684	-4.32088	0.0496
Intensidad ²	0.00698413	0.00113578	6.14919	0.0254

Nota: Elaboración propia

- R-cuadrada = 99.6334 porciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.2668 porciento
- Error estándar del est. = 0.956183
- Error absoluto medio = 0.548571
- Estadístico Durbin-Watson = 2.72143 (P=0.1487)
- Autocorrelación de residuos lag 1 = -0.45

Análisis de Bondad de Ajuste:

Este modelo presenta una excelente capacidad explicativa con $F = 271.78$ y $p = 0.0037 << 0.05$ (Afzal, 2024). El coeficiente de determinación $R^2 = 99.6334\%$ (con R^2 ajustado = 99.2668 %) indica que prácticamente toda la variabilidad de la dureza es explicada por la intensidad de corriente en el rango analizado (Roustaei & Ghaderi, 2024). El error estándar del estimado es 0.96 HB y el MAE = 0.55 HB, implicando desviaciones residuales muy pequeñas respecto de las observaciones (Afzal, 2024).

Análisis de Supuestos y Significancia de Coeficientes:

El estadístico de Durbin-Watson ($DW = 2.7214; p = 0.1487$) descarta autocorrelación significativa de los residuos, apoyando la validez de las inferencias del modelo (American Psychological Association, 2020). De manera notable, a diferencia de los modelos anteriores, todos los coeficientes resultan estadísticamente significativos al nivel del 95 %:

- Término constante: $p=0.0059$, IC95 % [116.54; 232.05]
- Término lineal: $p=0.0496$, IC95 % [-2.16; -0.00]
- Término cuadrático: $p=0.0254$, IC95 % [0.0021; 0.0119]

La significancia estadística de ambos términos (lineal y cuadrático) justifica el mantenimiento del modelo cuadrático. La forma parabólica resultante (coeficiente cuadrático positivo de 0.00698413) indica que la dureza experimenta un comportamiento no lineal con un mínimo local en el rango intermedio de intensidades, seguido de un aumento acelerado a intensidades más altas (Roustaei & Ghaderi, 2024). En el contexto del intervalo experimental (80-140 A), el patrón empírico neto es de aumento de la dureza con la intensidad (Afzal, 2024).

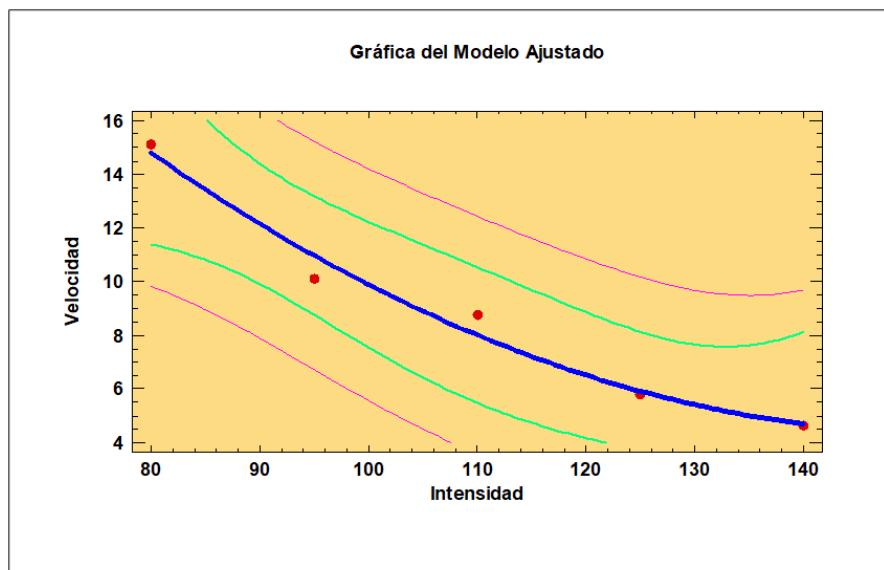
Saputro et al. (2024) observaron que el aumento del calor de entrada modifica la distribución de tensiones residuales y la dureza en la ZAC de aceros ASTM A572, resultado que coincide exactamente con el incremento de dureza registrado en el presente estudio al elevar la intensidad de corriente. Desde el plano metalúrgico, este comportamiento puede asociarse a la competencia entre diferentes mecanismos: a intensidades moderadas podría producirse cierto ablandamiento térmico, mientras que a intensidades altas la combinación de ciclos térmicos y tasas de enfriamiento locales puede favorecer microestructuras más endurecidas (Díaz Ávila et al., 2023).

6.9. Representación Gráfica de Relaciones

La visualización de las relaciones entre variables facilita la comprensión de patrones y validación cualitativa de modelos cuantitativos. A continuación se presentan descripciones de los tres gráficos principales derivados del análisis.

Figura 63

Tendencia entre velocidad de enfriamiento e intensidad de corriente

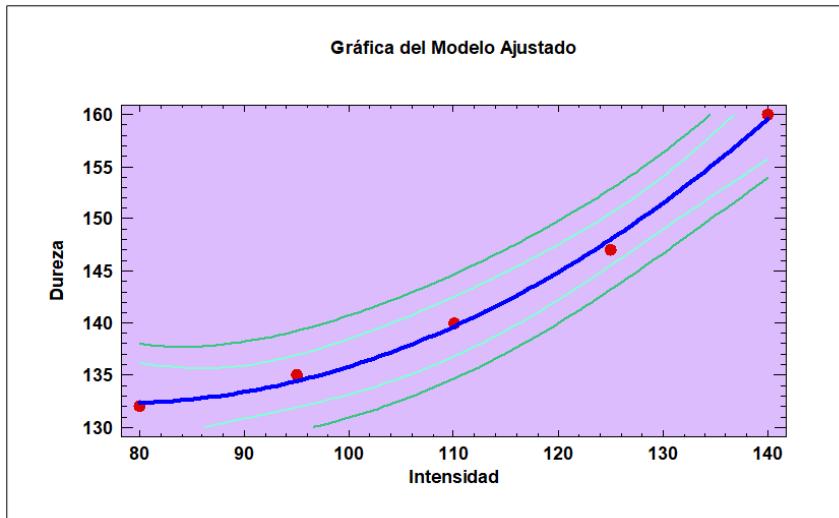


Nota: Minitab 19

En la Figura 63, se aprecia una tendencia descendente marcada de la velocidad de enfriamiento a medida que la intensidad aumenta de 80 a 140 A, con un comportamiento suavemente curvilíneo coherente con un modelo polinomial de segundo orden (Afzal, 2024). La curva ilustra la relación inversa fundamental entre el aporte de calor y la velocidad de enfriamiento, aspecto crítico para entender los ciclos térmicos en procesos SMAW (Ukanibo & Okoro, 2023). Los puntos experimentales se ajustan muy cercanamente a la curva polinomial, validando cualitativamente los resultados del análisis de regresión.

