



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

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE SOLDADURA AL ARCO
ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO PARA
ALEACIONES DE ACEROS DISÍMILES**

Ing. Sergio Alejandro López Rodríguez

Asesorado por el Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE SOLDADURA AL ARCO
ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO PARA
ALEACIONES DE ACEROS DISÍMILES**

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

POR

ING. SERGIO ALEJANDRO LÓPEZ RODRÍGUEZ

ASESORADO POR EL DR. SC. ING. ROBERTO ALEJANDRO AGUILAR RIVAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTE EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

JURADO EVALUADOR QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA

DECANA	Mtra. Aurelia Anabela Córdoba Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores
EXAMINADOR	Dra. Aura Marina Rodríguez
SECRETARIO	Mtro. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE SOLDADURA AL ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO PARA ALEACIONES DE ACEROS DISÍMILES

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 27 de agosto de 2016.

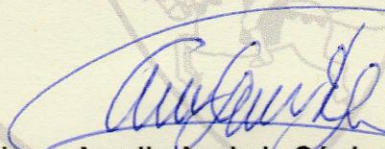
Sergio Alejandro López Rodríguez

EEPM-579-2019

En mi calidad como Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **“DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE SOLDADURA AL ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO PARA ALEACIONES DE ACERO DISÍMILES”** presentado por el Ingeniero Mecánico **Sergio Alejandro López Rodríguez** quien se identifica con Carné **200611632**, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

“Id y Enseñad a Todos”


Inga Aurelia Anabela Córdova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala




Guatemala, septiembre de 2019

EEPM-580-2019

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE SOLDADURA AL ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO PARA ALEACIONES DE ACERO DISÍMILES”** presentado por el Ingeniero Mecánico **Sergio Alejandro López Rodríguez** quien se identifica con Carné **200611632**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Coti
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



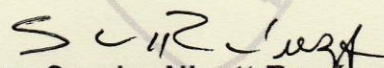
Guatemala, septiembre de 2019

EEPFI-581-2019

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE SOLDADURA AL ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO PARA ALEACIONES DE ACERO DISÍMILES”** presentado por el Ingeniero Mecánico **Sergio Alejandro López Rodríguez** quien se identifica con Carné **200611632**.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores
Coordinadora de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



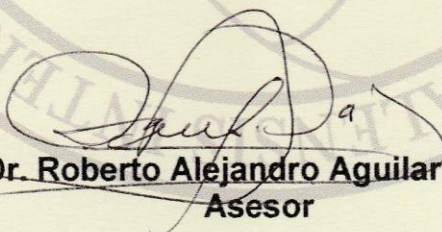
Guatemala, septiembre de 2019

EEPM-582-2019

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Mecánico **Sergio Alejandro López Rodríguez** quien se identifica con Carné **200611632** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE SOLDADURA AL ARCO ELÉCTRICO CON ELECTRODO REVESTIDO PARA ALEACIONES DE ACERO DISÍMILES”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Dr. Roberto Alejandro Aguilar Rivas
Asesor

Guatemala, septiembre de 2019

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por todas las bendiciones recibidas.
Mi padre	Victor López, por ser mi ejemplo a seguir.
Mi madre	Tomasa Rodríguez, por su amor incondicional.
Mis hermanos y hermanas	Estuardo, Lourdes, Adrián y Amarilis, por su cariño y motivación.
Mis familiares	Por todo su cariño y aprecio.
Mis catedráticos	Por todos los conocimientos transmitidos.
Mis amigos y compañeros	Por su valiosa amistad

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San Carlos
de Guatemala**

Gracias por la educación brindada, en especial a la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

Dr. Roberto Aguilar

Un sobresaliente profesional y amigo que me inspira y motiva a seguir adelante.

Gilberto Rosas

Agradezco su trabajo y consejos en la elaboración de las soldaduras.

Msc. Inga. Sandra Ramírez

Su amistad y entusiasmo son inigualables, gracias por su apoyo y motivación.

Mis amigos y compañeros

Gracias por la amistad y compañerismo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XIX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Aceros	1
1.1.1. Aceros al carbono.....	2
1.1.1.1. Aceros al bajo carbono	2
1.1.1.2. Acero de medio carbono.....	2
1.1.1.3. Aceros de alto carbono.....	2
1.1.2. Aceros aleados	3
1.2. Aceros inoxidables	3
1.2.1. Aceros inoxidables ferríticos	3
1.2.2. Aceros inoxidables austeníticos.....	3
1.2.3. Aceros inoxidables martensíticos	4
1.2.4. Aceros inoxidables endurecidos por precipitación	4
1.3. Aceros disimiles.....	4

1.4.	Soldadura por arco metálico protegido (SMAW)	5
1.4.1.	Corriente eléctrica en soldadura por arco.....	6
1.4.2.	Tipos de potencia en soldadura eléctrica	7
1.4.3.	Soplo de arco en soldadura eléctrica	8
1.4.4.	Conceptos de electricidad aplicados a máquinas de soldadura eléctrica	9
1.5.	Soldadura de aceros al carbono y aceros aleados	11
1.5.1.	Solidificación de soldaduras	14
1.5.2.	Forma del charco de soldadura.....	15
1.6.	Conceptos de soldabilidad	16
1.7.	Procedimientos de soldadura.....	16
1.7.1.	Especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS).....	17
1.7.1.1.	Soldadura de aceros al carbono.....	17
1.8.	Influencia de los elementos aleantes en la soldabilidad.....	18
1.9.	Selección del paso de raíz	18
1.10.	Soldadura de aceros inoxidables	21
1.10.1.	Procedimientos de soldadura de aceros inoxidables	22
1.10.1.1.	Soldadura con arco revestido para aceros disimiles.....	22
1.10.1.1.1.	Electrodos para aceros inoxidables	23
1.10.2.	Influencia de los elementos aleantes en la soldadura de aceros inoxidables	26
1.10.2.1.	Influencia de los elementos aleantes en la estructura de la soldadura de aceros inoxidables.....	27

1.10.3.	Selección del paso de raíz para soldaduras de aceros inoxidables	28
1.10.4.	El diagrama de <i>Schaeffler</i>	28
1.10.5.	Procesos de soldadura para aceros inoxidables	35
1.10.5.1.	Soldadura de aceros inoxidables austeníticos.....	37
1.10.5.1.1.	Agrietamiento por corrosión bajo tensión en aceros inoxidables austeníticos	41
1.10.5.1.2.	Prevención de la fisuración en aceros inoxidables austeníticos	42
1.10.5.2.	Consideraciones para el procedimiento de soldadura de aceros inoxidables austeníticos.....	44
1.10.6.	Soldadura de aceros inoxidables martensíticos.....	44
1.10.6.1.	Consideraciones para el procedimiento de soldadura de aceros inoxidables martensíticos.....	46
1.10.7.	Soldadura de aceros inoxidables ferríticos	48
1.10.7.1.	Preservación de la resistencia a la corrosión de aceros inoxidables ferríticos durante la soldadura	49
1.10.7.2.	Consideraciones para el procedimiento de soldadura de aceros inoxidables ferríticos.	50
1.11.	Soldadura de aceros disimiles.....	51

1.11.1.	Cuidados con la soldadura de aceros disimiles.....	51
1.11.1.1.	Determinación de la composición de la soldadura en uniones disimiles.....	52
1.11.2.	Combinaciones de soldaduras disimiles	56
1.11.2.1.	Consideraciones adicionales para la soldadura de aceros al carbono y de baja aleación.	57
1.11.2.2.	Consideraciones adicionales con la soldadura de los aceros inoxidables	58
1.11.3.	Selección del metal de aporte para soldaduras de aceros disimiles	59
1.12.	Procedimiento para soldaduras de aceros disimiles	62
1.12.1.	Soldadura de aceros inoxidables austeníticos disimiles.....	63
1.12.2.	Soldadura de aceros inoxidables austeníticos con aceros al carbono o de baja aleación	64
1.12.3.	Soldadura de aceros inoxidables ferríticos y martensíticos con aceros al carbono y aceros de baja aleación	69
1.13.	Ensayos no destructivos para inspección de soldaduras de aleaciones de aceros disimiles.....	70
1.13.1.	Ensayo no destructivo para soldaduras por medio de inspección visual.....	71
1.13.2.	Normas ASTM aplicadas al proceso de inspección de soldaduras de aceros disimiles.....	72
1.13.3.	Ensayo por líquido penetrante para la inspección de soldaduras.....	72

1.13.4.	Ensayo por partículas magnéticas para la inspección de soldaduras de aleaciones de aceros disimiles.	73
1.14.	Ensayos mecánicos para la inspección de soldaduras de aleaciones de aceros disimiles	74
1.14.1.	Normas ASME, ASTM y AWS para ensayos mecánicos en probetas soldadas.	74
1.14.2.	Descripción del ensayo a tracción para inspección de probetas soldadas.....	75
1.14.3.	Descripción del ensayo de dobléz para la inspección de probetas soldadas.....	77
1.14.3.1.	Criterios de aceptación para el ensayo de dobléz en soldaduras	80
1.14.4.	Inspección metalográfica de muestras soldadas de aceros disimiles.	81
1.14.4.1.	Preparación de muestras de probetas soldadas.	82
1.14.4.1.1.	Especímenes de soldadura macroscópicos.....	83
1.14.4.1.2.	Especímenes de soldadura microscópicos.....	84
1.14.4.2.	Ataque químico de muestras de probetas soldadas de aceros disimiles.....	85
2.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	87

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	109
CONCLUSIONES.....	153
RECOMENDACIONES.....	155
ANEXOS.....	157
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Partes de la soldadura por arco	6
2.	Voltaje constante, tensión de arco creciente y corriente constante	7
3.	Fuerzas y soplos magnéticos en la soldadura por arco	9
4.	Electrodo negativo y polaridad directa	10
5.	Electrodo positivo y polaridad inversa	10
6.	Corriente eléctrica alterna	11
7.	Zonas metalúrgicas desarrolladas en una soldadura típica.....	13
8.	Áreas de la soldadura	14
9.	Comparación de las formas del charco de la soldadura.....	15
10.	El paso de raíz en soldadura a tope.....	20
11.	Paso de raíz para soldadura a tope, según AWS D1.1	20
12.	Área afectada térmicamente del metal base en la soldadura.....	21
13.	Diagrama de <i>Schaeffler</i>	29
14.	Diagrama de DeLong	31
15.	Diagrama WRC-1988	33
16.	Diagrama WRC-1992	35
17.	Efecto del contenido de carbono en la precipitación de carburos	40
18.	Cordón de soldadura con 30 % de metal diluido	54
19.	Uso del diagrama de Schaeffler	60
20.	Aplicación y uso del diagrama de Schaeffler.....	66
21.	Procedimiento para la unión de aceros inoxidable austeníticos con aceros al carbono.....	68

22.	Probeta normalizada para ensayo de tracción en placas soldadas	77
23.	Muestra de plegado de raíz y cara en soldaduras	78
24.	Muestra de plegado lateral para la inspección de soldaduras	79
25.	Máquina para el ensayo de dobléz en probetas soldadas	80
26.	Preparación de junta a tope tipo doble bisel	94
27.	Preparación de muestras a ser soldadas para ensayo de tracción.....	94
28.	Detalle de preparación de bisel.....	95
29.	Preparación de previa a la unión por soldadura.....	100
30.	Detalle de proceso de limpieza entre pasadas y cordón final	101
31.	Máquina de dobléz y demostración de ensayo	105
32.	Probeta disímil acero DF 2 y 420, unión 100 % Ni, con END de líquidos penetrantes.....	110
33.	Probeta disímil acero DF 2 y 420, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes.....	110
34.	Probeta disímil acero 304 y DF 2, unión 100 % Ni, con END de líquidos penetrantes.....	111
35.	Probeta disímil acero 304 y DF 2, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes.....	112
36.	Probeta disímil de acero 304 y 420, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, uno.....	112
37.	Probeta disímil de acero 304 y 420, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, dos.....	113
38.	Probeta disímil aceros 420 y 1018, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, uno.....	114
39.	Probeta disímil aceros 420 y 1018, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, dos.....	114
40.	Probeta disímil aceros 304 y 1018, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, uno.....	115

41.	Probeta disímil aceros 304 y 1018, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, dos.	116
42.	Probeta disímil aceros 1018 y DF 2, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, uno.	116
43.	Probeta disímil aceros 1018 y DF 2, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, dos.	117
44.	Falla en probeta de aceros disimiles 304-420.....	118
45.	Falla en probeta de aceros disimiles 304-DF 2.....	119
46.	Falla en probeta de aceros disimiles 304-1018.....	120
47.	Falla en probeta de aceros disimiles 420-1018.....	121
48.	Falla en probeta de aceros disimiles 420-DF 2.....	122
49.	Falla en probeta de aceros disimiles 1018-DF 2.....	123
50.	Probeta doblada de aceros disimiles 1018 y 304.....	124
51.	Probeta doblada de aceros disimiles 1018 y 420.....	125
52.	Probeta doblada de aceros disimiles 304 y 420.....	126
53.	Probeta doblada de aceros disimiles 420 y DF 2.....	127
54.	Probeta doblada de aceros disimiles 1018 y DF 2.....	128
55.	Probeta doblada de aceros disimiles 304 y DF 2.....	129
56.	Aceros inoxidables 304 y 420, ataque con reactivo uno, observación 400X.....	130
57.	Límite de cordón de soldadura unión disímil 304-420, lado 304.....	131
58.	Cordón de soldadura 304-420, observación 100X reactivo uno.....	132
59.	Límite de cordón de soldadura unión disímil 304-420, lado 420, observación 400X, reactivo uno.....	133
60.	Secuencia de tamaño de grano austenítico unión 304-420, observación 400X reactivo uno.....	133
61.	Materiales base unión 304-DF 2, observación 400X, reactivo uno.....	134
62.	Límite de unión 304-DF 2, lado 304, observación 400X, reactivo uno.....	135
63.	Límite de cordón unión 304-DF 2, observación 400X, reactivo dos.....	136

64.	ZAC unión 304-DF 2, observación 400X, reactivo dos	137
65.	Límite de cordón unión 304-1018, observación 100X reactivo uno	138
66.	Efecto de transición del tamaño de grano en ZAC y zona sin afectar unión 304-1018, observación 400X, reactivo dos	139
67.	Cordón unión 304-1018, observación 400X, reactivo uno	140
68.	Materiales base unión 420-DF 2	141
69.	Límite de cordón unión 420-DF 2, observación 100X y 400X, reactivo dos.....	142
70.	Límite de cordón unión 420-DF 2, observación 100X, reactivo uno.....	143
71.	Cordón de unión aceros 420 y DF 2, observación 100X, reactivo uno .	143
72.	Zonas afectadas por el calor, unión 420-DF 2, observación 400X, reactivo uno	144
73.	Metales base acero 420 izquierda, acero 1018 derecha, observación 100X, reactivo uno y dos.....	145
74.	Límite del cordón unión aceros 420-1018, observación 100X y 400X, reactivo dos.....	145
75.	Límite de cordón unión 420-1018, observación 100X y 400X, reactivo uno.....	146
76.	Cordón de unión 420-1018, observación 100X, reactivo uno	147
77.	ZAC acero 1018, unión 420-1018, observación 400X, reactivo dos	147
78.	Metales base unión 1018-DF 2, observación 400X, reactivo dos	148
79.	Límite de cordón unión 1018-DF 2, observación 400X, reactivo dos	149
80.	Límite de cordón unión 1018-DF 2, lado DF 2, observación 400X, reactivo dos.....	149
81.	ZAC unión 1018-DF2, lado DF 2, observación 400X, reactivo dos	150
82.	Secuencia de la ZAC en la unión 1018-DF 2, observación 400X, reactivo dos.....	151

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Clasificación y sugerencias para la soldadura y electrodos de aceros inoxidables	24
II.	Tabla comparativa de las características de soldadura del acero inoxidable 304 con acero al carbono.....	38
III.	Susceptibilidad relativa de varios grados de acero inoxidable a la sensitización durante la soldadura	41
IV.	Aceros inoxidables martensíticos	45
V.	Aceros inoxidables ferríticos.....	49
VI.	Determinación de la composición de las soldaduras disimiles en acero.....	53
VII.	Límites aproximados de elementos diluidos en soldadura	55
VIII.	Metales de aporte de acero inoxidable, para la soldadura disímil o similar de aceros inoxidables austeníticos	64
IX.	Tabla comparativa de normas de ensayos mecánicos.....	75
X.	Resistencia mecánica de aceros disimiles empleados.....	98
XI.	Composición química característica de los aceros disimiles empleados.....	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
C	Carbono
cm	Centímetro
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continúa
Creq	Cromo equivalente
Cr	Cromo
Fe₃C	Carburo de hierro
HAZ	Zona afectada por el calor
HB	Dureza Brinell
°C	Grado centígrado
°F	Grado Fahrenheit
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
ml	Mililitro
mm	Milímetro
Mo	Molibdeno
Nieq	Níquel equivalente
Ni	Níquel
Ω	Omh
%	Porcentaje

GLOSARIO

AISI	Instituto Americano del Hierro y el Acero (<i>American Iron and Steel Institute</i>).
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (<i>American Society of Mechanical Engineers</i>)
ASTM	Asociación Americana de Ensayos de Materiales (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
Austenizante	Relativo a un elemento o factor que provoca la aparición de la estructura del acero denominada austenita.
AWS	Sociedad Americana de Soldadura (<i>American Welding Society</i>).
Charco de Soldadura	Parte de la soldadura que se forma al momento de la fusión del metal de aporte sobre la superficie del metal base.
Craqueo	En los procesos de soldadura, término relativo a una fisuración provocada por la aplicación de calor.

Delaminación	Se refiere a la separación de las láminas, producto del proceso de laminación del acero durante su fabricación bajo efectos de tensión mecánica.
Difusión	Movimiento de materia dentro de la materia.
Dilución	Acción de diluir o diluirse un cuerpo o una sustancia.
DMW	Soldadura de metales disimiles (<i>Dissimilar Metal Welding</i>)
Epitaxial	Se refiere a la deposición de una sobre capa cristalina en un sustrato cristalino, donde hay registro entre la sobre capa y el sustrato.
Fisuración	Imperfección en la soldadura con características de separación entre dos superficies que deberían ser continuas.
GTAW	Soldadura de arco tungsteno bajo protección de gas (<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>).
Sensitización	Efecto negativo en los procesos de soldadura de aceros inoxidable, particularmente austeníticos, donde se pierde cromo en los granos del acero, ya sea por evaporación o segregación a los límites de grano, lo que provoca una pérdida de la cualidad de resistencia a la corrosión.

SMAW	Soldadura de arco metálico protegido (<i>Shielded Metal Arc Welding</i>).
Titania	Dióxido de titanio
TWI	El Instituto de Soldadura (<i>The Welding Institute</i>)
WRC	Consejo de Investigación de Soldadura (<i>Welding Reserch Council</i>)

RESUMEN

Las soldaduras de aleaciones de aceros disimiles son casos particulares de procesos de unión en acero, donde se busca la preservación de las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión en la junta cuando se utilizan dos aceros de composición química o metalográfica diferentes. Para lograrlo se requiere de una serie de consideraciones, que al implementarse de manera adecuada, pueden mejorar la facilidad para la realización de la soldadura. El objetivo principal de la investigación es diseñar una metodología de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido para aleaciones de aceros disimiles. Siendo el propósito de la misma detallar un procedimiento establecido por el autor, donde se plantea una metodología de investigación y desarrollo de una técnica práctica, para garantizar la fiabilidad de las uniones soldadas. Los aceros involucrados en el desarrollo de la experimentación incluyen acero de bajo carbono, acero para herramientas, acero inoxidable austenítico y acero inoxidable martensítico.

La metodología de la investigación tiene un enfoque mixto con un diseño experimental teniendo alcance y tipo descriptivo.

Los resultados más relevantes muestran que las propiedades mecánicas evaluadas de las juntas de aceros disimiles, corresponden, según los ensayos de tracción, a resultados generalmente diferentes a las propiedades mecánicas de los elementos soldados, dando como resultado propiedades intermedias. Así también los resultados de los ensayos de doblez demuestran comportamiento de fragilidad, debido a la aparición de estructuras duras durante el proceso de

soldadura, reducen la ductilidad de las uniones soldadas, todo lo anterior se demuestra por medio del análisis metalográfico de las soldaduras.

Se llega a la conclusión que los parámetros que influyen en la soldadura de aleaciones de aceros disímiles son: la composición química de los metales base, la estructura metalográfica, las cantidades de cada elemento del que se compone el metal a ser soldado; el tipo de material de aporte seleccionado, el cual debe poseer compatibilidad química con los metales base y mantener las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión de la unión ya solidificada; los efectos del calor al momento de la soldadura, la preparación de la junta, limpieza de la junta durante el proceso de soldadura y la técnica y práctica del soldador, este deberá ser certificado para garantizar calidad en la unión.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

El problema de las soldaduras en aceros disimiles en gran medida se debe a los efectos de transformación estructural, en las zonas expuestas a altas temperaturas que provoca la precipitación de carburo de hierro, el cual es duro, además, la aparición de martensita, en zonas donde prevalece ferrita que es blanda. En caso contrario puede ocurrir el efecto opuesto, en zonas donde prevalece la austenita, la precipitación de ferrita puede provocar debilidad durante la unión por medio de soldadura. Asimismo, surgen inconvenientes con la precipitación de carburos de cromo duros en la zona próxima al cordón, específicamente en los aceros inoxidable austeníticos que son más propensos a formar carburos en los límites de grano, esta situación los hace susceptibles a la corrosión.

- Formulación de pregunta central

¿Cómo se diseña una metodología para la unión por medio de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido para aleaciones de aceros disimiles?

Preguntas específicas:

1. ¿Qué parámetros intervienen en la soldadura al arco eléctrico de aleaciones de aceros disimiles?
2. ¿Cuál es la metodología para la inspección metalográfica de soldaduras de aleaciones de aceros disimiles?

3. ¿Cuáles son las propiedades mecánicas que pueden ser evaluadas con pruebas estandarizadas en las soldaduras de aleaciones de aceros disímiles?

OBJETIVOS

General:

Diseñar una metodología de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido para unir aleaciones de aceros disimiles.

Específicos:

1. Establecer los parámetros que intervienen en la soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido en aleaciones de aceros disimiles.
2. Determinar una metodología de inspección de las microestructuras resultantes de las soldaduras de aleaciones de aceros disimiles.
3. Evaluar las propiedades mecánicas de probetas soldadas de aleaciones de aceros disimiles por medio de normativas internacionales.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación se desarrolla bajo la idea fundamental de establecer una metodología pertinente para la correcta unión por medio de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido para aleaciones de aceros disimiles, incluyendo una experimentación que se basa en la creación de muestras tipo probeta de uniones soldadas de aceros al carbono, aceros para herramienta, aceros inoxidable austeníticos y aceros inoxidable martensíticos. La metodología de la investigación tiene un enfoque mixto con un diseño experimental teniendo alcance y tipo descriptivo.

Por medio de fases se explica la metodología involucrada en el proceso de investigación:

- a) Primera fase. Investigación bibliográfica y recolección de información teórica.

Se realizó la investigación bibliográfica sobre la temática de soldadura, seleccionándose la información concerniente al tema de investigación. De igual manera se seleccionaron las normas implicadas para el desarrollo del proceso experimental y de preparación de los especímenes ensayados. Con esta información se fundamenta el diseño de la propuesta de metodología, mejorando procesos previamente propuestos por otros autores.

- b) Segunda fase. Establecimiento de los parámetros que se involucran en la soldadura de aleaciones de aceros disímiles.

Para establecer los parámetros que se involucran en el proceso de unión por medio de soldadura de aleaciones de aceros disímiles, se desarrolló un análisis de la información disponible sobre la temática planteada, concluyendo que las soldaduras de aleaciones disímiles requieren de una serie de consideraciones particulares, ya que como se expone en el desarrollo de la investigación, la interacción de dos o más aleaciones de aceros de distinta naturaleza necesita de conocimientos sobre el metal base, una correcta selección del material de aporte, una preparación adecuada de la junta a ser soldada, la técnica de la soldadura aplicada y el control de las imperfecciones resultantes en el proceso de unión.

- c) Tercera fase. Determinación de una metodología para la inspección de microestructuras resultantes en uniones soldadas de aceros disímiles.

Se realizó un análisis metalográfico de cada una de las uniones disímiles, y como consecuencia se determinó una metodología para la inspección de las uniones de aceros disímiles soldados. La metodología incluye: seccionamiento de las muestras de forma longitudinal, preparación por medio de desgaste abrasivo y posterior pulido metalográfico. Se utilizó dos tipos diferentes de reactivos ácidos para la revelación de estructuras metalográficas. Con la utilización de un microscopio óptico metalográfico se observaron zonas próximas al cordón, zonas afectadas por el calor y cordones en cada una de las uniones. Se utilizaron acercamientos de 100X y 400X para los análisis. Como guía de trabajo se utilizó la norma ASTM E 3-01.

- d) Cuarta fase. Evaluación de las propiedades mecánicas resultantes en soldaduras de aleaciones de aceros disimiles

Para la evaluación de las propiedades mecánicas resultantes de las probetas soldadas de aleaciones de aceros disimiles, se utilizaron dos tipos de ensayos, uno de dobléz y el otro de tracción. En el primer ensayo, se buscaba evaluar la propiedad de ductilidad en las juntas soldadas, dando como resultado fragilidad presente. El segundo ensayo cuantificó la propiedad de resistencia máxima a la tracción en las juntas, dando como resultado valores intermedios, posiblemente la fuente de la variación se debió a la presencia de estructuras duras en la junta.

Se presenta al final el análisis y la discusión de los resultados, mostrando las conclusiones y recomendaciones alcanzadas en la investigación.

INTRODUCCIÓN

Una de las dificultades técnicas más importantes a nivel industrial es la necesidad de unir, por medio de soldadura, dos aceros que no poseen cualidades de composición química o estructura metalográfica similar. A este tipo de uniones se le denomina juntas disimiles. La investigación posee características de ser sistemática, siendo una propuesta que mejora metodologías ya propuestas para la unión por medio de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido para aleaciones de aceros disimiles.

El problema de unir dos aceros denominados disimiles surge con la necesidad de mantener la resistencia mecánica y a la corrosión en la junta soldada, por lo que una metodología que muestre los pasos para realizar este tipo particular de uniones es de gran beneficio técnico y científico a nivel ingenieril. La importancia de la metodología propuesta para la unión de aleaciones de aceros disimiles por medio de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido prácticamente es dar la posibilidad, a quien así lo requiera, de unir cualquier acero con otro acero de naturaleza metalúrgica diferente; los beneficiarios al ser implementada la propuesta de metodología incluye a industrias de generación de energía eléctrica, industrias químicas y de alimentos, en aplicaciones de maquinaria diversa donde se requiera la interacción de aceros inoxidables con aceros al carbono y aleados.

Para la realización de la investigación se realizaron varios capítulos, a continuación se hace una descripción del contenido de cada uno.

El capítulo uno se refiere al marco teórico, donde se realiza la investigación documental y bibliográfica referente a los procesos de unión por soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido para aceros al carbono, aceros inoxidable y aleaciones de aceros disimiles, se muestra también la metalurgia de la soldadura, las recomendaciones para la unión por medio de soldadura al arco eléctrico de aceros inoxidable y las normativas involucradas en la evaluación de las probetas obtenidas.

En el capítulo dos, se muestran contenidos de la presentación de los resultados obtenidos durante la experimentación en las probetas soldadas. Se analizan las variables involucradas en el proceso de la unión por medio de soldadura de aceros disimiles y como estas influyen en la junta resultante; la selección del material de aporte, los valores característicos de composición química y de resistencia mecánica a la tracción de los metales base, la ejecución del proceso de soldadura que incluye la metodología propuesta en la investigación, metodología de ejecución de ensayos no destructivos, ejecución de ensayos mecánicos y ejecución de ensayos metalográficos. En este capítulo se analiza el desarrollo experimental de la investigación, así como la fundamentación práctica para la correcta ejecución de soldadura de aleaciones de aceros disimiles.

Para finalizar en el capítulo tres, se realiza la discusión de los resultados obtenidos, mostrando los valores y propiedades de los diferentes ensayos realizados en las probetas seleccionadas de uniones soldadas.

La investigación fue realizada de forma satisfactoria, ya que se contó con todos los medios, materiales y documentación necesarios para proyectar el diseño de la metodología.

1. MARCO TEÓRICO

En el estudio de las metodologías para la unión por medio de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido para aleaciones de aceros disimiles se requiere del análisis preliminar de las distintas propiedades que poseen los materiales base que involucra el proceso, a continuación se muestran contenidos referentes a las propiedades y características de los aceros involucrados en la metodología propuesta, la descripción del proceso de soldadura por arco eléctrico, la metalurgia de la soldadura, proceso de selección de material de aporte y el análisis de diversas técnicas sugeridas para la unión de aceros inoxidables; normativas involucradas en ensayos no destructivos y pruebas mecánicas para la evaluación de propiedades mecánicas resultantes en las juntas soldadas.

1.1. Aceros

Según ASM (2005), se tienen las siguientes consideraciones: el componente principal del acero es el hierro, que existe en dos formas cristalinas por debajo de su punto de fusión. Una de ellas es la estructura cubica centrada en el cuerpo (BCC), que es estable desde la temperatura ambiente hasta 912°C y desde 1394°C hasta el punto de fusión 1530°C . En el primer intervalo de temperatura, al hierro BCC se le conoce como ferrita (hierro α), mientras que, en el rango de temperatura más alta, es conocida como ferrita- δ (delta). La otra forma de cristal, que es estable entre 912°C y 1394°C , es la estructura cúbica centrada en las caras (FCC), conocida como austenita o hierro γ (gamma).

1.1.1. Aceros al carbono

El acero se considera que es al carbono cuando no se especifica o cuando se requiere que el contenido sea mínimo de cromo, cobalto, columbio, molibdeno, níquel, titanio, tungsteno, vanadio o circonio, o cualquier otro elemento que se podría añadir para obtener un efecto de aleación deseado. También cuando el mínimo especificado para el cobre no supera el 0,40 por ciento; o cuando el contenido máximo especificado para cualquiera de los siguientes elementos no exceda los porcentajes indicados: 1,65 por ciento de manganeso, 0,60 por ciento de silicio y 0,60 por ciento de cobre. (ASM, 2005).

1.1.1.1. Aceros al bajo carbono

Los aceros de bajo carbono contienen hasta un 0,30 por ciento de carbono.

1.1.1.2. Acero de medio carbono

Los aceros de medio carbono son similares a los aceros de bajo contenido de carbono, excepto que los rangos de carbono van de 0,30 a 0,60 por ciento y el contenido de manganeso de 0,60 a 1,65 por ciento.

1.1.1.3. Aceros de alto carbono

Los aceros de alto contenido de carbono son los que contienen de 0,60 al 1,00 por ciento de carbono, con contenido de manganeso que van desde 0,30 a 0,90 por ciento.

1.1.2. Aceros aleados

Son considerados como aceros aleados aquellos que contienen al menos 8 por ciento en peso de elementos aleantes diferentes al carbono. Entre estos se encuentran los aceros inoxidable.

1.2. Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aquellos que por lo menos contienen 10,5 por ciento en peso de cromo. Algunos aceros inoxidables contienen más del 30 por ciento de cromo o menos del 50 por ciento de hierro. Los aceros inoxidables son resistentes a la corrosión, debido a que forman de una capa de óxido de cromo. El carbono está normalmente presente en cantidades de menos del 0,03 hasta un 1 por ciento en ciertos grados martensíticos.

1.2.1. Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos son esencialmente aquellos que contienen cromo con una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo. El cromo contenido en los aceros usualmente está en los rangos del 10,5 por ciento hasta un 30 por ciento en peso.

1.2.2. Aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos tienen una estructura cristalina cúbica centrada en las caras. La estructura austenítica es alcanzada a través del uso libre de elementos austenizantes como el níquel, manganeso y nitrógeno. Los aceros inoxidables austeníticos son esencialmente no magnéticos en la condición de recocido y pueden endurecerse únicamente por trabajo en frío.

1.2.3. Aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos son esencialmente aleaciones de cromo y carbono que poseen una estructura distorsionada cúbica centrada en el cuerpo, en la condición de endurecido. Son aceros magnéticos, endurecibles por tratamiento térmico, y son generalmente resistentes a la corrosión en cierta medida. El cromo contenido puede estar presente en rangos del 10,5 hasta un 18 por ciento y el contenido de carbono puede llegar a exceder el 1,2 por ciento.

1.2.4. Aceros inoxidables endurecidos por precipitación

Los aceros inoxidables endurecidos por precipitación son aleaciones al cromo-níquel que contienen elementos endurecibles por precipitación como el cobre, aluminio o titanio. Estos pueden estar ya sea en estado austenítico o martensítico en la condición de recocido. Aquellos que son austeníticos en la condición de recocido son frecuentemente transformables a martensíticos por medio de tratamientos térmicos, algunas veces con tratamiento sub cero. (ASM, 2005).

