UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

TESIS

EFECTO DEL TIPO DE CORRIENTE EN LA PENETRACIÓN, DUREZA Y ZAC EN SOLDADURAS SMAW DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304

PRESENTADO POR:

Br. EDILBERTO MONZON CHIRINOS

Br. MILKO HECTOR DELGADO NAVIDES

PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALURGICO

ASESOR:

Mgt. ELIAS 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** Elías Teodoro Peña Peña quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: EFECTO DEL TIPO DE CORRIENTE EN LA PENETRACIÓN, DUREZA Y ZAC EN SOLDADURAS SMAW DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304

Presentado por: Edilberto Monzon Chirinos **DNI N°** 48524803;
presentado por: Milko Hector Delgado Navideo **DNI N°:** 71960469
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO METALÚRGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 4 %.

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.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
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.	

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 Setiembre de 20 26

Firma

Post firma Elías T. PEÑA PEÑA

Nro. de DNI 23965618

ORCID del Asesor 0000000345290665

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27359:68636838

EFECTO DEL TIPO DE CORRIENTE EN LA PENETRACIÓN, DUREZA Y ZAC EN SOLDADURAS SMAW DEL ACERO INOXIDA...

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:628296898

Fecha de entrega
22 sep 2026, 7:09 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
22 sep 2026, 7:47 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
Tesis_Edilberto_Milko_22.09 setiembre.pdf

Tamaño del archivo
6.8 MB

141 páginas

30.197 palabras

178.460 caracteres

4% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

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

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

4%	Fuentes de Internet
0%	Publicaciones
3%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

Texto oculto
255 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

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 del Cusco;

Señores Docentes, distinguidos miembros del Jurado:

En cumplimiento del Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, y con el propósito de optar al título profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra consideración la tesis colectiva titulada: “Efecto del tipo de corriente en la penetración, dureza y zona afectada por el calor (ZAC) en soldaduras SMAW del acero inoxidable AISI 304”.

El presente trabajo estudia, de manera experimental, la influencia del tipo de corriente continua y alterna del proceso de soldadura SMAW sobre la penetración, la dureza y la extensión de la zona afectada por el calor (ZAC) en el acero inoxidable AISI 304, material de amplio uso industrial. Para ello, se soldaron cupones con electrodo E 308L-16 bajo distintos niveles de aporte de calor y se evaluó la calidad de las uniones mediante inspección visual, líquidos penetrantes, ensayo de doblado y ensayo de dureza.

La tesis se organiza en seis capítulos, que comprenden el planteamiento del problema, la fundamentación teórica, las hipótesis y variables, la metodología, el procedimiento experimental y la interpretación de los resultados, a partir de los cuales se formulan las conclusiones y recomendaciones.

Confiamos en que los resultados obtenidos constituyan un aporte para la optimización de las uniones soldadas en el ámbito industrial y un material de consulta para la comunidad universitaria. Dejamos el presente trabajo a vuestro elevado criterio, agradeciendo anticipadamente las observaciones y sugerencias que contribuyan a enriquecerlo.

Edilberto Monzón Chirinos

Milko Héctor Delgado Navides

DEDICATORIA

A ti, abuela Gloria. No estás físicamente, pero cada meta alcanzada lleva tu huella. Gracias por las propinas que me diste sin que yo lo pidiera y por cada consejo que aún repito en voz baja cuando tengo dudas.

A mis abuelos Froilán y Romania, firmes como un buen acero. Ustedes no solo estuvieron durante mi vida universitaria, fueron ese abrigo silencioso que nunca preguntaba por qué me demoraba tanto, solo me decían "usted siga nomás, hijo".

A mis padres, Milko y Yenny. Ustedes que me vieron dar los primeros pasos hace 29 años y nunca dejaron de empujarme. Mamá Yenny, gracias por cuidar a Valentino mientras yo corría a clases o rendía exámenes. Papá Milko, por tus palabras firmes cuando dudaba, por enseñarme que la constancia vence al cansancio.

A mis tías, esas mujeres que siempre aparecían con un plato de comida, un mensaje de ánimo o simplemente con su presencia cuando más lo necesitaba. Gracias por cada gesto pequeño que en su momento no medí, pero que hoy pesa más que cualquier mineral pesado.

A mis hermanos Froilán y Andrea, el menor de todos, pero el más pendiente. Gracias por preguntar cada semana cómo iba la tesis, por reírte de mi estrés y por recordarme que la vida también es pausa. Tu preocupación sincera fue un termómetro que nunca marcó fiebre, sino calma.

A Maryori, mi compañera de ruta. Por entender los silencios, los malos ratos y las ausencias que esta carrera exigió.

Y para ti, Valentino. Cuando tengas 29 años como yo hoy, quiero que sepas que cada esfuerzo fue para mostrarte que los sueños se construyen con pasos pequeños pero seguros.

A Dios, por darme a cada uno de ustedes. Porque mi mayor riqueza no está en ningún mineral, sino en esta familia que me sostuvo hasta el final.

Milko Héctor Delgado Navides

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante. A mi madre, quien con su amor, esfuerzo y constante dedicación ha velado por mí en cada paso de mi camino, siendo mi mayor inspiración.

A mi papa Edilberto, que desde el cielo ilumina mi camino.

A mi hermano Cleto, por su apoyo incondicional a lo largo de esta travesía, y a mis hermanas, quienes se alegran sinceramente por cada logro que alcanzo. A mis hermanos, por su compañía y respaldo en todo momento.

A mi cuñada Doris, por ser un ejemplo a seguir, motivándome a ser mejor cada día. Y de manera muy especial, a mi sobrino Camilo, mi compañero de vida desde la niñez hasta el día de hoy, quien ha sido parte fundamental de mi historia y crecimiento personal.

Edilberto Monzón Chirinos

AGRADECIMIENTO

Mi gratitud a Dios, fuente de fortaleza y esperanza, por acompañarme en cada etapa de este camino, concederme salud y sabiduría, y permitirme superar las dificultades hasta alcanzar esta importante meta académica.

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, mi alma mater, por acogerme en sus aulas y ofrecerme una formación integral basada en el conocimiento, la investigación y el compromiso profesional. Las experiencias adquiridas durante estos años han sido fundamentales para mi desarrollo como futuro ingeniero metalúrgico.

De manera especial, agradezco a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias con dedicación y responsabilidad. Sus enseñanzas, orientaciones y consejos contribuyeron al fortalecimiento de mis capacidades y dejaron una valiosa huella en mi formación académica, profesional y humana.

Finalmente, expreso mi sincero reconocimiento a todas las personas que me brindaron su apoyo, confianza y palabras de aliento durante el desarrollo de esta investigación. Su compañía y colaboración fueron esenciales para culminar satisfactoriamente esta etapa de mi vida.

Edilberto Monzón Chirinos

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, mi alma mater, por brindarme los conocimientos, las herramientas y el entorno académico necesarios para formarme profesionalmente en la carrera de Ingeniería Metalúrgica. En sus aulas adquirí aprendizajes y experiencias que contribuyeron de manera significativa a mi crecimiento académico, profesional y personal.

A mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por compartir generosamente sus conocimientos, experiencias y consejos a lo largo de mi formación universitaria. Sus enseñanzas, orientación, paciencia y compromiso fueron fundamentales para fortalecer mis capacidades y despertar en mí el interés por seguir aprendiendo y superándome profesionalmente.

Expreso también mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron su valioso grano de arena para que esta investigación pudiera desarrollarse y llegar a su culminación. Cada consejo, palabra de aliento, orientación y muestra de confianza representó un apoyo importante durante las diferentes etapas de este proceso.

A quienes me acompañaron en los momentos de dificultad y compartieron conmigo la satisfacción de cada avance, les agradezco profundamente. Su apoyo no solo académico y profesional, sino también humano, fue esencial para superar los desafíos y alcanzar este importante objetivo.

Finalmente, manifiesto mi gratitud a todas las personas que formaron parte de este camino. Su colaboración y respaldo permanecerán siempre presentes como parte fundamental de este logro.

Milko Héctor Delgado Navides

Índice

PRESENTACIÓN....ii
DEDICATORIA iii
DEDICATORIA iv
AGRADECIMIENTO v
Índice....vii
Índice de tablas....xiv
Índice de figuras....xv
Resumen....xx
Abstract xxi
Introducción xxii
CAPÍTULO I....1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1
1.1. Planteamiento del Problema....1
1.2. Formulación del problema objeto de investigación 2
1.2.1. Problema General....2
1.2.2. Problemas Específicos 2
1.3. Justificación....2
1.3.1. Justificación Ambiental....2
1.3.2. Justificación Social....2
1.3.3. Justificación Económica....3
1.3.4. Justificación Tecnológica....3
1.3.5. Justificación Teórica 3
1.3.6. Justificación Práctica....4
1.3.7. Justificación Metodológica 4
1.4. Objetivos 4
1.4.1. Objetivo General 4

1.4.2. Objetivos Específicos 4
CAPÍTULO II 5
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 5
2.1. Antecedentes de la Investigación 5
2.1.1. Antecedentes internacionales 5
2.1.2. Antecedentes Nacionales 6
2.2. Marco Teórico 7
2.2.1. Acero Inoxidable 7
2.2.2. Ventajas del Acero Inoxidable 7
2.2.3. Clasificación de los Aceros Inoxidables 8
2.2.3.1. Aceros Inoxidables Austeníticos (Series 200 y 300) 9
2.2.4. Acero Inoxidable AISI 304 10
2.2.4.1. Microestructura del acero AISI 304 10
2.3. Transformación de ferrita a austenita en soldaduras de aceros inoxidables austeníticos 11
2.3.1. Modos de solidificación primaria 11
2.3.1.1. Diagrama de fases 11
2.3.1.2. Austenita primaria 14
2.3.1.3. Ferrita primaria 14
2.3.1.4. Microestructura de la soldadura 15
2.4. Metalurgia de los aceros inoxidables 17
2.4.1. Efecto de los Elementos de Aleación 17
2.5. Soldabilidad 19
2.5.1. Tipos de Soldabilidad 19
2.5.1.1. Soldabilidad metalúrgica 19
2.5.1.2. Soldabilidad operativa 19
2.5.1.3. Soldabilidad constructiva 19

2.5.2. Soldabilidad de Aceros Inoxidables Austeníticos 19
2.5.2.1. Factores que actúan en la soldabilidad 20
2.6. Metalurgia de la soldadura 20
2.6.1. Evolución de la microestructura en la zona de fusión 20
2.7. Diagramas de Constitución 22
2.7.1. Diagrama de Schaeffler 22
2.7.2. Diagrama de Long 23
2.7.3. Diagrama de WRC - 1992 24
2.8. Zona afectada por el calor (ZAC) 25
2.8.1. Crecimiento del grano 26
2.8.2. Formación de ferrita 26
2.9. Problemas durante la soldadura de los aceros inoxidables 26
2.9.1. Sensibilización 27
2.9.2. Formación de fisuras y el rol de la ferrita 27
2.9.3. Fase sigma 27
2.10. Soldadura por arco con electrodo revestido (Shielded metal arc welding - SMAW) 28
2.10.1. Descripción del proceso 28
2.10.2. Ventajas y limitaciones 29
2.10.3. Aplicaciones 29
2.10.4. Variables del proceso 30
2.10.4.1. Diámetro del electrodo 31
2.10.4.2. Intensidad de corriente 32
2.10.4.3. Longitud de arco 32
2.10.4.4. Velocidad de soldeo 32
2.10.4.5. Corriente del proceso de soldadura 33
2.11. Soldadura con corriente continua y corriente alterna 34

2.11.1. Soldeo con corriente continua 34
2.11.2. Soldeo con corriente alterna. 36
2.12. Tipo de corriente y penetración 36
2.13. Características del proceso de soldeo 39
2.13.1. Soldeo con electrodo revestido. 39
2.14. Electrodos 43
2.14.1. Designación de los electrodos 44
2.14.2. Clasificación de los electrodos 45
2.14.3. Funciones del revestimiento 49
2.14.4. Partes de un Electrodo 50
2.15. Ciclo Térmico 50
2.15.1. Aporte de calor (Heat input) 51
2.15.2. Temperatura Inicial de la Chapa (o Temperatura de Precalentamiento) 51
2.15.3. Geometría de la Soldadura 51
2.15.4. Características Térmicas del Material 51
2.16. Cálculo del Ancho de la ZAC 52
2.17. Imperfecciones en los cordones de soldadura 52
2.18. Ensayos no destructivos 53
2.18.1. Inspección visual 54
2.18.2. Partículas magnéticas 55
2.18.3. Líquidos penetrantes 55
2.18.4. Ultrasonidos 56
2.18.5. Radiografías 56
2.19. Ensayos destructivos 56
2.19.1. Ensayo de tracción 56
2.19.2. Ensayo de resiliencia (flexión por choque) 57
2.19.3. Ensayo de dureza 57

2.19.4. Ensayo microscópico y macroscópico 57
2.19.5. Ensayo de cortante 57
2.19.6. Ensayo de doblado 57
2.20. Calificación del procedimiento 58
2.20.1. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) 58
2.20.2. Registro de calificación del procedimiento (PQR) 58
2.20.3. Calificación de soldadores (WPQ) 58
CAPÍTULO III 59
HIPÓTESIS Y VARIABLES 59
3.1. Hipótesis general y específicas 59
3.1.1. Hipótesis General 59
3.1.2. Hipótesis Específicas 59
3.2. Variables independientes y dependientes 59
3.2.1. Variable Independiente 59
3.2.2. Variables Dependientes 59
3.3. Operacionalización de Variables e Indicadores 60
CAPÍTULO IV 62
METODOLOGÍA 62
4.1. Ámbito de estudio 62
4.2. Enfoque de la investigación 62
4.3. Tipo de investigación 62
4.4. Nivel de investigación 62
4.5. Diseño de la investigación 62
4.5.1. Diseño específico 62
4.6. Variables de la investigación 63
4.6.1. Variable independiente 63
4.6.2. Variables dependientes 63

4.7. Población y muestra 63
4.7.1. Población 63
4.7.2. Muestra 63
4.7.3. Técnicas 63
4.7.4. Instrumentos 64
4.8. Procedimiento de la investigación 64
4.9. Control de variables 64
CAPÍTULO V 66
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 66
5.1. Equipos utilizados en la investigación 66
5.1.1. Fuente de Poder 66
5.1.2. Equipo de ensayo de doblez guiado en U 66
5.1.3. Instrumentos utilizados en la investigación 67
5.1.3.1. Durómetro portátil 67
5.2. Material consumible de inspección 69
5.3. Materiales para la investigación 70
5.3.1. Cupones de acero inoxidable AISI 304 70
5.3.2. Consumibles 71
5.4. Soldabilidad de los Cupones 73
5.4.1. Cálculo del Cromo equivalente y Níquel equivalente 73
5.4.2. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con corriente continua con electrodo al polo positivo (CCEP). 76
5.4.3. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con corriente alterna. 80
5.5. Calor neto aportado 85
5.6. Cálculo del ancho de la zona afectada por el calor 86
5.7. Evaluación de la calidad de los cupones soldados 87
5.7.1. Inspección Visual 87

5.7.2. Inspección con tintes penetrantes 87
5.7.3. Ensayo de doblez guiado 92
5.7.4. Ensayo de dureza 100
CAPÍTULO VI 101
INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS 101
CONCLUSIONES 107
RECOMENDACIONES 109
Referencias 110
Anexos 114

Índice de tablas

Tabla 1 *Aceros inoxidables austeníticos (Catálogo electrodos SELECTARC 2003)* 9
Tabla 2 *Tipos de solidificación, reacciones y microestructuras resultantes* 21
Tabla 3 *Comparación entre corriente continua y corriente alterna*.....33
Tabla 4 *Cuadro de Defectos en la Soldadura del AISI 304* 53
Tabla 5 *Esquema de funcionamiento del ensayo de líquidos penetrantes* 55
Tabla 6 *Operacionalización de variables* 60
Tabla 7 *Características técnicas del durómetro portátil* 67
Tabla 8 *Composición química del AISI 304*.....70
Tabla 9 *Propiedades mecánicas del AISI 304, según norma ASTM A240* 70
Tabla 10 *Composición química (%)*.....72
Tabla 11 *Propiedades mecánicas* 72
Tabla 12 *Calor neto aportado en los cupones de experimentación*.....85
Tabla 13 *Valores del ancho de la ZA AISI 304*.....86
Tabla 14 *Resultados de la inspección visual.* 87
Tabla 15 *Resultados del ensayo de líquidos penetrantes*.....90
Tabla 16 *Resultados del ensayo de doblado* 99
Tabla 17 *Dureza promedio de la ZAC según aporte de calor - CC (Corriente Continua)* ..100
Tabla 18 *Dureza promedio de la ZAC según aporte de calor - CA (Corriente Alterna)*.....100

Índice de figuras

Figura 1 *Clasificación de aceros inoxidables* 9

Figura 2 *Microestructura del acero AISI 304 atacado con NaOH acuoso al 20% a 3 V con DC durante 20 segundos* 11

Figura 3 *Sistema ternario Fe-Cr-Ni, superficie líquida* 12

Figura 4 *Sistema ternario Fe-Cr-Ni, superficie sólida.* 13

Figura 5 *Esquemas que muestran la transformación de solidificación y post-solidificación en soldaduras de aceros inoxidables.* 14

Figura 6 *Estructura de solidificación en el centro de la soldadura (a) Acero inoxidable 310 (b) Acero inoxidable 309. Aumento 190x* 15

Figura 7 *Los diagramas de fases Fe-Cr-Ni seudo-binarios: (a) a 55% en peso de Fe, (b) a 63% en peso de Fe, (c) a 73% en peso de Fe.* 16

Figura 8 *Estructura de solidificación con enfriamiento de estaño líquido cerca del charco de soldadura en una soldadura GTAW de acero inoxidable 309.* 16

Figura 9 *Diagrama binario sistema Hierro-Cromo (7).* 17

Figura 10 *Tipos de solidificación para el diagrama de fase pseudobinario.* 21

Figura 11 *Diagrama de Schaeffler* 22

Figura 12 *Diagrama De Long* 23

Figura 13 *Diagrama WRC – 92 del acero AISI 304* 24

Figura 14 *Microestructura transversal de la soldadura de un acero inoxidable 304 endurecido por trabajo. (a) Antes de endurecer por trabajo, (b) metal base, (c) precipitación de carburos en el límite de grano, (d) recristalización, (e) crecimiento de grano enseguida del límite de fusión, (f) zona de fusión.* 26

Figura 15 *Fase sigma* 28

Figura 16 *Esquema del proceso SMAW.* 28

Figura 17 *Características del acero y de la soldadura bajo diferentes condiciones.* 30

Figura 18 *Soldeo con corriente alterna* 36

Figura 19 *Polaridad y penetración.* 38

Figura 20 *Modos de transferencia con electrodos revestidos* 41

Figura 21 *Características de la polaridad inversa (CCEP) con los electrodos revestidos* 41

Figura 22 *Características de la polaridad directa (CCEN) con los electrodos revestidos* 42
Figura 23 *Electrodos revestidos.* 43
Figura 24 *Designación del electrodo – Según AWS.* 44
Figura 25 *maquinas de soldar* 66
Figura 26 *Equipo de doblez* 67
Figura 27 *Durómetro portátil* 68
Figura 28 *Kit de tintes penetrantes* 69
Figura 29 *Tipo de unión* 71
Figura 30 *Electrodo E 308L-16* 73
Figura 31*Ubicación de los valores de cromo y níquel equivalentes en el diagrama de Schaeffler* 75
Figura 32 *Soldabilidad de los cupones* 84
Figura 33 *Cupones soldados* 84
Figura 34 *Tintes penetrantes* 87
Figura 35 *Aplicando el spray de limpieza sobre la superficie.* 88
Figura 36 *Probeta cubierta con el penetrante* 88
Figura 37 *Limpiando el penetrante.* 89
Figura 38 Aplicando revelador 89

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AISI = Instituto Americano del hierro y acero (American Iron and Steel Institute)

SMAW = Shielded metal arc welding (soldadura por arco con electrodo revestido)

GTAW = Gas Tungsten Arc Welding (Soldadura por arco con electrodo de tungsteno y gas protector)

SAW = Submerged Arc Welding (Soldadura por arco sumergido)

FCAW = Flux Cored Arc Welding (Soldadura por arco con alambre tubular con fundente)

AWS= Sociedad americana de soldadura (American Welding Society)

mm = Milímetro.

ANSI = Instituto americano de normas nacionales (American National Standards Institute)

ZF = Zona de fusión.

ZAC = Zona afectada por el calor.

MB = Metal base.

H= Energía de soldeo, en J/mm

V = Voltio

A = Amperio

v = velocidad de soldeo.

Tmax = Temperatura máxima

To = Temperatura inicial de la chapa.

Tm = Temperatura de fusión o temperatura del líquido del metal a soldar.

C = Calor específico del metal sólido.

Hnet = Energía neta aportada.

t = Espesor de la chapa a soldar.

ρ = Densidad del material

ρC = Calor específico volumétrico.

Y= Ancho de la zona afectada térmicamente.

R_C = Velocidad de enfriamiento en un punto del eje central del cordón de soldadura

°C/s

k= Conductividad térmica del metal

% = Porcentaje.

HB= Brinell Hardness (Dureza Brinell)

API = American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróeo)

Resumen

La investigación tuvo como objetivo comparar la penetración, la dureza y la zona afectada por el calor (ZAC) en soldaduras SMAW del acero inoxidable AISI 304 realizadas con corriente continua y corriente alterna. Se aplicó un enfoque cuantitativo. Se soldaron cupones de 4.5 mm de espesor con electrodo E308L-16, bajo aportes térmicos de 1232.8, 1808.2, 2054.7 y 2835.6 J/mm. Las uniones fueron evaluadas mediante inspección visual, líquidos penetrantes, doblado guiado, medición de penetración y dureza Brinell; adicionalmente, se estimó analíticamente el ancho de la ZAC. La penetración aumentó de 2.60 a 4.50 mm en corriente continua y de 2.40 a 4.50 mm en corriente alterna, mientras que el ancho estimado de la ZAC aumentó de 2.0 a 4.0 mm. La dureza se mantuvo entre 196 y 199 HB en corriente continua y entre 196 y 198 HB en corriente alterna; estas variaciones fueron reducidas y no permitieron establecer una relación concluyente con el aporte térmico ni con el tipo de corriente. Los aportes intermedios de 1808.2 a 2054.7 J/mm presentaron el comportamiento más favorable en penetración, doblado y control de discontinuidades. La condición de 2054.7 J/mm con corriente continua alcanzó penetración completa de 4.5 mm y obtuvo un resultado aceptable en el ensayo de doblado.

Palabras clave: Acero inoxidable AISI 304, Soldadura SMAW, Tipo de corriente, Penetración, Zona afectada por el calor

Abstract

This research aimed to compare penetration, hardness, and the heat-affected zone (HAZ) in shielded metal arc welds of AISI 304 stainless steel produced using direct current and alternating current. A quantitative approach was applied. Coupons with a thickness of 4.5 mm were welded using E308L-16 electrodes at heat inputs of 1232.8, 1808.2, 2054.7, and 2835.6 J/mm. The welded joints were evaluated through visual inspection, liquid penetrant testing, guided bend testing, penetration measurement, and Brinell hardness testing. In addition, the HAZ width was analytically estimated. Penetration increased from 2.60 to 4.50 mm with direct current and from 2.40 to 4.50 mm with alternating current, whereas the estimated HAZ width increased from 2.0 to 4.0 mm. Hardness remained between 196 and 199 HB with direct current and between 196 and 198 HB with alternating current. These small variations did not establish a conclusive relationship with either heat input or current type. Intermediate heat inputs ranging from 1808.2 to 2054.7 J/mm provided the most favorable behavior in terms of penetration, guided bending, and discontinuity control. The condition of 2054.7 J/mm with direct current achieved full penetration of 4.5 mm and an acceptable guided bend test result.

Keywords: AISI 304 stainless steel, SMAW welding, Current type, Penetration, Heat-affected zone.

Introducción

La soldadura de aceros inoxidables constituye un aspecto fundamental en múltiples sectores industriales, debido a las excelentes propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión que caracterizan a estos materiales. Entre ellos, el acero inoxidable AISI 304 destaca por su amplia aplicación en las industrias alimentaria, química, petroquímica y de fabricación de equipos, gracias a su buena soldabilidad y a su comportamiento frente a ambientes agresivos.

El proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) es uno de los métodos más utilizados para la unión de estos aceros por su versatilidad, bajo costo de implementación y facilidad de operación. Sin embargo, la calidad de las uniones soldadas depende de las variables de operación empleadas y, de manera particular, del tipo de corriente eléctrica, que influyen directamente en la estabilidad del arco, la distribución del calor, la penetración, la dureza y la extensión de la zona afectada por el calor (ZAC). La falta de información sistematizada sobre estos efectos puede conducir a una selección inadecuada de parámetros, generando defectos de soldadura, disminución de la resistencia mecánica y posibles fallas en servicio.

Frente a esta situación, la presente investigación tuvo como objetivo determinar el efecto del tipo de corriente en la penetración, la dureza y la zona afectada por el calor en soldaduras SMAW del acero inoxidable AISI 304. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo: se soldaron cupones de acero AISI 304 con electrodo E 308L-16, empleando corriente continua y corriente alterna con aportes de calor entre 1232.8 y 2835.6 J/mm, y la calidad de las uniones se evaluó mediante inspección visual, ensayo de líquidos penetrantes, ensayo de doblado y ensayo de dureza, complementándose con el cálculo analítico del ancho de la ZAC. Los resultados obtenidos aportan criterios prácticos para la selección de parámetros de soldadura, contribuyendo a mejorar la calidad, la seguridad y la eficiencia de las uniones soldadas en el ámbito industrial.

Para su desarrollo, la tesis se encuentra organizada en seis capítulos, cuyo contenido se describe brevemente a continuación:

El Capítulo I, Planteamiento del Problema, presenta el planteamiento y la formulación del problema de investigación, la justificación y los objetivos general y específicos del estudio.

El Capítulo II, Fundamentación Teórica, reúne los antecedentes internacionales y nacionales de la investigación, así como las bases teóricas sobre los aceros inoxidables austeníticos, la metalurgia de la soldadura, el proceso SMAW, el ciclo térmico y los ensayos destructivos y no destructivos.

El Capítulo III, Hipótesis y Variables, formula la hipótesis general y las hipótesis específicas, e identifica y operacionaliza las variables de la investigación.

El Capítulo IV, Metodología, describe el ámbito de estudio, el enfoque, el tipo, el nivel y el diseño de la investigación, así como la población, la muestra y las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

El Capítulo V, Procedimiento Experimental, detalla los equipos y materiales utilizados, el cálculo del calor neto aportado y del ancho de la ZAC, la soldadura de los cupones y la ejecución de los ensayos de calidad.

El Capítulo VI, Interpretación de los Resultados, analiza y discute los resultados obtenidos en cada ensayo. Finalmente, se presentan las conclusiones, las recomendaciones, las referencias bibliográficas y los anexos correspondientes.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.Planteamiento del Problema

La soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) es ampliamente utilizada en la industria debido a su versatilidad y bajo costo operativo, especialmente en la unión de aceros inoxidables como el AISI 304, material altamente valorado por su resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, la calidad de la unión soldada depende de múltiples variables del proceso, entre las cuales el tipo de corriente eléctrica empleada (corriente continua o corriente alterna, así como su polaridad) desempeña un papel fundamental.

El tipo de corriente influye directamente en la estabilidad del arco, la distribución del calor, la tasa de fusión del electrodo y, en consecuencia, en características críticas de la soldadura como la penetración, la dureza del cordón y la extensión de la zona afectada por el calor (ZAC). Estas propiedades son determinantes para el desempeño mecánico y la integridad estructural de la unión soldada, especialmente en aplicaciones donde el acero inoxidable AISI 304 está expuesto a condiciones exigentes.

A pesar de la importancia de estos parámetros, en muchos contextos industriales y académicos no se cuenta con información suficiente o sistematizada sobre cómo el tipo de corriente afecta específicamente la penetración, la dureza y la ZAC en soldaduras SMAW de este material. Esta falta de conocimiento puede conducir a la selección inadecuada de parámetros de soldadura, generando defectos, disminución de la resistencia mecánica y posibles fallas en servicio.

En este contexto, surge la necesidad de investigar y analizar el efecto del tipo de corriente en las propiedades mencionadas, con el fin de establecer relaciones claras que permitan un proceso adecuado de soldadura SMAW en el acero inoxidable AISI 304.

1.2.Formulación del problema objeto de investigación

1.2.1. Problema General

PG: ¿Cómo influira el tipo de corriente en la penetración, la dureza y la zona afectada por el calor (ZAC) en soldaduras SMAW del acero inoxidable AISI 304?