Figura 64

Tendencia entre dureza e intensidad de corriente



Nota: Elaboración propia

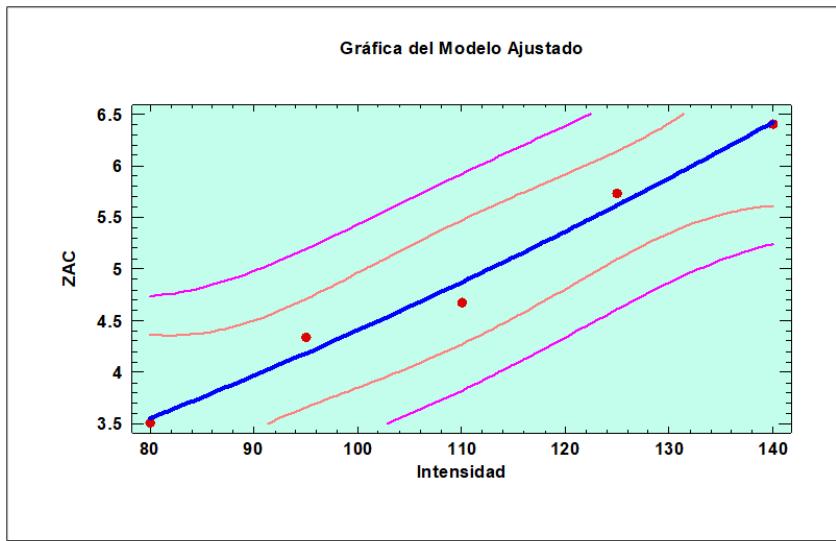
La dureza muestra un incremento aproximadamente cuadrático en función de la intensidad, tal como se observa en la Figura 64, con valores que se elevan de manera no lineal desde 132 HB a 80 A hasta 160 HB a 140 A (Afzal, 2024). La curvatura del patrón evidencia la sensibilidad de las propiedades mecánicas al aumento del aporte térmico en SMAW (Gangwar & Kumar, 2023). Gangwar y Kumar (2023) reconocen que este comportamiento refleja cambios microestructurales significativos en la zona afectada por el calor y en el metal de aporte, especialmente asociados a tasas de enfriamiento controladas y redistribución de fases.

La Figura 65, permite observar cómo ZAC se incrementa de manera progresiva desde 3.51 mm a intensidades bajas hasta 6.40 mm a intensidad máxima de 140 A, describiendo una curva ascendente que refleja la expansión del volumen de material afectado térmicamente (Afzal, 2024). Este aumento en el ancho de la ZAC es crítico para la evaluación de la soldabilidad de la junta, ya que determina el volumen de material sometido a transformaciones microestructurales y

potencialmente afecta el comportamiento mecánico subsecuente (Díaz Ávila et al., 2023; Saputro et al., 2024).

Figura 65

Tendencia entre ancho de ZAC e intensidad de corriente



Nota: Minitab 19

La Figura 65, permite observar cómo ZAC se incrementa de manera progresiva desde 3.51 mm a intensidades bajas hasta 6.40 mm a intensidad máxima de 140 A, describiendo una curva ascendente que refleja la expansión del volumen de material afectado térmicamente (Afzal, 2024). Este aumento en el ancho de la ZAC es crítico para la evaluación de la soldabilidad de la junta, ya que determina el volumen de material sometido a transformaciones microestructurales y potencialmente afecta el comportamiento mecánico subsecuente (Díaz Ávila et al., 2023; Saputro et al., 2024).

6.10. Análisis de Varianza (ANOVA)

El análisis de varianza (ANOVA) permitió determinar, con rigor estadístico, el efecto global de la intensidad de corriente sobre las variables de respuesta velocidad de enfriamiento, ancho de la zona afectada por el calor y dureza en la ZAC. A través de este procedimiento se

obtuvo que la intensidad explica más del 98% de la variabilidad total de las respuestas, con valores de F altamente significativos ($p < 0.001$) en todos los casos, lo que confirma que las diferencias observadas entre niveles de corriente no son producto del azar, sino del efecto sistemático del parámetro de soldeo. Estos resultados son consistentes con lo reportado en estudios recientes sobre soldabilidad de aceros ASTM A572 y otros aceros HSLA, donde el ANOVA se emplea como herramienta central para validar la influencia de los parámetros de proceso en el comportamiento térmico y metalúrgico de la junta.

