UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

TESIS

INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO AISI 304 POR EL PROCESO SMAW

PRESENTADO POR:

Br. MARCIO EDU HUAMAN INFANTAS

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO

ASESOR:

Mgt. VICTOR MELECIO DUEÑAS AQUISE

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** Mgt. VICTOR MELECIO DUEÑAS AQUISE ..... quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesistitulada: INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO AISI 304 POR EL PROCESO SMAW .....

Presentado por: MARCIO EDU HUAMAN INFANTAS ..... DNI N° 74502791 ...;
presentado por: ..... DNI N°: .....
Para optar el título Profesional/Grado Académico de ....INGENIERO METALURGICO .....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por ...02... veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de .....9.....**%.**

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 2026

.....
Firma

Post firma VICTOR MELECIO DUEÑAS AQUISE
Nro. de DNI 29378517
ORCID del Asesor 0000-0002-4473-1580

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:627136187

MARCIO EDU HUAMAN INFANTAS

INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE OPERACION EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO AISI 304 POR EL PROCESO SMA...

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:627136187

Fecha de entrega
20 sep 2026, 6:06 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
20 sep 2026, 6:22 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE OPERACION EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO AISI 304 POR EL....pdf

Tamaño del archivo
3.8 MB

155 páginas

27.489 palabras

161.664 caracteres

9% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

8% Fuentes de Internet
0% Publicaciones
6% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

PRESENTACIÓN

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

Señores Docentes miembros del Jurado:

Cumpliendo con los requisitos del Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica y con el objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, pongo a vuestra disposición la tesis titulada: **"INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO AISI 304 POR EL PROCESO SMAW. (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)".**

El presente trabajo constituye una investigación de carácter tecnológico orientada al análisis y optimización de las variables de operación que intervienen en el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), aplicado al acero inoxidable AISI 304. En este sentido, se busca contribuir al mejoramiento de la calidad de las uniones soldadas, así como a la reducción de defectos y la optimización de los parámetros de trabajo.

Asimismo, esta investigación pretende aportar conocimientos técnicos y prácticos que resulten de utilidad tanto para profesionales como para técnicos vinculados a los procesos de fabricación y conformado por soldadura, promoviendo la aplicación de procedimientos más eficientes, seguros y confiables en el ámbito industrial.

Espero que el presente estudio cumpla con las expectativas académicas y técnicas requeridas, y que constituya un aporte significativo al desarrollo de la ingeniería metalúrgica.

Marcio Edu Huamán Infantas.

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada, en primer lugar, a mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y aliento constante a lo largo de mi formación académica y personal. Gracias por ser mi fortaleza en los momentos de dificultad y por confiar siempre en mis capacidades.

De manera muy especial, dedico este trabajo a la memoria de mi padre, quien partió hace dos años, pero cuyo ejemplo, valores y enseñanzas permanecen vivos en cada paso de mi vida. Su esfuerzo, sacrificio y amor infinito fueron el motor que me impulsó a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Aunque ya no esté físicamente presente, este logro es también suyo, porque sin su guía y apoyo incondicional no habría sido posible.

A todos ustedes, gracias por ser la base fundamental de este logro académico

Marcio Edu Huamán Infantas.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y aliento permanente a lo largo de mi formación académica y personal. Su confianza, paciencia y fortaleza han sido un pilar fundamental para alcanzar este logro, especialmente en los momentos de mayor dificultad.

De manera muy especial, agradezco a la memoria de mi padre, cuyo ejemplo de vida, valores y enseñanzas continúan guiando cada uno de mis pasos. Su esfuerzo, sacrificio y amor incondicional fueron la motivación constante para no rendirme y seguir adelante. Este logro también le pertenece, pues su legado vive en cada meta alcanzada.

Asimismo, expreso mi profundo agradecimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, quienes, a través de sus conocimientos, experiencia y compromiso con la formación académica, contribuyeron de manera significativa a mi desarrollo profesional y a la consolidación de los fundamentos científicos y técnicos necesarios para la realización de esta tesis.

De manera particular, agradezco a mi asesor, Mgt. Ing. Víctor M. Dueñas Aquise, por su orientación académica, dedicación, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de la presente investigación. Su guía y asesoramiento fueron determinantes para la correcta conducción y culminación de este trabajo.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento por haber sido parte esencial de este logro académico.

Marcio Edu Huamán Infantas.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN ii
DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTO iv
ÍNDICE v
ÍNDICE DE TABLAS ix
ÍNDICE DE FIGURAS x
SIMBOLOGIA xiii
RESUMEN xiv
ABSTRACT xv
INTRODUCCIÓN xvi
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1
1.1. Planteamiento del Problema 1
1.2. Formulación del Problema 2
1.2.1. Problema General 2
1.2.2. Problemas Específicos 2
1.3. Justificación e Importancia 3
1.3.1. Justificación Tecnológica 3
1.3.2. Justificación Social 3
1.3.3. Justificación Económica 3
1.3.4. Justificación Ambiental 3
1.3.5. Importancia 4
1.4. Objetivo General y Específicos 5
1.4.1. Objetivo General 5
1.4.2. Objetivos Específicos 5
CAPITULO II MARCO TEÓRICO 6
2.1. Antecedentes de la Investigación 6
2.1.1. Antecedentes Internacionales 6
2.1.2. Antecedentes Nacionales 7
2.2. El acero inoxidable 8

2.2.1. Clasificación de los aceros inoxidables 9
2.3. Los aceros inoxidables austéniticos 11
2.3.1. Características del acero inoxidable austenítico AISI 304 13
2.3.2. Ventajas del acero inoxidable AISI 304 14
2.3.3. Aplicaciones 15
2.4. Aceros inoxidables ferríticos 15
2.5. Aceros inoxidables martensíticos 16
2.6. El ciclo térmico y su importancia 16
2.7. Fundamentos de Soldabilidad de Aceros Inoxidables 17
2.7.1. Procesos de Soldadura por Fusión de los Aceros Inoxidables 18
2.8. Proceso de Soldadura por Arco Eléctrico con Electrodo Revestido (SMAW) 19
2.8.1. Principios del proceso 20
2.8.2. Ventajas y limitaciones del soldeo por arco con electrodos revestidos 22
2.8 Ciclo térmico y distribución de la temperatura 31
2.8.3. Factores que influyen en los cambios de temperatura durante la soldadura por arco. 33
2.8.4. Cálculo del Ancho de la ZAC 36
2.9 Soldadura de los aceros inoxidables 37
2.8.5. Aspectos operativos 39
2.8.6. Operaciones de corte y montaje 43
2.8.7. Preparación de bordes 44
2.8.8. Alineación de bordes y punteado de la soldadura 46
2.8.9. Piezas y material de respaldo 48
2.8.10. Grado de penetración de la soldadura 50
2.8.11. Humedad 51
2.8.12. Limpieza 51
2.8.13. Ventilación y control de humos 56
2.9. Consumibles 57
2.11.1 Selección de electrodos 57
2.10. Diagrama de Schaeffler 59
2.12 Soldadura de los aceros inoxidables austeníticos 61

2.10.1. Características de la soldadura 62
2.11. Tipos de juntas 65
2.12. Posiciones De Soladura 65
2.13. Control de calidad de las soldaduras 67
2.13.1. Ensayos destructivos 67
2.14. Las imperfecciones (discontinuidades) en soldadura 73
2.14.1. Tipos De Discontinuidades 74
2.14.2. Discontinuidades en Soldadura 75
CAPITULO III 88
HIPOTESIS Y VARIABLES 88
3.1. Hipótesis General y Específicos 88
3.1.1. Hipótesis General 88
3.1.2. Hipótesis Especificas 88
3.2. Variable Independiente y Dependiente 89
3.2.1. Variable dependiente 89
3.2.2. Variables Independientes 89
CAPITULO IV 90
METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION 90
4.1. Ámbito de Estudio 90
4.2. Tipo o Nivel de Investigación 90
4.3. Población y Muestra 91
4.3.1. Población 91
4.3.2. Muestra 91
4.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos 91
4.4.1. Técnicas 91
4.4.2. Instrumentos 92
4.5. Viabilidad 92
CAPITULO V 93
PROCEDIMIENTO METODOLOGICO EXPERIMENTAL 93
5.1. Maquinaria y Equipos 93
5.1.1. Equipos y Materiales Para la Investigación 93

5.1.2. Materiales usados en la investigación 96
5.2. Soldabilidad de las Probetas 99
5.2.1. Preparación de los cupones 99
5.2.2. Tipo de junta 100
5.2.3. Condiciones de soldabilidad de las probetas 101
5.3. Cálculos Realizados 103
5.3.1. Cálculo de aporte de calor 103
5.3.2. Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) 104
5.4. Control de Calidad de las Probetas 106
5.4.1. Inspección Visual 106
5.4.2. Tintes penetrantes 107
5.4.1 Ensayo de Doblado 111
5.4.2 Prueba de Dureza 115
CAPITULO VI ANALISIS DE LOS RESULTADOS 117
6.1. Resultados y discusión 117
6.1.1. Ensayo por Líquidos Penetrantes 117
5.5 Ensayo de doblado 117
6.2. Prueba de Dureza 118
6.3. Discusión e interpretación de los resultados 118
CONCLUSIONES 122
RECOMENDACIONES 124
BIBLIOGRAFÍA 126
ANEXOS 131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades químicas del acero AISI 304.....13
Tabla 2 Propiedades mecánicas del acero AISI 304.....14
Tabla 3 Propiedades mecánicas del acero AISI 304.....14
Tabla 4 Comparación entre corriente continua y corriente alterna 28
Tabla 5 Valor de la constante k.....30
Tabla 6 Ángulo de inclinación 31
Tabla 7 Eficiencia del proceso de soldadura.....34
Tabla 8 Comparativa entre la Soldadura en Aceros Inoxidables Austeníticos Vs. Aceros al Carbono 38
Tabla 9 Métodos de Corte del Acero Inoxidable 44
Tabla 10 Temperatura de fusión de metales y óxidos metálicos.....52
Tabla 11 Elementos que pueden causar defectos 54
Tabla 12 Criterios de aceptación del ensayo de inspección visual.....71
Tabla 13 Composición química del acero inoxidable AISI 304. 97
Tabla 14 Propiedades mecánicas del acero AISI 304.....97
Tabla 15 Composición química y propiedades mecánicas del E 312-16 99
Tabla 16 Condiciones para realizar la soldadura.....101
Tabla 17 Parámetros de soldadura.....102
Tabla 18 Resultados del calor neto aportado 104
Tabla 19 Resultados del cálculo del ancho de la ZAC 106
Tabla 20 Resultados del examen visual.....106
Tabla 21 Resultados de la inspección visual por tintes penetrantes (fluorescentes).....110
Tabla 22 Resultados de la prueba de doblez 115
Tabla 23 Ensayo de dureza 115
Tabla 24 Resultados de la prueba con tintas penetrantes.....117
Tabla 25 Resultados del ensayo de doblez.....117
Tabla 26 Resultados de dureza (HRB) en las diferentes zonas del depósito de soldadura.....118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de aceros inoxidables....10
Figura 2 Clasificación de los aceros de la serie 300....12
Figura 3 Proceso SMAW....20
Figura 4. Circuito eléctrico del proceso SMAW....21
Figura 5 Características del acero y de la soldadura bajo diferentes condiciones....24
Figura 6 Distribución de temperatura en la pieza soldada....31
Figura 7 Distribución de temperatura de una sección cualquiera a lo largo del eje X. Las curvas representan instantes de tiempo diferentes T1, T2, T3 durante la soldadura....32
Figura 8 Zonas del depósito de soldadura....37
Figura 9 Esquema de soldadura a derecha....41
Figura 10 Esquema de soldadura a izquierda....41
Figura 11 Esquema de soldadura en vertical....42
Figura 12 Esquema de soldadura en cornisa....42
Figura 13 Esquema de soldadura en techo....43
Figura 14 Preparaciones de borde recomendadas....45
Figura 15 Secuencia de punteado correcto....46
Figura 16 Secuencia de punteado incorrecto....47
Figura 17 Diseño de ranuras en barras de respaldo....48
Figura 18 Diagrama de Schaeffler....60
Figura 19 Ejemplo de grafica en un diagrama de Schaeffler....61
Figura 20 Tipos de juntas....65
Figura 21 Posiciones de las soldaduras según ANSI/AWSA 3.0-8....66
Figura 22 Deposito de soldadura en cara y raíz....69
Figura 23 Kit básico de Líquidos Penetrantes....72
Figura 24 Exceso de penetración....76
Figura 25 Falta de penetración....76
Figura 26 Concavidad externa....77
Figura 27 Concavidad interna....77
Figura 28 Socavaduras o mordeduras de borde....78

Figura 29 Quemado 79
Figura 30 Discontinuidad. 79
Figura 31 Falta de continuidad del cordón 80
Figura 32 Fisuras transversales 81
Figura 33 Fisura de interrupción 81
Figura 34 Fisuras en la zona afectada por el calor 82
Figura 35 Falta de penetración 82
Figura 36 Falta de fusión 83
Figura 37 Falta de fusión 83
Figura 38 Inclusiones gaseosas 84
Figura 39 Porosidad agrupada. 84
Figura 40 Porosidad alineada 85
Figura 41 Inclusiones no metálicas 85
Figura 42 Inclusión de escoria aisladas 86
Figura 43 Escorias alineadas 87
Figura 44 Desalineado 87
Figura 45 Fuente de poder 94
Figura 46 Durómetro 94
Figura 47 Equipo de ensayo de doblado 95
Figura 48 Probetas de Acero Inoxidable 96
Figura 49 Electrodo AWS E 312-16 98
Figura 50 Junta a tope en V. 101
Figura 51 Soldadura de los cupones 102
Figura 52 Vista de los cupones soldados 103
Figura 53 Kit de tintes penetrantes 107
Figura 54 Secado de los cupones 108
Figura 55 Aplicación del penetrante. 108
Figura 56 Lavando el exceso de penetrante. 109
Figura 57 Aplicación del revelador 109
Figura 58 Se observa la limpieza de un cupón 110
Figura 59 Se observa un cupón ya cortado 112

Figura 60 Posición de la probeta en el equipo de doblez 112
Figura 61 Cara y raíz de una soldadura 113
Figura 62 Ubicación de los puntos donde se indentaron 113
Figura 63 Probetas dobladas con presencia de discontinuidades en la zona de soldadura 114
Figura 64 Muestra las probetas de los cupones R y T después de realizar la prueba de doblez 114

SIMBOLOGIA

AWS	American welding society
GMAW	Gas metal arc welding
ZAC	Zona afectada por el calor
MB	Metal base
DS	Deposito de soldadura
SMAW	Shielded metal arc welding
GTAW	Gas tungsten arc welding
MIG	Metal inert gas
TIG	Tungsten inert gas
H	Calor de aporte
H_{net}	Calor de aporte neto
V	Voltios
I	Intensidad de corriente
v	Velocidad de soldeo
$\boldsymbol{v}$	Velocidad de la traslación de la fuente de calor
$\boldsymbol{f}$	Eficiencia térmica
° C	Grados celsius
DCEP	Corriente continua, electrodo al polo positivo.
t	Abertura de raíz
a	Cara de raíz
e	Espesor nominal del material base

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar la influencia de las variables de operación del proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304, mediante la evaluación de la dureza y la detección de discontinuidades superficiales empleando el ensayo de líquidos penetrantes. Para ello, se realizaron cordones de soldadura variando principalmente la intensidad de corriente y la velocidad de soldeo, manteniendo controlados los demás parámetros de operación.

La soldabilidad del material fue analizada a partir de la medición de la dureza en el metal depositado y en la zona afectada por el calor (ZAC), así como mediante la inspección no destructiva por líquidos penetrantes, con el fin de identificar indicaciones superficiales asociadas a discontinuidades. Asimismo, se evaluó la relación existente entre los niveles de dureza obtenidos y la presencia de indicaciones detectadas durante el ensayo no destructivo.

Los resultados permitieron establecer que las variaciones en las variables de operación del proceso SMAW influyen significativamente en el comportamiento del acero AISI 304, afectando el aporte térmico, la dureza del depósito y las características superficiales de la soldadura. De esta manera, se valida la importancia del control de los parámetros de soldadura para garantizar una adecuada soldabilidad del acero AISI 304 y una mejora en la calidad de las uniones soldadas.

Palabras clave: Soldabilidad, Acero AISI 304, Variables de operación, Líquidos penetrantes.

ABSTRACT

The objective of this research work is to determine the influence of the operating variables of the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process on the weldability of AISI 304 stainless steel, through the evaluation of hardness and the detection of surface discontinuities using the dye penetrant inspection. For this purpose, weld beads were produced by varying mainly the current intensity and the welding speed, while keeping the other operating parameters controlled.

The weldability of the material was analyzed based on hardness measurements in the weld metal and the heat-affected zone (HAZ), as well as through non-destructive dye penetrant inspection to identify surface indications associated with discontinuities. Likewise, the relationship between the obtained hardness levels and the presence of indications detected during the non-destructive testing was evaluated.

The results established that variations in the operating variables of the SMAW process significantly influence the behavior of AISI 304 steel, affecting the heat input, the hardness of the deposit, and the surface characteristics of the weld. Thus, the importance of controlling welding parameters is validated to ensure adequate weldability of AISI 304 steel and an improvement in the quality of welded joints.

Keywords: Weldability, AISI 304 steel, Operating variables, Penetrant liquids.

INTRODUCCIÓN

La ciencia y la técnica de la soldadura se están modernizando a grandes pasos, aunque sus principios básicos sean los mismos. A pesar de los grandes avances tecnológicos en la soldadura, esta sigue siendo susceptible a fallas, razón por la cual se debe seguir investigando en la soldabilidad de los diferentes materiales, ya que ella juega un papel muy importante en la calidad de las juntas soldadas. Durante el proceso de soldadura ocurre la coalescencia o fusión del material que se quiere unir, y posteriormente se solidifica; estos cambios de estado se llevan a cabo en tiempos muy cortos, afectando la microestructura de los aceros y modificando las propiedades físicas, mecánicas y químicas; además, se pueden generar alteraciones dimensionales de la pieza en la unión soldada; por tal motivo, se deben controlar las variables de soldeo y establecer los límites operativos que permitan obtener soldaduras sanas, que puedan soportar los requerimientos mecánicos y demandas extremas del servicio en su vida útil .

La soldadura en acero inoxidable varía sensiblemente respecto a la soldadura en piezas de acero ordinarios. Por ello, se hace necesario realizar un estudio de las características que le son propias a fin de obtener resultados óptimos de soldeo.

La creciente aplicabilidad de los aceros inoxidables en la fabricación de componentes de la industria petroquímica, química y de la vida cotidiana, así como los cambios microestructurales que pueden ocurrir en este material durante los procesos de soldadura, hacen necesario estudiar la soldabilidad de estas uniones.

En el presente trabajo de investigación, se realiza un estudio de la influencia de las variables de soldabilidad de los aceros inoxidables de la serie AISI 304. Estos aceros tienen un punto de fusión más bajo, su estructura interna ofrece una mayor resistencia eléctrica con menor

conductividad térmica y presentan en general un mayor coeficiente de dilatación que los demás aceros por lo que es importante realizar un análisis de la influencia de las variables de soldadura.

Es importante determinar las variables que participan en la soldabilidad del acero inoxidable utilizando ensayos de doblez, de dureza y metalográficos, ya que durante la soldadura se pueden presentar fallas o disminución de sus propiedades mecánicas.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

El acero inoxidable es uno de los cinco materiales ferrosos más utilizados en la industria en general, también tiene aplicación en la fabricación de equipos y utensilios domésticos y médicos. Pero el desarrollo original de lo que actualmente son los aceros inoxidables aconteció en los albores de la primera guerra mundial. En forma independiente y casi simultánea, en Inglaterra y en Alemania se descubrieron los aceros inoxidables tal como los conocemos ahora, en términos generales es una aleación del hierro con otros materiales compatibles entre ellos el cromo, siendo este el que le imparte su resistencia a la corrosión y cuyo porcentaje de participación es superior al 12 %.

La soldadura del acero inoxidable AISI 304 en una planta industrial deben ser ejecutados a la perfección, sin embargo se presentan con frecuencia fallas durante su operación que han derivado en siniestros con graves efectos económicos, daños ecológicos y al personal, por lo cual es muy necesario disponer de estudios técnicos orientados a analizar los factores que dan lugar a estas situaciones tales como la calidad del metal base, la selección del proceso de soldadura, la zona donde se realizan los cordones, la influencia de los variables de soldadura y el procedimiento operatorio. Para lo cual en el presente trabajo se realiza un estudio de la influencia de las variables de soldadura para obtener un depósito de soldadura que no ocasione defectos en la unión soldada.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿De qué manera influirán las variables de operación en el proceso de soldadura SMAW en la soldabilidad del acero AISI 304 y en la calidad microestructural del metal base a soldar?

1.2.2. Problemas Específicos

1.- ¿En qué medida influirá la intensidad de corriente de soldadura en la dureza del metal depositado y de la zona afectada por el calor (ZAC) del acero inoxidable AISI 304 soldado por el proceso SMAW?

2.- ¿Cómo influirá la selección del electrodo adecuado en la soldabilidad del acero AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW?

3.- ¿Cómo influirá la velocidad de soldeo en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW?

4.- ¿Cómo influirá el ángulo de inclinación del electrodo en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW?

5.- ¿Cómo influirá la longitud de arco en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW?

1.3. Justificación e Importancia

1.3.1. Justificación Tecnológica

Permitirá el desarrollo de conocimientos de la tecnología para la aplicación de las variables de soldadura en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 permitiendo obtener depósitos de calidad.

1.3.2. Justificación Social

Permitirá crear cuadros de técnicos especialistas en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 por el proceso SMAW.

1.3.3. Justificación Económica

La creación de cuadros técnicos con conocimientos bastos en la soldabilidad del acero inoxidable permitirá obtener depósitos de calidad sin defectos, lo que permitirá un ahorro económico para la empresa como ingresos económicos altos para los soldadores en este tipo de acero.

1.3.4. Justificación Ambiental

Con la innovación y conocimiento de la tecnología de la soldadura del acero inoxidable AISI 304 se reducirá el desecho de acero inoxidable contribuyendo en el cuidado y reducción de la contaminación del medio ambiente.

1.3.5. Importancia

La importancia del presente trabajo de tesis radica en su contribución al entendimiento y optimización del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) aplicado al acero inoxidable AISI 304, uno de los materiales más utilizados en la industria debido a su alta resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas.

En primer lugar, analizar la influencia de las variables de operación como la corriente de soldadura, el voltaje, la velocidad de avance y el tipo de electrodo, permite identificar las condiciones óptimas que garantizan una adecuada calidad de la unión soldada. Esto es fundamental para evitar defectos comunes como porosidad, grietas o falta de fusión, los cuales pueden comprometer la integridad estructural de los componentes.

Asimismo, este estudio resulta relevante porque el acero AISI 304 es ampliamente empleado en sectores como la industria alimentaria, química, petroquímica y de la construcción. Por ello, mejorar su soldabilidad mediante el control adecuado de los parámetros del proceso SMAW contribuye directamente a incrementar la confiabilidad, seguridad y vida útil de las estructuras y equipos fabricados con este material.

De igual manera, la investigación aporta conocimiento técnico que puede ser aplicado tanto en el ámbito académico como en el sector industrial, sirviendo como referencia para futuros estudios o para la capacitación de personal en procesos de soldadura. Esto favorece la estandarización de procedimientos y la mejora continua en la calidad de fabricación.

1.4. Objetivo General y Específicos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la influencia de las variables de operación en el proceso de soldadura SMAW en la soldabilidad del acero AISI 304 y en la calidad microestructural del metal base a soldar.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Determinar la influencia de la intensidad de corriente de soldadura en la dureza del metal depositado y de la zona afectada por el calor (ZAC) del acero inoxidable AISI 304 soldado por el proceso SMAW
2. Determinar la influencia de la selección del electrodo adecuado en la soldabilidad del acero AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW,
3. Determinar la influencia de la velocidad de soldeo en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW.
4. Determinar la influencia del ángulo de inclinación del electrodo en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW.
5. Determinar la influencia de la longitud de arco en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso SMAW.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

(Castellar, Arrieta, & Antonio, 2003), en su trabajo de investigación plantea como objetivo Plasmar en un documento las diferentes características de soldabilidad de los aceros inoxidables; establecer diferentes procesos existentes y formas adecuadas de trabajo en ellos, suministrando las principales propiedades del material a soldar y así mismo recomendando los diferentes tipos de juntas para un adecuado proceso. Se realizó una minuciosa investigación de los diferentes documentos y fuentes a los que se obtuvo acceso, catálogos de proveedores de soldadura, literatura técnica especializada, libros y páginas de Internet. Se recopiló y procesó la información mas importante y que no estuviese repetida, se seleccionó y se organizó de la manera mas clara posible, obteniendo toda esta literatura en el presente documento. El final de dicho trabajo se obtuvo un documento que contiene una práctica y completa información sobre las características principales de los aceros inoxidables, su soldabilidad y los diferentes tipos de juntas previstas con sus consideraciones de diseño.