1.2.2. Problemas Específicos

PE1: ¿De qué manera el tipo de corriente afectará la penetración del cordón de soldadura en el acero inoxidable AISI 304?

PE2: ¿Cómo variara la dureza en el metal de soldadura y la ZAC al emplear diferentes tipos de corriente?

PE3: ¿Qué efecto tendrá el tipo de corriente en la extensión de la zona afectada por el calor (ZAC)?

1.3.Justificación

1.3.1. Justificación Ambiental

La optimización del proceso de soldadura SMAW contribuye directamente a la reducción del impacto ambiental de la industria metalmecánica. La selección adecuada del tipo de corriente y del aporte de calor disminuye el consumo innecesario de energía eléctrica, la cantidad de electrodos desechados y la generación de humos metálicos y residuos asociados a los retrabajos, ya que una unión soldada correctamente a la primera evita repetir el proceso con el consiguiente gasto de material y energía. Asimismo, al prolongarse la vida útil de las estructuras y equipos de acero inoxidable AISI 304, se reduce la frecuencia de reposición de componentes y, con ello, la demanda de nuevos recursos metálicos, favoreciendo prácticas más sostenibles en la fabricación y reparación de estructuras.

1.3.2. Justificación Social

Esta investigación contribuye a mejorar la calidad y la seguridad de las estructuras y equipos fabricados con acero inoxidable AISI 304, utilizados en sectores sensibles como la construcción, la industria alimentaria y la sanitaria, donde una falla de la unión soldada puede comprometer la inocuidad de los alimentos, la integridad de infraestructuras críticas y, en última instancia, la seguridad de las personas. Al establecer parámetros de soldadura confiables, se reducen las fallas estructurales en servicio y los riesgos asociados.

Adicionalmente, el conocimiento generado beneficia a los soldadores, técnicos y talleres metalmecánicos de la región del Cusco, quienes podrán aplicar criterios validados experimentalmente en su labor diaria, elevando la calificación de la mano de obra local y la confianza en los productos que fabrican.

1.3.3. Justificación Económica

Una adecuada selección del tipo de corriente reduce los defectos de soldadura, los retrabajos y el desperdicio de material de aporte, lo que disminuye de manera directa los costos de producción y de control de calidad. La identificación de un rango óptimo de aporte de calor permite, además, evitar el sobredimensionamiento de parámetros que consume energía y electrodos sin beneficio técnico. Por otra parte, las uniones soldadas de mejor calidad incrementan la vida útil de los componentes, generando ahorros significativos en mantenimiento, reparación y reemplazo de piezas, y evitando las pérdidas económicas derivadas de paradas de planta no programadas. Estos beneficios mejoran la competitividad de los talleres y empresas metalmecánicas que trabajan con aceros inoxidables.

1.3.4. Justificación Tecnológica

El estudio genera conocimiento técnico sobre la influencia del tipo de corriente en el proceso SMAW aplicado al acero inoxidable AISI 304, aportando criterios más precisos para la selección de parámetros de soldadura sustentados en ensayos destructivos y no destructivos. Esta información favorece la mejora y estandarización de procedimientos de soldadura, sirviendo de base para la elaboración de especificaciones de procedimiento (WPS) y para la calificación de soldadores conforme a los códigos AWS y ASME. Asimismo, promueve la innovación en las técnicas de unión de materiales al contrastar el desempeño de la corriente continua y la corriente alterna bajo condiciones controladas, conocimiento transferible a otros procesos y aleaciones de interés industrial.

1.3.5. Justificación Teórica

La investigación sistematiza y amplía el conocimiento existente sobre la relación entre el tipo de corriente, el aporte de calor y las propiedades de la unión soldada en aceros inoxidables austeníticos, un aspecto sobre el cual la información disponible se encuentra dispersa o resulta insuficiente para el caso específico del AISI 304 soldado por SMAW. Al contrastar los modelos analíticos de la literatura como el cálculo del calor neto aportado, el ancho de la ZAC y los diagramas de constitución de Schaeffler con resultados experimentales

propios, el estudio aporta evidencia que valida y delimita el alcance de dichos modelos, enriqueciendo el marco teórico de la metalurgia de la soldadura.

1.3.6. Justificación Práctica

Los resultados obtenidos son de aplicación inmediata en el taller: proporcionan al soldador y al supervisor de calidad una guía concreta para elegir el tipo de corriente y el rango de aporte de calor más conveniente según el requerimiento de la unión, reduciendo la práctica del ensayo y error que habitualmente se emplea en ausencia de información sistematizada. De esta manera, la investigación responde a una necesidad real del ejercicio profesional de la ingeniería metalúrgica y de la industria regional que trabaja con aceros inoxidables.

1.3.7. Justificación Metodológica

El trabajo propone un procedimiento experimental ordenado y replicable para la preparación de cupones, el cálculo del calor neto aportado, la soldadura bajo condiciones controladas y la evaluación mediante inspección visual, líquidos penetrantes, ensayo de doblado y ensayo de dureza conforme a criterios normalizados que puede servir de referencia metodológica para futuras investigaciones que evalúen otros materiales, procesos de soldadura o variables de operación, tanto en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica como en otras instituciones. Objetivo general y específicos.

1.4.Objetivos

1.4.1. Objetivo General

OG: Determinar el efecto del tipo de corriente en la penetración, la dureza y la zona afectada por el calor (ZAC) en soldaduras SMAW del acero inoxidable AISI 304.

1.4.2. Objetivos Específicos

OE1: Evaluar la influencia del tipo de corriente en la penetración del cordón de soldadura.

OE2: Analizar la variación de la dureza en el metal de soldadura y en la zona afectada por el calor (ZAC).

OE3: Determinar el efecto del tipo de corriente en el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC).

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1.Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Legña Oyacato Lizbeth (2021) en su trabajo de investigación, plantea como objetivo estudiar la soldabilidad de materiales disímiles de un acero inoxidable AISI 304 y acero al carbono ASTM A36 en placas y ASTM A500 en tubería, mediante el proceso de soldadura SMAW con el uso de cinco diferentes tipos de material de aporte E7018, E6010, E312, E308 y E309L. La presente investigación se inicia con la adquisición de los materiales, seguido por la caracterización de los materiales para garantizar la calidad de estos, después se realiza el corte y preparación de las juntas a ser soldadas por el proceso SMAW. Una vez soldados, se realizaron los ensayos no destructivos como la inspección visual, tintes penetrantes y rayos X. Posteriormente se realizaron los ensayos destructivos tales como ensayos de tracción, doblado de cara y raíz. Se realizaron los ensayos metalográficos y de dureza. Para concluir se describe el análisis y la comparación de los resultados obtenidos en el desarrollo experimental y así obtener un material de aporte óptimo para la soldadura de materiales disímiles.

Gomez Jimenez (2015), en su trabajo de investigación, plantea como objetivo estudiar la soldabilidad en ambiente húmedo de los aceros inoxidables austeníticos de la serie 300 mediante el proceso de soldadura manual por arco metálico "MMAW. Para lo cual se realizó un diseño factorial (22) usando diferentes condiciones de variables de proceso a fin de examinar su efecto sobre la calidad de la soldadura. El desarrollo fue el siguiente, se utilizó un espécimen (placa) de acero inoxidables AISI 304 como metal base, teniendo un tamaño de aproximadamente 13 x 15 cm y un espesor de 0.635 cm con una preparación de junta en V.

El metal de aporte utilizado fue un electrodo recubierto de acero inoxidable AWS E312-16 con un diámetro de 1/8".

Habiendo terminado las operaciones de soldadura los especímenes fueron inspeccionados visualmente a fin de detectar discontinuidades externas, después fueron cortados perpendicularmente con respecto a la dirección de soldadura usando la sierra cinta para seccionar la soldadura y realizar las pruebas de tensión y la cortadora de disco giratorio

para los cortes de metalografía. Llegándose a la conclusión de que los aceros inoxidables austeníticos de la serie 300 tienen muy buena soldabilidad, pero para lograr esto depende ampliamente del cuidado y la selección del metal de aporte y metal base adecuado para llevar a cabo un proceso de soldadura bajo el agua.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Alberco Medina (2020), en su trabajo de investigación, plantea como objetivo determinar el mejor procedimiento de soldadura para asegurar la calidad de la junta soldada en tuberías de acero inoxidable austenítico AISI 304 del sector alimenticio. En esta investigación se estudió la soldabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante un estudio comparativo de los procesos de soldadura GMAW y GTAW, para determinar el mejor procedimiento en estos tipos de aceros. Para la evaluación de ambos procesos se utilizaron ensayos destructivos y no destructivos. Los ensayos no destructivos comprendieron: ensayo de inspección visual y líquidos penetrantes mientras que los ensayos destructivos comprendieron ensayos de doblez, tracción y dureza. Todos estos ensayos se desarrollaron según los códigos de soldadura ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos) y AWS (Sociedad Americana de Soldadura). Para realizar la evaluación de los procesos de soldadura GMAW y GTAW se soldaron dos probetas con ambos procesos, las cuales fueron evaluadas con los ensayos no destructivos de inspección y líquidos penetrantes, luego se prepararon 8 probetas para el ensayo de doblez, 4 para el ensayo de tracción y 3 para el ensayo de dureza. Al realizar los ensayos no destructivos de inspección visual y líquidos penetrantes a las probetas de los procesos de soldadura GMAW y GTAW, ambas probetas pasaron los criterios de aceptación según los códigos de soldadura, sin embargo, se observó una mejor formación de raíz (cordón interior de la tubería). Al realizar los ensayos destructivos de doblez y de tracción, ambos procesos de soldadura obtuvieron un resultado aceptable según el criterio de aceptación del código de soldadura ASME IX.

Chávez Melgar (2007), en su trabajo de investigación, plantea como objetivo realizar un estudio de la influencia de los parámetros de soldadura mediante GTAW sobre la microestructura y la resistencia a la corrosión por picaduras del acero inoxidable dúplex 23Cr-4Ni. Se estudiaron cuatro condiciones soldadas mediante el proceso GTAW autógeno en donde se variaron el aporte de calor y la temperatura de precalentamiento. Se realizó el análisis microestructural para cada condición, además se sometieron a ensayos de dureza y ensayos de corrosión por picaduras. Se realizaron ensayos de microdureza Vickers, realizando barridos

verticales y horizontales en la sección del cordón con el fin de obtener indicadores de cambios en propiedades mecánicas en la soldadura realizada. Se determinó la resistencia a la corrosión por picaduras mediante ensayos de corrosión electroquímicos de polarización anódica en una solución de 3.5% NaCl, los cuales se orientaron a la obtención del potencial crítico de picaduras (Ecp) para cada condición. Llegando a la conclusión que la resistencia a la corrosión por picaduras disminuyó de manera significativa para las condiciones empleadas, resultando más afectadas, las condiciones que presentaron velocidad de enfriamiento menor. Se encontró nucleación preferencial de las picaduras en las interfaces ferrita/austenita y al interior de la ferrita. Por lo tanto, para el rango de calor de aporte empleado no se obtuvo una buena soldabilidad, ya que no se logra un balance apropiado de las fases según el análisis microestructural realizado y la resistencia a la corrosión por picaduras se ve afectada significativamente.

2.2.Marco Teórico

2.2.1. Acero Inoxidable

Los aceros inoxidables son aleaciones a base de hierro, con bajo contenido de carbono y un mínimo de 11% de cromo. La mayoría de los grados comerciales contiene al menos 11% de cromo y hasta 0.8% de carbono. Algunos grados contienen níquel como segundo elemento de aleación. Cuando el contenido total de la aleación excede aproximadamente el 50%, la designación “resistente al calor” es más aplicable que inoxidable. Su principal característica es su alta resistencia a la corrosión. Esta resistencia es debido a la formación espontánea de una capa de óxido de cromo en la superficie del acero. Aunque es extremadamente fina, esta película invisible está firmemente adherida al metal y es extremadamente protectora en una amplia gama de medios corrosivos. Dicha película es rápidamente restaurada en presencia del oxígeno, y así daños por abrasión, corte o mecanizados son reparados rápidamente.

2.2.2. Ventajas del Acero Inoxidable

a) Resistencia a la corrosión

Todos los aceros inoxidables tienen una alta resistencia a la corrosión. Los grados de baja aleación, resisten la corrosión en condiciones atmosféricas; los grados altamente aleados pueden resistir la corrosión en la mayoría de los medios ácidos, incluso a elevadas temperaturas.

b) Resistencia a la alta y baja temperatura

Algunos grados resisten grandes variaciones térmicas y mantendrán alta resistencia a temperaturas muy altas, otros demuestran dureza excepcional a temperaturas criogénicas.

c) Facilidad para la fabricación

La mayoría de aceros inoxidables pueden ser cortados, soldados, forjados y mecanizados con resultados satisfactorios.

d) Resistencia mecánica

La característica de endurecimiento por trabajo en frío de muchos aceros inoxidables, se usa en el diseño para reducir espesores y así, los costos. Otros aceros inoxidables pueden ser tratados térmicamente para hacer componentes de alta resistencia.

e) Estética

El acero inoxidable está disponible en muchas terminaciones superficiales. Se mantiene fácilmente dando por resultado una alta calidad.

f) Propiedades higiénicas.

La facilidad de limpieza del acero inoxidable lo hace la primera opción en hospitales, cocinas, e instalaciones alimenticias y farmacéuticas.

g) Ciclo de trabajo

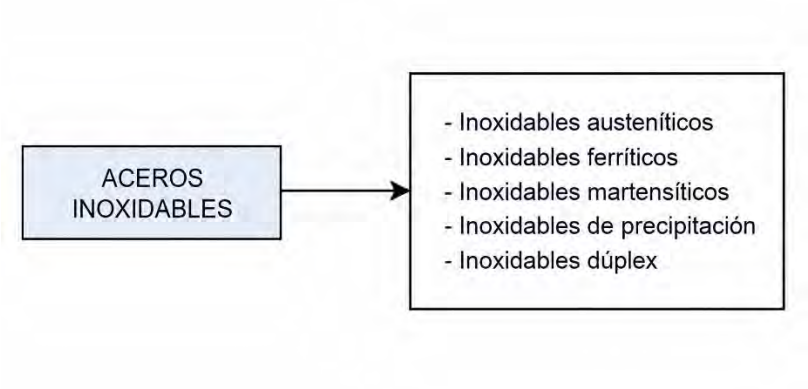
El acero inoxidable es un material durable, y es la opción más barata considerando el ciclo vital.

2.2.3. Clasificación de los Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables se dividen en cuatro grupos: Austeníticos, Martensíticos, Ferríticos y los que se endurecen por precipitación. Estas clasificaciones se refieren principalmente a la estructura de los aceros.

La figura 1, muestra la clasificación de los aceros inoxidables. (Di Caprio. G, (1999) “Los aceros inoxidables”, Milano, ed. Grupinox).

Figura 1 *Clasificación de aceros inoxidables*



Fuente: Di Caprio. G, (1999) "Los aceros inoxidables", Milano, ed. Grupinox

2.2.3.1. Aceros Inoxidables Austeníticos (Series 200 y 300)

Generalmente, estos aceros están compuestos de cromo, níquel y manganeso en hierro. No son magnéticos y tienen excelente resistencia a la corrosión, sin embargo, son susceptibles al agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Los aceros inoxidables austeníticos se endurecen mediante el trabajo en frío. Son los aceros inoxidables más dúctiles y se pueden formar con facilidad, aunque su formabilidad se reduce con mayor trabajo en frío. Se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones como: artículos de cocina, accesorios, construcción soldada, equipo ligero de transporte, partes para hornos e intercambiadores de calor y componentes para ambientes químicos severos (Kalpakjian, 2008).

La clasificación de este tipo de aceros inoxidables (serie 300) y su composición química se aprecia en la tabla 1.

Tabla 1

Aceros inoxidables austeníticos (Catálogo electrodos SELECTARC 2003)

	COMPOSICION NOMINAL, %					
AISI Nº	**C**	**Mn máx.**	**Si máx**	**CR**	**Ni**	**Otros ***
201	0.15 máx	5.5 - 7.5	1.00	16.00 - 18.00	3.50 - 5.50	0.25 máx. N
202	0.15 máx	7.5 - 10.0	1.00	17.00 - 19.00	4.00 - 6.00	0.25 máx. N
301	0.15 máx	2.00	1.00	16.00 - 18.00	6.00 - 8.00	-
302	0.15 máx	2.00	1.00	17.00 - 19.00	8.00 - 10.00	-

302B	0.15 máx	2.00	2.0 - 3.0	17.00 - 19.00	8.00 - 10.00	-
303	0.15 máx	2.00	1.00	17.00 - 19.00	8.00 - 10.00	0.15 mín. S
303 (Se)	0.15 máx	2.00	1.00	17.00 - 19.00	8.00 - 10.00	0.15 mín. Se
304	0.08 máx	2.00	1.00	18.00 - 20.00	8.00 - 10.50	-
304L	0.03 máx	2.00	1.00	18.00 - 20.00	8.00 - 12.00	-
305	0.12 máx	2.00	1.00	17.00 – 19.00	10.50 - 13.00	-
308	0.08 máx	2.00	1.00	19.00 - 21.00	10.00 - 12.00	-
309	0.20 máx	2.00	1.00	22.00 - 24.00	12.00 - 15.00	-
309S	0.08 máx	2.00	1.00	22.00 - 24.00	12.00 - 15.00	-
310	0.25 máx	2.00	1.00	24.00 - 26.00	19.00 - 22.00	-
310S	0.08 máx	2.00	1.00	24.00 - 26.00	19.00 - 22.00	-
314	0.25 máx	2.00	1.5 - 3.0	23.00 - 26.00	19.00 - 22.00	-
316	0.08 máx	2.00	1.00	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 3.00 Mo
316L	0.03 máx	2.00	1.00	16.00 - 18.00	10.00 - 14.00	2.00 - 3.00 Mo
317	0.08 máx	2.00	1.00	18.00 - 20.00	11.00 - 15.00	3.00 - 4.00 Mo
321	0.08 máx	2.00	1.00	17.00 - 19.00	9.00 - 12.00	5 x C mín. Ti
347	0.08 máx	2.00	1.00	17.00 - 19.00	9.00 - 12.00	10 x C mín Cb-Ta
348	0.08 máx	2.00	1.00	17.00 - 19.00	9.00 - 13.00	11 x C mín Cb-Ta

Fuente: Di Caprio. G, (1999) “Los aceros inoxidables”, Milano, ed. Grupinox

2.2.4. Acero Inoxidable AISI 304

El acero inoxidable austenítico AISI 304 es uno de los más usados en la actualidad debido a su buena resistencia a la corrosión y costo. Este acero posee gran resistencia a los ácidos más oxidantes lo cual hace más fácil desinfectar haciéndolo ideal para usos domésticos, alimenticios, químicos y farmacéuticos. Entre las debilidades de este acero está el ambiente costero y soluciones de cloruros los cuales le generan corrosión.

El acero AISI 304 presenta en su composición de 18 a 20 por ciento de cromo el cual le ayuda a generar la película protectora contra la corrosión, hasta 10.5 por ciento de níquel el cual también le ayuda a generar una película protectora y también carbono y manganeso los cuales le ayudan a tener buenas propiedades mecánicas.

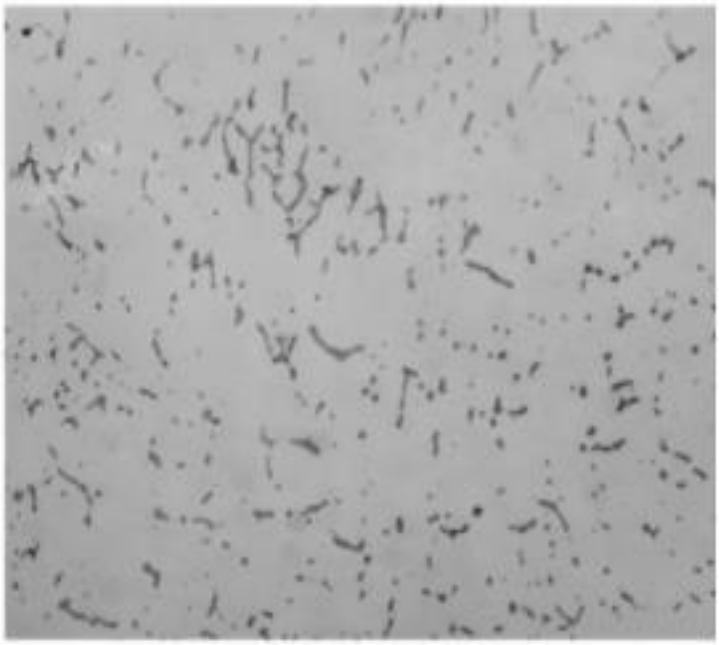
2.2.4.1. Microestructura del acero AISI 304

Las microestructuras de los aceros inoxidables pueden ser bastante complejas. Las estructuras de la matriz varían de acuerdo con el tipo de acero inoxidable como ferrítico, austenítico, martensítico, endurecible por precipitación o dúplex. Se puede observar un amplio

rango de constituyentes de segunda fase, con la soldadura o la exposición a alta temperatura incrementa la complejidad (ASM INTERNATIONAL, 2004).

En la Figura 2 se observa la microestructura del acero inoxidable AISI 304 atacado con hidróxido de sodio. Esta microestructura corresponde a una matriz austenítica con ferrita-delta en forma alargada.

Figura 2 *Microestructura del acero AISI 304 atacado con NaOH acuoso al 20% a 3 V con DC durante 20 segundos*



Fuente: ASM INTERNATIONAL (2004)

2.3. Transformación de ferrita a austenita en soldaduras de aceros inoxidables austeníticos

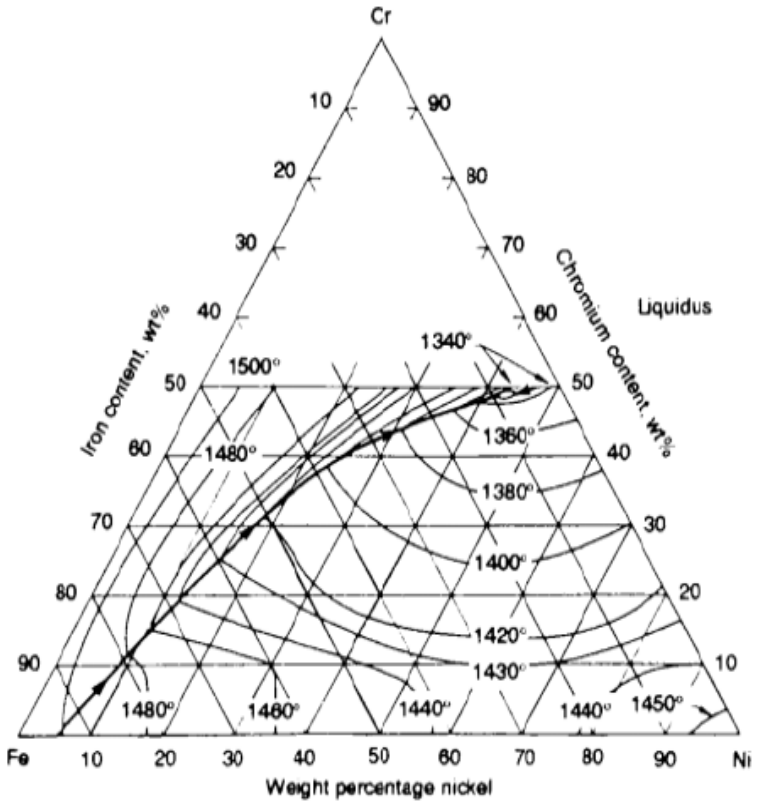
2.3.1. Modos de solidificación primaria

Las soldaduras de aceros inoxidables austeníticos normalmente tienen una matriz de austenita (FCC) con cantidades variables de ferrita-delta (BCC). Una cantidad adecuada de ferrita-delta en las soldaduras de aceros inoxidables austeníticos es esencial. Demasiada ferrita-delta (>= al 10% en volumen) tiende a reducir la ductilidad, dureza y resistencia a la corrosión; mientras que, muy poca ferrita-delta (<= al 5% en volumen) puede resultar en fisuras por solidificación (Kou, 2003).

2.3.1.1. Diagrama de fases

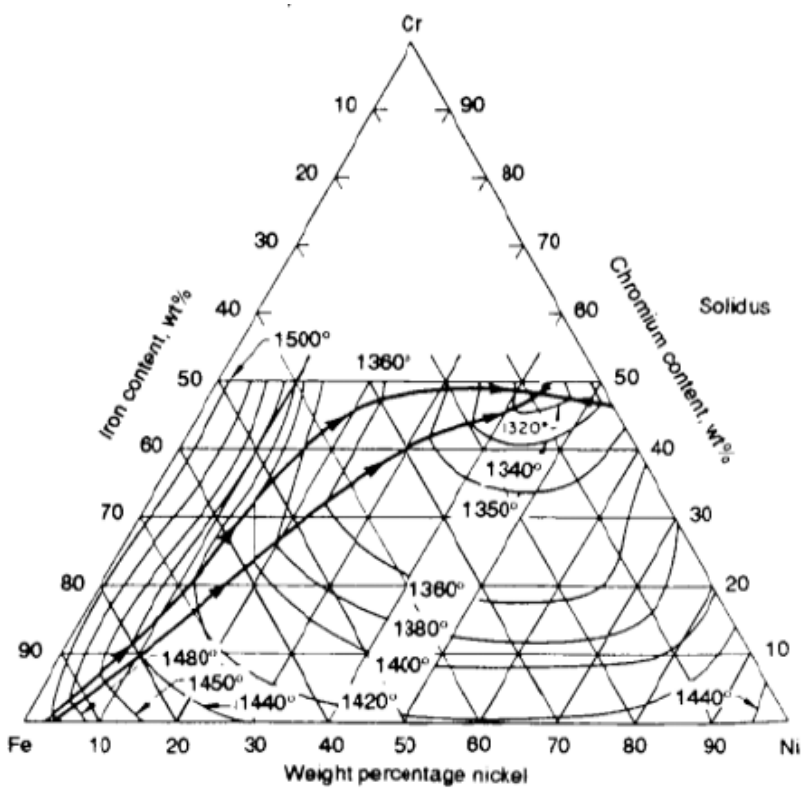
Las Figuras 3 y 4 muestran el diagrama de fase ternario del sistema Fe-Cr-Ni. La línea curva remarcada de la Figura 3 representa el canal en la superficie de líquido, la cual es conocida como la línea de saturación doble. La línea cae desde la temperatura de reacción peritéctica Fe-Ni hasta el punto eutéctico ternario en 49Cr-43Ni-8Fe. Las aleaciones con una composición rica en Cr (en la parte superior del diagrama) tienen ferrita-delta como fase de solidificación primaria, es decir, la fase sólida para formarse desde líquido. Por otro lado, las aleaciones con una composición rica en Ni (en la parte inferior del diagrama) tienen austenita como fase de solidificación primaria. Las curvas remarcadas en la superficie sólida de la Figura 4 siguen parcialmente la tendencia del canal líquido y convergen en la temperatura eutéctica ternaria.

Figura 3 *Sistema ternario Fe-Cr-Ni, superficie líquida*



Fuente: Kou, (2003)

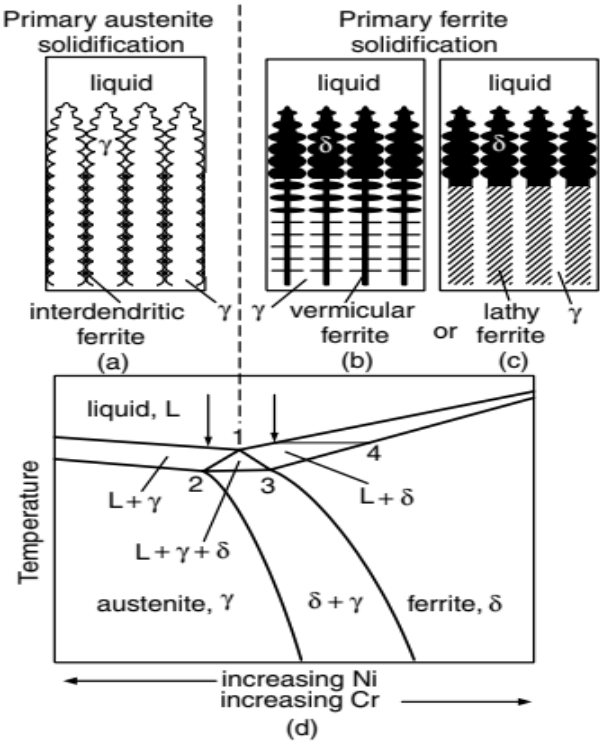
Figura 4 *Sistema ternario Fe-Cr-Ni, superficie sólida.*



Fuente: Kou (2003)

El desarrollo de la microestructura de la soldadura en los aceros inoxidables austeníticos se explica en la Figura 5. La ferrita del metal de soldadura puede tener tres tipos diferentes de morfología: interdendrítico (Figura 5.a), vermicular (Figura 5.b) y lathy (Figura 5.c). En la Figura 5.d se muestra una sección vertical del diagrama de fase ternario de la Figura 3, por ejemplo, al 70% en peso de Fe y sobre los 1200°C.

