



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

**ENSAYOS DE SOLDADURA AL ARCO CON ELECTRODO
REVESTIDO EN ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304**

Estuardo Santiago Celada Rios

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

Guatemala, mayo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ENSAYOS DE SOLDADURA AL ARCO CON ELECTRODO
REVESTIDO EN ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ESTUARDO SANTIAGO CELADA RIOS

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

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, MAYO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL I	
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADORA	Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
EXAMINADOR	Ing. César Augusto Akú Castillo
EXAMINADOR	Ing. Pedro Miguel Agreda Girón
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. APT-2015-025

El Decano 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 Postgrado, al Trabajo de Tesis de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **“ENSAYOS DE SOLDADURA AL ARCO CON ELECTRODO REVESTIDO EN ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304”**, presentado por el Ingeniero Mecánico **Estuardo Santiago Celada Ríos**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Ángel Roberto Sic García".

Ing. Ángel Roberto Sic García
DECANO

Guatemala, Mayo de 2015.



Universidad de San
Carlos
De Guatemala

APT-2015-025



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

El 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 dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **“ENSAYOS DE SOLDADURA AL ARCO CON ELECTRODO REVESTIDO EN ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304”** presentado por el Ingeniero Mecánico **Estuardo Santiago Celada Ríos** apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“DID Y ENSEÑAD A TODOS”

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Murphy Olympo Paiz Recinos', written over a large, hand-drawn oval.

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Director

Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Mayo de 2015.

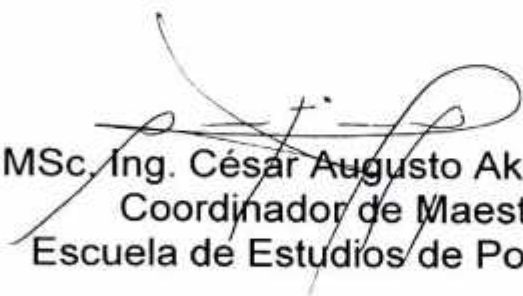
Cc: archivo
/la



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

Como Coordinador de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento y revisor del Trabajo de Tesis titulado **“ENSAYOS DE SOLDADURA AL ARCO CON ELECTRODO REVESTIDO EN ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304”**, presentado por el Ingeniero Mecánico **Estuardo Santiago Celada Ríos**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


MSc. Ing. César Augusto Akú Castillo
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Mayo de 2015.

Cc: archivo
/la



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

Como Revisor de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento del Trabajo de Tesis titulado **“ENSAYOS DE SOLDADURA AL ARCO CON ELECTRODO REVESTIDO EN ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304”**. Presentado por el Ingeniero Mecánico **Estuardo Santiago Celada Ríos**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Pedro Miguel Agreda ~~Giron~~
Revisor(a)
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Mayo de 2015.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la vida y sabiduría. A Él todo el honor y gloria.
Mis padres	Por su apoyo. Su amor será siempre mi inspiración.
Dr. Roberto Aguilar Rivas	Por todo el apoyo y conocimientos que me brindó para la elaboración de este trabajo.
Mis hermanas	Por todo el apoyo y su amor.
David Franco, Axel Salazar y Santos Barrientos	Por haber contribuido con la investigación.
Ing. Hugo Ramírez	Por haber apoyado el presente trabajo.
USAC	Por los conocimientos adquiridos.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por la oportunidad de realizar mi trabajo de graduación y los conocimientos adquiridos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XVII
ANTECEDENTES	XIX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XXIII
JUSTIFICACIÓN	XXVII
OBJETIVOS	XXIX
ALCANCES	XXXI
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XXXIII
INTRODUCCIÓN	XXXVII
1. ACEROS INOXIDABLES	1
1.1. Tipos de aceros inoxidables	3
1.1.1. Aceros inoxidables martensíticos	4
1.1.2. Aceros inoxidables ferríticos	5
1.1.3. Aceros inoxidables austeníticos	7
1.1.4. Aceros inoxidables dúplex	9
1.2. Corrosión del acero inoxidable	9
1.2.1. Sensitización (corrosión intergranular)	10
1.2.2. Corrosión Corrosión bajo tensión (SCC, <i>stress corrosion cracking</i>)	13
1.2.3. Corrosión por picaduras, cavidades y ataque microbiológico	15
1.3. Soldabilidad de los aceros inoxidables	15