(Luis Lopeez, 2019), el objetivo del presente trabajo es evaluar las fallas que se producen en el acero AISI 304 y fundicion gris por medio deunion de metales disimiles. Para la investigación se utilizaron probetas de AISI 304 y de fundicion gris (perlitica), los cuales se procedio a determinar su dureza y determinar su composición química. El trabajo concluye con las siguientes conclusiones: el ensayo de dureza no tuvo la capacidad de definir entre las zonas de la soldadura del metal base, aporte y ZAC, por su homogeneidad; el estudio metalográfico permitió definir que

el precalentamiento y postcalentamiento tiene una gran influencia en la formación de las estructuras finales, ya que permite el fenómeno de difusión.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

(Rios Roque, 2024), en su trabajo realiza un análisis económico para seleccionar el proceso de soldadura en la fabricación de un tanque de 1000 galones de acero inoxidable AISI 304 según API650 para almacenamiento de petróleo. El análisis económico se realiza para dos alternativas: en la alternativa 1 se emplea el proceso FCAW para espesores mayores a 9 mm, y el proceso GTAW para espesores menores; en la alternativa 2, se emplea una combinación de procesos GTAW-SMAW, donde se emplea GTAW como pase de raíz y SMAW como pase de relleno. En base al resultado del análisis económico se selecciona la alternativa 1; debido a que presenta mayor rendimiento y menor costo de producción. Luego, se desarrolla los procedimientos de soldadura preliminares según el código ASME IX para la alternativa seleccionada, para ello se elaboran diseños de juntas según el código de fabricación API650. Además, se selecciona el material de aporte y se establecen los parámetros de soldadura en base a bibliografía y recomendaciones de fabricantes de materiales de aporte. Asimismo, en el presente trabajo, se desarrolla los lineamientos para la calificación de los procedimientos de soldadura preliminares; se describe la cantidad y medidas de los cupones, los tipos de ensayos y los parámetros de aprobación que las pruebas deben cumplir para calificar los procedimientos propuestos. Por último, se da los lineamientos para realizar la calificación de soldadores, se describe las variables esenciales, tipos de cupón y ensayos que se requiere para realizar la calificación de soldadores.

(Canahua-Anchapuri, 2022), El presente libro es una adaptación de una investigación presentada a la Universidad Nacional del Altiplano en la cual se estudió la resistencia a la dureza

del acero inoxidable austenítico AISI 304 mediante un estudio comparativo de los procesos de soldadura SMAW y GTAW para unir planchas de 8.0 mm de espesor con una junta a tope en V y en posición plana 1G. Se determinó los parámetros de operación adecuados, siendo este uno de los objetivos del estudio, para luego establecer cuál de los procesos con uniones soldadas presenta óptimas propiedades mecánicas de resistencia adecuada de dureza en la zona afectada por el calor. Se utilizó la metodología del tipo experimental y aplicada, una vez obtenidas las juntas soldadas primeramente se realizó una inspección visual, seguido de un barrido de dureza con escala Rockwell B aplicada en zonas cercanas a la soldadura, considerándose la norma AWS D1.6 como referencia para establecer los criterios de aceptación de los ensayos realizados. Los datos obtenidos se tabularon, se procedió a la selección del mejor material de aporte, mediante un análisis adecuado con la finalidad de determinar cuál presenta una mejor influencia en las propiedades de dureza del acero inoxidable austenítico AISI 304. Los resultados que se obtuvieron demuestran que utilizando el proceso de soldadura GTAW con varilla ER308L, es más eficiente para unir el acero AISI 304 frente al proceso SMAW utilizando electrodo E308L-16, debido a que la soldadura GTAW proporciona soldadura limpia de escoria, son de gran calidad al tener siempre protegido el área de la soldadura de la atmósfera y presenta mayor resistencia a la dureza en la ZAC de 99.5 HRB frente al proceso de soldadura SMAW que tiene 98.0 HRB de resistencia a la dureza; así mismo se contribuye a mejorar los procedimientos de soldadura en este tipo de material que pueden ser aplicados en el campo industrial de la metalurgia transformativa.

2.2. El acero inoxidable

Los aceros inoxidables son aleaciones a base de hierro, cromo, carbono y otros elementos, principalmente, níquel, molibdeno, manganeso y titanio, entre otros, contando con una resistencia

particular a la corrosión. Naturalmente, la presencia de cada elemento en determinados porcentajes produce variaciones distintas de las características intrínsecas.

Esta característica de buena resistencia a la corrosión se debe a la propiedad de estas aleaciones de pasivarse en un ambiente oxidante. La formación de una película superficial de óxido de cromo sirve para la protección del acero inoxidable. Dicha película pasiva se vuelve a reconstruir cuando se la daña, si el ambiente es suficientemente oxidante manteniendo una protección permanente del acero. La importancia de este tipo de aceros, además de sus características mecánicas y su amplio uso en diferentes tipos de industria (químicas, petrolífera, nuclear, etc.), se debe a su alta producción a nivel mundial aparejado al desarrollo industrial después de la segunda guerra mundial.

2.2.1. 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 estructura martensítica es dura y frágil, la ferrítica es blanda y dúctil, en cambio la austenítica es de alta resistencia a la tensión, al impacto y al mismo tiempo dúctil. (Di Caprio, 1999).

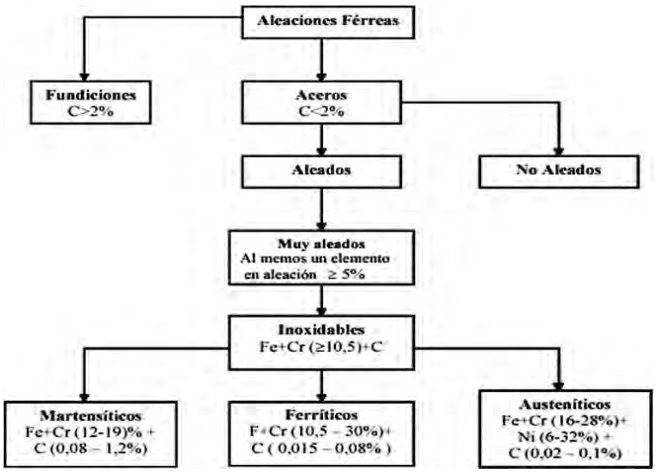
Los aceros inoxidables descansan principalmente en la presencia de cromo para lograr las cualidades de inoxidables. En general, mientras más alto sea el contenido de cromo, más resistente a la corrosión será el acero. Hay tres clases comunes de aceros inoxidables: austenítico, ferrítico y martensítico. Los nombres de estas clases reflejan la microestructura de la cual está compuesto en forma normal el acero. Los elementos de aleación en el acero pueden clasificarse como estabilizadores de austenita y estabilizadores de ferrita. Los estabilizadores de austenita de

importancia son el carbono, níquel, nitrógeno y manganeso. Estos elementos mejoran la retención de la austenita conforme se enfría el acero. Cuando está presente 12% o más de manganeso, o cuando está presente 20% o más de níquel, es imposible enfriar el acero con la lentitud suficiente para permitir que la austenita se transforme en ferrita. Aun con contenidos mucho más bajos de níquel y manganeso, la transformación es muy lenta y la austenita es estable a la temperatura ambiente. Los estabilizadores de ferrita de importancia son el cromo y los formadores fuertes de carburos. Los estabilizadores de ferrita tienden a evitar la transformación del acero en austenita bajo el calentamiento. El que un acero sea austenítico, ferrítico o martensítico depende del balance entre las cantidades presentes de estabilizadoras de austenita y ferrita y el ciclo de calentamiento-enfriamiento al cual se sujete el acero. En la figura 1, se detallan la clasificación de los aceros inoxidables. (Di Caprio, 1999).

La figura 1, muestra la clasificación de los aceros inoxidables.

Figura 1

Clasificación de aceros inoxidables.



Nota. Di Caprio, 1999

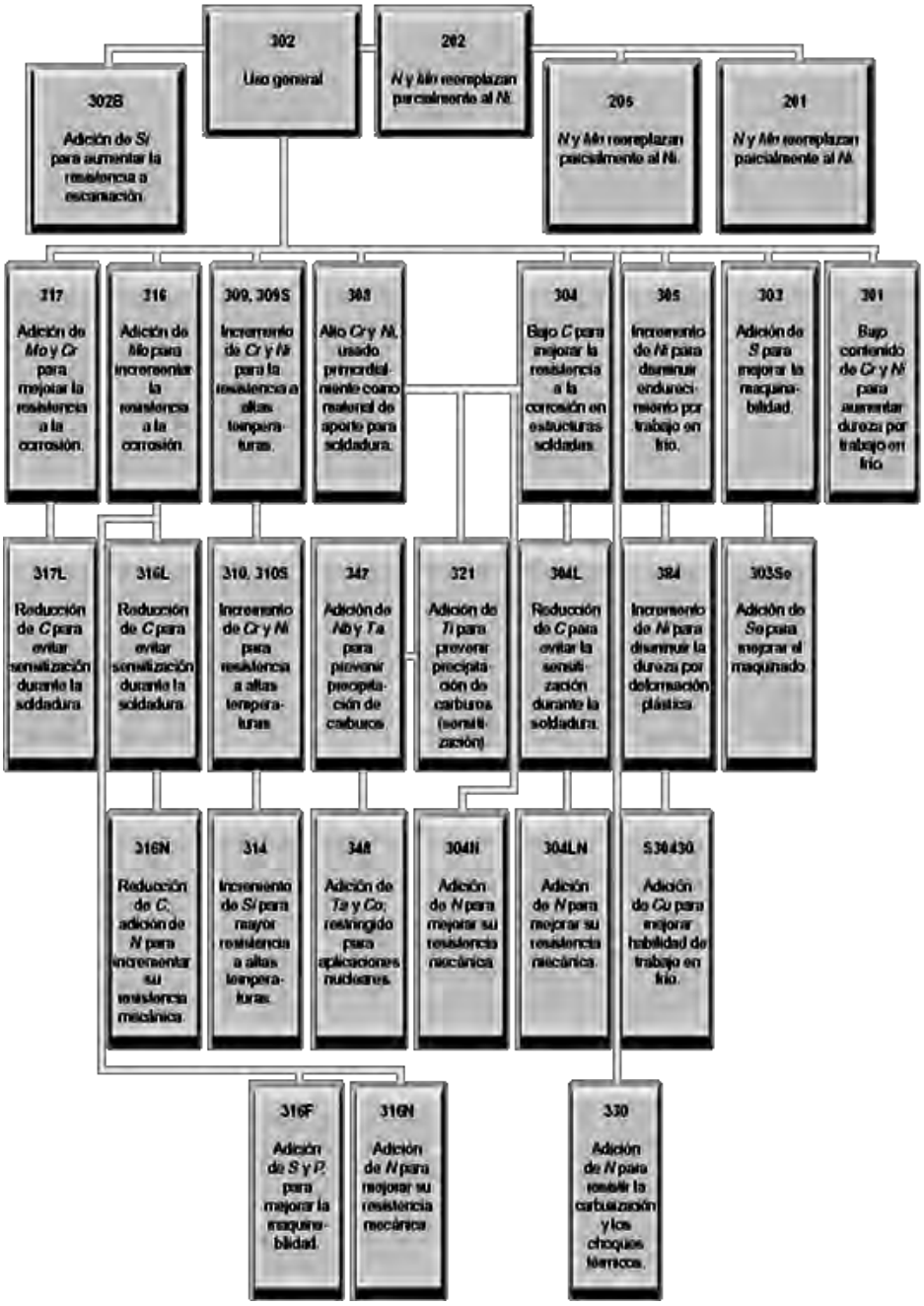
2.3. Los aceros inoxidables austéniticos.

Estos son los aceros inoxidables al cromo-níquel (tipo 3XX) y al cromo-níquel-manganeso (tipo 2XX). Son esencialmente no magnéticos en la condición de recocido y no endurecen por tratamiento térmico. El contenido total de níquel y cromo es de por lo menos 23%. Se pueden trabajar fácilmente en caliente o en frío. El trabajo en frío les desarrolla una amplia variedad de propiedades mecánicas y, en esta condición, el acero puede llegar a ser ligeramente magnético. Son muy resistentes al impacto y difíciles de maquinar. Estos aceros tienen la mejor resistencia a altas temperaturas y resistencia a la formación de escamas de todos los demás aceros inoxidables. Su resistencia a la corrosión suele ser mejor que la de los aceros martensíticos o ferríticos. El mayor inconveniente que presenta la soldadura de los aceros austeníticos es la precipitación de carburos que pueden producirse en las zonas cercanas al cordón de soldadura, quedando sensibilizados a la corrosión intergranular. Para evitar esta precipitación se deben soldar las piezas sin precalentamiento y con el menor aporte de calor posible. Otra posibilidad es emplear aceros austeníticos con porcentaje de carbono menor a 0.03% o aceros austeníticos estabilizados con titanio, niobio o tántalo. (Di Caprio, 1999)

La clasificación de este tipo de aceros inoxidables se aprecia en la figura 2.

Figura 2

Clasificación de los aceros de la serie 300.



Nota. Di Caprio (1999)

2.3.1. Características del acero inoxidable austenítico AISI 304

Este acero pertenece al grupo de los aceros inoxidables austeníticos de la serie 300, es muy versátil y uno de los más usados. El acero AISI 304 cuyo contenido es de cromo (Cr), níquel (Ni) y un bajo contenido de carbono; tiene una buena resistencia a la corrosión y excelentes propiedades para el conformado y el soldado.

Tiene buenas características para la soldadura, no requiere recocido tras la soldadura para que se desempeñe bien en una amplia gama de condiciones corrosivas. Presenta excelente resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta 870 °C y en servicio continuo hasta 925°C. No se recomienda para uso continuo entre 425 - 860°C, pero se desempeña muy bien por debajo y por encima de ese rango. Se lo puede trabajar en frio como por ejemplo en técnicas de cilindrado, doblado, embutición profunda, rolado y de corte. Este acero no puede ser endurecido por tratamiento térmico, en la figura 3,4 y 5 se detallan las características de este tipo de acero inoxidable. (Sumitec, 2017)

Tabla 1

Propiedades químicas del acero AISI 304

Grado (máx.)	Porcentaje %						
	C	Cr	Ni	Si	Mn	S	P
AISI 304	0,08	18-20	8-12	1	2	0,03	0,04

Fuente: (ASTM, 2016)

Tabla 2

Propiedades mecánicas del acero AISI 304.

PROPIEDADES MECÁNICAS					
Grado	Resistencia a la Tracción (MPa)	Elongación (% en 50 [mm])	Límite de Fluencia (MPa)	Dureza Brinell (Máx.)	Propiedades para trabajo en frío
AISI 304	485	40	170	201	Muy Buena

Fuente: (ASTM, 2016)

Tabla 3

Propiedades mecánicas del acero AISI 304.

Grado	PROPIEDADES FISICAS	
	Densidad [g/cm^3]	Densidad [lb/in^3]
AISI 304	7,8	0,28

Fuente: (ASTM, 2016)

2.3.2. Ventajas del acero inoxidable AISI 304

- Se lo puede limpiar fácilmente
- Acabados superficiales y formas variadas
- Baja rugosidad superficial
- Alta resistencia a la corrosión
- Presenta una gran durabilidad
- Relación costo-beneficio favorable
- Facilidad de fabricación
- Alta resistencia con bajo peso
- Es un material reciclable
- Bajo costo de mantenimiento

- Facilidad de conformado y de unión
- Buena apariencia y soldabilidad
- Amplio rango de propiedades mecánicas
- Resistencia a variaciones de temperatura (Ferneto, 2017)

2.3.3. Aplicaciones

Existe una gran variedad de aplicaciones como son: enfriadores de leche, cubiertos y utensilios de cocina, tarjas, canales, equipo y aplicaciones en electrodomésticos, intercambiadores de calor, los equipos para procesamiento de alimentos, contenedores de productos químicos, tanques para almacenamiento de vinos y cervezas, partes para extintores de fuego, partes para almacenes de algunas bebidas carbonatadas, coches de ferrocarril, cubiertos de hornos comerciales y filtros de agua, evaporadores, y barriles.(Sumitec, 2017)

2.4. Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos contienen entre 17% y 27% de cromo. Ejemplos de éstos son los aceros AISI 405, 430, 442 y 446. Estos aceros no son endurecibles por tratamiento térmico sino sólo moderadamente mediante trabajo en frío. Son magnéticos al igual que los martensíticos. Pueden trabajarse en frío o en caliente, pero alcanzan su máxima ductilidad y resistencia a la corrosión en la condición de recocido. En los aceros ferríticos con un alto contenido de cromo, puede aparecer fase sigma (dura y frágil) cuando se les mantiene por mucho tiempo a temperaturas cercanas a 470ºC. Por otro lado los aceros ferríticos son muy propensos al crecimiento del grano. (850ºC - 900ºC), inconveniente para la soldadura. Si las piezas a soldar son de dimensiones considerables, se recomienda postcalentar las piezas entre 700ºC y 800ºC, seguido de un enfriamiento rápido. (Di Caprio, 1999)

2.5. Aceros inoxidables martensíticos

Estos aceros son magnéticos y contienen entre 11.5% a 18% de cromo, como su principal elemento de aleación. Algunos ejemplos de este grupo son los aceros martensíticos AISI 410, 416, 420, 431, 501, y 502. En la soldadura de los aceros martensíticos se pueden producir tensiones y por consiguiente grietas, si no se adoptan las precauciones convenientes. Siempre que sea posible debe emplearse como metal de aporte aleaciones austeníticas (como la AISI 309 y 310) para absorber las tensiones en las zonas cercanas al cordón y así evitar grietas. Es conveniente precalentar entre 300 y 350ºC las piezas a ser soldadas. Después de la soldadura y una vez enfriadas las piezas se recomienda un revenido de 600 a 700 ºC. La mejor resistencia a la corrosión para estos aceros se obtiene efectuando tratamientos térmicos de temple y revenido a las temperaturas recomendadas. La resistencia a la corrosión en estos aceros, no es tan buena como en los aceros austeníticos o los ferríticos. Son utilizados principalmente, en piezas que van a estar sometidas a corrosión y que requieren de cierta resistencia mecánica. Algunos usos son: aletas para turbinas, rodetes de turbinas hidráulicas, fundiciones resistentes a la corrosión, cuchillería, piezas de válvula, etc. (Di Caprio, 1999)

2.6. El ciclo térmico y su importancia

Muchos de los metales y aleaciones que son expuestos al calor sufren transformaciones en estado sólido. Estos cambios microestructurales provocan a su vez cambios en las propiedades mecánicas y pueden afectar el comportamiento mecánico en servicio de una estructura o componente mecánico.

Algo parecido ocurre cuando se aplica calor a un metal para unirlo por soldadura. Cuando se suelda por fusión se busca unir dos piezas fundiéndolas localmente, a fin de conseguir una unión

metalúrgica. Sin embargo, el calor aplicado localmente, a la zona de unión, se transmite y viaja a través del material a otras zonas del mismo aumentando también su temperatura.

Ello conduce a que estas zonas del metal puedan sufrir transformaciones metalúrgicas como consecuencia de este calentamiento y posterior enfriamiento, lo cual afectaría su microestructura y por lo tanto sus propiedades mecánicas. Pero también el calentamiento y enfriamiento local traen como consecuencia cambios dimensionales en la pieza que pueden provocar distorsión o la formación de esfuerzos residuales en la pieza soldada.

Por lo tanto, se puede decir que cuando se suelda una pieza, está sometida a calentamientos y enfriamientos localizados. Es decir, está experimentando ciclos térmicos. En la medida que se controle el ciclo térmico se controlará la microestructura y las propiedades mecánicas del ensamble soldado.

El ciclo térmico está representado básicamente por:

- La distribución de la temperatura máxima en la zona afectada térmicamente
- La velocidad de enfriamiento en el metal fundido y en la zona afectada térmicamente.
- La velocidad de solidificación del metal fundido.

2.7. Fundamentos de Soldabilidad de Aceros Inoxidables

Soldar es unir sólidamente dos piezas metálicas o dos partes de una misma pieza. Esta unión se realiza, elevando la temperatura de las superficies a soldar, puestas en contacto, sin aportación de alguna sustancia o con aportación de una sustancia igual o semejante a las piezas a soldar.

Los procedimientos actualmente conocidos para la soldadura de metales, pueden clasificarse en:

- **Soldaduras Heterogéneas**: Son las que sueldan materiales de distinta naturaleza, con o sin metal de aportación o cuando los metales a unirse son iguales, pero con distinto metal de aporte.
- **Soldaduras Homogéneas:** Son las que, tanto los materiales que se sueldan como el metal de aporte, poseen la misma naturaleza. Si las soldaduras se efectúan sin el metal de aportación, se denominan autógenas. Los dos métodos básicos para la soldadura de los aceros inoxidables son la soldadura por fusión y la soldadura por resistencia

2.7.1. Procesos de Soldadura por Fusión de los Aceros Inoxidables.

Existen cuatro principales procesos en la soldadura por fusión de los aceros Inoxidables, ellos son:

- Soldadura por arco metálico protegido (SMAW).
- Soldadura por electrodo de tungsteno (TIG o GTAW).
- Soldadura por arco metálico spray (GMAW).
- Soldadura por arco sumergido (SAW).

Otro método de soldadura de los aceros inoxidables es el de soldadura láser, o el de haz electrónico.

2.8. Proceso de Soldadura por Arco Eléctrico con Electrodo Revestido (SMAW)

Jeffus (2009), indica que es un proceso en el que la fusión del metal se produce por el calor generado en un arco eléctrico establecido entre el extremo de un electrodo revestido y el metal base de una unión a soldar.

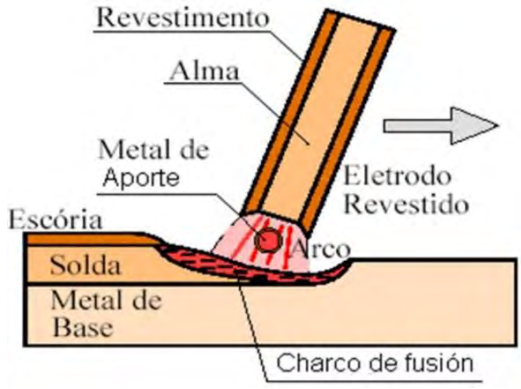
La soldadura manual es el más extendido entre todos los procedimientos de soldadura por arco, debido fundamentalmente a su versatilidad, aparte de que el equipo necesario para su ejecución es más sencillo, transportable y barato que el de los demás.

Así, la soldadura manual puede ser utilizada en cualquier posición, tanto en locales cerrados como en el exterior, se puede aplicar en cualquier localización que pueda ser alcanzada por un electrodo, incluso con restricciones de espacio, que no permiten la utilización de otros equipos; por otra parte, al no requerir ni tuberías de gases ni conducciones de agua de refrigeración, puede ser empleada en lugares relativamente alejados de la unidad generadora.

Por otra parte, la soldadura manual es aplicable a casi todos los tipos de aceros: al carbono, débilmente aleados, inoxidables, resistentes al calor, etc., y a gran número de aleaciones, como las cobre – cinc (latones) y cobre – estaño (bronces) principalmente. Asimismo, la soldadura manual se puede utilizar en todos los tipos de juntas y posiciones. La figura 6, ilustra dicho proceso (Jeffus ,2009)

Figura 3

Proceso SMAW



Nota. Society American Welding. (1996). *Manual de soldadura* (Octava edicion ed.). Mexico: Prentice-Hall.

2.8.1. Principios del proceso

En esencia, el procedimiento consiste en el establecimiento de un circuito eléctrico cerrado (Figura 7) que requiere una fuente de corriente adecuada dotado de dos terminales, uno de ellos conectado por medio de un cable a una porta electrodo, en cuya pinza se sujeta un electrodo revestido; el otro terminal se conecta, a su vez, a través de un cable de retorno y una pinza de masa, a la pieza. El circuito se cierra a través del arco que salta entre el extremo del electrodo y el punto de soldeo en la pieza.