Figura 5 *Esquemas que muestran la transformación de solidificación y post-solidificación en soldaduras de aceros inoxidables.*



Fuente: Kou, (2003)

2.3.1.2. Austenita primaria

Para una aleación rica en Ni (lado izquierdo del triángulo eutéctico trifásico) la austenita (gamma) es la fase de solidificación primaria. Las dendritas claras en la Figura 5.a son austenita, mientras que las partículas oscuras entre las ramificaciones de dendrita primaria son ferrita-delta que se forma cuando el triángulo trifásico es alcanzado durante la etapa terminal de solidificación. Estas se conocen como ferrita interdendrítica. Para dendritas con ramales secundarios largos, las partículas de ferrita interdendrítica pueden también formarse entre ramificaciones de dendrita secundaria.

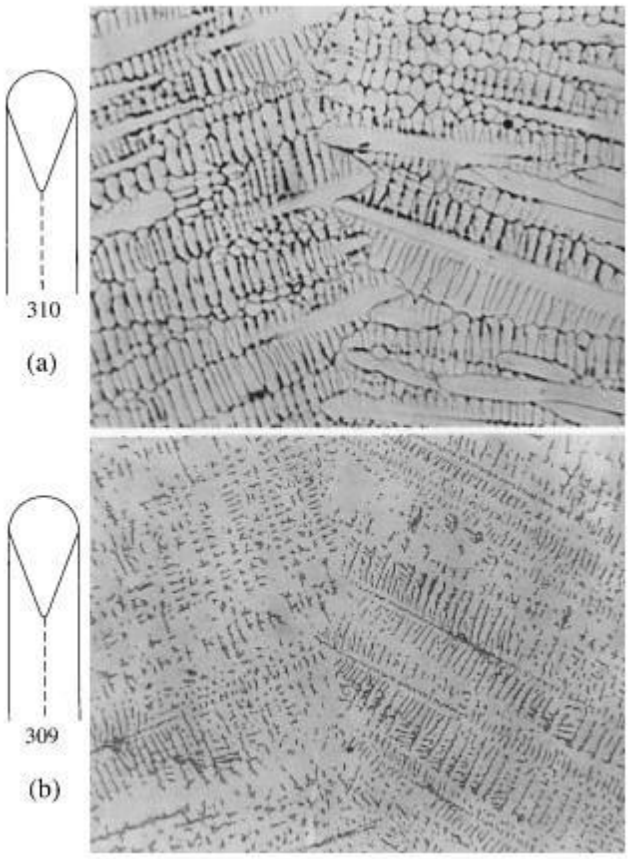
2.3.1.3. Ferrita primaria

En una aleación rica en Cr (lado derecho del triángulo eutéctico trifásico) la ferrita-delta es la fase de solidificación primaria. Las dendritas oscuras que se indican en la Figura 5.b son ferrita-delta. El núcleo de las dendritas de ferrita-delta, que se forma al inicio de la solidificación es más rico en Cr (punto 4), mientras que, las porciones más externas que se forman al reducirse la temperatura tienen contenidos de cromo más bajos.

2.3.1.4. Microestructura de la soldadura

La Figura 6 (a) muestra la estructura de solidificación en la línea central de una soldadura GTAW en una placa de acero inoxidable 310, la cual contiene aproximadamente 25% de Cr, 20% de Ni y 55% de Fe en peso.

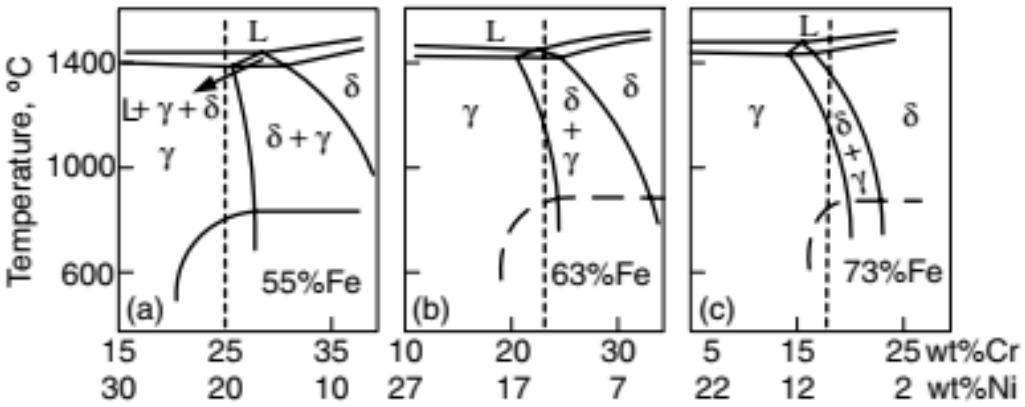
Figura 6 *Estructura de solidificación en el centro de la soldadura (a) Acero inoxidable 310 (b) Acero inoxidable 309. Aumento 190x*



Fuente: Kou (2003)

Por otro lado, la Figura 6 (b), muestra la estructura de solidificación en el centro de una soldadura GTAW de una placa de acero inoxidable 309, la cual contiene aproximadamente 23% en peso de Cr, 14% en peso de Ni y 63% en peso de Fe. La composición se ubica en el lado rico en Cr del triángulo eutéctico trifásico como se indica en la Figura 7.b y solidifica como ferrita-delta primaria. La microestructura consiste en ferrita-vermicular (oscura) en una matriz de austenita (clara).

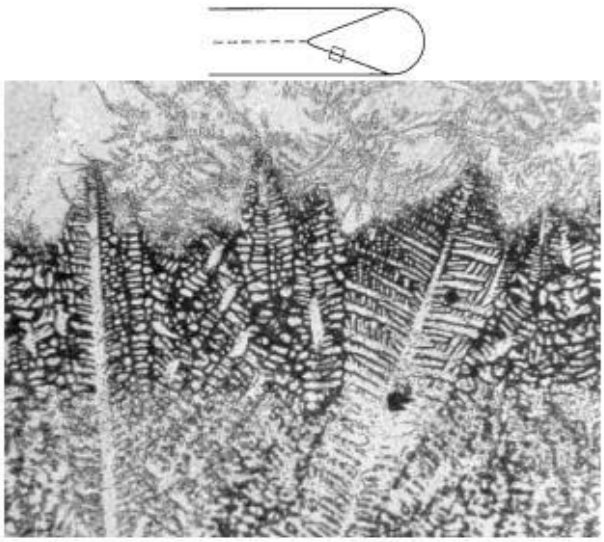
Figura 7 *Los diagramas de fases Fe-Cr-Ni seudo-binarios: (a) a 55% en peso de Fe, (b) a 63% en peso de Fe, (c) a 73% en peso de Fe.*



Fuente: Kou (2003)

Con la ayuda del enfriamiento, la evolución de la microestructura durante la soldadura puede ser estudiada de mejor manera. En la Figura 8 se pueden observar las dendritas de ferrita-delta (claras, atacadas con cloruro mixto) cerca al charco de soldadura de una soldadura GTAW de acero inoxidable 309, enfriada con estaño líquido antes de que ocurra la transformación δ → γ.

Figura 8 *Estructura de solidificación con enfriamiento de estaño líquido cerca del charco de soldadura en una soldadura GTAW de acero inoxidable 309.*



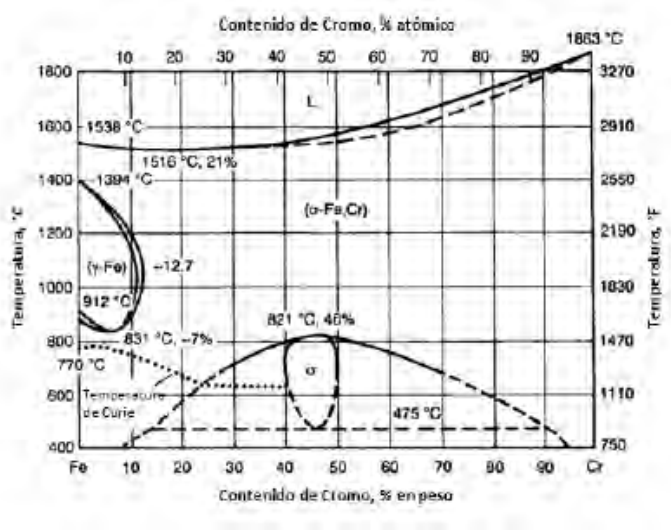
Fuente: Kou, (2003)

2.4.Metalurgia de los aceros inoxidables

Debido a que el elemento de aleación principal es el Cromo (Cr) el cual genera una capa pasiva resistente a la corrosión y estabiliza la estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) (7). Los aceros inoxidables y la estabilidad de sus fases son descritos en el diagrama Hierro-Cromo (Fe-Cr) (Figura 9), donde se pueden observar las diferentes fases que conforman la microestructura de los aceros, como la ferrita (α), Martensita (αM), Austenita (ϒ) y la fase Sigma (σ)

La microestructura de aceros con un contenido mayor a 12.7% en peso. Cr es totalmente Ferrítica a elevadas temperaturas. A bajas temperaturas aceros con un contenido de Cr mayor a 20% de Cr tienen en su microestructura la fase Sigma, la cual puede fragilizar al material (8). Los elementos aleantes que no son solubles en el hierro (impurezas) como el fósforo, azufre y oxígeno no tienen influencia en cuál fase se formará en el proceso de solidificación (7)

Figura 9 *Diagrama binario sistema Hierro-Cromo (7).*



Fuente: Kou (2003)

2.4.1. Efecto de los Elementos de Aleación

Los elementos de aleación de los aceros inoxidables tienen una característica principal y es de proporcionar excelentes propiedades mecánicas y hacerlos más resistentes a la corrosión. A continuación, se muestra el efecto de cada elemento aleante en los aceros inoxidables.

- Cromo (Cr). Elemento principal de aleación en los aceros inoxidables. A partir de un porcentaje de 10.5-13% le confiere a este tipo de aceros la alta resistencia a la corrosión.
- Níquel (Ni). Aumenta la ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión en ambiente ácido. Es un elemento altamente Gamágeno (que promueve la formación y estabilización de la Austenita). En los aceros inoxidables endurecibles por precipitación, forma compuestos intermetálicos que aumentan la resistencia mecánica.
- Cobre (Cu). Aumenta la resistencia a la corrosión en ambientes ácidos y es un elemento Gamágeno. En los aceros inoxidables endurecibles por precipitación, forma compuestos intermetálicos que aumentan la resistencia mecánica.
- Manganeso (Mn). Aumenta la ductilidad en caliente. Sus propiedades alfágenas o gamágenas varían dependiendo de la temperatura. A altas temperaturas favorece la formación de ferrita y a baja temperatura es un gran estabilizador de la Austenita. Aumenta la solubilidad del Nitrógeno (N), por lo que es usado en aceros inoxidables con altos contenidos de este elemento.

Silicio (Si). Incrementa la resistencia a la corrosión en altas y bajas temperaturas en ambientes fuertemente oxidantes.

- Carbono (C) y Nitrógeno (N). En los aceros inoxidables ferríticos disminuye la tenacidad y la resistencia a la corrosión. En los aceros inoxidables austenomartensíticos y martensíticos aumenta la resistencia mecánica y la dureza, disminuyendo la tenacidad. Es un elemento energéticamente Gamágeno.
- Titanio (Ti) y Niobio (Nb). Elemento fuertemente alfágeno. Formador de carburos con lo que disminuye el C presente. En los aceros inoxidables austeníticos estabiliza y aumenta la resistencia a la corrosión intergranular y las propiedades mecánicas a altas temperaturas.
- Aluminio (Al). En cantidades sustanciales mejora la resistencia a la oxidación. En los inoxidables endurecibles por precipitación aumenta la resistencia al formar compuestos intermetálicos.
- Cobalto (Co). Mejora la templabilidad especialmente a elevadas temperaturas.
- Azufre (S). Aumenta la maquinabilidad, disminuye la resistencia a la corrosión, la ductilidad, soldabilidad y la resistencia a altas temperaturas.
- Cerio (Ce). Perteneciente a las tierras raras, se añade en pequeños porcentajes para mejorar la resistencia a altas temperaturas, aumentando la resistencia a la oxidación y a la corrosión a elevadas temperaturas.

2.5.Soldabilidad

La soldabilidad es la capacidad de los materiales para ser unidos de manera duradera, mediante los procesos de soldadura, sin alterar transformaciones estructurales, deformaciones o tensiones que puedan provocar problemas.

Según la American Welding Society (AWS), "la soldabilidad es la capacidad de un material a ser soldado bajo las condiciones impuestas de fabricación en una específica estructura apropiada y desempeñarse satisfactoriamente en el servicio previsto." (Messler, 2008)

2.5.1. Tipos de Soldabilidad

2.5.1.1. Soldabilidad metalúrgica

Se refiere a no presentar los cambios estructurales en la unión soldada o variaciones en las propiedades físico-químicas durante el proceso de soldadura.

2.5.1.2. Soldabilidad operativa

Establece el estudio de las distintas actividades realizadas en cuestiones tecnológicas y de ejecución de las uniones soldadas durante el proceso de la soldadura.

2.5.1.3. Soldabilidad constructiva

Generalmente analiza las propiedades del conjunto soldado y su orientación al agrietamiento. Estudia el antes, durante y el después del conjunto soldado. Aquí influyen las propiedades físicas del material base como lo es la contracción y la dilatación que afectan las tensiones y deformaciones, las cuales provocan el agrietamiento de la unión soldada.

2.5.2. Soldabilidad de Aceros Inoxidables Austeníticos

Los aceros inoxidables son aquellos que presentan mejores propiedades para ser soldados, debido a que no presentan ningún problema en los procesos de soldadura por haz de electrones, por rayo láser, por arco, o por procesos de fricción y resistencia.

La soldabilidad es muy buena por lo que realizar incorrectamente el proceso de soldadura puede llegar a presentar problemas, así como en el cordón de soldadura y metal base, mencionando algunos como: fragilización, fisuración en caliente y la sensibilización o pérdida de resistencia a la corrosión intergranular. (Bencomo, 2009)

2.5.2.1. Factores que actúan en la soldabilidad

Los factores que intervienen en el estudio de soldabilidad son los siguientes:

- Tipo de material base, espesor
- Secuencia del proceso de soldadura
- Influencia de elementos aleantes
- Tipo de junta y proceso de soldadura
- Temperatura de precalentamiento del material
- Energía suministrada
- Velocidad de enfriamiento

Los parámetros mencionados tienen que ser tomados correctamente para obtener una soldadura de excelente calidad. Pueden existir otros factores que afecten la soldabilidad por ejemplo la alineación o predisposición del material, el índice de fluidez y las condiciones de trabajo.

2.6.Metalurgia de la soldadura

La microestructura en la zona de fusión de los aceros inoxidables austenítico depende de dos factores que son el comportamiento de la solidificación y las transformaciones subsecuentes en estado sólido. Los aceros inoxidables austeníticos pueden solidificarse como ferrita primaria o austenita primaria dependiendo de la composición especifica.

2.6.1. Evolución de la microestructura en la zona de fusión

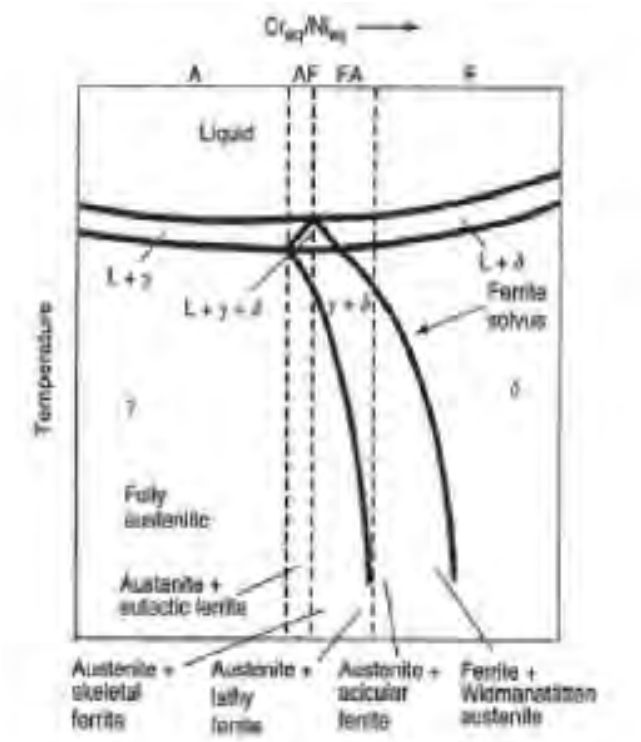
La microsegregación es un fenómeno que se produce durante la soldadura y no se puede evitar. Este fenómeno provoca un cambio en las fases resultantes de la solidificación y además altera sus composiciones.

La microsegregación de los elementos principales (Cromo [Cr], Níquel [Ni]) en los aceros inoxidables soldados, se han investigado teniendo en cuenta los diferentes modos de solidificación se puede comentar que en los aceros con modo de solidificación austenítico, las regiones interdendríticas están ligeramente enriquecidas en cromo y níquel.

Existen 4 posibles solidificaciones y transformaciones en el estado sólido para la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos que se muestra en la Tabla 2 y tienen relación con el diagrama de fase Fe – Cr – Ni en la Figura 10. En dicha figura se muestran las solidificaciones tipo A y AF que están asociadas con la solidificación de la austenita primaria,

razón por la que la austenita es la primera fase que se forma durante la solidificación. Las solidificaciones de tipo FA y F tienen ferrita delta como fase primaria, debido a la inestabilidad de la ferrita a bajas temperaturas.

Figura 10 *Tipos de solidificación para el diagrama de fase pseudobinario.*



Fuente: D. Kotecki y J. Lippold (2005)

Tabla 2 *Tipos de solidificación, reacciones y microestructuras resultantes*

Tipo de Solidificación	Reacción	Microestructura
Austenita (A)	$L \rightarrow L + A \rightarrow A$	Completamente austenítico, buena definición de la estructura solidificada.
Austenita – Ferrita (AF)	$L \rightarrow L + A \rightarrow L + A + (A + F)_{eut}$ $\rightarrow A + F_{eut}$	Ferrita en las fronteras de las dendritas.
Ferrita – Austenita (FA)	$L \rightarrow L + F \rightarrow L + F + (F + A)_{per/eut}$ $\rightarrow F + A$	Ferrita columnar resultado de la transformación ferrita a austenita.
Ferrita (F)	$L \rightarrow L + F \rightarrow F \rightarrow F + A$	Ferrita acicular o una matriz ferrítica con austenita en el límite de grano y placas al lado de Widmanstätten.

Fuente: D. Kotecki y J. Lippold, (2005)

El acero inoxidable austenítico AISI 304 por lo general sufre solidificaciones de tipo AF y FA.

2.7.Diagramas de Constitución

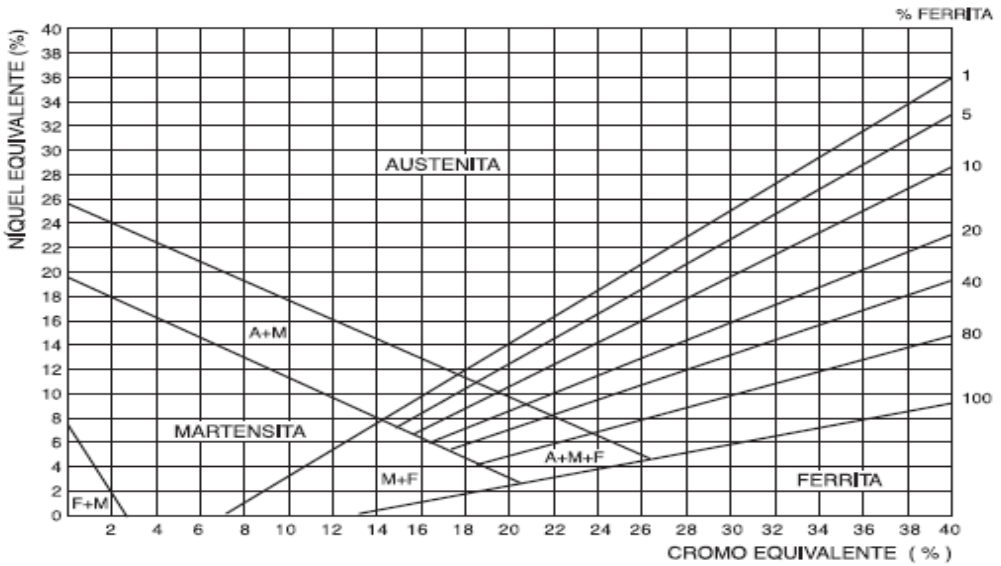
El uso de los diagramas de constitución permite predecir el comportamiento de la soldadura de los aceros inoxidables. Se conoce que el estudio está enfocado a los efectos de la composición en la microestructura de la soldadura.

2.7.1. Diagrama de Schaeffler

El diagrama de Schaeffler es utilizada para predecir la microestructura del metal de soldadura a partir de su composición química, relacionando los elementos estabilizadores de austenita y ferrita mediante los valores de níquel equivalente (Nieq) y cromo equivalente (Creq). Su aplicación permite estimar las fases presentes después del proceso de solidificación, como austenita, ferrita o martensita, así como determinar la susceptibilidad a problemas metalúrgicos durante la soldadura, principalmente la fisuración en caliente.

El diagrama de Schaeffler (figura 11) permite incrementar la capacidad de pronosticar cuantitativamente la microestructura del metal soldado, principalmente en la región de dos fases ferrita delta y austenita. (D. Kotecki y J. Lippold, 2005)

Figura 11 *Diagrama de Schaeffler*



Fuente: British stainless-steel association (2017)

El diagrama muestra el dominio de las fases martensítica, austenítica y ferrítica propias de los aceros inoxidables cuando estos son enfriados a las velocidades de soldadura.

Utilizando las relaciones equivalentes del diagrama de Schaeffler (Cromo y Níquel equivalente) está dada por el porcentaje en peso de los elementos de aleación, Seferian desarrollo una expresión para calcular la cantidad de ferrita delta presente en el metal de soldadura de los aceros inoxidables austeníticos

- **Cromo equivalente (Cr_eq):**

$$Creq = \%Cr + \%Mo + 1.5(\%Si) + 0.5(\%Nb) \qquad \text{Ecuación 1}$$

- **Níquel equivalente (Ni_eq):**

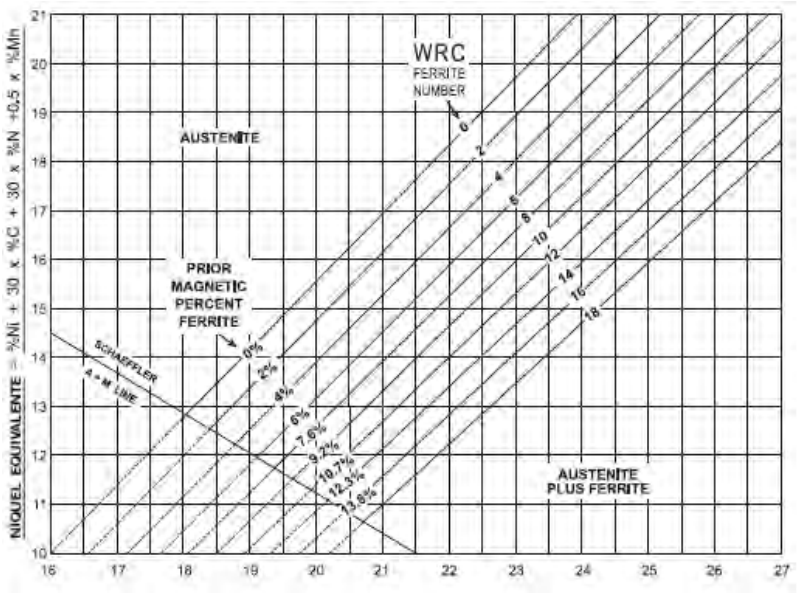
$$Nieq = \%Ni + 30(\%C) + 0.5(\%Mn) \qquad \text{Ecuación 2}$$

2.7.2. Diagrama de Long

El diagrama De Long es una variación del diagrama de Schaeffler, para la determinación de la ferrita en el proceso de soldadura. De Long incluyó Nitrógeno en níquel equivalente. Este diagrama no es recomendado para soldaduras tratadas térmicamente y materiales bases afectados por el calor.

La Figura 12 muestra los niveles de ferrita en las bandas, tanto como porcentajes basados en determinaciones metalográficas y el número de la ferrita (FN). Los valores del FN se fundamentan en mediciones magnéticas, las cuales son posibles debido a que la ferrita delta tiene una estructura BCC y la austenita no. (D. Kotecki y J. Lippold, 2005)

Figura 12 *Diagrama De Long*



Fuente: British stainless-steel association (2017)

Las unidades FN no se relacionan directamente al porcentaje de la ferrita, sin embargo, con valores menores a 10 tendrán un porcentaje de ferrita similar.

El subcomité de investigación de la soldadura en el año 1973 adoptó el FN como el medidor de la cantidad de la ferrita y los métodos de calibración que están especificados en la norma AWS A4.2 e ISO 8249.

2.7.3. Diagrama de WRC - 1992

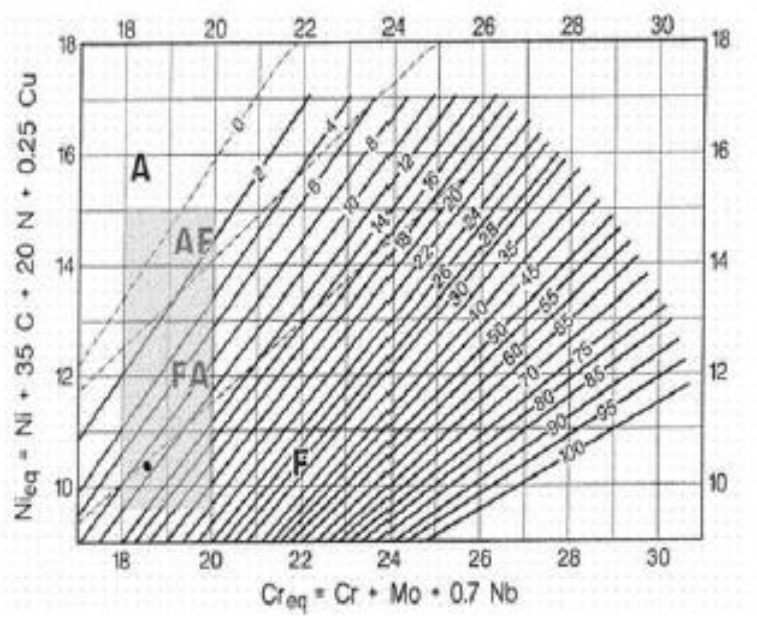
El diagrama de WRC-1992 nos proporciona información sobre las propiedades de la soldadura de los distintos tipos de microestructura, en función de lo que los elementos de aleación que contienen. El cromo equivalente se calcula mediante el porcentaje en peso de elementos estabilizadores de ferrita y níquel equivalente se calcula mediante el porcentaje en peso de elementos de estabilización de austenita.

Otra forma de calcular es utilizando las siguientes fórmulas:

$Creq = Cr + Mo + 0.7Nb$

$Nieq = Ni + 35C + 20\ N + 0.25Cu$

Figura 13 *Diagrama WRC – 92 del acero AISI 304*



Fuente: D. J Kotecki and T. A. Siewert, (1992)

El diagrama de WRC es aceptado hoy en día como una versión mejorada de la Schaeffler o el diagrama de Long.

2.8.Zona afectada por el calor (ZAC)

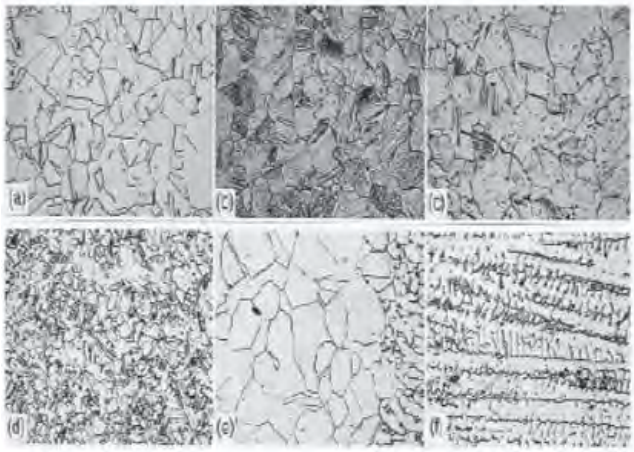
La zona afectada por el calor en los aceros austeníticos depende de la composición y la microestructura del metal base. El material algunas veces puede verse afectado durante el proceso de soldadura, ya que esta zona se calienta y se enfría, en algunos casos esta zona se vuelve frágil y puede presentar grietas, mientas en otros casos puede perder su dureza.