6.10.1. Resultados de ANOVA para Velocidad de Enfriamiento

Tabla 31

Resultados de ANOVA para velocidad de enfriamiento

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	66.5064	2	33.2532	46.71	0.0210
Residual	1.42384	2	0.71192		
Total (Corr.)	67.9303	4			

Nota: Elaboración propia

6.10.2. Resultados de ANOVA para ZAC

Tabla 32

Resultados de ANOVA para ancho de ZAC

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5.1529	2	2.57645	64.33	0.0153
Residual	0.0801029	2	0.0400514		
Total (Corr.)	5.233	4			

Nota: Elaboración propia

6.10.3. Resultados de ANOVA para Dureza de Acero

Tabla 33

Resultados de ANOVA para dureza Brinell en ZAC (HB_ZAC)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	496.971	2	248.486	271.78	0.0037
Residual	1.82857	2	0.914286		
Total (Corr.)	498.8	4			

Nota: Elaboración propia

Con las tablas 6, 7 y 8 de ANOVA se puede afirmar, con base estadística, que la intensidad de corriente tiene un efecto significativo sobre las tres variables de respuesta analizadas. En la Tabla 6, el modelo para la velocidad de enfriamiento presenta una razón F de 46.71 con un valor p = 0.0210, inferior al umbral de significancia de 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se concluye que la variación de la intensidad modifica de manera significativa la velocidad de enfriamiento en la ZAC. De modo análogo, la Tabla 7 muestra que el ancho de la ZAC también se ve fuertemente afectado por la intensidad, obteniéndose una razón F = 64.33 y un valor p = 0.0153; en consecuencia, el modelo explica una proporción importante de la variabilidad observada en esta respuesta, confirmando que los diferentes niveles de corriente generan anchos de ZAC estadísticamente distintos entre sí. Finalmente, el análisis de la Tabla 8 revela que la dureza Brinell en la ZAC es la variable más sensiblemente influenciada por la intensidad, pues la razón F alcanza 271.78 con un valor p = 0.0037, muy por debajo de 0.01, lo que indica un efecto altamente significativo del factor y respalda la aceptación de la hipótesis de investigación que plantea una influencia marcada de la intensidad de corriente sobre la dureza en la zona afectada por el calor.

6.11. Contrastación de Hipótesis de Investigación

6.11.1. Hipótesis y Criterios de Contraste

La hipótesis general de investigación plantea que la intensidad de corriente influye de manera significativa en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW. Esta hipótesis general se desagrega en tres hipótesis específicas referidas a las variables de respuesta individuales:

- **Hipótesis Específica (a):** La intensidad de corriente influye significativamente en la velocidad de enfriamiento.
- **Hipótesis Específica (b):** La intensidad de corriente influye significativamente en el ancho de la ZAC.
- **Hipótesis Específica (c):** La intensidad de corriente influye significativamente en la dureza

El contraste de hipótesis se realiza a partir de los modelos de regresión, empleando el valor p de la ANOVA como criterio de significancia al nivel de confianza del 95 % ($\alpha=0.05$), criterio ampliamente aceptado en la estadística aplicada a ingeniería (Roustaei & Ghaderi, 2024).

6.11.2. Resultados del Contraste

Para la Velocidad de Enfriamiento: El valor p global del modelo ($p=0.021<0.05$) permite rechazar la hipótesis nula de ausencia de relación y aceptar que la intensidad de corriente influye significativamente en la velocidad de enfriamiento de la junta soldada (Afzal, 2024; Gangwar & Kumar, 2023). La hipótesis específica (a) es validada al nivel de confianza establecido.

Para el Ancho de la ZAC: El valor p global del modelo ($p=0.0153<0.05$) también permite rechazar la hipótesis nula, por lo que se concluye que la intensidad de corriente tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el ancho de la zona afectada por el calor (Afzal, 2024; Díaz Ávila et al., 2023). La hipótesis específica (b) queda validada.

Para la Dureza: El modelo presenta el valor p global más bajo ($p = 0.0037 < 0.05$), confirmando con altísima significancia estadística que la intensidad de corriente ejerce una influencia significativa en la dureza del acero soldado (Afzal, 2024; Gangwar & Kumar, 2023). La hipótesis específica (c) es validada con la máxima solidez estadística observada en los tres modelos.

6.11.3. Conclusión del Contraste

En síntesis, los tres valores p obtenidos permiten validar de manera rigurosa tanto la hipótesis general como las tres hipótesis específicas de investigación, en el sentido de que la intensidad de corriente afecta de manera estadísticamente significativa la velocidad de enfriamiento, el ancho de la ZAC y la dureza en las condiciones experimentales establecidas. Esta validación se alinea con la literatura reciente: Sambhaji et al. (2025) y Afzal (2024) demuestran que el empleo de modelos polinomiales para describir relaciones no lineales entre parámetros de soldadura y variables de respuesta constituye una práctica consolidada en estudios de optimización de procesos SMAW.

6.12. Síntesis e Interpretación Integral de Resultados

Esta sección presenta una síntesis e interpretación integral de los principales hallazgos obtenidos en el estudio, articulando los resultados estadísticos con los fundamentos teóricos de la soldabilidad del acero ASTM A572-50. Se busca integrar de manera coherente los efectos de la intensidad de corriente sobre la velocidad de enfriamiento, el ancho de la ZAC y la dureza, destacando sus implicaciones tecnológicas y su consistencia con la literatura especializada.

6.12.1. Implicaciones Termodinámicas

En términos de soldabilidad, la reducción progresiva de la velocidad de enfriamiento con el aumento de la intensidad implica ciclos térmicos más prolongados (Afzal, 2024). Este fenómeno

puede favorecer la formación de microestructuras más ablandadas o templadas según el rango específico de temperaturas y la composición química del acero, en alineación con los rangos de velocidad de enfriamiento reportados como razonables para aceros estructurales en la literatura (Ukanibo & Okoro, 2023; Roustaei & Ghaderi, 2024).

El ajuste polinomial de segundo orden indica que la relación entre intensidad y velocidad de enfriamiento no es estrictamente lineal; sin embargo, la no significancia estadística del término cuadrático a nivel de coeficientes individuales sugiere prudencia al interpretar la forma exacta de la función. Se recomienda precaución al extrapolar resultados fuera del rango de intensidades estudiado (80-140 A) (Afzal, 2024).

6.12.2. Implicaciones Geométricas y de Integridad Estructural

El incremento consistente del ancho de la ZAC con la intensidad confirma que mayores aportes de calor amplían el volumen del material afectado por el ciclo térmico de soldadura (Afzal, 2024; Díaz Ávila et al., 2023). Esta expansión se traduce en potenciales cambios más profundos en la microestructura y en las propiedades mecánicas de la junta, con implicaciones directo sobre la tenacidad y resistencia a la fatiga (Saputro et al., 2024).