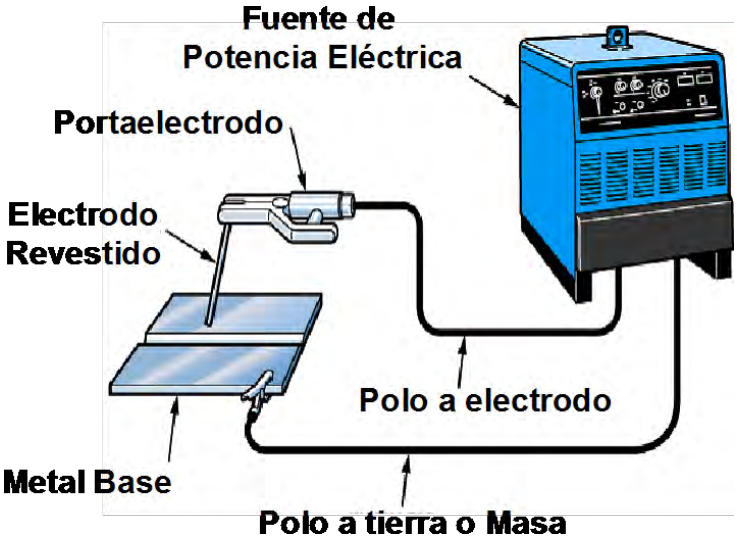
El proceso se inicia con el cebado del arco, operación consistente en tocar, por brevísimos instantes, la pieza con el extremo libre del electrodo, cerrándose durante ese corto tiempo el circuito. El paso de corriente genera, el calentamiento del punto de contacto y de las zonas inmediatas, particularmente el extremo del electrodo. La temperatura alcanzada por éste puede llegar a la de incandescencia, a pesar del corto tiempo de contacto, siendo suficiente para que, una vez separado el extremo del electrodo de la pieza, el metal del extremo libre del mismo produzca una fuerte emisión de electrones que se aceleran por la tensión, chocan con los electrones de otros

átomos del medio gaseoso, a los que expulsa de sus órbitas, lo cual genera una atmósfera ionizada en su entorno que permite el paso de corriente a través del aire, con lo que, a los electrones emitidos por el electrodo incandescente se suma el torrente de electrones conducido por ésta, que se proyectan sobre el ánodo, provocando su fusión parcial y produciéndose así el salto del arco.

El arco eleva extraordinariamente la temperatura, muy por encima de la de fusión del metal temperaturas del orden de 5000ºC son normales en cualquier arco deforma que, tanto el extremo del electrodo como la zona afectada por el arco en el metal base, se funden. Del extremo del electrodo se desprenden pequeñas gotas de metal fundido, que se proyectan sobre el metal de base también fundido, mezclándose con él y formando lo que se denomina baño de fusión. (society, 2012)

Figura 4.

Circuito eléctrico del proceso SMAW



Nota. Correa (2014), Procesos de Manufactura y Materiales.

2.8.2. Ventajas y limitaciones del soldeo por arco con electrodos revestidos

2.8.2.1. 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 es necesaria protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares.
- Es menos sensible al viento y a las corrientes de aire que los procesos por arco con protección gaseosa. No obstante, el proceso debe emplearse siempre protegido del viento, lluvia y nieve.
- Se puede emplear en cualquier posición, en locales abiertos y en locales cerrados, incluso con restricciones de espacio. No requiere conducciones de agua de refrigeración, ni tuberías o botellas de gases de protección, por lo que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.
- 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. (society, 2012)

2.8.2.2. Limitaciones

- Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición y por la necesidad de retirarla 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 de bajo punto de fusión como plomo, estaño y cinc, 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 titanio, zirconio, tántalo y niobio, 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 por los procesos que utilizan electrodo continuo, como el soldeo con alambre tubular o soldeo MIG / MAG. Esto se debe a que el electrodo solo puede consumirse hasta una longitud mínima (unos 5 cm), cuando se llega a dicha longitud el soldador tiene que retirar la colilla del electrodo no consumida e insertar un nuevo electrodo.
- Aunque en teoría se puede soldar cualquier espesor por encima de 1.5 mm, el proceso no resulta productivo para espesores mayores de 38 mm. (society, 2012)

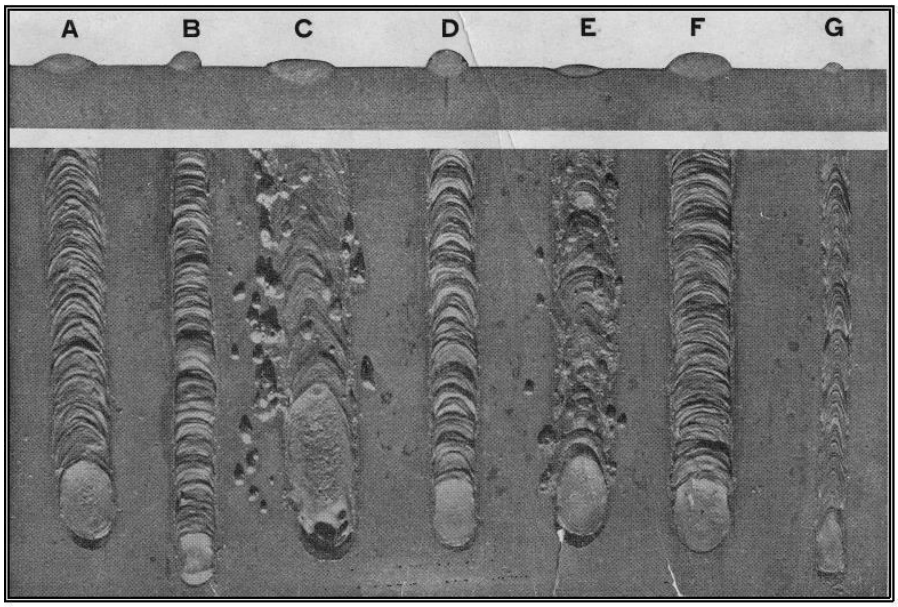
2.8.2.3. Variables del Proceso

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 5.

Figura 5

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), Manual de Soldadura & Catálogo de Productos

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

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

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

2.8.2.4. Efecto de las variables en el proceso SMAW.

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

a) Diámetro del electrodo

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

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

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

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

b) Intensidad de soldeo

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

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

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

c) Longitud de arco

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

Es conveniente mantener siempre la misma longitud del arco, con objeto de evitar oscilaciones en la tensión e intensidad de la corriente y con ello una penetración desigual. Un arco

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

d) Velocidad de soldeo

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

- 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. 70).
- Si la velocidad es excesiva se producen mordeduras, se dificulta la retirada de la escoria y se favorece el atrapamiento de gases (produciéndose poros). (Lincoln Electric, 2013, pág. 18)
- Con una baja velocidad el cordón será ancho y convexo y poca penetración, debido a que el arco reside demasiado tiempo sobre el metal depositado, (efecto “colchón”), en vez de concentrarse sobre el metal base.

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

e) Corriente de soldadura

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 realizar las tareas de soldadura, todavía la corriente contínua (CC6). 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 4, 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 4

Comparación entre corriente continua y corriente alterna.

Parámetro	Corriente Alterna	Corriente Continua
Cebado de acrco	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.

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)

Por otra parte, hay que tener en cuenta que el equipo tiene que ser capaz de suministrar corriente suficiente para el diámetro adecuado del electrodo. Hay que tener en cuenta, como regla práctica, que la intensidad requerida se calcula aplicando la ecuación 2.1:

$$I = k \times (d - 1) \qquad \text{Ec.1}$$

Donde:

I: $Intensidad\ de\ corriente\ (Amp)$

d: $Diámetro\ de\ electrodo\ (mm)$

k: $Contante\ que\ depende\ del\ tipo\ de\ electrodo$

En la tabla 5, se muestra el valor de la constante *k* en función al tipo de electrodo.

Tabla 5

Valor de la constante k.

Valor de K	Tipo de electrodo
55	Oxidante, básico, rutilo delgado
60	Ácido y rutilo medio
70	Gran rendemiento

Fuente: Alonso (2012), Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto.

En cuanto a la polaridad con corriente continua depende del material a soldar y del electrodo empleado, sin embargo, se recuerda que se obtienen mayor penetración con polaridad inversa.

f) Angulo de inclinación del electrodo

En el proceso SMAW, el ángulo de soldeo (o ángulo de inclinación del electrodo) es una variable operacional, ya que depende directamente de la forma en que el soldador ejecuta la soldadura durante la operación. No es un parámetro fijado por la máquina, sino una condición que puede variar durante la ejecución del cordón.

Esta variable operacional se puede definir como: la inclinación que adopta el electrodo revestido respecto al material base y al sentido de avance durante la soldadura SMAW. Constituye una variable operacional que depende de la técnica del soldador y que afecta la transferencia de calor, la penetración, la geometría del cordón, la protección proporcionada por el revestimiento y, en consecuencia, la soldabilidad del acero AISI 304. En SMAW se recomienda generalmente un ángulo de arrastre de 5° a 15° respecto a la vertical, en el sentido del avance. Cuando este ángulo se modifica significativamente, aparecen los siguientes efectos:

Tabla 6

Ángulo de inclinación.

Ángulo de inclinación	Efectos sobre la soldabilidad del AISI 304
Menor al recomendado (0°–5°)	Mayor penetración del calor en el material base, cordón más angosto y alto, mejor protección del baño de fusión, pero el avance puede ser más lento y existe mayor riesgo de pegado del electrodo si el arco es muy corto.
Recomendado (5°–15°)	Arco estable, penetración uniforme, buena humectación del cordón, adecuada protección por la escoria, menor probabilidad de discontinuidades y mejores propiedades mecánicas.
Mayor al recomendado (>15°–20°)	Disminuye la penetración, el cordón se hace más ancho y plano, aumenta el salpicado, el baño de fusión pierde estabilidad y la escoria puede adelantarse al arco, favoreciendo inclusiones de escoria, falta de fusión y porosidad.

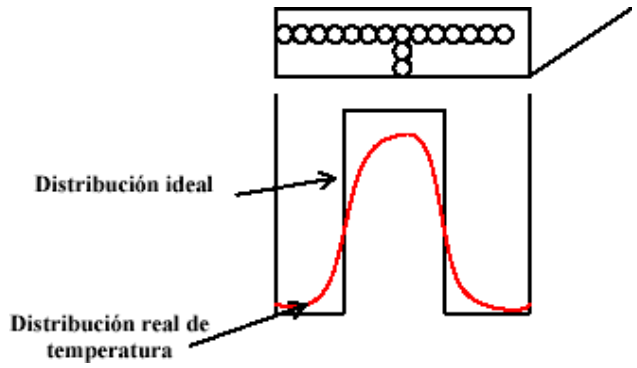
Nota. Elaboración propia

2.8 Ciclo térmico y distribución de la temperatura

Si se realizara una soldadura en la superficie de la pieza de trabajo, y se colocará una serie de termocuplas distribuidas debajo de ella según la figura 6 (círculos pequeños), se podría representar la distribución de la temperatura.

Figura 6

Distribución de temperatura en la pieza soldada.



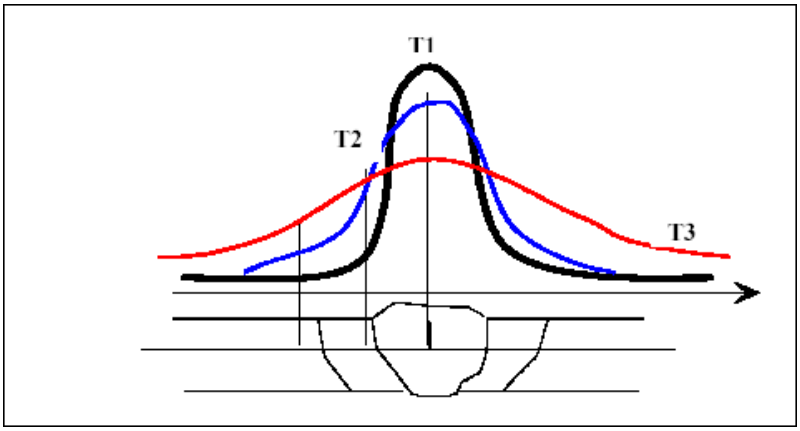
Nota. Fosca (2002).

Si el calor aportado no fluyera a través de la pieza a soldar, todo el calor se concentraría en la zona a fundir, y sólo una zona estrecha en el material alcanzaría el punto de fusión y el resto del metal permanecería a temperatura ambiente (distribución ideal de temperatura). Sin embargo, los metales son buenos conductores del calor, por lo tanto, éste se transmite a lo largo de la pieza.

Al conocer la temperatura en cada punto de la pieza a soldar, se puede predecir qué zonas del metal se verán afectadas micro estructuralmente. El calor aplicado a la pieza a soldar, se experimenta durante un tiempo determinado, es obvio que en un primer momento ésta se caliente y que, después, una vez que la fuente deja de actuar, comience a enfriarse. Esto significa que cada punto del material experimentará una variación de temperatura respecto del tiempo, es decir, un ciclo térmico. Si representamos los conceptos, distribución de temperaturas y ciclo térmico, en un mismo gráfico, se obtendrá una serie de curvas de temperatura que van cambiando con el tiempo como se indica en la figura 7.

Figura 7

Distribución de temperatura de una sección cualquiera a lo largo del eje X. Las curvas representan instantes de tiempo diferentes T1, T2, T3 durante la soldadura.



Nota. Fosca (2002).

Es importante señalar que, la distribución de temperatura representa las temperaturas existentes en un momento determinado, en varios puntos del metal que está siendo soldado. Por otro lado, el ciclo térmico representa la variación de la temperatura, de un punto cualquiera del metal, a lo largo del tiempo.

En la figura 7, se observa que existe una diferencia de temperaturas entre los puntos alejados de la unión soldada, separados entre sí por una determinada distancia. A esta diferencia se le llama gradiente térmico, el cual determina la velocidad de flujo de calor entre estos dos puntos. Cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas, mayor será la velocidad de enfriamiento o calentamiento entre ellos.

2.8.3. Factores que influyen en los cambios de temperatura durante la soldadura por arco.

Las investigaciones han demostrado que la distribución de temperatura en la soldadura por arco manual es influenciada por los siguientes factores:

a) Aporte de calor neto (Heat input).

El aporte de calor es la energía que se genera durante la soldadura. Puede ser de origen químico, como consecuencia de la combustión de sustancias combustibles; eléctricas (procesos de arco eléctrico); o mecánico (soldadura por fricción). Se expresa normalmente en términos de joules por milímetro (J/mm).

Esta energía o aporte de calor está condicionada por la eficiencia del proceso de soldadura empleado. Así el calor de aporte neto viene expresado por la siguiente ecuación:

$$Hnet = \frac{V \times I}{v} \times f \qquad Ec.1$$

Donde:

H_{net} = Calor neto sumnistrado (j/mm)

I = Amperaje (amp)

V = Voltios (Volt)

v = Velocidad de la traslación de la fuente de calor en mm/seg.

f: eficiencia térmica

Donde "f "es el factor de eficiencia del proceso de soldadura empleado y puede ser estimado a partir de los valores mostrados en la tabla 7.

Tabla 7

Eficiencia del proceso de soldadura

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

Nota. Fosca (2002)

La ecuación 2.1, provee un valor de referencia del calor de aporte, en función del voltaje, amperaje, la velocidad de soldadura.

b) Temperatura de precalentamiento.

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

c) Geometría de la soldadura.

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

d) Propiedades 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

e) Diámetro del electrodo.

Para un diámetro mayor de electrodo se requerirá, mayor aporte de calor para fundirlo. Este factor es de importancia secundaria, pero influye en el tamaño de la fuente de calor.

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

Cuando se realiza una soldadura, las regiones de la pieza que alcancen valores entre los límites arriba indicados, experimentarán cambios significativos en su microestructura y por lo tanto en las propiedades mecánicas.

2.8.4. Cálculo del Ancho de la ZAC

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

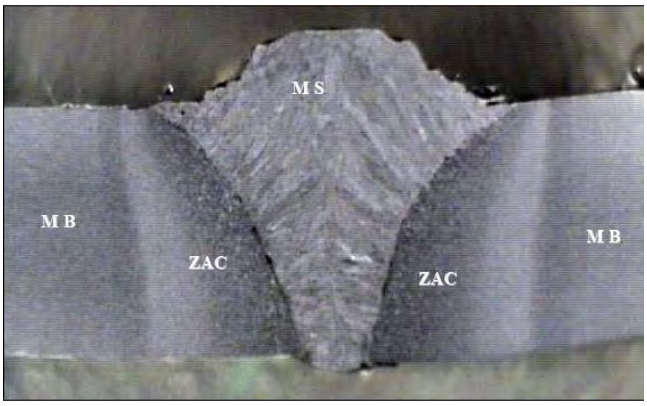
A pesar de que la ecuación del máximo de temperatura es de gran utilidad, es importante no olvidar las limitaciones existentes sobre su aplicación. La ecuación se aplica en procesos de pasadas únicas de penetración completa, soldeo o corte térmico, con independencia del espesor de la chapa. De hecho, también se aplica a cualquier soldadura por arco de penetración completa con menos de 4 pasadas. La ecuación 2 puede aplicarse sobre la base de una por pasada, sin embargo, la temperatura entre pasadas, aquella a la cual la zona de soldadura se enfría entre una y otra pasada, puede considerarse como un valor de T_0 en la ecuación del máximo de temperatura. (Fosca, 2009).

$$Y = [(\frac{1}{Tmax - T_o}) - (\frac{1}{Tfusion - T_o})] \qquad Ec.\,2$$

En la figura 8 se visualiza las diferentes zonas de un depósito de soldadura.

Figura 8

Zonas del depósito de soldadura.



Nota. Blanco y Cepeda (2015), efecto de la variación de temperatura entre pases en el acero al carbono ASTM A106 grado B

Donde:

MS = Metal de soldadura (depósito de soldadura)

ZAC = Zona afectada por el calor

MB = Metal base.

2.9 Soldadura de los aceros inoxidables

La soldadura en acero inoxidable varía sensiblemente respecto a la soldadura que pueda practicarse en piezas de acero ordinario. Por ello, se hace necesario realizar un estudio detallado de las características que le son propias a fin de poder obtener resultados óptimos de soldeo.

En la tabla 8 se muestra una primera comparativa de la influencia de las propiedades físicas en la soldadura de aceros inoxidables austeníticos frente a los aceros al carbono.

Tabla 8

Comparativa entre la Soldadura en Aceros Inoxidables Austeníticos Vs. Aceros al Carbono.

	Aceros inoxidables austeníticos	**Aceros al carbono**	**Observaciones**
Punto de fusión	1400 – 1450 ºC (Acero inoxidable AISI 304)	1540 ºC	El acero inoxidable tipo 304 requiere menos calor para producir la fusión, lo cual significa una soldadura más rápida para el mismo calor aportado por la fuente de soldeo, o bien, requiere emplear menos calor para la misma velocidad de soldeo.
Velocidad de conductividad térmica a 100 ºC	28%	100%	El acero inoxidable 304 conduce el calor mucho más lentamente que los aceros al carbono, lo cual va a producir gradientes de temperatura más pronunciados. Esto va a originar como resultado que se genere una mayor deformación en la pieza soldada.Asimismo, que los aceros inoxidables tengan una menor velocidad de la conductividad térmica significará una difusión más lenta del calor a través del metal de base. Esto va a provocar que la zona soldada permanecerá caliente por más tiempo, originándose así un mayor riesgo de producirse fenómenos como la precipitación de carburos de cromo, que como se verá más adelante, va a reducir la resistencia a la corrosión del acero.
a 650 ºC	66%	100%	
Expansión térmica pulg./pulg./ºC x 10^{-6}	17,6 (20 – 500 ºC)	11,7 (20 – 628 ºC)	Esto tiene especial relevancia en los métodos de soldeo por resistencia eléctrica. En efecto, una mayor resistencia eléctrica de los aceros inoxidables 304 implica que se genera mayor calor para el paso de la misma corriente eléctrica. Esta propiedad, junto con la menor velocidad de conductividad térmica de los aceros inoxidables, va a condicionar que los métodos de soldeo por resistencia eléctrica sean más efectivos en los aceros inoxidables que en los aceros al carbono. El acero inoxidable 304 se expande y contrae a una velocidad más alta que los aceros al carbono, lo cual significa que son más propensos a sufrir grandes

	deformaciones durante la soldadura. Por lo tanto, en el caso de los aceros inoxidables habrá que cuidar el proceso de embridado de las piezas con el fin de permitir la expansión y contracción de manera que se pueda controlar la deformación y el desarrollo de tensiones térmicas después del enfriamiento. Por ejemplo, para los aceros inoxidables deberán usarse más puntos de soldadura (más puntadas) para la sujeción y posicionado de las piezas que para el caso del acero al carbono.

Nota. Istrati (1961).

2.8.5. Aspectos operativos

En primer lugar, hay que reseñar que la soldadura en los aceros inoxidables genera un baño que en general resulta menos fluido que el de un acero ordinario, y además la penetración obtenida en la soldadura no es tan grande. Para compensar estos inconvenientes se debe prestar especial atención a las operaciones previas de preparación y separación de bordes. En este sentido, se recomienda realizar siempre un chaflán en los bordes para facilitar la fluidez y penetración del baño de fusión, además de poder conseguir así de más espacio para que la pasada de raíz pueda ser más ancha.

Además, en comparación con el resto de aceros al carbono, los aceros inoxidables muestran una mayor resistencia eléctrica debida a su estructura interna y composición, lo que implicará el empleo de mayores niveles de intensidad de corriente en el equipo de soldeo eléctrico, entre un 25 y 50% superior a los utilizados para soldar un acero común.

Si se emplease una corriente de intensidad demasiado baja dará lugar a un arco inestable, con interferencias de la escoria en el arco que terminará pegándose en el electrodo y dará lugar a una incorrecta forma del cordón. Por el contrario, si se emplea una corriente de intensidad

demasiado elevada generará un salpicado excesivo y poco control sobre el baño de fusión, que terminará produciendo fisuras y una pérdida de perdida a la corrosión por pérdida de cromo en la composición final del cordón.

En cuanto a la posición a mantener del electrodo, ésta dependerá de las distintas técnicas de avance en función de la posición en que se realiza la soldadura, que pueden ser:

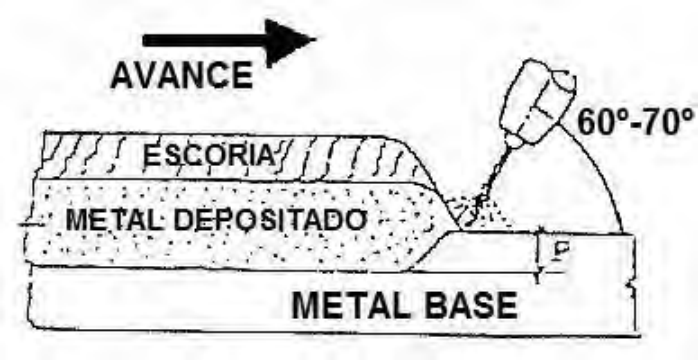
- Soldadura a derecha;
- Soldadura a izquierda;
- Soldadura en vertical;
- Soldadura en cornisa;
- Soldadura en techo.

a) Soldadura a derecha:

La soldadura a derecho, como se muestra en la figura 9, proporciona una mayor penetración y avance de la pistola. Por otro lado, se evita el riesgo de inclusiones de escorias, y además disminuye la probabilidad de formación de poros o de falta de fusión del baño. Genera un baño muy caliente y fluido, lo que requiere cierta habilidad por parte del operario. Se ejecuta mediante pasadas estrechas.

Figura 9

Esquema de soldadura a derecha



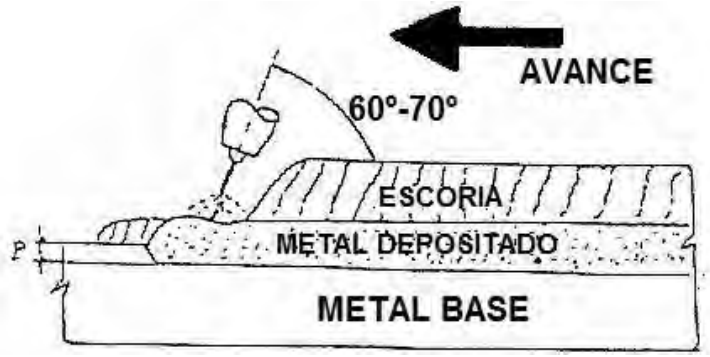
Nota. Ushiña Loachamín (2019) Diseño e implementación de un posicionador horizontal y circular para soldadura MIG en la empresa Indima S.A.

b) Soldadura a izquierda:

La soldadura ejecutada a izquierda como se muestra en la figura 10 proporciona poca penetración, por lo que solo se recomienda para soldar chapas finas. Por otro lado, requiere menor intensidad de corriente, por lo que el calor aportado al proceso es menor. Tiene tendencia a la formación de poros y de falta de fusión en el baño. Genera cordones anchos.

Figura 10

Esquema de soldadura a izquierda



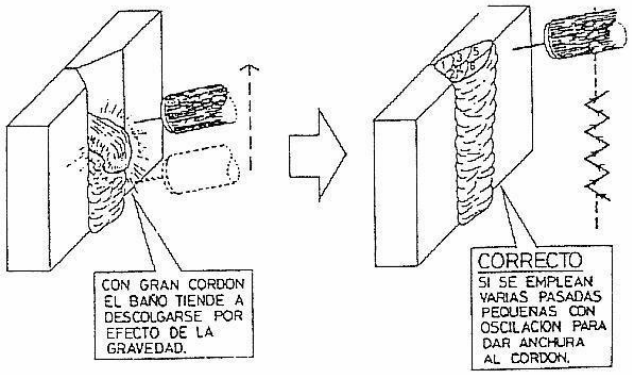
Nota. Ushiña Loachamín (2019) Diseño e implementación de un posicionador horizontal y circular para soldadura MIG en la empresa Indima S.A.

c) Soldadura en vertical

Para soldadura vertical, tal como se muestra en la figura 11, el electrodo se recomienda mantenerlo perpendicular a la pieza, usándose una leve oscilación en la pasada de raíz.