A continuación, se describen algunas reacciones metalúrgicas que pueden ocurrir en la ZAC de las aleaciones austeníticas:

- La zona afectada por el calor muestra un considerado crecimiento de grano siendo evidente que los granos más grandes están más próximos a la zona de fusión del material base.
- El control de las propiedades de la zona afectada por el calor puede ser realizado con la aplicación de tratamientos térmicos después de la soldadura, en otros casos se puede dar un cambio en las variables de soldadura.
- El tamaño de la ZAC depende de algunos factores como: el proceso de soldadura, potencia efectiva, espesor del material, metal de aporte, diseño de la junta, velocidad de enfriamiento, etc.

La Figura 14 muestra el crecimiento de grano severo de la zona afectada por el calor dando lugar a granos gruesos en la zona de fusión debido al crecimiento epitaxial. La microestructura del mismo material antes de endurecer por trabajo, se puede ver en la figura 14.

Figura 14 *Microestructura transversal de la soldadura de un acero inoxidable 304 endurecido por trabajo. (a) Antes de endurecer por trabajo, (b) metal base, (c) precipitación de carburos en el límite de grano, (d) recristalización, (e) crecimiento de grano enseguida del límite de fusión, (f) zona de fusión.*



Fuente: (ASM Metal Handbook Volume 09, 1992)

2.8.1. Crecimiento del grano

El crecimiento de grano es restringido ya que los aceros inoxidables austeníticos son soldados en su condición recocida o laminada en caliente al menos que la energía de soldadura sea muy alta. Cuando estos son trabajados en frio los aceros se recristalizarán y luego se dará el crecimiento de grano.

2.8.2. Formación de ferrita

La formación de ferrita se produce a mayores relaciones de cromo/níquel (Cr/Ni); a lo largo de la ZAC, en el límite de grano, prohibirá el crecimiento de grano y también minimizará la susceptibilidad al agrietamiento. El grado de formación de la ferrita es por lo general bajo, ya que la transformación de austenita a ferrita es relativamente inactiva y el ciclo térmico en la ZAC es bastante rápido.

2.9.Problemas durante la soldadura de los aceros inoxidables

Existen tres grandes problemas y estos son los de sensibilización, formación de fisuras y el rol de ferrita y la fase sigma.

2.9.1. Sensibilización

Es la precipitación del cromo en el área adyacente al borde del grano, provoca una cantidad insuficiente de cromo para que se mantenga la protección necesaria de la película de óxido. La soldadura de estos aceros produce áreas adyacentes al cordón que alcanzan las temperaturas antedichas, debido a ello estos aceros se sensibilizan en dos bandas paralelas al cordón de soldadura levemente alejadas de éste.

2.9.2. Formación de fisuras y el rol de la ferrita

La formación de fisuras de solidificación se da bajo condiciones de uniones extremas, produciendo las fisuras alrededor de la soldadura. Una cantidad pequeña de ferrita, alrededor de un 2 a 5%, liberará a la soldadura de las fisuras de solidificación. La ferrita aumenta el tamaño de grano, lo cual reduce la concentración de segregaciones en impurezas dañinas, que permanecen dentro de los límites y propicia la nucleación de fisuras.

La presencia de pequeñas cantidades de ferrita provee un número de soluciones, evita la fisuración en caliente, mejora la resistencia mecánica y en algunas ocasiones la resistencia a la corrosión. La cantidad de ferrita no debe ser mayor de 12 - 15% debido a que ella, en el diagrama Fe-Cr, se transforma en fase sigma, aumentando los riesgos de fisuración, así como también disminuye la resistencia a la corrosión. (Ramón Cortes, P., Jaime Villanueva A., Ernesto Ponce L., 2004.)

2.9.3. Fase sigma

La fase sigma es un compuesto intermetálico de hierro (Fe) – cromo (Cr) duro y frágil, que puede ser removido mediante un calentamiento a la temperatura de 1010ºC, en donde éste se disolverá, como muestra la Figura 14. Estos son los pequeños trazos rectos y negros que se encuentran en forma desordenada. Además, se observa una grieta que cruza la micrografía por el centro.

La formación de esta fase, se produce a trabajos de altas temperaturas 590°C a 930ºC, o a la fabricación de piezas que requieren tener un tratamiento térmico de alivio de tensiones, reduciendo notablemente su ductilidad. A temperaturas de 730ºC, la fase sigma se puede formar rápidamente, pero cuando se tiene temperaturas a bajas es necesario un mayor tiempo para su formación. Una variación en la composición, cambiará la velocidad de formación de esta fase y la temperatura a la cual se inicia. (Ramón Cortes, P., Jaime Villanueva A., Ernesto Ponce L., 2004.)

Figura 15 *Fase sigma*



Fuente: (Ramón Cortes, P., Jaime Villanueva A., Ernesto Ponce L., 2004.)

2.10. Soldadura por arco con electrodo revestido (Shielded metal arc welding -SMAW)

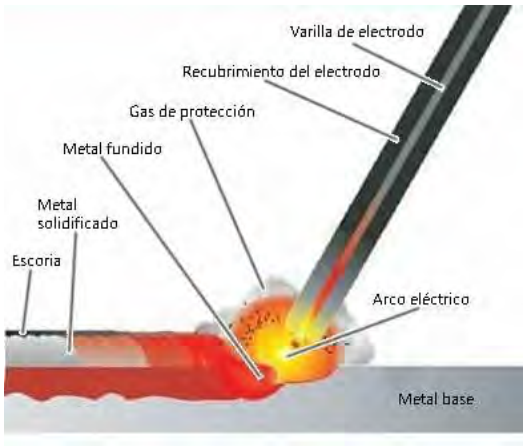
2.10.1. Descripción del proceso

Es un método de soldadura manual. Se establece un circuito eléctrico entre la fuente de poder, el electrodo, el arco de soldar, la pieza de trabajo y de regreso a la fuente de poder (ver figura 16).

Los electrones, que se mueven en el espacio entre los electrodos y la pieza producen un arco que genera calor necesario para fundir tanto a la propia varilla como al metal base. El arco puede sobrepasar los 3300ºC.

En la punta del electrodo se forman glóbulos de metal derretido, que se caen y se mezclan con el charco de metal fundido que se forma en la pieza de trabajo. Al retirar el electrodo, la mezcla de metales se solidifica y con esto se completa el cordón de soldadura.

Figura 16 *Esquema del proceso SMAW.*



Fuente: (American Welding Society)

2.10.2. Ventajas y limitaciones

Ventajas

- El equipo de soldeo es relativamente sencillo, no muy caro y portátil.
- El metal de aportación y los medios para su protección durante el soldeo proceden del propio electrodo revestido. No se necesita protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares.
- Es menos sensible al viento que los procesos por arco con protección gaseosa. No obstante, el proceso debe emplearse siempre protegido del viento, lluvia y nieve.
- Se puede emplear en cualquier posición, en locales abiertos y en locales cerrados, incluso con restricciones de espacio. No requiere conducciones de agua de refrigeración ni tuberías o botellas de gases de protección, por lo que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de corriente.
- Es aplicable para una gran variedad de espesores, en general mayores de 2 mm.
- Es aplicable a la mayoría de los metales y aleaciones de uso normal.

Limitaciones

- Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición, y por la necesidad de retirar la escoria, por lo que en determinadas aplicaciones ha sido desplazado por otros procesos.
- Requiere gran habilidad por parte del soldador.
- No es aplicable a metales con bajo punto de fusión, como plomo, estaño, zinc y sus aleaciones, debido a que el intenso calor del arco es excesivo para ellos. Tampoco es aplicable a metales de alta sensibilidad a la oxidación como el Ti, Zr, Ta y Nb, ya que la protección que proporciona es insuficiente para evitar la contaminación por oxígeno de la soldadura.
- No es aplicable a espesores inferiores a 1,5-2 mm.
- La tasa de deposición es inferior a la obtenida con procesos con hilo continuo.
- El proceso no resulta productivo para espesores mayores de 38 mm. Serán más adecuados los procesos SAW y FCAW.

2.10.3. Aplicaciones

Es uno de los procesos de mayor utilización, especialmente en soldaduras de producción cortas, trabajos de mantenimiento y reparación, así como en construcciones de campo. La mayor parte de aplicaciones se dan con espesores entre 3 y 38 mm.

El proceso es aplicable a aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros altamente aleados (inoxidables), fundiciones y metales no férreos como aluminio, cobre, níquel y sus aleaciones.

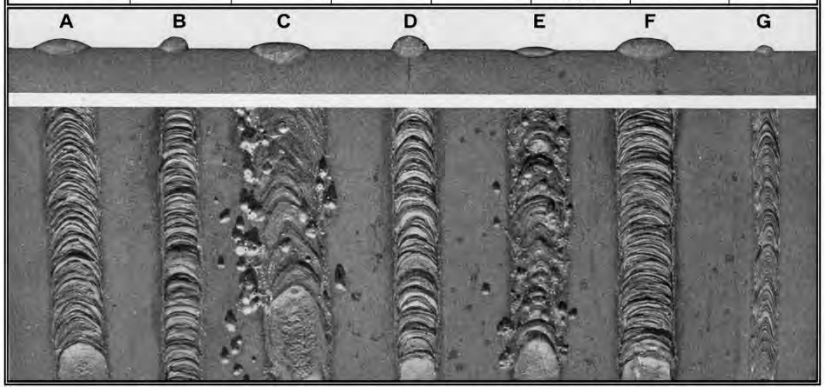
Los sectores de mayor aplicación son la construcción naval, de máquinas, estructuras, tanques y esferas de almacenamiento, puentes, recipientes a presión y calderas, refinerías de petróleo, oleoductos y gasoductos y en cualquier otro tipo de trabajo similar. Se puede emplear combinado con otros procesos de soldeo. Por ejemplo, en tubería se suele utilizar en combinación con el proceso TIG. La raíz se realiza con TIG completándose la unión con electrodos revestidos.

2.10.4. Variables del proceso

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

Figura 17 *Características del acero y de la soldadura bajo diferentes condiciones.*

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



Fuente: (Oerlikon, 2008, pág. 71)

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

- **Variables Preseleccionadas**: Entre ellas se encuentran el diámetro del alambre-electrodo, composición química del mismo. Los criterios que permiten una adecuada selección de estas variables son: tipo de material a ser soldado, su espesor, posición de soldadura, régimen de transferencia metálica deseada y propiedades mecánicas necesarias.
- **Variables Primarias**: Son las que controlan el proceso después que las Variables Preseleccionadas, controlan la forma del cordón, la estabilidad del arco, el régimen de soldadura (velocidad de aporte y cantidad de metal adicionado) y la calidad de soldadura. Estas variables son: tensión de arco, corriente de soldadura y la velocidad de avance. (Caraballo, 2014, pág. 2).

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

2.10.4.1. Diámetro del electrodo

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

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

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

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

2.10.4.2. Intensidad de corriente

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

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

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

2.10.4.3. Longitud de arco

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

Es conveniente mantener siempre la misma longitud del arco, con objeto de evitar oscilaciones en la tensión e intensidad de la corriente y con ello una penetración desigual. Un arco demasiado corto puede ser errático y producir cortocircuitos durante la transferencia de metal, un arco demasiado largo perderá direccionalidad e intensidad, además el gas y el fundente generados por el revestimiento no son tan eficaces para la protección del arco y del metal de soldadura, por lo que se puede producir porosidad y contaminación del metal de soldadura con oxígeno e hidrógeno.

2.10.4.4. Velocidad de soldeo

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

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

"En la práctica, hay que intentar que el arco vaya ligeramente adelantado al baño, pero depende de la posición de soldadura". (Alonso, 2012, pág. 70)

2.10.4.5. Corriente del proceso de soldadura

Cuando se tiene que realizar la selección del tipo de corriente necesaria, el tipo de electrodos que se va a utilizar es el factor fundamental a la hora de seleccionar tanto el tipo de corriente como el equipo. El primer determinante que hay que tener en cuenta es la disponibilidad de corriente en el lugar donde se van a realizar las tareas de soldadura; todavía la corriente continua (CC) es el tipo de corriente más utilizada para la soldadura; no obstante, cada vez hay un mayor número de electrodos que utilizan la corriente alterna (CA) como tipo de corriente de alimentación. En la tabla 3, se da la comparación entre la corriente continua y corriente alterna. (Alonso, 2012, pág. 70)

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

Tabla 3

Comparación entre corriente continua y corriente alterna

Parámetro	Corriente Alterna	Corriente Continua
Cebado de arco	No es fácil especialmente en diámetros pequeños, se debe añadir sustancias para facilitar el cebado.	Fácil
Mantenimiento del arco	Debido al cambio de polaridad, es más difícil de mantener estable el arco.	Fácil de mantener el arco.

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

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

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

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

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

2.11. Soldadura con corriente continua y corriente alterna

2.11.1. Soldeo con corriente continua

Al soldar con corriente continua, la polaridad no cambia, de manera la pieza o el electrodo podrán actuar como un único polo, ánodo o cátodo, no pudiendo cambiar. Esto condiciona la distribución de energía sobre la pieza o el electrodo.

Sobre el ánodo, polo +, inciden los electrones. Estos presentan una masa pequeña, m, pero una alta velocidad de desplazamiento, V, gracias a la tensión aplicada que tiende a

acelerarlos. En consecuencia, presentan una elevada energía cinética. Cuando estos electrones inciden sobre el ánodo, transforman toda esta energía cinética en calor, Q, por lo que el ánodo recibe aproximadamente el 70% de la energía generada en el proceso de soldeo.

Sobre el cátodo, polo -, inciden los cationes presentes. Estos presentan una masa grande, M, pero una baja velocidad de desplazamiento, v. En consecuencia, presentan una baja energía cinética. Cuando estos cationes inciden sobre el cátodo, transforman esta energía cinética en calor, q, por lo que el cátodo recibe aproximadamente el 30% de la energía generada en el proceso de soldeo.

Resumiendo:

- Ánodo (polo +): Receptor de e- → ↑ Ec = m V2/2 → Recibe un calor Q (aprox. 70%)
- Cátodo (polo -): Receptor de cationes → ↓ Ec = M v2/2 → Recibe un calor q (aprox. 30%)

Un segundo aspecto de crucial importancia es el efecto decapante que se produce en el cátodo.

Al abandonar los electrones la superficie del material, generan un efecto físico de arrastre de las películas de óxidos superficiales, efecto fundamental para la eliminación de las capas de óxidos refractarios que generan algunos materiales como el aluminio o el titanio.

Teniendo en cuenta el anterior reparto de energías y el efecto decapante que sufre el cátodo, resulta sencillo intuir la importancia de la elección de la polaridad cuando se suelda con corriente continua, dependiendo de que nos interese concentrar el calor sobre la pieza o sobre el electrodo, o de que existan capas de óxidos refractarios.

Así, por ejemplo, cuando se suelda con electrodo no consumible, TIG o plasma, interesa que el calor se concentre sobre la pieza, por lo que normalmente se trabaja con el electrodo actuando como cátodo. En cambio, en el soldeo MIG/MAG, se suele trabajar con el electrodo actuando de ánodo para incrementar la tasa de deposición y la productividad.

En consecuencia, cuando se suelda con corriente continua, es necesario distinguir dos tipos de polaridades:

- Polaridad directa. Cuando el electrodo está conectado al polo negativo, actuando como cátodo. También se la conoce como corriente continua electrodo negativo, CCEN, o CC-.
- Polaridad inversa. Cuando el electrodo está conectado al polo positivo, actúa como ánodo. También se la conoce como corriente continua de electrodo positivo, CCEP, o CC+.

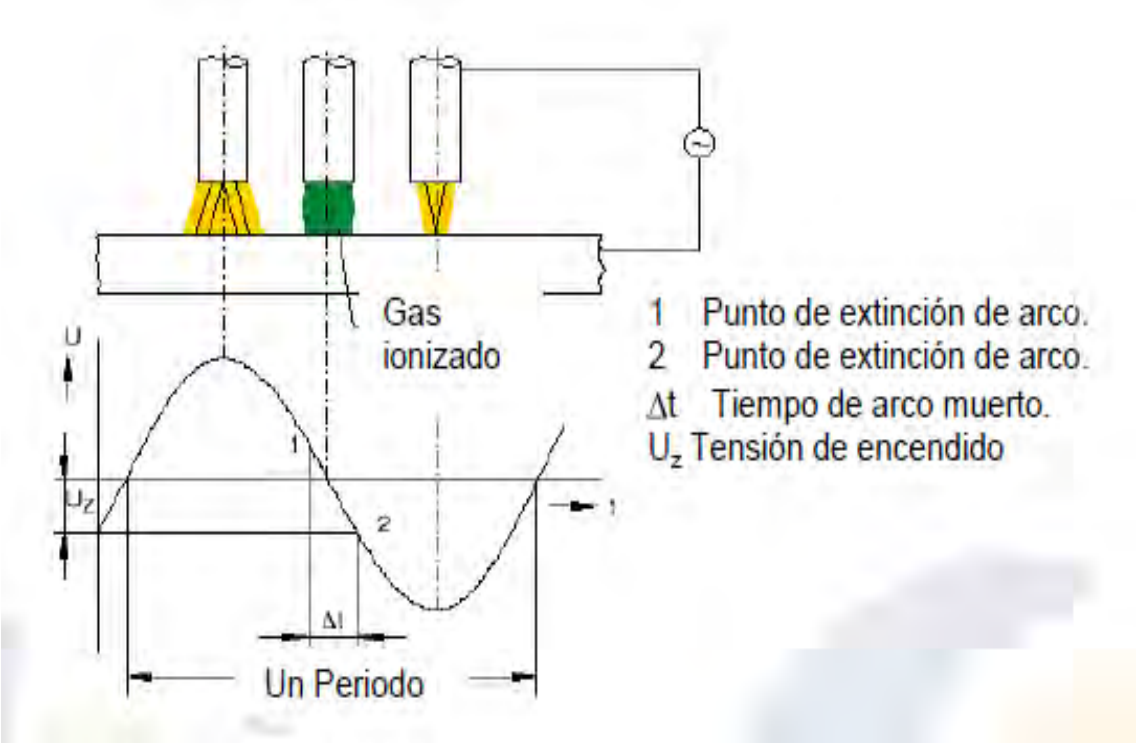
2.11.2. Soldeo con corriente alterna.

Cuando se establece un arco en corriente alterna, el electrodo actúa de ánodo durante medio ciclo y de cátodo durante el otro medio ciclo, produciendo alternativamente un ciclo en el que el electrodo actúa de positivo y de negativo; este cambio, en Europa, se produce 100 veces por segundo y por tanto, es imperceptible a simple vista.

Debido a este cambio continuo, el soldeo en corriente alterna aúna, aunque de forma reducida, los efectos de las dos polaridades en la corriente continua.

Sin embargo, no siempre es fácil mantener un arco eléctrico en corriente alterna, ya que la tensión que suministra la fuente de energía está variando continuamente. Para mantener el arco eléctrico encendido, es necesario que la tensión sea mayor de un cierto valor mínimo (Uz, ver figura 18). Si la tensión no alcanza ese valor, el arco se extinguirá; puede volver a encenderse si, al superar la tensión Uz, el cátodo no se ha enfriado demasiado.

Figura 18 *Soldeo con corriente alterna*



Fuente: (American Welding Society)

2.12. Tipo de corriente y penetración

Atendiendo al reparto de energías, cabría pensar que la mayor penetración durante el soldeo se debería obtener con el electrodo conectado al polo negativo, ya que en estas condiciones, el 70% de la energía se concentra sobre la pieza.

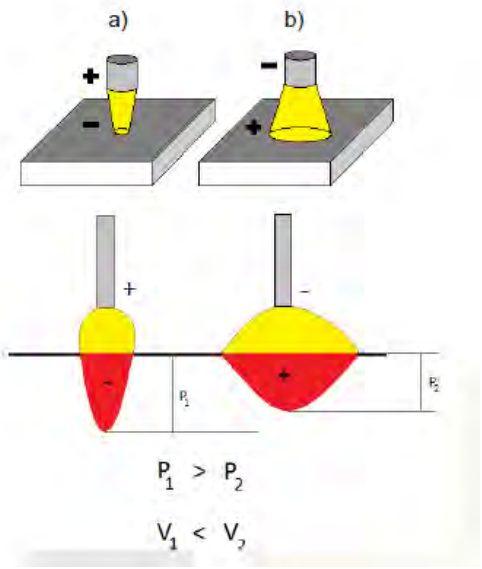
En la realidad esto no siempre es así ya que hay que tener en cuenta la dispersión que sufren los electrones. Esto hace que el arco eléctrico tienda a abrirse desde el polo negativo en forma de cono, haciendo que la mancha anódica sea muy superior a la mancha catódica. Dicho de otro modo, sobre el ánodo se concentra una energía Q, que se distribuye sobre una superficie A, mientras que sobre el cátodo se concentra una energía q, que se distribuye sobre una superficie a. La mayor penetración dependerá de la relación entre el calor aportado y la superficie sobre la que se distribuye, esto es, Q/A, o q/a.

Con polaridad inversa, los iones que son partículas de masa chocan sobre el metal base, penetrando debido al impacto sobre el baño de fusión. Además, en el arco cuya forma es cónica, los electrones fluyen del cátodo hacia el ánodo. Esto hace que la zona del cátodo se mantenga estable en una pequeña superficie de donde emana el flujo de electrones, mientras que el ánodo se distribuye sobre una superficie mayor, debido al desplazamiento inestable de los electrones que atraviesan la columna de plasma. Con polaridad inversa la chapa hace de cátodo, donde hay mayor densidad de energía, es decir mayor cantidad de electrones por milímetro cuadrado. A pesar de que el polo negativo tenga menos temperatura, la mayor densidad de energía concentra el calor en menor área, lo que sumado al impacto de los iones de masa sobre el baño de fusión, produce mayor penetración del metal depositado como se ilustra en la figura 19-a.

Por el contrario, con polaridad directa, los electrones no producen transferencia de masa, son cargas eléctricas que se desplazan a gran velocidad y que, a su paso impactan con las moléculas y átomos de los gases, así como sobre la superficie de la chapa. Sin embargo, a pesar de que el impacto de los electrones produce mayor temperatura sobre el baño de fusión, la base del cono del arco está sobre la chapa y, en consecuencia, el calor se distribuye en un área mayor, siendo la densidad de energía sobre la superficie del baño de fusión menor que en el soldeo con polaridad inversa (figura 19-b).

Esto se ha demostrado con varios procesos de soldeo por arco con electrodo consumible, tanto con electrodos revestidos, como con alambres macizos y tubulares, inclusive con flejes macizos y con fundente interior. La figura 19 muestra este efecto.

Figura 19 *Polaridad y penetración.*



Fuente: (American Welding Society)

Resumiendo:

- Ánodo (polo +): Recibe un calor Q sobre una superficie A → Densidad energética = Q/A.
- Cátodo (polo -): Recibe un calor q sobre una superficie a→ Densidad energética = q/a.

Que se obtenga una mayor penetración conectando el electrodo al polo positivo (ánodo) o al polo negativo (cátodo), dependerá de cuanto diverjan los electrones. Por ejemplo, en el soldeo plasma, se constriñe el arco, consiguiéndose una divergencia menor, a la vez que se aprovecha la emisión termoiónica del tungsteno, con lo que se consigue mayor penetración con el electrodo conectado al polo negativo. En cambio, cuando se suelda con electrodo revestido, los electrones tienden a divergir en gran medida, obteniéndose una mayor penetración con el electrodo conectado al polo positivo.

También es crucial tener en consideración como la transferencia de masa en el arco, cuando existe, afecta a la penetración. Por ejemplo, soldando con arco spray, la transferencia

de masa se realiza mediante gotas de muy pequeño que se proyectan a alta velocidad, lo que favorece la transmisión de energía a la pieza y aumenta la penetración.

2.13. Características del proceso de soldeo

2.13.1. Soldeo con electrodo revestido.

Los procesos con escoria tienen también diferentes resistencias de arco debido a los componentes de los fundentes, por ejemplo, la tensión para el soldeo de electrodos de rutilo es menor que la tensión para el soldeo con electrodos básicos. Esto se debe a que la conductividad eléctrica del rutilo es casi constante desde la temperatura ambiente hasta la temperatura del arco, mientras que los compuestos básicos, en general, son malos conductores a temperatura ambiente, y solamente se convierten en sustancias conductoras cuando la temperatura es mayor a unos 900^0 C. Además, la fluorita es un compuesto que eleva la tensión del arco, se ha demostrado que la presencia de fluorita puede elevar la tensión del arco hasta en 10 Voltios más que con los electrodos de rutilo, este efecto se incrementa en polaridad directa, por lo que resulta aconsejable soldar los electrodos básicos con polaridad inversa. En este proceso es posible soldar tanto con corriente continua como con corriente alterna. Con polaridad directa el rendimiento, de fusión (Kg / hora) es mayor que en polaridad inversa, pero con menor penetración. Los electrodos que mejor se adaptan a esta polaridad son los de rutilo, además tienen la ventaja de que el aspecto de los cordones es mejorado notablemente en comparación con la polaridad inversa. Debido al lento enfriamiento de la escoria, el baño de fusión tiene mayor tiempo de solidificación, con lo que puede deformarse en caliente, de modo que parte de los esfuerzos de contracción actúan en esta deformación y los esfuerzos residuales en la unión son menores. La polaridad directa es recomendable para el soldeo de chapa delgada (<3mm), y con electrodos rutilo-básicos se puede soldar buenas pasadas de raíz con excesiva separación entre chapas.

Con polaridad inversa se obtiene mayor penetración, es usual para el soldeo de los electrodos básicos y en general, para los inoxidables. También para los metales no ferrosos como el aluminio, el cobre, los bronces y latones se utilizan esta polaridad, especialmente en el aluminio ejerce el efecto decapante sobre la capa de alúmina. Con la corriente alterna se tiene una combinación de ambas polaridades, sin embargo, debido a la tensión baja en cada cambio de ciclo, es notoria cierta inestabilidad del arco para los electrodos básicos. Los electrodos de rutilo se adaptan fácilmente por su elevada conductividad eléctrica, sin embargo, se observa que hay mayor cantidad de proyecciones, con lo que el rendimiento de fusión

disminuye. La penetración es intermedia entre la obtenida con polaridad directa e inversa. Hay ausencia de soplo de arco. La inestabilidad del arco con la corriente alterna hace imposible el soldeo con electrodos de aluminio.

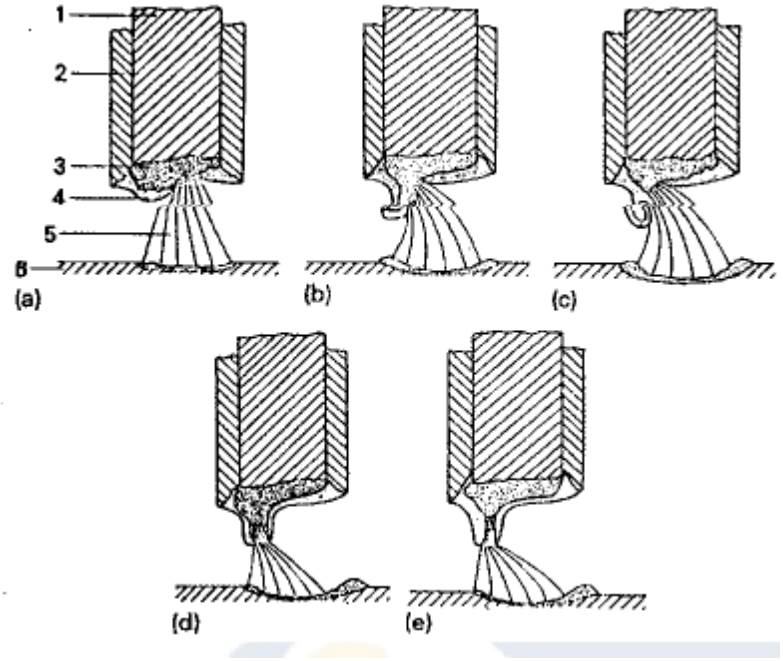
La escoria líquida emite iones positivos de los elementos alcalinos y esto ayuda a mantener la continuidad de la soldadura con corriente alterna. Además, la conductividad eléctrica de la escoria de rutilo es muy alta, inclusive a temperatura ambiente, facilitando el encendido del arco, mientras que la escoria básica tiene baja conductividad eléctrica a temperatura ambiente, elevándose esta propiedad con la temperatura; a temperaturas mayores a 900 °C, la escoria básica tiene muy buena conductividad eléctrica. En la soldadura con electrodos consumibles, la varilla o alambre actúa como fuente calorífica y metal de aportación. Es necesario estudiar, por tanto, la manera en que se produce dicha transferencia de masa. La mayor parte del trabajo que se ha realizado, está referido a electrodos revestidos y las fuerzas que intervienen en el proceso son:

- Electromagnéticas.
- Tensión superficial.
- Gravitatorias,
- Presiones en el foco catódico.
- Fuerzas debidas a la corriente gaseosa procedente del revestimiento.
- Fuerzas debidas a la formación de burbujas de gas dentro de la gota líquida.