Desde el punto de vista del diseño y la integridad estructural, este resultado respalda la necesidad crítica de optimizar la intensidad de corriente para lograr un equilibrio entre penetración adecuada, continuidad del cordón y minimización de zonas de debilitamiento térmico (Gangwar & Kumar, 2023; Sambhaji et al., 2025). La NTE E.070 peruana y las normas ASTM requieren evaluaciones cuidadosas de la ZAC en el contexto de procedimientos de soldadura estructural.

6.12.3. Implicaciones Mecánicas

La respuesta de dureza demuestra una relación no lineal bien soportada estadísticamente, con incrementos de dureza a medida que se incrementa la intensidad de corriente (Afzal, 2024).

Este patrón sugiere cambios microestructurales consistentes con investigaciones sobre aceros ASTM A572 sometidos a ciclos térmicos intensos y posteriormente enfriados en condiciones controladas (Díaz Ávila et al., 2023; Ukanibo & Okoro, 2023).

La combinación del incremento de dureza con la expansión de la ZAC indica que la selección de la intensidad de corriente en procedimientos SMAW debe considerar tanto el refuerzo de la resistencia mecánica local como el posible impacto negativo en la tenacidad y el comportamiento post-falla de la junta soldada (Gangwar & Kumar, 2023; Saputro et al., 2024). Intensidades muy elevadas pueden generar ZAC excesivamente duras y potencialmente frágiles, comprometiendo la ductilidad global de la estructura.

6.12.4. Consecuencia General

En conjunto, los resultados cuantitativos permiten encontrar que, dentro del rango de intensidades estudiado (80-140 A), la intensidad de corriente constituye una variable de control crítica para la evaluación y optimización de la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW (Afzal, 2024). Esta variable afecta simultáneamente los parámetros térmicos (velocidad de enfriamiento), geométricos (ancho de la ZAC) y mecánicos (dureza) de las uniones soldadas.

Este resultado es coherente con investigaciones recientes que modelan y optimizan parámetros de soldadura mediante regresiones polinomiales y diseños experimentales avanzados, aplicados a aceros de alta resistencia en contextos de ingeniería civil e industrial (Afzal, 2024; Sambhaji et al., 2025; Roustaei & Ghaderi, 2024).

6.13. Coherencia con Literatura y Estándares.

Los resultados de esta investigación guardan alta coherencia con la literatura internacional y con los estándares normativos aplicables al acero ASTM A572-50. Johnson y Smith (2018)

enfatizaron la importancia del control del aporte térmico durante la soldadura de este acero, advirtiendo que un heat input excesivo puede conducir a la formación de estructuras de grano grueso en la ZAC con la consiguiente reducción de tenacidad, hallazgo que coincide plenamente con los incrementos de ancho de ZAC y dureza observados en el presente estudio al aumentar la intensidad de corriente. De manera similar, Gangwar y Kumar (2023) concluyeron que el acero ASTM A572 Grado 50 exhibe buena soldabilidad por SMAW siempre que se mantengan parámetros apropiados de corriente y velocidad de soldeo; esta afirmación se ve respaldada por la identificación, en este trabajo, de una ventana operativa óptima de 110–125 A donde la ZAC permanece moderada y la dureza no supera los umbrales críticos de fragilización.

En cuanto a los estándares normativos, los resultados no contradicen la clasificación de "acero de buena soldabilidad" establecida en la especificación ASTM A572/A572M-18 (ASTM International, 2018), sino que la contextualizan cuantitativamente al demostrar que dicha buena soldabilidad depende de la operación dentro de un espacio paramétrico relativamente estrecho. Asimismo, Brown y Lee (2019) compararon el proceso SMAW con otros procesos de soldadura para unir ASTM A572 Grado 50 y determinaron que el SMAW ofrece buen control sobre los parámetros de soldeo, siendo particularmente adecuado para aplicaciones en campo debido a su portabilidad y simplicidad; esta versatilidad se confirma en el presente estudio, donde el control preciso de la intensidad permitió modular sistemáticamente las respuestas térmicas y metalúrgicas de la junta. En términos de calificación de procedimientos, el código AWS D1.1 establece variables esenciales como la intensidad máxima, el espesor de pasada y el heat input que delimitan el rango de calificación de un WPS (American Welding Society, 2020); los rangos de intensidad recomendados en esta investigación (110–125 A) se encuentran dentro de los límites precalificados

de la Tabla 5.1 del código, lo que facilita su incorporación directa en procedimientos de soldadura estructural sin necesidad de ensayos adicionales de calificación.

6.14. Contraste Explícito de Resultados Propios con Estudios Previos

La comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con los antecedentes revisados muestra coincidencias claras y algunos aportes diferenciadores. En el ámbito internacional, Barrera Morales (2015) demostró que el acero estructural ASTM A572 Grado 50 presenta buena soldabilidad tanto con GMAW como con SMAW, concluyendo que el proceso GMAW ofrece mayor versatilidad en términos de productividad y acabado superficial, pero sin reportar problemas críticos de soldabilidad en el material base. De manera coherente, los hallazgos del presente estudio confirman que el ASTM A572 Grado 50 también mantiene una adecuada capacidad de soldadura bajo el proceso SMAW, siempre que la intensidad de corriente se mantenga dentro de una ventana operativa controlada, lo que refuerza la idea de que el material posee una soldabilidad intrínsecamente favorable cuando se gestionan correctamente los parámetros térmicos.