Figura 11

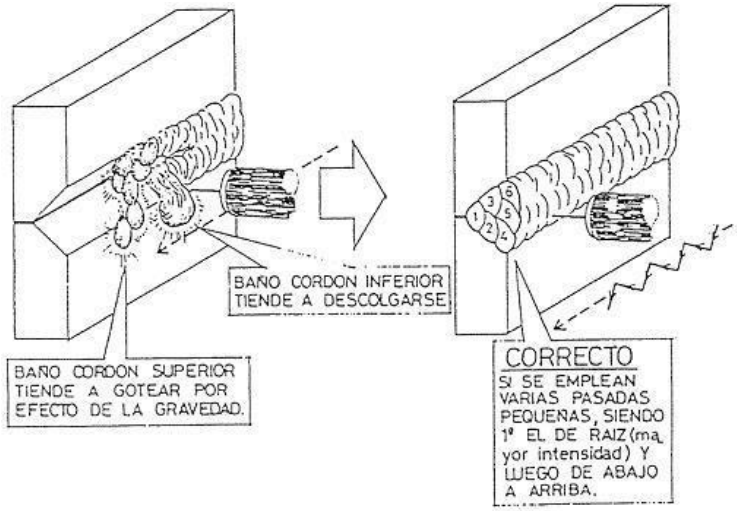
Esquema de soldadura en vertical



Nota. Horwitz (2003).

Figura 12

Esquema de soldadura en cornisa



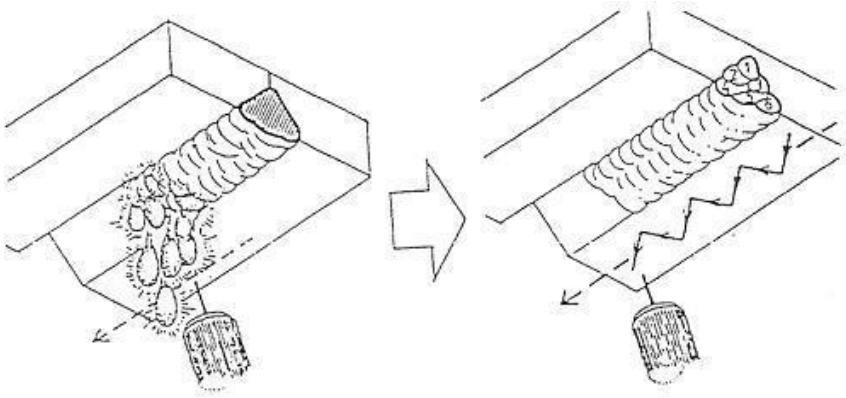
Nota. Horwitz (2003).

e) Soldadura en techo:

Para las soldaduras ejecutadas en techo, como se muestra en la figura 13 se recomienda realizar varias pasadas pequeñas con oscilación.

Figura 13

Esquema de soldadura en techo.



Nota. Horwitz (2003).

En general, para cualquier soldadura en aceros inoxidables se recomienda emplear la intensidad de corriente mínima, pero que proporcione un arco estable y cordones rectos. Con ello se conseguirá un cordón con mejor resistencia a la corrosión y minimizará también el aporte de calor, lo que reduce el riesgo a la fisuración del cordón y a la generación de deformaciones.

2.8.6. Operaciones de corte y montaje

Previo al proceso de soldadura de las piezas, éstas deberán ser cortadas con las medidas y geometrías precisas para luego ser posicionadas y montadas. Con excepción del corte oxiacetilénico, el acero inoxidable puede ser cortado con los mismos métodos de corte utilizados en los aceros al carbono.

Efectivamente, el único método de corte que no puede emplearse en los aceros inoxidables es el corte oxiacetilénico. El motivo de no poderse emplear el procedimiento de corte oxiacetilénico es porque se forma una gran cantidad de óxidos de cromo refractarios, cuyo punto de fusión es superior al del metal base, lo que impide que pueda llevarse a cabo un corte preciso y de calidad.

En la tabla 9 se observa los procedimientos de corte más empleados en piezas de acero inoxidable, en función de su espesor y forma geométrica:

Tabla 9

Métodos de Corte del Acero Inoxidable.

Método	Espesor/Geometría	Observaciones
Guillotina	Láminas, cintas, placas finas	Se debe realizar una preparación previa del borde expuesto al ambiente para eliminar el riesgo de formación de rendijas.
Corte por sierra y abrasivo	Amplio rango de espesores	Se recomienda eliminar restos de lubricantes o líquidos de corte antes de proceder a la soldadura o al tratamiento térmico previo.
Maquinado	Formas geométricas variadas	Se recomienda eliminar restos de lubricantes o líquidos de corte antes de proceder a la soldadura o al tratamiento térmico previo.
Corte con arco de plasma	Amplio rango de espesores	Antes de soldar, se debe amolar los bordes y superficies cortadas para limpiar bien el metal.
Corte con polvo metálico	Amplio rango de espesores	Se trata de un corte menos preciso que el corte con plasma, y además una vez efectuado el corte se deben eliminar todas las escorias formadas.
Corte por arco de grafito	Usado para acanalar la parte posterior del cordón de soldadura y para cortar piezas con formas irregulares	Antes de soldar, se deben amolar los bordes y superficies cortadas para limpiar bien el metal.

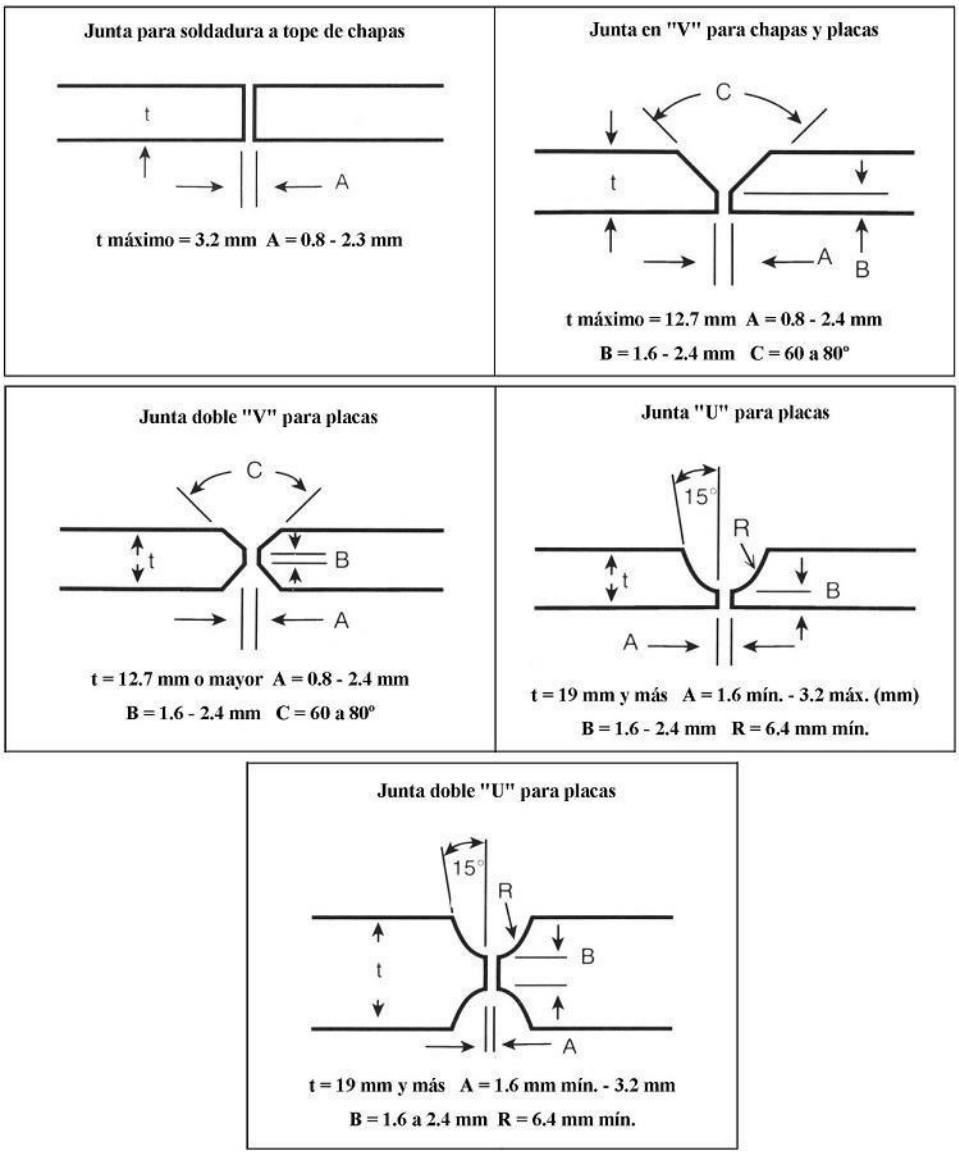
Nota. Horwitz (2003).

2.8.7. Preparación de bordes

En la figura 14, se muestran las preparaciones de borde recomendadas para la soldadura de chapas y planchas de acero inoxidable, con objeto de obtener un cordon de soldadura final con un diseño óptimo:

Figura 14

Preparaciones de borde recomendadas.



Nota. Horwitz (2003).

2.8.8. Alineación de bordes y punteado de la soldadura

Dotar de un alineamiento adecuado de las piezas antes de soldar mejora la tolerancia de fabricación, el aspecto final del cordón y el tiempo de soldadura, además que genera una menor deformación residual de las piezas soldadas.

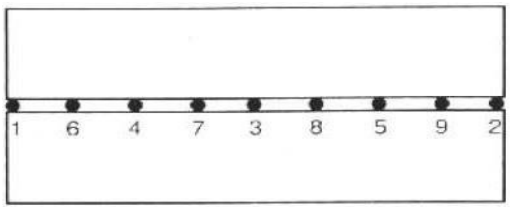
Cuando una de las piezas a soldar es sensiblemente más gruesa que la otra pieza (por ejemplo, al soldar el borde de la cubierta de un tanque con su pared lateral, donde el espesor de la chapa que constituye la cubierta del tanque suele ser más gruesa que la chapa superior de la pared lateral), el borde de la pieza más gruesa (en este caso el borde de la cubierta del tanque) deberá ser maquinado para rebajarlo e igualar los espesores soldados. Esto ayudará a disminuir la concentración de tensiones, y por ende, las deformaciones residuales.

Una vez que las piezas hayan sido posicionadas se suelen puntear las juntas para conseguir mantener el alineamiento y la separación uniforme entre bordes.

Para evitar que se desalinee las piezas durante el punteado, la secuencia de puntadas deberá comenzarse con un punto en cada extremo de la plancha, para posteriormente realizar otro punto en el centro mismo, según se muestra en la figura 15.

Figura 15

Secuencia de punteado correcto



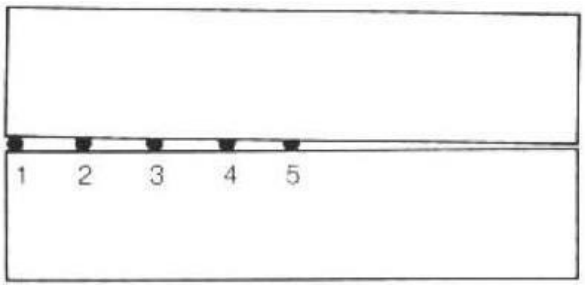
Nota. Avesta Welding AB (2004) The Avesta Welding Manual: Practice and products for stainless steel welding

La secuencia continuará realizando puntos de soldadura en el centro de cada tramo que resulte de ir avanzando con el proceso de punteado, como también se indica en la figura 16.

Por el contrario, cuando las puntadas se realizan desde un lado, como se muestra en la figura 16, los bordes se juntan y las chapas quedarán desalineadas y deformadas.

Figura 16

Secuencia de punteado incorrecto



Nota. Avesta Welding AB (2004) The Avesta Welding Manual: Practice and products for stainless steel welding

En general, y debido a la mayor expansión térmica de los aceros inoxidables, los puntos de soldadura para la alineación de las chapas se deberán colocar más juntos que si fuera para soldar piezas de acero al carbono ordinario.

El grosor de las puntadas deberá ser, en general, lo más pequeño posible, en torno a 3 ó 4 mm o incluso menos, como un pequeño punto, para el caso de chapas muy finas. En caso de chapas muy gruesas pueden darse puntadas más anchas (en torno a 20 mm), aunque en este caso deberán ser esmeriladas. Lo importante, en todo caso, es que las puntadas no causen defectos en el cordón de la soldadura final.

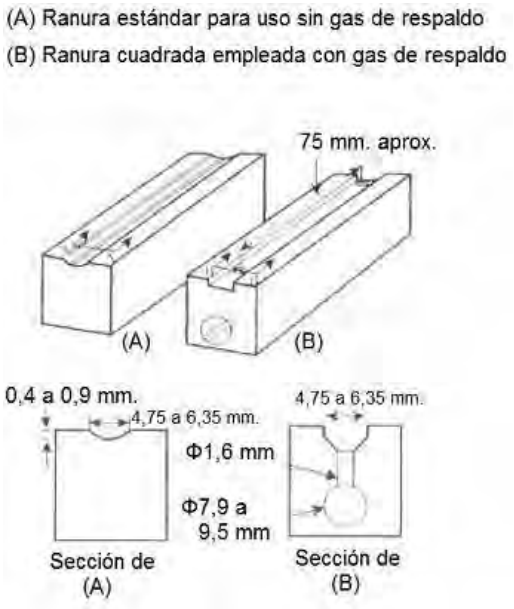
Aquellas puntadas que se incorporen a la soldadura final deberán ser limpiadas con cepillo o esmeriladas. En todo caso, se deberán inspeccionar para comprobar que no tengan ningún tipo de agrietamiento o rajaduras, en cuyo caso deberán ser eliminadas por esmerilado.

2.8.9. Piezas y material de respaldo

En caso de tener que ejecutarse la soldadura solamente por uno de los lados de la chapa se recomienda emplear unas piezas de respaldo por el otro lado, con objeto de conseguir un mejor acabado del cordón, una adecuada penetración de raíz y evitar la formación de grietas y rendijas que afecta tan negativamente a la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables. Este diseño de respaldo se muestra en la figura 17.

Figura 17

Diseño de ranuras en barras de respaldo



Nota. Horwitz (2003).

Decir que, en caso de poderse ejecutar la soldadura por ambos lados, estas piezas de respaldo no serían necesarias.

Pero en caso de tener que utilizar piezas de respaldo, lo más común es emplear barras de cobre, debido a la alta conductividad que presenta el material de cobre. El diseño y forma de la barra de respaldo dependerá si se usa o no gas de respaldo en la soldadura.

Cuando se utilice una barra de respaldo que sea de cobre, se deberá prestar especial atención en direccionar adecuadamente el arco de soldadura para evitar que el cobre de la barra de respaldo se funda y se incorpore al baño de fusión. Si el cobre fundido contamina el baño de fusión podría dar lugar a la formación de grietas, reduciendo la resistencia mecánica y contra la corrosión de la soldadura.

Por ello, lo que se recomienda es decapar la zona después de soldar para eliminar posibles trazas de cobre, algo que habrá que hacer obligatoriamente si a la soldadura se le tiene previsto que le siga un tratamiento de temple.

El uso de gas como gas de respaldo provee una excelente protección al lado interno de las soldaduras con el procedimiento TIG. Ayuda a controlar la penetración y mantiene una superficie exterior del cordón de buen aspecto y limpia.

El nitrógeno también se puede usar como gas de respaldo, y tiene un precio más ventajoso comparado con el argón. Sin embargo, habrá que cuidar que el nitrógeno no se introduzca dentro de la atmósfera del arco, porque podría alterar la composición de la soldadura.

Además de las barras de cobre se pueden emplear piezas cerámicas, cintas y pastas que están disponibles comercialmente, que ofrecen alguna protección contra el quemado, pero ofrecen poca protección contra la oxidación. Por ello, en este caso se hace necesario realizar un proceso de limpieza final por medios abrasivos o decapado con ácidos.

2.8.10. Grado de penetración de la soldadura

Para que una soldadura a tope pueda desarrollar totalmente sus propiedades de resistencia mecánica es necesario que la penetración del metal de aporte sea completa, de manera que rellene todo el espacio entre las piezas soldadas.

Es muy importante evitar que se formen huecos o rendijas sin rellenar de material de aporte por una falta de penetración pues esto, además de reducir la resistencia mecánica de la soldadura, es un foco de corrosión.

En efecto, las grietas y rendijas son zonas donde no existe suficiente aireación por lo que suele haber una escasez de oxígeno. Esta escasez de oxígeno impide la correcta formación de la capa protectora de óxido de cromo sobre la superficie del acero, es decir, no tiene lugar la pasivación del acero que le confiere la naturaleza de inoxidable. Por lo tanto, grietas y rendijas se convierten en puntos críticos por donde suele comenzar la corrosión del metal.

En este sentido, y como el baño de soldadura de un acero inoxidable es menos fluido que el del acero al carbono, su poder de penetración también es menor. Por ello, habrá que poner especial atención a la penetración de la junta soldada y disponer de un espacio mayor para el pase de raíz de manera que se favorezca el relleno con material de aporte.

Por ello, una vez realizada la soldadura, se hace necesario realizar el sellado de grietas, hendiduras, rendijas o el relleno de cráteres, pues son el origen de fenómenos corrosivos que reducen la resistencia del metal.

Concretamente la formación de cráteres, que se originan en los puntos inicial (cebado del arco) y final del cordón de soldadura (donde se interrumpe el arco), son posibles focos de inicio

de corrosión. De esta manera, se debe proceder a eliminar estas irregularidades mediante un relleno con material de soldadura y posteriormente aplicar un ligero pulido con abrasivos de grano fino para eliminar la posible presencia de irregularidades en la superficie.

2.8.11. Humedad

Otros de los aspectos que habrá que cuidar mucho es la humedad, cuya presencia puede producir porosidades en el cordón de soldadura. La humedad no solo puede presentarse en el ambiente que rodea mientras se ejecuta la soldadura, sino que puede estar presente a través del metal base o estar ya impregnada en el propio revestimiento de los electrodos inoxidables que se empleen.

Para ello se recomienda mantener los electrodos en ambientes cerrados y a una temperatura de 100 º C, o bien en termos portátiles hasta su utilización, para evitar que se produzca la absorción de humedad por parte del revestimiento del electrodo.

Síntomas que pueden avisarnos de la presencia de humedad en el revestimiento de los electrodos es la dificultad que presenta la remoción de la escoria de la superficie del cordón o la presencia visible de porosidad.

2.8.12. Limpieza

Otro aspecto a cuidar es la limpieza tanto del propio cordón como de las zonas cercanas en una distancia de 5 a 8 cm. Una limpieza insuficiente podrá provocar una pérdida de resistencia a la corrosión del propio cordón de soldadura o de las zonas adyacentes afectadas térmicamente (ZAT) por la soldadura, así como dar origen a una posible aparición de fisuras, porosidad o discontinuidades internas por falta de fusión.

A continuación, se enumeran algunas reglas a tener en cuenta para mantener unas buenas condiciones de limpieza:

- Antes de ejecutar la soldadura tanto los bordes como las superficies adyacentes deberán estar limpias y libres de grasas, aceites, para lo que se recomienda el empleo de disolventes no clorados (los disolventes clorados pueden dejar restos de cloruros sobre la superficie del acero que si no se limpian adecuadamente pueden originar corrosión).
- Asimismo, los bordes de las piezas a soldar deben estar libres de óxidos superficiales, los cuales suelen quedar después de realizar cortes por métodos térmicos. Estos óxidos están compuestos principalmente de cromo y níquel proveniente del propio acero inoxidable, los cuales poseen una temperatura de fusión mucho mayor que la del metal de base, y por lo tanto no se funden durante la soldadura.
- Por ello, estos restos de óxidos pueden quedar atrapados en el interior de la soldadura, dando lugar a un defecto interno que es dificultoso detectar, incluso por radiografía. Esto supone una diferencia básica con la soldadura de aceros ordinarios, dado que con los aceros ordinarios los óxidos de hierro funden a casi la misma temperatura que el metal de base.

En la tabla 10 se muestra las diferencias de temperatura de fusión entre el metal base y sus óxidos.

Tabla 10

Temperatura de fusión de metales y óxidos metálicos

Metal	**Temperatura de fusión (ºC)**	**Óxido metálico**	**Temperatura de fusión (ºC)**
Hierro	1.537	Fe_2O_3	1.565
Níquel	1.454	NiO	1.982
AISI 304	1.400 – 1.454	Cr_2O_3	2.266

Nota. Ramón Cortes et al. (2004).

Cuando se pretenda soldar aceros inoxidables que hayan estado en servicio y expuestos a altas temperaturas, posiblemente sus superficies estarán fuertemente oxidadas. En estos casos, el empleo de cepillos de alambres pule la superficie, pero las capas de óxidos que estén más fuertemente adheridas deberán ser eliminadas mediante esmerilado o maquinado, y si el óxido todavía persiste, entonces se puede emplear un decapado ácido de la zona afectada.

- En otras ocasiones, las piezas de aceros que han de ser soldadas han estado previamente prestando un servicio en ambiente químico lo que provoca que puedan estar contaminadas por productos químicos. Por ejemplo, un acero inoxidable que haya permanecido de servicio en un medio cáustico y se suelda, es posible entonces que tanto el cordón como la zona afectada térmicamente por la soldadura puedan desarrollar fisuras.

Por tanto, es una práctica recomendable neutralizar los residuos alcalinos con una solución medianamente ácida y los ácidos con una solución medianamente alcalina, antes de proceder a la realización de soldaduras en equipos que hayan estado en contacto con elementos químicos. A todo tratamiento neutralizador deberá seguir siempre un lavado con agua caliente para eliminar los residuos.

- Una vez finalizado el cordón de soldadura se deberá remover cualquier resto de resto que quede depositada sobre el cordón, dado que si quedara algo de escoria sobre el cordón, la zona cubierta por la escoria no quedaría expuesta al aire y no podría formarse la película protectora de óxido de cromo (pasivación del acero). Para la eliminación de escorias se recomienda el empleo de cepillos cuyas púas sean también de alambre de acero inoxidable.
- Se recomienda el empleo de gel decapante para aceros inoxidables con el fin de conseguir una mejor limpieza y pasivado del acero. Con ello se consigue aumentar la resistencia al ataque

químico de la zona soldada al eliminar cualquier residuo que pudiera generar corrosión. Una vez aplicado el gel se deberá esperar unos minutos para que éste reaccione, lavándose a continuación la zona aplicada con agua a presión.

- También se recomienda aplicar gel a ambos lados del cordón de soldadura para prevenir las salpicaduras en las zonas anexas. Las salpicaduras de soldadura crean pequeñas marcas sobre la superficie de la pieza. En estos puntos la capa protectora del acero inoxidable es penetrada y se crean pequeñas rendijas donde la corrosión puede originarse. Tanto el gel aplicado, como las salpicaduras, serán retirados mediante un proceso posterior de limpieza y lavado de las superficies.
- Asimismo, para soldaduras multipasadas se debe extremar la precaución de eliminar la escoria entre pasadas y evitar que quede atrapada en el interior del cordón entre pasadas, dado que darán lugar a puntos de fragilidad de la soldadura.
- En ocasiones, la presencia de ciertos elementos y compuestos en la superficie de las piezas pueden causar fisuras, defectos de soldadura o disminución en la resistencia a la corrosión en la soldadura y en la zona afectada por el calor. En la tabla 11, se indican los elementos que deben ser evitados, así como cuál es su fuente de origen habitual.

Tabla 11

Elementos que pueden causar defectos

Azufre, carbono	**Procedente de hidrocarburos tales como fluidos de corte, grasas, aceites, ceras e imprimantes.**
Azufre, fósforo, carbono	Crayones para marcar y pinturas
Plomo, zinc, cobre	Procedentes de herramientas tales como martillos, barras de respaldo de cobre, pinturas ricas en zinc.

Nota. Ramón Cortes et al. (2004).

La presencia de azufre, fósforo y otros elementos de bajo punto de fusión pueden causar fisuras en la soldadura o en la zona afectada por el calor. Un tratamiento con ácido nítrico seguido de una neutralización antes de ejecutar la soldadura ayudará a eliminar estos restos de contaminantes.

El carbono o materiales carbonosos dejados en la superficie antes de la soldadura, pueden dar lugar a una capa superficial con alto contenido en carbono que también puede reducir la resistencia a la corrosión en determinados ambientes.

Los contaminantes a base de aceite o grasa (hidrocarburos) deberán ser eliminados mediante una limpieza con solventes. Este tipo de contaminantes no es posible eliminarlos mediante tratamiento ácido o con agua. La norma ASTM A380, que se refiere a los procedimientos para limpieza y decapado de equipos de acero inoxidable, es una guía excelente para fabricantes y usuarios.

Un procedimiento típico para eliminar aceites o grasas incluye:

- Eliminar el exceso de contaminante con un trapo limpio.
- Limpiar el área a soldar (por lo menos 50 mm a cada lado de la soldadura) con un solvente orgánico, tales como solventes alifáticos, o bien solventes de naturaleza clorada. No obstante, el problema principal de usar solventes clorados es que pueden permanecer y concentrarse en fisuras, y más tarde iniciar procesos de corrosión por rendijas o por stress, si no se eliminan completamente con una buena limpieza posterior. Por ello, los solventes no clorados se prefieren para la limpieza del acero inoxidable, y son prioritarios usarlos siempre que se trate de la limpieza de equipos y piezas que contengan ranuras en su superficie.