La figura 20 muestra los modos de transferencia de metal en electrodos revestidos. Tras una fase inicial (a), comienza la deformación del metal y la escoria líquida por efecto de la presión en el cátodo (b), después se produce la separación de la gota por efecto de la tensión superficial (c). De forma alternativa, puede suceder que el arco se mueva hasta la punta de proyección (d) y la separación de la gota sea debida a fuerzas electromagnéticas (e). En resumen, las características representadas en la figura 21, para la polaridad inversa (CCEP) con los electrodos revestidos son:

- Cordones poco anchos, con mayor penetración.
- Excesiva acumulación de calor en el electrodo, que puede provocar su
- Sobrecalentamiento y rápido deterioro incluso a bajas intensidades de corriente.
- Se produce el efecto de decapado o limpieza de óxidos, facilitándose el soldeo de
- Algunas aleaciones como las de aluminio y magnesio.

Figura 20 *Modos de transferencia con electrodos revestidos*



Fuente: (American Welding Society)

(a) Fase inicial;

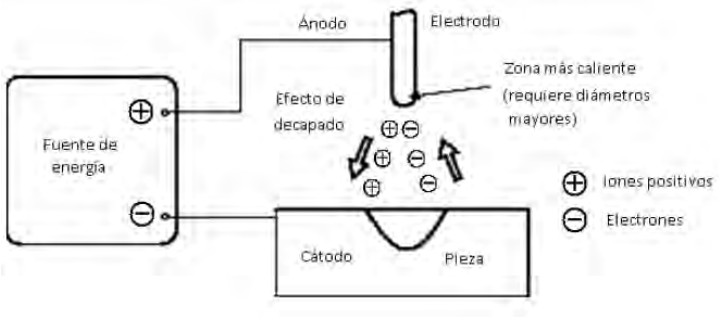
(b) Deformación del metal líquido debida a la presión en la raíz del arco;

(c) Separación de la gota debido a la tensión superficial;

(d) Movimiento del arco a la punta de la gota;

(e) Separación de la gota mediante fuerzas electromagnéticas.

Figura 21 *Características de la polaridad inversa (CCEP) con los electrodos revestidos*



Fuente: (Tecnologías de Unión CESOL)

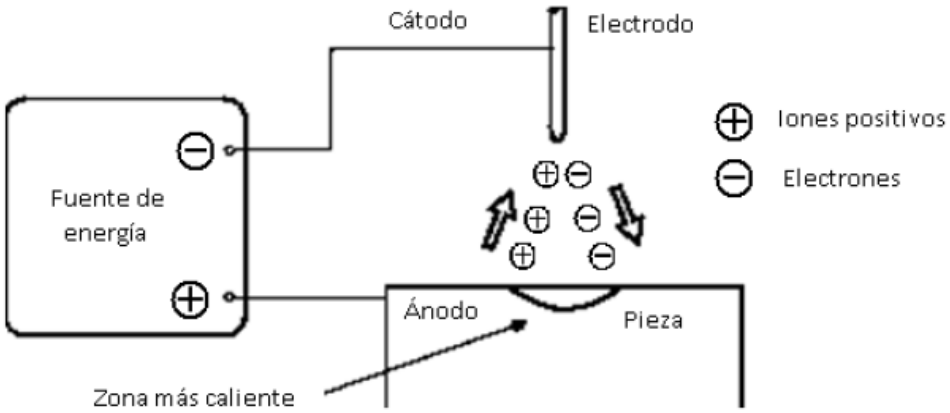
Si se conecta el electrodo al polo negativo (CCEN) y las piezas a soldar al positivo, serán las piezas las que se calientan más intensamente. La figura 22 representa las características de la polaridad directa (CCEN) con los electrodos revestidos, que son:

Cordones más anchos con menor penetración.

El electrodo soportará intensidades del orden de ocho veces mayores que si estuviese conectado al polo positivo, ya que se calienta menos.

No se produce el efecto de decapado sobre las piezas, por lo que si se quisiera soldar aleaciones con capas refractarias deberían decaparse químicamente antes del soldeo.

Figura 22 *Características de la polaridad directa (CCEN) con los electrodos revestidos*



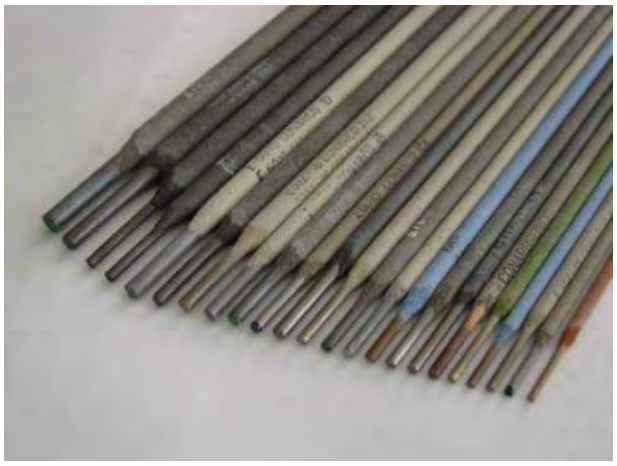
Fuente: (Tecnologías de Unión CESOL)

Un caso particular constituye el soldeo de tuberías con electrodos celulósicos. En la Norma API 1104 no se menciona nada con respecto a la polaridad, pero la práctica común es soldar la pasada de raíz con polaridad directa, para facilitar el manejo del baño de fusión al soldar en vertical descendente, y luego soldar todas las demás pasadas con polaridad inversa. Se observa una reacción especial del revestimiento de los electrodos celulósicos que permiten realizar buenas pasadas de raíz en polaridad directa, siendo la principal causa la gran aportación de calor por el arco eléctrico suministrada por la combustión de la celulosa del revestimiento que al producir CO2 genera gran cantidad de calor por ser una reacción exotérmica, lo cual unido a la mayor temperatura de la pieza (parte anódica), la penetración es total, asegurando así una estanqueidad local y perfecta de la unión.

2.14. Electrodos

Un electrodo es una varilla metálica especialmente preparada para servir como material de aporte en los procesos de soldadura por arco. En la figura 23, se observa un grupo de electrodos revestidos.

Figura 23 *Electrodos revestidos.*



Fuente: (Root Machinery LLP)

Tienen como misión servir de metal de aportación en el cordón de soldadura y ser conductor de la energía eléctrica necesaria para que salte el arco y se inicie la fusión. El metal fundido del electrodo cae sobre el cráter originado por la fusión del metal base y forma el baño de fusión. Este al solidificar da lugar al cordón de soldadura que establece la unión entre las dos piezas.

Existen electrodos desnudos y revestidos.

Los primeros, formados por un hilo metálico de una determinada composición química están prácticamente en desuso en la actualidad, ya que presentan inconvenientes tales como dificultad de encendido y mantenimiento del arco y producen cordones irregulares. Favorecen la absorción del oxígeno y nitrógeno en el metal fundido y reducen las características mecánicas de la soldadura.

El gran desarrollo que ha experimentado la soldadura por arco se debe en gran parte a las mejoras introducidas en el revestimiento de los electrodos. Estos están formados por una varilla metálica cilíndrica, que constituye el alma y un recubrimiento que la rodea y que es de composición química variable.

Se dispone de distintos tipos de electrodos en función de los materiales a soldar, del tipo de recubrimiento e incluso del tipo de corriente a utilizar y según la posición de soldeo.

2.14.1. Designación de los electrodos

En la soldadura por arco manual con electrodo revestido es imprescindible identificar los diferentes tipos de electrodos que existen en el mercado en función de sus características mecánicas, posición de soldeo, corriente, etc.

Es por eso por lo que se utilizan una serie de normas que mediante unos códigos, formados por número y letras, identifican a los electrodos sin depender de los diferentes fabricantes. Hoy en día la norma más utilizada es la desarrollada por la American Welding Society (AWS) y la American Society for Testing of Materials (ASTM), bajo el nombre de "Guía para la interpretación de la numeración de los electrodos recubiertos para aceros suaves y de baja aleación". También las normas UNE disponen de un código de identificación.

La clasificación elaborada por la AWS, es el sistema más utilizado para indicar a los electrodos.

Interpretación de las normas AWS para electrodos.

Cada uno de estos electrodos lleva un código impreso en el revestimiento. En la figura 24, se observa la designación según la norma norteamericana AWS.

Figura 24 *Designación del electrodo – Según AWS.*



Fuente: (Soldexa, 2021, pág. 44).

a) La letra *E* designa el producto: Electrodo para soldadura eléctrica manual.
b) Los primeros 2 dígitos en un número de 4 dígitos o 3 dígitos en un número de 5 dígitos señalan la resistencia mínima a la tracción, sin tratamiento térmico post soldadura:
   - $E\ 60XX = 60\ 000\ lbs/pulg\ mínimo$
   - $E\ 70XX = 70\ 000\ lbs/pulg$

- $E\ 110XX = 110\ 000\ lbs/pulg$

c) El último dígito, íntimamente relacionado con el penúltimo, es indicativo del tipo de corriente eléctrica y polaridad en la que mejor trabaja el electrodo e identifica a su vez el tipo de revestimiento, el que es calificado según el mayor porcentaje de materia prima contenida en el revestimiento; por ejemplo el electrodo $E-6010$ tiene un alto contenido de celulosa en el revestimiento aproximadamente un 30% o más; por ello es que a este electrodo se le clasifica como un electrodo de tipo celulósico. Similar clasificación se da en los otros electrodos.

d) El tercer dígito indica la posición en la que se puede soldar satisfactoriamente con un electrodo. (Soldexa, 2021, pág. 45)

2.14.2. Clasificación de los electrodos

Se pueden realizar 3 tipos de clasificaciones:

1. Según el espesor del revestimiento.

2. Según la composición del revestimiento.

3. Según la forma de aportación.

1. Carrillo y López (1993) definen según el espesor del revestimiento los electrodos siguientes:

- Electrodos delgados: cuando el espesor del revestimiento está entre el 4 y el 10% del diámetro del alma.
- Electrodos medios: cuando el espesor del revestimiento está entre el 10 y el 40% del diámetro del alma.
- Electrodos gruesos: cuando el espesor del revestimiento es mayor del 40% del diámetro del alma.
- Al aumentar el espesor del revestimiento el electrodo produce un arco más estable, de mayor rendimiento y con más escoria protectora del cordón de soldadura.

2. Según la composición del revestimiento los electrodos se pueden clasificar del siguiente modo:

a) Electrodos con revestimiento ácido.

- El revestimiento, medio-grueso, es una mezcla de óxidos de hierro, sílice, silicatos naturales y un porcentaje bastante elevado de ferro-manganeso.
- Puede utilizarse con corriente alterna y con corriente continua, y requiere una tensión de encendido bastante baja (40V aprox.).
- Arco muy estable.
- Escoria es muy abundante y se desprende fácilmente. Esta gran cantidad de escoria, explica Rodríguez (2002), obliga a trabajar con mayor intensidad de corriente e inclinación del electrodo. La inclusión de la escoria en el cordón produce grietas en aceros de baja soldabilidad.
- Se reservan por lo general para la soldadura en posición horizontal.
- Este tipo de electrodos, que hace unas décadas dominaba el mercado, ha ido siendo sustituido progresivamente por los rutilos y los básicos. En la actualidad se encuentran prácticamente en desuso.

b) Electrodos de revestimiento básico.

- El revestimiento, más grueso que en el caso de los ácidos, está compuesto principalmente por carbono de calcio y otros carbonatos.
- Son muy higroscópicos, por lo que se deben tomar precauciones para evitar la retención de humedad. Esta humedad puede causar porosidades en el metal de aportación y fisuras bajo el cordón. Si resultan expuestos a un ambiente húmedo deben secarse en hornos o estufas siguiendo las directrices marcadas por el fabricante que es quien conoce con exactitud la composición del electrodo.
- Producen poca escoria, lo que requiere bastante experiencia por parte del soldador, pero densa, que frecuentemente presenta un aspecto brillante. La escoria asciende rápidamente a la superficie del cordón y se elimina fácilmente. Por ello, es muy difícil que se produzcan inclusiones de escoria.
- El arco generado consigue una penetración media.
- Adecuado para la soldadura en todas las posiciones.
- Se utiliza normalmente con corriente continua y polaridad positiva, pero existen algunos que se pueden usar con corriente alterna.
- Se utilizan en la soldadura de estructuras metálicas, recipientes sometidos a presión, construcción naval y maquinaria.

- Para resolver el problema de su fuerte higroscopicidad, actualmente se están desarrollando electrodos básicos menos propensos a captar humedad.

c) Electrodos de revestimiento celulósico.

- Están formados principalmente por celulosa y otros componentes como los óxidos de titanio, rutilo, asbesto, ferro-manganeso y silicato sódico.
- Se emplean principalmente los revestimientos poco celulósicos porque la materia orgánica que contienen emite al arder una abundante humareda que molesta al soldador _ Por eso no se usan en locales cerrados.
- El arco produce muchas chispas, con abundantes pérdidas por salpicaduras.
- Se estima que el rendimiento de este tipo de electrodo es menor al 90%
- La descomposición de la celulosa proporciona hidrógeno a la zona del arco, haciendo que se eleve el voltaje consiguiendo un arco de mayor energía. En conclusión, realiza un arco de gran penetración y alta velocidad de fusión.
- La escoria es muy escasa y se retira con facilidad.
- Permiten su uso en cualquier posición y son adecuados cuando se tenga que cambiar de posición con frecuencia.
- Debido a su composición, que son componentes muy poco estabilizantes, se necesita emplear corriente continua, aunque también es posible con corriente alterna si se dispone de una máquina con tensión de vacío muy elevada.
- Se suelen emplear para soldar tubería en posición vertical descendente.
- Se utiliza para la construcción de oleoductos y gaseoductos donde resulta ventajoso soldar en todas las posiciones y se puede conseguir una buena penetración.

d) Electrodos con revestimiento de rutilo.

- La composición del revestimiento tiene como componente fundamental el rutilo (óxido de titanio).
- Las cualidades de estos electrodos están comprendidas entre las de los ácidos y los básicos.
- Proporcionan una penetración media. Aportan al metal gotas gruesas que se solidifican rápidamente,
- Electrodos de fácil manejo.
- Pocas salpicaduras.

- Son adecuado para soldar en todas las posiciones excepto en la vertical descendente. Sin embargo, existe una variedad de electrodos revestidos llamado rutílico-celulósico, el cual contiene similar composición que los de rutilo pero con mayores cantidades de celulosa. Por ello, son adecuados también para el soldeo en vertical descendente.
- La escoria es más fluida que en un electrodo de revestimiento ácido y se retira fácilmente.
- Producen un nivel de impurezas algo alto, colocándose en un nivel medio entre las que producen los electrodos ácidos y básicos.
- Se emplean con corriente alterna o con corriente continua, en ambas polaridades.
- Este tipo de electrodo es el utilizado prácticamente siempre en obra, debido a su facilidad de encendido y reencendido y a su escasa influencia de las condiciones ambientales.
- Se destina su uso a la construcción de estructuras metálicas, construcciones de calderas y construcciones navales.

e) Electrodos de revestimiento oxidante.

- Estos electrodos tienen un revestimiento grueso constituido por una mezcla de óxidos de hierro con o sin manganeso.
- La escoria que producen es gruesa, compacta y a menudo se separa sola.
- Proporciona escasa penetración, son fáciles de usar y admiten todo tipo de corriente.
- El revestimiento oxidante permite realizar lo que se denomina soldadura automática manual, que consiste en desplazar el electrodo dejándolo en contacto con la pieza cuando, normalmente, el electrodo ha de mantenerse a una distancia constante de la misma.
- Su uso se limita a la soldadura en ángulo en las posiciones horizontal, vertical y plana.
- Al originar un cordón ligero se emplea para trabajos sencillos, como rellenos y trabajos de cerrajería.

e) Electrodos bajos en hidrógeno.

Son electrodos destinados a la soldadura de aceros con alto contenido en carbono y azufre. Estos aceros tienden a absorber hidrógeno atmosférico durante la soldadura.

El hidrógeno, debido a su bajo peso atómico, y tal como se ha mencionado en otras ocasiones, se difunde fácilmente provocando fisuras y poros. Por este motivo, la elección de este tipo de electrodo trata de evitar esta absorción y minimizar los defectos.

f) Electrodos de alto rendimiento.

Desarrollados por Van der Willigen en el año 1947 su composición se basa en un revestimiento de rutilo con un elevado porcentaje de hierro. Son de alta calidad. Se denominan de alto rendimiento aquellos electrodos que tengan un rendimiento gravimétrico superior al 130%. Los electrodos anunciados hasta ahora suelen tener un rendimiento entre un 80 y un 100%. Tal y como define Ramírez (2010), el rendimiento gravimétrico de un electrodo es la relación del peso del metal depositado respecto a la varilla fundida utilizada para depositar igual cantidad de metal cualesquiera que sen las características del electrodo.

Estos electrodos requieren altas intensidades de soldeo para lograr fundir, además del alma, el polvo de hierro que contiene su revestimiento, por lo que se necesitan fuentes de energía potentes.

Este tipo de electrodo se elige cuando se piensa en reducir costes en soldadura, en grandes fábricas, tanto de construcción naval como en talleres de calderería pesada.

3. En función de la forma en que se realiza la aportación, los electrodos pueden clasificarse en:

- Electrodos de gota fría: Producen un arco eléctrico suave, con poder de penetración medio.
- Se utilizan normalmente con corriente continua y polaridad directa, aunque también se pueden usar con corriente alterna. Desprenden abundante escoria fácil de eliminar.
- Electrodos de gota caliente: Producen un arco duro y de gran poder de penetración. Se utilizan con corriente continua y polaridad inversa o con corriente alterna. Producen poca escoria, cordones planos y pueden utilizarse en todas las posiciones.
- Electrodos de gran revestimiento: Son electrodos con revestimiento de rutilo y alto porcentaje de polvo de hierro. Este polvo férrico aumenta la cantidad de metal depositado y permite obtener una intensidad de corriente superior con la misma sección del diámetro, obteniendo una velocidad de soldadura mayor y más facilidad en el cebado del arco.

2.14.3. Funciones del revestimiento

El revestimiento influye en las características eléctricas del arco y en las cualidades mecánicas de la soldadura. También influye considerablemente en el aspecto del cordón de soldadura, la velocidad de fusión, el grado de penetración y la facilidad de realización de la soldadura.

Entre las funciones más destacadas de los revestimientos están las siguientes:

- Estabiliza el arco, permite usar corriente alterna, continua o cualquier fuente de poder, dependiendo de la naturaleza del revestimiento.
- Cubre el cordón con una capa de escoria, protegiendo el metal fundido de su contacto con el aire hasta su enfriamiento, impidiendo su oxidación.
- Proporciona protección al arco, generando un gas que lo protege.
- Aporta elementos aleantes a la soldadura, ayudando a controlar la composición química y la resistencia de la soldadura.
- Actúa como agente limpiador y desoxidante del cordón de soldadura.
- Facilita el cebado y el mantenimiento del arco y reduce las proyecciones.
- Algunos revestimientos contienen polvo de hierro, que al fundir pasan a formar parte del metal fundido del baño, incrementando la velocidad de aportación y mejorando el aspecto de la soldadura.

2.14.4. Partes de un Electrodo

El electrodo está compuesto por diferentes partes que cumplen funciones específicas durante el proceso de soldadura. La punta desnuda corresponde a la zona donde se conecta el porta-electrodo, permitiendo la conducción de la corriente eléctrica hacia el electrodo. El extremo del arco es la parte que se funde durante la soldadura, aportando material al cordón de soldadura. El revestimiento cumple la función de proteger el baño de fusión y estabilizar el arco eléctrico mediante la generación de gases protectores y la formación de escoria. Finalmente, el alma metálica constituye el núcleo del electrodo y actúa como material de aporte, fundiéndose junto con el metal base para formar la unión soldada.

2.15. Ciclo Térmico

El metal adyacente a una soldadura está expuesto a ciclos térmicos, produciéndose en esta zona cambios o transformaciones micro estructurales en su estado sólido lo que provocan cambios en sus propiedades mecánicas. Si se conociera con precisión los ciclos térmicos en un proceso de soldadura como su respuesta del metal o aleación a dichos ciclos térmicos, se podría predecir los cambios en su microestructura y en sus propiedades mecánicas y solucionar los problemas de soldabilidad que se presentan. Se debe tener en cuenta lo siguiente: (Fosca, 2007).

2.15.1. Aporte de calor (Heat input)

El aporte de calor es la energía que se genera durante la soldadura. Puede ser de origen químico, eléctrico o mecánico. "El aporte de calor se expresa normalmente en términos de Joule por milímetro de soldadura" (Fosca, 2007)

$$\boldsymbol{Hnet = \frac{V\ X\ I}{v}\ f} \qquad \boldsymbol{Ec.3}$$

- Hnet = Calor neto suministrado (joule/milímetro)
- I = Intensidad de corriente (amperios)
- V = Tensión eléctrica (voltios)
- v = Velocidad de avance de la fuente de calor (milímetros/segundo).
- f = eficiencia térmica

En la eficiencia térmica para el proceso SMAW se considera que aproximadamente el 75 % de la energía del arco se transfiere efectivamente a la unión soldada y el porcentaje restante corresponde a pérdidas térmicas.

2.15.2. Temperatura Inicial de la Chapa (o Temperatura de Precalentamiento)

Es la temperatura a la cual el metal se encuentra en el medio ambiente o la temperatura a la que debe ser precalentado antes de soldar.

2.15.3. Geometría de la Soldadura

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

2.15.4. Características Térmicas del Material

Específicamente está relacionado con la conductividad térmica del material.

1. Cuanto más baja sea la conductividad térmica, más pronunciada será la distribución de temperaturas máximas. En otras palabras, la zona afectada térmicamente será menor.
2. Cuanta más alta sea la conductividad térmica del metal, más rápido se enfriará después de la soldadura.
3. Cuanta más alta sea la conductividad térmica, más corto será el tiempo de exposición a elevada temperatura. (BF Mexico, 2022)

2.16. Cálculo del Ancho de la ZAC

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

A pesar de que la ecuación del máximo de temperatura es de gran utilidad, es importante no olvidar las limitaciones existentes sobre su aplicación. La ecuación se aplica en procesos de pasadas únicas de penetración completa, soldeo o corte térmico, con independencia del espesor de la chapa. De hecho, también se aplica a cualquier soldadura por arco de penetración completa con menos de 4 pasadas. Esta ecuación puede aplicarse sobre la base de una por pasada, sin embargo, la temperatura entre pasadas, aquella a la cual la zona de soldadura se enfría entre una y otra pasada, puede considerarse como un valor de T0 en la ecuación del máximo de temperatura. (Fosca, 2009).

$$Y = \left[\left(\frac{1}{Tmax - T_o}\right) - \left(\frac{1}{Tfusion - T_o}\right)\right] x \left[\frac{Hneto}{4.13x\rho xCxt}\right] \qquad Ec.4$$

2.17. Imperfecciones en los cordones de soldadura

Tal y como define la norma UNE-EN ISO 6520-1:2007, es importante distinguir los siguientes conceptos para poder expresarnos con coherencia:

- "Imperfección: Discontinuidad en la soldadura o desviación respecto a la geometría prevista". También denominadas discontinuidades.
- "Defecto: Cualquier imperfección considerada como no aceptable." Es decir, una suma de imperfecciones que superan las tolerancias consideradas por la norma.

En la tabla 4, se muestran los diferentes tipos de discontinuidades.

Tabla 4

Cuadro de Defectos en la Soldadura del AISI 304

Categoría	Defecto / Discontinuidad	Descripción breve	Causa principal
Metalúrgicos (afectan la estructura)	Fisuración en caliente	Grietas durante la solidificación	Impurezas, baja ferrita delta
	Sensibilización	Pérdida de resistencia a la corrosión	Formación de carburos de cromo
	Degradación microestructural	Cambios en la estructura del material	Ciclos térmicos
	Tensiones residuales	Esfuerzos internos tras enfriamiento	Alta expansión térmica
⚙ Geométricos (afectan la forma)	Falta de penetración	Unión incompleta en la raíz	Baja energía de soldadura
	Falta de fusión	No se funde correctamente el metal base	Técnica deficiente
	Socavado (undercut)	Surco en los bordes del cordón	Exceso de calor o mala técnica
	Exceso de penetración	Metal sobresale en la raíz	Demasiado calor
	Falta de relleno (underfill)	Cordón por debajo de la superficie	Aporte insuficiente
	Desalineación	Unión mal posicionada	Error de montaje
De proceso (errores de ejecución)	Porosidad	Cavidades por gas atrapado	Contaminación o mala protección gaseosa
	Inclusiones	Material no metálico atrapado	Mala limpieza
	Salpicaduras (spatter)	Gotas adheridas alrededor	Parámetros incorrectos
	Oxidación (“sugaring”)	Oxidación en la raíz	Falta de gas de respaldo
	Contaminación superficial	Presencia de partículas extrañas	Herramientas o ambiente contaminado

Fuente: Elaboración propia basada en Cedinox (s.f.) y Oerlikon (2008).

2.18. Ensayos no destructivos

2.18.1. Inspección visual

Este método se basa en la detección de defectos por simple examen visual del cordón de soldadura. Para la inspección se usarán dispositivos que nos permitirán ampliar los defectos que no se pueden percibir a simple vista y dispositivos de medida para hacer comprobaciones de magnitud.

Esta es de poca envergadura o por personal más cualificado de un organismo externo de control o por la propia empresa de montaje, que realiza su propio autocontrol el cual es revisado y aceptado por la dirección facultativa.

Método de inspección

La inspección visual debe realizarse antes, durante y después de la soldadura. En todas las fases es necesario comprobar el nivel de limpieza de los cordones. Se recogen las comprobaciones generales necesarias para cada una de las etapas:

Antes de la soldadura

- Comprobación de los certificados de los materiales de base y de aportación, verificando si cumplen lo indicado en los planos y especificaciones de construcción.
- Calificación de los soldadores que ejecutarán el soldeo.
- Inspección de las superficies para detectar posibles defectos a fin de detectar incrustaciones, óxidos, grietas, laminaciones, cortes defectuosos o cualquier otra discontinuidad que pudiera afectar a la soldadura posterior.
- Verificación de las soldaduras punteadas, comprobando que las aberturas de raíz y diseño de la unión cumplen las especificaciones.
- Revisión de la calidad de los materiales de aporte y de su correcto almacenamiento.

Durante la soldadura

- Aplicación correcta del procedimiento homologado.
- Uso correcto de los parámetros de soldeo.
- Limpieza de la unión entre pasadas
- Uso correcto de materiales de aporte, fundentes y gases de protección, temperaturas de precalentamiento y entre pasadas.
- Comprobar la pasada de raíz, más susceptible de fisurarse que las de relleno.
- Comprobar secuencia de la soldadura y las deformaciones que se produzcan.

Después de la soldadura

- Se limpiará la unión con un cepillo de alambre.
- Inspeccionar la unión para encontrar posibles imperfecciones: mordeduras, grietas,
- salpicaduras, cráteres en los extremos, etc.
- Con la ayuda de reglas, galgas y escuadras se verificará la dimensión de la garganta y su longitud, su convexidad o concavidad y sobreespesor para ver si cumplen con los requisitos de calidad de la norma UNE EN ISO 5817.
- Señalizar con claridad las zonas a repasar.

2.18.2. Partículas magnéticas

Este ensayo se basa en la influencia que ejerce un determinado campo magnético sobre una cantidad de finas partículas metálicas depositadas sobre la superficie de la soldadura para detectar discontinuidades superficiales o cercanas a la superficie, incluyendo las zonas afectadas térmicamente.