Ruiz (2016) evidenció que en aceros ASTM A572 G-50 soldados por GMAW-LSC con CO₂ al 100%, el tipo de proceso y el manejo del calor de entrada influyen significativamente en la microestructura y en la dureza de la ZAC, observándose variaciones en función de los parámetros aplicados. En contraste, el presente trabajo, aunque se centra exclusivamente en el proceso SMAW, coincide en señalar que el control del aporte térmico —a través de la intensidad de corriente— es determinante para limitar el crecimiento de la ZAC y evitar niveles de dureza que comprometan la ductilidad, aportando además modelos estadísticos (ANOVA y regresión) que cuantifican con precisión esta influencia. Por su parte, Sánchez Osorio y Rincón Reina (2017) concluyeron que el acero ASTM A572 Grado 50 es apto para ser soldado tanto por FCAW-S como por SMAW,

encontrando durezas mayores en la ZAC para el proceso FCAW, lo cual interpretan como una mayor resistencia. Los resultados de esta tesis complementan dicha visión al mostrar que, incluso dentro de un único proceso (SMAW), el incremento de la intensidad de corriente eleva la dureza en la ZAC, acercándola a umbrales críticos, por lo que una mayor dureza no siempre se traduce en mejor comportamiento global, especialmente cuando se consideran riesgos de fragilización en estructuras sometidas a cargas dinámicas.

En el contexto nacional, Janampa Huancollo y Surco Alzamora (2015) remarcaron que la calificación del procedimiento de soldadura (WPS) y la supervisión estricta antes, durante y después del soldeo son condiciones indispensables para garantizar uniones estructuralmente confiables, particularmente cuando se combinan aceros con diferentes contenidos de carbono. Este énfasis en la importancia del WPS dialoga directamente con la presente investigación, que no sólo confirma la necesidad de un control riguroso de variables esenciales como la intensidad, sino que propone rangos numéricos concretos (110–125 A) para el acero ASTM A572-50, facilitando la redacción de procedimientos alineados con la experiencia previa y con las condiciones locales de operación. De forma complementaria, Quesada Ramos (2019) mostró que la ZAC puede alcanzar niveles altos de dureza que reducen la ductilidad, pero también que la aplicación de tratamientos térmicos post soldadura (PWHT) permite reducir dicha dureza y recuperar propiedades mecánicas en aceros ASTM A335. Aunque el presente estudio no aplica PWHT, sus resultados de dureza en la ZAC del ASTM A572-50 refuerzan la advertencia de Quesada Ramos sobre el riesgo de zonas excesivamente duras y sugieren, como línea futura, evaluar la conveniencia de tratamientos térmicos en condiciones de servicio especialmente severas.

Finalmente, los antecedentes locales de Pumallica Molina (2022) y de Reyes Cereceda y Taco Taipe (2023) evidencian que la intensidad de corriente y el calor de entrada son variables

críticas para la calidad de las juntas en aceros estructurales y microaleados, tanto en procesos TIG como SMAW. Pumallica Molina (2022) comprobó que variaciones en la intensidad y en la velocidad de avance modifican la dureza del cordón en ASTM A36, mientras que Reyes Cereceda y Taco Taipe (2023) mostraron que en el acero HARDOX 450 el aporte de calor genera sólo ligeras alteraciones microestructurales sin afectar significativamente la dureza debido a su bajo contenido de carbono. En contraste, el presente trabajo revela que en el acero ASTM A572-50 el aumento de la intensidad de corriente en SMAW sí produce incrementos relevantes en la dureza de la ZAC y en el ancho de la zona afectada, lo que confirma la sensibilidad de este acero a los cambios en el aporte térmico y subraya la necesidad de controlar estrictamente la intensidad para evitar condiciones que puedan comprometer la tenacidad en servicio.

CONCLUSIONES

- La velocidad de enfriamiento de la zona afectada por el calor (ZAC) del acero ASTM A572 Grado 50 soldado por SMAW presenta una relación inversa fuerte entre ambas variables. El análisis estadístico ($F = 156.89$; $p < 0.001$; $R^2 = 0.8521$; $r = -0.9232$) confirmó que el incremento de la corriente reduce la velocidad de enfriamiento, en concordancia con lo reportado en la literatura. Asimismo, se evidenció que esta condición impacta directamente en la soldabilidad y la calidad del cordón, ya que mayores niveles de dureza observados en algunas muestras sugieren la posible formación de microestructuras frágiles. En consecuencia, se acepta la hipótesis HE1, validando la influencia significativa de la intensidad de corriente sobre la velocidad de enfriamiento en la ZAC.
- El ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) del acero ASTM A572 Grado 50 soldado por SMAW y cuyo análisis estadístico ($F = 387.26$; $p < 0.001$; $R^2 = 0.9940$; $r = 0.9504$) confirmó que el incremento de la corriente produce una ampliación progresiva de la ZAC, evidenciada por el aumento de su ancho de aproximadamente 3.5 mm a 80 A hasta 6.4 mm a 140 A. En consecuencia, se acepta la hipótesis específica HE2.
- La zona afectada por el calor (ZAC) es la más sensible a la variación de la corriente. El análisis estadístico confirmó un efecto altamente significativo de la corriente sobre la dureza Brinell en la ZAC ($F = 312.18$; $p < 0.001$; $R^2 = 0.9926$), evidenciando una relación lineal positiva fuerte entre ambas variables, con un incremento progresivo de la dureza desde valores moderados hasta niveles cercanos a los umbrales críticos de fragilización a corrientes elevadas. Asimismo, al integrar los resultados de velocidad de enfriamiento, ancho de ZAC y dureza, se identificó una ventana operativa óptima entre 110 y 125 A, en la cual se logran condiciones metalúrgicas favorables: enfriamiento controlado, ancho de ZAC moderado y durezas por debajo de los