1.3. Aceros disimiles

Aceros disimiles son considerados a aquellos que presentan ciertas limitaciones al ser soldados. Las causas de estas dificultades radican en gran medida en la variación del contenido de los elementos aleantes presentes, también por la precipitación temprana de carburos en los cordones durante la solidificación y la diferencia de coeficientes de transmisión calórica.

Las combinaciones de metales ferrosos disimiles pueden ser con aceros de baja aleación y aceros de media aleación, aceros disimiles de baja aleación

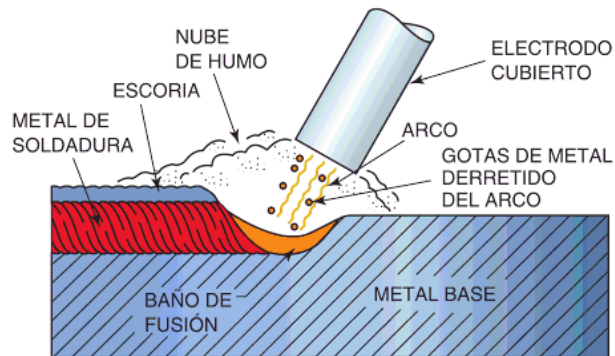
utilizando aceros inoxidable como material de aporte, aceros inoxidable con aceros al carbono o aceros de baja aleación y aceros simples, por último, son consideradas las soldaduras de aceros inoxidable con aceros inoxidable de diferente composición química y diferente estructura metalográfica. (Mvola B. *et al.*, 2013).

La soldadura de este tipo de aceros constituye el objetivo básico del presente trabajo.

1.4. Soldadura por arco metálico protegido (SMAW)

Según Jeffus L. en 2009, la soldadura por arco metálico protegido (por sus siglas en inglés *Shielded Metal Arc Welding SMAW*) es un proceso de soldadura que utiliza un electrodo de metal cubierto con fundente para transportar corriente eléctrica. La corriente eléctrica forma un arco a través de la abertura entre el extremo del electrodo y la pieza. El arco eléctrico crea suficiente calor para derretir ambos. El metal fundido del electrodo pasa por el arco hasta el baño fundido en el metal base, donde se mezclan. El extremo del electrodo y el baño fundido del metal están rodeados, purificados y protegidos por una nube gaseosa y una cubierta de escorias producidas a medida que el fundente protector del electrodo se quema o se evapora. A medida que el arco se aleja, la mezcla del electrodo fundido y el metal base se solidifican y se convierten en una única pieza.

Figura 1. **Partes de la soldadura por arco**



Fuente: Jeffus, L. *Soldadura, principios y aplicaciones*. p. 48.

1.4.1. **Corriente eléctrica en soldadura por arco**

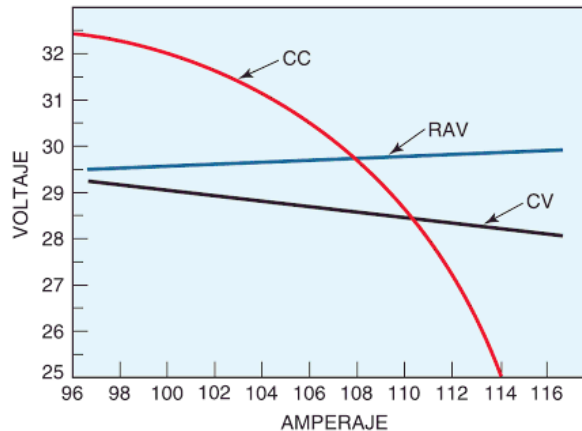
La corriente de soldadura es una corriente eléctrica, es decir, un flujo de electrones. Estos fluyen a través de un conductor del polo negativo (-) al positivo (+). La resistencia al flujo de electrones (electricidad) produce calor. Cuanto mayor sea la resistencia, mayor será el calor. El aire tiene una alta resistencia al flujo de corriente. Como los electrones saltan por las aberturas entre el extremo del electrodo y la pieza, se produce una gran cantidad de calor. Los electrones que fluyen a través de una abertura, producen un arco, el cual es el responsable de la unión metálica. (Jeffus, 2009).

1.4.2. Tipos de potencia en soldadura eléctrica

La corriente de soldadura se puede suministrar como:

- Voltaje constante (CV): el voltaje del arco permanece constante a la asignación seleccionada incluso si la longitud de arco y el amperaje incrementa o disminuye.
- Tensión de arco creciente (RAV): el voltaje del arco aumenta a medida que lo hace el amperaje.
- Corriente constante (CC): el total de corriente de soldadura (vatios) permanece constante. Este tipo de corriente también se denomina reducción de potencia del voltaje del arco (DAV), porque el voltaje del arco disminuye a medida que el amperaje aumenta.

Figura 2. **Voltaje constante, tensión de arco creciente y corriente constante**



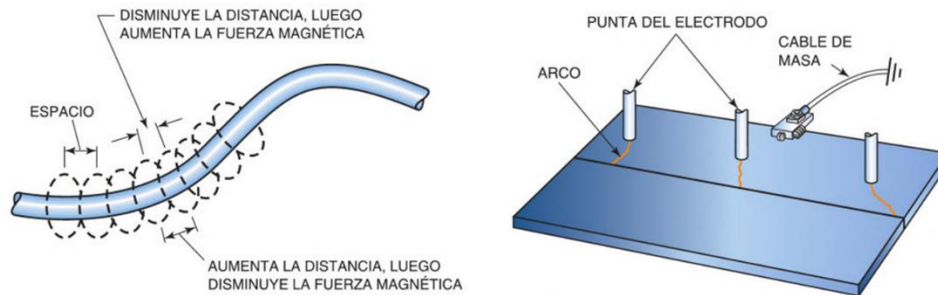
Fuente: Jeffus, L. *Soldadura, principios y aplicaciones*. p.50.

1.4.3. Soplo de arco en soldadura eléctrica

Cuando los electrones fluyen crean líneas de fuerza magnética que circulan alrededor de la línea de flujo. Las líneas de fuerza magnética se denominan líneas de flujo magnético. Estas líneas se espacian entre ellas de manera uniforme a lo largo del alambre que lleva la corriente. Si está doblado, las líneas de flujo de un lado se juntan, y las que están en el otro lado se separan. Las líneas de flujo distribuidas de forma no uniforme tratan de poner recto el cable para que las líneas se puedan espaciar uniformemente de nuevo. La fuerza que ejerce sobre el alambre, normalmente es pequeña. Sin embargo, cuando se suelda con amperajes muy altos, 600 amperios o más, dicha fuerza puede causar que el alambre se mueva.

La corriente de soldadura que fluye a través de la placa o cualquier campo magnético residual de la placa, ocasionará líneas de flujo no uniformes. Éstas, por turno, originan que un arco se mueva durante la soldadura. Este movimiento del arco se llama soplo magnético del arco. Lo cual constituye un defecto o inconveniente durante el proceso de soldadura.

Figura 3. **Fuerzas y soplos magnéticos en la soldadura por arco**



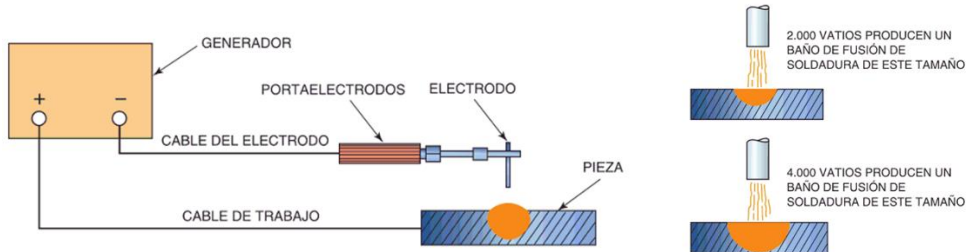
Fuente: Jeffus, L. *Soldadura, principios y aplicaciones*. p. 51.

1.4.4. **Conceptos de electricidad aplicados a máquinas de soldadura eléctrica**

Los tres tipos diferentes de corriente utilizados para soldadura son: corriente alterna (AC), corriente continua de electrodo negativo (DCEN), y corriente continua de electrodo positivo (DCEP). Algunos electrodos se pueden utilizar sólo con un tipo de corriente, mientras que otros se pueden utilizar con los tres tipos de corriente. Cada corriente tiene un efecto distinto sobre la soldadura.

DCEN: con corriente continua de electrodo negativo, éste es negativo, y el trabajo es positivo. La corriente de soldadura DCEN produce una velocidad alta de fusión del electrodo.

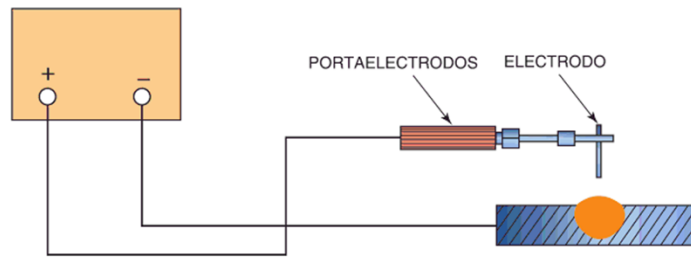
Figura 4. **Electrodo negativo y polaridad directa**



Fuente: Jeffus, L. *Soldadura, principios y aplicaciones*. p.49.

DCEP: con corriente continua de electrodo positivo, éste es positivo, y el trabajo es negativo. La corriente DCEP produce las mejores características de arco de soldadura.

Figura 5. **Electrodo positivo y polaridad inversa**

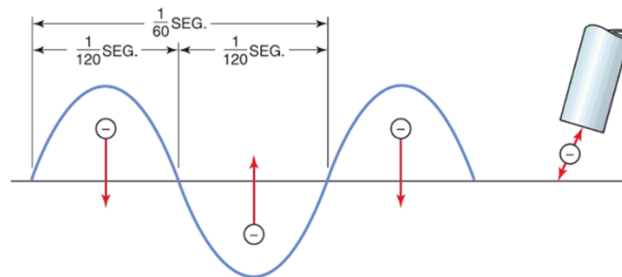


Fuente: Jeffus, L. *Soldadura, principios y aplicaciones*. p.50.

CA: en la corriente alterna, los electrones cambian de dirección cada 1/120 de segundo para que el electrodo y el trabajo alternen de ánodo a cátodo. La inversión rápida del flujo de corriente causa que el calor de la soldadura se distribuya en la pieza y en el electrodo, esto es, la mitad en cada uno. El

calentamiento uniforme permite que el cordón de soldadura mantenga el equilibrio entre penetración y acumulación.

Figura 6. **Corriente eléctrica alterna**



Fuente: Jeffus, L. *Soldadura, principios y aplicaciones*. p.50.

1.5. Soldadura de aceros al carbono y aceros aleados

La soldadura es la unión de dos o más piezas de metal por la aplicación de calor, presión o ambas, con o sin la adición de metal de aporte para producir una unión localizada por medio de fusión o recristalización, a través de la interface. Idealmente soldar una aleación en particular con un metal de aporte exactamente igual al metal base tiene algunas ventajas: uniformidad química, a través de la unión soldada, excelente acople de las propiedades físicas, como el color, densidad, conductividad térmica y eléctrica, uniformidad en las propiedades mecánicas, a través de la unión soldada y el metal base después del tratamiento térmico post soldadura.

Como resultado de la falta de coincidencia del metal de aporte y las características de distribución del calor, la soldadura es usualmente un compuesto químico heterogéneo consistente en seis regiones metalúrgicamente distintas. Una soldadura típica consiste en: 1) la zona

compuesta, 2) la zona sin mezcla, 3) la interface de la soldadura, 4) la zona parcialmente fundida, 5) la zona afectada térmicamente (por sus siglas en inglés *Heat Affected Zone HAZ*) y 6) la zona sin afectar del metal base.

Zona compuesta: la falta de mezcla del metal de aporte y el metal base comprende una zona de fusión soldada completamente fundida y homogénea en la zona o región compuesta.

Zona sin mezclarse: la región estrecha que rodea la zona compuesta en la mayor parte es conocida como la zona sin mezclar, la cual consiste en una capa límite de metal base fundido que se solidifica antes de experimentar cualquier mezcla en la zona compuesta fundida. Aunque la zona sin mezclarse está presente en todas las soldaduras por fusión, es fácilmente visible solo en aquellas soldaduras que utilizan una aleación de metal de aporte de composición sustancialmente diferente al metal base, siendo este el caso de las soldaduras disimiles de aceros.

Interface soldada: la tercera región definida en una soldadura es la interface soldada. Esta superficie delimita claramente el límite entre el metal base sin fundir en un lado y el metal soldado ya solidificado en el otro lado.

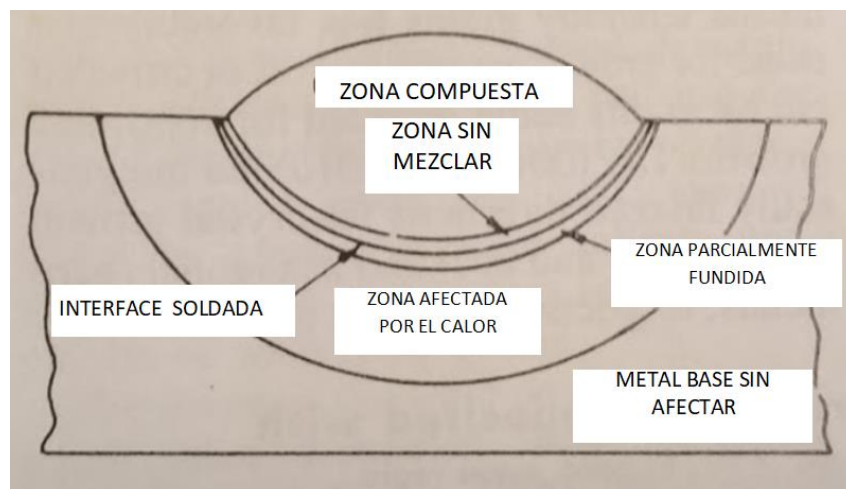
Zona parcialmente fundida: en el metal base inmediatamente adyacente a la interfase de soldadura donde puede producirse una fusión localizada, se puede observar la zona parcialmente fundida. En muchas aleaciones que contienen inclusiones de bajo punto de fusión y la segregación de impurezas o aleaciones en los límites de grano, puede ocurrir una disolución de estas regiones microscópicas de bajo punto de fusión desde la interfaz de soldadura hacia la zona parcialmente fundida. La profundidad a la que penetra una región

licuada en el metal base depende de la temperatura del *solidus* de la materia líquida.

Zona afectada por el calor: la verdadera HAZ (zona afectada por el calor) es la porción de la junta de soldadura que ha experimentado temperaturas pico lo suficientemente altas como para producir cambios microestructurales de estado sólido, pero demasiado bajas para causar cualquier fusión.

Metal base no afectado: Finalmente, la parte de la pieza de trabajo que no ha sufrido ningún cambio metalúrgico es el metal base no afectado. Aunque el metal base no es afectado, así como la totalidad de la unión de soldadura, es probable que esté en un estado de alta tensión residual de contracción transversal y longitudinal, dependiendo del grado de restricción impuesto a la soldadura.

Figura 7. **Zonas metalúrgicas desarrolladas en una soldadura típica**

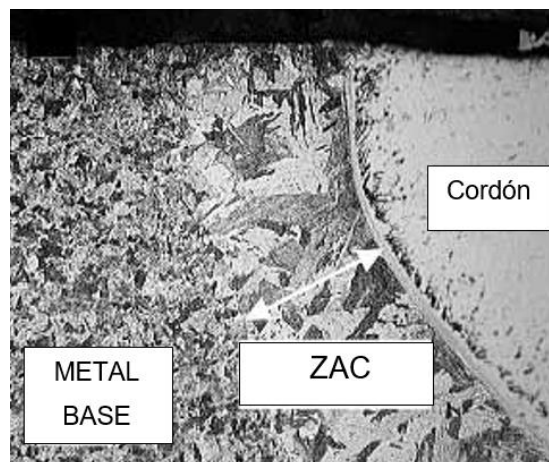


Fuente: ASM *Welding Handbook*. p. 27.

1.5.1. Solidificación de soldaduras

La mecánica de solidificación fundamental desarrollada principalmente para metales fundidos se ha aplicado con éxito a la solidificación de soldaduras. La diferencia sobresaliente entre la solidificación de una colada y la de una soldadura (aparte del tamaño relativo y las tasas de enfriamiento) es el fenómeno de crecimiento epitaxial en las soldaduras. En las fundiciones, la formación de cristales sólidos, a partir de la fusión requiere una nucleación heterogénea de partículas sólidas, principalmente en las paredes del molde, seguido del crecimiento del grano. En cambio, el fenómeno de nucleación en las soldaduras se elimina durante las etapas iniciales de solidificación, debido al mecanismo de crecimiento epitaxial en el que los átomos del charco de soldadura fundida se depositan rápidamente sobre sitios de rejilla preexistentes en el metal base sólido adyacente. Como resultado, la estructura y orientación cristalográfica de los granos expuestos o en contacto con la interfaz de soldadura continúan en la zona de fusión.

Figura 8. **Áreas de la soldadura**



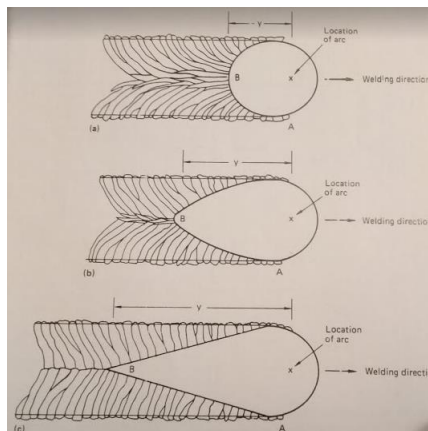
Fuente: TWI *Heat Affected Zone Microstructures in Supermartensitic Stainless Steels* (2002).

1.5.2. Forma del charco de soldadura

Debido a que controla la estructura metalográfica de solidificación, la forma del charco de la soldadura es un factor importante. Por ejemplo, si un metal en estado de fase simple, es soldado por medio de arco de tungsteno y gas a baja velocidad, propiciara la aparición de un charco de soldadura tipo elíptico (casi circular). Según lo que se ve en la figura nueve, los granos columnares crecen en la dirección del gradiente térmico producido por la fuente de calor móvil (es decir, el arco).

La forma del charco de soldadura tiende a hacerse más alargada con una velocidad de soldadura creciente. Finalmente, la soldadura adquiere una forma de lágrima a velocidades de deposición rápidas que se encuentran normalmente en la práctica comercial del proceso. El charco de soldadura es alargado dependiendo de las direcciones del gradiente de temperatura máxima en la posición A y B en la figura nueve. (ASM *Welding Handbook*. 1980).

Figura 9. **Comparación de las formas del charco de la soldadura**



Fuente: ASM *Welding Handbook*. p. 29.

1.6. Conceptos de soldabilidad

Todos los metales se pueden soldar, aunque para algunos se requiere mucho más cuidado y habilidad para producir juntas resistentes y dúctiles aceptables. El término soldabilidad ha sido acuñado para describir la facilidad con la cual se puede soldar apropiadamente un metal. Una buena soldabilidad significa que se puede utilizar casi cualquier proceso para producir soldaduras aceptables y que se necesita poco esfuerzo para controlar los procedimientos. Una soldabilidad pobre significa que los procesos utilizados son limitados y que la preparación de la junta y los procedimientos utilizados para fabricarla deben ser controlados cuidadosamente o las piezas no funcionarán como se pretende.

La AWS define la soldabilidad como: “la capacidad de un metal para ser soldado bajo condiciones de fabricación impuestas, de manera específica y apropiada a una estructura diseñada y para funcionar satisfactoriamente en el servicio pretendido”. La soldabilidad involucra la metalurgia de los metales que se van a soldar y de los metales de aportación, los procesos de soldadura, el diseño de juntas, la preparación para soldar, los tratamientos térmicos antes y después de la soldadura y muchos otros factores dependiendo de la complejidad del sistema de soldadura. (Jeffus, 2009).

1.7. Procedimientos de soldadura

Una especificación del procedimiento de soldadura es una serie de instrucciones por medio de las cuales se realiza una soldadura sana. Normalmente, el procedimiento está escrito de conformidad con un código, una especificación o una definición específicos.

1.7.1. Especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS)

Especificación del procedimiento de soldadura WPS (por sus siglas en inglés *Welding Procedure Specifications* WPS) es la terminología estándar utilizada por la AWS y la ASME. La WPS enumera todos los parámetros requeridos, para producir una soldadura sana para el código, las especificaciones o la definición específicos. Los parámetros específicos, como proceso, técnica, electrodo o relleno, corriente, amperaje, voltaje, precalentamiento y calentamiento posterior de la soldadura también se deberán incluir.

1.7.1.1. Soldadura de aceros al carbono

Los aceros dulces, o sea los de bajo carbono, menores de 0,30 %, se pueden soldar fácilmente por todos los procesos de soldadura. Las soldaduras resultantes son de alta calidad.

Los aceros de bajo carbono y acero dulce se pueden soldar rápidamente por el método de soldadura por arco metálico protegido. La selección del electrodo correcto para la aplicación de soldadura particular ayuda a asegurar alta resistencia y ductilidad en la soldadura.

Aceros de medio carbono y alto carbono requieren, procesos especiales incluyendo tratamientos térmicos. (Jeffus, 2009).

1.8. Influencia de los elementos aleantes en la soldabilidad

Los elementos aleantes en el acero pueden mejorar en gran medida las propiedades mecánicas de los aceros, también pueden provocar que la facilidad para la ejecución de procesos de soldadura se reduzca.

Todos los aceros al carbono pueden soldarse, por lo menos, con un método. No obstante, cuanto más alto sea el contenido de carbono en el metal, mayor será la dificultad para soldar el acero. Se deben tomar precauciones especiales en el proceso de soldadura.

Debido a que el acero para herramientas tiene un contenido de carbono de 0,8 a 1,50 por ciento, es muy difícil de soldar.

1.9. Selección del paso de raíz

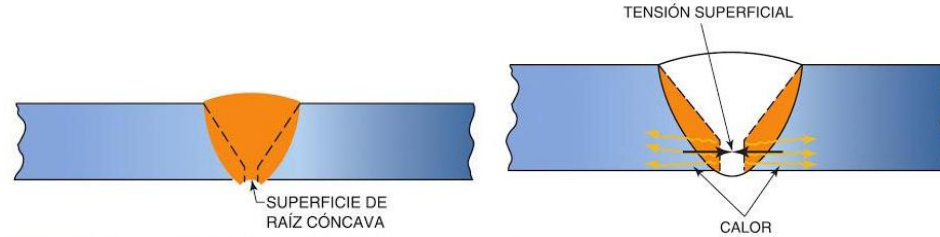
En soldadura, el paso de raíz es definido como los puntos, mostrados en la sección transversal donde se interseca la superficie del metal base. No todas las soldaduras necesitan del espacio de raíz, debido a las singularidades de cada proceso de unión.

El espacio entre las placas se denomina apertura de raíz o rendija de raíz. Los cambios en la apertura de raíz afectarán a la penetración. A medida que el espacio aumenta, la penetración de soldadura también aumenta. La apertura de raíz para la mayoría de soldaduras de tope varía de 0 milímetros a 3 milímetros. Las aperturas excesivamente grandes pueden causar que el metal fundido pase al otro lado o un solape en frío en la raíz de la soldadura.

La apertura de raíz ayudara al soldador a controlar la penetración y la succión. El control de la penetración se mejora, porque existe más metal cerca del borde para absorber el excesivo calor del arco. Esto hace que los ajustes de la máquina sean menos críticos, al permitir que el baño de fusión de la soldadura se enfríe rápidamente entre cada movimiento del electrodo. La succión de raíz está provocada por la tensión superficial del metal fundido tratando de apretarse en una bola, formando una superficie de raíz cóncava. La apertura de raíz permite que se controle un baño de fusión de la soldadura más grande, debido al tamaño aumentado del baño de fusión de la soldadura, no se ve tan afectado por la tensión superficial. (Jeffus, 2009).

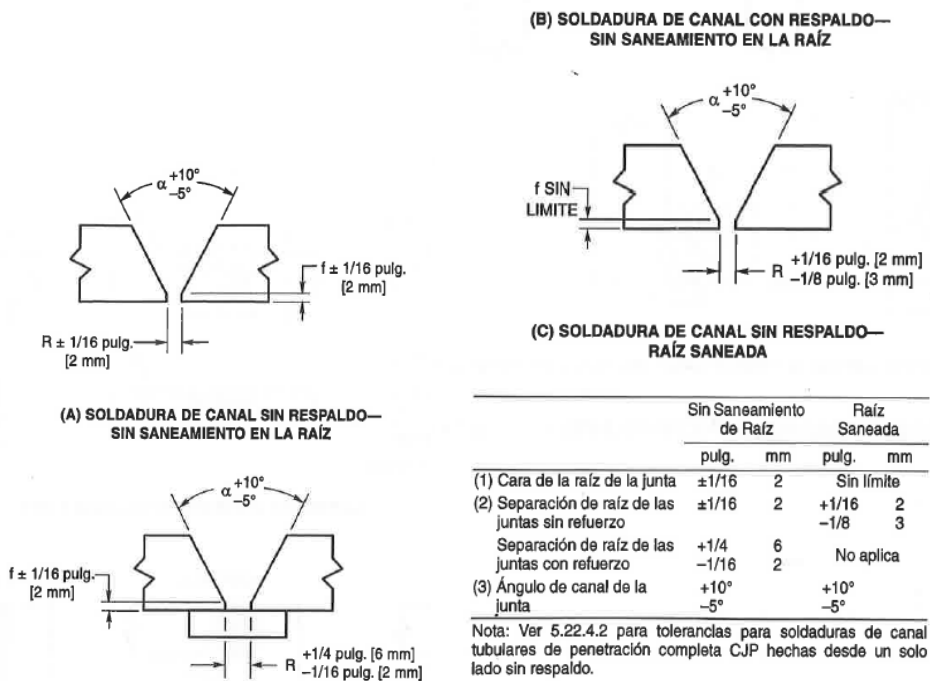
Según AWS D1.1/D1.1M:2010, apartado 5.22.1, para juntas de soldadura de filete, las partes a ser unidas deben ponerse en un contacto tan cercano como sea práctico. La abertura de la raíz no debe exceder $3/16$ de pulgada (5 milímetros) excepto en casos que involucren formas o placas de 3 pulgadas (75 milímetros) o mayor espesor si, después de enderezar y en ensamble, la abertura de la raíz no puede cerrarse lo suficiente para cumplir con esta tolerancia. En tales casos, puede usarse una abertura de raíz máxima de $5/16$ de pulgada (8 milímetros), siempre que se utilice un respaldo adecuado. El refuerzo debe ser de fundente, cinta de vidrio, polvo de hierro o materiales similares, o soldaduras que usen un proceso de bajo hidrogeno compatible con el metal de aporte depositado. Si la separación es mayor de $1/16$ de pulgada (2 milímetros), las piernas de la soldadura de filete deben incrementarse por la cantidad de la abertura de raíz, o el contratista debe demostrar que se ha obtenido la garganta efectiva requerida.

Figura 10. El paso de raíz en soldadura a tope



Fuente: Jeffus, L. *Soldadura: principios y procedimiento*. p. 105.

Figura 11. Paso de raíz para soldadura a tope, según AWS D1.1

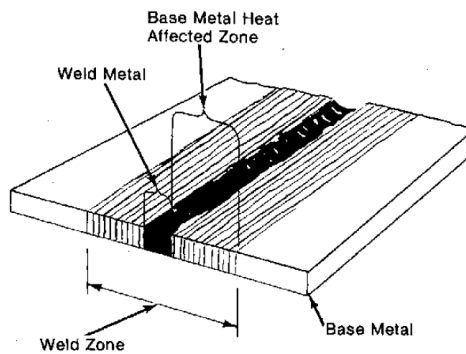


Fuente: AWS D1.1 M:2010. *Código de soldadura estructural-acero*. p. 221.

1.10. Soldadura de aceros inoxidables

Durante la soldadura de aceros inoxidables, las temperaturas del metal base adyacentes a la soldadura alcanzan niveles en los que se producen transformaciones microestructurales. El grado en que se producen estos cambios y su efecto sobre la soldadura acabada en términos de resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas, depende del contenido de aleación, espesor del metal a trabajar, metal de aporte, diseño de junta, método de soldadura y habilidad de soldador. Independientemente de los cambios que se produzcan, el objetivo principal en la soldadura de aceros inoxidables es proporcionar una junta de calidad con cualidades iguales o mejores que las del metal base, permitiendo cualquier cambio metalúrgico que tenga lugar en el metal base adyacente a la soldadura y cualquier diferencia en el metal de relleno de la soldadura.

Figura 12. Área afectada térmicamente del metal base en la soldadura



Fuente: AISI, NiDI. *Welding of stainless steels and other joining methods*. p. 4.

La siguiente discusión es útil en la comprensión de las características metalúrgicas de los aceros inoxidable y cómo sus microestructuras pueden cambiar durante la soldadura. (AISI, 1988).

1.10.1. Procedimientos de soldadura de aceros inoxidables

Los dos métodos básicos para la soldadura de aceros inoxidables son soldadura por fusión y soldadura por resistencia. En la soldadura por fusión, el calor es proporcionado por un arco eléctrico entre un electrodo de carbono o de metal (conectado a un terminal de una fuente de alimentación) y el metal a soldar (que está conectado al otro terminal). En la soldadura por resistencia, la unión es el resultado del calor y la presión. El calor es producido por la resistencia al flujo de corriente eléctrica, a través de las partes a soldar y la presión es aplicada por los electrodos. Ambos métodos son ampliamente utilizados para aceros inoxidables.

1.10.1.1. Soldadura con arco revestido para aceros disimiles

SMAW es un proceso versátil y rápido que es muy popular para la soldadura de aceros inoxidables y disimiles, especialmente para unir formas que no se pueden configurar fácilmente, por los métodos de soldadura automática. Debido a que el electrodo está recubierto, SMAW se denomina comúnmente soldadura de electrodo "recubierto".

1.10.1.1.1. Electroodos para aceros inoxidables

Los electroodos para SMAW se seleccionan primero con base a la composición de la aleación, como se muestra en la tabla uno, y luego de acuerdo con el recubrimiento. Los revestimientos de electroodos son generalmente bases de cal o materiales de base de titania, dependiendo del tipo de soldadura a realizar y del tipo de fuente de alimentación utilizada. Por ejemplo, en la tabla uno, se muestra las clasificaciones de AWS para 17 electroodos utilizados en soldadura de arco revestido de acero inoxidable. El sufijo -15 indica que el recubrimiento es principalmente del tipo "cal", y estos electroodos se utilizan con polaridad inversa de corriente continua RP. Para corriente alterna (AC), se utilizan electroodos con el sufijo -16. Estos electroodos también son utilizables con DC y pueden tener un revestimiento de tipo "cal" o "de tipo titania".

Los electroodos de tipo -15 son utilizables en todas las posiciones de soldadura, pero dan como resultado un cordón de soldadura que aparece relativamente rugoso. Los electroodos de tipo -16 son utilizables solamente en la posición plana y son preferidos, porque dan como resultado un cordón de soldadura más liso.

La manipulación y el almacenamiento de electroodos revestidos de acero inoxidable en SMAW son muy importantes, porque los revestimientos tienden a absorber la humedad. La humedad en la zona de soldadura durante el proceso puede conducir a la porosidad, lo que debilita la soldadura y se convierte en puntos focales de corrosión. Por esta razón, los electroodos de acero inoxidable deben almacenarse en un ambiente cálido y seco (preferiblemente en el recipiente hermético original).

Tabla I. **Clasificación y sugerencias para la soldadura y electrodos de aceros inoxidables**

Clasificación de AWS para electrodos de soldadura por arco electrico protegido SMAW.			
DC Polaridad Inversa		AC o DC Polaridad inversa	
E 308-15	E 312-15	E 308-16	E 312-16
E 308L-15	E 16-8-2-15	E 308L-16	E 16-8-2-16
E 309-15	E 316-15	E 309-16	E 316-16
E 309Cb-15	E 316L-15	E 309Cb-16	E 316L-16
E 309Mo-15	E 317-15	E 309Mo-16	E 317-16
E 310-15	E 318-15	E 310-16	E 318-16
E 310Cb-15	E 330-15	E 310Cb-16	E 330-16
E 310Mo-15	E 347-15	E 310Mo-16	E 347-16
	E 349-15		E 349-16

Condiciones sugeridas para la soldadura de aceros austeniticos al cromo-níquel						
			Corriente en amperios		voltaje (máximo)	Tipo de Soldadura
		Tamaño de electrodo en pulgadas	Plana Horizontal	Vertical		
	Pasadas		Sobre cabeza			
Chapa 24	1	3/64	15-25	15-25	23	B, L, F
chapa 20-24	1	1/16	20-40	25-40	24	B, L, F
chapa 16-22	1	5/64	30-60	35-55	24	B, L, F
chapa 12-18	1	3/32	45-90	45-65	24	B, L, F
3/16"	1	1/8	70-120	70-95	25	B, L, F
3/16"-1/2"	1	5/32	100-160	100-125	26	B, L, F
1/4"	1	5/32	125	110	26	B
	1	3/16	160	125	26	B, L, F
	2	3/16	160	125	26	B
3/8"	2	3/16	160	125	26	F
	3	3/16	160	125	26	B
1/2"-3/4"	múltiples	3/16	130-190	130-145	27	B, L, F
3/8" y más	múltiples	1/4	210-300	-	28	B, L, F
1/2" y más	múltiples	5/16	250-400	-	29	B, L, F

B= tope L= traslape F= filete

Fuente: AISI, NiDI. *Welding of stainless steels and other joining methods*. p.16.