1.3.1.	Defectos de soldadura	18
1.3.1.1.	Formación de fase	18
1.3.1.2.	Fisuración en caliente	19
2.	ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304	21
2.1.	Composición química	22
2.2.	Características físicas, metalúrgicas y mecánicas del acero inoxidable AISI 304.....	22
2.3.	Soldabilidad del acero inoxidable AISI 304	23
2.3.1.	Electrodos para el proceso SMAW.....	24
2.3.2.	Defectos en la soldadura de acero inoxidable AISI 304.....	29
3.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	33
3.1.	Identificación del material base	38
3.2.	Análisis microscópico	40
3.3.	Tamaño de muestra.....	41
3.4.	Parámetros	43
3.5.	Procedimientos.....	44
4.	RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO EXPERIMENTAL....	47
4.1.	Fase experimental	47
4.1.1.	Inspección de muestras.....	47
4.1.2.	Ensayos de dureza.....	50
4.1.3.	Ensayo de líquidos penetrantes	54
4.1.4.	Ensayo de resistencia a la corrosión	55
4.1.4.1	Resultados obtenidos.....	60

5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
5.1.	Inspección visual.....	67
5.2.	Ensayo de líquidos penetrantes	68
5.3.	Ensayo de dureza	68
5.4.	Ensayo microscópico de ataque con ácido oxálico	69
5.5.	Consideraciones para la aplicación del método propuesto	71
6.	APLICACIONES DEL MÉTODO PROPUESTO	73
6.1.	Reparación y soldadura de tubería de 76,2mm (3 in) para planta de tratamiento aguas residuales	73
6.2.	Fabricación de tensor de cadena	73
6.3.	Reparación de tubo de intercambiador de calor	74
	CONCLUSIONES	77
	RECOMENDACIONES	79
	BIBLIOGRAFÍA	81
	APÉNDICES	85
	ANEXOS	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de Schaeffler.....	2
2.	Gráfica de relación tiempo-temperatura para producir la susceptibilidad a la corrosión intergranular en un acero AISI 304 con varios contenidos de carbono	11
3.	Corrosión transgranular de un acero AISI 316	14
4.	Zonas de interés del diagrama de Schaeffler	26
5.	Líneas trazadas sobre el diagrama de Schaeffler para identificar los puntos de unión del material base con los electrodos según tabla III y conocer los porcentajes de ferrita correspondientes	28
6.	Fisura central en filete con alta restricción, soldado con alto aporte térmico y con contenido de ferrita delta marginal	30
7.	Aspecto de una fisura provocada por corrosión bajo tensiones.	30
8.	Corrosión intergranular de un acero AISI 304	31
9.	Intercambiador de calor con fisura en zona de soldadura.....	34
10.	Tanque de mezclado con ataque corrosivo.....	35
11.	Tubos de acero inoxidable con fisura en zona soldada.....	36
12.	Base de tensor de cadena.....	37
13.	Chispa del material base AISI 304	40
14.	Muestra de acero para la realización del ensayo microscópico	41
15.	Muestra de acero para la realización de los ensayos de redondos	42
16.	Planchas de acero AISI 304 con bisel previo al ensayo de soldadura ...	42
17.	Paso de cordones empleado en los ensayos de planchas.....	44
18.	Distorsión angular según el tipo de junta	45