- Una vez aplicado los solventes, y transcurrido el tiempo de reacción de éstos, se deben eliminar completamente secándolos con trapo limpio.
- Se debe asegurar la completa limpieza. Un residuo en el trapo de secado puede indicar limpieza incompleta.

2.8.13. Ventilación y control de humos

Una adecuada ventilación es importante para minimizar la exposición de los operarios soldadores a los humos, producidos durante los procesos de soldadura y corte de todos los metales, incluyendo al acero inoxidable.

Además de una buena ventilación, los soldadores deben evitar aspirar los humos que se desprenden del trabajo de soldeo, posicionándose de tal manera que su cabeza se encuentre fuera de la columna de humo.

La composición de los humos de soldadura varía con el metal de aporte y el proceso. Las soldaduras por arco también producen gases como ozono y óxidos de nitrógeno. Se ha manifestado preocupación en la soldadura con consumibles de acero inoxidable y aceros de alta aleación debido al cromo, y en menor grado al níquel, presente en los humos de soldadura. Una buena ventilación minimizará estos riesgos a la salud.

El Instituto Internacional de Soldadura desarrolló una serie de hojas informativas para soldadores, que ofrecen sugerencias internacionalmente aceptadas para el control del humo.

2.9. Consumibles

En cuanto a los gases de protección que se suelen emplear con la soldadura MIG para aceros inoxidables está el argón, helio o una mezcla de ambos. En ocasiones, para obtener mayor estabilidad del arco y una mejor fluidez del baño de soldadura, se utilizan adiciones de pequeñas cantidades de gases activos como dióxido de carbono, oxígeno o hidrógeno.

Decir que para los procesos de soldadura MIG en aceros inoxidables se recomienda la transferencia de material de aporte por spray, para lo cual se deberá usar como gas protector Argón con 1 ó 2% de Oxígeno. Con ello se consiguen arcos estables y baños de fusión que deja un cordón de aspecto liso y con escasas proyecciones.

Si se decide por el tipo de transferencia del metal de aporte por cortocircuito y pulsado para soldaduras en posición, entonces se recomienda emplear una mezcla de gases compuesto por un 90% de helio, 7,5% argón y un 2,5% de CO_2.

En todo caso, cualquiera que sea la combinación, el gas de protección para la soldadura MIG deberá contener al menos un 97,5% de gases inertes (argon, helio o mezcla de los dos), mientras que los gases activos presentes en la combinación, como el dióxido de carbono (CO_2) no deberá pasar del 2,5%, para que la calidad de la soldadura y la resistencia a la corrosión no se vean disminuidas.

2.11.1 Selección de electrodos

En la selección del contenido del material de aporte que constituye el electrodo para la soldadura de los aceros inoxidables es fundamental conocer el contenido de ferrita existente en el metal base a soldar.

El comportamiento a la soldadura de los aceros inoxidables austenítico, por ejemplo, varía según su estructura interna que se trate, desde aquellos que son completamente austenítico como el 310, hasta otros que poseen doble estructura austenítica y ferrítica como los grados 308, 309, 312, etc.

Al final, se recomienda que el porcentaje de ferrita en el electrodo esté balanceado con el de austenita, con el fin de conseguir cordones con buena resistencia al agrietamiento, y a la vez también, una resistencia al impacto o a la corrosión por tensiones, de acuerdo a las condiciones de servicio a las que vaya a estar expuesta la pieza soldada.

En efecto por un lado, la presencia de ferrita reduce la posibilidad de producirse fenómenos de agrietamiento en caliente del cordón de soldadura, debido a que ciertos elementos e impurezas presente en el acero, como el fósforo, azufre o silicio con bajo punto de fusión, quedan atrapados durante el proceso de enfriamiento del cordón de soldadura, siendo el germen de generación de futuras grietas internas del cordón de soldadura.

Resulta que estos elementos son mucho más solubles en la ferrita que en la austenita, por lo que cierta cantidad de ferrita ayudaría a absorber estas impurezas y evitar que quedasen atrapadas en el cordón durante su enfriamiento, eliminando así la posibilidad de generar grietas en el interior del cordón.

Por ello, en la mayoría de los materiales de aporte para la soldadura de acero inoxidable austenítico contienen un porcentaje de ferrita, que puede variar según el tipo de aplicación, entre un 3% a un 20%.

Por otro lado, en ciertas ocasiones no es recomendable la presencia de excesiva ferrita en el material de aporte, por ejemplo, en aplicaciones criogénicas de muy bajas temperatura (-195 ºC), donde un incremento en el porcentaje de ferrita implicaría una disminución de la resistencia al impacto del cordón, al ser la ferrita muy frágil a estas temperaturas.

En otras aplicaciones, que impliquen ambientes corrosivos, pero en altas temperaturas, la ferrita puede producir también una disminución importante de la resistencia a la oxidación, sobre todo en los grados inoxidables al molibdeno como 316, 317 y sus versiones L de bajo carbono.

Se deduce que para una correcta selección del tipo de electrodo en las soldaduras de aceros inoxidables es muy importante conocer el porcentaje de ferrita en su composición, pues éste condicionará finalmente el contenido de ferrita que quede presente en la soldadura.

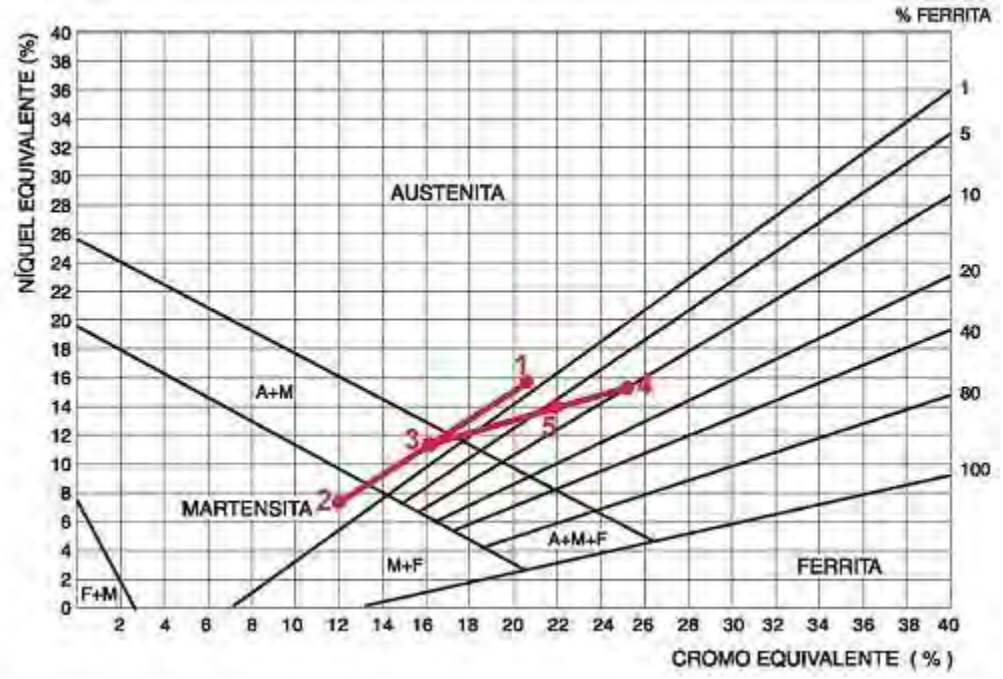
Para medir el contenido de ferrita que quede presente en el cordón de soldadura se puede conocer mediante el uso de instrumentos de laboratorio sensibles al magnetismo (dado que la ferrita es magnética y la austenita no), o bien se puede estimar por medio de un examen metalográfico (método más exacto cuando la ferrita se encuentra presente en un rango del 4 al 10%), o bien a través de gráficos que pueden estimar con bastante exactitud el contenido de ferrita a partir de la composición química del metal de aporte.

2.10. Diagrama de Schaeffler

El diagrama de Schaeffler, figura 18 se usa principalmente para predecir la estructura del metal de

Figura 18

Diagrama de Schaeffler



Nota. Ibarra et al. (2010).

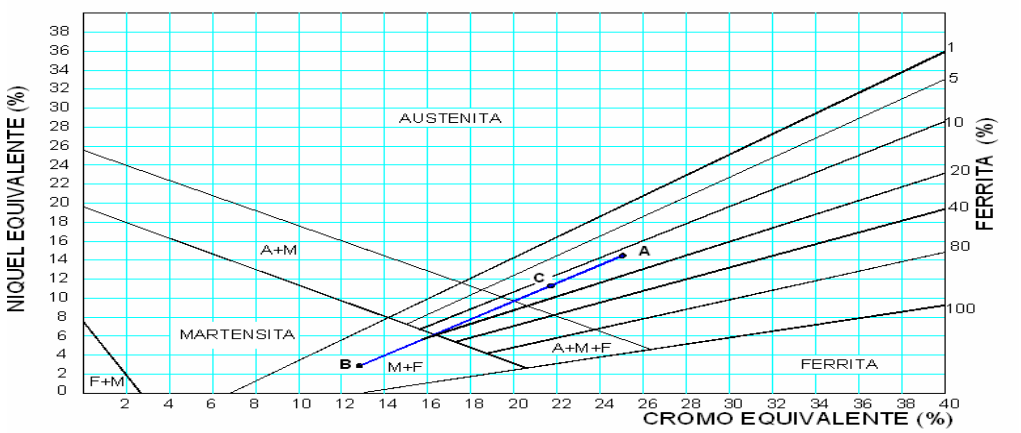
Soldadura obtenida en la unión de aceros inoxidables disímiles, o de aceros inoxidables con aceros al carbono, con o sin aleación. Este diagrama fue obtenido por Al Schaeffler de manera empírica y permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición. Este diagrama es válido únicamente cuando los elementos se encuentran en proporciones no mayores a: C máx. 0.2%, Mn máx. 1.0%, Si máx. 1.0%, Mo máx. 3.0%, Nb máx. 1.5%. Adicionalmente se indican problemas que presentan determinadas estructuras al soldar, dependiendo de su ubicación en el diagrama, que pueden evitarse al seleccionar adecuadamente el metal de aporte y el procedimiento de soldadura. Para su empleo se parte del cromo y el níquel equivalente del material base y del material de aporte. Estos se calculan a partir de las fórmulas dadas a continuación, para luego graficarlas en el diagrama de Schaeffler como se muestra en la figura 19.

Cromo equivalente=%Cr+%Mo+1,5x%Si+0,5x%Nb (1)

Níquel equivalente=%Ni+30x%C+0,5x%Mn (2)

Figura 19

Ejemplo de grafica en un diagrama de Schaeffler



Nota. Ibarra et al. (2010).

2.12 Soldadura de los aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos, comparados con otras familias de aceros, como los aceros al carbono sin alear, los de baja aleación o incluso comparados con las otras familias de aceros inoxidables, son aceros que tienen un punto de fusión más bajo, su estructura interna ofrece una mayor resistencia eléctrica con menor conductividad térmica y presentan, en general, un mayor coeficiente de dilatación que los demás aceros.

Para la ejecución de soldaduras en los aceros inoxidables austeníticos se requiere aportar menor cantidad de calor para crear el baño de fusión en el metal base.

En efecto, una conductividad térmica menor tiene como consecuencia principal que el calor se concentre en una zona pequeña alrededor del cordón de soldadura, y por lo tanto se va a necesitar un menor aporte de calor para mantener el baño de fusión.

Sin embargo, como contrapartida esto genera un aumento del gradiente de temperatura y de las tensiones residuales asociadas, que unido al mayor coeficiente de dilatación que presentan los aceros inoxidables austeníticos, va a implicar un mayor riesgo de producirse deformaciones y desalineaciones durante la soldadura. De ahí la necesidad de mantener un estricto control dimensional mediante el empleo de guías y de otras técnicas de embridado, con objeto de poder mantener la geometría del conjunto soldado sin que se produzcan deformaciones.

2.10.1. Características de la soldadura

En general, los aceros inoxidables austeníticos se sueldan con más facilidad que los martensíticos y los ferríticos, pero existen factores característicos de esta familia que deben ser tenidos en cuenta para poder ejecutar una buena soldadura y de paso eliminar el riesgo de defectos en la soldadura.

A continuación, se detallan los fenómenos que deben ser tenidos en cuenta a la hora de ejecutar la soldadura de aceros inoxidables austeníticos.

- Precipitación de carburos:

Es una de las causas más común de corrosión en los aceros inoxidables austeníticos y que aparece en las zonas del metal base adyacentes del cordón. Es decir, que no es una corrosión que afecta específicamente al cordón sino en el área alrededor de éste.

Ello ocurre porque cuando a un acero inoxidable austenítico se le somete a un intervalo de temperatura de entre 420 y 900 º C durante un cierto tiempo, o si durante su enfriamiento se le enfría lentamente en dicho intervalo de temperatura, da lugar a un precipitado de compuestos de carburo de hierro y cromo. Este precipitado empobrecería el contenido en cromo en el acero, y por

tanto su función protectora que le confiere su característica de inoxidable perderá. Esta precipitación es intensa en el intervalo que va de los 600 a los 850 º C.

Los precipitados de carburo de cromo se suelen formar en los límites de grano, haciendo que disminuya la cohesión entre ellos, a la vez que origina el empobrecimiento antes dicho del contenido de cromo de las zonas anexas, por lo que la propiedad protectora que le confiere el cromo al acero inoxidable disminuye, y el acero queda "sensibilizado", es decir, más vulnerable a la corrosión.

Esta tendencia a la formación de los precipitados del carburo de cromo dependerá del tiempo de exposición en el intervalo de temperaturas críticas (420-900 º C) y de la cantidad de carbono presente en la composición del acero.

De esta forma, un acero grado 304, con un porcentaje en carbono del 0,06% aproximadamente, podría quedar sensibilizado en apenas 3 minutos si se mantiene a una temperatura de 700 º C. Sin embargo, uno de grado 304L, con un 0,03% de carbono, podría aguantar incluso unas 8 horas a 600 º C antes de sensibilizarse. Por ello, en aquellas aplicaciones donde el riesgo de producirse corrosión intergranular sea alto deberá utilizarse aleaciones de bajo contenido en carbono, como son los grados "L" (Low Carbon).

Entre las recomendaciones para disminuir el riesgo de precipitación de carburos se pueden mencionar los siguientes:

- Limitar el contenido máximo de carbono, tanto del metal base como de los electrodos empleados, al 0,03%, con objeto de evitar la formación de los precipitados de carburo de

cromo. Los aceros inoxidables con un contenido en carbono inferior al 0,03% son conocidos como grado “L” (Bajo o Low Carbon).

- Se recomienda utilizar en la soldadura electrodos que contengan en su composición elementos llamados “estabilizadores”, como el Titanio (Ti) o el Niobio (Nb), que son elementos que se combinan preferentemente con el carbono para formar carburos de titanio o de niobio antes que lo haga con el cromo. De esta forma se deja libre el cromo que no reacciona con el carbono y evita que se formen los precipitados de carburo de cromo, de manera que el cromo quede libre para poder cumplir su función protectora en los aceros inoxidables. Estos aceros, denominados “estabilizados” son conocidos como los grados 347(Nb) y 321 (Ti) y son ideales para aquellas aplicaciones donde se prevea que la aleación estará expuesta un largo tiempo sometida al rango de temperaturas de sensibilización (420-900 º C).
- Otra forma de restaurar la resistencia a la corrosión una vez formado los precipitados de carburo de cromo es sometiendo a la pieza de acero a un proceso de templado. Para ello, se calentará la pieza sobre los 1050 º C con lo que se conseguirá disolver los carburos de cromo precipitados, seguido de un enfriamiento rápido para así evitar la formación de nuevos precipitados. Es una solución válida para aquellos casos donde se prevea que la pieza no va a estar sujeta en sus condiciones de servicio al rango de temperatura de sensibilización, y además que la geometría y tamaño de las piezas permita su manejo para introducirlo en un horno para su templado.
- Otra forma de reducir la precipitación de carburos es disminuyendo el aporte térmico al proceso de soldeo. Para ello se recomienda bajar la intensidad de corriente en lo posible sin comprometer la estabilidad del arco, emplear electrodos de diámetro pequeño y ejecutar la soldadura mediante cordones cortos para que el aporte de calor no sea excesivo a la pieza.

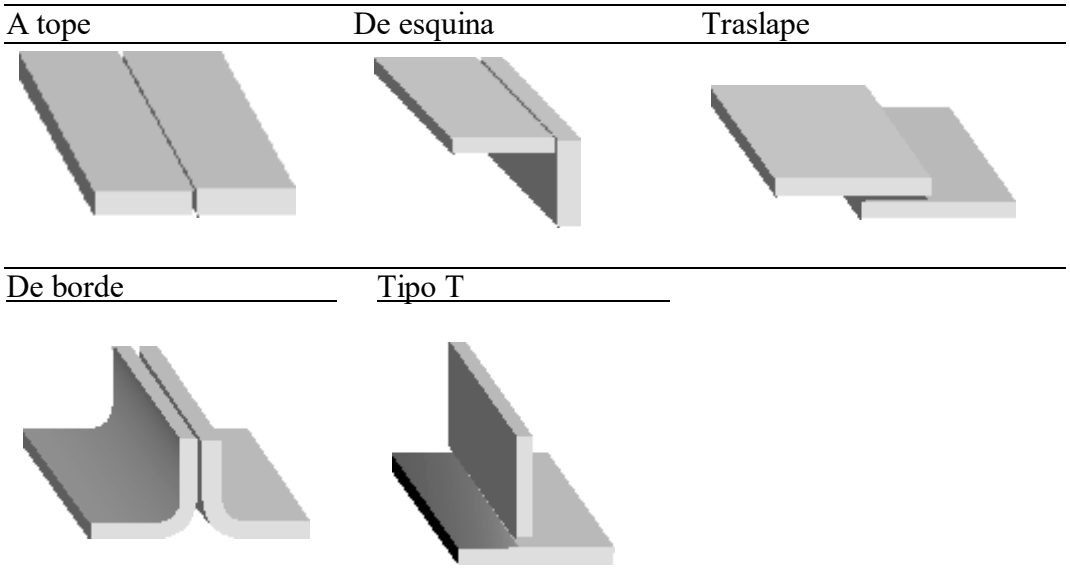
Asimismo, después de cada pasada se recomienda enfriar en el menor tiempo posible la zona afectada térmicamente por la soldadura (ZAT), antes de que quede expuesta al rango de temperatura de sensibilización (420-900 ºC). De esta forma, para los grados no estabilizados o que no sean de bajo contenido en carbono, tales como el AISI 304, es importante limitar la entrada de calor a valores por debajo de 35 kilo-Joule por centímetro de cordón de soldadura ejecutado con objeto de minimizar el ataque corrosivo en ambientes agresivos.

2.11. Tipos de juntas

Cuando las piezas de acero son llevadas a la forma de junta, ellas pueden asumir una de las cinco configuraciones presentadas en la Figura 20. Los tipos de juntas son las descripciones de posiciones relativas de los materiales que van a ser unidos y no implica un tipo específico de soldadura.

Figura 20

Tipos de juntas



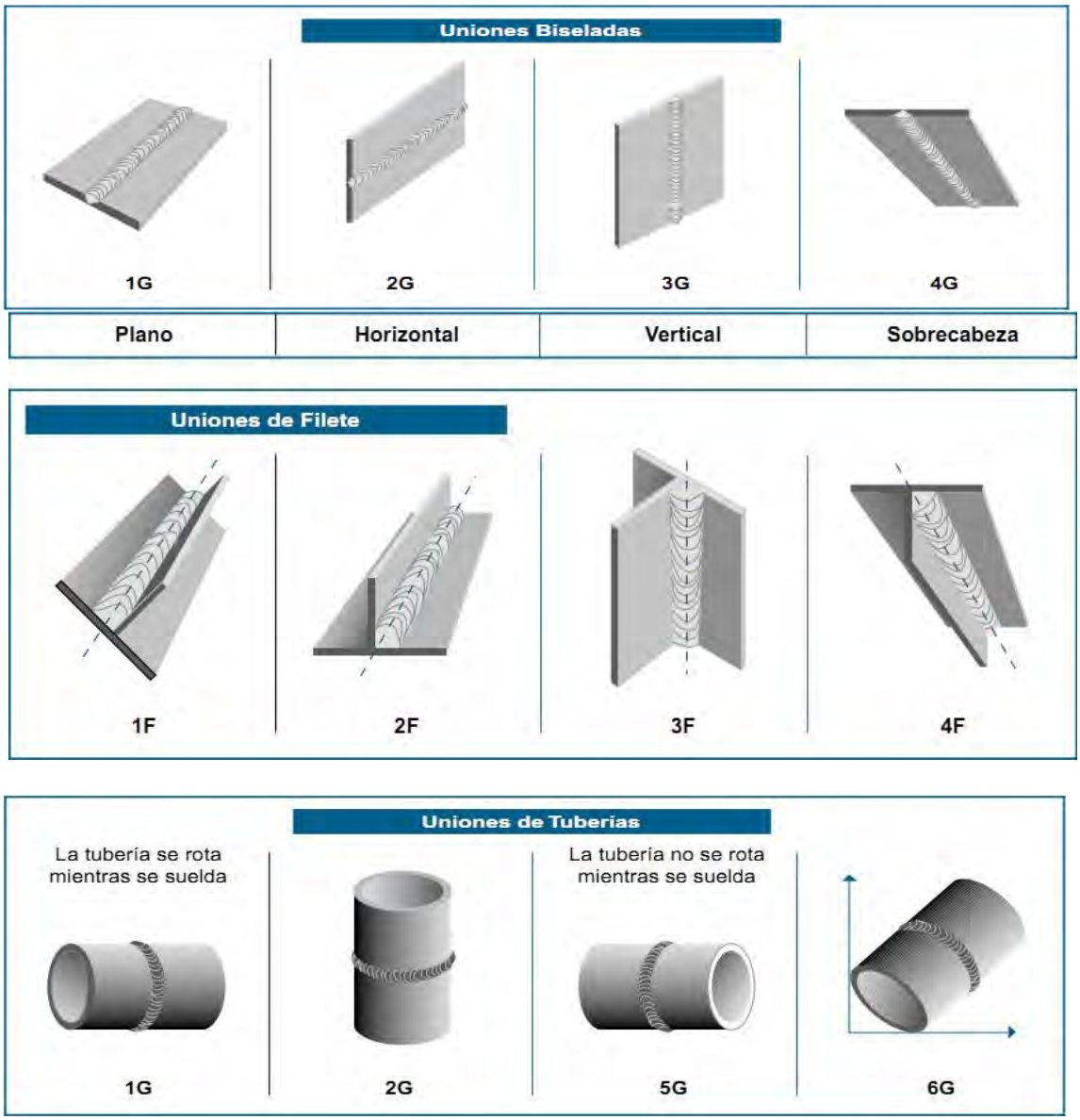
Nota. Masabanda y Yauripoma (2009) Elaboración de un manual para prácticas de la materia teórica de los procesos de soldadura.

2.12. Posiciones De Soladura.

Según la designación ANSI/AWSA 3.0-8, las posiciones de soldaduras se indican en la Figura 21.

Figura 21

Posiciones de las soldaduras según ANSI/AWSA 3.0-8



Nota. Masabanda y Yauripoma (2009) Elaboración de un manual para prácticas de la materia teórica de los procesos de soldadura.

2.13. Control de calidad de las soldaduras

Hay numerosos ensayos usados para determinar las varias propiedades mecánicas y químicas de los metales. Mientras que algunos de esos ensayos proveen valores para más de una propiedad, la mayoría son diseñados para determinar el valor de una característica específica. Por esto, puede ser necesario realizar varios ensayos diferentes para determinar toda la información deseada.

Los métodos de ensayo son generalmente agrupados en dos clases, destructivos y no destructivos**.** Los ensayos destructivos dejan al material o parte fuera de uso para servicio una vez que se realiza el ensayo. Estos ensayos determinan como el material se comporta cuando es cargado a rotura. Los ensayos no destructivos no afectan a la pieza o componente para su posterior uso.

2.13.1. Ensayos destructivos

Exigen la destrucción de la pieza soldada, para examinar su estructura interna del metal base y metal aportado, en otros casos en probetas tomadas de la soldadura para determinar las propiedades mecánicas de la junta o de sus diferentes partes.

2.13.1.1. Ensayos mecánicos.

Son utilizados principalmente para el control de los materiales de base y de los metales de aportación; mediante estos ensayos se determina los valores de resistencia a la tracción, del límite, elástico y el alargamiento de los metales.

Los ensayos mecánicos más usados, son:

- Ensayos de tensión.
- Ensayos de dureza en la soldadura o en sus proximidades.
- Ensayos volumétricos (de doblado o doblez)
- Ensayos de resistencia (energía de rotura por choque, de una probeta entallada).

a) Ensayo de dureza

La dureza es una medida de la resistencia de un material a la deformación permanente (plástica) en su superficie, o sea la resistencia que opone un material a ser rayado o penetrado.