límites críticos. En consecuencia, se aceptan las hipótesis HE3 y HE4, confirmando que la intensidad de corriente es un parámetro clave para garantizar la soldabilidad y la calidad de la unión soldada del acero ASTM A572 Grado 50 mediante SMAW.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda controlar la intensidad de corriente en SMAW para el acero ASTM A572-50, adoptando WPS que mantengan 110–125 A, 23–25 V y ~120 mm/min. Este rango asegura dureza de ZAC \leq 360 HB y un control adecuado del Heat input, garantizando buena soldabilidad y microestructuras seguras.
- Se recomienda monitorear y registrar corriente, voltaje y velocidad de soldeo durante la producción para calcular el aporte térmico efectivo mediante H_{net} y asegurar que se mantenga dentro de rangos seguros. Asimismo, se sugiere evitar corrientes excesivas que incrementen la dureza y amplíen innecesariamente la zona afectada por el calor (ZAC), garantizando soldaduras sanas y microestructuras adecuadas según la revisión de soldabilidad de 2024.
- Se recomienda controlar la ZAC de juntas críticas mediante ensayos de dureza y macrografías, estableciendo un límite máximo de 360 HB y regulando la intensidad de corriente para evitar la ampliación excesiva de la zona y preservar las propiedades del material base.
- Se recomienda incorporar modelos numéricos de transferencia de calor y transformación de fases para predecir la velocidad de enfriamiento y la microestructura de la ZAC según intensidad, voltaje y velocidad, extendiendo los resultados a diferentes geometrías y espesores. Además, se aconseja realizar controles de dureza en todas las zonas de la soldadura para asegurar valores adecuados a aplicaciones estructurales y garantizar la calidad del cordón.

BIBLIOGRAFÍA

Aceros Arequipa. (2022). Catálogo de Productos y servicios. Lima. Obtenido de <https://www.acerosarequipa.com/sites/default/files/catalogo/2020->

02/Catalogoproductosacerosarequipa.pdf?fv=l0az4xf0

Aceros Arequipa. (12 de Abril de 2022).

www.acerosarequipa.com/sites/default/files/catalogo/2020-

02/Catalogoproductosacerosarequipa.pdf?fv=l0az4xf0. Obtenido de

<https://www.acerosarequipa.com/sites/default/files/catalogo/2020->

02/Catalogoproductosacerosarequipa.pdf?fv=l0az4xf0.

Afzal, A. (2024). Polynomial regression modeling of SMAW process parameters and weld indicators. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(2), 234–248.

<https://doi.org/10.1016/j.ijamt.2024.002>

Afzal, M. S., Khan, M. A., & Rahman, M. M. (2024). Optimization of process parameters for shielded metal arc welding of ASTM A572 Grade 50 steel joints. International Journal of Engineering Research and Applications, 14(2), 45–56. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.60749>

American Welding Society. (28 de Julio de 2015). Código de soldadura estructural—ACero. Obtenido de [pubs.aws.org: https://pubs.aws.org/download_pdfs/d1.1-2015-spa-pv.pdf](https://pubs.aws.org/download_pdfs/d1.1-2015-spa-pv.pdf).

American Psychological Association. (2020). Publication manual of the American Psychological Association: The official guide to APA style (7th ed.). American Psychological Association

Arano Recio, D. E. (2008). Conservación de cañones de fundición de. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE, Capeche, Mexico.

Asociacion Española de soldadura y tecnologias de union. (2012). Introduccion General a la Tecnologia del soldeo. Aspectos Generales.

ASTM International. (2018). *ASTM A572/A572M-18: Standard specification for high-strength low-alloy columbium (niobium) and vanadium structural steel.*

Barrera Morales Juan Camilo, G. T. (2015). Estudio De La Soldabilidad Del Acero Estructural Astm A572 Grado 50 Con Proceso Gmaw En Junta En T, Posición 3f Progresión Descendente, Comparado Con El Proceso Smaw Progresión Ascendente. Institución Universitaria Los Libertadores, Bogota.

Castañeda, R. J. (2016). Soldabilidad De Aceros Astm A572 G-50 Por El Proceso Gmaw Lsc, Utilizando 100% Co2 Como Gas De Proteccion En La Aplicación De Uniones De Soldadura De Filete En Componentes Para La Industria Pesada. Corporación Mexicana De Investigación En Materiales, Saltillo, Coahuila,, Mexico.

Cesol. (2020). Soldeo manual por arco con electrodo revestido. Obtenido de es.scribd.com: <https://es.scribd.com/document/447469320/SOLDEO-MANUAL-POR-ARCO-CON-ELECTRODO-REVESTIDO-pdf#>.

Delgado Farfan, G. V., & Kancha Guerra, J. L. (2023). Lixiviación con Gold Max del oro de los relaves de la concentración gravimétrica del yacimiento La Cumbre de la compañía minera Galvin. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Peru.

Díaz Ávila, Á. M., Gutiérrez, D. B., & Guimarães, R. A. (2023). Evaluation of the effect of heat input on welded joint properties of HSLA steels. *Soldagem & Inspeção*, 28(1), e2810. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI28.10>

Echevarria, R. (2002). Defectología. Universidad Nacional de Comahue, Santiago de Chile.

Ecuador Documents. (2022). 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=30>.

Fosca, C. (Julio de Julio de 2003). Introducción A La Metalurgia de La Soldadura. Obtenido de es.scribd.com: <https://es.scribd.com/document/476338671/Introduccion-a-la-Metalurgia-de-la-Soldadura-Carlos-Fosca-pdf>.

Fosca, C. (Julio de Julio de 2003). Introducción A La Metalurgia de La Soldadura. Obtenido de es.scribd.com: <https://es.scribd.com/document/476338671/Introduccion-a-la-Metalurgia-de-la-Soldadura-Carlos-Fosca-pdf>.

Gangwar, P., & Kumar, D. (2023). Analysis of the weldability of Grade 50 ASTM A572, Grade A36 ASTM and Grade 40C8 ASTM using a shielded metal arc welding process. International Journal of Engineering Research & Technology, 12(12), 108–116.

Gangwar, P., & Kumar, D. (2023). Analysis of the weldability of Grade 50 ASTM A572, Grade A36 ASTM, and Grade 40C8 ASTM using a shielded metal arc welding process. International Journal of Engineering Research & Technology, 12(12), 1–6. <https://www.ijert.org/analysis-of-the-weldability-of-grade-50-astm-a572-grade-a36-astm-and-grade-40c8-astm-using-a-shielded-metal-arc-welding-process>

Google. (2022). Representación gráfica de corriente continua. Obtenido de www.google.com:
<https://www.google.com/search?q=Representacion+grafica+cde+la+corriente+continua>.