También deben evitarse otras fuentes de humedad en el área de soldadura, tales como trapos húmedos, condensación o humedad en líneas de aire usadas para soplar la suciedad lejos del área a soldar.

En el caso del análisis de los electrodos que se utilizan para soldar tuberías de aceros inoxidables se deben tomar ciertas consideraciones, aunque los diversos fabricantes de equipos tienen algunas diferencias en la composición de electrodo específico empleado para la deposición de la primera capa de revestimiento depositado por soldadura sobre acero al carbono, generalmente hay acuerdo sobre los requisitos de dicho electrodo.

- El contenido de aleación del electrodo debe ser elevado para permitir una cantidad considerable de dilución, para el acero al carbono sin desarrollar una estructura martensítica dura.
- El electrodo no debe ser de una composición que de dificultades intrínsecas de soldadura.
- Cuando se deposita un depósito de menor contenido de aleación sobre la primera capa, la dilución de la capa secundaria por la primera no debe causar dificultades en la segunda capa, específicamente se utilizan los siguientes electrodos:

Para la primera capa: el tipo 309, el tipo 309 Mo o el tipo 312 son comúnmente usados por varios fabricantes. El tipo 309 contiene un 25 Cr-12Ni nominal, el tipo 309-Mo contiene 25Cr-12Ni-2Mo, y el tipo 312 contiene un 29Cr-9Ni nominal.

Para la segunda capa: se utilizan comúnmente el tipo 308, el tipo 308L o el tipo 347, siendo la elección generalmente realizada por el diseñador del bisel. El tipo 347 puede causar dificultades con el agrietamiento.

Las aleaciones con un contenido de aleación más bajo, como los tipos 308 o 308 L (nominal 18 por ciento de níquel), no deben utilizarse como primera capa sobre acero al carbono, porque tolerarán una pequeña dilución sin que se vuelvan frágiles, debido a la formación de martensita.

Cuando la dilución del metal base de acero al carbono en el metal de soldadura de acero inoxidable interfiere con la resistencia a la corrosión de la junta de metal revestida, se puede aplicar la siguiente sugerencia: soldar la

mitad del primer paso o cordón de soldadura e incluso la mitad del segundo paso. Esto reduce el volumen de dilución por el acero al carbono en el metal de soldadura.

1.10.2. Influencia de los elementos aleantes en la soldadura de aceros inoxidables

Ninguno de los elementos de aleación utilizados en los aceros inoxidables afecta más las características de soldadura como el cromo. Los elementos empleados en grandes cantidades para ajustar las propiedades, tales como el níquel, el manganeso y el molibdeno, tienen algún efecto sobre la escoria de óxido durante la fusión, pero no hasta el punto que se conviertan en un factor significativo. Algunos otros elementos que podrían tener un efecto significativo, como el aluminio, están presentes en porcentajes relativamente pequeños.

El silicio, al igual que el cromo, es un fuerte formador de óxido, y los altos contenidos de silicio tienden a hacer que el metal fundido y cubiertas de escoria se vuelvan más fluidos. Esto a veces puede ser útil para el soldador.

Los efectos de otros elementos residuales en los aceros inoxidables, tales como el fósforo, el selenio y el azufre son de considerable importancia en la soldadura, aunque los efectos pueden ser benéficos o nocivos. La evidencia disponible sugiere que, aunque pueden estar presentes elementos que forman óxidos refractarios, es posible tener la escoria final de una composición que es bastante fluida a temperaturas de soldadura y, por lo tanto, no será objetable.

El azufre, el fósforo o el selenio añadidos a los cristales de acero inoxidable para lograr las características de mecanizado libre perjudican en cierta medida la soldabilidad, tal como causar la porosidad o una tendencia a la

falta de calor que puede dar lugar a la fisuración en caliente del metal de soldadura. Se pueden hacer modificaciones en la composición de las calidades de mecanizado libre para mejorar la soldabilidad.

1.10.2.1. Influencia de los elementos aleantes en la estructura de la soldadura de aceros inoxidables

La metalurgia de todo el metal de soldadura de acero inoxidable es controlada, tanto por la composición como por la velocidad de solidificación; con los aceros austeníticos o de la serie 300, ya sea austenita completa o ferrita en una matriz de austenita. La solidez de la soldadura o la ausencia de defectos de fisuración están en la mayoría de los casos relacionada con la presencia de ferrita en la matriz austenítica. Por lo tanto, es deseable conocer en el caso de cada elemento su efecto en la formación de austenita o ferrita. Además, algún elemento tiene un efecto sobre la estabilidad de la austenita que es importante para mantener la tenacidad de la soldadura. El cromo y el molibdeno desempeñan funciones duales, actuando primero como formadores de ferrita fuertes y en segundo lugar como estabilizadores de austenita. El níquel, el carbono y el nitrógeno, también desempeñan funciones duales, actuando primero como formadores de austenita fuertes, y segundo como estabilizadores fuertes de austenita. El silicio y el columbio realizan la función solamente como formadores de ferrita. El manganeso desempeña un doble papel, actuando primero como un formador de austenita débil, y segundo como estabilizador fuerte de austenita.

La cuantificación de las influencias anteriores en cualquier soldadura dada, determina la estructura de la soldadura como se ilustra en los diagramas de *Schaeffler* y *DeLong*.

En los aceros de la serie 400 la influencia de cada elemento en la estructura de soldadura es similar a los comentarios anteriores, excepto que el contenido total de aleación se reduce de manera que la mayor parte de la austenita formada se transforma fácilmente en martensita. La cuantificación de la composición sobre la estructura de soldadura se obtiene entonces, mediante el uso del diagrama de *Schaeffler*. Debido a la tenacidad limitada y la ductilidad asociada con la martensita; martensita mezclada con estructuras de soldadura de ferrita, se sugiere un cuidado adicional en la selección de soldaduras de la serie 400. (AISI, 1988).

1.10.3. Selección del paso de raíz para soldaduras de aceros inoxidables

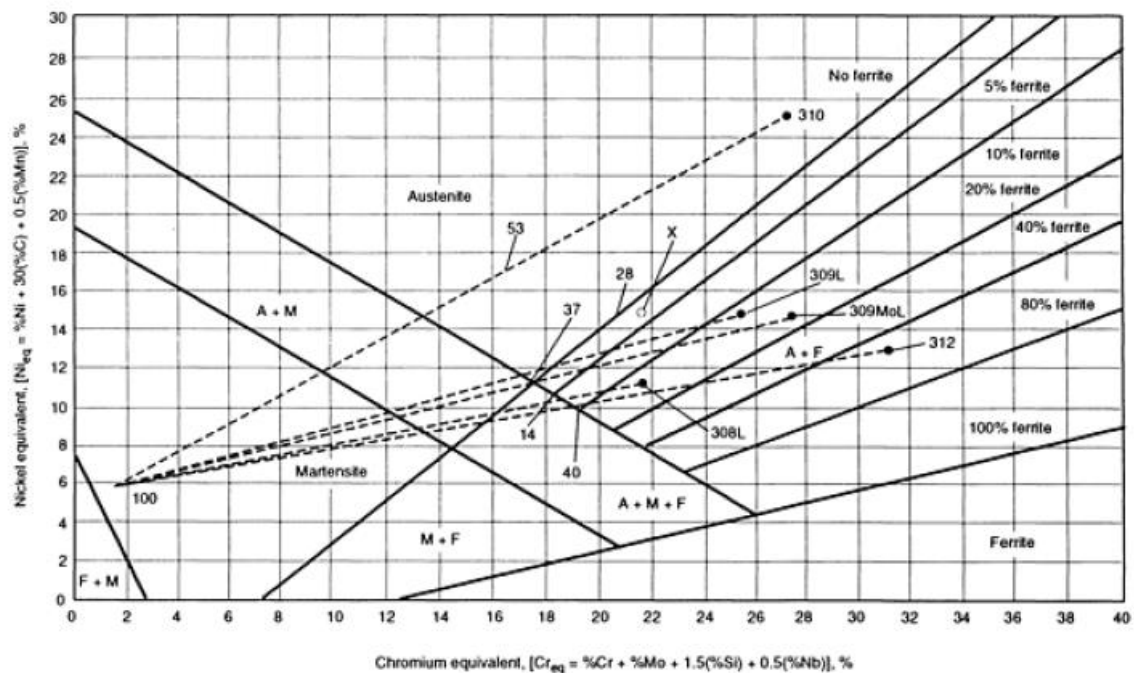
Igual que con los aceros al carbono, se cumplen los mismos requisitos del tamaño del paso de raíz entre las piezas de metal base a ser soldadas para los aceros inoxidables. Como referencia, se puede realizar una consulta más amplia en la norma AWS D1.6/1.6M:2007.

1.10.4. El diagrama de *Schaeffler*

El diagrama de *Schaeffler*, publicado en 1949, fue ampliamente utilizado para estimar el contenido de ferrita de metales de soldadura de acero inoxidable. El diagrama contiene campos de fase y líneas de iso-ferrita que permiten la predicción de la composición del metal a soldar. Todavía se utiliza ampliamente para predecir el contenido de ferrita de los depósitos de soldadura disímiles.

Esto implica calcular un "equivalente de cromo" (Creq) y un "equivalente de níquel" (Nieq) para cada metal base y para el metal de relleno propuesto, trazando cada equivalente en el diagrama de *Schaeffler* y trazando líneas de unión entre los puntos trazados, proporcionada de acuerdo con la dilución esperada, para obtener una estimación del contenido de ferrita del metal de soldadura.

Figura 13. Diagrama de *Schaeffler*



Fuente: ASM Metals Handbook. Welding, brazing and soldering. p. 2025.

En la figura trece es posible observar lo siguiente: A, austenita; F, ferrita; M, martensita, punto 100 es acero ASTM A 387A. Ejemplo: el punto x del diagrama indica la composición equivalente del depósito de soldadura de tipo 318 (316 cb) que contiene 0,07 por ciento de carbono, 1,55 por ciento de manganeso, 0,57 por ciento de silicio, 19,02 por ciento de cromo, 11,87 por ciento de níquel, 2,16 por ciento de molibdeno y 0,80 por ciento de niobio. Cada

uno de estos porcentajes se multiplicó por el "factor de potencia" indicado para el elemento en cuestión a lo largo de los ejes del diagrama, para determinar el cromo y el níquel equivalente. Cuando se han planteado como punto x, la constitución de la soldadura se indicó como austenita más de 0 a 5 por ciento de ferrita; magnético. El análisis de la muestra real reveló un contenido de ferrita medio del 2 por ciento. Para estructuras, austenita mas ferrita (a + f), el diagrama predijo el porcentaje de ferrita en un 4 por ciento para los siguientes aceros inoxidable: 308, 309, 309 cb, 310, 312, 316, 317, 318 (316 cb) y 347.

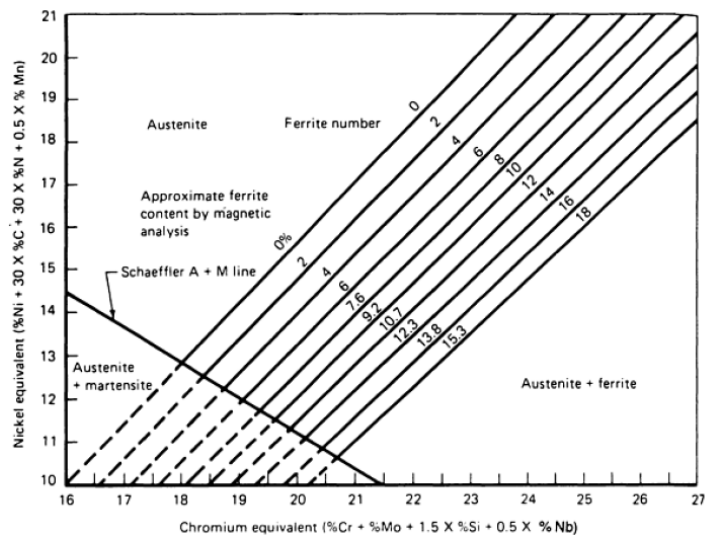
Una buena práctica metalúrgica dicta que la primera capa no debe contener martensita, mostrada como M en el diagrama. Esto limita la dilución. Si se puede encontrar un proceso que tenga una dilución inferior al 14 por ciento, entonces se podría depositar un tipo 308L con ausencia de martensita. Por otra parte, si se hace una primera capa con acero inoxidable tipo 312, cualquier factor de dilución inferior al 40 por ciento impide la formación de martensita. La selección de un metal de aportación para la primera capa que cae en la región A + F con 3 a 15 por ciento de ferrita y sin martensita, cumplirá con los requisitos metalúrgicos de un depósito de calidad. La composición y el grosor adecuados pueden ser logrados en una sola capa, pero más a menudo se requiere una segunda capa.

Varios problemas fueron identificados cuando se utiliza el diagrama de *Schaeffler* para predecir los factores físicos y mecánicos propios de una soldadura. El diagrama de *Schaeffler* no considera el efecto del nitrógeno en la promoción de la austenita a expensas de la ferrita, y es incorrecto en el tratamiento del manganeso. El manganeso no promueve la formación de austenita a alta temperatura a expensas de la ferrita, como se predice en el diagrama, aunque el manganeso estabiliza la austenita en su transformación a baja temperatura en martensita. Además, el diagrama de *Schaeffler* hace sus

predicciones en términos de porcentajes de ferrita. Esto se ha encontrado que es impreciso, y la unidad de número de ferrita (FN) con base magnética fue desarrollada para la especificación y determinación del contenido de ferrita. La base para la escala de FN (número de ferrita) se describe en el estándar AWS 4.2, "Procedimientos estándar para la calibración de instrumentos magnéticos para medir el contenido de la ferrita delta del acero austenítico y dúctil austenítico ferrítico".

Un segundo diagrama de predicción ampliamente utilizado es el diagrama de DeLong, publicado en 1974 e incorporó algunas mejoras. Tiene una escala de número de ferrita (FN) e incluye un coeficiente para el nitrógeno en el nitrógeno equivalente, aunque la gama de composiciones es más limitada que para el diagrama de *Schaeffler*.

Figura 14. Diagrama de DeLong



Fuente: ASM Metals Handbook. Welding, brazing and soldering. p. 2027.

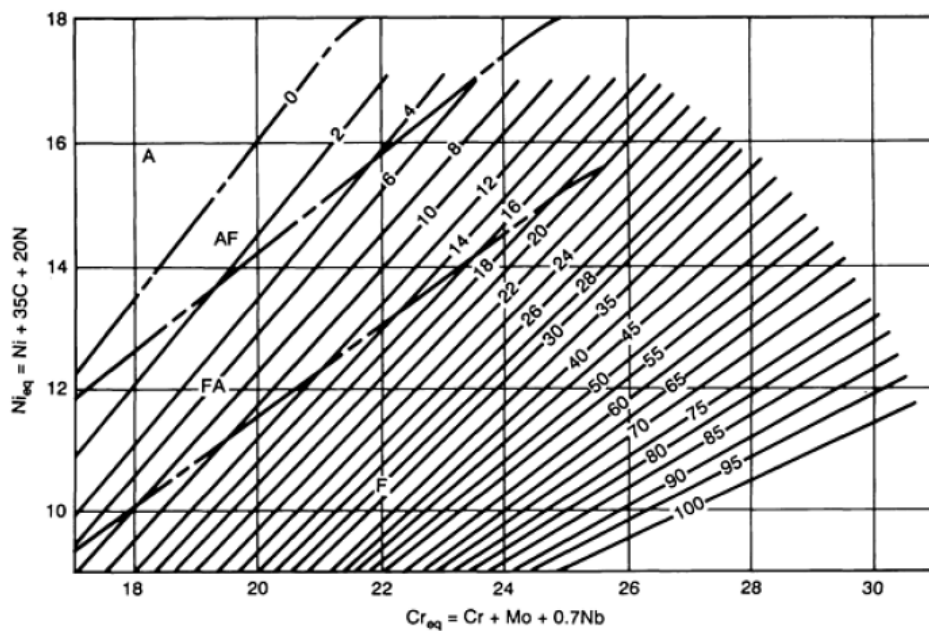
La diferencia en la aplicabilidad de los diagramas de Schaeffler y DeLong es sustancial. El diagrama DeLong es un subconjunto finamente afinado de la gama Schaeffler, diseñado específicamente para las soldaduras de acero inoxidable de la serie 300 que contienen pequeñas cantidades de ferrita. Su uso ampliamente aceptado con estas aleaciones está documentado por su inclusión en las especificaciones A5.4 y A5.9 del metal de aporte AWS y en el Código de Calderas y recipientes a presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME). La predicción del número de ferrita para composiciones que caen fuera del rango del diagrama *DeLong* (por ejemplo, aceros inoxidables dúplex) es el uso más cuantitativo del diagrama de *Schaeffler*, sin embargo, su extensión a composiciones totalmente ferríticas y la inclusión de regiones martensíticas proporciona mucha información cualitativa sobre el efecto general de elementos de aleación y propiedades mecánicas características de familias de aleaciones.

En efecto, el diagrama de *DeLong* intercambió mejor precisión de predicción para un rango de composición más limitado, pero un rango que incluía todos los metales de soldadura austeníticos comunes de acero inoxidable. Sin embargo, se ha encontrado que manipula incorrectamente el manganeso (como lo hace el diagrama de *Schaeffler*) y sobrestima el FN de composiciones de mayor aleación, tales como el tipo 309. También ha tenido una aplicación limitada a juntas metálicas disímiles.

El diagrama de WRC-1988 supera muchos de los problemas asociados con los diagramas de *Schaeffler* y *DeLong*. Se desarrolló con datos medidos por la definición más reciente de la escala FN. Elimina el coeficiente de manganeso erróneo del níquel equivalente y elimina la sobrestimación sistemática de FN para los metales de soldadura altamente aleados. Aunque cubre una gama de composiciones más amplia que el diagrama de *DeLong*,

tiene un rango de composición más estrecho que el diagrama de *Schaeffler*, porque se extiende solamente sobre el intervalo de composición de las aleaciones comerciales con las que se desarrolló.

Figura 15. **Diagrama WRC-1988**



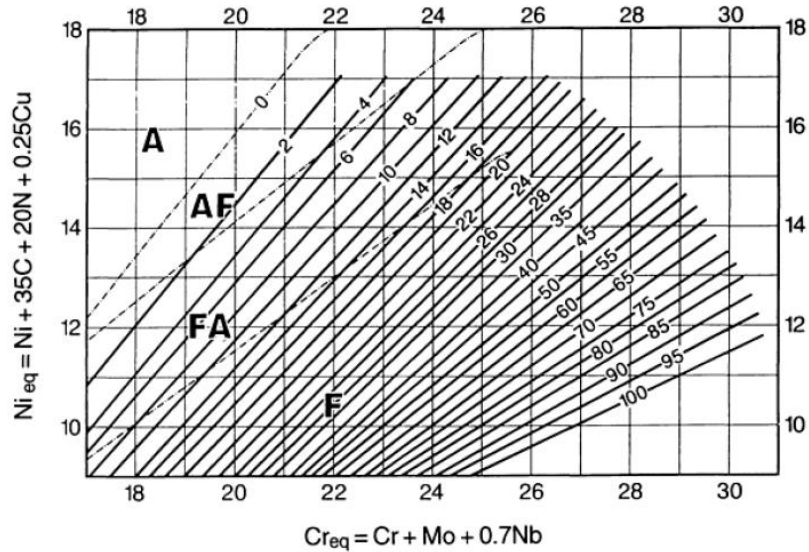
Fuente: ASM Metals Handbook. Welding, brazing and soldering. p. 2028.

En el intervalo desde que apareció por primera vez el diagrama de la WRC-1988, ha sido objeto de considerables evaluaciones y revisiones. Los datos independientes de más de 200 metales de soldadura han confirmado la mejor precisión de predicción de la WRC-1988 sobre la de sus predecesores. El diagrama WRC 1988 predice el contenido de ferrita de la serie 300 convencional de acero inoxidable con un mayor grado de precisión que el diagrama de *DeLong*, es más preciso que el diagrama de *Schaeffler* para predecir el contenido de ferrita de los aceros inoxidables dúplex y es adecuado

para nuevas aleaciones que contienen rangos de composición ampliados. También incluye datos primarios de modo de solidificación para revelar relaciones con la respuesta de FN. Estudios recientes han enfatizado que el modo de solidificación es más preciso que el FN para predecir la resistencia al fisuración en caliente. Estos estudios indican que la estructura de solidificación inicial (austenita primaria o ferrita) determina directamente la sensibilidad al agrietamiento controlando la solubilidad de los elementos que promueven el agrietamiento a estas temperaturas.

En los últimos años, los aceros inoxidable dúplex-ferríticos-austeníticos se han utilizado con más frecuencia. Algunos de estos aceros y sus soldaduras contienen cantidades significativas de cobre (a menudo aproximadamente 2 por ciento en peso). Aunque estas composiciones pueden trazarse en el diagrama WRC-1988, se puede obtener una mayor precisión con el diagrama WRC-1992 modificado. Mientras que el diagrama de *Schaeffler* ofrece predicciones para cromo equivalente de 0 a 40 y níquel equivalente de 0 a 32, el diagrama de WRC-1992 es más limitado, considerando el cromo equivalente de 17 a 31 y el níquel equivalente de 9 a 18. El diagrama WRC-1992 es útil para predecir el FN para juntas metálicas disimiles. (ASM, 2006).

Figura 16. Diagrama WRC-1992



Fuente: ASM Metals Handbook. Welding, brazing and soldering. p.2029.

1.10.5. Procesos de soldadura para aceros inoxidables

Los metales base del acero inoxidable y, por lo tanto, los metales de relleno de soldadura usados con ellos, se eligen casi invariablemente sobre la base de una adecuada resistencia a la corrosión para la aplicación prevista. Esto generalmente significa que el metal de relleno de soldadura debe por lo menos igualar (y a veces superar) el contenido del metal base en términos de elementos de aleación específicos, tales como cromo, níquel y molibdeno.

Después de considerar la resistencia a la corrosión, evitar el agrietamiento se convierte en el tema unificador en la selección de material de relleno y el desarrollo de procedimientos para la soldadura de aceros inoxidables. El agrietamiento puede ocurrir a temperaturas que están justo por debajo de la temperatura de *solidus* de la aleación o las aleaciones que se están soldando. Este agrietamiento en caliente, como se le llama, puede aparecer como grandes grietas de metal de soldadura, generalmente a lo largo de la línea

central de soldadura. Sin embargo, puede aparecer como pequeñas grietas cortas (microfisuras) en el metal soldado o en la zona afectada por el calor (HAZ) en la línea de fusión y, usualmente, perpendicular a ella. La fisuración en caliente en soldaduras de acero inoxidable es de mayor preocupación en los aceros inoxidables austeníticos, aunque puede ocurrir en todo tipo de soldaduras de acero inoxidable.

El agrietamiento también puede ocurrir a temperaturas bastante bajas, típicamente 150 °C o menos, debido a la interacción de altas tensiones de soldadura, metal de alta resistencia e hidrógeno difusible. Esta fisuración en frío ocurre comúnmente en la soldadura de aceros inoxidables martensíticos, así como las zonas afectadas por el calor, incluyendo aquellos de aceros inoxidables endurecidos por precipitación. La fisuración en frío también puede ocurrir en soldaduras ferríticas de acero inoxidable que se han fragilizado por el proceso.

En muchos casos de fisuración en frío, donde la soldadura resultante tiene propiedades aceptables, la sustitución de un metal de aporte austenítico en aceros martensíticos o ferríticos resulta de suma utilidad. Cuando la fisuración en caliente ocurre en un metal de soldadura austenítico, un remedio común es usar un metal de aporte en su mayoría austenítico que incluye una pequeña cantidad de ferrita. Sin embargo, puede ser necesario otro enfoque para evitar la fisuración en caliente en situaciones que requieren baja permeabilidad magnética, alta tenacidad a temperaturas criogénicas, resistencia a los medios que atacan selectivamente la ferrita (como la urea) o tratamientos térmicos posteriores a la soldadura (PWHT), sus requisitos pueden limitar seriamente la cantidad de ferrita que es aceptable. (ASM, 2006).

1.10.5.1. Soldadura de aceros inoxidables austeníticos

Se consideran los más soldables de los aceros de alta aleación y pueden soldarse por todos los procesos de soldadura por fusión y resistencia. Se experimenta relativamente poco problema en la fabricación de juntas soldadas satisfactorias si se consideran debidamente sus características físicas inherentes y sus propiedades mecánicas.

En comparación con el acero dulce, por ejemplo, los aceros inoxidables austeníticos tienen varias características que requieren una revisión de los procedimientos de soldadura que se consideran estándar para el acero dulce. Como se ilustra en la tabla dos, el punto de fusión de los aceros de grado austenítico es menor, por lo que se requiere menos calor para producir la fusión. Su resistencia eléctrica es más alta que la del acero dulce, por lo que se requiere menos corriente eléctrica (ajustes de baja temperatura) para la soldadura. Estos aceros inoxidables también tienen un menor coeficiente de conductividad térmica, lo que provoca una tendencia a que el calor se concentre en una pequeña zona adyacente a la soldadura. Los aceros inoxidables austeníticos también tienen coeficientes de expansión térmica aproximadamente 50 % mayores que el acero dulce, lo que requiere más atención al control de deformación y distorsión.

Una parte importante de la soldadura exitosa de los grados austeníticos, por lo tanto, requiere una selección adecuada de la aleación del metal de aporte y procedimientos de soldadura correctos.

Tabla II. **Tabla comparativa de las características de soldadura del acero inoxidable 304 con acero al carbono**

Comparación de las características de la soldadura de aceros inoxidables 304 con aceros simples al carbono			
	Acero al carbono	Acero inoxidable tipo 304	Características
Punto de fusión °F Aproximado	2800	2550-2650	El acero 304 requiere menos calor para producir la fusión, lo cual significa una soldadura más rápida para la misma o menor cantidad de calor necesaria para la misma velocidad de avance
Resistencia eléctrica (sin aleación) (Microhms-cm, aprox)			Esto es de importancia en los métodos de fusión eléctrica. La alta resistencia eléctrica del acero 304 resulta en la generación de más calor para la misma corriente o el mismo calor con baja corriente, comparado con el acero al carbono. Esto, en conjunto con la baja conductividad térmica, da cuenta de la efectividad de los métodos de soldadura por resistencia en los aceros 304.
A 68 °F	12.5	72	
A 1625 °F	125	126	
Rango de conductividad térmica (comparada en porcentaje)			El acero 304 conduce el calor más lentamente que el acero al carbono, promoviendo gradientes térmicos engañosos. Esto acelera el pandeo, especialmente en combinación con altos rangos de expansión. Una lenta difusión del calor a través del metal base hace que las zonas de la soldadura se mantengan calientes por más tiempo, como resultado puede apreciarse un rango más amplio de carburos precipitados a menos que el exceso de calor sea artificialmente removido por barras frías, entre otros.
A 212 °F	100%	28%	
Sobre 1200 °F	100%	66%	
	Nota: el acero 304 a 212 °F tiene un rango de 9.4 y a 932 °F tiene un rango de 12.4 Btu/ft ² /hr/F/ft		
Coefficiente de expansión calorica por °F sobre el rango indicado	0.0000065 (68-1162 °F)	0.0000098 (68-932 °F)	El acero 304 se contrae a una velocidad mayor que la del acero al carbono, lo que significa que debe permitirse un aumento de la expansión y la contracción para controlar la deformación y el desarrollo de tensiones térmicas en el enfriamiento

Fuente: AISI, NiDI. *Welding of stainless steels and other joining methods*. p.4.

Dos objetivos importantes en la fabricación de juntas de soldaduras en aceros inoxidables austeníticos son: 1) preservación de la resistencia a la corrosión, y 2) prevención de agrietamiento.

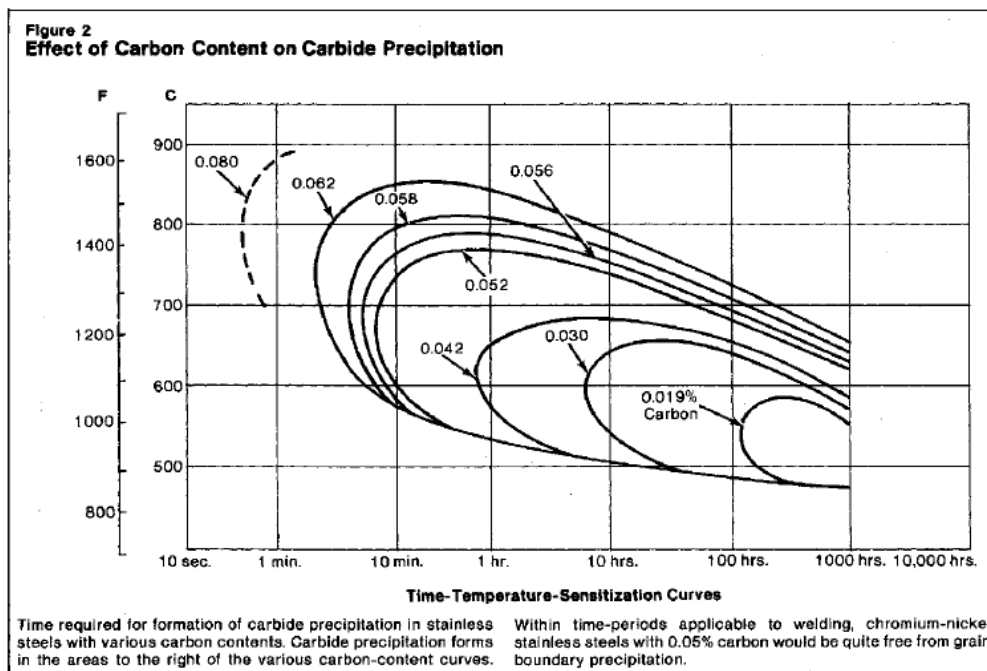
El criterio principal para la selección de un acero inoxidable es normalmente la resistencia a la corrosión y, si bien se da la mayor consideración a la resistencia a la corrosión del metal base, se debe considerar el metal de soldadura y el metal de base inmediatamente adyacente a la zona de soldadura. La soldadura produce naturalmente un gradiente de temperatura en el metal que se está soldando, que va desde la temperatura de fusión del metal de soldadura fundido hasta la temperatura ambiente a cierta distancia de la soldadura.

Una característica de un acero inoxidable austenítico recocido, tal como el tipo 304, es su susceptibilidad a un cambio microestructural importante si se expone a temperaturas dentro de un intervalo aproximado de 425-900 °C. Dentro de esta gama, el cromo y el carbono forman carburos de cromo, y éstos precipitan fuera de la solución sólida en los límites de grano. La rapidez del desarrollo del carburo depende de una serie de factores que pueden ser ilustrados por la tabla tres y la figura diecisiete. La temperatura real del metal entre el rango de 425-900 °C es un factor importante. Los carburos de cromo se forman con la mayor rapidez a aproximadamente 650 °C, y la formación cae a cero en los límites superior e inferior. Otro factor es la cantidad de carbono originalmente presente en el material cuanto mayor es el contenido de carbono, más pronunciada es la acción. El tiempo de permanencia de la temperatura es un tercer factor. El efecto de la precipitación de carburo sobre la resistencia a la corrosión repercute en reducir el cromo disponible para proporcionar resistencia a la corrosión. Sin embargo, el comportamiento de una soldadura de acero inoxidable sensibilizada por soldadura cuando se expone a un ambiente corrosivo es difícil de predecir. La corrosión intergranular no siempre ocurre y hay muchos ambientes en los que el acero inoxidable austenítico sensibilizado está proporcionando un servicio satisfactorio.

Debido a que el contenido bajo de carbono reduce la medida en que ocurre la precipitación de carburos, los grados austeníticos de bajo contenido de carbono pueden ser preferidos para soldaduras que se usan en un servicio altamente corrosivo. Se utiliza ampliamente el tipo 304 con un contenido máximo de carbono del 0,08 por ciento. También están disponibles los tipos de bajo carbono 304L, 316L y 317L con 0,03 por ciento de carbono. Los tipos 321 y 347 contienen titanio y columbio-tantalio, respectivamente, elementos de aleación que tienen una mayor afinidad por el carbono que el cromo, reduciendo así la posibilidad de precipitación de carburo de cromo. Estos tipos

estabilizados están destinados a un servicio de larga duración a temperaturas elevadas en un ambiente corrosivo o cuando los grados de baja emisión de carbono no son adecuados.

Figura 17. **Efecto del contenido de carbono en la precipitación de carburos**



Fuente: AISI, NiDI. *Welding of stainless steels and other joining methods*. p. 6.