2.18.3. Líquidos penetrantes

Este ensayo permite detectar defectos superficiales en los cordones de soldadura. El método se basa en la aplicación de un líquido que penetra en las discontinuidades existentes. Una vez esperado el tiempo necesario para que penetre, se retira el exceso y se aplica un revelador. Este se mancha con el líquido que ha quedado retenido en el defecto superficial mostrando su posición.

El material a ensayar no debe ser poroso, ya que podría desvirtuar el resultado del ensayo.

Tabla 5

Esquema de funcionamiento del ensayo de líquidos penetrantes



Fuente: Elaboración propia

2.18.4. Ultrasonidos

Este ensayo se basa en la transmisión de una onda ultrasónica por el material a ensayar y en interpretar los resultados obtenidos al recibir la onda, una vez que ha atravesado el material.

Los ultrasonidos que se usan para el ensayo son ondas con una frecuencia entre los 0.5MHz y los 20, frente a los 0.02 MHz de las ondas audibles. Permiten detectar defectos internos.

2.18.5. Radiografías

La inspección radiográfica se basa en la propiedad que tienen las partículas radiantes como los rayos X y rayos gamma de penetrar materiales y de impresionar una película fotográfica sensible dando un reflejo de la estructura interna del material ensayado, pudiendo identificar una discontinuidad o una diferencia de densidad en él.

Este ensayo puede detectar todo tipo de imperfecciones internas en el cordón de soldadura y en la zona afectada térmicamente, exceptuando las faltas de fusión que a veces no las detecta por lo que se debe complementar con un ensayo de ultrasonidos.

2.19. Ensayos destructivos

2.19.1. Ensayo de tracción

Este ensayo consiste en someter a la probeta de ensayo a una carga de tracción creciente hasta que se produzca la rotura. Durante la prueba se puede ir cuantificando la resistencia y la deformabilidad de la probeta, gracias al sistema informatizado que se dispone.

Por medio de esta prueba conocemos con precisión la carga a que rompe el material.

El ensayo se puede realizar sobre el metal de aportación o sobre metal de aportación y metal base.

2.19.2. Ensayo de resiliencia (flexión por choque)

Este ensayo nos indica la capacidad que tiene la soldadura de absorber energía de un impacto sin que se produzca su rotura. Las probetas que se usan, de unas dimensiones y características determinadas, llamadas Charpy, se colocan en una máquina de ensayo consistente en un péndulo que se deja caer libremente hasta golpear la probeta. La energía absorbida se puede leer en una escala situada en el péndulo. Para que la prueba sea correcta, la energía absorbida debe ser mayor que la mínima que requiere el material base.

2.19.3. Ensayo de dureza

Este ensayo mide la resistencia que ofrece el metal a la penetración. Está basado en un penetrador que comprime la superficie de la probeta a ensayar.

Existen tres sistemas de medida de dureza: Brinell, Vickers y Rockwell. Cada una de ella está caracterizada por emplear distintos materiales para el penetrador

2.19.4. Ensayo microscópico y macroscópico

Estos ensayos se realizan para determinar la calidad de la unión, realizando un corte transversal en el cordón de soldadura.

El examen macroscópico es realiza mediante un examen visual sin amplificación o con una amplificación de hasta 20 aumentos. Con el microscópico podemos determinar la estructura interna del metal, usando una amplificación entre 50 y 500 aumentos.

2.19.5. Ensayo de cortante

El método es similar al del ensayo de tracción, por someter a la probeta a una carga creciente de tracción hasta la rotura. Mediante unas fórmulas numéricas se puede obtener la resistencia a cortante de los cordones de soldadura longitudinales y transversales.

2.19.6. Ensayo de doblado

Este ensayo permite averiguar la ductilidad de la unión soldada y permite comprobar si existen imperfecciones sobre las caras del cordón y sobre la zona afectada térmicamente.

La máquina de ensayo dobla la probeta de dimensiones normalizadas, cargándola gradualmente hasta doblarla 180º. En las fotos siguiente se observa la secuencia de doblado.

2.20. Calificación del procedimiento

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

2.20.1. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)

Un WPS es un documento preparado y calificado por un departamento técnico o de ingeniería, para dar instrucciones al personal que realiza e inspecciona las soldaduras de producción.

2.20.2. Registro de calificación del procedimiento (PQR)

Documento que valida y respalda el WPS. El PQR contiene las variables reales de soldadura utilizadas en la prueba y los resultados del ensayo realizado sobre la soldadura para propósitos de calificar las especificaciones del procedimiento de soldadura. El PQR es el registro que documenta los resultados de soldar y ensayar las probetas.

2.20.3. Calificación de soldadores (WPQ)

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

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1.Hipótesis general y específicas

3.1.1. Hipótesis General

El tipo de corriente influye significativamente en la penetración, la dureza y la zona afectada por el calor (ZAC) en soldaduras SMAW del acero inoxidable AISI 304.

3.1.2. Hipótesis Específicas

- El tipo de corriente influye significativamente en la penetración del cordón de soldadura.
- El tipo de corriente influye significativamente en la dureza del metal de soldadura y la ZAC.
- El tipo de corriente influye significativamente en la extensión de la zona afectada por el calor (ZAC).

3.2.Variables independientes y dependientes

3.2.1. Variable Independiente

Tipo de corriente en el proceso SMAW

3.2.2. Variables Dependientes

Penetración del cordón de soldadura

Dureza

Zona afectada por el calor (ZAC)

3.3.Operacionalización de Variables e Indicadores

Tabla 6

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad	Técnica	Instrumento
Tipo de corriente (VI)	Forma de suministro de energía eléctrica en el proceso SMAW que influye en la estabilidad del arco y transferencia de calor.	Tipo de corriente aplicada durante la soldadura del acero inoxidable AISI 304.	- Corriente alterna (CA) - Corriente continua (CC)	- Tipo de corriente - Polaridad (CCEP)	Cualitativa nominal	Observación experimental	Equipo de soldadura SMAW
Penetración (VD1)	Profundidad alcanzada por el metal fundido en el material base durante la soldadura.	Medición de la profundidad del cordón de soldadura en probetas seccionadas.	Penetración del cordón	Profundidad de penetración	mm	Medición	Vernier
Dureza (VD2)	Resistencia del material a la deformación permanente.	Medición de la dureza en diferentes zonas de la soldadura.	- Metal base - ZAC - Metal de soldadura	Valor de dureza en cada zona	HB (Brinell)	Ensayo de dureza	Durómetro portátil

Zona afectada por el calor - ZAC (VD3)	Región del material base cuya microestructura cambia por efecto del calor sin fundirse.	Medición del ancho de la ZAC en muestras metalográficas.	Extensión de la ZAC	Ancho de la ZAC	mm	Análisis teórico	Aplicación por fórmula

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1.Ámbito de estudio

Geográficamente, el estudio se realizó en el taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

4.2.Enfoque de la investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se efectuó la medición numérica de la penetración, la dureza y la extensión de la zona afectada por el calor en soldaduras SMAW del acero inoxidable AISI 304. Los resultados fueron organizados en tablas y gráficos, y analizados mediante una comparación descriptiva entre las condiciones de corriente continua y de corriente alterna, sin aplicar pruebas estadísticas inferenciales.

4.3.Tipo de investigación

El estudio es de tipo aplicado, ya que busca generar conocimientos que puedan ser utilizados directamente en el proceso de soldadura SMAW, contribuyendo a la mejora de la calidad de las uniones soldadas en acero inoxidable.

4.4.Nivel de investigación

La investigación presenta un nivel descriptivo-comparativo, porque describe los resultados obtenidos en la penetración, la dureza y la extensión de la zona afectada por el calor y compara su comportamiento bajo diferentes condiciones de corriente continua y corriente alterna. La comparación se realizó mediante los valores obtenidos en cada probeta

4.5.Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es preexperimental, ya que se manipula deliberadamente la variable independiente (tipo de corriente) para observar su efecto sobre las variables dependientes.

4.5.1. Diseño específico

La investigación siguió un diseño preexperimental de comparación de tratamientos con medición posterior. Se aplicaron diferentes condiciones de soldadura SMAW a probetas de acero inoxidable AISI 304, empleando corriente continua con electrodo positivo y corriente alterna, con intensidades de 60, 80, 100 y 120 A. Posteriormente, se evaluaron la penetración,

la dureza, la extensión de la ZAC y la calidad de las uniones. Debido a que no se realizaron réplicas, asignación aleatoria ni pruebas estadísticas inferenciales, los resultados fueron analizados de manera descriptiva y comparativa

4.6.Variables de la investigación

4.6.1. Variable independiente

- Tipo de corriente en el proceso SMAW
  - Corriente alterna (CA)
  - Corriente continua (CC)
    - Polaridad directa (CCEN)
    - Polaridad inversa (CCEP)

4.6.2. Variables dependientes

- Penetración del cordón de soldadura (mm)
- Dureza (HB – Brinell)
- Zona afectada por el calor (ZAC) (mm)

4.7.Población y muestra

4.7.1. Población

La población está constituida por todas las uniones soldadas en acero inoxidable AISI 304 realizadas mediante el proceso SMAW.

4.7.2. Muestra

La muestra estuvo constituida por ocho probetas de acero inoxidable AISI 304 de 4,5 mm de espesor, soldadas mediante el proceso SMAW. Se utilizaron cuatro probetas con corriente continua, con electrodo positivo, y cuatro con corriente alterna, aplicando intensidades de 60, 80, 100 y 120 A. La selección de la muestra fue no probabilística e intencional, de acuerdo con la disponibilidad del material y las condiciones definidas para el procedimiento experimental. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.7.3. Técnicas

- Medición directa
- Ensayos mecánicos

4.7.4. Instrumentos

- Durómetro portátil

4.8.Procedimiento de la investigación

El procedimiento experimental se desarrolló en las siguientes etapas:

- **Preparación de probetas**

Se cortaron y acondicionaron probetas de acero inoxidable AISI 304 con dimensiones estandarizadas.

- **Proceso de soldadura**

Se realizaron soldaduras mediante el proceso SMAW utilizando diferentes tipos de corriente (CA, CCEP), manteniendo constantes otros parámetros como amperaje, tipo de electrodo y posición de soldadura.

- **Medición de la penetración**

Se determinó la profundidad del cordón de soldadura mediante observación o medición directa.

- **Ensayo de dureza**

Se realizaron mediciones de dureza en el metal base, la ZAC y el metal de soldadura utilizando un durómetro portátil.

- **Evaluación de la ZAC**

Se midió la extensión de la zona afectada por el calor mediante análisis teórico.

- **Registro de datos**

Los resultados fueron registrados en tablas para su posterior análisis.

4.9.Control de variables

Para garantizar la validez del experimento, se controlaron las siguientes variables:

|

- Tipo de electrodo
- Amperaje de soldadura
- Posición de soldadura
- Preparación de las probetas
- Condiciones ambientales

CAPÍTULO V

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.1.Equipos utilizados en la investigación

5.1.1. Fuente de Poder

Características técnicas de la fuente de poder:

-

Marca: MILLER	Marca SOLDATEC
Modelo: XMT 304 CC.	Modelo ACM-250
Salida nominal de corriente: 300 Amperios	Salida nominal de corriente: 250 Amperios
Gama de Voltaje: 10 – 35 Voltios.	Voltaje de alimentación 220V/60Hz
Gama de amperaje: 5 – 400	Rango de amperaje: 50 – 250 A
Máx Voltaje de circuito abierto CD: 90 V.	Max. Voltaje en vacion: 75 V
KVA: 12.4	KVA: 10.5
KW: 11.5	KW: 8.4

Figura 25 *máquinas de soldar*



Fuente: *Elaboración propia.*

5.1.2. Equipo de ensayo de doblez guiado en U

- Características:

Presión de trabajo: 20 toneladas.

En la figura 26 se observa dicho equipo.

Figura 26 *Equipo de doblez*



Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Instrumentos utilizados en la investigación

5.1.3.1. Durómetro portátil

Tabla 7

Características técnicas del durómetro portátil

De materiales	Acero y acero fundido, acero para herramientas de aleación, acero inoxidable, fundición gris, fundición nodular,

	aleación de aluminio fundido, aleación de cobre y zinc (latón), cobre y aleación de estaño, cobre (bronce), acero forjado
Rango de medición	HLD (170 ~ 960) HRC (17,9 ~ 69,5) HB (19 ~ 683) HV (80 ~ 1042) HS (30,6 ~ 102,6) HRA (59,1 ~ 88) HRB (13,5 ~ 101,7)
Indicación de Error	66hld (dispositivo de impacto D)
Dirección de medición	360 °
La dureza de la escala	HL HB... HRB HRC... HRA... HV HS
Pantalla	Pantalla TFT 320x240 color verdadero
De la memoria de datos	Máximo 600 grupos (en relación con los tiempos de impacto 1 ajustable 32 ajustables)
Poder	Batería recargable de li-batería
Temperatura de trabajo	-20 °C ~ 55 °C
Tamaño	210x85x45mm
Peso	0,6 kg

Fuente: Elaboración propia.

Figura 27 *Durómetro portátil*



Fuente: Elaboración propia.

5.2.Material consumible de inspección

- Marca: Ambrosol
- Procedencia: Italia.

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

- Limpiador Cleaner X 400ML
- Penetrante Rojo X 400ML
- Revelador Detector Blanco X 400ML

En la figura 28 se observa el kit de tintes penetrantes.

Figura 28 *Kit de tintes penetrantes*



Fuente: Elaboración propia.

5.3.Materiales para la investigación

5.3.1. Cupones de acero inoxidable AISI 304

En las tablas 8 y 9 se detallan la composición química y sus propiedades mecánicas del AISI 304.

Tabla 8

Composición química del AISI 304

AISI Nº	Composición nominal, %					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Otros *
		máx.	máx			
304	0.08 máx	2.00	1.00	18.00 - 20.00	8.00 - 10.50	-

Fuente: Di Caprio. G, (1999) “Los aceros inoxidables”, Milano, ed. Grupinox

Tabla 9

Propiedades mecánicas del AISI 304, según norma ASTM A240

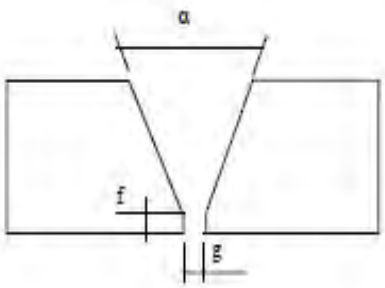
Resistencia a la tracción (MPa)	Punto de fluencia 0.02% (MPa)	Dureza		Elongación 2 pulg (%)
		Rockwell B	Brinell	
515	205	92	201	40

Fuente: (American Society for Testing and Materials)

Para un mejor estudio los cupones se han identificado por: T1, T2, T3 y T4.

Los cupones emparejados tienen las siguientes dimensiones: ancho: 100 mm, longitud: 150 mm y espesor: 4.5mm. El tipo de unión se muestra en la figura 29.

Figura 29 *Tipo de unión*



Espesor de pared (mm)	Angulo, α	Separación Raíz, g (mm)	Tacón, f (mm)
2 – 3	70 – 90	2 – 3	0.5 – 1.5
> 4	65 - 75	2 - 4	0.5 – 1.5

Fuente: (Metrode Products Limited).

5.3.2. Consumibles

En la fabricación de las probetas soldadas se utilizaron electrodos revestidos de acero inoxidable adecuados para el tipo de acero austenítico seleccionado. Como criterio general, se optó por un metal de aporte con una composición similar.

Electrodo E 308L-16 (Norma AWS A5.4)

Es un electrodo que tiene un depósito con estructura austeno-ferrítica, exento de poros y buen acabado. Para soldar aceros inoxidables no estabilizados del grupo 18/8 y 19/9. El revestimiento rutílico le proporciona excelentes caracterísiticas de soldabilidad en corriente continua y corriente alterna, además de facilitar la operación del soldeo, tanto en soldadura de

unión como en recargue. Debe soldarse con arco corto y con electrodos secos. Al realizar pulido espejo los cordones depositados se confunden con el metal base 18/8 ó 19/9. El INOX AW posee un contenido extra bajo de carbono (ELC) lo que le disminuye la posibilidad de precipitación de carburos de cromo.

Selección del diámetro del electrodo

Para la ejecución experimental se seleccionó un electrodo E308L-16 de 3,25 mm (1/8 pulg), considerando el espesor de 4,5 mm de las placas de acero inoxidable AISI 304, la junta a tope con preparación en V y la posición plana de soldadura. Para materiales de 4 a 5 mm de espesor se recomienda utilizar electrodos con diámetros entre 3,2 y 4,0 mm, por lo que el diámetro elegido permitió controlar adecuadamente el arco, el baño de fusión, la penetración y el aporte térmico.

Según la ficha técnica de Soldexa, el electrodo INOX AW E308L-16 de 3,25 mm opera en un rango de 60 a 120 A, tanto con corriente continua con electrodo positivo como con corriente alterna. Este intervalo coincide con las intensidades de 60, 80, 100 y 120 A empleadas en la investigación. Además, el diámetro se mantuvo constante en todas las pruebas para evitar su influencia y evaluar principalmente los efectos del tipo de corriente y del aporte térmico.

Composición química y propiedades mecánicas

Las tablas 10 y 11 muestran la composición química y las propiedades mecánicas.

Composición química (%)

Tabla 10

Composición química (%)

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0.021	0.90	0.80	Max. 0.025	Max. 0.025	-------	9.5	19	-------	-------

Fuente: (Soldexa. s.f.).

Tabla 11

Propiedades mecánicas

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin tratamiento	550 – 650 (79 750 – 94 250)	> 350 (50 750)	> 35	> 50

Fuente: (Soldexa. s.f.).

En la figura 30 se muestra el consumible utilizado para soldar AISI304.

Figura 30 *Electrodo E 308L-16*



Fuente: Elaboración propia

5.4.Soldabilidad de los Cupones

En los formatos de Especificación del procedimiento de soldadura (WPS), se detallan las condiciones de soldabilidad para los cupones con corriente alterna y corriente continua (polaridad directa). Un WPS establece las variables esenciales y no esenciales, así como los rangos aceptables de cada una durante su aplicación. Es la temperatura a la cual el metal se encuentra en el medio ambiente o la temperatura a la que debe ser precalentado antes de soldar.

5.4.1. Cálculo del Cromo equivalente y Níquel equivalente.

- Composición química del metal depositado, con un coeficiente de dilución del 35%:
  - Carbono

    C=0.35(0.06) +0.65(0.03) =0.0405
  - Manganeso

    Mn=0.35(1.5) +0.65(1.8) =1.695
  - Silicio

    Si=0.35(0.5) +0.65(0.6) =0.565
  - Cromo

    Cr=0.35(19) +0.65(20) =19.65
  - Niquel

    Ni=0.35(9) +0.65(10) =9.65

Con las composiciones químicas del AISI 304 y del electrodo E 308L-16 y del depósito de soldadura, se calcula el cromo y níquel equivalente:

Aplicando las ecuaciones 1 y 2, se tiene:

- Cromo equivalente:

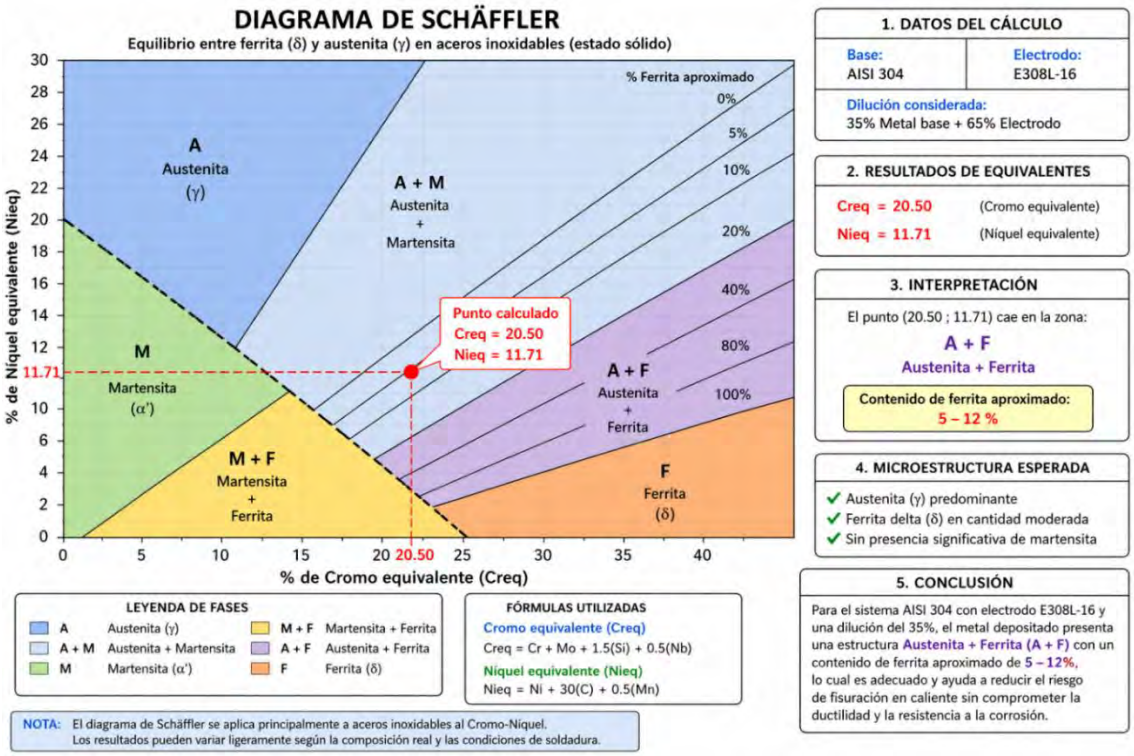
Creq=19.65+1.5(0.565) = 20.50

- Níquel equivalente:

Nieq= 9.65+30(0.0405) +0.5(1.695) = 11.71

Estos valores se representan en el diagrama de Schaeffler, como se muestra en la figura 31. Al ubicar dichos puntos en el diagrama, se observa que caen en la zona austenita + ferrita, con presencia de ferrita delta. Esta condición es favorable, ya que contribuye a reducir el riesgo de fisuración durante la soldadura.

Figura 31*Ubicación de los valores de cromo y níquel equivalentes en el diagrama de Schaeffler*



Fuente: Elaboración propia basada en Kou (2003).

Interpretación del Diagrama de Schaeffler:

A partir de los valores obtenidos (Creq = 20.50 y Nieq = 11.71), el punto se ubica en la región austenita + ferrita (A + F) del Diagrama de Schaeffler. Esto indica que la microestructura del metal depositado estará compuesta predominantemente por austenita, con una fracción estimada de ferrita delta entre 5 % y 12 %.

Desde el punto de vista metalúrgico, esta combinación resulta adecuada, ya que la presencia de ferrita disminuye la susceptibilidad a la fisuración en caliente, mientras que la austenita aporta buenas propiedades de ductilidad y tenacidad. En consecuencia, la microestructura obtenida es coherente con la esperada en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos.

En estas condiciones, el uso del electrodo E308L-16 es apropiado, ya que permite obtener un cordón de soldadura con buena resistencia a la fisuración en caliente y propiedades mecánicas satisfactorias.

5.4.2. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con corriente continua con electrodo al polo positivo (CCEP).

- **Cupón T1:**

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA	

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Institución PQR No.: Según norma:	Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica-UNSAAC. AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel	Identificación: Cupon T1 Fecha: 06/01/2026 Realizado por: Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N. Revisado: Mgt. Ing. Elías T. Peña Peña.

Artículo I. Junta Utilizada		**Artículo II. Técnica de soldadura**	
Tipo de junta:	A tope	Proceso de soldadura:	SMAW
Abertura de raíz:	1 mm	Tipo de soldadura:	Manual
Talón:	2 mm	Cordón de respaldo	No
Ángulo de bisel:	60°	Un Pase	Si
Placa de respaldo:	No Sí	Pases siguientes:	No.
Preparar bisel:	Amolado		
Método:			
Artículo III. Metal Base		**Artículo V. Posición de Soldadura**	
Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	4.5mm	Progresión:	Ascendente
		Técnica:	Un pase
Artículo IV. Metal de Aporte		**Precalentamiento**	NA
Diámetro:	3.25 mm	**Tiempo entre pases**	NA
Denominación AWS:	E308L-16		
Especificación AWS:	AWS A5.4	**Artículo VI. Notas**	
Casa comercial:	SOLDEXA	• Verificar alineación de la junta	
Denominación comercial:	INOX AW	• Asegurar limpieza de las partes	

Detalle de la Junta



N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (voltios)	Vel. de avance (mm/seg)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E308L-16	3.25	CCEP	60	20	0.73	X	

- **Cupón T2**

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA	

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Institución PQR No.: Según norma:	Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica-UNSAAC. AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel	Identificación: Cupón T2 Fecha: 06/01/2026 Realizado por: Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N. Revisado: Mgt. Ing. Elías T. Peña Peña.

Artículo I. Junta Utilizada		**Artículo II. Técnica de soldadura**	
Tipo de junta:	A tope	Proceso de soldadura:	SMAW
Abertura de raíz:	2 mm	Tipo de soldadura:	Manual
Talón:	3 mm	Cordón de respaldo	No
Ángulo de bisel:	60°	Un Pase	Si
Placa de respaldo:	No	Pases siguientes:	No.
Preparar bisel:	Sí		
Método:	Amolado		
Artículo III. Metal Base		**Artículo V. Posición de Soldadura**	
Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	4.5mm	Progresión:	Ascendente
		Técnica:	Un pase
Artículo IV. Metal de Aporte		**Precalentamiento Tiempo entre pases**	NA NA
Diámetro:	3.25 mm		
Denominación AWS:	E308L-16	**Artículo VI. Notas**	
Especificación AWS:	AWS A5.4	• Verificar alineación de la junta	
Casa comercial:	SOLDEXA	• Asegurar limpieza de las partes	
Denominación comercial:	INOX AW		

Detalle de la Junta



N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. de avance (mm/seg)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E308L-16	3.25	CCEP	80	22	0.73	X	

- **Cupón 3**

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**	

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Institución PQR No.: Según norma:	Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica-UNSAAC. AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel	Identificación: Cupon T3 Fecha: 06/01/2026 Realizado por: Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N. Revisado: Mgt. Ing. Elias T. Peña Peña.

Artículo I. Junta Utilizada		**Artículo II. Técnica de soldadura**	
Tipo de junta:	A tope	Proceso de soldadura:	SMAW
Abertura de raíz:	2mm	Tipo de soldadura:	Manual
Talón:	3mm	Cordón de respaldo	No
Ángulo de bisel:	60°	Un Pase	Si
Placa de respaldo:	No	Pases siguientes:	No.
Preparar bisel:	Sí		
Método:	Amolado		

Artículo III. Metal Base		**Artículo V. Posición de Soldadura**	
Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	4.5mm	Progresión:	Ascendente
		Técnica:	Un pase

Artículo IV. Metal de Aporte		**Precalentamiento Tiempo entre pases**	NA NA
Diámetro:	3.25 mm		
Denominación AWS:	E308L-16		
Especificación AWS:	AWS A5.4	**Artículo VI. Notas**	
Casa comercial:	SOLDEXA	• Verificar alineación de la junta	
Denominación comercial:	INOX AW	• Asegurar limpieza de las partes	

Detalle de la Junta



N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. de avance (mm/seg)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E308L-16	3.25	CCEP	100	20	0.73	X	

- **Cupón T4**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALÚRGICA

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Institución PQR No.: Según norma:	Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica-UNSAAC. AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel	Identificación: Cupón T4 Fecha: 06/01/2026 Realizado por: Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N. Revisado: Mgt. Ing. Elias T. Peña Peña.

Artículo I. Junta Utilizada		**Artículo II. Técnica de soldadura**	
Tipo de junta:	A tope	Proceso de soldadura:	SMAW
Abertura de raíz:	2mm	Tipo de soldadura:	Manual
Talón:	3mm	Cordón de respaldo	No
Ángulo de bisel:	60°	Un Pase	Si
Placa de respaldo:	No	Pases siguientes:	No.
Preparar bisel:	Sí		
Método:	Amolado		

Artículo III. Metal Base		**Artículo V. Posición de Soldadura**	
Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	4.5 mm	Progresión:	Ascendente
		Técnica:	Un pase
Artículo IV. Metal de Aporte		**Precalentamiento Tiempo entre pases**	NA NA
Diámetro:	3.25 mm		
Denominación AWS:	E308L-16		
Especificación AWS:	AWS A5.4		
Casa comercial:	SOLDEXA		
Denominación comercial:	INOX AW		

Artículo VI. Notas

- Verificar alineación de la junta
- Asegurar limpieza de las partes

Detalle de la Junta



N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. de avance (mm/seg)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E308L-16	3.25	CCEP	120	23	0.73	X	

5.4.3. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS) con corriente alterna.