En las uniones soldadas se determina la dureza, en la mayoría de los casos en la zona afectada por el calor (ZAC), para evitar riesgos de fisuraciones generadas por las altas temperaturas que se dan y por los enfriamientos rápidos que puedan ocurrir; es por esto que se realizan los ensayos de dureza en la zona más frágil o crítica con el fin de poder programar los correspondientes controles como, por ejemplo, el precalentamiento de las piezas.

Se distinguen varias escalas de dureza: Brinell, Vickers, Knoop, y Rockwell.

2.13.1.2. Ensayos volumétricos

Este grupo de ensayos es diseñado para ayudar en la determinación de la sanidad de un metal, o si está libre de imperfecciones. Los ensayos volumétricos son usados rutinariamente para la calificación de procedimientos de soldadura y de soldadores. Después de que una chapa de ensayo haya sido soldada, las probetas son removidas y sometidas al ensayo volumétrico para determinar si el metal de soldadura contiene alguna imperfección o defecto.

Hay tres tipos generales de ensayos destructivos volumétricos:

- Ensayo de doblado
- Ensayo nick-breck
- Ensayo de desgarre de filete.

a) Ensayo de doblado

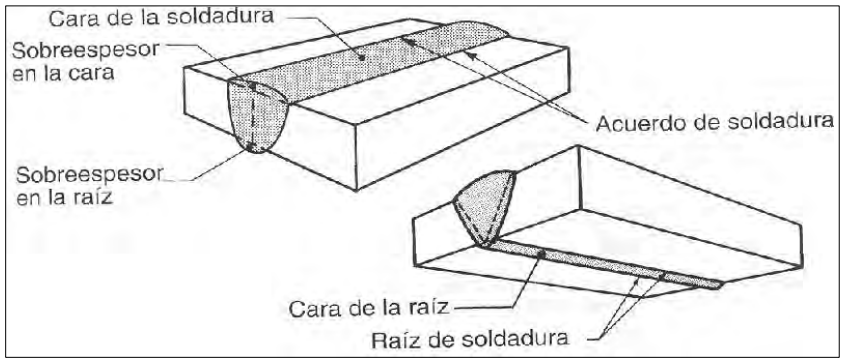
La finalidad de este ensayo es determinar la ductilidad y la calidad del material de la soldadura, se realiza mediante el doblado de la probeta en forma de u, para luego examinar la zona doblada, se utiliza este ensayo para calificar procedimiento, habilidad de soldadores y operadores de máquinas de soldar: Los ensayos de doblez pueden ser: Doblez transversal de lado

- Doblez transversal de raíz
- Doblez transversal de cara
- Doblez longitudinal de cara
- Doblez longitudinal de raíz (CESOL 2013).

En la figura 22, se puede observar la matriz de ensayo de doblez y el doblez de cara y raíz.

Figura 22

Deposito de soldadura en cara y raíz.



Fuente: Walteros (2010) Manual de Soldadura Und 5 Tipos de Uniones

Esta prueba de ensayo es cualitativa; se busca que las probetas de experimentación no presenten fisuras.

Para la aceptación es necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

- Las discontinuidades medidas en cualquier dirección en la superficie no deben tener más de 3 mm.
- La suma de todas las discontinuidades presentes de entre 1 mm y 3 mm no deben sobrepasar los 10 mm en total.

2.13.1.3. Ensayos no destructivos.

Se denomina ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT de non destructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo.

Los métodos de END más utilizados para detección de fallas en soldadura son:

- Inspección Visual
- Líquidos Penetrantes
- Partículas magnéticas
- Radiografía
- Ultrasonido

2.13.1.4. Inspección visual

La inspección visual es el primer ensayo no destructivo que se realiza en todo cordón de soldadura, y el más usado, es económico, simple, comúnmente aplicado a todas las soldaduras, capaz de examinar varias zonas de soldadura al mismo tiempo, es un método de inspección superficial, es decir se examina la apariencia externa del cordón de soldadura, ancho y espesor, discontinuidades como: mordeduras, traslapes, solapado, fisuras, golpes de arco, inclusiones de escoria, porosidad superficial, si la garganta del cordón es la necesaria, el desalineamineto de las juntas. (González Arias, 1995)

2.13.1.5. Criterios de aceptación del ensayo de inspección visual.

Tabla 12

Criterios de aceptación del ensayo de inspección visual

No	Criterios
1	No se debe aceptar grietas de ninguna dimensión.
2	Todas las mordeduras presentes en la soldadura se deben completar hasta su sección transversal.
3	Debe haber una fusión completa entre el metal base y el metal de aporte. El refuerzo no debe superar los 3 mm.
4	El máximo valor de socavación debe ser de 1 mm.
5	No se acepta grietas, penetración inadecuada o fusión incompleta en la raíz de soldaduras de ranura con penetración completa de la junta (CJP).
6	La perforación por fusión o concavidad de raíz de un lado sin respaldo en soldaduras de ranura con penetración completa de la junta (CJP) deben ajustarse a lo siguiente: Si el espesor total de la soldadura es igual o mayor al metal base, la concavidad de raíz no debe superar los 2 mm. La perforación por fusión no debe exceder los 3 mm.

Nota. Silva (2025) Evaluación de la soldabilidad de un acero de alta aleación mediante SMAW con diversos materiales de aporte

2.13.1.6. Líquidos penetrantes (PT)

Este tipo de END se utiliza para detectar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales inspeccionados, es uno de los métodos de ensayos no destructivos más ampliamente utilizados para la detección de discontinuidades superficiales en materiales sólidos no porosos. Es casi seguro que el método de END superficial más comúnmente utilizado en la actualidad, ya que se puede aplicar a casi cualquier material magnético o no magnético, los líquidos penetrantes proporcionan a la industria una amplia gama de sensibilidades y técnicas que lo hacen especialmente adaptable a una amplia gama de tamaños y formas. Es extremadamente útil para los exámenes que se realizan en lugares remotos de campo, ya que es extremadamente portátil. El método es también muy apropiado en un entorno de producción donde muchas piezas pequeñas se pueden procesar en un período de tiempo relativamente corto. En la figura 23 se muestra un kit básico de líquidos penetrantes.

Figura 23

Kit básico de Líquidos Penetrantes



Nota. Elaboración propia

Ventajas de los líquidos penetrantes:

- Son utilizados en una gran variedad de materiales.
- Su empleo es relativamente fácil.

- Bajo costo respecto a los demás.
- La geometría de las piezas no representa un problema.
- Portátiles.
- Permiten cubrir un área muy grande en poco tiempo.
- Capacitación en poco tiempo.

Desventajas de los líquidos penetrantes:

- Limitaciones graves en materiales porosos.
- Sólo sirve para defectos superficiales.
- La superficie de trabajo debe estar suficientemente limpia.
- Acceso directo a la superficie a inspeccionar.
- Por si mismas no proporcionan un registro permanente.
- El área de trabajo debe tener una buena ventilación.
- Depende de factores humanos.
- Compatibilidad química entre los líquidos y el material.

2.14. Las imperfecciones (discontinuidades) en soldadura

La tecnología de la soldadura involucra diversas disciplinas, todas ellas de gran importancia; tales como: química, física, electricidad, metalurgia, etc, es por ello que durante la aplicación de una soldadura acontece un complejo conjunto de aspectos y variables que con dificultad redundara en una soldadura perfecta. Es decir, una soldadura terminada, siempre contendrá imperfecciones, ahora bien, aunque estas se hallen, tendremos las normas y códigos aplicados, para determinar cuándo un tipo de imperfección pasa a ser un defecto (condición inaceptable), incluso puede darse el caso que bajo un documento técnico una imperfección sea tratada como defecto, mientras que para otro documento esta misma sea aceptada.

2.14.1. Tipos De Discontinuidades

En END escuchamos hablar de “defectos” y/o “discontinuidades”. Se dice que cualquier indicación encontrada es llamada “discontinuidad” hasta que se pueda identificar y evaluar el efecto que puede tener sobre la pieza en servicio. Si, de acuerdo a esto, “la discontinuidad” es inaceptable con arreglo a un criterio de especificaciones, será un “defecto” (cuando por magnitud o localización provocan el fallo de la pieza o unión), ahora, si esa discontinuidad no afecta el rendimiento de la pieza en el servicio al que se destina, se deberá llamar simplemente “discontinuidad”. Por eso se dice que: No existe soldadura “perfecta”, toda soldadura tiene “discontinuidades”.

De acuerdo a lo dicho se puede definir que:

Discontinuidad = es la pérdida de la homogeneidad del material.

Un “defecto” = es una discontinuidad inaceptable, que debe ser reparada.

Como generalidad diremos que una discontinuidad puede producirse en cualquier momento de la vida de una pieza metálica.

- Discontinuidad inherente: Se crea durante la producción inicial desde el estado de fusión.
- Discontinuidad de proceso: Se produce durante procesos posteriores de fabricación o terminado.
- Discontinuidades de servicio: Se producen durante el uso del producto debido bien a circunstancias ambientales, o de carga, o ambas.

Las discontinuidades se pueden también clasificar en:

- Superficiales: Se ven a simple vista, no importa su profundidad.
- Internas: Se encuentran en el interior del material y no alcanzan la superficie.

Por último, debemos distinguir entre:

- Indicaciones relevantes: Son aquellas indicaciones provenientes de fallas suficientemente serias como para afectar la aptitud para el servicio de la pieza.
- Indicaciones no relevantes: Son aquellas indicaciones que provienen de discontinuidades que no afectarían la aptitud para el servicio de la pieza.
- Indicaciones falsas: Son aquellas indicaciones causadas por interferencias eléctricas y electrónicas, superficies muy rugosas etc.

2.14.2. Discontinuidades en Soldadura

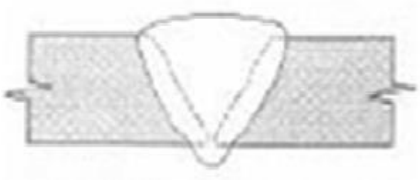
Una forma simple de clasificar las discontinuidades y defectos en soldadura es en superficiales e internas

2.14.2.1. Discontinuidades Superficiales

a) Exceso de penetración: Se produce por efecto de un movimiento que causa la penetración del electrodo dentro de los biseles, los cuales son distribuidos en esas áreas. Causa que el material chorree al interior y puede retener escoria o no en su interior. Este defecto puede producir en soldadura de gaseoductos, desgaste por erosión. La imagen radiográfica da una densidad más clara en el centro del ancho de la imagen, ya sea extendida a lo largo de la soldadura o en gotas circulares aisladas, pudiendo presentar en su interior una mancha deforme negra. Figura 24.

Figura 24

Exceso de penetración



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

b) Falta de penetración: Como en las uniones en U o en V son visibles por la cara posterior, esta imperfección puede considerarse superficial. A menudo la raíz de la soldadura no quedará adecuadamente rellena con metal dejando un vacío que aparecerá en la radiografía como una línea negra oscura firmemente marcada, gruesa y negra, continua o intermitente reemplazando el cordón de la primera pasada. Puede ser debida a una separación excesivamente pequeña de la raíz, a un electrodo demasiado grueso, a una corriente de soldadura insuficiente, a una velocidad excesiva de pasada, penetración incorrecta en la ranura. Este defecto por lo general no es aceptable y requiere la eliminación del cordón de soldadura anterior y repetición del proceso. Figura 25.

Figura 25

Falta de penetración



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

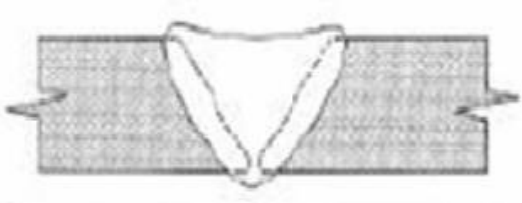
c) Concavidades

Estas discontinuidades se presentan de dos tipos:

- **Concavidad externa o falta de relleno**: presenta una disminución de refuerzo externo, por poco depósito de material de aporte en el relleno del cordón. La imagen radiográfica muestra una densidad de la soldadura más oscura que la densidad de las piezas a soldarse, la cual se extiende a través del ancho completo de la imagen. Figura 26.

Figura 26

Concavidad externa

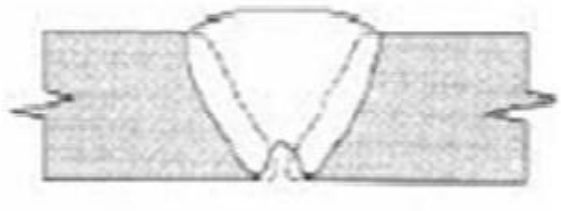


Nota. Echevarría (2011) Defectología.

- **Concavidad interna:** Insuficiente refuerzo interno de la soldadura en su cordón de primera pasada el cual al enfriarse disminuye su espesor pasando a ser menor que el del material base. Figura 27.

Figura 27

Concavidad interna



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

d) Socavaduras o mordeduras de borde

La socavadura es una ranura fundida en el metal base, adyacente a la raíz de una soldadura o a la sobremonta, que no ha sido llenada por el metal de soldadura. Figura 28.

Causas y corrección

1.-Exceso de calor - Corrija el amperaje de su maquina

2.-Electrodo inadecuado - Cambie el electrodo

3.-Manipulación incorrecta - Mejore el movimiento manual

4.-Arco muy intenso - Corrija el arco

5.-Velocidad inadecuada - Mejore la velocidad y corrija el movimiento del electrodo

Figura 28

Socavaduras o mordeduras de borde



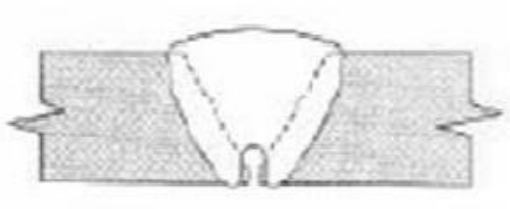
Nota. Echevarría (2011) Defectología.

e) Quemado

Es una zona de la pasada de raíz donde la penetración excesiva ha causado que el aporte de la soldadura penetre dentro de la misma soplándose. Resulta de factores que producen excesivo calor en un área determinada, tales como: excesiva corriente, velocidad lenta del electrodo, manejo incorrecto del electrodo. Hay destrucción completa de los biseles. Esta discontinuidad se observa en la figura 32.

Figura 29

Quemado.



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

f) Salpicaduras

Son imperfecciones consistentes en esferuelas de metal fundido depositadas aleatoriamente sobre el cordón y su vecindad. Pueden ser provocadas por humedad en el revestimiento del electrodo. En la figura 30 se observa esta discontinuidad.

Figura 30

Discontinuidad.



Nota. Elaboración propia

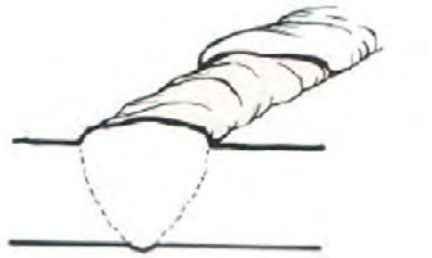
g) Falta de continuidad del cordón

Se origina al interrumpir el soldador el cordón y no empalmar bien la reanudación del trabajo. Su severidad es muy variable ya que, en los casos más severos, pueden considerarse auténticas faltas de fusión transversales, en tanto que en otras ocasiones, son simples surcos

normales al eje del cordón. Su aspecto radiográfico es el de una línea oscura u oblicua, relativamente nítida. Figura 31.

Figura 31

Falta de continuidad del cordón.



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

2.14.2.2. Discontinuidades internas

Pueden clasificarse en:

a) Fisuras longitudinales

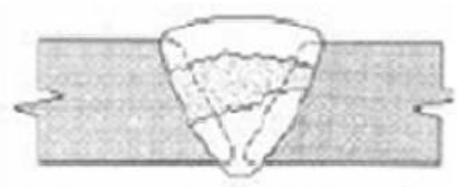
Pueden producirse en el centro del cordón (generalmente por movimientos durante o posteriores a la soldadura) o en la interfase del material base con el de aporte (por causa de un enfriamiento brusco o falta de un correcto precalentamiento en grandes espesores). Esta discontinuidad se observa en la figura 32.

b) Fisuras transversales

Producidas generalmente en aceros duros, por combinación de elementos que al enfriarse a la temperatura normal producen la fisura que puede o no prolongarse al metal base. Figura 35.

Figura 32

Fisuras transversales



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

c) Fisura de interrupción o arranque (o de cráter)

En el arranque de la soldadura por cambio de electrodo pueden producirse fisuras en forma de estrella por efecto del brusco enfriamiento y recalentamiento del material (son fisuras en caliente). Figura 33.

Figura 33

Fisura de interrupción



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

d) Fisuras alrededor del cordón (ZAC)

- **Fisuras en frío:** Se produce por la falta de precalentamiento (crítica para ciertos tipos de aceros), en aceros duros (estructura martensítica en ZAC como resultado del ciclo térmico de soldadura) o de mucho espesor. Figura 34.

Figura 34

Fisuras en la zona afectada por el calor.



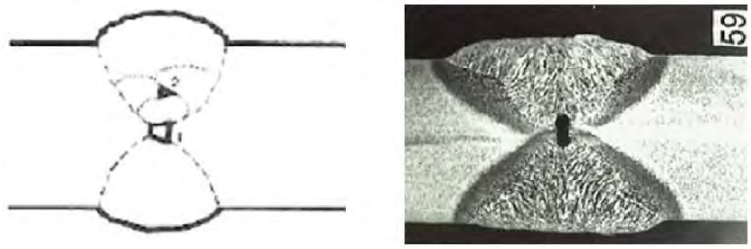
Nota. Echevarría (2011) Defectología.

e) Falta de penetración

Se da en la zona de raíz cuando no ha penetrado el metal fundido. Si la unión es en X o en K, la raíz queda en corazón mismo del cordón, siendo la falta del metal de aporte en dicha zona rigurosamente interna. Figura 35.

Figura 35

Falta de penetración.



Nota. Elaboración propia.

f) Falta de fusión

Generalmente ocasionada por falta de temperatura suficiente para fundir el metal base o el cordón anterior ya sólido. Figura 36.

Figura 36

Falta de fusión



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

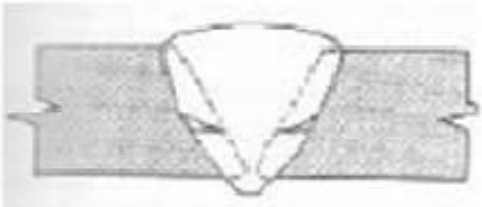
- Falta de fusión entre pasadas

Se produce en las interfases de la soldadura, donde las capas adyacentes del metal, o el metal base y el metal de soldadura no se fusionan debidamente, por lo general debido a una capa muy fina de óxido que se forma en las superficies. Esta capa de óxido puede deberse a una falta de calentamiento del metal base o al depósito previo del metal de soldadura en volumen suficientemente alto que impide que cualquier capa de óxido, escoria, impurezas, etc. migre a la superficie.

También puede deberse a la falta de corriente suficiente o la mala ubicación del arco eléctrico dentro de los biseles, el cual, al producirse más sobre uno, deja al otro sin fundir. Figura 37.

Figura 37

Falta de fusión.



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

2.14.2.3. Discontinuidades Como Inclusiones

a) Inclusiones gaseosas

Por diversas razones, en el metal de soldadura fundido se forman gases que pueden quedar atrapados si no hay tiempo suficiente para que escapen antes de la solidificación de la soldadura. El gas así atrapado, por lo general tiene la forma de agujeros redondos denominados porosidades esféricas, o de forma alargada llamados porosidad tubular o vermicular. Figura 38.

Figura 38

Inclusiones gaseosas.



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

b) Porosidad agrupada (nido de poros)

Producida generalmente por un agente oxidante o excesiva humedad del revestimiento. Pueden también encontrarse capas de óxido sobre los biseles, las que al fundirse desprenden gas. El tamaño de estos poros es igual en toda la zona. Figura 39.

Figura 39

Porosidad agrupada.



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

c) Porosidad alineada

Generalmente surge en la pasada de base del cordón soldado, por efecto de la dificultad de penetrar con el electrodo, por mala regulación eléctrica en correspondencia con el fundente utilizado por máquinas automáticas y por acumulación de algunos de los elementos del mismo. Figura 40.

Figura 40

Porosidad alineada.



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

d) Inclusiones no metálicas

Provienen de agentes extraños como pueden ser del material de aporte.

Figura 41

Inclusiones no metálicas.



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

e) Inclusiones de escoria aisladas

La mayoría de las soldaduras contienen escorias que han sido atrapadas en el metal depositado durante la solidificación. Son depósitos de carbón, óxidos metálicos y silicatos principalmente. Figura 42.

Figura 42

Inclusión de escoria aisladas.



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

Las escorias pueden provenir del revestimiento del electrodo o del fundente empleado. El flujo tiene como finalidad eliminar las impurezas del metal. Si este no permanece derretido durante un período suficientemente largo como para permitir que la escoria se eleve a la superficie, parte de esa escoria quedaría atrapada en el metal. Ésta a su vez puede quedar atrapada en el metal en pasadas posteriores. Las superficies sucias e irregulares, las ondulaciones o cortes insuficientes contribuirán al atrapado de escoria. Las inclusiones de escoria se asocian frecuentemente a la falta de penetración, fusión deficiente, talón de raíz suficientemente grande, soldadura en V muy estrecha y deficiente habilidad del soldador

f) Escorias alineadas

Se producen por movimientos inadecuados del electrodo por parte del soldador. Quedan alineadas sobre el costado del cordón soldado. En el caso de la soldadura automática, el fundente suele quedar atrapado por una mala regulación de la máquina o por falta de limpieza, pero en este caso estará en el centro del cordón. Este tipo de defecto es muy agresivo. Figura 43.

Figura 43

Escorias alineadas.



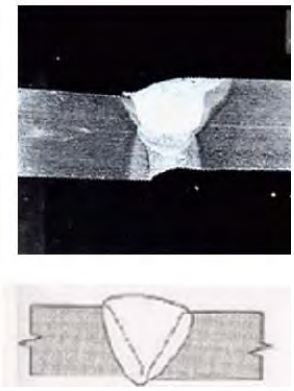
Nota. Echevarría (2011) Defectología.

g) Desalineado (high low).

Desalineamiento de las partes a ser soldadas. Figura 44.

Figura 44

Desalineado.



Nota. Echevarría (2011) Defectología.

CAPITULO III

HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis General y Específicos

3.1.1. Hipótesis General

Las variables de operación del proceso de soldadura SMAW influyen significativamente en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304.

3.1.2. Hipótesis Especificas

1.- La intensidad de corriente de soldadura influye significativamente en la dureza del metal depositado y de la zona afectada por el calor (ZAC) del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW.

2.- La selección del electrodo influye significativamente en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW, al afectar la calidad del depósito de soldadura y la integridad de la unión soldada.

3.- La velocidad de soldeo influye significativamente en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW, al modificar el calor de aporte y las características del cordón de soldadura.

4.- El ángulo de inclinación del electrodo influye significativamente en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW, al afectar la geometría del cordón y la calidad de la unión soldada.

5.- La longitud del arco influye significativamente en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW, al afectar la estabilidad del arco, la transferencia metálica y la calidad de la unión soldada.

3.2. Variable Independiente y Dependiente

3.2.1. Variable dependiente

Soldabilidad del acero inoxidable AISI 304

3.2.2. Variables Independientes

1. Intensidad de corriente de soldadura (A)
2. Selección del electrodo
3. Velocidad de soldeo
4. Angulo de inclinación
5. Longitud de arco

CAPITULO IV

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

4.1. Ámbito de Estudio

Geográficamente, el presente estudio se desarrollará en el taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Este taller cuenta con la infraestructura, equipos y condiciones necesarias para la ejecución de procesos de soldadura bajo parámetros controlados, lo cual garantiza la confiabilidad de los resultados obtenidos.

El taller dispone de máquinas de soldadura SMAW, herramientas de preparación de probetas, instrumentos de medición y equipos de seguridad, permitiendo llevar a cabo las uniones soldadas del acero inoxidable AISI 304 conforme a los requerimientos técnicos del estudio. Asimismo, el entorno facilita la aplicación de procedimientos experimentales, tales como la variación de parámetros operativos, la inspección visual de las juntas y la evaluación de sus propiedades.

4.2. Tipo o Nivel de Investigación

Explorativa: Se investigará todo y cada uno de los detalles del trabajo, para esto se indagará en cada uno de los parámetros de análisis generando hipótesis y reconociendo las variables de interés investigativo.

Descriptivo: Esta investigación se realiza describiendo el problema en una circunstancia espacial determinada, además será la más adecuada para la problemática de la investigación, por su origen y su desarrollo.

Correlacional: En este tipo de investigación va a tener como finalidad determinar el grado de relación o sociedad no causal, existente entre dos o más variables evaluando la hipótesis, sujeta a comprobación.

Explicativa: La investigación intenta informar la realidad, explicando su significatividad dentro de una teoría de referencia encargada de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto.