La eliminación de los carburos precipitados del tipo 304, con el fin de restablecer la máxima resistencia a la corrosión puede lograrse mediante calentamiento entre 980 a 1177 °C, por encima del intervalo de sensibilización, seguido de enfriamiento rápido. El alivio de tensiones de una soldadura a 815-927 °C no restablecerá la resistencia a la corrosión y, de hecho, puede fomentar la precipitación de carburo en acero inoxidable que no tiene un bajo contenido de carbono o no se estabiliza. La susceptibilidad relativa de varios aceros

inoxidables austeníticos a la sensibilización durante la soldadura se muestra en la tabla tres.

Tabla III. Susceptibilidad relativa de varios grados de acero inoxidable a la sensitización durante la soldadura

Susceptibilidad de varios grados a la sensitización durante la soldadura											
	Grado	Rango de análisis comercial			Susceptibilidad a la formación de carburos intergranulares comparado con el acero 304 (véase la nota 3)			Causa de la diferencia			
		% Cromo	% Níquel	% Carbono	Mayor	Menor	Ninguno	Contenido de carbono existente		Proporción de Cr y Ni al carbono existente	
								Alta	Baja	Alta	Baja
Composición Normal	304	18/20	8/10.5	0.08 max							
	302	17/19	8/10	0.15 max	X			X			X
	301	16/18	6/8	0.15 max	X			X			X
	305	17/19	10.5/13	0.12 max		Nota 1			Usualmente	X	
	308	19/21	10/12	0.08 max		X			La misma	X	
	316	16/18	10/14	0.08 max	Aproximadamente la misma que el acero 304						
	317	18/20	11/15	0.08 max	Aproximadamente la misma que el acero 304						
	309	22/24	12/15	0.20 max				X			Véase Nota 1
	309S	22/24	12/15	0.08 max		X					Véase Nota 1
	310	24/26	19/22	0.25 max	X						
314	23/26	19/22	0.25 max	X							
Composición de extra bajo carbono	304L	18/20	8/12	0.03 max			Nota 4		X	X	
	316L	16/18	10/14	0.03 max			Nota 4		X	X	
Composición estabilizada	347	17/19	9/13	0.08 max			Nota 2				
	321	17/19	9/12	0.08 max			Nota 2				
	309C	22/24	12/15	0.08 max			Nota 2				
	318	17/19	13/15	0.08 max			Nota 2				

Nota 1: Depende del análisis exacto dentro de su amplia gama. El carbono de los aceros del tipo 309, 310 y 314 es usualmente cercano a 0.08% como máximo
Nota 2: la formación de carburos intergranulares se evita por el contenido de agentes estabilizantes.
Nota 3: Temperatura y tiempo a temperatura constante
Nota 4: La formación de carburos se minimiza en gran medida para la soldadura, pero no para el servicio a largo plazo a temperaturas elevadas

Fuente: AISI, NiDI. *Welding of stainless steels and other joining methods*. p.8.

1.10.5.1.1. Agrietamiento por corrosión bajo tensión en aceros inoxidables austeníticos

La posibilidad de agrietamiento por tensión y corrosión es otra razón para el tratamiento térmico post soldadura (PWHT). En el estado de metal soldado, las zonas próximas a la soldadura contienen tensiones residuales que se aproximan al límite de elasticidad del material. Es difícil predecir cuándo un

entorno producirá un agrietamiento por tensión y corrosión y decidir cuanta reducción debe hacerse en la magnitud del estrés residual, para evitar su aparición. La forma para asegurarse contra esta fisuración por corrosión bajo tensión en los aceros inoxidable austeníticos soldados, es recocer los tipos que contienen contenido de carbono regular y aliviar el estrés de los tipos estabilizado y extra bajo de carbono. (AISI, 1988).

1.10.5.1.2. Prevención de la fisuración en aceros inoxidable austeníticos

Se han observado dos formas generales de fisuración en aceros inoxidable austeníticos soldado son:

- En el metal de soldadura durante o inmediatamente después de la soldadura.
- En el metal base cerca de una junta de soldadura.

Las microfisuras pueden desarrollarse en el metal de soldadura depositado poco después de la solidificación, o puede ocurrir en las zonas afectadas por el calor de las gotas previamente depositadas de metal de soldadura. Las grietas en caliente o la microfisuración dieron mucha dificultad hace algunos años, pero hoy se conoce bastante sobre estos problemas de fisuración en caliente, para evitar su ocurrencia en soldaduras.

La microestructura del metal de soldadura afecta fuertemente la susceptibilidad a la microfisuración. El metal de soldadura que tiene una microestructura totalmente austenítica es considerablemente más sensible a las

condiciones que promueven la microfisuración que el metal de soldadura que contiene alguna ferrita delta libre en una matriz austenítica. En consecuencia, siempre que sea posible, se emplea una estructura de soldadura austenítica que contiene ferrita. La selección del metal de relleno y la planificación de un procedimiento de soldadura debe hacerse con cuidado, para asegurar la pequeña, pero importante cantidad de ferrita delta.

Se ha hecho mucho uso del diagrama de *Schaeffler* para determinar si una composición del metal de soldadura especificada contendrá ferrita delta y el porcentaje aproximado.

Un poco de ferrita en un depósito de soldadura de acero inoxidable predominantemente austenítico, tal como el tipo 308, por ejemplo, tiende a eliminar la fisuración en caliente, un fenómeno que puede destruir un producto de otro modo bien diseñado. La industria química, por otro lado, ve a la ferrita en una forma diferente. Una pequeña cantidad de la misma en un depósito de soldadura tipo 316 puede causar serios problemas de corrosión. Así, dependiendo de la naturaleza de la aplicación, la ferrita puede ser buena o mala. La corrosión es un tema complejo, y si la aplicación no es una prueba de tiempo, los expertos deben ser consultados independientemente de si los materiales que contienen ferrita están involucrados.

En cuanto a la cantidad de ferrita que se necesita en un depósito de soldadura para evitar grietas; según el *Welding Research Council*, tanto la ASME como la NRC han adoptado una política de mínimo 5 FN para los consumibles de soldadura que se van a utilizar en los trabajos nucleares y 3 FN como mínimo en cualquier soldadura multipunto para evitar las fisuras. (El lector puede referirse a las siguientes especificaciones de la *American Welding*

Society y las discusiones adjuntas para obtener más información: AWS 5.4-77 y AWS 5.9-77).

1.10.5.2. Consideraciones para el procedimiento de soldadura de aceros inoxidables austeníticos

La pregunta a menudo surge si un acero inoxidable austenítico debe ser precalentado para la soldadura. En general, el precalentamiento no es útil porque no se producen cambios estructurales, como la formación de martensita, en la soldadura o en las zonas afectadas por el calor. En algunos casos, el precalentamiento podría ser perjudicial en el aumento de la precipitación de carburo, o mayor deformación.

Cuando se trata de un metal de soldadura austenítica sensible a las grietas (que normalmente contiene poca o ninguna ferrita), es importante minimizar la cantidad de estrés impuesta a la junta de soldadura, mientras se enfría desde la temperatura a la que comienza la solidificación hasta aproximadamente 980 °C. Las microfisuras debidas al rango de temperatura se forman en los límites de grano del metal de soldadura. Si el nivel de estrés es particularmente alto, las fisuras se propagarán para formar grietas visibles. (AISI, 1988).

1.10.6. Soldadura de aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos se pueden soldar en cualquiera de sus condiciones: recocido, semi-endurecido, endurecido, aliviado de tensión, o templado. Independientemente de la condición previa, la soldadura producirá una zona martensítica endurecida adyacente a la soldadura (donde la temperatura alcanza 815-1010 °C). La dureza de la zona dependerá

principalmente del contenido de carbono y puede ser controlada hasta cierto punto por el procedimiento de soldadura. Se debe reconocer que los gradientes de temperatura agudos, que son acentuados por la baja tasa de conductividad térmica, provocan tensiones intensas debidas tanto a la expansión térmica como a los cambios volumétricos causados por la variación en la estructura cristalina. Su severidad puede ser suficiente para producir fracturas.

Tabla IV. **Aceros inoxidables martensíticos**

ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS																	
Análisis Químico en % (Valores máximos a menos que se indique lo contrario)										Propiedades Mecánicas Nominales (Hojas recocidas a menos que se indique lo contrario)							
Tipo AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Otro	Resistencia a la tensión		Resistencia a la fluencia (0.2% de deformación)		Elongación en 2" (50.8 mm)	Dureza en escala Rockwell	Forma del producto	
										ksi	Mpa	ksi	Mpa				
403	0.15	1	0.04	0.03	0.5	11.5/13.00					70	483	45	310	25	B 80	
410	0.15	1	0.04	0.03	1	11.5/13.50					70	483	45	310	25	B 80	
414	0.15	1	0.04	0.03	1	11.5/13.50	1.25/2.5				120	827	105	724	15	B 98	
416	0.15	1.25	0.06	0.15 (min)	1	12/14		0.6*			75	517	40	276	30	B 82	Barra
416Se	0.15	1.25	0.06	0.06	1	12/14			0.15Se (min)		75	517	40	276	30	B 82	Barra
420	0.15 (min)	1	0.04	0.03	1	12/14					95	655	50	345	25	B 82	Barra
420 F	0.15 (min)	1.25	0.06	0.15 (min)	1	12/14		0.6*			95	655	55	379	22	220 Brinell	Barra
422**	0.20/0.25	1	0.025	0.025	0.75	11/13	0.5/1	0.75/1.25	0.15/0.30 V		145	1000	125	862	18	320 Brinell	Barra
431	0.2	1	0.04	0.03	1	15/17	1.25/2.5				125	862	95	655	20	C 24	Barra
440 A	0.60/0.75	1	0.04	0.03	1	16/18		0.75			105	724	60	414	20	B 95	Barra
440 B	0.75/0.95	1	0.04	0.03	1	16/18		0.75			107	738	62	427	18	B 96	Barra
440 C	0.95/1.20	1	0.04	0.03	1	16/18		0.75			110	758	65	448	14	B 97	Barra

* Puede agregarse a las opciones del fabricante ** Templado y revenido

Fuente: AISI, NiDI. *Welding of stainless steels and other joining methods*. p. 9.

Como grupo, los aceros inoxidables martensíticos (endurecibles por tratamiento térmico) tienen ciertas características a las temperaturas encontradas en la soldadura. Estas características son las siguientes:

- Sus puntos de fusión son aproximadamente 1482 °C, lo que se compara con 1537 °C para el acero dulce. Esto significa que requieren menos calor para su fusión o que se funden más rápido que el acero dulce para la misma tasa de aporte calórico.

- Sus coeficientes de expansión y contracción son aproximadamente iguales o ligeramente menores que el valor correspondiente para el acero al carbono. Esto es en contraste con los grados de cromo-níquel los coeficientes elegidos son alrededor de 45-50 por ciento más alto que el de acero dulce.
- Los coeficientes de conductividad térmica son inferiores a la mitad de los de acero dulce dependiendo de la temperatura. Al respecto, son similares a los grados cromo-níquel.
- Su resistencia al flujo de corriente eléctrica es mayor que la del acero dulce. Por eso, se requiere menos amperaje para su soldadura.

1.10.6.1. Consideraciones para el procedimiento de soldadura de aceros inoxidables martensíticos

El precalentamiento y el control de temperatura entre pasadas son los mejores medios, para evitar el agrietamiento en la soldadura de aceros inoxidables martensíticos. Las temperaturas de precalentamiento empleadas son usualmente del orden de 204 a 315 °C. El contenido de carbono es el factor más importante para establecer si el precalentamiento será necesario.

La siguiente guía puede ser útil para coordinar procedimientos de soldadura en función del contenido de carbono y para acomodar las características de soldadura de los grados martensíticos:

Por debajo de 0,10 por ciento de carbono generalmente no se requiere precalentamiento ni tratamiento térmico después de soldar. De 0,10 a 0,20 por

ciento de carbono - precalentar a 260 °C, soldar y enfriar lentamente. De 0,20 a 0,50 por ciento de carbono precalentar a 260 °C, soldar y tratar térmicamente después de la soldadura. Sobre 0,50 por ciento de carbono precalentamiento a 260 °C, soldadura con alta entrada de calor y tratamiento térmico después de la soldadura.

El post-calentamiento, que debe considerarse siempre como parte integrante de una operación de soldadura sobre los tipos martensíticos, se puede realizar por uno de dos métodos:

- Recocido a 815 °C o más seguido por enfriamiento controlado a 593 °C a una velocidad de 10 °C grados por hora y luego enfriamiento por aire.
- Calentar a 732-760 °C y seguir con los mismos ciclos de enfriamiento como se describe en el primer enunciado.

Si el templado y revenido siguen inmediatamente a la soldadura, el post-recocido puede ser eliminado. De lo contrario, cubra inmediatamente después de la soldadura sin permitir que la pieza se enfríe a temperatura ambiente.

Cuando sea permisible, el uso de acero inoxidable austenítico como metal de aporte, ayudará a prevenir las soldaduras quebradizas. Se deposita un cordón de soldadura dúctil, por supuesto, no se eliminará el endurecimiento del metal en el HAZ.

1.10.7. Soldadura de aceros inoxidable ferríticos

Los aceros inoxidable ferríticos son también aleaciones de cromo directo en la serie AISI 400 con una microestructura, en estado recocido, que consiste en ferrita y carburos. También son magnéticos. Al calentar la mayoría de los tipos ferríticos por encima de una temperatura crítica, la estructura se convierte en austenítica, que al enfriarse puede transformarse parcialmente en martensita, (pero no lo suficiente para impartir alta resistencia). Por consiguiente, los aceros inoxidable ferríticos se consideran no endurecibles por tratamiento térmico. También, habrá una tendencia a que los granos de ferrita aumenten de tamaño.

Estas dos características estructurales, a) formación de martensita y b) crecimiento del grano, resultan en una reducción de ductilidad y tenacidad. También, el enfriamiento rápido de temperaturas por encima de 370 °C, puede causar precipitación intergranular (similar a la precipitación de carburo en los aceros inoxidable austeníticos) que resulta en resistencia reducida a la corrosión. Por consiguiente, los aceros inoxidable ferríticos numerados con AISI no se consideran atractivos desde el punto de vista de la soldabilidad.

Tabla V. **Aceros inoxidables ferríticos**

ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS																
Análisis Químico en % (Valores máximos a menos que se indique lo contrario)										Propiedades Mecánicas Nominales (Hojas recocidas a menos que se indique lo contrario)						
AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Otro	Resistencia a la tensión		Resistencia a la fluencia (0.2% de deformación)		Elongación en 2" (50.8 mm)	Dureza en escala Rockwell	Forma del producto
										ksi	Mpa	ksi	Mpa			
405	0.08	1	0.04	0.03	1	11.5/14.5			0.10/0.3 Al	65	448	40	276	25	B 75	
409	0.08	1	0.045	0.045	1	10.5/11.75			6xC/0.75 Ti	65	448	35	241	25	B 75	
429	0.12	1	0.04	0.03	1	14/16				70	483	40	276	30	B 80	Placa
430	0.12	1	0.04	0.03	1	16/18				75	517	50	345	25	B 85	
430 F	0.12	1.25	0.06	0.15 (min)	1	16/18		0.60*		95	655	85	586	10	B 92	Cable
430 FSe	0.12	1.25	0.06	0.06	1	16/18			0.15 Se (min)	95	655	85	586	10	B 92	Cable
434	0.12	1	0.04	0.3	1	16/18		0.75/1.25		77	531	53	365	23	B 83	
436	0.12	1	0.04	0.3	1	16/18		0.75/1.25	5xC/0.70	77	531	53	365	23	B 83	
442	0.2	1	0.04	0.3	1	18/23				80	552	45	310	20	B 90	Barra
446	0.2	1.5	0.04	0.03	1	23/27			0.25 N	80	552	50	345	20	B 83	

Puede agregarse a las opciones del fabricante

Fuente: AISI, NiDI. *Welding of stainless steels and other joining methods*. p.10.

1.10.7.1. Preservación de la resistencia a la corrosión de aceros inoxidables ferríticos durante la soldadura

Aunque los fabricantes prefieren mucho evitar el tratamiento térmico posterior a la soldadura, esta operación puede ser vital bajo ciertas circunstancias para asegurar una adecuada resistencia a la corrosión o propiedades mecánicas. La temperatura usual de recocido es 788 °C. El tiempo a la temperatura depende de la masa involucrada y puede variar desde sólo unos pocos minutos para la chapa de calibre delgado a varias horas, para la chapa gruesa.

El enfriamiento de los aceros inoxidables ferríticos, a partir de la temperatura de recocido puede hacerse mediante enfriamiento con aire o agua. A menudo las partes se dejan enfriar al horno hasta aproximadamente 593 °C,

seguido de enfriamiento rápido. Debe evitarse el enfriamiento lento a través de un rango de temperatura de 565 °C a 400 °C, ya que induce la fragilidad a temperatura ambiente.

Además, las modificaciones al acero en forma de adiciones de titanio o columbio ayudan a reducir la cantidad de precipitación intergranular.

1.10.7.2. Consideraciones para el procedimiento de soldadura de aceros inoxidables ferríticos

Aunque existe poco peligro de endurecimiento excesivo en la HAZ durante la soldadura de aceros inoxidables ferríticos, hay una consideración para usar el precalentamiento. Las secciones más gruesas (aproximadamente 1/4 de pulgada de espesor y más gruesas) están en mayor peligro de agrietamiento durante la soldadura. Sin embargo, el diseño de la soldadura, la sujeción proporcionada por el apriete, el tipo de junta, la temperatura ambiente, el proceso de soldadura a utilizar y la secuencia de soldadura pueden tener casi tanta influencia como el espesor del material. En la práctica, se utiliza un rango de temperatura de precalentamiento de 150-232 °C, para secciones más gruesas. Este punto debe ser explorado en el desarrollo prudente de cualquier procedimiento de soldadura.

Para los grados ferríticos bajos en carbono o estabilizados, el uso del precalentamiento es usualmente indeseable para secciones delgadas, de menos de 1/4 de pulgada de grosor (AISI, 1988).

1.11. Soldadura de aceros disimiles

La soldadura de aceros inoxidable austeníticos disimilares entre sí es una práctica bastante común. Cuando se emplean procedimientos de soldadura adecuados y metales de aportación, la mayoría de los aceros inoxidable austeníticos también pueden soldarse satisfactoriamente a varias otras clases de acero soldable, incluyendo aceros inoxidable endurecibles ferríticos y de precipitación, aceros al carbono y aceros de baja aleación.

Como regla general, el metal de soldadura debe ser al menos igual en propiedades de resistencia y corrosión al componente más pobre de la junta. Además, no debe haber compuestos intermetálicos u otras fases para degradar las propiedades del metal de soldadura, la microestructura debe ser resistente al agrietamiento. Se ha demostrado que una microestructura austenítica con un número de ferrita (FN) de 5 a 10 es altamente resistente al agrietamiento. Si se produce un metal de soldadura totalmente austenítico, se puede lograr una resistencia satisfactoria a la fisuración en ciertas aplicaciones usando un metal de aporte de alto contenido de manganeso o una aleación de base de níquel. (ASM, 2006).

1.11.1. Cuidados con la soldadura de aceros disimiles

La soldadura de metales disimiles se refiere a la unión de dos materiales de diferente aleación, o composición química. En realidad, todas las soldaduras de fusión son soldaduras de metal disimilares (DMWs), debido a que los metales que se unen tienen una estructura forjada y las soldaduras tienen una estructura fundida. Frecuentemente, el metal de aportación de composición de adaptación se altera deliberadamente del de las aleaciones de base.

Para esta discusión una soldadura de metal disimilar será la que existe entre los metales de dos sistemas de aleación diferentes.

En este asunto, las industrias de procesos químicos pueden aprender algo de la industria eléctrica. Una aplicación de DMW muy común es la unión de tubos ferríticos a tubos de caldera austeníticos tales como 304H o un acero inoxidable austenítico similar.

En la soldadura de metal disimilar, las propiedades de tres metales deben ser consideradas; Los dos metales unidos y el metal de relleno utilizado para unirlos. Por ejemplo, si uno de los metales que se unen se suelda usando precalentamiento cuando se suelda a sí mismo, se debe usar precalentamiento en la fabricación de un DMW. Otra variable podría ser el control de entrada de calor. En ocasiones puede haber un conflicto en que el control óptimo para un metal es indeseable para otro. En este caso, se necesita un compromiso. Esta es una razón por la que el desarrollo de un procedimiento DMW a menudo requiere más estudio que para un procedimiento de soldadura de metal similar convencional (AISI, 1988).

1.11.1.1. Determinación de la composición de la soldadura en uniones disimiles

Es necesario conocer la composición aproximada del metal de soldadura antes que se pueda predecir el rendimiento del servicio. La tabla enumera tres métodos para determinar la composición del metal de soldadura junto con ventajas y limitaciones. La técnica para el método 1 es obvia: el metal se retira de la soldadura y se realiza un análisis. El método 2 se aproxima a la dilución de soldadura por medición de área, como se muestra en la figura. El método 3

utiliza los siguientes porcentajes de dilución de metal base para algunos de los procesos de soldadura más comunes:

- SMAW (electrodo cubierto): dilución de 20 a 25 %.
- GMAW (arco de pulverización): dilución de 20 a 40 %.
- GTAW: dilución de 20 a 50 %.
- SAW (arco sumergido): dilución de 20 a 50 %.

Tabla VI. **Determinación de la composición de las soldaduras disimiles en acero**

Determinación de las composiciones de soldaduras de metales disimiles		
MÉTODO	VENTAJAS	LIMITACIONES
1. Análisis químico de la soldadura	Determinación más precisa	Consume tiempo costoso
2. Aproximación de la dilución del metal base por sección de soldadura y composición calculada	Menos costosos y generalmente más corto que el análisis químico	Estimar el porcentaje a menudo es difícil en las soldaduras, por ejemplo las soldaduras multi pasadas
3. Cifras aproximadas de dilución para procesos comunes de soldadura y composición calculada	Es una forma muy rápida de estimar la composición en "bruto". No hay trabajo de laboratorio involucrado	La técnica de soldadura puede tener una fuerte influencia de dilución en algunos procesos, por ejemplo GMAW y GTAW

Fuente: Avery, R. *Guidelines for welding dissimilar metals*. p. 4.

Las cifras son aproximadas, porque la técnica de soldadura tiene una fuerte influencia en la dilución, particularmente con GTAW. La dilución en el

proceso de SMAW es más predecible, lo cual es una ventaja en la fabricación de DMWs.

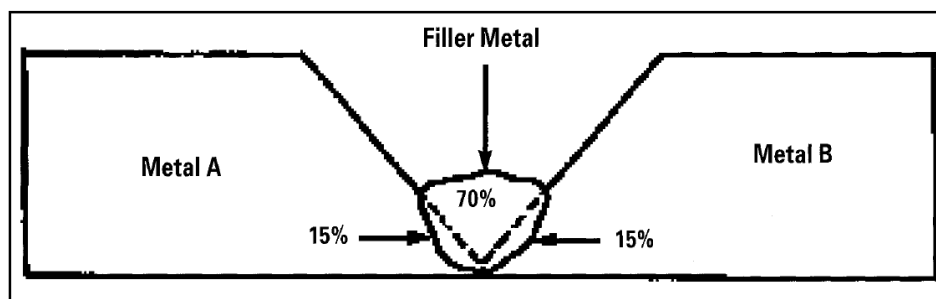
Cuando la cantidad de dilución del metal base se determina mediante el método 2 o 3 de la tabla, el porcentaje medio de un elemento específico, X, se determina mediante la siguiente fórmula.

En este ejemplo, la dilución es del 15 % de cada metal base A y B, mientras que el metal de aportación aporta el 70 % del volumen de soldadura.

$$X_x = (X_A)(0.15) + (X_B)(0.15) + (X_F)(0.70)$$

Donde X_x es el porcentaje medio del elemento X en el metal de soldadura, X_A es el porcentaje del elemento x en el metal base A, X_B es el porcentaje del elemento X en el metal base B y X_F es el percibimiento del elemento X en el metal de aportación F.

Figura 18. **Cordón de soldadura con 30 % de metal diluido**



Fuente: Avery, R. *Guidelines for welding dissimilar metals*. p.5.

Los cálculos se hacen normalmente sólo para constituyentes de aleaciones importantes, por ejemplo, hierro, cromo, níquel, cobre y molibdeno, mientras que los elementos tales como carbono o manganeso rara vez figuran. El carbono es un factor importante en la soldabilidad de las aleaciones de base de hierro, pero no tiene mayor importancia en un DMW que en la soldadura de metales similar. En otras palabras, se supone que ambos metales en un DMW son básicamente soldables.

Tabla VII. **Límites aproximados de elementos diluidos en soldadura**

Límites aproximados de elementos diluyentes en soldaduras*				
Metal de soldadura	Hierro	Níquel	Cromo	Cobre
Níquel	30%		30%	Ilimitado
Níquel-Cobre	2.5% SMAW	Ilimitado	8%	Ilimitado
	15% GMAW			
Ni-Cr-Fe**	25%	Ilimitado	30%	15%
Cobre-Níquel	5%	Ilimitado	3-5%	Ilimitado
* Los valores límite deben ser tratados unicamente como guías. Los límites absolutos son influenciados por el proceso de soldadura, restricciones de la soldadura y pequeñas variaciones en la composición del metal de aporte				
** El silicio puede ser menor que 0.75% en la soldadura				

Fuente: Avery, R. *Guidelines for welding dissimilar metals*. p.8.

Una DMW correctamente diseñada hace coincidir las propiedades de soldadura con las condiciones de servicio. Algunas de las más importantes a considerar son las propiedades mecánicas y físicas y la resistencia a la corrosión / oxidación de la soldadura.

El metal de soldadura debe ser igual o más fuerte que el material más débil unido, aunque el código de la sociedad americana de ingenieros mecánicos (ASME) permite una resistencia de la soldadura del 95 % en algunos casos. La ductilidad comparable a los metales que se unen es deseable, pero no siempre es posible.

Es deseable que las propiedades físicas del metal de soldadura sean similares a las de los metales base. En las juntas que son expuestas a ciclos de calor, una mala coincidencia en el coeficiente de expansión térmica puede conducir a un fallo de fatiga térmica temprana.

La soldadura debe tener resistencia a la corrosión y oxidación igual al metal base menos resistente que se une. Cuando una DMW está en un ambiente donde el líquido puede ser un electrolito, el metal de soldadura debe ser catódico (el más resistente a la corrosión) que ambos metales base. Si la soldadura es anódica (menos resistente a la corrosión), puede sufrir corrosión galvánica acelerada. (Avery, 1991).

1.11.2. Combinaciones de soldaduras disimiles

Níquel y aleaciones de níquel se sueldan fácilmente a la mayoría de los metales utilizados comercialmente. Excepciones son la soldadura por fusión al aluminio, titanio, y la mayoría de los metales y aleaciones refractarias. A continuación, se expresan las soldaduras disimiles más comúnmente aplicadas en la industria de la unión de aceros.

Soldadura de acero y acero inoxidable por debajo de 450 °C: Estos son probablemente los DMW más frecuentes en la industria, con la posible excepción de las soldaduras de tubos de calderas. En el desarrollo de un

procedimiento de DMW, es importante tener en cuenta los parámetros de soldadura normalmente utilizados para cada uno de los metales que se unen de modo que los que son apropiados se incluyen en el procedimiento de soldadura. (Avery, 1991).

1.11.2.1. Consideraciones adicionales para la soldadura de aceros al carbono y de baja aleación

Una guía simple en la elaboración de DMWs es usar los mismos parámetros tales como precalentamiento, la temperatura entre pasadas, entrada de calor, tratamiento térmico post soldadura, etc. que se usan en aleaciones de soldadura para sí mismos. Algunos de estos controles son los siguientes:

- Los aceros al carbono con menos del 0,20 % de carbono pueden soldarse normalmente con aportes austeníticos sin precalentamiento, pero cuando el carbono es superior al 0,30 % es necesario controlar la temperatura. A medida que aumenta el contenido de aleación, es decir, en el caso de aceros de baja aleación, el control de precalentamiento es usualmente esencial.
- Los electrodos austeníticos recubiertos o los hilos fundentes deben tener un bajo contenido de humedad para prevenir los defectos asociados al hidrógeno en las HAZ de baja aleación. Los niveles de humedad del recubrimiento aceptables para soldar aleaciones austeníticas pueden causar problemas relacionados con el hidrógeno, tales como la fisuración intergranular en el HAZ de un acero de baja aleación. Los electrodos se

pueden volver a calentar de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes para reducir la humedad.

- Las juntas de alta restricción son susceptibles de agrietamiento a menos que se utilice precalentamiento. El grado de restricción varía con el diseño de la junta y el grosor del metal. Sobre una superficie de aproximadamente 1 1/4 de pulgada. (32 mm) puede ser altamente restringido y generalmente requiere precalentamiento.
- Cuando se necesita un precalentamiento, una temperatura de 150 °C suele ser adecuada con 205 °C usada en condiciones severas. Una vez terminado, la soldadura debe enfriarse lentamente para permitir que el hidrógeno se difunda desde la HAZ.

1.11.2.2. Consideraciones adicionales con la soldadura de los aceros inoxidables

Como con la soldadura de acero inoxidable a sí misma, la buena práctica incluye elementos tales como limpieza adecuada antes de la soldadura, buen ajuste, y gases de protección adecuados. Otras consideraciones incluyen las siguientes:

- Los tratamientos térmicos posteriores a la soldadura, como el alivio de tensiones a 593-705 °C, son a menudo beneficiosos en la mejora de las propiedades de la HAZ en los aceros ferríticos. Este tratamiento térmico puede, sin embargo, reducir la resistencia a la corrosión y afectar negativamente a las propiedades mecánicas de muchos grados estándar de acero inoxidable.

- Calentar los aceros inoxidable no estabilizados que tienen un contenido de carbono de 0,03 por ciento o superior pueden reducir significativamente la resistencia a la corrosión intergranular. Si el tratamiento térmico es una necesidad y la resistencia total a la corrosión del acero inoxidable austenítico es necesario, los tipos de aceros estabilizados al titanio, al columbio o los grados de bajo carbono pueden ser utilizados (menos 0,03 por ciento de carbono).

1.11.3. Selección del metal de aporte para soldaduras de aceros disimiles

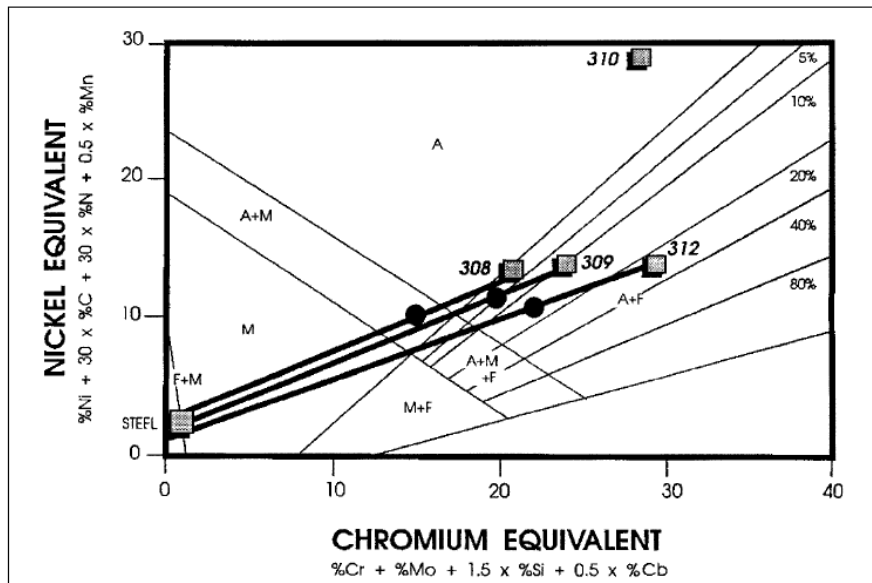
Una de las combinaciones de DMW más comunes es el acero inoxidable tipo 304 a un acero dulce de bajo carbono. El tipo 308, el metal de relleno estándar para la soldadura del acero tipo 304 específicamente, no debe ser utilizado para hacer esta soldadura. Algunas soldaduras de tipo 308 pueden ser satisfactorias, pero eventualmente habrá problemas de calidad, debido a la dilución de hierro.

Se debe usar un metal de aporte de aleación superior tal como el tipo 309 con un número de ferrita (FN) superior a 10 o el acero tipo 312 con un FN superior a 25. El efecto de la dilución en una soldadura de acero inoxidable austenítico se puede ilustrar usando el diagrama de WRC 1988 de la figura. La estructura de una soldadura de acero inoxidable puede ser completamente austenítica, tal como el tipo 310, o contener cantidades variables de ferrita delta, como con los tipos 308, 309 o 312. La cantidad de ferrita viene determinada por la composición y las tasas de enfriamiento de la soldadura, cuanto mayor sea la rapidez de enfriamiento, mayor será el contenido de ferrita. Las soldaduras totalmente austeníticas son más susceptibles a la fisuración en

caliente que las soldaduras que contienen aproximadamente un 5 % o más de ferrita.