- Cupón T1

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALÚRGICA

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Institución PQR No.: Según norma:	Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica-UNSAAC. AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel	Identificación: Cupón T1 Fecha: 06/01/2026 Realizado por: Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N. Revisado: Mgt. Ing. Elias T. Peña Peña.

Artículo I. Junta Utilizada		**Artículo II. Técnica de soldadura**	
Tipo de junta:	A tope	Proceso de soldadura:	SMAW
Abertura de raíz:	3 mm	Tipo de soldadura:	Manual
Talón:	4 mm	Cordón de respaldo	No
Ángulo de bisel:	60°	Un Pase	Si
Placa de respaldo:	No	Pases siguientes:	No.
Preparar bisel:	Sí		
Método:	Amolado		

Artículo III. Metal Base		**Artículo V. Posición de Soldadura**	
Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	4.5m	Progresión:	Ascendente
		Técnica:	Un pase
Artículo IV. Metal de Aporte		**Precalentamiento Tiempo entre pases**	NA NA
Diámetro:	3.25 mm		
Denominación AWS:	E308L-16	**Artículo VI. Notas**	
Especificación AWS:	AWS A5.4	• Verificar alineación de la junta • Asegurar limpieza de las partes	
Casa comercial:	SOLDEXA		
Denominación comercial:	INOX AW		

Detalle de la Junta



N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. de avance (mm/seg)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo .	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E308L-16	3.25	CA	60	20	0.73	X	

- Cupón T2:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALÚRGICA

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

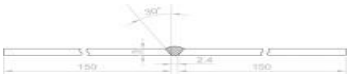
Institución PQR No.: Según norma:	Escuela Profesional de Ingeniería Metalurgica-UNSAAC. AWS D1.6 Structural Welding Code –	Identificación: Cupón T2 Fecha: 06/01/2026 Realizado por: Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N. Revisado: Mgt. Ing. Elias T. Peña Peña.

Artículo I. Junta Utilizada		**Artículo II. Técnica de soldadura**	
Tipo de junta:	A tope	Proceso de soldadura:	SMAW
Abertura de raíz:	2 mm	Tipo de soldadura:	Manual
Talón:	3 mm	Cordón de respaldo	No
Ángulo de bisel:	60°	Un Pase	Si
Placa de respaldo:	No	Pases siguientes:	No.
Preparar bisel:	Sí		
Método:	Amolado		

Artículo III. Metal Base		**Artículo V. Posición de Soldadura**	
Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	4.5m	Progresión:	Ascendente
		Técnica:	Un pase

Artículo IV. Metal de aporte		**Precalentamiento Tiempo entre pases**	NA NA
Diámetro:	3.25 mm	**Artículo VI. Notas**	
Denominación AWS:	E308L-16	• Verificar alineación de la junta • Asegurar limpieza de las partes	
Especificación AWS:	AWS A5.4		
Casa comercial:	SOLDEXA		
Denominación comercial:	INOX AW		

Detalle de la Junta



N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. de avance (mm/seg)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E308L-16	3.25	CA	80	22	0.73	X	

- Cupón T3

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALÚRGICA

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Institución PQR No.: Según norma:	Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica-UNSAAC. AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel	Identificación: Cupón T3 Fecha: 06/01/2026 Realizado por: Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N. Revisado: Mgt. Ing. Elias T. Peña Peña.

Artículo I. Junta Utilizada		**Artículo II. Técnica de soldadura**	
Tipo de junta:	A tope	Proceso de soldadura:	SMAW
Abertura de raíz:	2mm	Tipo de soldadura:	Manual
Talón:	3mm	Cordón de respaldo	No
Ángulo de bisel:	60°	Un Pase	Si
Placa de respaldo:	No	Pases siguientes:	No.
Preparar bisel:	Sí		
Método:	Amolado		

Artículo III. Metal Base		**Artículo V. Posición de Soldadura**	
Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	4.5m	Progresión:	Ascendente
		Técnica:	Un pase
Artículo IV. Metal de Aporte		**Precalentamiento Tiempo entre pases**	NA NA
Diámetro:	3.25 mm		
Denominación AWS:	E308L-16	**Artículo VI. Notas**	
Especificación AWS:	AWS A5.4	• Verificar alineación de la junta • Asegurar limpieza de las partes	
Casa comercial:	SOLDEXA		
Denominación comercial:	INOX AW		

Detalle de la Junta



N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. de avance (mm/seg)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E308L-16	3.25	CA	100	20	0.73	X	

- Cupón 4:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALÚRGICA

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)

Institución PQR No.: Según norma:	Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica-UNSAAC. AWS D1.6 Structural Welding Code – Stainless Steel	Identificación: Cupón T4 Fecha: 06/01/2026 Realizado por: Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N. Revisado: Mgt. Ing. Elias T. Peña Peña.

Artículo I. Junta Utilizada		**Artículo II. Técnica de soldadura**	
Tipo de junta:	A tope	Proceso de soldadura:	SMAW
Abertura de raíz:	2mm	Tipo de soldadura:	Manual
Talón:	3mm	Cordón de respaldo	No
Ángulo de bisel:	60°	Un Pase	Si
Placa de respaldo:	No	Pases siguientes:	No.
Preparar bisel:	Sí		
Método:	Amolado		

Artículo III. Metal Base		**Artículo V. Posición de Soldadura**	
Especificación:	AISI 304	Posición de soldadura:	1G
Espesor:	4.5 mm	Progresión:	Ascendente
		Técnica:	Un pase
Artículo IV. Metal de Aporte		**Precalentamiento Tiempo entre pases**	NA NA
Diámetro:	3.25 mm		
Denominación AWS:	E308L-16		
Especificación AWS:	AWS A5.4	**Artículo VI. Notas**	
Casa comercial:	SOLDEXA	• Verificar alineación de la junta • Asegurar limpieza de las partes	
Denominación comercial:	INOX AW		

Detalle de la Junta



N.º de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (voltios)	Vel. de avance (mm/seg)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo .	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E308L-16	3.25	CA	120	23	0.73	X	

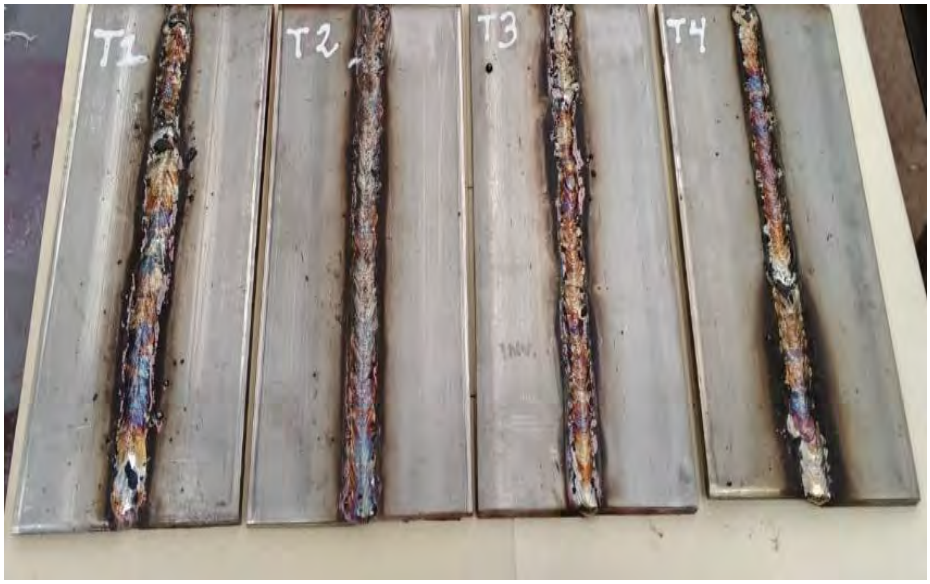
En las figuras 32 y 33 se muestran la soldabilidad de los cupones y los cupones soldados.

Figura 32 *Soldabilidad de los cupones*



Fuente: Elaboración propia

Figura 33 *Cupones soldados*



Fuente: Elaboración propia

5.5.Calor neto aportado

Aplicando la ecuación 3 del capítulo II, se tienen los siguientes resultados para ambos tipos de corriente:

Cupón T1:

$$Hnet = \frac{60\ \text{A} \times 20\ \text{V}}{0.73\ \text{mm/s}} \times 0.75 = 1232.8\ \ J/mm$$

Cupón T2:

$$Hnet = \frac{80\ \text{A} \times 22\ \text{V}}{0.73\ \text{mm/s}} \times 0.75 = 1808.2\ \ J/mm$$

Cupón T3:

$$Hnet = \frac{100\ \text{A} \times 20\ \text{V}}{0.73\ \text{mm/s}} \times 0.75 = 2054.7\ \ J/mm$$

Cupón T4:

$$Hnet = \frac{120\ \text{A} \times 23\ \text{V}}{0.73\ \text{mm/s}} \times 0.75 = 2835.6\ \ J/mm$$

En la tabla 12 se muestra el resumen del cálculo de calor neto aportado.

Tabla 12

Calor neto aportado en los cupones de experimentación

Cupón	Intensidad de corriente(A)	Tensión Eléctrica del arco (V)	Veloc. De soldadura (mm/seg)	Eficiencia térmica de SMAW (%)	Aporte de calor (J/mm)
T1	60	20	0.73	75	1232.8
T2	80	22	0.73	75	1808.2
T3	100	20	0.73	75	2054.7
T4	120	23	0.73	75	2835.6

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla 12, se asevera que a igualdad de aporte de calor, la corriente continua (CC) genera una mayor penetración y una ZAC más profunda debido a la estabilidad del arco y la transferencia de energía más eficiente. En contraste, la corriente alterna (CA), al presentar interrupciones cíclicas del arco, produce una menor penetración efectiva y una ZAC

más superficial, evidenciando que el tipo de corriente influye en la distribución térmica aun bajo condiciones energéticas equivalentes.

5.6.Cálculo del ancho de la zona afectada por el calor

Reemplazando valores en la ecuación 4 del capítulo II, se tiene:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{Tmax - T_o}\right) - \left(\frac{1}{Tfusion - T_o}\right)\right] x \left[\frac{Hneto}{4.13x\rho xCxt}\right]$$

Para saber la influencia del calor aportado en la ZAC, se calcula el ancho de la zona afectada por medio de la ecuación 4.

- To = 18 °C,
- T fusión= 1450 ºC
- Calor especifico volumétrico = 0.004 J/mm^3-ºC. (Fosca. C. 2007)
- t (espesor) = 4.5 mm (0.45 cm)
- o Tmax = 500 °C.

En la tabla 13 se presentan los valores estimados del cálculo del ancho de la ZAC para AISI 304.

Tabla 13

Valores estimados del ancho de la ZA AISI 304

Aporte de calor (J/mm)	Ancho de la ZAC (mm)
1232.8	2.0
1808.2	2.5
2054.7	3.0
2835.6	4.0

Fuente; Elaboración propia

Considerando la experiencia experimental reportada para soldadura SMAW en aceros inoxidables austeníticos de espesor similar, se estima que la ZAC real observable se ubica entre 2 y 4 mm aproximadamente, incrementándose con el aporte térmico aplicado.

5.7.Evaluación de la calidad de los cupones soldados

5.7.1. Inspección Visual

Los resultados de este examen se detallan en la tabla 14.

Tabla 14

Resultados de la inspección visual.

Aporte de calor (J/mm)	CORRIENTE CONTINUA Defectos principales	CORRIENTE ALTERNA Defectos principales
1232.8	Falta de fusión, baja penetración	Falta de fusión, inclusiones de escoria
1808.2	Mínimos defectos (óptimo)	Salpicadura, inclusiones, perfil irregular
2054.7	Socavado muy leve	Socavado leve, porosidad
2835.6	Socavado severo, distorsión	Porosidad, escoria, cordón ancho

Fuente; Elaboración propia

5.7.2. Inspección con tintes penetrantes

Después de hacer la inspección visual se procede a realizar el ensayo de tintes penetrantes. En la figura 34 se muestra el kit de tintes penetrantes.

Figura 34 *Tintes penetrantes*



Fuente; Elaboración propia

Este ensayo se inicia con la limpieza uniforme de la superficie del cordón aplicando el spray de limpieza (ver figura 35) con el fin de eliminar cualquier contaminante; posteriormente, se procede al secado de la superficie.

Figura 35 *Aplicando el spray de limpieza sobre la superficie.*



Fuente; Elaboración propia

Seguidamente se aplica el líquido penetrante al cordón de soldadura (ver figura 36). Para una buena penetración deben transcurrir unos 20 minutos.

Figura 36 *Probeta cubierta con el penetrante*



Fuente; Elaboración propia

Remover el penetrante de la superficie con un trapo limpio libre de pelusas. La probeta deberá quedar completamente seca (ver figura 37).

Figura 37 *Limpiando el penetrante.*



Fuente; Elaboración propia

Finalmente se aplica el revelador (figura 38) para que absorba el penetrante que se encuentra en las discontinuidades, formando indicaciones de color rojo sobre el fondo blanco. Se deberá esperar unos 15 minutos.

Figura 38 Aplicando revelador



Fuente; Elaboración propia

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 15.

Figura 39 Medición con vernier



Fuente; Elaboración propia

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 15.

Tabla 15

Resultados del ensayo de líquidos penetrantes y medición de la penetración

Tipo de corriente	Aporte de calor (J/mm)	Condición esperada	Posibles indicaciones detectadas	Interpretación	Penetración (mm)	Interpretación
CC	1232.8	Baja fusión	Indicaciones lineales o discontinuas	Posible falta de fusión superficial	2.6 mm	Penetración insuficiente
CC	1808.2	Condición óptima	Sin indicaciones o muy pocas	Buena calidad superficial	4.10 mm	Penetración adecuada
CC	2054.7	Condición óptima	Sin indicaciones relevantes	Cordón adecuado	4.5 mm	Penetración completa

CC	2835.6	Alto aporte térmico	microfisuras o indicaciones por oxidación	Posible sobrecalentamiento	4.5 mm	Penetración completa + exceso de raíz
CA	1232.8	Baja estabilidad de arco	Indicaciones por falta de fusión	Mayor riesgo que en CC	2.40 mm	Penetración insuficiente
CA	1808.2	Condición aceptable	Indicaciones leves dispersas	Calidad moderada	3.9 mm	Penetración adecuada
CA	2054.7	Condición aceptable	Pocas indicaciones	Comportamiento adecuado	4.4 mm	Penetración completa
CA	2835.6	Alto aporte térmico	Indicaciones por oxidación o microfisuración	Efectos térmicos elevados	4.5 mm	Penetración completa + exceso de raíz

5.7.3. Ensayo de doblez guiado

El ensayo de doblado se hace para justificar y dar seguimiento al comportamiento del Material, además con este ensayo se puede conocer la ductilidad y el grado de rigidez

- Ensayo de doblado de los cupones soldados con corriente alterna:

Cupón T1:

<table>
<tr><td></td><td colspan="6">FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="7">ENSAYO DE DOBLADO GUIADO</td><td>PQR</td></tr>
<tr><td colspan="8">DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR</td></tr>
<tr><td>Proceso</td><td>SMAW</td><td>Amperaje</td><td>60</td><td>Voltaje</td><td>20</td><td>Vel. De soldeo (mm/seg)</td><td>0.73</td></tr>
<tr><td>Tipo de estudio:</td><td colspan="3">De laboratorio</td><td>Nº de probeta:</td><td colspan="2">T1</td></tr>
<tr><td>Norma aplicable:</td><td colspan="3">WAS D1.1</td><td>Fecha de elaboración:</td><td colspan="2">08-01-2026</td></tr>
<tr><td>Realizado por:</td><td colspan="3">Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N.</td><td>Asesor:</td><td colspan="2">Mgt. Ing. Elías Teodoro Peña</td></tr>
<tr><td>Laboratorio</td><td colspan="5">Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC</td><td></td></tr>
<tr><td>Espesor de la probeta (mm)</td><td>4.5</td><td colspan="2">Longitud de la probeta(mm)</td><td>150</td><td>Temp. de Precalentamiento (°C)</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="8">Resultados.</td></tr>
<tr><td>Probeta</td><td colspan="3">Lado de la prueba</td><td colspan="4">Observaciones</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td colspan="3">Cara</td><td colspan="4">Falta de fusión</td></tr>
<tr><td colspan="3">Raiz</td><td colspan="4">Falta de penetracion</td></tr>
<tr><td colspan="4">Aprobación:</td><td colspan="4">No Aprueba</td></tr>
</table>

	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.	

ENSAYO DE DOBLADO GUIADO							PQR
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso	SMAW	Amperaje	80	Voltaje	22	Vel. De soldeo (mm/seg)	0.73
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		T2	
Norma aplicable:	WAS D1.1			Fecha de elaboración:		08-01-2026	
Realizado por:	Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N.			Asesor:		Mgt. Ing. Elías Teodoro Peña	
Laboratorio	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC						
Espesor de la probeta (mm)	4.5	Longitud de la probeta(mm)		150	Temp. de Precalentamiento (°C)		

Resultados.		
Probeta	Lado dela prueba	Observaciones
	Cara	No presenta discontinuidad
	Raiz	No presenta discontinuidad
Aprobación:		Aceptable

	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.	

ENSAYO DE DOBLADO GUIADO							PQR
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso	SMAW	Amperaje	100	Voltaje	20	Vel. De soldeo (mm/seg)	0.73
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		T3	
Norma aplicable:	WAS D1.1			Fecha de elaboración:		08-01-2026	
Realizado por:	Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N.			Asesor:		Mgt. Ing. Elías Teodoro Peña	

Laboratorio	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC				
Espesor de la probeta (mm)	4.5	Longitud de la probeta (mm)	150	Temp. de Precalentamiento (°C)	

Resultados.		
Probeta	Lado dela prueba	Observaciones
	Cara	No presenta discontinuidad
	Raiz	No presenta discontinuidad
Aprobación:		Aceptable

	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.	

ENSAYO DE DOBLADO GUIADO							PQR
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso	SMAW	Amperaje	120	Voltaje	23	Vel. De soldeo (mm/seg)	0.73
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		T4	
Norma aplicable:	WAS D1.1			Fecha de elaboración:		08-01-2026	
Realizado por:	Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N.			Asesor:		Mgt. Ing. Elías Teodoro Peña	

Laboratorio	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC				
Espesor de la probeta (mm)	4.5	Longitud de la probeta (mm)	150	Temp. de Precalentamiento (°C)	

Resultados.		
Probeta	Lado dela prueba	Observaciones
	Cara	Presenta socavado
	Raiz	Exceso de penetración
Aprobación:		rechazo

- Ensayo de doblado de los cupones soldados con corriente continua:

Cupón T1

	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.						
ENSAYO DE DOBLADO GUIADO							PQR
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso	SMAW	Amperaje	60	Voltaje	20	Vel. De soldeo (mm/seg)	0.73
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		T1	
Norma aplicable:	WAS D1.1			Fecha de elaboración:		08-01-2026	
Realizado por:	Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N.			Asesor:		Mgt. Ing. Elías Teodoro Peña	
Laboratorio	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC						
Espesor de la probeta (mm)	4.5	Longitud de la probeta(mm)		150	Temp. de Precalentamiento (°C)		
Resultados.							
Probeta	Lado de la prueba			Observaciones			
	Cara			Falta de fusión			
	Raiz			Falta de penetración			
Aprobación:				No Aprueba			

	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.	

ENSAYO DE DOBLADO GUIADO							PQR
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso	SMAW	Amperaje	80	Voltaje	22	Vel. De soldeo (mm/seg)	0.73
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		T2	
Norma aplicable:	WAS D1.1			Fecha de elaboración:		08-01-2026	
Realizado por:	Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N.			Asesor:		Mgt. Ing. Elías Teodoro Peña	

Laboratorio	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC				
Espesor de la probeta (mm)	4.5	Longitud de la probeta(mm)	150	Temp. de Precalentamiento (°C)	

Resultados.		
Probeta	Lado dela prueba	Observaciones
	Cara	No presenta discontinuidad
	Raiz	No presenta discontinuidad
Aprobación:		Aceptable

	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.	

ENSAYO DE DOBLADO GUIADO							PQR
DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso	SMAW	Amperaje	100	Voltaje	20	Vel. De soldeo (mm/seg)	0.73
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		T3C	
Norma aplicable:	WAS D1.1			Fecha de elaboración:		08-01-2026	
Realizado por:	Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N.			Asesor:		Mgt. Ing. Elías Teodoro Peña	

Laboratorio	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC				
Espesor de la probeta (mm)	4.5	Longitud de la probeta (mm)	150	Temp. de Precalentamiento (°C)	

Resultados.		
Probeta	Lado dela prueba	Observaciones
	Cara	No presenta discontinuidad
	Raiz	No presenta discontinuidad
Aprobación:		Aceptable

	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.	
ENSAYO DE DOBLADO GUIADO		PQR

DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR							
Proceso	SMAW	Amperaje	120	Voltaje	23	Vel. De soldeo (mm/seg)	0.73
Tipo de estudio:	De laboratorio			Nº de probeta:		T4 C	
Norma aplicable:	WAS D1.1			Fecha de elaboración:		08-01-2026	
Realizado por:	Edilberto Monzon Ch. y Milko Delgado N.			Asesor:		Mgt. Ing. Elías Teodoro Peña	

Laboratorio	Taller de soldadura. Escuela Prof. De Ing. Metalúrgica. UNSAAC				
Espesor de la probeta (mm)	4.5	Longitud de la probeta (mm)	150	Temp. de Precalentamiento (°C)	

Resultados.		
Probeta	Lado dela prueba	Observaciones
	Cara	Presenta socavado
	Raiz	Exceso de penetración
Aprobación:		rechazo

En la tabla 16 se resumen los resultados del ensayo de doblado.

Tabla 16

Resultados del ensayo de doblado

Probeta	Aporte de Calor (J/mm)	Corriente	Discontinuidad	Clasificación (AWS)
T1	1232.8	CC	Falta de fusión	Rechazo
T1	1232.8	CA	Falta de penetración, inclusión de escoria	Rechazo
T2	1808.2	CC	Sin defectos relevantes	Aceptable
T2	1808.2	CA	Salpicadura	Aceptable
T3	2054.7	CC	Socavado leve	Aceptable
T3	2054.7	CA	Porosidad dispersa	Aceptable

T4	2835.6	CC	Socavado, exceso de penetración	Rechazo
T4	2835.6	CA	Exceso de penetración	Rechazo

Fuente; Elaboración propia

5.7.4. Ensayo de dureza

Los resultados del ensayo de dureza se muestran en las tablas 17 y 18.

En ellas se presentan los valores de dureza del cordón de soldadura según el aporte de calor calculado.

Tabla 17

Dureza promedio de la ZAC según aporte de calor - CC (Corriente Continua)

Aporte de calor (J/mm)	Dureza (HB)
1232.8	199
1808.2	198
2054.7	197
2835.6	196

Fuente; Elaboración propia

Tabla 18

Dureza promedio de la ZAC según aporte de calor - CA (Corriente Alterna)

Aporte de calor (J/mm)	Dureza (HB)
1232.8	198
1808.2	197
2054.7	198
2835.6	196

Fuente; Elaboración propia

CAPÍTULO VI

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1 Ancho de la zona afectada por el calor (ZAC)

Los resultados presentados en la Tabla 13 muestran que el ancho estimado de la zona afectada por el calor aumentó de 2.0 a 4.0 mm cuando el aporte térmico se incrementó de 1232.8 a 2835.6 J/mm. Esta tendencia evidencia una relación directa entre ambas variables: cuanto mayor es la energía neta suministrada por unidad de longitud, mayor es la extensión del material base expuesto a temperaturas capaces de producir alteraciones metalúrgicas.

Para los aportes térmicos de 1232.8, 1808.2, 2054.7 y 2835.6 J/mm se obtuvieron anchos estimados de ZAC de 2.0, 2.5, 3.0 y 4.0 mm, respectivamente. El incremento progresivo resulta físicamente coherente, debido a que una mayor entrada de calor eleva la energía acumulada en la junta, disminuye la velocidad de enfriamiento y favorece la propagación térmica hacia regiones más alejadas de la línea de fusión.

Sin embargo, estos resultados provienen de la aplicación del modelo analítico de Carlos Fosca y, por tanto, representan una estimación bajo determinadas condiciones simplificadas. El modelo no reproduce completamente fenómenos presentes en la soldadura real, como las pérdidas de energía por convección y radiación, la conducción tridimensional, las variaciones instantáneas de la longitud del arco, la geometría real del cordón y las fluctuaciones en la velocidad de avance.

En consecuencia, los valores calculados permiten interpretar adecuadamente la tendencia térmica del proceso, pero no deben presentarse como mediciones metalográficas directas. Para validar experimentalmente el ancho real de la ZAC sería necesario realizar cortes transversales, preparación metalográfica, macroataque químico y medición mediante microscopía o análisis digital de imágenes.

Desde el punto de vista metalúrgico, una ZAC más extensa implica que un mayor volumen de material permaneció expuesto al ciclo térmico de soldadura. En el acero inoxidable austenítico AISI 304, una exposición térmica excesiva puede favorecer el crecimiento de grano y, bajo determinados intervalos de temperatura y tiempo de permanencia, aumentar el riesgo de sensibilización. No obstante, la ocurrencia de estos fenómenos no puede confirmarse únicamente con el cálculo térmico, pues requeriría análisis microestructural y ensayos complementarios de corrosión.

Por lo tanto, el control del aporte térmico constituye una medida fundamental para limitar la extensión de la ZAC. Los resultados indican que los aportes intermedios permiten alcanzar un equilibrio más conveniente entre fusión, penetración y control de las alteraciones térmicas del material base.

6.2 Examen visual

Los resultados de la inspección visual consignados en la Tabla 14 muestran que la calidad superficial y geométrica del cordón varió en función del aporte térmico y, en menor medida, del tipo de corriente empleado.

Con el menor aporte térmico, correspondiente a 1232.8 J/mm, se observaron falta de fusión y baja penetración en corriente continua, mientras que con corriente alterna se registraron falta de fusión e inclusiones de escoria. Estos resultados indican que la energía suministrada fue insuficiente para producir una fusión adecuada del metal base y mantener un baño de soldadura suficientemente fluido. En estas condiciones también pueden influir la velocidad de avance, la longitud del arco, el ángulo del electrodo y la técnica del soldador.

Con un aporte de 1808.2 J/mm, la corriente continua presentó mínimos defectos y fue considerada la condición visual más favorable. En corriente alterna se observaron salpicaduras, inclusiones y un perfil irregular, lo cual podría relacionarse con una menor estabilidad del arco y con variaciones en la transferencia de metal.

Al incrementar el aporte a 2054.7 J/mm, se observaron socavado muy leve corriente continua, así como socavado leve y porosidad en corriente alterna. Esto evidencia que, aunque el incremento de energía favoreció la penetración, también comenzó a producir discontinuidades relacionadas con una mayor fluidez del baño y con un control menos favorable de la geometría del cordón.

Finalmente, con el aporte máximo de 2835.6 J/mm, se registraron socavado severo y distorsión en corriente continua, mientras que en corriente alterna se observaron porosidad, escoria y un cordón excesivamente ancho. Por consiguiente, el mayor aporte térmico no produjo la mejor calidad visual, sino que incrementó la severidad de las discontinuidades geométricas.

En términos generales, la condición de 1808.2 J/mm con corriente continua presentó el mejor acabado superficial. No obstante, la inspección visual solamente permite detectar

discontinuidades superficiales y alteraciones geométricas visibles; por sí sola no permite confirmar cambios microestructurales, falta de fusión interna ni fisuras subsuperficiales.

6.3 Ensayo de líquidos penetrantes

Los resultados presentados en la Tabla 15 permiten analizar la presencia de discontinuidades abiertas a la superficie del cordón. Este método complementa la inspección visual, debido a que permite revelar indicaciones superficiales que podrían no distinguirse directamente a simple vista.

Con el aporte térmico de 1232.8 J/mm, se presentó una mayor tendencia a obtener indicaciones lineales o discontinuas asociadas con una posible falta de fusión superficial. Esta condición resulta coherente con la insuficiente energía suministrada para fundir adecuadamente los bordes de la junta. La corriente alterna presentó un comportamiento menos favorable que la corriente continua, posiblemente como consecuencia de una menor estabilidad del arco durante la ejecución de la soldadura.

Para los aportes intermedios de 1808.2 y 2054.7 J/mm, la corriente continua presentó ausencia de indicaciones relevantes o una cantidad mínima de ellas, lo que evidencia una mejor calidad superficial. Con corriente alterna se registraron indicaciones leves o dispersas, aunque el comportamiento fue aceptable en comparación con el menor aporte térmico.