4.3. Población y Muestra

4.3.1. Población

Como población o universo se ha determinado los aceros inoxidables austeniticos.

4.3.2. Muestra

Para la presente investigación se ha considerado probetas de acero inoxidable de la serie AISI 304.

4.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

4.4.1. Técnicas

Se utilizará la técnica de la “Observación directa”, porque las probetas serán analizadas visualmente.

4.4.2. Instrumentos

Durante el desarrollo del trabajo se usarán los siguientes instrumentos equipo de corte manual, durómetro, máquina de soldar o fuente de poder, equipo de ensayo de doblez.

4.5. Viabilidad

El desarrollo del presente trabajo de investigación es viable, porque se cuenta con los equipos y materiales necesarios para la experimentación y control de calidad.

CAPITULO V

PROCEDIMIENTO METODOLOGICO EXPERIMENTAL

5.1. Maquinaria y Equipos

5.1.1. Equipos y Materiales Para la Investigación

A) Fuente de poder

Para la soldabilidad de las probetas, se hizo uso de la fuente de poder del taller de soldadura de la Carrera Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

Características:

- Marca: MILLER
- Modelo: XMT 304 CC.
- Salida nominal de corriente: 300 Amperios
- Gama de Voltaje: 10 – 35 Voltios.
- Gama de Amperage : 5 - 400
- Máx Voltaje de circuito abierto CD: 90 V.
- KVA: 12.4
- KW: 11.5

En la figura 45, se puede observar la fuente de poder usada.

Figura 45

Fuente de poder



Nota. Elaboración propia.

B) Durómetro portátil

La figura 46, muestra el durómetro portátil empleado en la medición de la dureza de las probetas soldadas. Este instrumento permite realizar mediciones rápidas y confiables directamente sobre la superficie del material, sin necesidad de extracción de muestras.

Figura 46

Durómetro



Nota. Elaboración propia.

Las características de este instrumento son:

- Características:
  - ✓ Botón SNAP para captura rápida de imágenes.

- ✓ Enfoque manual ajustable entre 50x y 1600x.
- ✓ Rango de enfoque: de 8 mm a 1000 mm.
- ✓ Iluminación LED: 8 luces con ajuste de intensidad de brillo.
- ✓ Compatibilidad: Windows Vista, XP, 7, 8 y 10 (32 y 64 bits).
- ✓ Resolución de imagen: 1600×1200p, 1280×960p, 640×480p, 480×360p.
- ✓ Resolución de video: 1600×1200p, 1280×960p, 640×480p, 480×360p.
- ✓ Rango de ampliación: desde 20x hasta 1600x.

C) Equipo de ensayo de doblado

Este equipo pertenece al taller de soldadura de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. En la figura 47 se puede observar el equipo de ensayo de doblez, cuya presión de trabajo es de 20 toneladas.

Figura 47

Equipo de ensayo de doblado



Nota. Elaboración propia.

5.1.2. Materiales usados en la investigación

5.1.2.1. Material base

Para la investigación se ha seleccionado el acero inoxidable AISI 304. Las probetas para el estudio tienen las siguientes características:

- Forma del producto: Plancha de acero inoxidable.
- Dimensiones de la probeta: 2 x 5 pulgadas.
- Espesor: 1/8 de pulgada (3.175 mm).
- Estado de suministro: Recocido.

Figura 48

Probetas de Acero Inoxidable



Nota. Elaboración propia.

En la tabla 13 y 14 se detallan su composición química y propiedades mecánicas.

Tabla 13

Composición química del acero inoxidable AISI 304.

Tipo		%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%N
AISI	304	0.08	2.0	0.75	0.045	0.03	18.0-20.0	8.00-10.5	2.0-3.0	0.10

Nota. Di Caprio (1999).

Tabla 14

Propiedades mecánicas del acero AISI 304.

Propiedades mecánicas		AISI 304
Resistencia a la tracción (MPa)		515
Punto de fluencia 0.02% (MPa)		205
Elongación 2 pulg. (%)		40
Dureza	Rockwell B	92
	Brinell	201

Nota. Di Caprio (1999).

5.1.2.2. Material de aporte

Para el presente trabajo de investigación, los criterios de selección del electrodo pueden resumirse en los siguientes factores:

1. Compatibilidad química con el metal base.
2. Propiedades mecánicas requeridas.
3. Resistencia a la corrosión.
4. Espesor del material.
5. Posición de soldadura.
6. Tipo de revestimiento.
7. Tipo de corriente de soldadura.
8. Condiciones de servicio de la unión.
9. Susceptibilidad a la fisuración.

Tomando en cuenta estos criterios se ha seleccionado el electrodo**: (**AWS E 312-16).

- Electrodo AWS E 312-16

Electrodo cuyo depósito tiene una estructura austeno-ferrítica con Ferrita > 20%, insensible a la fisuración en caliente. El material depositado presenta una alta resistencia a la rotura y es muy empleado para soldar aceros de difícil soldabilidad y unir aceros disímiles. El revestimiento rutílico le permite obtener depósitos libres de poros y con buen acabado. El INOX 29/9 es resistentes al impacto, calor, corrosión y a la fricciónmetal -metal. Los depósitos son maquinables.

Figura 49

Electrodo AWS E 312-16



Nota. Elaboración propia.

Aplicaciones:

- Electrodo especial ideal para labores de mantenimiento y reparación, en todos los sectores industriales.
- Para soldar aceros al carbono y aceros aleados con problemas de soldabilidad (aceros de difícil soldabilidad).
- Para soldar una gran variedad de aceros: herramientas, tratados térmicamente, inoxidables y rápidos.

- Ideal para soldar aceros disímiles, unir acero al carbono con acero inoxidable y planchas de acero galvanizado.
- Para recuperar ejes, matrices, moldes, herramientas, cadenas, engranajes, paletas de agitadores, cremalleras, tornillos extrusores y en general, piezas de alta resistencia.
- Comobase para recubrimientos protectores especiales.
- Muy usado en la industria siderúrgica (resistente al descascaramiento hasta 110°C) para relleno de ejes, mandriles, rodillos, camacojin para cuchilas de corte en caliente, etc.

En la tabla 15 se muestra la composición química y sus propiedades mecánicas.

Tabla 15

Composición química y propiedades mecánicas del E 312-16

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

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,04	1,00	0,80	máx. 0,025	máx. 0,020	2,80	12,00	22,00	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin tratamiento	600 (87 000)	> 420 (60 900)	> 30	> 40

Nota. Soldexa (2011) Manual de soldadura & catálogo de productos.

5.2. Soldabilidad de las Probetas

5.2.1. Preparación de las probetas

Previo a la soldadura de los cupones, es necesario realizar las siguientes operaciones, tales como:

- **Limpieza de las probetas.**

Antes de ejecutar la soldadura tanto los bordes como las superficies adyacentes deberán estar limpias y libres de grasas, aceites, para lo que se recomienda el empleo de disolventes no clorados.

Asimismo, los bordes de las piezas a soldar deben estar libres de óxidos superficiales, los cuales suelen quedar después de realizar cortes por métodos térmicos. Estos óxidos están compuestos principalmente de cromo y níquel proveniente del propio acero inoxidable, los cuales poseen una temperatura de fusión mucho mayor que la del metal de base, y por lo tanto no se funden durante la soldadura.

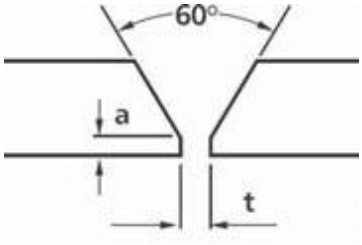
Por ello, estos restos de óxidos pueden quedar atrapados en el interior de la soldadura, dando lugar a un defecto interno que es dificultoso detectar, incluso por radiografía. Esto supone una diferencia básica con la soldadura de aceros ordinarios, dado que con los aceros ordinarios los óxidos de hierro funden a casi la misma temperatura que el metal de base.

5.2.2. Tipo de junta.

Por el espesor de las probetas, se seleccionó la junta a tope en “V”, cuyas características se detallan en la figura 50.

Figura 50

Junta a tope en V.



Nota. Elaboración propia.

Donde:

t = Abertura de raíz = 2 mm.

a =Cara de la raíz = 2.00 mm.

e = espesor nominal del material base o de la placa = 3.175 mm.

5.2.3. Condiciones de soldabilidad de las probetas

En la tabla 16 se detallan las condiciones de soladura con los que se llegaron a soldar.

Tabla 16

Condiciones para realizar la soldadura.

Proceso	SMAW
Espesor de material base	3.175 mm
Posición de soldadura	1G
Numero de pasadas	01
Polaridad	DCEP (Corriente continua, electrodo al polo positivo).
Material de aporte	AWS E 308L-16 Diámetro: 1/8”
Tipo de junta	Simple “V”, 60º

Nota. Elaboración propia.

5.2.3.1. Parámetros de soldadura

En la tabla 17 se detallan las variables seleccionadas para la soldadura del material base.

Tabla 17

Parámetros de soldadura.

Cupón	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Veloc.de desplazamiento (mm/seg)	Angulo del electrodo
P	80	20.0	5.5	5°
Q	110	21.5	5.80	10°
R	150	23.0	6.0	15°
T	210	25.0	6.40	25°

Nota. Elaboración propia

Con los parámetros arriba mencionados, se realizó la soldadura de los cupones, tal como se muestra en la figura 51.

Figura 51

Soldadura de los cupones.

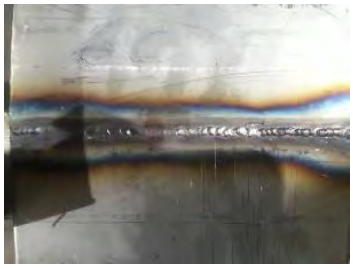
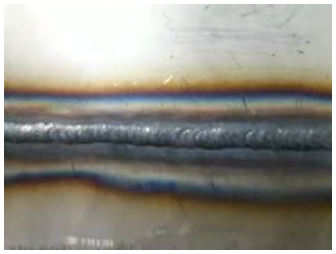


Nota. Elaboración propia.

En la figura 52 se observa los cupones después de la soldadura.

Figura 52

Vista de los cupones soldados.

Cupón P	Cupón Q
	
Cupón R	Cupón T
	

Nota. Elaboración propia

5.3. Cálculos Realizados

5.3.1. Cálculo de aporte de calor

Para el cálculo del aporte de calor, se calculó haciendo uso de la ecuación 1, del capítulo II.

Cupón P:

$$Hnet = \frac{20 \times 80}{5.5} \times 0.78 = \ 226.90 \ J/mm$$

Cupón Q:

$$Hnet = \frac{21.5 \times 110}{5.8} \times 0.78 = 318.05\ J/mm$$

Cupón R:

$$Hnet = \frac{23 \times 150}{6.00} \times 0.78 = \ 448.5\ \frac{J}{mm}$$

Cupón T:

$$Hnet = \frac{25 \times 210}{6.40} \times 0.78 = 639.84\ \ J/mm$$

En la tabla 18 se resume los resultados del cálculo de calor neto aportado.

Tabla 18

Resultados del calor neto aportado

Cupón	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Veloc. de desplazamiento (mm/seg)	Calor neto aportado (J/mm)
P	80	20.0	5.5	226.90
Q	110	21.5	5.80	318.05
R	150	23.0	6.0	448.5
T	210	25.0	6.40	639.84

Nota. Elaboración propia

5.3.2. Cálculo del Ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC)

Para nuestra investigación, los datos son los siguientes:

- T ambiente = 16ºC
- T fusión=1425 ºC

Para el acero inoxidable AISI 304:

- ρ = 0.079 gr/mm3
- C = 0.017 J/gr-°C
- $\rho.C = 0.001343$ j/mm^3-ºC
- t (espesor) = 3.175 mm.
- Tmax = 800 °C.

PROBETA P:

$$Y = [(\frac{1}{800-16}) - (\frac{1}{1425-16})] \times [\frac{226.90}{4{,}13 \times 0.001343 \times 3.175}] = 7.29\ mm$$

PROBETA Q:

$$Y = [(\frac{1}{800-16}) - (\frac{1}{1425-16})] \times [\frac{318.05}{4{,}13 \times 0.001343 \times 3.175}] = 10.22\ mm$$

PROBETA R:

$$Y = [(\frac{1}{800-16}) - (\frac{1}{1425-16})] \times [\frac{448.50}{4{,}13 \times 0.001343 \times 3.175}] = 14.41\ mm$$

PROBETA T:

$$Y = [(\frac{1}{800-16}) - (\frac{1}{1425-16})] \times [\frac{639.84}{4{,}13 \times 0.001343 \times 3.175}] = 20.56\ mm$$

En la tabla 13 se resume los resultados del cálculo del ancho de la zona afectada por el calor:

Tabla 19

Resultados del cálculo del ancho de la ZAC.

Cupón	Intensidad de corriente (A)	Tensión de arco (V)	Veloc.de desplazamiento (mm/seg)	Calor neto aportado (J/mm)	Ancho de la ZAC (mm)
P	80	20.0	5.50	226.90	7.29
Q	110	21.5	5.80	318.05	10.22
R	150	23.0	6.00	448.5	14.41
T	210	25.0	6.40	639.84	20.56

Nota. Elaboración propia

5.4. Control de Calidad de las Probetas

5.4.1. Inspección Visual

Un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de inspección visual del cordón de soldadura de los cuatro cupones se ilustra en la tabla 20.

Tabla 20

Resultados del examen visual

Cupón	Discontinuidades detectadas		Descripción	Clasificación según AWS D1.1
	Cara	Raíz		
P	No	Si	Falta de penetración al inicio de la junta. Discontinuidad en el cordón de soldadura.	Aprueba
Q	No	No	Fisuras de crater de aprox. 2.5 mm de diámetro.	Aprueba
R	Si	No	Falta de material de aporte al inicio y final del cordón.	Aprueba
T	Si	No		No aprueba

Nota. Elaboración propia

La inspección visual es generalmente utilizada para verificar la superficie, forma, evidencia de alineamiento de superficies en contacto o evidencias de fugas. Para muchos tipos de soldadura, su integridad es verificada principalmente mediante inspección visual. La inspección visual

constituye aun una parte importante del control de calidad práctico. De manera que la inspección visual es de importancia primordial.

Siendo el método de prueba no destructiva más extensamente utilizado, la inspección visual es fácil de aplicar, rápida, relativamente menos costosa, no requiere equipo especial sino únicamente una buena visión, y arroja información muy importante relativa a la conformidad general de las especificaciones de soldadura.

5.4.2. Tintes penetrantes

Después de haber realizado el examen visual y haber señalizado los posibles defectos, se procede a realizar el examen con tintes penetrantes fluorescentes. En la figura 53 se observa el kit de tintes penetrantes que se usaron en la presente investigación, tenemos el penetrador, removedor y revelador.

Figura 53

Kit de tintes penetrantes



Nota. Elaboración propia.

Procedimiento para realizar la inspección con tintes penetrantes:

1. Limpieza mecánica de la superficie.

La superficie o el área a inspeccionar deben estar completamente libre de escorias, oxido, aceites, grasas, agua o de cualquier otro contaminante que pueda interferir en la función del líquido penetrante. La limpieza se realizó con un paño humedecido con thinner para luego ser secado con un secador eléctrico. Esta operación se observa en la figura 54.

Figura 54

Secado de los cupones



Nota. Elaboración propia.

2. Aplicación del líquido penetrante.

Una vez que la superficie está completamente limpia y seca se aplica el penetrante, sumergiendo la pieza en un baño de penetrante, para luego reposar por un tiempo de 20 minutos. Esta operación se observa en la figura 55.

Figura 55

Aplicación del penetrante.



Nota. Elaboración propia.

3. Remoción de exceso de penetrante

Este es el paso más delicado del procedimiento de inspección ya que se debe remover el excedente sobre la superficie de la muestra procurando no eliminarlo de los posibles defectos, esto se realiza con un chorro de agua de mínimo caudal, tal como se aprecia en la figura 56.

Figura 56

Lavando el exceso de penetrante.



Nota. Elaboración propia.

4. Aplicación del revelador

Se aplica una fina capa de revelador a la superficie de la muestra para provocar que el penetrante “atrapado” emerja desde el interior de las fallas hasta hacerse visible. En la figura 57 se observa dicha operación.

Figura 57

Aplicación del revelador.



Nota. Elaboración propia.

5. Indicaciones del revelador

El revelador debe permanecer sobre la superficie de la muestra para permitir la extracción del penetrante hacia fuera de cualquier tipo de falla superficial. El tiempo requerido de permanencia fue de 15 minutos.

6. Limpieza del cupón.

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

Figura 58

Se observa la limpieza de un cupón



Nota. Elaboración propia.

7. Inspección e interpretación.

En la Tabla 21 se resume los resultados de la prueba por tintes penetrantes (fluorescentes).

Tabla 21

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

Cupón	Observaciones	Defectos
P	Presenta discontinuidad.	Falta de fusión

Q	Presenta discontinuidad.	Mordedura
R	No presenta discontinuidad	Ninguno
T	Presenta discontinuidad.	Inclusión

Nota. Elaboración propia

8. Limpieza total de la probeta.

El paso final de este proceso es una limpieza minuciosa para remover la totalidad del revelador aplicado sobre la superficie de los componentes que fueron encontrados aceptables.

5.4.1 Ensayo de Doblado

La prueba de ensayo de doblado consiste en doblar la probeta a 180° en matrices estándares. Este tipo de ensayo no es cuantitativo sino cualitativo, ya que se pretende observar que las probetas no presenten ninguna fisura, lo cual indicara que los parámetros de las variables utilizadas han sido las correctas. Este ensayo mide la capacidad de la barra para doblarse hasta llegar a un doblez de radio mínimo sin agrietarse.

Para realizar la prueba de doblez, las superficies convexas de las probetas dobladas deben ser examinadas visualmente en busca de discontinuidades en la superficie. Para la aceptación es necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

- Las discontinuidades medidas en cualquier dirección en la superficie no deben tener más de 3 mm.
- La suma de todas las discontinuidades presentes de entre 1 mm y 3 mm no deben sobrepasar los 10 mm en total.

Previo a la prueba de doblez, las probetas se preparan, puliendo la zona del depósito con una amoladora, para luego colocarla en la máquina de doblez para realizar los ensayos de doblez

de cara y raíz con los que se puede verificar la calidad del cordón, penetración y fusión entre el material base y el material de aporte. En la figura 61 se observa el cupón ya cortado y en la figura 59 se observa la posición de la probeta en el equipo de doblez.

Figura 59

Se observa un cupón ya cortado



Nota. Elaboración propia.

Figura 60

Posición de la probeta en el equipo de doblez

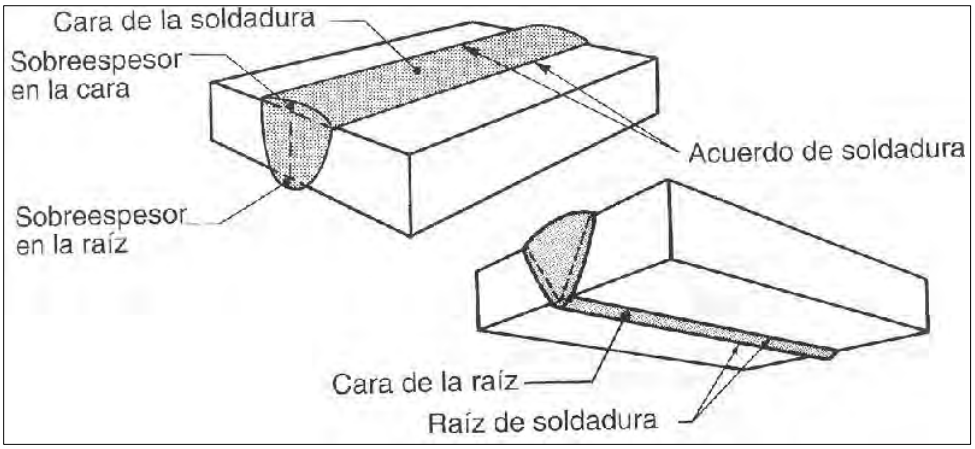


Nota. Elaboración propia.

Para un mejor entendimiento de este examen, debemos de mencionar mediante una figura esquematizada la cara y raíz de una soldadura. En la figura 61 se grafica estos términos.

Figura 61

Cara y raíz de una soldadura.



Nota: Walteros Larrotta (Manual de Soldadura Und 5 Tipos de Uniones., 2010)

En la figura 62 y 63, se observa las probetas después de realizar la prueba de doblez.

Figura 62

Ubicación de los puntos donde se indentaron



Nota. Elaboración propia.

Figura 63

Probetas dobladas con presencia de discontinuidades en la zona de soldadura

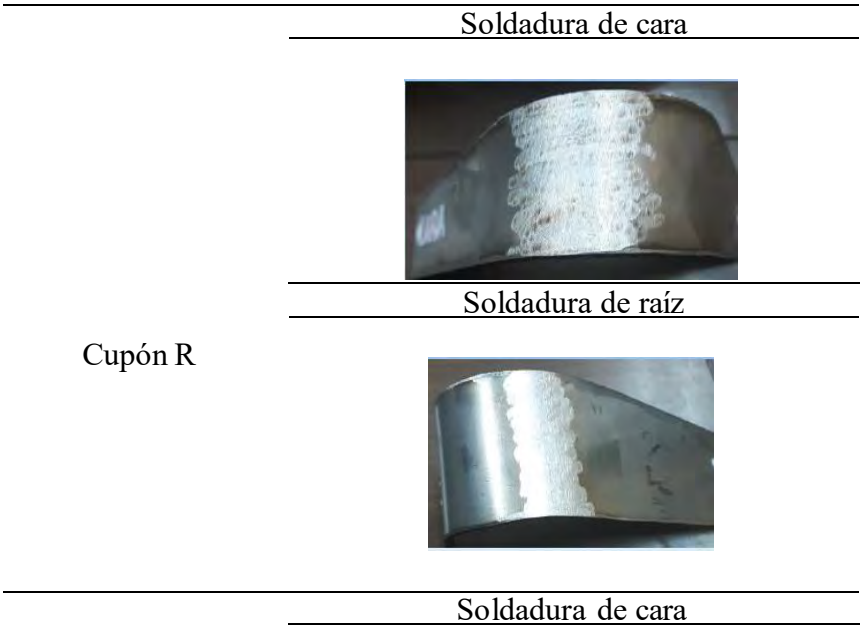


Nota. Elaboración propia.

En la figura 64 se muestra las probetas de los cupones R y T después de realizar la prueba de doblez

Figura 64

Muestra las probetas de los cupones R y T después de realizar la prueba de doblez



Cupón T	
	Soldadura de raíz
	

Nota. Elaboración propia.

En la tabla 22 se muestra el resultado de la prueba de doblez.

Tabla 22

Resultados de la prueba de doblez.

Probeta	Observaciones
P	Presenta Discontinuidad
Q	Presenta Discontinuidad
R	No presenta discontinuidad.
T	Presenta Discontinuidad

Nota. Elaboración propia

5.4.2 Prueba de Dureza

En la tabla 23 se observa que el ancho de la zona afectada por el calor calculado

Tabla 23

Ensayo de dureza

Cupón	**Calor de aporte (J/mm)**	**Tendencia del enfriamiento**	**Dureza estimada del metal depositado (HB)**
P	226,90	Enfriamiento rápido	255 HB

Q	318,05	Enfriamiento moderado	250 HB
R	448,50	Enfriamiento más lento	245 HB
T	639,84	Enfriamiento lento	240 HB

Nota. Elaboración propia

CAPITULO VI

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

6.1. Resultados y discusión

6.1.1. Ensayo por Líquidos Penetrantes

Los resultados de la prueba de tintes penetrantes se resumen en la tabla 24.

Tabla 24

Resultados de la prueba con tintas penetrantes.

Discontinuidades con tintas penetrantes		
Tipo de transferencia	Discontinuidad	Descripción
Spray	Si	Falta de fusión
Spray	Si	Mordedura
Spray	No	Ninguno
Spray	Si	Inclusión

Nota. Elaboración propia.

5.5 Ensayo de doblado

En la tabla 25 se muestra los resultados obtenidos del ensayo de doblez.

Tabla 25

Resultados del ensayo de doblez

Probeta	Doblado		Discontinuidad	Calificación	
	Cara	Raíz	o defecto.	Cumple	No cumple
P	X		Si presenta		X
P		X	Si presenta		X
Q	X		Si presenta		X
Q		X	Si presenta		X
R	X		No presenta	X	
R		X	No presenta	X	
T	X		Si presenta		X
T		X	Si presenta		X

Nota. Elaboración propia.

6.2. Prueba de Dureza

Se efectuó la toma de la medida desde el centro del cordón como punto de origen.

Los valores calculados de dureza (Rockwell B) se muestran en la tabla 26

Tabla 26

Resultados de dureza (HRB) en las diferentes zonas del depósito de soldadura

Cupón	Calor de aporte (J/mm)	Tendencia de enfriamiento	Dureza estimada del metal depositado (HB)
P	226,90	Muy rápido	255
Q	318,05	Rápido	250
R	448,50	Moderado	245
T	639,84	Lento	240

Fuente: Elaboración propia.