La figura diecinueve también muestra que la martensita (M) puede formarse a medida que se reducen los equivalentes de níquel y cromo. La martensita es una fase dura, de baja ductilidad, propensa a defectos relacionados con el hidrógeno. En DMWs, es mejor evitar la martensita. Si el metal de relleno tipo 308 se diluye en un 25 % con acero dulce, el metal de soldadura se encuentra en el área de fase austenita-martensita (A + M) de la figura. Los electrodos de los tipos 309 y 312 tienen más níquel y cromo y cuando están diluidos con acero al carbono están todavía en el área de fase de austenita-ferrita (A + F) y mantienen una excelente resistencia a la fisuración.

Figura 19. Uso del diagrama de Schaeffler



■ Figure 2. Effect of 25% mild steel dilution types 308, 309, and 312 weld metals. Structure of the diluted 308 is austenite and martensite while 309 and 312 austenite and ferrite.

Fuente: Avery, R. *Guidelines for welding dissimilar metals*. p.6.

Mientras que los tipos 309 y 312 son ahora ampliamente utilizados para DMWs, el tipo 310 tiene una larga historia de uso en soldadura de metal disimilar y para soldar metales difíciles incluyendo aleaciones de alto endurecimiento tales como aceros para herramientas. Las soldaduras tipo 310 a menudo han dado un servicio excelente a pesar de pequeñas fisuras detectables por la prueba de líquidos penetrantes. Una precaución en el uso de 310 para aceros no revenidos que contienen 0,07-0,15 por ciento de fósforo es el probable agrietamiento del metal de soldadura. Los metales de relleno tipo 309 o 312 pueden tolerar mejor este nivel de fósforo y deben utilizarse.

Cuando las temperaturas de servicio están por encima de 427 °C, el metal de aporte ideal es un metal de níquel-cromo o de níquel-cromo-hierro, tal como lo describe la AWS A5.14 clase ERNiCr-3 un electrodo desnudo, o ya sea AWS A5.11 clase ENiCrFe-2 o Clase ENiCrFe-3 también del tipo electrodo. Las soldaduras de aleación de níquel tienen un coeficiente de dilatación térmica (COE *Coefficient of thermal Expansion*) entre el acero ordinario y el acero inoxidable austenítico. Con las soldaduras de tipo 309 y 312 que poseen un COE más alto, existe una alta concentración de esfuerzos en la línea de fusión del lado del acero que, durante el ciclo térmico, propicia a fallos de fatiga térmica.

Otra precaución en el uso de metales de aporte de acero inoxidable se produce cuando el metal soldado es tratado térmicamente entre 593-705 °C. Las soldaduras que contienen cantidades más altas de ferrita delta, por ejemplo, el tipo 312 (FN más de 25) o tipo 309 (FN más de 10), pueden perder la ductilidad a la temperatura ambiente y sufrir una resistencia a la corrosión reducida como resultado de la formación de la fase sigma en este intervalo de temperaturas. Si se requiere un tratamiento térmico post-soldadura en este intervalo, un metal de soldadura de composición de baja ferrita reduce la

probabilidad de formación de la fase sigma (compuesto intermetálico constituido principalmente por hierro y cromo propio de aparecer en los aceros inoxidables). Otro método consiste en que "se unte" sobre la primera pasada (superficie por soldadura superpuesta) del lado ferrítico con el tipo 309 seguido por el tratamiento térmico para el lado ferrítico. La soldadura a tope se hace entonces utilizando una carga convencional tal como el tipo 308, una alternativa es un metal de aporte de aleación de níquel que no está sujeto a la formación de fase sigma.

1.12. Procedimiento para soldaduras de aceros disimiles

A medida que se desarrollan nuevos materiales de ingeniería es importante desarrollar los métodos y materiales para soldarlos. Los metales de soldadura austeníticos se utilizan frecuentemente para unir varios materiales de ingeniería y por una diversidad de razones. Los consumibles austeníticos han sido ampliamente utilizados para formar el metal de soldadura de transición en juntas de aleaciones ferrosas disímiles, para unir acero inoxidable, en reparación de soldadura, en recubrimientos duros y en revestimientos resistentes a la corrosión. Si se alea apropiadamente, el metal de soldadura austenítico es fuerte, dúctil, resistente a la fisuración en caliente y capaz de retener contaminantes potencialmente molestos en solución sólida. El alambre consumible austenítico se forma fácilmente en frío, facilitando su producción. Pero algunas composiciones austeníticas se caracterizan por un alto coeficiente de dilatación térmica que a menudo conduce al desarrollo de altas tensiones residuales en la soldadura. Las microestructuras de metal de soldadura basadas en composiciones de metal de soldadura austeníticas tradicionales pueden predecirse, a partir de diagramas empíricos, tales como el diagrama de *Schaeffler*. Sin embargo, surgen dificultades cuando la composición de metal de soldadura se extiende más allá del intervalo de aplicación de las relaciones

empíricas originales. Esta situación es, por ejemplo, cuando el diagrama de *Schaeffler* se aplica para soldar metal de una historia térmica diferente, o de una concentración de cromo muy diferente a la del estudio original. (Olson, 1984).

1.12.1. Soldadura de aceros inoxidables austeníticos disimiles

En general, la composición de metal de soldadura depositada debe coincidir casi con la composición de metal base cuando se sueldan diferentes aceros inoxidables austeníticos. Sin embargo, no es infrecuente soldar diferentes aceros inoxidables austeníticos, tales como los tipos 304 y 347, entre sí o una aleación de base de níquel usando un metal de aportación que difiere en la composición química de ambos metales básicos siempre que el metal de soldadura tenga una adecuada resistencia a la corrosión o propiedades mecánicas (o ambas) para el servicio requerido. Generalmente, el metal de aporte alternativo debe estar más aleado que el metal base, pero el contenido de ferrita del metal de soldadura resultante debe considerarse para corrosión o servicio a alta temperatura. Algunos metales de aportación pueden dar un contenido de ferrita demasiado alto, en particular los tipos de alto cromo y bajo níquel, tales como el tipo 312. Los materiales de aporte para la soldadura de aceros inoxidables austeníticos diferentes se dan en la tabla (ASM, 2006).

Tabla VIII. **Metales de aporte de acero inoxidable para la soldadura disímil o similar de aceros inoxidables austeníticos**

Metales Base	201, 202, 301, 302, 302B, 303, 304, 305, 308	304L	309 309S	310 310S 314	316	316L	317	317L	321 347 348	330
201, 202, 301, 302, 302B, 303, 304, 305, 308		E308 *	E308 *	E308 *	E308 *	E308 *	E308 *	E308 *	E308 *	E309
340L		E308L	E308 *	E308 *	E308 *	E308 *	E308 *	E308 *	E308 *	E309
309, 309S			E309	E309	E309	E309	E309	E309	E309	E309
310, 310S, 314				E310	E316**	E316**	E317	E317	E308 *	E310
316					E316**	E316**	E316**	E316**	E316L	E309 Mo
316L					E316L	E316**	E316L	E316L	E308 *	E309 Mo
317							E317	E317	E308L	E309 Mo
317L								E417L	E347*	E309 Mo
321, 347, 348										E309
330										E330

* Para servicio a temperaturas menores a 370 °C, el electrodo E308L puede ser usado
** Para servicio a temperaturas menores a 370 °C, el electrodo E316L puede ser usado

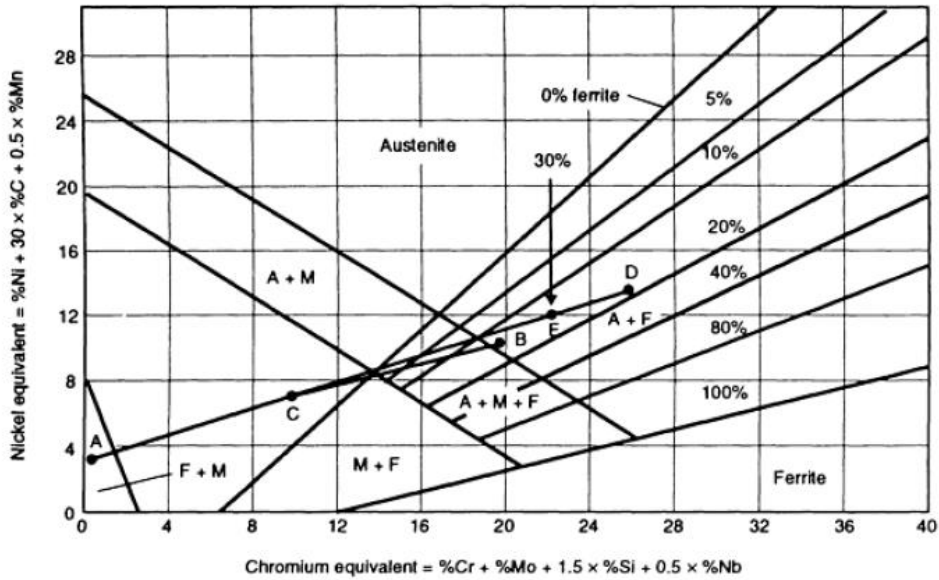
Fuente: ASM Metals Handbook. *Welding, brazing and soldering*. p. 1280.

1.12.2. Soldadura de aceros inoxidables austeníticos con aceros al carbono o de baja aleación

Al unir acero inoxidable austenítico con acero al carbono o acero de baja aleación para aplicaciones de servicio que impliquen exposición a temperaturas que no excedan 370 ° C, es una buena práctica usar un metal de aporte de acero inoxidable con un contenido de aleación total lo suficientemente alto como para prevenir la formación de martensita en la soldadura después de la dilución por el metal base y para preservar cantidades residuales de ferrita para minimizar la posibilidad de fisuración en caliente resultante de la soldadura bajo restricción severa. La dilución es el cambio en la composición química de un metal de relleno de soldadura causado por la mezcla del metal de base o metal de soldadura depositado previamente en el cordón de soldadura depositado. Normalmente se mide por el porcentaje de metal de base o metal de soldadura previamente depositado en el cordón de soldadura.

El diagrama de *Schaeffler* es particularmente útil cuando se examina qué metal de aportación es adecuado para unir metales diferentes. El ejemplo de la figura veinte muestra la unión de un acero al carbono (punto A) a un acero inoxidable austenítico tipo 304 (punto B) utilizando el tipo 309 como metal de aportación (punto D). El punto C muestra cuál sería la composición del metal de soldadura si estos elementos estuvieran unidos sin un metal de aporte. Si asumimos que cada metal base está fusionado en la misma extensión, el punto C estará a medio camino entre A y B. Debido a que la soldadura se hace usando metal de aporte tipo 309, la composición del metal de soldadura estará a lo largo de la línea CD, dependiendo del grado de dilución. En el punto E se obtiene una composición de metal de soldadura adecuada, es decir, una estructura austenítica con 8 a 9 % de ferrita (FN). Este metal de soldadura será resistente a las grietas, en contraste con eso obtenido en el punto C, que es muy sensible al agrietamiento, debido a la formación de martensita. Los metales de relleno de los tipos 309 y 309L (25Cr-12Ni) son los más utilizados para unir acero al carbono o de baja aleación a acero inoxidable austenítico; Que normalmente contiene alrededor de 8 a 15 FN. Los tipos 304Cb, 309Mo, 309L Mo y 312 (29Cr-9Ni) son progresivamente más ferríticos. También se obtienen soldaduras satisfactorias con metal de relleno de níquel-cromo-hierro y estos metales de aportación permiten que la temperatura de servicio supere los 370 ° C y minimicen algunos problemas de alivio de tensiones.

Figura 20. **Aplicación y uso del diagrama de Schaeffler**



Fuente: ASM Metals Handbook. Welding, brazing and soldering. p. 1281.

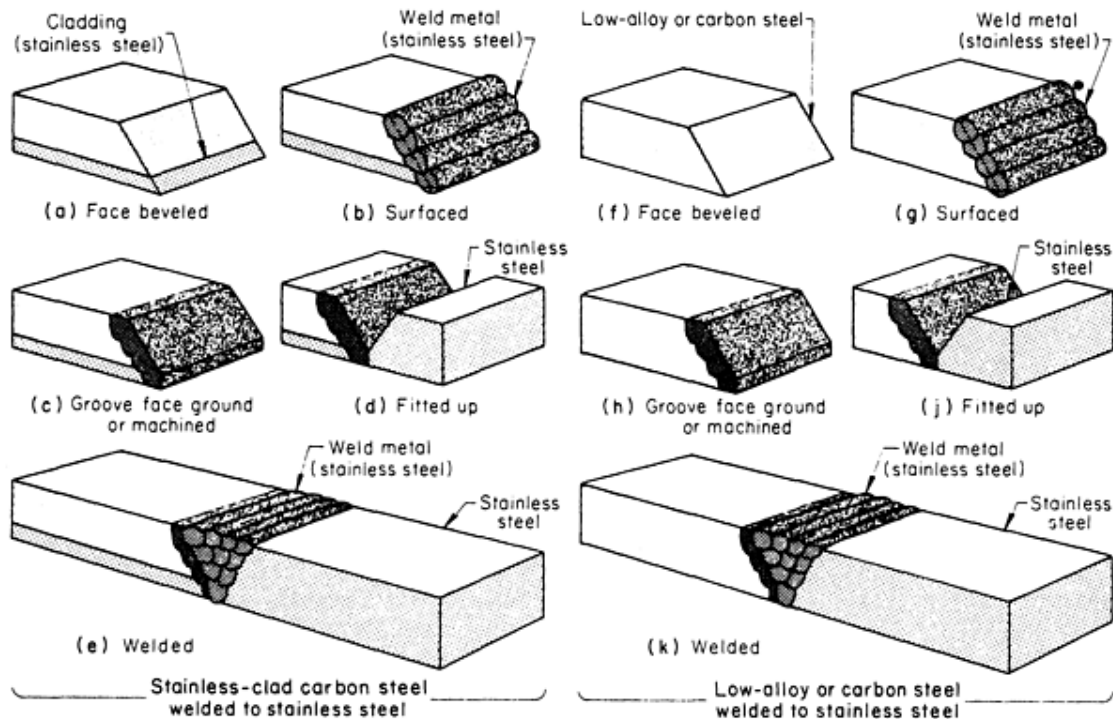
Al unir acero inoxidable austenítico a acero al carbono, es una buena práctica que al acero al carbono se le aplique en la primera superficie, o se "unte", con una capa de tipo 309 u otro metal de soldadura de acero inoxidable adecuado, de manera que la porción de la soldadura (sobre el acero al carbono) donde las dificultades tienen más probabilidades de ocurrir se deposita con metal de aporte de acero inoxidable mientras que hay poca restricción en el metal de soldadura. De este modo, después de la deposición e inspección de la superficie untada, la unión entre el elemento de acero inoxidable y la capa de superficie se convierte en una junta de inoxidable a inoxidable que se puede soldar usando un metal de relleno de acero inoxidable convencional. La deposición de acero al carbono o metal de aportación de acero de baja aleación sobre acero inoxidable austenítico debe evitarse siempre que sea posible, ya que puede dar lugar a depósitos de soldadura duros y quebradizos.

Un procedimiento para unir acero inoxidable a acero al carbono o, acero inoxidable a acero al carbono revestido de acero inoxidable, se muestra en la figura. Este procedimiento es ampliamente utilizado en la soldadura de tuberías de acero inoxidable a acero al carbono, a acero de baja aleación, y a acero al carbono revestido de inoxidable.

En la figura veintiuno, es posible apreciar los procedimientos para juntar acero inoxidable austenítico a acero al carbono revestido de inoxidable, acero al carbono y acero de baja aleación. Los bordes de acero revestido de inoxidable, acero de baja aleación, o de acero al carbono son biselados para la soldadura (A y F). Una superficie (o capa "untada") del metal de aporte de acero inoxidable se aplica al borde biselado (B y G). La capa es maquinada o aplanada a las dimensiones requeridas y se le alivia las tensiones, si se requiere (C y H). Los componentes están ajustados para la soldadura (D y J). La soldadura se completa utilizando el metal de aporte utilizado normalmente para la soldadura del acero inoxidable o el que se utiliza para el paso de superficie en acero inoxidable sobre el acero revestido de inoxidable, el acero al carbono o acero de baja aleación (E y K).

Al depositar la capa superficial, la dilución del metal de soldadura de acero inoxidable para acero al carbono, que puede causar el agrietamiento de la soldadura, puede minimizarse con las siguientes prácticas. Si el revestimiento en acero inoxidable es de acero inoxidable tipo 304, se deben utilizar los tipos 309 y 309 L para la capa de revestimiento. Después de depositar la capa de revestimiento, el componente es aliviado de estrés, si es necesario. La soldadura final entre el acero inoxidable sólido y el acero recubierto de acero inoxidable o acero al carbono revestido puede realizarse con el metal de aportación normalmente empleado para soldar el elemento de acero inoxidable sólido o con el que se utilizó para el revestimiento.

Figura 21. **Procedimiento para la unión de aceros inoxidables austeníticos con aceros al carbono**



Fuente: *ASM Metals Handbook. Welding, brazing and soldering.* p. 1282.

En otro método, un miembro corto de la transición del acero inoxidable se suelda al acero al carbono o del miembro del acero recubierto de inoxidable antes del alivio de tensiones y de la soldadura final. Este método asegura la protección del metal base de acero al carbono del efecto de la soldadura final, y el alivio de tensiones se puede hacer mientras hay poca restricción en la junta. Este método, sin embargo, es más costoso que el procedimiento para producir una capa superficial.

En un tercer método, la interfaz de la pieza de trabajo (acero inoxidable y acero al carbono o acero inoxidable y acero al carbono revestido de acero

inoxidable) debe estar biselado y ajustado, dejando una abertura de raíz en la junta que luego se suelda con un metal de aportación de aleación suficientemente alta, para evitar el agrietamiento de la soldadura después de la dilución por el acero al carbono. El procedimiento de soldadura debe ser controlado para mantener la penetración al mínimo. Una desventaja de este método es que la junta está bajo sujeción, tanto durante la soldadura como en el alivio local del esfuerzo. Aunque a menudo se utiliza, este método es el menos deseable de los tres. (ASM, 2006).

1.12.3. Soldadura de aceros inoxidables ferríticos y martensíticos con aceros al carbono y aceros de baja aleación

Al soldar acero inoxidable ferrítico o martensítico a acero al carbono o acero de baja aleación para servicio general (no servicio a alta temperatura), el uso de acero inoxidable austenítico o de base níquel (NiCrFe) puede producir soldaduras de calidad adecuada si los procedimientos de soldadura correctos son seguidos. (Si no se puede utilizar un acero inoxidable austenítico o un metal de relleno NiCrFe, normalmente se especifica un metal de aportación similar al metal base de acero inoxidable). Se emplean dos métodos. El primero consiste en adecuar ambas superficies de los miembros de la junta a soldar, utilizando los tratamientos adecuados de precalentamiento y post-calentamiento, según se requiera, y luego hacer una soldadura entre las superficies con el método de untado sin precalentamiento o post-calentamiento. Los metales de relleno (como el tipo 309) que son suficientemente altos en contenido de aleación para minimizar los efectos de la dilución por acero al carbono, o los grados de acero inoxidable al cromo (serie 400) se usan ampliamente con este método. La penetración en el metal base debe mantenerse al mínimo. El segundo método implica depositar el metal de aportación directamente sobre las superficies de

los dos elementos de la junta sin usar una capa de revestimiento separada. La dilución del metal de soldadura por ambos metales básicos debe mantenerse bajo control estricto mientras se está soldando la junta retenida. (ASM B, 2006).

1.13. Ensayos no destructivos para inspección de soldaduras de aleaciones de aceros disimiles

La prueba no destructiva de las soldaduras es un método que se utiliza para comprobar la existencia de discontinuidades, defectos de superficie, como grietas, golpes de arco, socavaciones y falta de penetración. De igual manera los defectos internos o bajo la superficie que pueden comprender inclusiones de escoria, porosidad y metal no fundido en el interior de la soldadura. En la presente investigación se utilizó las técnicas de ensayos no destructivos descritas en la norma AWS B1.10 (1999).

Los estándares de aceptación definen las características de las discontinuidades e indican si se permiten tipos particulares de estas. Ciertas discontinuidades, tales como escoria o porosidad son aceptables siempre que su tamaño y distribución estén dentro de los límites especificados. Estos criterios deben ser incorporados en los estándares de aceptación. La mayoría de los códigos y especificaciones tales como AWS D1.1, código de soldadura de acero estructural, ASME código de calderas y recipientes a presión, y API 1104, soldadura de tuberías e instalaciones relacionadas contienen estándares de aceptación.

Los elementos esenciales comunes a la mayoría de todos los métodos de pruebas no destructivas incluyen lo siguiente:

- Un medio de sondeo.
- Un espécimen de prueba que sea apropiado para el medio que se utiliza, de manera que se puedan detectar discontinuidades.
- Un detector capaz de medir las distribuciones o alteraciones en el medio
- Una técnica para registrar o mostrar información recibida del detector, adecuada para la evaluación.
- El operador que debe ser entrenado para interpretar la retroalimentación del detector para evaluar los resultados (AWS, 1999).

1.13.1. Ensayo no destructivo para soldaduras por medio de inspección visual

La inspección visual es el método de prueba no destructiva más frecuente y constituye el primer paso en casi todos los procesos de inspección. La mayoría de las soldaduras reciben sólo inspección visual. En este método, si la soldadura parece estar bien, se acepta, si no, se rechaza. Este procedimiento a menudo se pasa por alto cuando se utilizan métodos de prueba no destructivos más sofisticados. Sin embargo, no debería de pasarse por alto.

Se pueden identificar problemas menores y corregirlos antes que se complete la soldadura. Esto elimina la reparación y el costoso rechazo. La inspección visual debería realizarse antes de utilizar cualquier otra prueba no destructiva o mecánica para eliminar (rechazar) las soldaduras con problemas obvios.

Al utilizarse en la eliminación de las soldaduras que tienen excesivas discontinuidades en la superficie, que no aprobaran las normas o códigos, se ahorra tiempo de preparación. (Jeffus, 2009).

1.13.2. Normas ASTM aplicadas al proceso de inspección de soldaduras de aceros disimiles

Las normas ASTM incluidas para la inspección de soldaduras de aceros disimiles utilizadas en la presente investigación incluyen: ASTM E 3-01, Guía estándar para la preparación de especímenes metalográficos; ASTM E 8M-04, método estándar para la prueba de tensión de materiales metálicos; ASTM E 190-92, método estándar para la prueba de dobléz guiada para la comprobación de la ductilidad en las soldaduras; ASTM E 165-02, Método estándar para la examinación por líquido penetrante y ASTM E 1444-01, Práctica estándar para la examinación por partículas magnéticas.

1.13.3. Ensayo por líquido penetrante para la inspección de soldaduras

Basándose en lo expresado en la norma AWS B1.10 1999, se menciona lo siguiente: el examen por líquido penetrante es un método sensible para detectar y localizar discontinuidades, siempre que las discontinuidades sean claras y abiertas a la superficie. El método emplea un colorante líquido penetrante que se aplica a la superficie limpia apropiadamente a examinar y que entra en la discontinuidad. Después de un tiempo de permanencia adecuado, el exceso de agente penetrante se elimina de la superficie y la parte se seca. Se aplica entonces un revelador que actúa como un secante, extrayendo el penetrante de la discontinuidad. El penetrante, extraído de una abertura sobre la superficie, indica la presencia y localización de una discontinuidad.

Para una explicación más profunda sobre la técnica y metodología en la inspección de soldaduras por medio de líquidos penetrantes se puede consultar

la norma ASTM E165 02 y la norma AWS B1.10, *Guide for the nondestructive examination of welds* del año 1999.

1.13.4. Ensayo por partículas magnéticas para la inspección de soldaduras de aleaciones de aceros disímiles

Basándose en la norma AWS B1.10 (1999) es posible expresar la posibilidad de inspeccionar soldaduras por medio de partículas magnéticas; de lo cual se expresa lo siguiente: El método de partículas magnéticas, se utiliza para localizar discontinuidades superficiales o sub superficiales en materiales ferromagnéticos. El examen de partículas magnéticas se basa en los principios que las líneas magnéticas de fuerza serán distorsionadas por un cambio en la continuidad del material; es decir, una discontinuidad que crea un campo magnético o una fuga de flujo.

El método de partículas magnéticas se limita a materiales ferromagnéticos. Las juntas soldadas entre metales de características magnéticas disímiles pueden crear indicaciones irrelevantes de partículas magnéticas, aunque las propias soldaduras sean sanas. La mayoría de superficies de soldadura son aceptables para el examen de partículas magnéticas después de la eliminación de escoria, salpicaduras u otro material extraño que pueda retener mecánicamente el medio de ensayo.

La norma ASTM E 1444-01 da detalles más profundos sobre la realización del método antes descrito por AWS B1.10, para mayor información puede consultarse los documentos anexos a esta investigación.

1.14. Ensayos mecánicos para la inspección de soldaduras de aleaciones de aceros disimiles

Estas pruebas destructivas pueden ser pruebas químicas, pruebas metalográficas, ensayos mecánicos o cualquier combinación de los mismos. Las pruebas especificadas deben ser aquellas que proporcionen una garantía razonable del desempeño requerido de la soldadura en servicio.

La prueba ideal sería, por supuesto, una que duplicara exactamente las condiciones de servicio. Sin embargo, la dificultad y el costo de aplicar tales pruebas es obvio; por lo tanto, se utilizan alternativamente ciertas pruebas estándar (AWS, 2000).

1.14.1. Normas ASME, ASTM y AWS para ensayos mecánicos en probetas soldadas

Las pruebas que se describen a continuación para las pruebas mecánicas en soldaduras de aleaciones de aceros disimiles se basan en las normas ASTM E8-04 para el ensayo de tracción y ASTM E190-92 para el ensayo de doblez de soldaduras. Como referencia de ASME se tiene la sección IX, calificación de soldaduras. Toda la información pertinente para las pruebas y ensayos destructivos y no destructivos en soldaduras se encuentra disponible de igual manera en la norma AWS D1.1 y el Manual de Inspección de Soldaduras de AWS (*Welding Inspection Handbook AWS*).

Tabla IX. **Tabla comparativa de normas de ensayos mecánicos**

ENSAYO	AWS	ASTM	ASME
Ensayo de tracción	D1.1, B4.0	E 8	SECCION IX, QW 142, QW 463.1
Ensayo de doblez	D1.1, B4.0	E 190	SECCIÓN IX QW 202

Fuente: elaboración propia.

1.14.2. Descripción del ensayo a tracción para inspección de probetas soldadas

Los ensayos de tracción se realizan con muestras preparadas en forma de barras redondas o tiras planas. Las barras redondas simples se utilizan, a menudo, para probar sólo el metal de soldadura y se denomina “prueba de metal soldado”. Esta prueba se puede utilizar en secciones gruesas, donde no es posible diluir el metal base en todo el metal de soldadura. Las muestras redondas se cortan desde el centro del metal de soldadura. Las barras planas se utilizan, a menudo, para probar tanto la soldadura como el metal que lo rodea. Las barras normalmente se cortan en un ángulo de 90 grados con la soldadura. El tamaño de la barra también depende del tamaño del equipo de ensayo de tracción disponible para la prueba.

Comúnmente, para probar las secciones más finas del metal se utilizan dos muestras planas. Cuando se prueban soldaduras, la muestra debe incluir la zona afectada por el calor y la placa base. Si el metal de soldadura es más resistente que la placa, se producen fallos en la placa; si la soldadura es más débil, se producen fallos en la soldadura. Esta prueba, por lo tanto, queda abierta a la interpretación.

Según la norma AWS D1.1 en su sección 4.31.4 menciona: la longitud total de la soldadura de filete debe ser examinada visualmente, y luego un espécimen de 6 pulgadas (150 mm) de largo o un cuarto de sección del cupón de soldadura de filete de la tubería debe cargarse de tal manera que la raíz de la soldadura esté en tracción. Por lo menos un inicio y final de soldadura deben estar ubicados dentro de la probeta de ensayo. La carga debe incrementarse o repetirse hasta que la probeta se fracture o se doble de manera plana sobre sí misma.

Para aprobar el examen visual previo al ensayo de fractura, la soldadura debe presentar una apariencia razonablemente uniforme y debe estar libre de traslape, fisuras y socavaciones en exceso de los requerimientos de 6.9. No debe haber porosidad visible en la superficie de la soldadura.

La probeta fracturada es aprobada si cumple con lo siguiente:

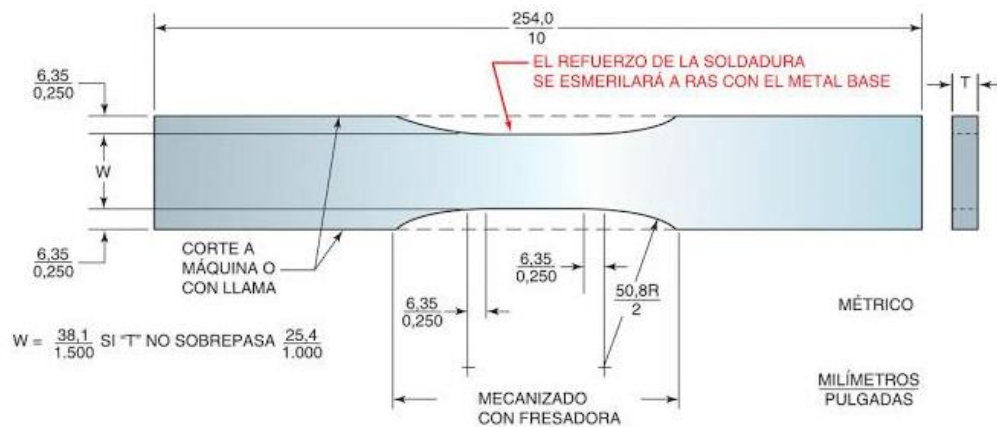
- La probeta se dobla sobre sí misma, o
- La soldadura de filete, si se fractura, tiene una superficie de fractura que muestra fusión completa en la raíz de la junta sin inclusión o porosidad mayor a 3/32 de pulgada. (2.5 mm) en la dimensión más grande, y
- La suma de las dimensiones más grandes de todas las inclusiones y porosidades no debe exceder 3/8 de pulgada. (10 mm) en la probeta de longitud de 6 pulgadas (150 mm).

En AWS D1.1 4.9.3.4, se menciona lo siguiente en probetas planas para el ensayo de tracción: antes del ensayo, deben medirse el ancho menor y el espesor correspondiente de la sección reducida. El espécimen debe romperse

bajo carga de tracción, y debe determinarse la carga máxima. El área transversal debe obtenerse multiplicando el ancho por el espesor. La resistencia a la tracción debe obtenerse dividiendo la carga máxima por el área transversal.

La resistencia a la tracción no debe ser menor que el valor mínimo del rango de tracción especificado del metal base utilizado. La información referente a la preparación de la muestra y el método de ensayo se encuentran disponibles en las normas ASTM E8 y ASTM A370.

Figura 22. **Probeta normalizada para ensayo de tracción en placas soldadas**



Fuente: Jeffus, L. *Soldadura: principios y aplicaciones*. p. 518.

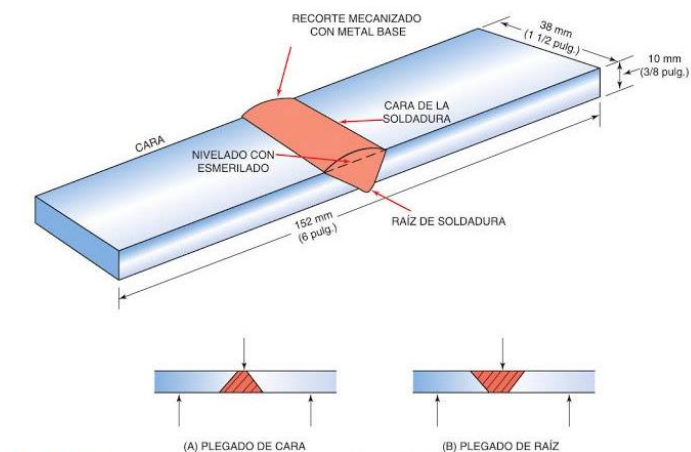
1.14.3. Descripción del ensayo de doblaje para la inspección de probetas soldadas

Para probar las juntas de tope de ranura soldadas en metal de 3/8 de pulgada (10 mm) de espesor o menos, se preparan dos muestras y se prueban; una para doblar hacia la cara y otra para doblar hacia la raíz. Si las soldaduras pasan esta prueba, el soldador está calificado para hacer soldaduras de ranura en placas con un rango de espesor de 3/8 a 3/4 de pulgada (10 a 19 mm). Estas

soldaduras necesitan mecanizarse como se muestra en la figura. Si se aprueban, el soldador también será calificado para hacer soldaduras de filete en materiales de cualquier espesor (ilimitado).