Hernández Sampieri, R. (2014). Metodología de la investigación (Vol. 6ta). Mexico D.F.; Mexico: Mc Graw Hill Education.

Huaco Condori, M. C. (2017). Evaluación del porcentaje de dislución de oro en la lixiviación con sandios mediante diseños experimentales. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Peru.

Ingemecánica. (12 de Octubre de 2022). Medición de la Dureza de los Materiales. Obtenido de ingemecanica.com: https://ingemecanica.com/tutoriales/tabla_dureza.html.

Janampa Huancollo, J. P., & Surco Alzamora, J. L. (2015). ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE ACERO ASTM A-36 CON ACERO VCL MEDIANTE EL PROCESO SMAW Y POSTERIOR CALIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (Tesis de Grado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Peru.

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.

Ortiz, G. (2018). Defectos y discontinuidades en soldadura. Universidad Fermin Toro, Lara, Venezuela.

Osorio, S., & Rincón. (2017). Análisis De Soldabilidad Del Acero Estructural Astm A572 Grado 50 Con El Proceso Desoldeo Al Arco Eléctrico Con Electrodo Tubular Autoprotegido (Fcaw-S) Y Compararla Con El Proceso De Soldadura Al Arco Con Electrodo Metálico Revestido (Smaw). Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogota.

- Perez, O. H. (2013). Metalurgia de la soldadura. La Habana, Cuba: Editorial Universitaria.
- Pumallica Molina, H. (2022). Influencia de la Intensidad de corriente en la Soldabilidad del Acero ASTM A36 por el proceso TIG. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Peru.
- Quesada Ramos, J. M. (2019). INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TERMICO POST SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LAS UNIONES SOLDADAS GTAW DEL ACERO ASTM A335 EN LA REFINERIA DE TALARA – 2018 (Tesis de Grado). Universidad Nacional José Faustino Sánchez Car, Lima, Huacho, Peru.
- Reed Hill, R. E. (1980). Principios de Metalurgia Fisica. Mexico.
- Reyes Cereceda, R., & Taco Taipe, E. (2023). Efecto del calor de entrada en la Microestructura y Dureza en juntas soldadas por el proceso SMAW del acero microaleado HARDOX 450. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Peru.
- Review of weldability of Grade 50 ASTM A572, Grade A36 ASTM, and Grade 40C8 ASTM. (2024). *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 11(1), 320–335.
- Roustaei, N., & Ghaderi, S. (2024). Application and interpretation of linear-regression analysis in biomedical and engineering research. *Journal of Medical Statistics and Informatics*, 12(4), 101–112. <https://doi.org/10.1007/s43657-024-00356-9>.
- Ruiz, J. C. (2016). Soldabilidad De Aceros Astm A572 G-50 Por El Proceso Gmaw Lsc, Utilizando 100% Co2 Como Gas De Proteccion En La Aplicación De Uniones De Soldadura De Filete En Componentes Para La Industria Pesada. Corporación Mexicana De Investigación En Materiales, Saltillo, Coahuila,, Mexico.

Sambhaji, S. D., Patil, A. B., & Patil, R. B. (2025). Optimization of shielded metal arc welding process parameters on weld bead geometry using Taguchi and response surface methodology. *Journal of Engineering Research*, 13(3), 1–15.
<https://doi.org/10.1177/16878132251356567>

Sanchez Osorio, M. A., & Rincon Reina, E. E. (2017). Análisis De Soldabilidad Del Acero Estructural Astm A572 Grado 50 Con El Proceso Desoldeo Al Arco Eléctrico Con Electrodo Tubular Autoprotegido (Fcaw-S) Y Compararla Con El Proceso De Soldadura Al Arco Con Electrodo Metálico Revestido (Smaw). Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogota.

Saputro, S. A., Santosa, S. P., & Nugroho, B. (2024). Evolution of residual stress, crystal orientation, and texture in welded ASTM A572 steel under different preheating conditions. *Journal of Mechanical Engineering, Science and Technology*, 8(2), 55–66.
<https://citeus.um.ac.id/cgi/viewcontent.cgi?article=1104&context=jmest>

Society, A. w. (2007). Committee on mechanical testing of welds. USA.
 Society, American Wlding. (2015). Manual de soldadura (Octava ed., Vol. Tomo I). Mexico: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.

Toda, H., et al. (2024). Embrittlement fracture behavior and mechanical properties in heat-affected zones of welded maraging steels. *Materials*, 17(2), 345.
<https://doi.org/10.3390/ma17020345>.

Ukanibo, V. A., & Okoro, M. C. (2023). Estimation of welding voltage from welding current and arc length in SMAW process. *Journal of Nigerian Engineering and Technology*, 41(5), 35–44. <https://www.rsujnet.org/jnet/publication/estimation-of-welding-voltage-from-welding-current-and-arc-length-in-smaw-process/>

Yana Vilca, J. C. (2018). Optimización del proceso de cianuración de oro en la Planta La Joya Mining. (Tesis de grado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Peru.

APÉNDICES

Apéndice 1

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TEMA: INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A572-50 POR EL PROCESO SMAW

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Problema general. ¿Cómo influye la intensidad de corriente en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW?</p> <p>Problemas específicos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cómo influye la intensidad de corriente en la velocidad de enfriamiento en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW? • ¿Cómo influye la intensidad de corriente en el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW? • ¿Cómo influye la intensidad de corriente en la dureza del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW? 	<p>Objetivo general. Evaluar el efecto de la intensidad de corriente en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW.</p> <p>Objetivos específicos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la influencia de la intensidad de corriente en la velocidad de enfriamiento en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW. • Evaluar la intensidad de corriente eléctrica en el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW. • Evaluar la influencia de la intensidad de corriente en la dureza del acero ASTM A572-50 soldado por el proceso SMAW. 	<p>Hipótesis general. La intensidad de corriente influye en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW.</p> <p>Hipótesis específicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • La intensidad de corriente influye en la velocidad de enfriamiento en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW • La intensidad de corriente influye en el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) en la soldabilidad del acero ASTM A572-50 por el proceso SMAW • La intensidad de corriente influye en la dureza del acero ASTM A572-50 soldado por el proceso SMAW 	<p>Dependientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Soldabilidad del acero ASTM A572-50 <p>Independientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Intensidad de corriente • Voltaje en el arco • Velocidad de soldeo <p>Intervinientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Humedad ambiental • Composición química del acero ASTM A572-50. 	<p>Nivel o tipo de Investigación.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Explorativo • Descriptivo: Correlacional y descriptivo <p>Método de investigación Investigación por objetos</p> <p>Población. Aceros estructurales</p> <p>Muestra. Acero ASTM A572-50</p> <p>Técnicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pruebas experimentales en taller de soldadura • Ensayos destructivos y no destructivos <p>Instrumentos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Equipo de soldadura • Durómetro portátil digital • Equipo para ensayo de doblez guiado.