6.3. Discusión e interpretación de los resultados

Angulo del electrodo

En los cupones experimentales se incrementó progresivamente el ángulo de inclinación del electrodo desde 5° hasta 25°. Un ángulo reducido, como el empleado en el cupón P (5°), favorece una mayor concentración del arco sobre la superficie de la junta, aunque puede dificultar la adecuada protección del baño de fusión por parte de la escoria, incrementando la posibilidad de presentar discontinuidades como falta de fusión o cordones irregulares cuando no se combina con parámetros adecuados de corriente y velocidad.

Al aumentar el ángulo a 10° y 15° (cupones Q y R), el electrodo adopta una inclinación más cercana a la recomendada para el proceso SMAW, permitiendo una distribución más uniforme del calor y una mejor estabilidad del arco. Estas condiciones favorecen la formación de un cordón

con geometría más uniforme, mejor humectación de los bordes y una adecuada protección del baño de soldadura.

En el cupón T, con un ángulo de 25°, el electrodo presenta una mayor inclinación respecto a la vertical. Aunque esta condición puede mejorar la visibilidad del baño de fusión, un incremento excesivo del ángulo puede desviar el calor hacia la dirección de avance, modificar la penetración y favorecer la formación de inclusiones de escoria o socavados cuando no existe un adecuado equilibrio con la corriente, el voltaje y la velocidad de soldadura.

Intensidad de corriente

La intensidad de corriente es una de las principales variables operacionales del proceso SMAW, ya que controla el calor generado por el arco eléctrico y afecta directamente la penetración, la geometría del cordón y la calidad de la unión soldada. En esta investigación, la corriente aumentó de 80 A (cupón P) a 210 A (cupón T), incrementando el calor de aporte y favoreciendo una mayor fusión del metal base y del electrodo.

Con corrientes bajas (80 A), el calor aportado fue insuficiente, aumentando el riesgo de falta de fusión. En corrientes intermedias (110–150 A), se obtuvo un arco más estable, mejor penetración y una adecuada formación del cordón, favoreciendo la calidad de la soldadura. En cambio, con corrientes elevadas (210 A), el exceso de calor incrementó el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) y la probabilidad de defectos como socavado, exceso de penetración e inclusiones de escoria.

Desde el punto de vista metalúrgico, un calor excesivo en el acero inoxidable AISI 304 puede favorecer el crecimiento de grano en la ZAC y la sensibilización por precipitación de

carburos de cromo, disminuyendo la resistencia a la corrosión y afectando las propiedades mecánicas. No obstante, debido a que la intensidad de corriente varió simultáneamente con el voltaje, la velocidad de soldadura y el ángulo del electrodo, los resultados corresponden al efecto combinado de estas variables, aunque la corriente sigue siendo la que ejerce mayor influencia sobre el calor de aporte y el comportamiento de la unión soldada.

Velocidad de soldeo

La velocidad de soldadura es una variable operacional que influye en el calor aportado por unidad de longitud, la penetración, la geometría del cordón y el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC). En esta investigación, la velocidad aumentó progresivamente de 5,5 mm/s en el cupón P a 6,4 mm/s en el cupón T.

A bajas velocidades, el arco permanece más tiempo sobre la junta, incrementando la transferencia de calor y favoreciendo una mayor penetración, aunque una corriente baja puede limitar la calidad de la fusión. Con velocidades intermedias se obtuvo un equilibrio adecuado entre el calor aportado, la estabilidad del baño de soldadura y la formación del cordón. En el cupón T, aunque la mayor velocidad tiende a reducir el calor aportado, este efecto fue compensado por el incremento simultáneo de la intensidad de corriente y el voltaje, manteniéndose un elevado aporte térmico.

Desde el punto de vista metalúrgico, una velocidad adecuada permite controlar el ciclo térmico y limitar el crecimiento de la ZAC, mientras que velocidades muy bajas aumentan el calor aportado y velocidades excesivas pueden provocar falta de penetración o falta de fusión. Debido a que la velocidad de soldadura varió conjuntamente con la corriente, el voltaje y el ángulo del electrodo, los resultados reflejan el efecto combinado de estas variables; sin embargo, la velocidad

sigue siendo un factor fundamental en el control del calor de aporte y en la calidad de la unión soldada.

Dureza

Se concluye que, a medida que aumenta el calor de aporte desde 226,90 J/mm hasta 639,84 J/mm, la dureza del metal depositado disminuye gradualmente debido a la reducción de la velocidad de enfriamiento y al crecimiento de la microestructura solidificada. Así, el cupón P presenta la mayor dureza estimada (255–265 HB), mientras que el cupón T muestra la menor (240–250 HB).

Esta tendencia confirma que un mayor calor de aporte prolonga el ciclo térmico y reduce ligeramente la dureza del depósito. No obstante, el metal depositado por el electrodo AWS E312-16 mantiene una dureza superior a la del acero inoxidable AISI 304 (201 HB), debido a sus mejores propiedades mecánicas, por lo que todos los cupones presentan valores de dureza superiores al metal base.

CONCLUSIONES

Primera. Se concluye que las variables de operación del proceso SMAW influyen significativamente en la soldabilidad del acero AISI 304, evidenciándose modificaciones en las propiedades del metal depositado y en las características de la zona afectada por el calor (ZAC), lo que confirma la hipótesis general planteada.

Segunda. La intensidad de corriente de soldadura tiene una influencia directa y significativa en la dureza del metal depositado y de la ZAC del acero AISI 304, así como en el ancho de dicha zona, observándose que el incremento de la corriente genera un mayor aporte térmico y una ampliación de la ZAC, además de cambios apreciables en la microestructura del cordón de soldadura.

Tercera. Las variaciones de dureza en el metal depositado y en la zona afectada por el calor influyen en la aparición de indicaciones superficiales detectadas mediante el ensayo de líquidos penetrantes, evidenciándose una mayor susceptibilidad a la formación de discontinuidades superficiales en zonas con mayores gradientes de dureza y tensiones residuales.

Cuarta. La velocidad de soldeo influye significativamente en la soldabilidad del acero AISI 304, ya que velocidades de avance más bajas incrementan el aporte térmico, dando lugar a un mayor ancho de la ZAC y a variaciones en la dureza del depósito, mientras que velocidades de soldeo más altas permiten un mejor control del aporte de calor y una ZAC más estrecha.

Quinta. El control adecuado de la intensidad de corriente y de la velocidad de soldeo permite optimizar la soldabilidad del acero AISI 304 soldado por SMAW, reduciendo la extensión

de la ZAC, controlando la dureza del metal depositado y minimizando la aparición de indicaciones superficiales detectables por ensayos no destructivos.

RECOMENDACIONES

Primera. - Se recomienda controlar estrictamente la intensidad de corriente durante el proceso SMAW del acero AISI 304, seleccionando rangos adecuados según el diámetro del electrodo, con el fin de limitar el aporte térmico, evitar el ensanchamiento excesivo de la zona afectada por el calor (ZAC) y mantener valores de dureza compatibles con una adecuada soldabilidad.

Segunda. - Se sugiere optimizar la velocidad de soldeo para lograr un equilibrio entre penetración y control térmico, evitando velocidades demasiado bajas que incrementen el aporte de calor y generen una ZAC más amplia, así como velocidades excesivamente altas que puedan provocar falta de fusión o discontinuidades superficiales.

Tercera. Se recomienda aplicar procedimientos de soldadura (WPS) validados experimentalmente para el acero AISI 304, en los cuales se definan claramente los rangos de corriente, velocidad de soldeo y aporte térmico, con el objetivo de garantizar la repetibilidad del proceso y la calidad de las uniones soldadas.

Cuarta. - Se sugiere complementar la evaluación de soldabilidad con ensayos no destructivos adicionales, como inspección visual y radiografía o ultrasonido, especialmente en aplicaciones críticas, a fin de obtener una caracterización más completa de las discontinuidades generadas durante el proceso SMAW.

Quinta. - Se recomienda realizar un control metalográfico sistemático del metal depositado y de la zona afectada por el calor, que permita verificar la estabilidad microestructural del acero

AISI 304 frente a diferentes condiciones de soldadura y prevenir fenómenos como la sensibilización por precipitación de carburos.

Sexta. - Para futuros trabajos de investigación, se recomienda evaluar la influencia de otras variables del proceso SMAW, tales como el tipo de electrodo, la polaridad, el número de pasadas y la temperatura interpase, sobre la soldabilidad del acero AISI 304.

Séptima. - Se sugiere ampliar el estudio incorporando ensayos mecánicos complementarios, como tracción, doblado o impacto, que permitan correlacionar la dureza y la microestructura con el comportamiento mecánico global de las uniones soldadas.

BIBLIOGRAFÍA

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

American Welding Society. (1996). *Manual de soldadura.* México: Prentice Hall Hispanoamericana. Obtenido de https://catalogo.sena.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=13255

Arrieta Estrella, E., & Pacheco Castellar, F. (2003). *Soldabilidad de aceros inoxidables y tipos de juntas.* Monografía de grado, Institución Universitaria Tecnológica de Bolívar, Cartagena. Obtenido de https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0024439.pdf

Avesta Welding AB. (2004). *The Avesta Welding Manual: Practice and products for stainless steel welding.* Obtenido de https://steel-sci.com/assets/avesta-welding-handbook.pdf?utm_source

Ávila Hernández, R. (5 de 2004). *Comparación de torneado húmedo y seco con la utilización de insertos de la serie GC 4000 de SANDVIK, para el maquinado de probetas de 5 in de largo, 1/2 in de diámetro y rosca 3/4 UNC 10 hilos x in, de acero inoxidable tipo 304 y acero aleado AISI 4140.* Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad de las Américas Puebla. Obtenido de https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/avila_h_re/

Blanco, O., & Cepeda, E. (2015). *Efecto de la variación de temperatura entre pases en el acero al carbono ASTM A106 grado B.* Universidad Libre. Obtenido de

https://repository.unilibre.edu.co/server/api/core/bitstreams/3d574e77-0648-4f06-93bc-51e9b567a7ba/content

Canahua-Anchapuri, N. (2022). *Comparación de procesos de soldadura en aceros inoxidables austeníticos.* Puno- Peru.

Castellar, E. A., Arrieta, E., & Antonio, P. F. (2003). *Soldabilidad de aceros inoxidables y tipos de juntas.* Cartagena.

Chávez Melgar, Y. (2007). *Influencia de los parámetros de soldadura en la microestructura y resistencia a la corrosión de soldaduras mediante GTAW en un acero inoxidable dúplex del tipo 23Cr-4Ni.* Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de http://hdl.handle.net/20.500.12404/1036

Correa, F. (2014). *Procesos de soldadura. Procesos de Manufactura y Materiales*. Obtenido de https://procesosdemanufacturaymateriales.blogspot.com/2014/08/soldadura-por-arco-electrico-proceso-de.html

Costanza, G., Sili, A., & Tata, M. (2016). Weldability of austenitic stainless steel by metal arc welding with different shielding gas. *Procedia Structural Integrity, 2*, 3508-3514. doi:10.1016/j.prostr.2016.06.437

Di Caprio, G. (1999). *Los aceros inoxidables* (2a ed., 1a reimp. ed.). Barcelona: Inoxcenter. Obtenido de https://biblioteca.artium.eus/Record/170311

Echevarría, R. (2011). *Defectología.* Editorial de la Universidad Nacional del Comahue. Obtenido de https://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/18629

Gallegos Pasco, P., & Canahua Anchapuri, N. (10 de 2022). *Comparación de procesos de soldadura en aceros inoxidables austeníticos.* Puno: Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C. doi:10.35622/inudi.b.038

González Arias, A. (1995). *Laboratorio de ensayos industriales* (14 ed.). Ediciones Letina. Obtenido de https://es.slideshare.net/slideshow/laboratorio-y-ensayos-industriales-por-gonzalez-arias/105037838

Ibarra Echeverria, M., Núñez Solís, E., & Huerta Ibáñez, J. (2010). *Manual Aceros Inoxidables: sistemas electrodos y consumibles para acero inoxidable.* Santiago de Chile: INDURA S.A.

Inchaurza Zabala, A. (1981). *Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor: propiedades, transformaciones y normas* (1a ed. ed.). México, D.F.: Limusa. Obtenido de https://biblioteca.unap.edu.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=39023

INFRA. (8 de 2009). *Manual de electrodos para soldar.* INFRA.

Istrati, G. (1961). *Manual de los aceros inoxidables.* Buenos Aires: Librería y Editorial Alsina.

Jeffus, L., & Rowe, R. (2008). *Manual de soldadura GMAW (MIG-MAG).* Ediciones Paraninfo, S.A. Obtenido de https://books.google.com/books?id=lvltVXsi1-EC

Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (5a ed. ed.). México, D.F.: Pearson Educación. Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=gilYI9_KKAoC

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

Luis Lopeez, M. D. (2019). *Soldadura del acero inoxidable AISI 304 con electrodo 308 conprecalentamiento y post calentamiento a 350 °C.* Mexico.

(2010). *Manual de Soldadura Und 5 Tipos de Uniones.* Obtenido de https://es.scribd.com/doc/29706904/Manual-de-Soldadura-Und-5-Tipos-de-Uniones

Masabanda Santos, S., & Yauripoma Guacho, M. (5 de 2009). *Elaboración de un manual para prácticas de la materia teoría de procesos de soldadura.* Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito. Obtenido de https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1492

Oerlikon. (1999). *Manual de soldadura: catálogo de productos* (1a ed. ed.). Lima: EXSA. Obtenido de https://biblioteca.unap.edu.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=120023

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

Rios Roque, R. R. (2024). *Análisis económico y procedimiento de soldadura para tanque de almacenamiento de 1000 galones de petróleo fabricado de acero inoxidable AISI 304 según API 650.* Lima-Peru.

Silva, W. (2025). *Evaluación de la soldabilidad de un acero de alta aleación mediante SMAW con diversos materiales de aporte (investigación tecnológica).* Tesis de pregrado, Universidad

Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Obtenido de https://hdl.handle.net/20.500.12918/12208

society, A. W. (2012). *Manual de soldadura.* Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.

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

Ushiña, D. (2019). *Diseño e implementación de un posicionador horizontal y circular para soldadura MIG en la empresa Indima S.A.* Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20162

Walteros Larrotta, G. (10 de Abril de 2010). *Manual de Soldadura Und 5 Tipos de Uniones*. Obtenido de es.scribd.com: https://es.scribd.com/doc/29706904/Manual-de-Soldadura-Und-5-Tipos-de-Uniones

ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE LA SOLDABILIDAD DEL ACERO AISI 304 POR EL PROCESO SMAW. (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA). (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)				
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	**OBJETIVOS**	**HIPOTESIS**	**VARIABLES**	**METODOLOGÍA**
Problema general El acero inoxidable es uno de los materiales ferrosos más utilizados en la industria, así como en la fabricación de equipos, utensilios domésticos y dispositivos médicos. Su elevada resistencia a la corrosión se debe principalmente a su contenido de cromo, superior al 12 %. En aplicaciones industriales, la soldadura del acero inoxidable AISI 304 requiere un adecuado control de las variables de operación, ya que las discontinuidades o defectos en las uniones soldadas pueden ocasionar pérdidas económicas, daños ambientales y riesgos para el personal. En este contexto, resulta necesario analizar la influencia de las variables de operación del proceso de soldadura SMAW sobre la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 y la calidad microestructural de la unión soldada, con el propósito de generar información que contribuya a optimizar el proceso y mejorar la integridad de las uniones.	**Objetivo general** Determinar la influencia de las variables de operación del proceso de soldadura SMAW en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304. **Objetivos específicos** 1.-Determinar la influencia de la intensidad de corriente de soldadura en la dureza del metal depositado y de la zona afectada por el calor (ZAC) del acero inoxidable AISI 304 soldado	**Hipótesis general** Las variables de operación del proceso de soldadura SMAW influyen significativamente en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304. **Hipótesis específicas** 1.- La intensidad de corriente de soldadura influye significativamente en la dureza del metal depositado y de la zona afectada por el calor (ZAC) del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW. 2.- La selección del electrodo influye	**Variable dependiente** Soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 **Variables independientes** - Intensidad de corriente de soldadura (A) - Selección del electrodo - Velocidad de soldeo - Angulo de inclinación - Longitud de arco	**Tipo y Nivel de Investigación** **Exploratoria:** Se investigará todo y cada uno de los detalles del trabajo, para esto se indagará en cada uno de los parámetros de análisis generando hipótesis y reconociendo las variables de interés investigativo. **Descriptivo**: Esta investigación se realiza describiendo el problema en una circunstancia espacial determinada, además será la más adecuada para la problemática de la investigación, por su origen y su desarrollo.

Problema general ¿De qué manera influirán las variables de operación del proceso de soldadura SMAW en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304? ***Problemas específicos*** 1. ¿En qué medida influirá la intensidad de corriente de soldadura en la dureza del metal depositado y de la zona afectada por el calor (ZAC) del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW? 2. ¿Cómo influirá la selección del electrodo en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW? 3. ¿Cómo influirá la velocidad de soldeo en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW? 4. ¿Cómo influirá el ángulo de inclinación del electrodo en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW? 5. ¿Cómo influirá la longitud del arco en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW?	mediante el proceso SMAW. 2.-Determinar la influencia de la selección del electrodo en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW. 3.-Determinar la influencia de la velocidad de soldeo en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW. 4.-Determinar la influencia del ángulo de inclinación del electrodo en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW. 5.-Determinar la influencia de la longitud del arco en la soldabilidad del acero inoxidable	significativamente en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW, al afectar la calidad del depósito de soldadura y la integridad de la unión soldada. 3.- La velocidad de soldeo influye significativamente en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW, al modificar el calor de aporte y las características del cordón de soldadura. 4.- El ángulo de inclinación del electrodo influye significativamente en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW, al afectar la geometría del cordón y la calidad de la unión soldada.		**Correlacional**: En este tipo de investigación va a tener como finalidad determinar el grado de relación o sociedad no causal, existente entre dos o más variables evaluando la hipótesis, sujeta a comprobación. **Explicativa**: La investigación intenta informar la realidad, explicando su significatividad dentro de una teoría de referencia encargada de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto.

	AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW.	5.- La longitud del arco influye significativamente en la soldabilidad del acero inoxidable AISI 304 soldado mediante el proceso SMAW, al afectar la estabilidad del arco, la transferencia metálica y la calidad de la unión soldada.		

Anexo 2: Recomendaciones para la selección del electrodo.

Es necesario una adecuada selección del material de aporte, para conseguir una soldadura con optima resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas.

Un producto bien diseñado puede fallar en la zona soldada, si el material de aporte contiene menor contenido de aleación que el material base. Las características de la zona soldada son dependientes tanto del contenido de aleación del metal de aporte y del grado de protección del baño de fusión, con respecto al medio ambiente. Para cumplir este último objetivo se emplea una mezcla de gases o suministros químicos, en ciertos procesos de soldadura.

El primer criterio para la selección del electrodo es la composición de la aleación, la tabla 1 lista los materiales de aporte sugeridos para aceros austeníticos.

La larga lista de materiales de aporte para aceros austeníticos, a menudo, causa confusión para seleccionar el material más adecuado. La regla general es usar una aleación mayor en composición al metal base o similar. Por ejemplo, el tipo 308, se utiliza para los metales base 302 y 304, por la mayor cantidad de cromo y níquel.

Además, es el electrodo estándar para aleaciones bajas en cromo y níquel. Para el tipo 316, se aplica el mismo principio, donde la mínima cantidad de cromo es mayor en el metal soldado que en el metal base.

Ciertos electrodos estándares tienen una estructura completamente austenítica, por ejemplo, los tipos 310, 310Cb, 310Mo y 330. En estos tipos, la relación de formadores de ferrita y los formadores de austenita, tiene que ser pequeña dentro de los límites permisibles, con la finalidad de minimizar la presencia de ferrita en el depósito. Estos materiales de aporte deben ser

utilizados cuidadosamente en juntas que presenten altas tensiones residuales y también sobre metales base que contienen elementos como fósforo, azufre y silicio, como por ejemplo los metales base 302B, 303, y 314.

Al seleccionar materiales para soldadura, existe un concepto equivocado al pensar que, mientras mayor es el número AISI mayor es el contenido de la aleación. Esta regla no siempre es verdad, como en el caso del tipo 347, grado estabilizado, para servicio a alta temperatura. El tipo 347 no debe ser usado, como material de aporte de propósito general para soldar otras aleaciones, dado que el 347 es sensible a fisurarse.

Los materiales de aporte de acero inoxidable son de varios tipos, como:

- Electrodos revestidos para soldadura eléctrica manual SMAW.
- Hilo sólido, protegido por un gas ligeramente oxidante en la soldadura MIG/GMAW, o con flux en la soldadura por arco sumergido SAW.
- Hilo o varilla de aportación para soldadura TIG/GTAW, con un gas inerte de protección.

Los electrodos para aceros inoxidables se muestran en la siguiente tabla:

Metales de aporte sugeridos para la soldadura de aceros inoxidables austeníticos.

Tipo	Condición (en servicio)	Electrodo	Comentarios
201 202 301 302 304 305 308	Aw-R Aw-R	308 308	Tipo 308 referido a la composición 18-8 o 19-9 Requerimientos reales 0.08maxC, 19minCr, 9minNi,tipo 310 puede ser usado pero el incremento de silicio ocasionaría el agrietamiento en caliente.
302B 304L	Aw Aw-SR	309 308L 347	
303 303Se	Aw-R	312	Metal base libre de maquinado incrementará la tendencia la agrietamiento en caliente en la zona de fusión tipo 312 su composición está ajustada para una gran cantidad de ferrita para evitar el problema del agrietamiento.
309 309S	Aw	309	
310 310S	Aw	309 310 316	
316	Aw-SR	316 310	Soldaduras realizadas con los electrodos 316, 316L, 317, 317Nb y 318 podrían ocasionalmente mostrar pobre resistencia a la corrosión en condición bruto de soldadura. Tratamientos sugeridos: 1) Para los tipos 316 y 317 metal base, recocido 1950°F-2050°F. 2) Para los tipo 316L y 317L metal base alivio de esferzos 1600°F. 3) Para 316Nb metal base, 1600-1650°F tratamiento estabilización. Cuando el tratamiento térmico no es posible otros metales de aporte deben ser especialmente seleccionados para satisfacer los requerimientos de resistencia a la corrosión de la aplicación
316L	Aw-R	316L	
316-Nb	Aw-Ht	316Nb	
317	Aw-R	317	
317L	Aw-SR	317Nb	
321	Aw-Ht	321 347	Electrodos 321 no son manufacturados, debido a que el titanio no es fácilmente recuperado durante la deposición.
347	Aw-Ht	347	Precaución al soldar secciones gruesas debido a problemas de fisuración en el metal base y zona afectada térmicamente.
348	Aw-Ht	347	Ta restringido a 0.10 Max, y Co restringido a 0.20 Max. para servicio nuclear.

Aw: Bruto de soldadura.
R : Recocido.
Sr : Alivio de esfuerzos
Ht : Después de tratamiento de estabilización.

Anexo 3

SMAW

Acero Inoxidable

OERLIKON

INOX 29/9

Electrodo cuyo depósito tiene una estructura austeno-ferrítica con Ferrita > 20%, insensible a la fisuración en caliente. El material depositado presenta una alta resistencia a la rotura y es muy empleado para soldar aceros de difícil soldabilidad y unir aceros disimiles. El revestimiento rutílico le permite obtener depósitos libres de poros y con buen acabado. El INOX 29/9 es resistentes al impacto, calor, corrosión y a la fricción metal - metal. Los depósitos son maquinables.

Clasificación	
AWS A5.4 / ASME SFA-5.4	E312-16

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

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,10	1,00	0,90	máx. 0,025	máx. 0,020	0,5	10,00	29,00	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2'' [%]	Energía absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin tratamiento	740 - 840 (107 300 - 121 800)	> 600 (87 000)	> 25	-

Conservación del Producto
• Mantener en un lugar seco y evitar humedad. • Almacenamiento bajo horno: 50°C. • Resecado de 300°C a 350°C por 2 horas.

Posiciones de Soldadura

P, H, Va, Sc.



Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna(AC) o continua (DC): Electrodo al polo 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		-	-	55	80	110	160	-
Amperaje máximo		-	-	85	120	150	220	-

Aplicaciones

- Electrodo especial ideal para labores de mantenimiento y reparación, en todos los sectores industriales.
- Para soldar aceros al carbono y aceros aleados con problemas de soldabilidad (aceros de difícil soldabilidad).
- Para soldar una gran variedad de aceros: herramientas, tratados térmicamente, inoxidables y rápidos.
- Ideal para soldar aceros disimiles, unir acero al carbono con acero inoxidable y planchas de acero galvanizado.
- Para recuperar ejes, matrices, moldes, herramientas, cadenas, engranajes, paletas de agitadores, cremalleras, tornillos extrusores y en general, piezas de alta resistencia.
- Como base para recubrimientos protectores especiales.
- Muy usado en la industria siderúrgica (resistente al descascaramiento hasta 110°C) para relleno de ejes, mandriles, rodillos, cama cojin para cuchilas de corte en caliente, etc.