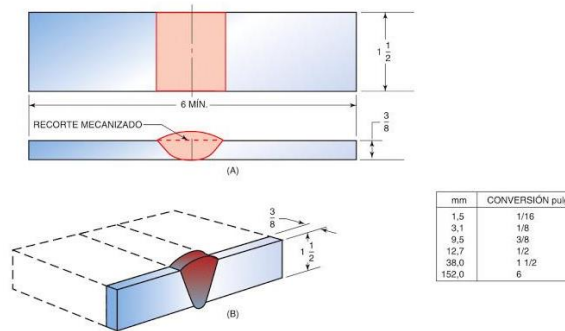
Para las juntas de tope de ranura soldadas en metal de espesor de $\frac{1}{2}$ pulgada (13 mm) se preparan dos muestras de plegado lateral y se prueban. Si pasan esta prueba, el soldador está calificado para soldar en metales de espesor ilimitado. Cuando se preparan las muestras, se debe tener precaución y asegurarse que todas las marcas de esmerilado corran longitudinalmente a la muestra para que no provoquen grietas de tensión. Adicionalmente, los bordes deben redondearse para reducir las grietas que tienen a aparecer en los bordes agudos. La razón máxima de este borde redondeado es de $\frac{1}{8}$ de pulgada (3 mm).

Figura 23. **Muestra de plegado de raíz y cara en soldaduras**



Fuente: Jeffus, L. *Soldadura: principios y aplicaciones*. p. 521.

Figura 24. **Muestra de plegado lateral para la inspección de soldaduras**



Fuente: Jeffus, L. *Soldadura: principios y aplicaciones*. p. 521.

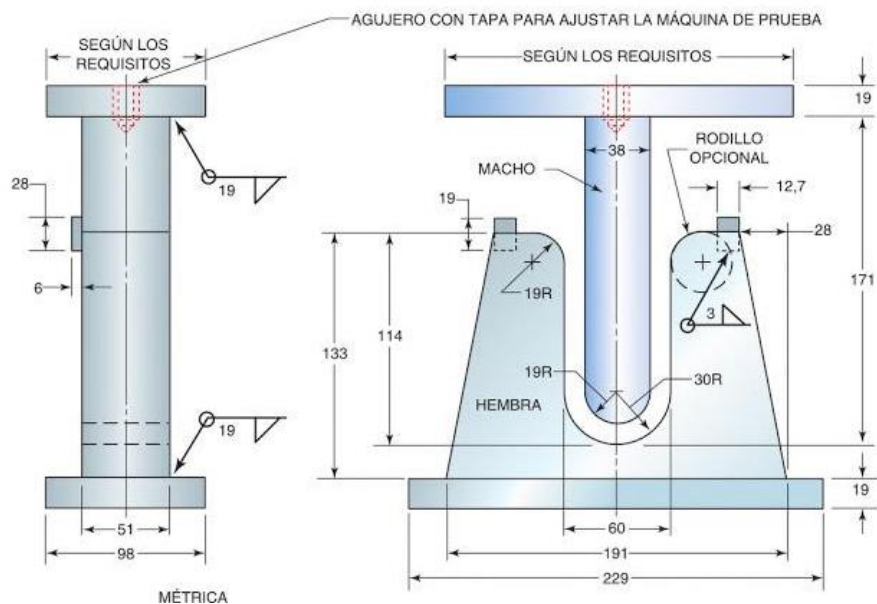
Según la AWS D1.1, en la sección 4.9.3.1, se detalla sobre el ensayo mecánico de doblado: cada espécimen debe doblarse en un dispositivo de doblado que cumpla con los requerimientos mostrados en las figuras, o que sea sustancialmente en conformidad con esas figuras, siempre que el radio de doblado máximo no se exceda. Cualquier medio conveniente puede utilizarse para mover el miembro punzón con relación al miembro de matriz.

El espécimen debe ser colocado en el miembro de matriz del dispositivo con la soldadura al centro. Los especímenes de doblado de cara deben colocarse con la cara de la soldadura dirigida hacia la abertura. Los especímenes de doblado de raíz y de sanidad de soldadura de filete deben colocarse con la raíz de la soldadura dirigida hacia la abertura. Los especímenes de doblado de lado deben colocarse con el lado que muestra mayor discontinuidad, si es que lo hubiera, dirigida hacia la abertura.

El punzón debe forzar al espécimen dentro de la matriz hasta que éste tome forma de U. la soldadura y las HAZ deben estar centradas completamente dentro de la porción doblada del espécimen después del ensayo. Cuando se

utiliza un dispositivo de plantilla envolvente, el espécimen debe estar firmemente sujetado a un extremo para que no se resbale durante la operación de doblado. La soldadura y las HAZ deben estar completamente en la porción doblada del espécimen después del ensayo. Los especímenes de ensayo deben retirarse del dispositivo cuando el rodillo externo haya sido movido 180 grados del punto de partida. (Jeffus, L., 2009).

Figura 25. **Máquina para el ensayo de doblado en probetas soldadas**



Fuente: Jeffus, L. *Soldadura: principios y aplicaciones*. p. 522.

1.14.3.1. Criterios de aceptación para el ensayo de doblado en soldaduras

En la norma AWS D1.1 numeral 4.9.3.3 se menciona que la superficie convexa del espécimen de ensayo de doblado debe ser examinada visualmente

para discontinuidades en la superficie. Para su aceptación la superficie no debe tener discontinuidades que excedan las siguientes dimensiones:

Primero: 1/8 de pulgada (3 mm) medida en cualquier dirección sobre la superficie.

Segundo: 3/8 de pulgada (10 mm) la suma de las dimensiones más grandes de todas las discontinuidades que excedan 1/32 de pulgada (1 mm), pero menores o iguales a 1/8 de pulgada (3 mm).

Tercero: ¼ de pulgada (6 mm) la máxima fisura de esquina, excepto cuando esa fisura de esquina resulte de una inclusión de escoria visible u otra discontinuidad de tipo fusión, entonces debe aplicarse un máximo de 1/8 de pulgada (3 mm).

Los especímenes con fisura de esquina que exceden ¼ de pulgada (6 mm) sin evidencia de inclusiones de escoria u otra discontinuidad de tipo fusión deben ser descartados, y se debe ensayar un espécimen de reemplazo de la soldadura original. (AWS, 2009).

1.14.4. Inspección metalográfica de muestras soldadas de aceros disimiles

El examen metalográfico se requiere a veces en especificaciones para soldaduras. Se utiliza para determinar lo siguiente:

- La solidez de las soldaduras.
- La distribución de las inclusiones no metálicas en la soldadura.
- El número de pasadas de soldadura.

- La estructura metalúrgica en la zona de soldadura y fusión.
- La extensión y la estructura metalúrgica de la zona afectada por el calor.
- La ubicación y profundidad de penetración de la soldadura.

Estas pruebas pueden implicar un mero examen visual, en cuyo caso los especímenes preparados (llamados macro-especímenes) son grabados para destacar la configuración bruta y la configuración del talón y se examinan a simple vista o con aumentos por debajo de 10X; o pueden implicar un examen microscópico, en cuyo caso los especímenes (llamados micro-especímenes) se preparan y graban para su examen con aumentos superiores a 10X.

Las muestras pueden ser aseguradas mediante secciones de soldaduras de prueba o soldaduras de control de producción incluyendo guías de soporte laterales. Se pueden preparar mediante corte, mecanizado o pulido para revelar la superficie deseada para el grabado.

Seccionamiento de soldaduras de producción por perforación de núcleo o trépano se han utilizado durante años como un control de calidad. Sin embargo, la re-soldadura de las áreas trituradas o trepanadas eran a menudo más difícil de realizar que la soldadura original y producía con frecuencia defectos en el área de la reparación (AWS, 2000).

1.14.4.1. Preparación de muestras de probetas soldadas

Para la preparación de muestras a ser observadas, tanto de manera macro como microscópica antes del análisis metalográfico es posible seguir con los lineamientos de la norma ASTM E-3 (2001). Sin embargo, la presente

investigación considera que algunas de las indicaciones de la norma no pueden ser aplicadas a cabalidad, debido al tamaño de las muestras a ser ensayadas.

1.14.4.1.1. Especímenes de soldadura macroscópicos

Para el examen macroscópico, diferentes metales requieren diferentes métodos de preparación. Como ejemplo, para soldaduras de acero al carbono, la superficie a examinar puede prepararse por uno de los siguientes métodos:

Uno: después de seccionar la soldadura y preparar un acabado relativamente liso en la superficie a examinar, colocar en una solución al 50 por ciento de ácido clorhídrico en agua a 66 °C hasta que haya una definición clara de la estructura macro de la soldadura. Esto requerirá una inmersión en la solución antes descrita de aproximadamente media hora.

Dos: se prepara otro tipo de macro espécimen esmerilando y puliendo muestras lisas con una rueda de esmeril o papel de esmeril, y luego se graba mediante el tratamiento con una solución de una parte en peso de persulfato amónico (sólido) y nueve partes de agua. La solución debe ser utilizada a temperatura ambiente y debe ser aplicada frotando la superficie para ser atacada con un pedazo de algodón que se sature siempre con la solución. El proceso de grabado debe continuar hasta que haya una definición clara de la estructura macro de la soldadura.

Después de ser atacados, los especímenes se lavan en agua clara y el exceso de agua se elimina rápidamente. Los especímenes se lavan después con alcohol propílico o etílico y se secan. La superficie atacada se puede conservar mediante la aplicación de una laca clara y delgada.

El examen macroscópico se utiliza para revelar el número de pasadas de soldadura, la penetración de la soldadura, la extensión del corte de la soldadura, la extensión de la zona afectada por el calor (HAZ) y la circunferencia bruta. Los defectos demostrados por varios exámenes no destructivos pueden ser expuestos para una evaluación posterior usando el examen macroscópico.

1.14.4.1.2. Especímenes de soldadura microscópicos

Cuando se examinan defectos extremadamente pequeños o para estructuras metalúrgicas con gran aumento, se deben cortar muestras de la soldadura real o de muestras de probetas de ensayo soldadas. Estos micro especímenes reciben un pulido hasta alcanzar una superficie tipo espejo y se atacan con un reactivo químico para su examen con un microscopio metalográfico, esto se logra con una ampliación apropiada para revelar la estructura del metal base, HAZ, zona de fusión, depósito de metal de soldadura, segregación, pequeñas discontinuidades, etc. Muestras tales como éstas pueden ser necesarias en algunos códigos y especificaciones que con frecuencia son útiles en la identificación de problemas y en la determinación de soluciones. Un metalografo calificado puede leer una gran cantidad de exámenes microscópicos. Sin embargo, el procedimiento es complicado; es necesaria una habilidad considerable para pulir adecuadamente las muestras y usar los medios de ataque adecuados y la técnica para mostrar lo que se desea.

1.14.4.2. Ataque químico de muestras de probetas soldadas de aceros disimiles

Para el ataque macroscópico es posible utilizar una variedad de productos químicos que revelen las diferentes zonas involucradas en la soldadura, además de la morfología de los granos presentes en el cordón de soldadura. Con base en esto es posible establecer que se pueden utilizar los siguientes productos como se muestra en la tabla X.

Para la revelación de estructuras microscópicas es posible la utilización de los reactivos tipo picral y el reactivo de *Murakami's*. El picral consiste en la solución de 4 gramos de ácido pícrico, cien mililitros de etanol o metanol y cuatro o cinco gotas de cloruro de zefirano, este reactivo se debe de aplicar por medio de un algodón húmedo con la solución durante algunos segundos a un minuto o más (ASM, 1998).

La dificultad más grande de la revelación de estructuras en las soldaduras de aleaciones de aceros disimiles surge cuando existe la interacción de acero inoxidable austenítico, ya que este es difícil de atacar por medio de reactivos simples. Esto motiva la utilización del reactivo de *Murakami's* como ejemplo.

Sin embargo, la investigación arrojó resultados satisfactorios con el uso de una solución de ácido clorhídrico más ácido nítrico y ácido acético para los aceros inoxidables y cordones de soldadura. Para los aceros simples al carbono funciona de buena forma la utilización de ácido nítrico más etanol, conocido como nital. (ASM, 1998).

2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestra la metodología propuesta de forma detallada para la correcta unión de aleaciones de aceros disimiles por medio de soldadura eléctrica con la utilización de electrodo revestido y los parámetros que influyen en el proceso. También se muestran las propiedades, características de los materiales que se involucran y la designación de las muestras que se obtuvieron como medio de experimentación para el análisis de la validación de las cualidades y propiedades de las soldaduras de aleaciones de aceros disimiles.

- Parámetros que influyen en las soldaduras de aleaciones de aceros disimiles.

De lo descrito en el capítulo uno, es posible llegar a establecer los parámetros que influyen en las soldaduras de aleaciones de aceros denominados disimiles; los mismos incluyen los elementos químicos presentes en el metal base, la estructura metalográfica presente en los metales seleccionados, la preparación del metal a ser soldado, la característica de soldabilidad del tipo de aceros seleccionados, la selección del paso de raíz de la soldadura, la selección del material de los electrodos para la formación de la soldadura, la selección del proceso para la realización de la soldadura, la metodología de aplicación de soldaduras y los tratamientos térmicos post soldadura aplicados, las estructuras metalográficas obtenidas en el cordón resultante de la soldadura y la ZAC.

Los compuestos químicos propios de la composición de los metales seleccionados influye significativamente, ya que un contenido presente de elementos aleantes alto, como es el caso de los aceros de tipo inoxidable, promueve la aparición de estructuras metalográficas no deseadas durante la ejecución de la soldadura. La aparición de descarburación, sensitización del cromo y la aparición de carburos de níquel son los principales causantes de condicionar a un proceso particular de soldadura a los aceros de tipo inoxidable; esto se llega a incrementar cuando aparece disimilitud entre las composiciones químicas de los materiales base, siendo esta una razón por la que se justifica el desarrollo investigativo del presente proyecto.

Los materiales seleccionados para la experimentación incluyen una gama de aceros inoxidables, acero de bajo y alto carbono. En lo referente a su estructura metalográfica, los aceros inoxidables incluyen estructuras martensíticas y austeníticas. El principal inconveniente que presenta la utilización de aceros denominados inoxidables del tipo martensíticos es su posibilidad de transformación estructural durante la aplicación de excesivo calor, ya que podría aparecer la estructura denominada martensita en los límites del inicio de la ZAC y la zona parcialmente fundida. Los aceros denominados inoxidables del tipo austeníticos, a pesar que poseen una estructura metalográfica estable, puede sensitizarse o sensibilizarse, lo que acarrearía una formación de compuestos del tipo carburo de cromo que poseen alta dureza y estarían presentes en las fronteras de grano, reduciendo su resistencia y provocando la posible presencia de corrosión intergranular

Los aceros con bajo contenido de carbono presentan una estructura ferrítica con una cantidad de contenido de carbono limitada al 0,18 % en peso, poseen una soldabilidad muy buena, ya que la ferrita posee poca cantidad de contenido de carbono y dificulta la aparición de martensita, la cual es perjudicial

al momento de realizar la soldadura, ya que su alta dureza reduce significativamente la ductilidad de la junta y puede provocar fisuras en el proceso de enfriamiento de la soldadura. Una estructura de perlita y cementita es posible de encontrar en los aceros de alto contenido de carbono seleccionados para la experimentación; sin embargo, estas estructuras sí podrían propiciar la aparición de martensita.

Una adecuada preparación de la superficie a ser unida por medio de soldadura siempre es necesaria. La presencia de corrosión o herrumbre en la superficie provocaría imperfecciones internas en la soldadura, reduciendo de esta forma la resistencia de la soldadura. Dependiendo del espesor de la chapa a unir se puede necesitar la preparación de los extremos a ser soldados por medio de biseles. En el caso particular de la presente investigación, se utilizó un bisel doble a sesenta grados como lo especifica la normativa ASME sección IX.

En términos de soldabilidad, los aceros denominados inoxidable pueden catalogarse con buena soldabilidad, siempre y cuando se seleccione adecuadamente el electrodo para realizar la unión y los tratamientos térmicos pre, durante y post soldadura. Los aceros denominados al carbono poseen una alta soldabilidad, considerando que se dificulta al incrementarse la cantidad del contenido de carbono existente, lográndose reducir con una buena selección del metal de aportación para la soldadura.

El paso de raíz es necesario en la unión a tope de las muestras ensayadas, ya que esto promueve la unión más eficiente al inicio de la junta, la dimensión seleccionada fue del espesor del electrodo utilizado para la unión (3/32 de pulgada).

Según lo demostrado en el capítulo uno, específicamente el tema relacionado al diagrama de *Schaeffler*, cuando se necesita unir dos aceros disimiles, el contenido de níquel y cromo equivalente marcan una influencia significativa en la selección del electrodo para la soldadura. La adecuada selección del electrodo influye de gran manera en las características mecánicas de la soldadura, motivo por el que es un parámetro a considerar para la adecuada unión de aceros denominados disimiles, ya que debe poseer buena compatibilidad química con los metales base y una buena capacidad de dilución en la soldadura resultante.

Cada proceso particular de soldadura posee ciertas ventajas tecnológicas que facilitan su aplicación en procesos de soldaduras, la correcta selección de un proceso adecuado de soldadura facilita la comprensión de los posibles efectos que este tenga durante su utilización en uniones de aceros del tipo disimiles, ya que comercial y de forma industrial el proceso de soldadura denominado al arco eléctrico es el más versátil y utilizado, es el seleccionado como proceso para las muestras experimentadas.

Para unir aceros por lo general es común la utilización de una metodología de soldadura por medio de oscilación en avance, sin embargo, en la presente investigación se selecciona una metodología de arrastre de la gota de soldadura en el charco. La metodología propuesta garantiza un mayor índice de penetración por pasada de soldadura y una mejor deposición del material durante el proceso de aplicación de la soldadura; este parámetro influye significativamente en los resultados esperados durante la experimentación.

Los tratamientos térmicos en los aceros se definen como una serie de procedimientos de aplicación de calor, permanencia y posterior enfriamiento en función de una estructura metalográfica deseada. Este parámetro es de

consideración durante los procesos de unión por medio de soldadura de aceros martensíticos y de alto carbono, ya que los mismos pueden provocar la aparición de martensita no deseada debido a sus propiedades mecánicas dañinas para la calidad en la soldadura.

Por último, las estructuras resultantes de la soldadura pueden provocar una serie de disminuciones en las cualidades de resistencia mecánica y ductilidad en las soldadura, un parámetro que puede ser controlado al unísono por medio de una buena selección de material base, una correcta selección de metal de aporte y una metodología adecuada del proceso de unión por soldadura.

- Selección del proceso para las soldaduras a tope de aleaciones de aleaciones de aceros disimiles.

Para el desarrollo de la experimentación propuesta se seleccionó un proceso de soldadura por medio de arco eléctrico con electrodo revestido; debido a su disponibilidad, adaptabilidad y gran aplicación a nivel industrial; siendo justificada la utilización de la misma, ya que los resultados expuestos de la investigación pueden llegar a ser utilizados de forma directa en los procesos de reparación y reacondicionamiento de piezas utilizadas en la industria nacional actualmente.

Debido a la aplicación más amplia de soldaduras a tope para este tipo de uniones disimiles a nivel industrial, se justifica su utilización.

- Selección de los aceros disimiles a ensayar y preparación de probetas.

Para la experimentación que se presenta, se propuso la utilización de los siguientes materiales base: acero denominado inoxidable de tipo austenítico AISI 304, acero inoxidable del tipo martensítico AISI 420, acero con bajo contenido de carbono AISI 1018 y acero para herramienta AISI O1 (comercialmente disponible bajo el nombre DF 2). Los mismos son de alta utilización comercial e industrial en el medio nacional. El acero de tipo inoxidable 304 es aplicado en la industria farmacéutica, de alimentos y generación de energía eléctrica por medio de vapor. El acero AISI 420 es utilizado para la construcción de moldes para productos plásticos.

El acero 1018 es el más utilizado para mecanizado libre, además su contenido de carbono bajo, lo hace idóneo como marco comparativo en la utilización de tuberías de transporte de fluidos, por lo tanto, imprescindible en la investigación. Por último, la selección de acero DF 2, se basa en su contenido de carbono presente, que es alto y puede promover la aparición de estructuras no deseadas durante el proceso de unión por medio de soldadura, razón por la que su utilización en la experimentación podría dar resultados que beneficien a mejorar los procesos de unión, por medio de soldadura, así evitar estructuras que perjudican la calidad de las juntas soldadas.

Se proponen dos tipos de muestras, una para la experimentación metalográfica y análisis de ductilidad con dimensiones de ancho 2,5 pulgadas, largo 3 pulgadas y espesor de 3/8 de pulgada; la otra, para ser ensayadas a tracción con dimensiones de 2,5 pulgadas de ancho, 5 pulgadas de largo y 3/8 de pulgada de espesor. Tanto las probetas obtenida para el desarrollo del ensayo mecánico de tracción y también para el ensayo de ductilidad fueron

seleccionadas en términos dimensionales, con base a las recomendaciones de la AWS D1.1 que se encuentra en la sección calidad de la soldadura y ensayos.

Las uniones disimiles experimentadas fueron:

- Acero inoxidable tipo austenítico 304 + acero inoxidable tipo martensítico 420.
- Acero inoxidable tipo austenítico 304 + acero simple al carbono 1018.
- Acero inoxidable tipo austenítico 304 + acero para herramienta DF 2.
- Acero inoxidable tipo martensítico 420 + acero simple al carbono 1018.
- Acero inoxidable tipo martensítico 420 + acero para herramienta DF 2.
- Acero simple al carbono 1018 + acero para herramienta DF 2.

Los ensayos propuestos se realizaron con dos muestras de cada unión disímil para análisis metalográfico y prueba de ductilidad, para los ensayos mecánicos a tracción se tiene una muestra de cada unión disímil.

- Preparación de las muestras de probetas de soldaduras de aceros disimiles.

En las muestras del ensayo de ductilidad se hicieron biseles dobles a sesenta grados en uno de los extremos de cada muestra, esto se hizo con la utilización de un esmeril de banco.

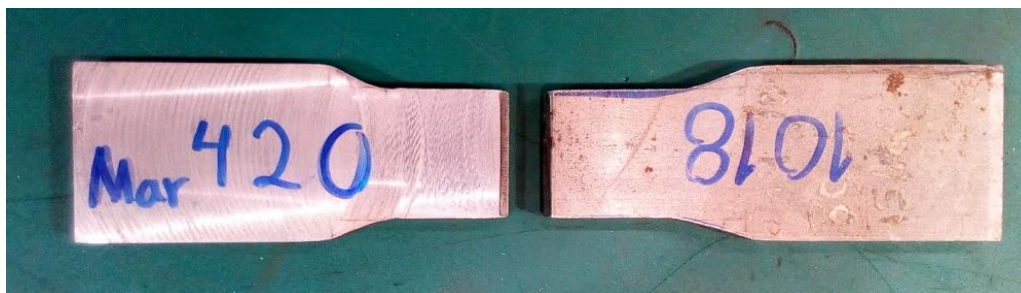
Figura 26. **Preparación de junta a tope tipo doble bisel**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Las muestras que fueron utilizadas para los ensayos de tracción requirieron una preparación más especial, esto debido a que se necesitaba además del bisel correspondiente en uno de los extremos a sesenta grados, una reducción en el perfil de la muestra. La figura veintisiete detalla de forma más adecuada la forma de la probeta deseada, las curvas son necesarias en esta tipo de probeta, ya que las concentraciones de esfuerzos deben focalizarse en el medio de investigación, es decir, la unión por soldadura, esto se explica de una forma más detallada en la norma ASTM E 08.

Figura 27. **Preparación de muestras a ser soldadas para ensayo de tracción**



Fuente: Elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Figura 28. **Detalle de preparación de bisel**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

- Selección del metal de aporte para soldadura de aleaciones de aceros disimiles.

La utilización del diagrama de *Schaeffler* y *De Long* para la correcta selección del material de aporte es indispensable. La cantidad de cromo y níquel, además del número de ferrita como resultante del tipo de proceso de soldadura son los parámetros más significativos durante la selección del metal de aporte. Para la presente investigación y con el apoyo del diagrama antes mencionado, se seleccionó como metal de aporte dos tipos de electrodos, ambos de clase austenítica siendo los tipos E 309L-16 y E 312-16 de 3/32 de pulgada de diámetro.

El material de aporte garantiza la suficiente cantidad de níquel y cromo equivalente en el cordón durante la soldadura, reduciendo la presencia de los efectos de la sensitización y formación de carburos de níquel durante el

proceso. La alta presencia del número de ferrita da como resultado una soldadura sana y con una ductilidad aceptable. Como medio de referencia, también es de mencionar que a nivel comercial los electrodos seleccionados son los más útiles cuando se trata de soldaduras disimiles en aceros.

La buena selección del electrodo garantiza de cierta manera la no presencia de inclusiones de escoria, poros, falta de fusión y penetración entre otras imperfecciones no deseadas en la junta ya terminada.

Las especificaciones técnicas de cada electrodo se muestran a continuación:

E 309L-16

Utilizado como electrodo en la unión de materiales tales como acero tipo inoxidable 304 con aceros denominados al carbono con aceros de baja aleación, liga con aceros tipo inoxidables de análisis desconocido. La estructura resultante es austenítica.

- Resistencia a la tensión 550 MPa (80 000 psi).
- Elongación 30 %
- Composición química bajo normativa AWS A4.5.
- Carbono 0,15 % máximo.
- Silicio 1,00 % máximo.
- Manganeso 0,5 – 2,5 %
- Cromo 22,0 – 25,0 %
- Níquel 12,0 – 14,0 %
- Molibdeno 0,75 % máximo.
- Azufre 0,03 % máximo.

- Cobre 0,75 % máximo.
- Fósforo 0,04 % máximo.

E 312-16

Se utiliza para soldar aleaciones de fundición y forjadas de composición similar. La estructura resultante es austenítica.

- Conforme a AWS A 5.4 y ASME SFA-A5.4.
 - Composición química de acuerdo con AWS A4.5.
 - Carbono 0.15 % máximo.
 - Cromo 28-32 %
 - Níquel 8-10.5 %
 - Molibdeno 0.75 % máximo.
 - Manganeso 0.5-2.5 %
 - Silicio 1% máximo.
 - Fosforo 0.04% máximo.
 - Azufre 0,03% máximo.
 - Cobre 0,75 % máximo.
 - Número de Ferrita 30-60.
- Valores característicos de resistencia mecánica a la tracción de los materiales base utilizados en las probetas de soldaduras disimiles.

Ya que se necesita de parámetros comparativos para los ensayos mecánicos de tracción en cuanto a valores de resistencia mecánica, a continuación se presenta por medio de una tabla valores de esfuerzo a ruptura comunes para los aceros 1018, DF 2 (AISI O1), inoxidables 304 y 420.

Tabla X. **Resistencia mecánica de aceros disimiles empleados**

ACERO	RESISTENCIA MECÁNICA
1018	440 MPa
Acero para herramienta DF 2 (O 1)	655.5 MPa
Inoxidable 304	650 MPa
Inoxidable 420	860 MPa

Fuente: elaboración propia.

- Composición química de los metales utilizados en las probetas de soldaduras disimiles.

La composición química de los metales seleccionados indica la presencia de los diferentes tipos de elementos que componen al acero. En la siguiente tabla se muestra la información referente a los elementos existentes en los aceros 1018, DF 2, inoxidables 304 y 420.

- Necesidad de aplicación de tratamientos térmicos pre, durante y post soldadura en el proceso de soldadura de aceros disimiles.

A pesar de la presencia en las uniones de altos valores de temperatura y la posibilidad de aparición de martensita, se descartan los tratamientos térmicos en la ejecución de la experimentación, ya que las dimensiones de las muestras según lo que se menciona en la AWS D1.1 sección 5.4.5 y 5.6 son muy pequeñas para que se requiera un tratamiento térmico, por lo que no se utilizaron en la presente investigación.

Tabla XI. **Composición química característica de los aceros disimiles empleados**

ACERO	COMPOSICIÓN QUÍMICA
1018	Carbono: 0,15-0,20 % Manganeso: 0,60-0,90 % Fosforo: 0,040 % máx. Silicio: 0,050 % máx.
DF 2	Carbono: 0,95 % Manganeso: 1,25 % Silicio: 0,30 % Cromo: 0,50 % Tungsteno: 0,50 %
Inoxidable 304	Carbono: 0,08 % máx. Manganeso: 2,00 % máx. Silicio: 1,00 % máx. Cromo: 18-20 % Níquel: 8-10,50 %
Inoxidable 420	Carbono: 0,15 % Manganeso: 1 % máx. Silicio: 1 % máx. Cromo: 12-14%

Fuente: elaboración propia.

- Ejecución del proceso de soldadura de aceros disimiles en casos específicos.

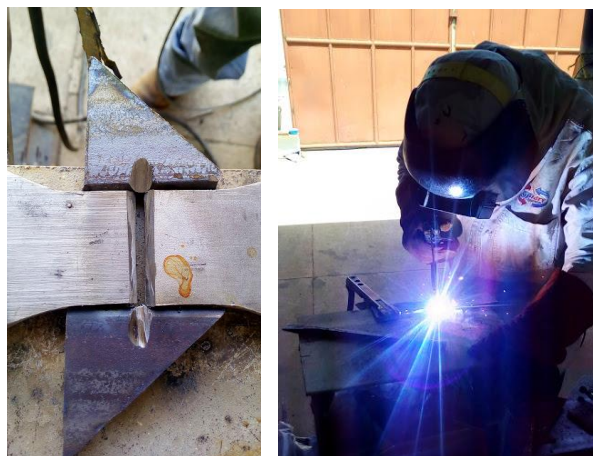
Con las muestras ya preparadas, el material de aporte y tipo de soldadura seleccionados, se procede a explicar el proceso de las uniones soldadas de aleaciones de aceros disimiles presentados en el desarrollo experimental de la investigación.

Para una correcta ejecución del proceso se debe considerar lo siguiente: la técnica del soldador es un factor de alta relevancia al momento de unir piezas por soldadura, para estos fines se tuvo el trabajo de un soldador certificado, de acuerdo con la norma AWS. Otros factores que influyen son la selección de la corriente de soldadura, así como la limpieza previo a la soldadura, durante la soldadura y después de finalizada.

Las muestras antes de ser unidas, se dejaron firmes con el paso de raíz necesario; la figura veintinueve, que a continuación se muestra, detalla de mejor forma la aplicación de piezas previas de soporte a la unión soldada.

Otra de las características de mencionar en la metodología del proceso de unión es la creación de un canal en las piezas de soporte y la junta a ser unida. La finalidad de esto es iniciar y finalizar el cordón de soldadura en una parte que después se mecanizará, reduciendo los efectos perjudiciales que acarrearán el inicio y fin del arco durante su aplicación.

Figura 29. **Preparación de previa a la unión por soldadura**



Fuente: elaboración propia, taller de herrería Villa Nueva.

Figura 30. **Detalle de proceso de limpieza entre pasadas y cordón final**



Fuente: elaboración propia, taller de herrería Villa Nueva.

Como es posible de apreciar en la figura treinta, el cordón ya terminado posee calidad bajo inspección visual además de iniciar y finalizar en los canales destinados para los fines antes descritos. Las soldaduras fueron realizadas en un taller de soldadura, ubicado en el municipio de Villa Nueva departamento de Guatemala, propiedad del perito y experto en soldaduras Gilberto Rosas.

La metodología de unión de soldaduras disimiles a tope puede describirse de la siguiente manera:

- Preparación de los biseles.
- Limpieza de los biseles (eliminación de restos de corrosión si existiera, por medio de discos abrasivos o papel de lija).

- Selección de la corriente (para estas muestras en particular se utilizó una corriente que varió de 90 a 100 amperios dependiendo de las necesidades del soldador).
- Aplicación de placas de soporte laterales, respetando el paso de raíz (evitan el alabeo durante el proceso de unión).
- Creación del canal de soldadura (facilita el inicio y fin del cordón, evitando presencia de poros por arranque y finalización del arco).
- Inicio de la soldadura (debido al espesor de la muestra soldada, no es posible unir las piezas en una sola pasada, se debe hacer por medio de múltiples pasadas para rellenar de mejor manera el espesor establecido).
- Primera pasada, incluye la deposición de un cordón que luego se limpiará por medio de un disco abrasivo y una pulidora (esta limpieza busca eliminar residuos de escoria que podrían quedar atrapados en el cordón y luego debilitar la unión soldada; es también de mencionar, debido a que esta es la primera pasada, todo lo insoluble que quede atrapado en esta fase no se verá al final de forma simple, tampoco por medio de END como tintes penetrantes, se requerirá de ensayos más especializados para la detección de estas imperfecciones, razón por la que la limpieza en esta fase es sumamente importante y trascendental).
- Segunda pasada, relleno, con la metodología descrita anteriormente, se arrastra la gota de la fusión por medio del charco sin oscilar (en esta fase se depositan dos cordones paralelos, haciendo canales entre cada uno de ellos y el material de aporte, su finalidad es generar un espacio más adecuado para la recepción del siguiente cordón, mejorando con esto la

calidad de la soldadura además de limpiar de nuevo la posible escoria que haya quedado atrapada durante la capa anterior).

- Tercera pasada, fusión completa de la junta, en esta parte si es posible oscilar levemente, ya que el mayor depósito se realizó en la pasada previa (esta pasada es la final y requiere sumo control en la penetración y velocidad de avance del soldador).
- Tiempo de espera para enfriamiento (puede variar de 20 a 30 minutos).
- Remoción de las placas de soporte de inicio y fin de cordón.
- Ejecución de ensayos no destructivos a probetas específicas.