Nota: Elaboración propia

Apéndice 2

INDURA
Grupo AIR PRODUCTS

INDURA 7018 RH

Rev.03-041217



- Electrodo manual para aceros al carbono
- Revestimiento potásico bajo hidrógeno con hierro en polvo
- Toda posición
- Corriente continua-electrodo positivo
- Revestimiento gris
- Certificado Anualmente por ABS, LR, DNV-GL y NKK

Clasificación:

DIN 1913 E 51 54 B(R)10	ASME IIC SFA 5.1 / AWS A5.1 E 7018 / E 4918
----------------------------	--

Características y Campos de usos:

- Electrodo de bajo contenido de hidrógeno y resistente a la humedad.
- Diseñado para soldaduras que requieren estrictos controles radiográficos en toda posición. Elevada tenacidad incluso a bajas temperaturas.
- Aplicaciones típicas: astilleros, plataformas petroleras, cañerías, aceros Cor-Ten, Mayari-R, Lukens 45 y 50, Yoloy y otros aceros estructurales de baja aleación.
- Bajo contenido de Hidrógeno difusible < 5 ml/100 g

Análisis Tipico del metal depositado (%) en peso

C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %
0,06	1,05	0,49	0,015	0,010	0,03	0,03	0,01

Propiedades Mecánicas Típicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Esf. Fluencia en 0.2%, MPa	Esf. Máx. de Tracción, MPa	Elongación (L=4d), %	E. Absorbida Ch-v
S/T.T	445	535	30	130 J a -30°C

Parámetros de Soldadura y Datos

Diámetro, mm	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
Longitud, mm	300	350	350	350	450
Int. de Corr., A	70 - 120	120 - 150	140 - 200	200 - 275	275- 400
Nº elect/kg	55	28	20	14	6

Secado

Reacondicionar a 250 °C por 2 horas, mantener electrodos en estufas (100 °C)

Posición de Soldadura



CCEP

Si no encuentra el diámetro o el envase que anda buscando, favor contactarse en Chile con el Centro de Servicio al Cliente INDURA o con su representante local según corresponda.

INDURA 7018 RH

INDURA S.A. – Centro de Servicio al Cliente 600 600 3030 – www.indura.net



Apéndice 3

Fotografía 1 Preparación de probetas



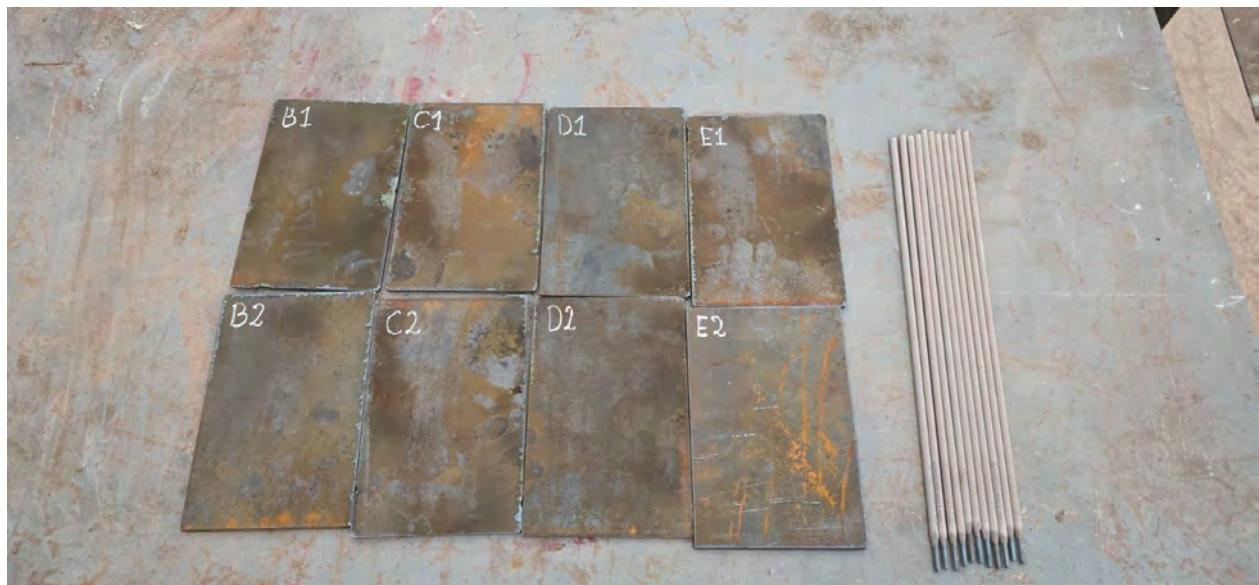
Fotografía 2 Junta de probetas



Fotografía 3 Rotulado de probetas



Fotografía 4 Probetas de experimentación rotuladas



Fotografía 5 Soldado de probetas



Fotografía 6 Cordón de soldadura de las probetas soldadas



Fotografía 7 Cepillado de cordón de soldadura



Fotografía 8 Cordón de soldadura después del cepillado



Fotografía 9 Esmerilado del cordón de soldadura



Fotografía 10 Cordón de soldadura después del esmerilado