Con el aporte máximo de 2835.6 J/mm, se registraron indicaciones posiblemente relacionadas con oxidación superficial, sobrecalentamiento o microfisuración. Sin embargo, debe precisarse que el ensayo de líquidos penetrantes únicamente revela la forma, ubicación y extensión aparente de una indicación. La naturaleza exacta del defecto debe confirmarse mediante observación complementaria o análisis metalográfico.

La comparación entre ambos tipos de corriente indica que la corriente continua presentó un comportamiento superficial ligeramente más favorable, especialmente dentro del intervalo intermedio de aporte térmico. Esto puede atribuirse a una mayor estabilidad del arco y a una transferencia energética más uniforme. No obstante, el aporte térmico ejerció una influencia más evidente que el tipo de corriente sobre la aparición de indicaciones.

6.4 Ensayo de doblado guiado

Los resultados de la Tabla 16 evidencian que el comportamiento de las uniones soldadas durante el doblado estuvo condicionado principalmente por el nivel de aporte térmico y por las discontinuidades originadas durante la soldadura.

Las probetas soldadas con el menor aporte térmico, 1232.8 J/mm, fueron clasificadas como rechazadas. En corriente continua se identificó falta de fusión, mientras que en corriente alterna se registraron falta de penetración e inclusión de escoria. Estas discontinuidades redujeron la continuidad metalúrgica de la unión y actuaron como zonas de concentración de esfuerzos durante la deformación.

Las probetas correspondientes a los aportes intermedios de 1808.2 y 2054.7 J/mm presentaron los mejores resultados. Con 1808.2 J/mm, la probeta soldada con corriente continua no mostró defectos relevantes y la correspondiente a corriente alterna presentó salpicaduras, discontinuidad principalmente superficial que no comprometió de manera crítica su comportamiento durante el doblado.

Con 2054.7 J/mm, las probetas de ambas corrientes fueron clasificadas como aceptables, aunque se registraron socavado leve en corriente continua y porosidad dispersa en corriente alterna. Estos resultados indican que el intervalo intermedio de aporte térmico proporcionó suficiente energía para favorecer la fusión y penetración, sin producir un deterioro crítico de la capacidad de deformación de la unión.

Con el aporte máximo de 2835.6 J/mm, las probetas fueron rechazadas debido a la presencia de socavado y exceso de penetración. Aunque este nivel térmico permitió alcanzar la penetración completa, el exceso de energía modificó desfavorablemente la geometría de la unión y generó puntos susceptibles de concentración de esfuerzos.

En consecuencia, los aportes comprendidos entre 1808.2 y 2054.7 J/mm proporcionaron el comportamiento más favorable en el ensayo de doblado. Esto demuestra que una mayor penetración no implica necesariamente una mejor calidad mecánica, puesto que un aporte excesivo puede generar discontinuidades capaces de reducir la integridad de la unión.

6.5 Dureza

Los resultados de las Tablas 17 y 18 muestran que la dureza de la ZAC permaneció prácticamente constante en las condiciones evaluadas. Con corriente continua se obtuvieron valores entre 196 y 199 HB, con una variación máxima de 3 HB; con corriente alterna se registraron valores entre 196 y 198 HB, con una variación máxima de 2 HB.

La pequeña magnitud de estas diferencias indica que, dentro del intervalo de aporte térmico estudiado, no se produjo una modificación apreciable de la dureza. Este comportamiento es coherente con la estabilidad de la microestructura austenítica del acero

inoxidable AISI 304, que no experimenta las transformaciones de endurecimiento características de los aceros al carbono durante el enfriamiento de la soldadura.

Al comparar ambos tipos de corriente, las diferencias fueron de 1 HB para 1232.8 y 1808.2 J/mm, de 1 HB para 2054.7 J/mm a favor de la corriente alterna y nulas para 2835.6 J/mm. Por su reducida magnitud, estas diferencias no evidencian un efecto definido del tipo de corriente sobre la dureza.

Las variaciones observadas pueden corresponder a la dispersión propia del material, a la ubicación de la huella, a la preparación superficial y a la resolución del durómetro. Además, debido a que no se realizaron réplicas ni un perfil de microdureza transversal, los resultados tienen un alcance descriptivo y no permiten establecer diferencias estadísticamente significativas.

En consecuencia, los datos obtenidos no muestran una relación concluyente entre el aporte térmico y la dureza, ni una diferencia atribuible al tipo de corriente. La dureza se conservó en un intervalo estrecho de 196 a 199 HB; por tanto, la selección de la condición más favorable debe sustentarse principalmente en la penetración, el ensayo de doblado y la presencia de discontinuidades, y no en pequeñas diferencias de dureza.

6.6 Penetración en función del aporte de calor

Los resultados de la Tabla 15 muestran una relación directa entre el aporte térmico y la profundidad de penetración del cordón. En corriente continua, la penetración aumentó de 2.6 mm, con 1232.8 J/mm, hasta 4.5 mm, con aportes de 2054.7 y 2835.6 J/mm. En corriente alterna, aumentó de 2.40 mm hasta 4.5 mm dentro del mismo intervalo térmico.

Con el aporte de 1232.8 J/mm, las penetraciones de 2.6 mm en corriente continua y 2.40 mm en corriente alterna fueron insuficientes respecto al espesor de 4.5 mm de la probeta. Este resultado coincide con la falta de fusión y falta de penetración registradas mediante inspección visual y ensayo de doblado.

Con 1808.2 J/mm, la penetración aumentó a 4.10 mm en corriente continua y 3.90 mm en corriente alterna. Aunque estos valores representan aproximadamente el 91.1 % y 86.7 % del espesor, respectivamente, no corresponden estrictamente a una penetración completa. Por ello, deben denominarse penetración parcial alta o cercana a la penetración completa, salvo que el criterio aplicado permita una penetración parcial.

Con 2054.7 J/mm, se alcanzaron 4.5 mm en corriente continua y 4.4 mm en corriente alterna. Estas condiciones presentaron el mejor equilibrio entre profundidad de penetración, comportamiento en doblado y control de discontinuidades. La corriente continua alcanzó la penetración completa, mientras que la corriente alterna presentó una penetración equivalente al 97.8 % del espesor.

Con el aporte máximo de 2835.6 J/mm, ambas corrientes alcanzaron 4.5 mm de penetración. Sin embargo, este resultado estuvo acompañado por socavado, distorsión y exceso de penetración, además del rechazo de las probetas durante el ensayo de doblado. Por tanto, alcanzar la totalidad del espesor no fue suficiente para garantizar una unión de mejor calidad.

En todas las condiciones, la corriente continua presentó valores iguales o ligeramente superiores a los obtenidos con corriente alterna. Esta diferencia podría relacionarse con una mayor estabilidad del arco y una transferencia energética más uniforme.

En términos generales, el aporte de 2054.7 J/mm con corriente continua presentó la condición más favorable, porque alcanzó los 4.5 mm de penetración y mantuvo un resultado aceptable en el ensayo de doblado. El aporte de 2835.6 J/mm también produjo penetración completa, pero generó discontinuidades relacionadas con el exceso de energía.

CONCLUSIONES

Primera. En las condiciones evaluadas, el aporte térmico mostró una relación directa con la penetración y con el ancho estimado de la zona afectada por el calor; sin embargo, no se comprobó una variación relevante de la dureza atribuible al aporte térmico ni al tipo de corriente. La corriente continua presentó una penetración igual o ligeramente superior a la corriente alterna. La condición de 2054.7 J/mm con corriente continua resultó la más favorable, porque alcanzó una penetración completa de 4.5 mm, registró 197 HB y mostró un comportamiento aceptable en el ensayo de doblado.

Segunda. La penetración del cordón aumentó conforme se incrementó el aporte térmico. En corriente continua, la profundidad de penetración pasó de 2.60 a 4.50 mm, mientras que en corriente alterna aumentó de 2.40 a 4.50 mm. Los valores bajos de aporte térmico produjeron penetración insuficiente y falta de fusión; por el contrario, los aportes intermedios permitieron alcanzar una penetración adecuada o completa. No obstante, el aporte máximo de 2835.6 J/mm, aunque produjo penetración completa, generó socavado, distorsión y exceso de penetración, demostrando que una mayor entrada de calor no garantiza una mejor calidad de la unión.

Tercera. La dureza de la ZAC se mantuvo en un intervalo estrecho de 196 a 199 HB. Con corriente continua la variación máxima fue de 3 HB y con corriente alterna fue de 2 HB; asimismo, las diferencias entre ambos tipos de corriente fueron de 0 a 1 HB. Debido a la reducida magnitud de estas variaciones y a la ausencia de réplicas, no se estableció una relación concluyente entre la dureza y el aporte térmico ni un efecto atribuible al tipo de corriente. Por tanto, en las condiciones estudiadas, la dureza del AISI 304 permaneció prácticamente constante.

Cuarta. El ancho estimado de la ZAC aumentó de 2.0 a 4.0 mm cuando el aporte térmico se incrementó de 1232.8 a 2835.6 J/mm, evidenciándose una relación directamente proporcional entre ambas variables. Debido a que el ancho de la ZAC fue obtenido mediante un modelo analítico y se emplearon valores equivalentes para corriente continua y alterna, no se pudo establecer una diferencia cuantitativa atribuible exclusivamente al tipo de corriente. Por tanto, se concluye que el aporte térmico fue el principal factor responsable del crecimiento de la ZAC.

Conclusión final. Los aportes térmicos intermedios, comprendidos entre 1808.2 y 2054.7 J/mm, proporcionaron el comportamiento más favorable en términos de penetración, extensión estimada de la ZAC, ensayo de doblado y control de discontinuidades. Dentro de

este intervalo, la condición de 2054.7 J/mm con corriente continua fue la más adecuada para la soldadura SMAW del acero inoxidable AISI 304 de 4.5 mm de espesor. La dureza permaneció prácticamente constante y, por ello, no constituyó un criterio diferenciador entre las condiciones evaluadas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda trabajar con aportes térmicos intermedios entre 1808.2 y 2054.7 J/mm en la soldadura SMAW del acero inoxidable AISI 304, debido a que este intervalo presentó el comportamiento más favorable respecto a la penetración, el ensayo de doblado y la menor presencia de discontinuidades. Deben evitarse aportes térmicos muy bajos, por el riesgo de falta de fusión y penetración, así como valores excesivos, que pueden generar socavado, distorsión y exceso de penetración. La dureza no debe emplearse como criterio diferenciador, puesto que permaneció prácticamente constante.

Para aplicaciones donde se requiera mayor penetración y estabilidad del arco, se recomienda emplear corriente continua con electrodo al polo positivo (CCEP), ya que en las condiciones evaluadas presentó valores de penetración iguales o ligeramente superiores a los obtenidos con corriente alterna, especialmente en los niveles intermedios de aporte térmico.

Se recomienda controlar conjuntamente la corriente, el voltaje y la velocidad de avance, debido a que estas variables determinan el aporte térmico y afectan principalmente la penetración, la geometría del cordón y la extensión de la ZAC. En las condiciones estudiadas no se comprobó una modificación relevante de la dureza.

En futuras investigaciones se recomienda complementar los resultados con ensayos macrográficos o metalográficos, mediante corte transversal, preparación de superficie y ataque químico, para medir directamente la penetración real y el ancho de la ZAC. Esto permitiría validar experimentalmente los valores estimados utilizados en el presente estudio.

Se recomienda ampliar el número de probetas por condición experimental y realizar réplicas bajo parámetros constantes, con la finalidad de reducir la influencia de factores propios de la ejecución manual del proceso SMAW y obtener resultados con mayor confiabilidad estadística.

Referencias

Alberco Medina, A. (2020). *Estudio Comparativo De Los Procesos De Soldadura GMAW y GTAW para Determinar El Mejor Procedimiento En La Unión De Tuberías De Acero Inoxidable Austenitíco AISI 304 Del Sector Alimenticio".* Trujillo.

Alonso, C. (2012). *Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto.* Cano Pina Ceysa.

Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* México: Edamsa.

ASM INTERNATIONAL. (2004). *Metallography and Microstructures.* Managing. Obtenido de http://www.worldcat.org/oclc/42469467

ASTM. (2016). *Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel.*

Barrera, L., & Coronel, M. (2011). *Desarrollo y procedimientos para la utilización de técnicas de ensayos no destructivos con ultrasonido para inspección de tuberías.* Universidad Pontificia Bolivariana , Bucaramanga.

Bencomo, N. (2009). *Soldadura disímil entre los aceros AISI/SAE 304 y ASTM A36 mediante el proceso de GMAW-P.* Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

BF Mexico. (14 de 02 de 2022). *Cedulacion de parmetros para soldadura*. Obtenido de https://bfmx.com/soldadura/parametros-de-soldadura-que-debes-regular/

BF Mexico. (2022). *Cedulacion de parmetros para soldadura.* Obtenido de https://bfmx.com/soldadura/parametros-de-soldadura-que-debes-regular/

Bravo Calvo, E. (2022). *Imperfecciones En Soldadura Y Tipos De Discontinuidades Introducción.* Obtenido de www.academia.edu: https://www.academia.edu/33510097/Imperfecciones_En_Soldadura_Y_Tipos_De_Discontinuidades_Introducci%C3%93n

British stainless steel association. (2017). Obtenido de http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=121

Bundy, J., & Hobart, H. (8 de septiembre de 2010). *El agrietamiento de la soldadura no tiene por qué ser un enigma*. Obtenido de OEM OFF-HIGHWAY: https://www.oemoffhighway.com/drivetrains/hardware/article/10169444/hobart-

brothers-weld-cracking-can-seriously-impact-a-companys-productivity-and-product-reliability

Carrión, F., Lomelí, M., Quintana, J., & Martínez, M. (2002). *La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes.* Instituto Mexicano Del Transporte, Publicación Técnica. Secretaria De Comunicaciones Y Transportes.

Castro, G. (2009). *Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A.* Biblioteca virtual UTA. Ebrary.

CC.OO, F. d. (2011). *Ensayos destructivos metalurgicos.* Federacion de enseñanza de CC.OO, Andalucia. España.

Chavez Melgar, Y. R. (2007). *INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA EN LA MICROESTRUCTURA Y RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE SOLDADURAS MEDIANTE GTAW EN UN ACERO INOXIDABLE DUPLEX DEL TIPO.* Lima.

Código AWS . (1999). *Structural Welding Code – Stainless Steel.*

Cortes, R., Villanueva, J., & Ponce, E. (2004). *Estudio de la soldabilidad y corrosión del acero inoxidable AISI 304 con los agentes utilizados en la lixiviación del cobre.* . España.

Eyheralde, T. (2016). *Mecánica General junto al Coordinador Técnico de la Tecnicatura de soldadura.* Obtenido de http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanicageneral/soldadura/09%20Proceso%20GMAW%20FCAW.pdf

Fosca, C. (2003). *Introducción a la metalurgia de la soldadura.* PUCP. Lima: PUCP.

Fosca, C. (2007). Introduccion a la metalurgia de la soldadura. *Introduccion a la metalurgia de la soldadura.* PUCP, Lima, Peru. Obtenido de https://es.scribd.com/document/476338671/Introduccion-a-la-Metalurgia-de-la-Soldadaura-Carlos-Fosca-pdf

García, A., Varela, Á., Mier, J., Camba, C., & Barbadillo, F. (2010). Estudio tribologico de aceros austeniticos tipo hadfield, influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste. *Metalurgia, 46*, 47-52. Obtenido de https://www.academia.edu/11560942/Estudio_tribol%C3%B3gico_de_aceros_austen%C3%ADticos_tipo_Hadfield_influencia_del_manganeso_en_su_respuesta_frente_al_desgaste

Gomez Jimenez, D. (2015). *SOLDABILIDAD DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS SERIE 300 MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA MMAW (ELECTRODO REVESTIDO) EN AMBIENTE HÚMEDO.* Saltillo.

Gómez, & Ramírez. (2016). *Estudio de soldabilidad de tubería sanitaria en acero inoxidable con soldadura TIG para la empresa Ingeniar inoxidables de Pereira.* Universidad Tecnológica de Pereira.

Horwitz, H. (2002). *anual de soldadura aplicaciones y practica (tomo II).* Bogotá: Afaomega.

Jeffus, L. (2009). *Soldadura. Principios y aplicaciones.* Paraninfo. Obtenido de https://books.google.com.pe/books/about/Soldadura_Principios_y_aplicaciones.html?id=rHynAxzh0iEC&redir_esc=y

Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología.* México: Pearson.

Kobe, S. (2011). *Arc Welding of Specific Steel sand CastIrons* (Fourth Edition ed.). Tokyo: Kita-Shinagawa, Shinagawa-Ku.

Kotecki, D., & Lippold, J. (2005). *Welding Metallurgy of Stainless.* Wiley-Interscience.

Kotecki, D., & Siewert, A. (2017). *WRC-1992 Constitution Diagram for.*

Kou, S. (2003). *Metalurgia de la soldadura.* EE.UU: Ed. Wiley-Intersciencia.

Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy.* New Jersey: Wiley Interscience.

Legña Oyacato , L. (2010). *Estudio de soldabilidad de las placas y tuberías de acero inoxidable ISI 304 con aceros ASTM A36 y ASTM A500 utilizando el proceso SMAW.* Quito.

Legña Oyacato Lizbeth, O. P. (2021). *Estudio de la soldabilidad de placas y tuberias de acero inoxidable AISI 304 con aceros ASTM A36 Y acero ASTM A500 utilizando el proceso de soldadura SMAW.* Quito.

Lincoln Electric. (2013). *Soldeo manual con electrodos revestidos.* Lincoln Electric. Obtenido de https://www.academia.edu/7303830/Manual_Lincol_Electrodos

LINCOLN ELECTRIC. (s.f.). *LINCOLN ELECTRIC.* Obtenido de http://solysol.com.es/data/documents/SoldaduraMIGMAG.pdf

Oerlikon. (2008). *Manual de Soldadura & Catálodo de Productos.* Lima: Exsa. Obtenido de https://www.soldaceros.com.pe/wp-content/uploads/2015/09/Manual-de-Soldadura-OERLIKON.pdf

Oxgasa. (2003). *Manual del soldador, INFRA. El Salvador.*

Pérez Cargua, M. A., & Pullas Rea, L. M. (2009). Influencia De La Utilización De Insertos De Varilla Corrugada Sobre Las Soldaduras De Perfil Estructural. *Tesis de posgrado.* Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba. Obtenido de http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/270/3/15T00419.pdf

Shackelford, J. (1992). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros.* MacMillan Inc.

Soldexa. (2011). *Manual de Soldadura y Catálodo de Productos.* Oerlikon. Obtenido de https://es.slideshare.net/RonPincu/manual-soldadura-soldexa-15139801

Soldexa. (2021). *Catálogo de Consumibles.* Lima: Nazca Electrodos Soldexa. Obtenido de https://www.syhrep.com/wp-content/uploads/2021/06/Catalogo_Soldexa_NAZCA_sp_pe_rev0_v4.pdf

Stainless Steel Plate. (2016). *Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications.* Obtenido de https://www.astm.org/Standards/A240.htm

Stainless Steel Weld Metals. (s.f.). *A Modification of the WRC-1988 Diagram.* Obtenido de https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1992_05_s171.pdf

Torres, E. (2010). *Soldabilidad de los hierros fundidos, recomendaciones para soldadura.* Universidad de Matanzas Cuba. Obtenido de http//monografias.umcc.cu/monos/2010/QUIMEC/mo1019.pdf

Zacarías, F. (2013). *Cálculo del espesor mínimo requerido en equipos sujetos a presión en una planta de cracking catalítico fluidizado (Fcc-1).* Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma De México , Zaragoza.

Anexos

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general: ¿Cómo influye el tipo de corriente en la penetración, la dureza y la zona afectada por el calor (ZAC) en soldaduras SMAW del acero inoxidable AISI 304?	**Objetivo general:** Determinar el efecto del tipo de corriente en la penetración, la dureza y la zona afectada por el calor (ZAC) en soldaduras SMAW del acero inoxidable AISI 304.	**Hipótesis general:** El tipo de corriente influye significativamente en la penetración, la dureza y la zona afectada por el calor (ZAC) en soldaduras SMAW del acero inoxidable AISI 304.	**Variable independiente:** Tipo de corriente en el proceso SMAW. **Dimensiones:** Corriente continua (CC), corriente alterna (CA) y polaridad CCEN/CCEP. **Variables dependientes:** Penetración del cordón, dureza y ancho de la ZAC. **Indicadores:** Profundidad de penetración (mm), dureza Brinell (HB) y ancho de la ZAC (mm).	**Enfoque:** Cuantitativo. **Tipo:** Aplicada. **Nivel:** Explicativo. **Diseño:** Experimental; diseño completamente aleatorizado. **Ámbito:** Taller de Soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, UNSAAC. **Población:** Uniones soldadas de acero inoxidable AISI 304 mediante SMAW. **Muestra:** Ocho probetas/condiciones: cuatro con CC y cuatro con CA, evaluadas a 1232.8, 1808.2, 2054.7 y 2835.6 J/mm. **Técnicas:** Observación experimental, medición directa,

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA
				inspección visual, líquidos penetrantes, doblado guiado y dureza. **Instrumentos/equipos:** Fuente SMAW, vernier, durómetro portátil, equipo de doblado y kit de líquidos penetrantes.
PE1: ¿De qué manera el tipo de corriente afectará la penetración del cordón de soldadura en el acero inoxidable AISI 304?	**OE1:** Evaluar la influencia del tipo de corriente en la penetración del cordón de soldadura.	**HE1:** El tipo de corriente influye significativamente en la penetración del cordón de soldadura.	**VI:** Tipo de corriente: CC y CA. **VD1:** Penetración del cordón. **Dimensión:** Profundidad de fusión. **Indicador/unidad:** Profundidad de penetración, en mm. **Técnica/instrumento:** Medición directa en probeta seccionada; vernier o microscopio metalográfico.	**Procesamiento:** Comparación de la penetración obtenida con CC y CA para cada nivel de aporte térmico.
PE2: ¿Cómo variará la dureza en el metal de soldadura y	**OE2:** Analizar la variación de la dureza en el	**HE2:** El tipo de corriente influye	**VI:** Tipo de corriente: CC y CA.	**Procesamiento:** Comparación de los valores de

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA
la ZAC al emplear diferentes tipos de corriente?	metal de soldadura y en la zona afectada por el calor (ZAC).	significativamente en la dureza del metal de soldadura y la ZAC.	**VD2:** Dureza. **Dimensiones:** Metal base, ZAC y metal de soldadura. **Indicador/unidad:** Valor de dureza, en HB. **Técnica/instrumento:** Ensayo de dureza; durómetro portátil.	dureza según corriente y aporte térmico.
PE3: ¿Qué efecto tendra el tipo de corriente en la extensión de la zona afectada por el calor (ZAC)?	**OE3:** Determinar el efecto del tipo de corriente en el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC).	**HE3:** El tipo de corriente influye significativamente en la extensión de la zona afectada por el calor (ZAC).	**VI:** Tipo de corriente: CC y CA. **VD3:** Zona afectada por el calor. **Dimensión:** Extensión de la ZAC. **Indicador/unidad:** Ancho de la ZAC, en mm. **Técnica/instrumento:** Análisis teórico mediante la ecuación adoptada y contraste con las condiciones experimentales.	**Procesamiento:** Estimación y comparación del ancho de la ZAC según aporte térmico y tipo de corriente.

Issued August 2013 • Index No. DC/18.8

XMT® 304 CC/CV

Multiprocess Welding Power Source

Quick Specs

Heavy Industrial Applications
Construction
Shipbuilding
Railroad
Truck/Trailer Manufacturing
Fabrication
Repair Shops
Rental Fleets

Processes
MIG (GMAW)
Pulsed MIG (GMAW-P)
Stick (SMAW)
TIG (GTAW)
Flux-Cored (FCAW)
Air Carbon Arc Cutting and Gouging (CAC-A)

Input Power Requires 3- or 1-Phase Power
Output Power 10–35 V, 5–400 A
Weight Net: 79.5 lb. (36.1 kg)
Ship: 88.6 lb. (40.2 kg)

Wind Tunnel Technology™ protects electrical components and PC boards from contamination.

Fan-On-Demand™ cooling system operates only when needed, reducing noise, energy use and the amount of contaminants pulled through machine.

Lift-Arc™ allows TIG starting without the use of high-frequency. Starts the arc without contaminating the weld with tungsten.

Line voltage compensation keeps welding output constant even if input power varies by +/-10 percent.

Adaptive Hot Start™ increases the output amperage at the start of a weld if necessary, eliminating electrode sticking.

Lightweight, aerospace-grade aluminum case offers protection with the benefit of reduced weight.



Inverter arc control technology provides greater puddle control for superior 6010 Stick electrode performance.

Large, dual digital meters are easy to view and are presettable to ease setting weld output.

Process selector switch reduces the number of control setup combinations without reducing any features.

Optional 115 VAC auxiliary power provides 10 amps of circuit-breaker-protected power for water circulators, etc.

Pulsed MIG capabilities with optional Optima control reduces spatter and distortion, allows better out-of-position puddle control, and provides potential reduction of fume particle emission.

Specifications (Subject to change without notice.)

Input Power	Rated Output at 60% Duty Cycle	Voltage Range in CV Mode	Amperage Range in CC Mode	Max. Open-Circuit Voltage	Amps Input at Rated Load Output, 60 Hz, 208 V	230 V	400 V	460 V	575 V	KVA	KW	Dimensions	Weight
Three-Phase	300 A at 32 VDC	10–35 V	5–400 A	90 VDC	33.7	30.5	17	18.9	15.2	12.2	11.6	H: 17 In. (432 mm) W: 12.5 In. (318 mm) D: 24 In. (610 mm)	79.5 lb. (36.1 kg)
Single-Phase	225 A at 29 VDC	10–35 V	5–400 A	90 VDC	52.4	47.4	—	24.5	—	11.3	7.6		

Certified by Canadian Standards Association to both the Canadian and U.S. Standards.

TRUE BLUE® 3 YR. WARRANTY

Power source is warranted for 3 years, parts and labor.
Original main power rectified parts are warranted for 5 years.

Miller

Miller Electric Mfg. Co.
An ITW Company
1635 West Spencer Street
P.O. Box 1079
Appleton, WI 54912-1079 USA

Equipment Sales US and Canada
Phone: 866-931-9730
FAX: 800-637-2315
International Phone: 920-735-4554
International FAX: 920-735-4125

MillerWelds.com

ISO 9001 REGISTERED QUALITY SYSTEM

SMAW

Acero Inoxidable

OERLIKON

INOX AW

Material depositado de estructura austeno-ferrítica, exento de poros y buen acabado. Para soldar aceros inoxidables no estabilizados del grupo 18/8 y 19/9. El revestimiento rutílico le proporciona excelentes caracterisiticas de soldabilidad en corriente continua y corriente alterna, además de facilitar la operación del soldeo, tanto en soldadura de unión como en recargue. Debe soldarse con arco corto y con electrodos secos. Al realizar pulido espejo los cordones depositados se confunden con el metal base 18/8 ó 19/9. El INOX AW posee un contenido extra bajo de carbono (ELC) lo que le disminuye la posibilidad de precipitación de carburos de cromo.

Clasificación	
AWS A5.4 / ASME SFA-5.4	E308L-16

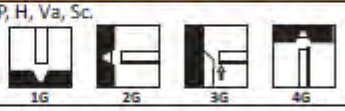
Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,021	0,90	0,80	máx. 0,025	máx. 0,025	–	9,5	19	–	–

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin tratamiento	550 – 650 (79 750 – 94 250)	> 350 (50 750)	> 35	> 50

Conservación del Producto
• Mantener en un lugar seco y evitar humedad. • Almacenamiento bajo horno: 50°C. • Resecado de 350°C a 370°C por 1 hora.

Posiciones de Soldadura
P, H, Va, Sc.  1G 2G 3G 4G

Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente continua (DC): Electrodo al positivo DCEP								
Diámetro	[mm]	1,60	2,00	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	5/64	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo		20	30	50	60	100	130	170
Amperaje máximo		30	60	80	120	140	180	250

Aplicaciones

- Para soldar aceros inoxidables no estabilizados, del tipo: AISI 301, 302, 304, 308, 301L, 302L, 304L y 308L.
- Para soldar cierto tipo de uniones en aceros disimiles.
- Como cama cojín (base) para la aplicación posterior de recubrimientos protectores.
- En la reconstrucción de equipos de minería, como por ejemplo para reconstruir bordes de cucharones de draga, palas, lápices, etc. Ideal para la soldadura de piezas de acero al manganeso.
- En la construcción de tanques, tuberías, ductos, empleados en la industria cervecera, lechera, textil y papelera.
- En la industria química o petroquímica, donde no se presenta corrosión excesiva.