Para el análisis de las imperfecciones posibles en las muestras de las soldaduras de aceros disimiles se aplicaron una serie de ensayos no destructivos. La inspección visual fue la primera técnica empleada, consistió en la apreciación por parte del investigador de las posibles imperfecciones superficiales obtenidas durante el proceso de unión.

El uso de líquidos penetrantes fue la siguiente técnica empleada en el análisis de las posibles imperfecciones de las uniones soldadas. Esta se basó en los lineamientos establecidos en la ASTM E 165-02 Método estándar para la examinación por líquido penetrante, su utilización fue con la finalidad de encontrar imperfecciones superficiales no aparentes por medios simples visuales. El kit de líquidos penetrantes utilizado fue de la marca TRYTECH tipo A y C que cumple con las normas ASTM E-1417 y ASTM E-1418.

La secuencia del proceso incluía: limpieza previa de la soldadura con cepillo de alambre, aplicación de limpiador por medio de paño, aplicación de tinte penetrante con una duración de permanencia de 10 de 20 minutos, limpieza del tinte excedente con paño húmedo en liquido limpiador, aplicación de revelador y apreciación de los resultados.

La utilización del ensayo por partículas magnéticas establecida en la norma ASTM E 1444-01, práctica estándar para la examinación por partículas magnéticas, fue descartada de la presente investigación, esto se debió a la presencia de estructuras austeníticas propias de la utilización de material de aporte E 309-16 y E 312-16, las cuales no son magnéticas.

- Ejecución de ensayos mecánicos a probetas seleccionadas.

Como medios experimentales para la demostración de las posibles cualidades en las características mecánicas de las muestras obtenidas de uniones de aceros disimiles, se utilizaron dos tipos de ensayos mecánicos.

El primero, ensayo de doblez, basado en la norma ASTM E 190-92, Método estándar para el ensayo mecánico de doblez guiado para la comprobación de la ductilidad en las soldaduras, con la utilización de una máquina de doblez manufacturada por el investigador, con la finalidad de cumplir la norma, se usó en seis probetas seleccionadas, una de cada muestra. El objetivo primario de la prueba fue la determinación de la cualidad de ductilidad en las probetas disimiles. La prueba fue realizada en el Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur, perteneciente a la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 31. **Máquina de doblar y demostración de ensayo**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

La segunda prueba mecánica utilizada fue el ensayo mecánico de tracción, basado en la norma ASTM E 8M-04, método estándar para la prueba de tracción de materiales metálicos. La prueba fue realizada en el Área de Metales perteneciente al Centro de Investigaciones de Ingeniería, ubicado en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. La finalidad de esta prueba consistió en determinar de manera cualitativa y cuantitativa la resistencia de las uniones soldadas, para la misma se ensayaron seis probetas, una de cada unión disímil.

- Ejecución de inspección metalográfica óptica a probetas seleccionadas.

El medio de análisis más trascendental en la presente investigación se basó en la utilización de la metalografía óptica, cuya finalidad fue la determinación de las estructuras metalográficas resultantes, de manera

cualitativa, en las uniones disimiles específicamente las zonas que conforman la soldadura.

El proceso para la preparación de las probetas fue regido por medio de la norma ASTM E 3-01, Guía estándar para la preparación de especímenes metalográficos. Por medio de un seccionamiento longitudinal de cada una de las muestras disimiles, se logró obtener una probeta que mostró los efectos resultantes de los distintos parámetros involucrados en el proceso de unión. Luego se realizó un pulido mecánico (pasando por lija P80, P240, P320, P600 y P1000), un pulido con alúmina de 0,04 μm utilizando una pulidora metalográfica y un paño suave; por último, una preparación con ataque químico, decapado, para revelación de estructuras con reactivos denominados de la siguiente forma:

- Reactivo uno: contenido de 30 ml de ácido clorhídrico, 20 ml de ácido nítrico y 20 ml de ácido acético. Este se utilizó específicamente en aceros inoxidable.
- Reactivo dos: contenido de 3 % en volumen de ácido nítrico y un contenido en volumen del 97 % de alcohol metílico. Este se utilizó específicamente en aceros denominados al carbono.

El reactivo se aplicó por medio de hisopo, frotando suavemente sobre la parte superior pulida a ser observada hasta que se notó un opacamiento significativo en la pieza, a pesar que la técnica estandarizada menciona un tiempo de exposición al ácido establecido, para la presente investigación esto fue una dificultad, ya que la unión de aceros de tipo inoxidable con aceros al carbono restringió la inmersión superficial de la probeta en ácido de un solo

tipo, ya que como se describió, dependiendo del acero a ser observado, así también fue el reactivo utilizado.

Posteriormente se lavó la probeta con agua y una pronta aplicación de alcohol para inhibir la aparición de óxido superficial.

Las muestras obtenidas fueron observadas bajo el microscopio metalográfico marca *AM SCOPE*, con una serie de aumentos que variaron en función de la necesidad de la parte de la soldadura a ser estudiada, se puede observar con cien aumentos (100X) y cuatrocientos aumentos (400X).

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se hace un análisis de los resultados y las características más importantes de los mismos, obtenidos al ensayar las distintas probetas que se tuvieron como medio experimental para la evaluación de las distintas propiedades resultantes de las soldaduras de aleaciones de aceros disimiles por medio de la utilización del proceso de soldadura eléctrica y la utilización de electrodo revestido. De igual manera, se realiza la comparación de los datos y valores teóricos con los obtenidos de forma experimental.

- Resultados de ensayos no destructivos en probetas soldadas de aleaciones de aceros disimiles.

De la práctica descrita en el desarrollo de la experimentación, fue posible obtener los siguientes resultados referentes a ensayos no destructivos aplicados a las probetas de las uniones soldadas disimiles.

- Probetas de acero inoxidable 420 y acero DF 2 END.

Probeta uno: unión experimental con material de aporte E Ni-Fe 100, se localizaron muchas imperfecciones tipo fisura en todo el cordón y las zonas próximas al mismo. Durante la ejecución de la unión por medio de soldadura, el soldador reportó la presencia de oscilación en el depósito, esto se debe a defectos propios del electrodo que se obtuvieron durante el proceso de fabricación, la excentricidad del recubrimiento fue la imperfección. Es de concluir que la falta de penetración y la aparición de múltiples fisuras en las primeras pasadas de la soldadura se debieron a la incompatibilidad química del

electrodo y los metales base. Esta probeta es considerada un espécimen y se descartó para ser utilizada con ensayos mecánicos.

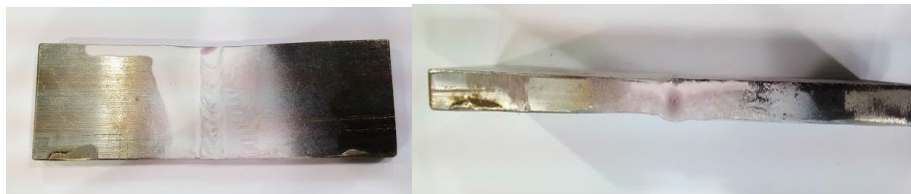
Figura 32. **Probeta disímil acero DF2 y 420, unión 100% Ni, con END de líquidos penetrantes**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Probeta dos: unión con material de aporte 309L-16, se observó después de la aplicación de líquidos penetrantes la presencia de pequeñas fisuras a los costados del cordón de soldadura.

Figura 33. **Probeta disímil acero DF2 y 420, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

- Probetas de acero tipo inoxidable 304 y acero DF 2 END.

Probeta uno: unión experimental con material de aporte E Ni-Fe 100, precalentamiento a 250 grados centígrados, no existió unión continua en el lado del acero DF 2, es posible apreciar fisuras en la parte media del cordón en sentido longitudinal al mismo. Esta probeta muestra también un defecto muy significativo en la zona de transición cordón-material base. Se concluye que la presencia de las imperfecciones antes mencionadas se debe a una incompatibilidad química entre los materiales base y el electrodo seleccionado. Después de esta experimentación se descarta la utilización de material de aporte tipo E Ni-Fe 100.

Figura 34. **Probeta disímil acero 304 y DF 2, unión 100% Ni, con END de líquidos penetrantes**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Probeta dos: unión con material de aporte 309L-16, no se aprecian imperfecciones aparentes, con inspección visual o líquidos penetrantes.

Figura 35. **Probeta disímil acero 304 y DF 2, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

- Probetas de acero tipo inoxidable 304 y acero inoxidable 420 END.

Probeta uno: unión con material de aporte E 309L-16, no se observaron imperfecciones en la unión o metal próximo al cordón.

Figura 36. **Probeta disímil de acero 304 y 420, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, uno**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Probeta dos: unión con material de aporte E 309L-16, no se observaron imperfecciones en la unión o metal próximo al cordón.

Figura 37. **Probeta disímil de acero 304 y 420, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

- Probetas de acero inoxidable 420 y acero 1018 END

Probeta uno: unión con material de aporte E 309L-16, fue posible apreciar una pequeña imperfección, debido a una inclusión de escoria en la última pasada, la cual al ser retirada dejó un poro cerca de la interfaz cordón metal base. Con la aplicación de líquidos penetrantes se ratificó la falta de profundidad del defecto, a pesar de verse una tendencia al contraste del tinte en el lado del acero 1018, no es una imperfección significativa. Esto significa que no es causal de rechazo, sin embargo, debe repararse.

Figura 38. **Probeta disímil aceros 420 y 1018, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, uno**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

Probeta dos: unión con material de aporte E 309L-16, no existen imperfecciones aparentes o de contraste con la utilización de líquidos penetrantes.

Figura 39. **Probeta disímil aceros 420 y 1018, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, dos**

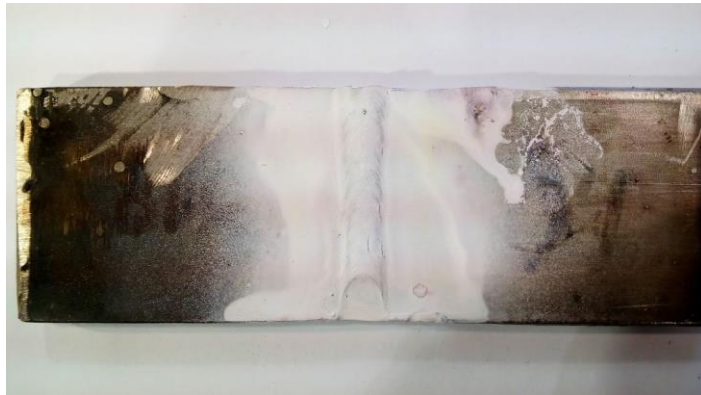


Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probetas de acero tipo inoxidable 304 y acero 1018 END.

Probeta uno: unión con material de aporte E 309L-16, no se aprecian imperfecciones en la unión o material base.

Figura 40. **Probeta disímil aceros 304 y 1018, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, uno**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

Probeta dos: unión con material de aporte E 309L-16, al igual que la probeta uno, no se aprecian imperfecciones en la unión o material base.

Figura 41. **Probeta disímil aceros 304 y 1018, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probetas de acero 1018 y acero DF 2 END.

Probeta uno: unión con material de aporte E 309L-16, se aprecia un pequeño poro al lado del cordón, no representa una imperfección mayor, y no es causal de rechazo, se reparó por medio de esmerilado.

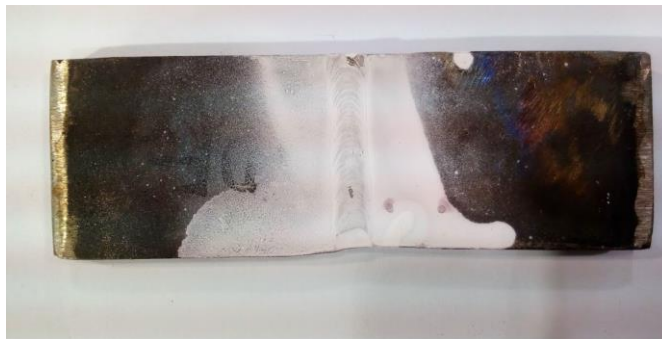
Figura 42. **Probeta disímil aceros 1018 y DF 2, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, uno**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

Probeta dos: unión con material de aporte E 309L-16, no se observaron imperfecciones en la unión o metal próximo al cordón.

Figura 43. **Probeta disímil aceros 1018 y DF 2, unión 309L-16, con END de líquidos penetrantes, dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Resultados de ensayos de tracción a probetas de aceros disimiles.

Con la finalidad de realizar un análisis del comportamiento mecánico de las probetas obtenidas de soldaduras de aleaciones de aceros disimiles, se realizó un ensayo de tracción a seis probetas, correspondientes a las combinaciones propuestas.

Los ensayos de tracción fueron realizados en las instalaciones del Centro de Investigaciones de Ingeniería, de la Facultad de Ingeniería, ubicada en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala; las pruebas fueron desarrolladas específicamente en el área de metales, por medio de la orden de trabajo No. 38801 y el informe No.222-M. Los valores obtenidos y el análisis del comportamiento mecánico frente al ensayo de tracción se exponen a continuación en cada caso particular.

- Probeta de aceros disimiles acero tipo inoxidable 304 y acero inoxidable 420, material de aporte E 312-16, tracción.

La probeta mostró un esfuerzo a la ruptura de 492,81 MPa, cediendo en la parte más cercana a la ZAC, específicamente en el inicio de la transición del cordón y el material base del acero tipo inoxidable 420. La fractura muestra un comportamiento muy marcado a la fragilidad, es posible establecer lo siguiente: primero la resistencia del cordón aplicado muestra un relativamente bajo, según datos del fabricante este tiene una resistencia máxima de 754 Mpa. La fragilidad de la fractura mostrada, específicamente del lado del acero 420 se debió, posiblemente a la presencia de martensita durante el proceso de enfriamiento; la falla dio inicio en la parte externa hacia la interna, esto se debe a la posibilidad de un intercambio más brusco en la parte externa durante el enfriamiento de la soldadura, propiciando la aparición de estructuras duras y poco dúctiles.

Figura 44. **Falla en probeta de aceros disimiles 304-420**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probeta de aceros disimiles acero tipo inoxidable 304 y acero con alto contenido de carbono DF 2, material de aporte E 312-16, tracción.

La fractura muestra presencia de zonas mixtas en la falla, es decir, con comportamiento dúctil muy pequeño, presente en el centro de la falla, y una marcada presencia de fragilidad en lo que resta de la fractura. Fue posible apreciar que la fractura tomó un comportamiento que sigue la forma del bisel, es posible ver unas delaminaciones en el centro de la falla.

La fractura sucedió en un valor 320,16 Mpa, cediendo en el lado del acero DF 2, esto se debió a la posibilidad de presencia de estructuras duras en el acero en las zonas próximas a la falla, específicamente en la ZAC. La particularidad de esta falla demuestra que, debido a la alta cantidad de contenido de carbono del acero DF 2, existió un temple localizado que fragilizó la porción de la junta soldada.

Figura 45. **Falla en probeta de aceros disimiles 304-DF 2**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probeta de aceros disimiles acero tipo inoxidable 304 y acero al carbono 1018, material de aporte E 312-16, tracción.

La fractura muestra un deslizamiento pronunciado hacia el acero 1018, con un ángulo aproximado de 45 grados. La falla ocurrió en una zona cercana al cordón con una estricción aparente en el lado del acero 1018, esto debido a la ductilidad elevada del metal base. Es posible observar una decoloración del acero 1018 posible efecto térmico del aporte de calor en la soldadura. La fractura tuvo lugar en un valor de 615,43 Mpa. Se puede apreciar una fractura del tipo dúctil en el contorno de la falla del lado del acero 1018, con la presencia de zonas muy marcadas con forma de hoyuelos en la parte central de la misma.

Figura 46. **Falla en probeta de aceros disimiles 304-1018**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probeta de aceros disimiles acero inoxidable 420 y acero al carbono 1018, material de aporte E 312-16, tracción.

La fractura sucedió de forma localizada en el límite del cordón y la probeta de acero inoxidable 420. El tipo de falla es de características frágiles con su

inicio en las partes externas orientada hacia el interior de la fractura, es de mencionar que esto se debió al intercambio más brusco en la parte exterior de la soldadura en contra parte con la interior, provocando la aparición de estructuras duras en el acero, y por la naturaleza del acero inoxidable 420, la presencia de martensita por su alta templabilidad. El límite de ruptura para la probeta fue de 585,08 Mpa.

Figura 47. **Falla en probeta de aceros disimiles 420-1018**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probeta de aceros disimiles acero inoxidable 420 y acero de alto carbono DF 2, material de aporte E 312-16, tracción.

Fue posible apreciar una fractura del tipo mixta, la zona frágil aparente en la parte externa, con cierta orientación a la forma del bisel. Es de apreciar una posible delaminación y presencia de zonas duras en la parte del acero DF-2, donde ocurrió la ruptura. La falla ocurrió por una marcada presencia de estructuras duras en la zona mixta del cordón, propio del comportamiento de un acero con alto contenido de carbono cuando es expuesto a una alta temperatura como lo es el proceso de soldadura. La fractura ocurrió a 371,13 MPa.

Figura 48. **Falla en probeta de aceros disimiles 420-DF 2**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probeta de aceros disimiles acero al carbono 1018 y acero de alto carbono DF 2, material de aporte E 312-16, tracción.

La probeta fracturó a 131,97 Mpa, lo cual se considera muy bajo, el tipo de falla es de comportamiento frágil orientada hacia el sentido del bisel, fue posible observar un leve comportamiento dúctil en dirección central de la falla, la fractura ocurrió en el lado del acero DF 2, no fue posible apreciar algún tipo de estricción en el lado del acero 1018. La presencia de estructuras duras en el acero DF 2 por su alta cantidad de contenido de carbono y la aplicación de alta temperatura durante el proceso de soldadura propicio la aparición de las mismas, dándole un comportamiento de fragilidad a la unión.

Figura 49. **Falla en probeta de aceros disimiles 1018-DF 2.**



Fuente: elaboración propia, edificio M 112, ITUGS.

- Análisis de probetas ensayadas por dobléz.

Una prueba de dobléz se utiliza para comprobar la ductilidad en las soldaduras por medio de un ensayo destructivo. La AWS expone en el código B 4.0 que se considera dúctil a una soldadura que cumpla con un dobléz de 180 grados sin la presencia de fisuras, delaminaciones o fracturas visibles. Como es posible de apreciar en las probetas ensayadas, esto no fue posible de obtener, debido a la existencia de baja ductilidad en los materiales base ensayados, además de la presencia de estructuras duras que se formaron durante la realización de soldadura. En los párrafos que siguen, se describirá el análisis de las probetas dobladas en cada unión disímil, generalizando los cordones de soldadura son sanos y de calidad, por lo que se descarta como fuente posible de fallo la unión y el metal de aporte empleado, es de mencionar que una gran cantidad de las fracturas ocurrió en el límite del cordón y la ZAC. Las fallas en las probetas ensayadas se deben a las cualidades de disimilitud en sus características químicas y estructura metalográfica de los materiales base y material aporte empleados para las juntas experimentales.

- Probeta unión acero 1018 y acero tipo inoxidable 304, ensayo de dobléz.

Los materiales base fueron acero de tipo al carbono 1018 y acero tipo inoxidable 304, el metal de aporte fue E 309 L-16, las piezas se prepararon con doble bisel y la soldadura fue una unión completa. Como se aprecia en la figura, la fractura ocurre del lado del acero 1018 después de doblar a un ángulo de 90 grados, la separación de la junta soldada se debe a la naturaleza disímil de los metales seleccionados y el electrodo seleccionado, siendo también diferentes las características mecánicas lo que ocasiona la carencia de ductilidad en la junta. Es de mencionar que difícilmente la probeta fallaría en el lado del acero 304, ya que el metal de aporte es también austenítico, por lo que las propiedades mecánicas serán similares.

Figura 50. **Probeta doblada de aceros disimiles 1018 y 304**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probeta unión acero 1018 y acero inoxidable 420, ensayo de doblado.

El acero 1018 y el acero inoxidable 420 fueron los materiales base en la soldadura de unión disímil, como material de aporte se utilizó E 309 L-16 de estructura resultante austenítica. Para esta probeta el ángulo de doblado fue de 48 grados, fracturando en el lado del acero 420, del análisis e interpretación de esta fractura es posible mencionar que la falla ocurre, debido a la presencia de carburos y estructuras duras en la interfaz del cordón y el material base del acero 420. Las características de composición química y estructura martensítica del acero inoxidable propiciaron la fragilidad a la unión.

Figura 51. **Probeta doblada de aceros disimiles 1018 y 420**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probeta unión acero tipo inoxidable 304 y acero inoxidable 420, ensayo de dobléz.

El ángulo obtenido de la prueba de dobléz para la probeta de aceros inoxidables 304 y 420 fue de 22 grados, esto muestra una ductilidad muy escasa en la unión, la razón de esto posiblemente se debe, como en la probeta anterior, a la precipitación de estructuras duras y por consiguiente de alta fragilidad. La soldadura se realizó con material de aporte E 309 L-16 y fracturó del lado del acero inoxidable 420, de estructura martensítica, como es posible de apreciar en la figura cincuenta y dos.

Figura 52. **Probeta doblada de aceros disimiles 304 y 420**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probeta unión acero inoxidable 420 y acero para herramientas DF 2, ensayo de doblez.

Las características propias del acero para herramientas DF 2 de fácil templado y baja ductilidad, hicieron de esta unión disímil una junta con poca capacidad de asimilar la prueba de doblez, lo mencionado anteriormente se demuestra con los 15 grados obtenidos durante el ensayo. Los materiales base utilizados en la unión fueron acero inoxidable 420 y acero para herramientas DF 2, se utilizó electrodo E 309 L-16 de estructura metalográfica resultante austenítica. La fractura ocurrió del lado del acero DF 2.

Figura 53. **Probeta doblada de aceros disimiles 420 y DF 2**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probeta unión acero 1018 y acero para herramientas DF 2, ensayo de dobléz.

A pesar que la unión disímil analizada está conformada por un acero 1018 de alta ductilidad, la junta solo soportó un ángulo en la prueba de dobléz de 20 grados, la presencia de estructuras duras y por lo mismo frágiles en el acero DF 2 propicio la aparición prematura de la fractura. Como material de aporte se usó el electrodo E 309 L-16.

Figura 54. **Probeta doblada de aceros disimiles 1018 y DF 2**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Probeta unión acero tipo inoxidable 304 y acero para herramientas DF 2, ensayo de dobléz.

Con 16 grados obtenidos de la prueba de dobléz, la probeta de acero tipo inoxidable 304 y acero para herramientas DF 2, muestra un comportamiento de mucha fragilidad, fracturando en el lado del acero DF 2, como se ha

mencionado en los análisis previos, esto se debe a la posibilidad de la aparición de estructuras duras en el acero por la aplicación de calor durante el proceso de soldadura. El material de aporte E 309L-16 fue el utilizado para la unión disímil.

Figura 55. **Probeta doblada de aceros disimiles 304 y DF 2**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12, ITUGS.

- Análisis metalográfico a probetas de soldaduras de aceros disimiles.

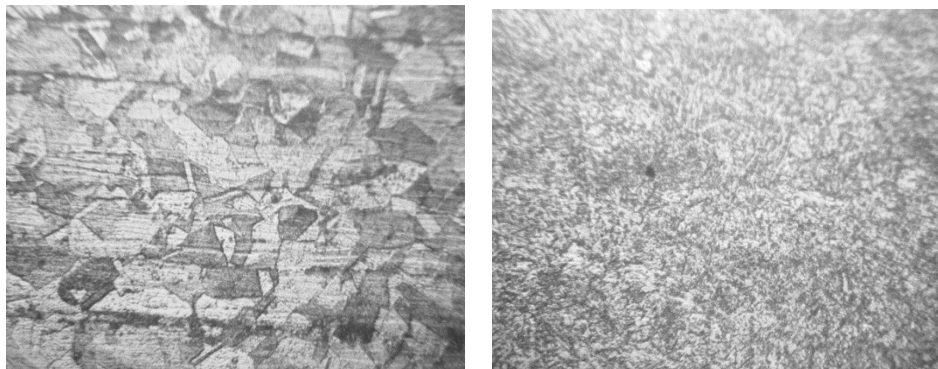
Según pudo observarse, durante la ejecución de los procesos propuestos, se obtienen diferentes estructuras metalográficas para los diferentes tipos de soldadura, ya que este proceso afecta de manera directa la forma, orientación y tipo de las mismas, debido al efecto termodinámico de la transformación del acero. Las estructuras de los metales seleccionados sufren cambios, los cuales de forma directa afectan las propiedades de la soldadura, lo mismo sucede con las características mecánicas y la capacidad de resistir a la corrosión en la soldadura.

El análisis metalográfico, de manera sintetizada, proyecta la interpretación de micrográficas obtenidas en secciones longitudinales de las probetas ensayadas para las diferentes uniones disimiles antes descritas.

- Análisis metalográfico de probeta de aceros disimiles, acero de tipo inoxidable 304 y acero tipo inoxidable 420.

La unión disímil involucra la interacción de un acero inoxidable tipo austenítico 304, y un acero inoxidable del tipo martensítico 420, el metal de aporte utilizado fue E 309L-16 de características estructurales austeníticas. La primera figura muestra el material base del lado izquierdo del acero tipo 304 y del lado derecho del acero tipo 420, es claro de apreciar la diferencia de su estructura, por un lado austenita, orientada en desniveles, lo que da como resultado una variación en los claros y oscuros de la estructura; y por el otro lado una de martensita revenida, propia del acero inoxidable martensítica.

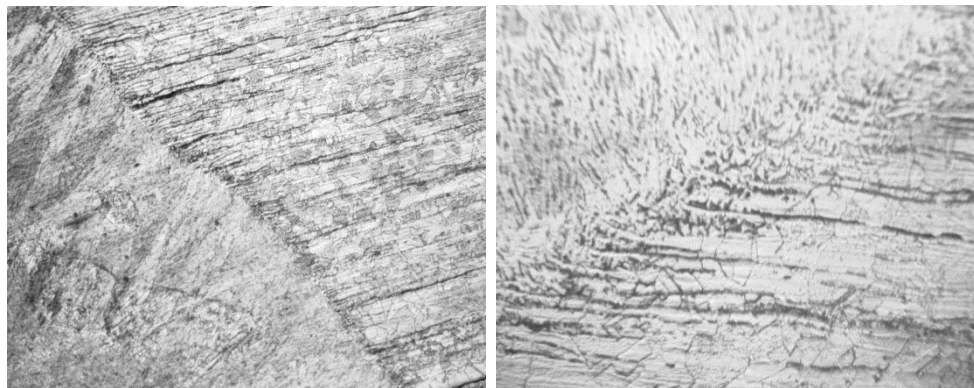
Figura 56. **Aceros inoxidables 304 y 420, ataque con reactivo uno, observación 400X**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

En la figura cincuenta y siete, se aprecia la frontera de la interacción del material base y el cordón de soldadura. Del lado izquierdo, se puede observar una metalografía a cien aumentos (100X), y del lado derecho, una a cuatrocientos aumentos (400X), esto con el material base tipo acero 304. Debido a la naturaleza del metal de aporte, tipo austenítico, y el metal base de tipo austenítico, también se puede apreciar la correcta unión sin variables estructurales, la variación ocurre en el tamaño del grano, siendo más propenso a tener mayor tamaño en el cordón con un crecimiento epitaxial propio en las soldaduras. Las zonas que son afectadas por el calor en esta área analizada muestran la aparición de granos austeníticos de menor tamaño, debido al efecto del proceso de cambio de fase, de estado líquido a sólido, en la soldadura.

Figura 57. **Límite de cordón de soldadura unión disimil 304-420, lado 304**



Ataque reactivo uno, lado izquierdo observación 100X y lado derecho observación 400X, la fusión es sana.

Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Por su parte, el cordón de soldadura muestra un tamaño de grano superior al de cualquiera de los materiales base, su característica más peculiar, aunque no es posible de observar más que a simple vista, es la forma de crecimiento

del grano, ya que esta crece de forma epitaxial, orientada del centro del cordón hacia los extremos del material base.

Figura 58. **Cordón de soldadura 304-420, observación 100X reactivo uno**

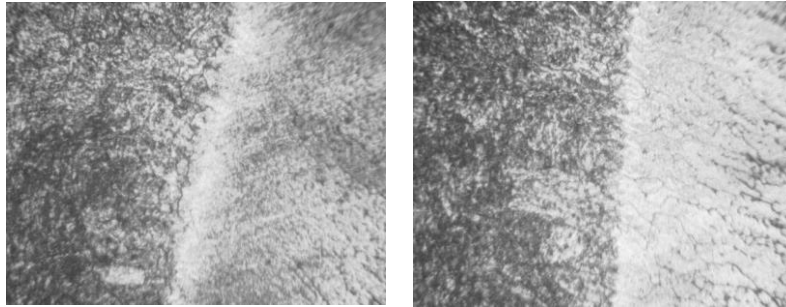


Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Observando la metalografía obtenida de la zona próxima al cordón en la unión 304-420, figura cincuenta y nueve, se aprecia del lado izquierdo el acero inoxidable martensítico, y del otro lado el cordón de soldadura.

La fusión del metal seleccionado y el metal del cordón se muestra sana y sin una variación tan súbita en el tamaño y forma en los granos próximos al final de la unión.

Figura 59. **Límite de cordón de soldadura unión disimil 304-420, lado 420, observación 400X, reactivo uno**



Fuente: elaboracion propia, edificio M 12 ITUGS.

En la ZAC del lado del acero tipo inoxidable austenítico, se muestra un comportamiento de cambio en el tamaño del grano, como se aprecia en la figura sesenta, los granos próximos al cordón poseen un tamaño menor, luego en la ZAC crecen para después mantener un tamaño estándar en la zona sin afectar, esto en cierta medida se debe a las características propias del acero tipo inoxidable austenítico para transferir calor.

Figura 60. **Secuencia de tamaño de grano austenítico unión 304-420, observación 400X reactivo uno**



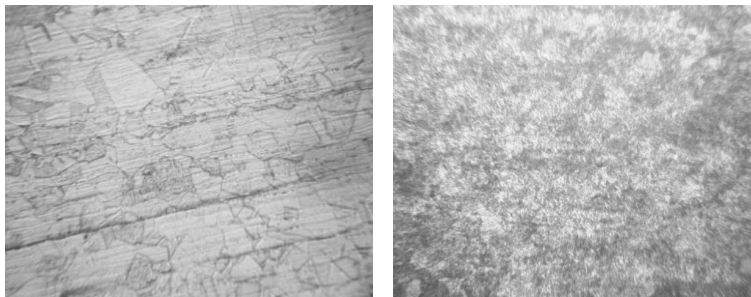
De izquierda a derecha; zona próxima al cordón, ZAC y zona sin afectar

Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

- Análisis metalográfico de probeta de aceros disimiles acero tipo inoxidable 304 y acero para herramienta DF 2.

La siguiente probeta a analizar incluye la interacción de acero inoxidable austenítico 304 y acero con contenido alto de carbono para herramientas DF 2, (AISI O1). Las estructuras metalográficas de los metales seleccionados son austenita para el acero 304 y una mezcla de perlita y cementita, más otros carburos para el acero para herramientas DF 2. Los carburos no son apreciables en blanco y negro, pero pueden ser reconocidos por medio del microscopio con tonalidades verdes, azules y naranjas bajo el efecto de luz incandescente. Para la revelación de las estructuras en la unión disímil fue necesario lo siguiente: primero atacar el lado del acero DF 2 con reactivo dos, debido a que este reactivo no reacciona para la revelación de estructuras en el acero 304; segundo observación bajo el microscopio del acero DF 2, tercero aplicación de reactivo uno en el cordón y el lado del acero 304, ya que este no permitía la revelación de estructuras en el acero DF 2; ocasionando la aparición prematura de núcleos de corrosión que se confunden con estructuras del acero con alto contenido de carbono. Por último, la observación de estructuras en el acero 304.

Figura 61. **Materiales base union 304-DF 2, observación 400X reactivo uno**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS

Al observar la micrografía, resultante de los límites de interacción del cordón y el material base para el acero inoxidable austenítico se observa un efecto simple de reducción de tamaño de grano en la frontera del cordón, la unión es adecuada y homogénea, característica propia de la compatibilidad química del metal soldado y su material de aporte. Véase la figura sesenta y dos.

Figura 62. **Límite de unión 304-DF 2, lado 304, observación 400X reactivo uno**

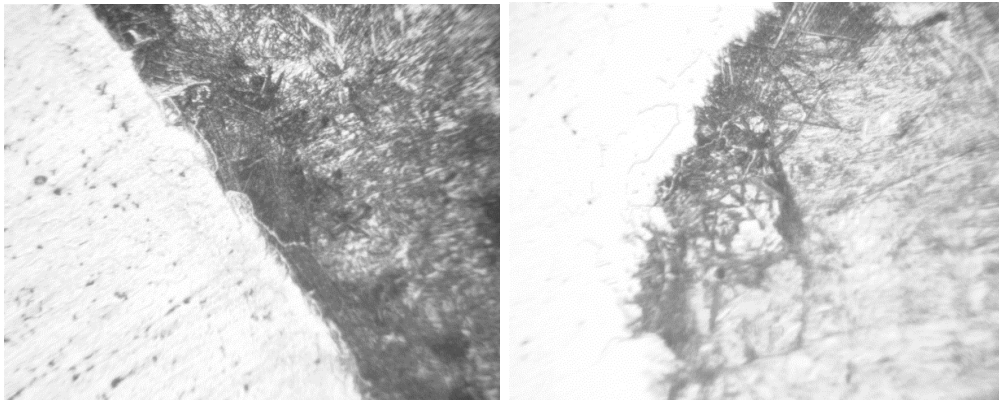


Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Un fenómeno muy característico de la aplicación de calor en los aceros de alto carbono es la aparición de martensita, estructura pocas veces deseable en el acero, debido a sus propiedades de alta dureza y baja tenacidad. En la probeta ensayada, la martensita aparece en el límite del cordón y el material base DF-2. A pesar de que la unión se aprecia sana, la aparición de la martensita reduce mucho la ductilidad de la soldadura, ratificando lo apreciado en el ensayo de doblé y tracción bajo los mismos efectos nocivos de la estructura en mención.

La martensita puede ser observada como una estructura tipo agujas o paja de color blanco, entrando en contraste con carburos oscuros como se muestra en la micrografía. La mayor cantidad de la misma es observada en el límite de la soldadura con el cordón, presente en la ZAC y reduciendo su presencia conforme se avanza hacia la zona sin afectar.

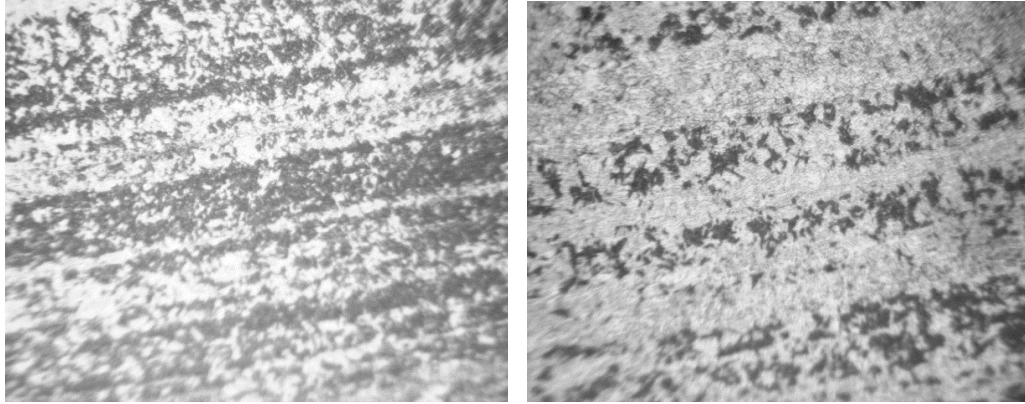
Figura 63. **Límite de cordón unión 304-DF 2, observación 400X, reactivo dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

La unión del lado del acero DF 2 muestra un comportamiento interesante, es posible ver un intercambio de los matices de color oscuro y blanco. Las áreas blanquecinas muestran la presencia de martensita y las oscuras presencia de carburos o cementita. Este comportamiento va en disminución hasta que se obtiene de nuevo la estructura propia del acero DF 2.

Figura 64. **ZAC unión 304-DF 2, observación 400X, reactivo dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Una aclaración que se hace en esta soldadura es que el metal de aporte usado en la soldadura fue níquel puro, esto dificultó la exposición de estructuras, no se obtuvieron resultados valederos para el análisis del cordón, debido a que ninguno de los reactivos disponibles reveló estructuras.

- Análisis metalográfico de probeta de aceros disimiles acero tipo inoxidable 304 y acero al carbono 1018.

La tercera probeta analizada incluye la interacción de acero tipo inoxidable 304 austenítico y acero 1018 de bajo carbono. Como material de aporte se utilizó electrodo E 309-16 de composición austenítica.

El proceso de revelación de estructuras sigue la misma secuencia expuesta en la probeta 304-DF 2, debido a la diferencia en las composiciones químicas de los materiales base, se hace necesario cuidar que el ataque con el reactivo no genere corrosión, sino más bien revelación estructural.

Como se ha mencionado en las uniones donde interviene acero tipo inoxidable 304, la unión es homogénea y sana, sin distorsiones aparentes, esto es debido a la compatibilidad de los elementos químicos presentes en el metal base y el metal de aporte.

Figura 65. **Límite de cordón unión 304-1018, observación 100X reactivo uno**



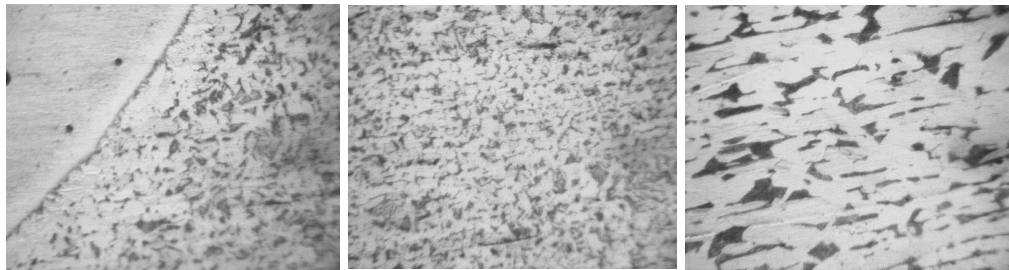
Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Del otro lado de la unión es posible observar un fenómeno de reducción del tamaño del grano de forma gradual, teniendo el menor tamaño el grano próximo al límite del cordón y aumentando conforme se acerca a la ZAC, hasta recuperar su tamaño estándar.

En esta metalografía se muestra una línea aparente de interacción del cordón y el metal base de menor cantidad de carbono, situación que podría delimitarse como una difusión de carburos hacia la zona con punto de fusión menor, es decir, el límite del cordón, no se aprecia una dilución muy amplia del metal de aporte en el material base, esto puede deberse al diferencial de

temperaturas de solidificación durante el proceso de enfriamiento, la necesidad de retención del calor por un período más amplio en la ZAC y la variación en las concentraciones químicas de los elementos presentes en la formación de la soldadura. Las zonas blancas muestran estructuras tipo ferrita y las zonas oscuras estructuras tipo perlita.

Figura 66. **Efecto de transición del tamaño de grano en ZAC y zona sin afectar unión 304-1018, observación 400X, reactivo dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

El cordón de esta unión muestra un comportamiento epitaxial, propio en las soldaduras, con un grano alargado, que crece en dirección del cordón hacia el material base. Es más significativa su apreciación a simple vista.

Figura 67. **Cordón unión 304-1018, observación 400X, reactivo uno**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

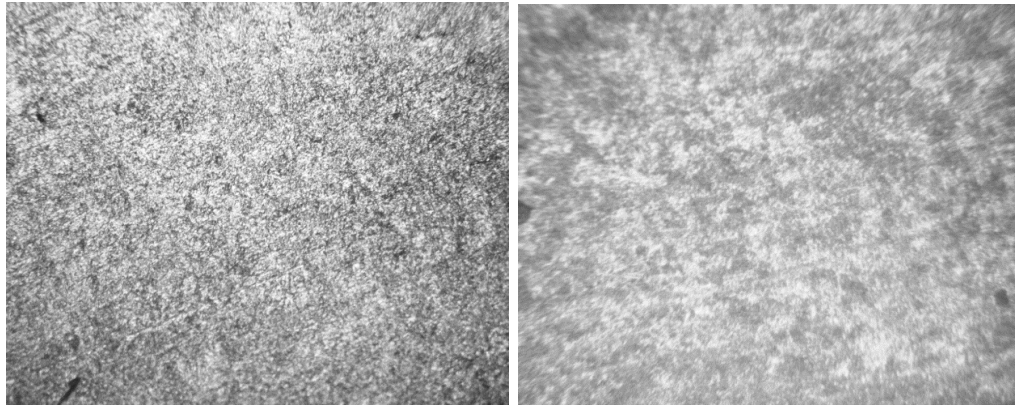
- Análisis metalográfico de probeta de aceros disimiles acero inoxidable 420 y acero para herramientas DF 2.

La unión disímil de acero inoxidable 420 martensítico y acero para herramienta DF 2, se consideró en la presente investigación como un espécimen, ya que no se logró unir por medio del material de aporte seleccionado para la junta soldada, níquel cien por ciento. En el cordón de raíz se desistió con la unión, debido a la aparición de una fractura muy significativa al centro y unas fisuras, demostradas con las pruebas de END aplicadas previamente. Sin embargo, se dejó la soldadura de estos dos aceros como una muestra para análisis posterior.

En la figura sesenta y ocho es posible diferenciar las estructuras de los aceros, debido a su naturaleza de mostrar colores bajo el microscopio, ya que a pesar de verse similares en blanco y negro, el acero DF 2, posee carburos los

cuales se muestran en una serie de tonalidades cambiantes de color, como se había expuesto anteriormente.

Figura 68. **Materiales base unión 420-DF 2**



Lado izquierdo 420, observación 100X, reactivo uno; lado derecho DF-2, observación 400X, reactivo dos.

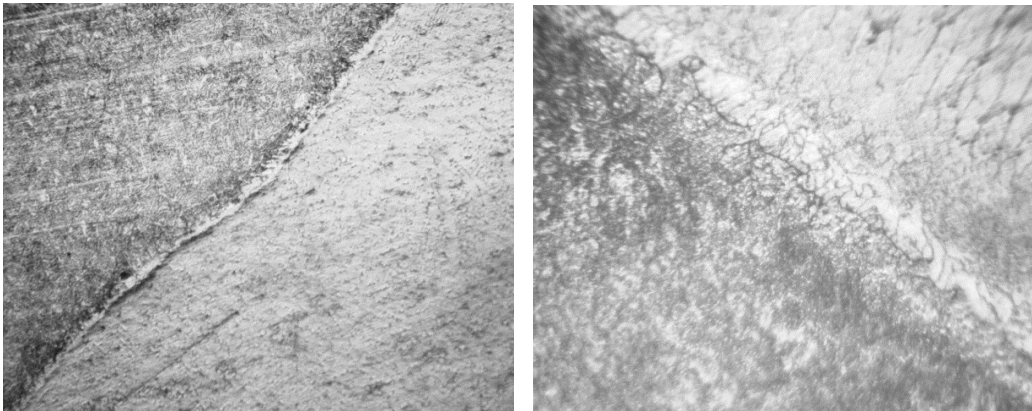
Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Para la revelación de estructuras se utiliza la misma técnica descrita anteriormente donde se involucran aceros de tipo inoxidables y aceros de tipo al carbono.

Debido a que solo se expuso la probeta a un cordón de soldadura sin completar la misma, se tiene una presencia inicial de martensita en el lado del acero DF 2, de color blanco, como se aprecia en la metalografía del lado izquierdo superior de la figura sesenta y nueve. El cordón se muestra en el lado derecho de la línea límite en la unión.

Los carburos se empiezan a ubicar de nuevo en el límite del cordón deteniendo de esta forma el avance de la difusión del material de aporte.

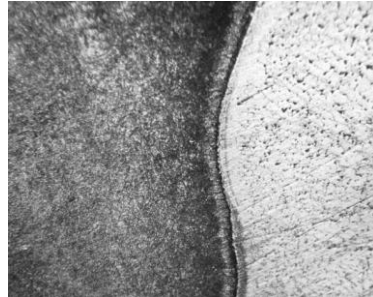
Figura 69. **Límite de cordón unión 420-DF 2, observación 100X y 400X, reactivo dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Del lado de la junta que tiene como material base al acero 420 se observa una barrera bien delimitada, posible producto de precipitación de compuestos tipo carburos de cromo o cementita, no se muestra dilución amplia, a pesar de que el metal de aporte tiene suficiente concentración como para reaccionar químicamente con los porcentajes de los materiales base. La práctica demuestra que no se logró fundir adecuadamente el cordón en la unión, se intentó también con un precalentamiento a 250 grados centígrados, sin obtener mejoría.

Figura 70. **Límite de cordón unión 420-DF 2, observación 100X, reactivo uno**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS

Por ser el cordón de soldadura de níquel puro, el reactivo seleccionado para el análisis metalográfico no logra revelar estructuras, a continuación se muestra la micrografía respectiva al cordón de la unión de raíz de los aceros 420 y DF 2, lo único apreciable es corrosión aparente por efecto de los ácidos del reactivo.

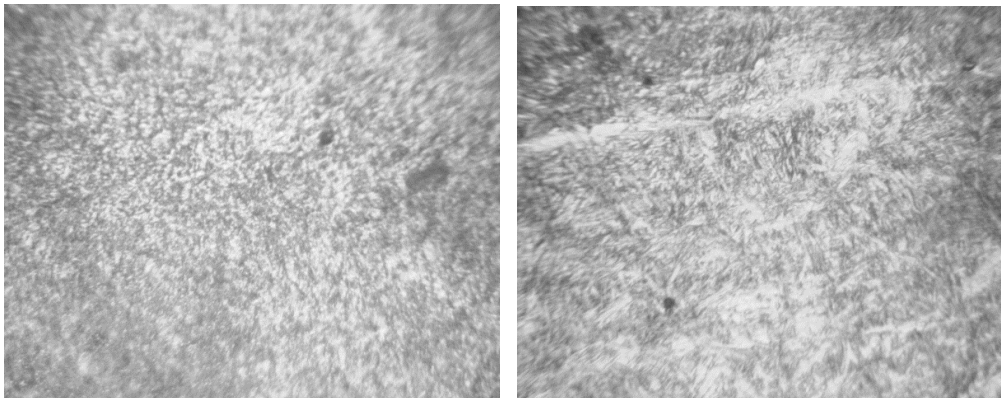
Figura 71. **Cordón de unión aceros 420 y DF 2, observación 100X, reactivo uno**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

En la figura setenta y dos, las zonas próximas a la soldadura afectadas por el calor es posible observar una serie de variaciones en la difusión de cementita en el acero inoxidable 420, lado izquierdo, y la aparición de martensita dispersa en el acero DF 2, lado derecho; la presencia de este tipo de estructuras metalográficas es posible que se deban a los efectos del proceso.

Figura 72. **Zonas afectadas por el calor, unión 420-DF 2, observación 400X, reactivo uno**

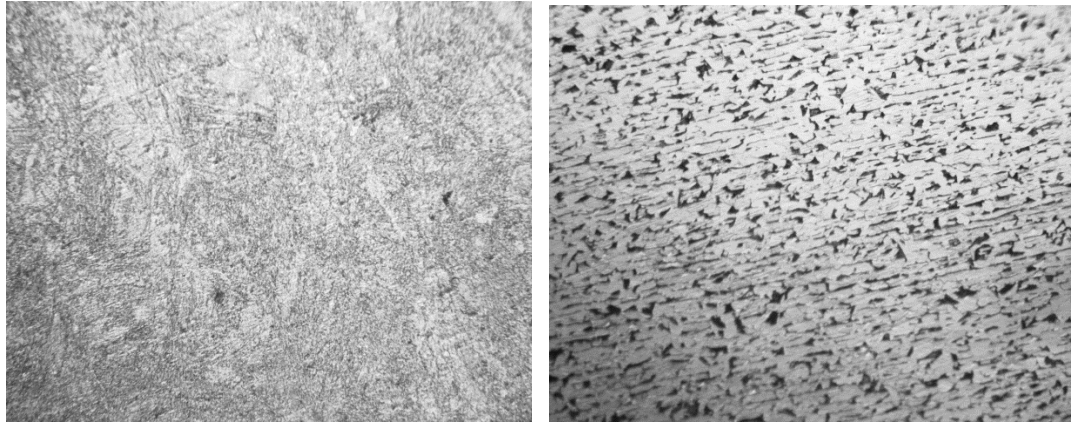


Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

- Análisis metalográfico de probeta de aceros disimiles acero inoxidable 420 y acero al carbono 1018.

La unión de acero inoxidable 420, tipo martensítico y acero de bajo carbono 1018, se realizó con la utilización de material de aporte E 309 L 16, siendo este de estructura austenítica. Los materiales base muestran estructuras típicas de cada acero, el inoxidable 420 de estructura martensítica, y el acero de bajo carbono, 1018 de estructura ferrítico-perlítica.

Figura 73. **Metales base acero 420 izquierda, acero 1018 derecha, observación 100X, reactivo uno y dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Figura 74. **Límite del cordón unión aceros 420-1018, observación 100X y 400X, reactivo dos**

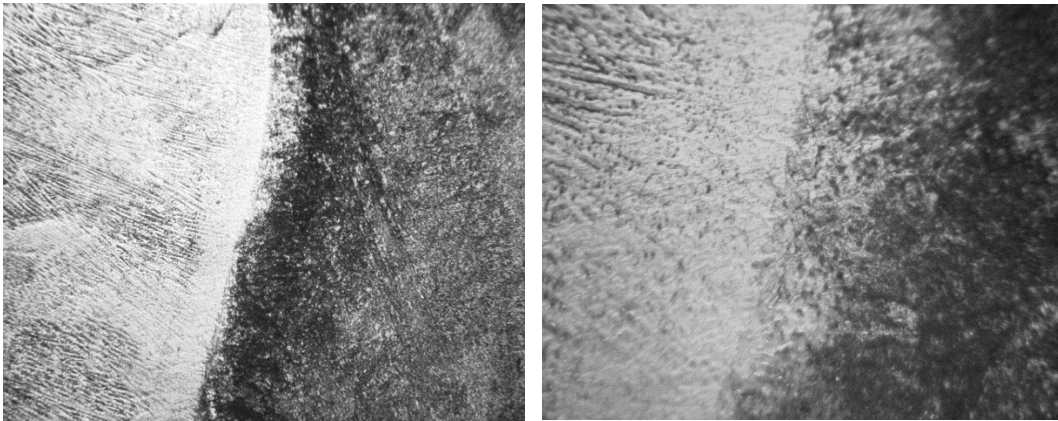


Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

La unión que presenta como material base al acero de tipo inoxidable 420, no muestra ningún tipo de precipitación extraña a la junta, sino solamente una

división bien definida entre el metal de aporte y el metal base, en tal sentido es posible apreciar que si existió una fusión y difusión bien adecuada.

Figura 75. **Límite de cordón unión 420-1018, observación 100X y 400X, reactivo uno**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

El cordón de esta unión muestra características estructurales de tipo epitaxial, con orientación del centro hacia los costados del bisel propio del material base. Por su naturaleza, la estructura presente del cordón es austenita. Al igual que las micrografías antes descritas para los cordones de soldadura, la mejor forma de apreciar las estructuras es a simple vista.

Figura 76. **Cordón de unión 420-1018, observación 100X, reactivo uno**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Como particularidad de esta unión, se puede apreciar un cambio en el tamaño del grano de forma progresiva con forme se aleja de la zona más próxima al cordón hacia el metal base del acero 1018, al ver la figura es posible apreciar este detalle, característica singular de los efectos de la distribución calórica.

Figura 77. **ZAC acero 1018, unión 420-1018, observación 400X, reactivo dos**

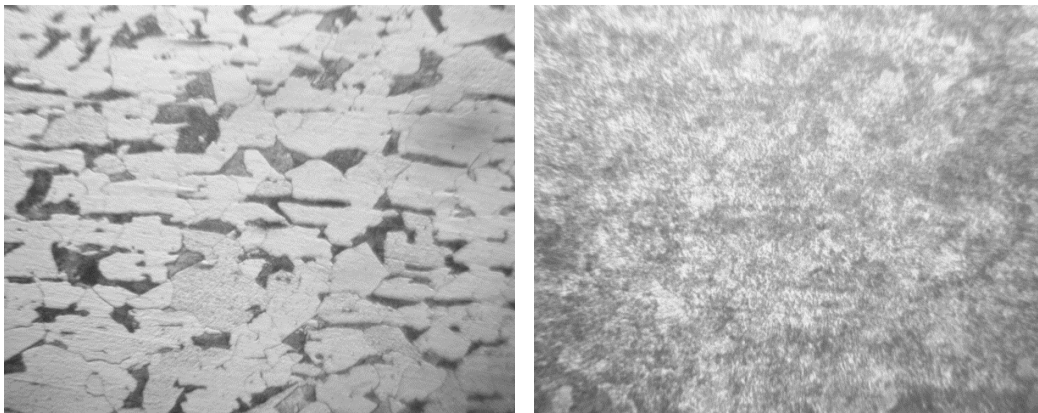


Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

- Análisis metalográfico de probeta de aceros disimiles acero al carbono 1018 y acero para herramienta DF 2.

Los materiales base que son parte de la junta de soldadura a analizar son aceros al carbono, los cuales presentan para el acero 1018 bajo contenido de carbono y para el acero DF 2 alto carbono, sus estructuras consisten en matriz ferrítica, de color blanco en la figura setenta y ocho, con algunas inclusiones de perlita, de color oscuro para el acero 1018. Para el acero DF 2, sus estructuras consisten en una matriz de cementita de color oscuro con inclusiones ferríticas de color blanco. Material de aporte E 309 L16 de estructura austenítica.

Figura 78. **Metales base unión 1018-DF2, observación 400X, reactivo dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

En la figura setenta y nueve, observando el límite en la junta soldada del lado de interacción del acero 1018, se puede observar una frontera marcada como en los casos anteriormente analizados, efectos similares a la disminución del tamaño del grano y su posterior crecimiento conforme se aleja de la zona de la soldadura afectada por el calor.

Figura 79. **Límite de cordón unión 1018-DF 2, observación 400X, reactivo dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

En la figura ochenta, en el lado del acero DF 2, se observa particularidades ya apreciadas anteriormente en otras de las uniones disimiles, la presencia de martensita. Una fusión bastante adecuada por la característica de dilución observada es posible de valorar en la unión.

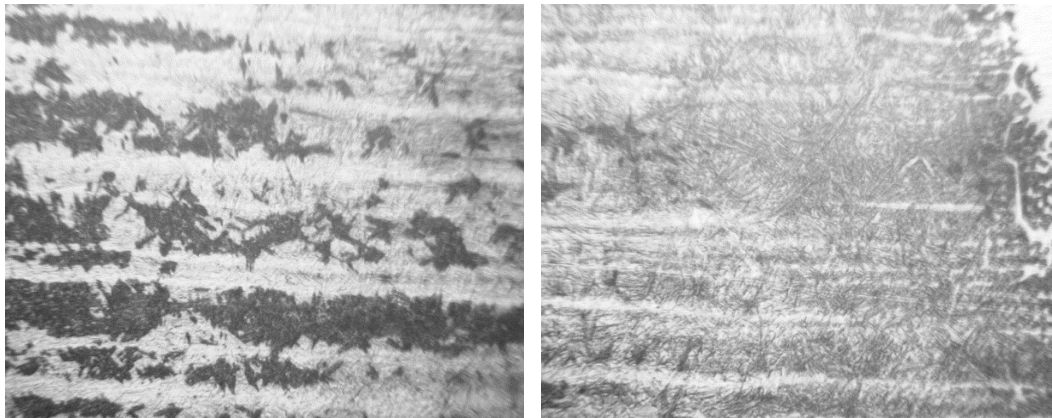
Figura 80. **Límite de cordón unión 1018-DF 2, lado DF 2, observación 400X, reactivo dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

En la ZAC del lado que pertenece al acero DF 2, se puede apreciar una baja presencia de martensita conforme se aleja hacia la zona sin afectar. La martensita, de color blanco y los carburos precipitados, de color negro, son observados en la figura ochenta y uno.

Figura 81. **ZAC unión 1018-DF2, lado DF 2, observación 400X, reactivo dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

Debido a que la revelación de estructuras de esta probeta requirió el reactivo dos, la revelación del cordón dañaba los límites de interacción del metal seleccionado y el metal de aporte con el uso del reactivo uno, con mayor efecto de velocidad de corrosión en los metales propios en la soldadura estudiada. Esto motivó la no presencia de una micrografía del cordón para la probeta.

En la figura ochenta y dos, la ZAC del metal tipo acero al carbono 1018, muestra un comportamiento de reducción cerca del límite del cordón y aumento progresivo del tamaño de grano hacia la zona sin afectar del metal que se

soldo. Para la investigación presente es una particularidad en cada unión donde interactúa el acero 1018.

Figura 82. **Secuencia de la ZAC en la unión 1018-DF 2, observación 400X, reactivo dos**



Fuente: elaboración propia, edificio M 12 ITUGS.

CONCLUSIONES

1. Se diseñó una metodología de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido para la adecuada unión de aleaciones de aceros disimiles y resultó satisfactoria para los fines propuestos. (Ver anexo 1).
2. Se establecieron los parámetros que influyen en el proceso de soldadura de aleaciones de aceros disimiles, siendo estos: la composición química de los metales base, tipo de material de aporte, efectos del calor en la soldadura, preparación de la junta y la técnica del soldador.
3. Por medio de una metodología práctica, se determinó los procedimientos que involucran la inspección de las microestructuras resultantes de las soldaduras de aleaciones de aceros disimiles.
4. Utilizando normativas para ensayos, se evaluaron las propiedades mecánicas ductilidad y resistencia, de las probetas resultantes de las uniones soldadas de aleaciones de aceros disimiles, donde se obtuvo resultados ligeramente diferentes a las propiedades mecánicas de los elementos soldados, dando propiedades intermedias entre los materiales base y la soldadura.

RECOMENDACIONES

1. Se requiere la aplicación de tratamientos térmicos post soldadura, con la finalidad de mejorar la metodología propuesta de soldadura de aleaciones de aceros disimiles, con esto se podrían obtener propiedades mecánicas más homogéneas.
2. Se debe utilizar materiales base y de aporte que cuenten con certificaciones internacionales aceptables, esto para incrementar la fiabilidad y certeza en las propiedades mecánicas resultantes de las uniones soldadas.
3. Es necesario analizar las características de los reactivos químicos más aptos para la revelación de las estructuras metalográficas obtenidas en las uniones soldadas de aleaciones de aceros disimiles, lo que mejoraría la metodología propuesta para el análisis metalográfico de las juntas soldadas.
4. Con el incremento en la cantidad de probetas ensayadas, puede mejorarse el análisis de las propiedades mecánicas resultantes de las uniones soldadas disimiles.

ANEXOS

Anexo 1.

Metodología de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido para aleaciones de aceros disimiles:

1. Preparación de los biseles
2. Limpieza de los biseles (eliminación de restos de corrosión si existiera, por medio de discos abrasivos o papel de lija)
3. Selección de la corriente (para estas muestras en particular se utilizó una corriente que varió de 90 a 100 amperios dependiendo de las necesidades del soldador).
4. Aplicación de placas de soporte laterales, respetando el paso de raíz (evitan el alabeo durante el proceso de unión).
5. Creación del canal de soldadura (facilita el inicio y fin del cordón, evitando presencia de poros por arranque y finalización del arco).
6. Inicio de la soldadura (debido al espesor de la muestra soldada, no es posible unir las piezas en una sola pasada, se debe hacer por medio de múltiples pasadas para rellenar de mejor manera el espesor establecido).
7. Primera pasada, incluye la deposición de un cordón que luego se limpiará por medio de un disco abrasivo y una pulidora (esta limpieza busca eliminar residuos de escoria que podrían quedar atrapados en el cordón y luego debilitar la unión soldada; es también de mencionar que, debido a que esta es la primera pasada, todo lo insoluble que quede atrapado en esta fase no se verá al final de forma simple, tampoco por medio de END como tintes penetrantes, se requerirá de ensayos más especializados para

la detección de estas imperfecciones, razón por la que la limpieza en esta fase es sumamente importante y trascendental).

8. Segunda pasada, relleno, con la metodología descrita anteriormente, se arrastra la gota de la fusión por medio del charco sin oscilar (en esta fase se depositan dos cordones paralelos, haciendo canales entre cada uno de ellos y el material de aporte, su finalidad es generar un espacio más adecuado para la recepción del siguiente cordón, mejorando con esto la calidad de la soldadura además de limpiar de nuevo la posible escoria que haya quedado atrapada durante la capa anterior).
9. Tercera pasada, fusión completa de la junta, en esta parte si es posible oscilar levemente, ya que el mayor depósito se realizó en la pasada previa (esta pasada es la final y requiere sumo control en la penetración y velocidad de avance del soldador).
10. Tiempo de espera para enfriamiento de la junta soldada (puede variar de 20 a 30 minutos).
11. Remoción de las placas de soporte de inicio y fin de cordón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar, R. (2014), Fundamentos básicos de la corrosión y aceros inoxidables. INDESA-SIE.
2. Aguilar, R. y Celada, S. (2012). Soldabilidad del Acero AISI 1045 con Electrodo E8018B2 y E9018B3. *Revista Científica del Centro de Investigaciones de Ingeniería, FIUSAC.*
3. Aguilar, R. y Soria, E. (2004), Metalografía y ensayos no destructivos como apoyo al análisis y corrección de fallas en materiales y equipo. Primer congreso de Ingeniería Mecánica Facultad de Ingeniería, USAC.
4. Aguilar, R y Zacarías, M. (2016), Estructuras metalográficas de probetas cementadas de acero ASSAB 7210 y BOHELER E230, y su relación con su dureza resultante. proyecto de investigaciones metalúrgicas FIUSAC, *Revista de Escuela de Post grado FIUSAC.*
5. American Iron and Steel Institute, NIDI, (1988), *Welding of Stainless Steels and Other Joining Methods.*
6. American Society for Metals Handbook Volume 1 (2005), *Properties and Selection: Irons, steels, and High Performance Alloys.*
7. American Society for Metals Handbook Volume 6 (2006), *Welding, brazing and soldering.*

8. American Society for Metals Handbook Volume 9 (1998) *Metallography and Microstructures*.
9. Avery, R. (1991). *Guidelines for welding dissimilar metals*.
10. Avery, R. (1991). *Pay attention to dissimilar metal welds, guidelines for welding dissimilar metals*. Ontario, Canada: Chemical Engineering Progress.
11. American Welding Society (2000), *Welding Inspection Handbook*.
12. American Welding Society (1999), *Guide for the nondestructive examination of welds*.
13. Briones, R., Ruiz, A., Rubio C. y Carreón, H. (2013) Caracterización microestructural y mecánica de una soldadura disímil de aceros inoxidables 316L/ AL-6XN. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 34 (2), 306-315.
14. Celada, E. (2015), Ensayos de Soldadura al Arco con Electrodo Revestido en Acero Inoxidable Austenítico AISI 304. Escuela de Estudios de Postgrado Facultad de Ingeniería USAC.
15. Celada, E & Aguilar, R. (2013). *Soldabilidad del acero AISI 1045 con electrodos E8018B2 y E9018B3*. FIUSAC (1) (4), 7-13.

16. García, A., Salas, R., Centeno L. y Velásquez A. (2011) Metalurgia de uniones soldadas de aceros disímiles (ASTM A420-A537) y comportamiento mecánico ante cargas monotónica y cíclica. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32 (1), 36-48.
17. Jeffus, L. (2009). *Soldadura principios y aplicaciones*. Madrid, España: Paraninfo.
18. Marulanda, A., Luddey, J., Burbano, V. y Peláez, J. (2013). Análisis de Soldabilidad de Aceros Inoxidables con Aceros de Medio y Bajo Carbono por SMAW. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 22 (35), 91-100.
19. Mvola, B., Kah P. y Martikainen, J. (2013). Dissimilar ferrous metal welding using advanced gas metal arc welding processes. *Rev. Advanced Material Science*, (38), 125-127.
20. Norma ASTM E 3-01, (2001), Guía estándar para la preparación de especímenes metalográficos.
21. Norma ASTM E 8M-04, (2004), Método estándar para la prueba de tensión de materiales metálicos.
22. Norma ASTM E 190-92, (1992), Método estándar para la prueba de doblez guiada para la comprobación de la ductilidad en las soldaduras.
23. Norma ASTM E 165-02, (2002), Método estándar para la examinación por líquido penetrante.

24. Norma ASTM E 1444-01, (2001), Práctica estándar para la examinación por partículas magnéticas.
25. Norma AWS D1.1 (2010), Código de Soldadura Estructural-Acero.
26. Olmos, M., Martínez, K. y Unfried, J. (2014) Efecto del ciclo térmico sobre la microestructura de la zona afectada térmicamente de juntas soldadas de aceros inoxidable disímiles obtenidas por el proceso SMAW. *12ava Conferencia latinoamericana y del caribe sobre ingeniería y tecnología*, Guayaquil, Ecuador.
27. Olson L. (1984), *Prediction of austenitic weld metal microstructure and properties*.
28. Ospina R., Aguirre H. y Parra H. (2007) Soldabilidad en aceros inoxidable y aceros disímiles. *Scientia et Technica*, 13 (34), 273-278.
29. Ruiz I. (2011). Consideraciones para trabajar acero inoxidable, parte II soldadura. *Revista Metal Actual*, (20). 18-24.
30. Taban E., Deleu E., Dhooge A. y Kaluc E. (2008), *Evaluation of dissimilar welds between ferritic stainless steel modified 12% Cr and carbon steel S355*. *Rev. Welding Journal* 87, 291-297.