19.	Planchas de acero inoxidable 304 soldadas con electrodo E 308L	48
20.	Zonas y distancias de la soldadura ensayadas en durómetro	50
21.	Gráficas de la A-F del ensayo de dureza ambos métodos.....	51
22.	Aplicación de líquidos penetrantes, revelador (derecha), penetrante (izquierda) a platina de (a) método convencional y (b) método propuesto.....	54
23.	Redondo aplicado el ataque con ácido oxálico y sección de plancha soldada método convencional	56
24.	Microfotografía del material base, estructura <i>step</i> según ASTM A 262 100 x ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm ² 3,5 minutos	57
25.	Microfotografía del material base sensitizado en horno a 650 °C 3 h., estructura <i>ditch</i> según ASTM A 262 100 x ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm ² 3,5 minutos.....	58
26.	Microfotografía del material base sensitizado en horno a 650 °C, 20 h., estructura “corrosión en borde de grano” según ASTM A 262 100 x ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm ² 3,5 minutos	59
27.	Material de aporte E 308L método convencional 100 x, ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm ² 3,5 minutos, temperatura ambiente.....	60
28.	Zona de fusión y material de aporte (HAZ) método convencional 50 x, ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm ² 3,5 minutos	61
29.	La misma probeta de la figura anterior, zona afectada por el calor, pero 100 x.....	62
30.	Material de aporte E 308L método propuesto 100 x, ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm ² 3,5 minutos.....	63

31.	Zona de fusión y material base (HAZ) método propuesto 100 x, ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm ² 3,5 minutos.	64
32.	Material base (HAZ) método propuesto 100 x, ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm ² 3,5 minutos.....	65
33.	Tensor de cadena terminado.....	74
34.	Soldadura de intercambiador de calor.....	75

TABLAS

I.	Composición química de acero AISI 304	22
II.	Propiedades mecánicas del acero AISI 304.....	23
III.	Composiciones químicas de los materiales base y aporte con el cálculo del Ni y Cr equivalentes.....	25
IV.	Porcentaje de dilución de los procesos de soldadura	29
V.	Tabla de diferentes chispas de aceros	39
VI.	Defectos superficiales encontrados en la soldadura	49
VII.	Defectos encontrados en los ensayos de soldadura	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Amp	Amperaje
C	Carbono
cm	Centímetro
AC	Corriente alterna
DC	Corriente continua
Cr_{eq}	Cromo equivalente
END	Ensayo no destructivo
°C	Grado Celcius
°F	Grado Fahrenheit
kJ	Kilo Joule
kgf/mm²	Kilogramo fuerza por milímetro cuadrado
Kg	Kilogramo masa
lb	Libra masa
MPa	Megapascales
m/s	Metro por segundo
ksi	Mil libras por pulgada cuadrada
mg/hr	Miligramo por hora
mm	Milímetro
Mo	Molibdeno
Ni_{eq}	Níquel equivalente
in	Pulgada
SAW	Soldadura por arco sumergido
V	Voltaje

GLOSARIO

Acritud	Endurecimiento o incremento de la resistencia a la deformación plástica de un material por trabajo o deformación en frío, a nivel macroscópico, que tiene el efecto de incrementar la densidad de dislocaciones del material.
AISI	Instituto Americano del Hierro y el Acero
Alotropía	Se denomina a la propiedad que poseen determinados metales de presentarse bajo estructuras metalográficas diferentes en el estado sólido, generalmente en función de las temperaturas a que se someten.
Austenita	Es la forma estable del hierro puro a temperaturas que oscilan entre los 900 a 1 400 °C. Está formada por una disolución sólida del carbono en el hierro, lo que supone un porcentaje máximo de C del 2,11 %. Es dúctil, blanda y tenaz.
Bisel	En soldadura a tope, se define bisel como la preparación en forma de terminal angular de dos uniones. Atendiendo a las necesidades mecánicas, metalúrgicas y económicas, así será el tipo de preparación, o bisel a utilizar (V, U, X, T, etc.).

Cementita	Es un microconstituyente de los aceros, y otras aleaciones ferrosas como las fundiciones en general. La cementita tiene un 6,67 % en peso de carbono, y es un compuesto intermetálico de inserción. Su composición química es Fe_3C y su estructura cristalina es del tipo ortorrómbica.
Choque térmico	Se refiere al impacto o colapso que se produce debido al calentamiento o enfriamiento abrupto de una estructura sólida, produciendo agrietamientos o fracturas en la misma.
Coefficiente de dilatación	Es el cociente que mide el cambio relativo de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo cambia de temperatura provocando una dilatación térmica. En el caso de la soldadura ocurre una dilatación lineal por el calor de aporte del proceso, que, por tratarse de dos materiales de diferente composición química (material base y material de aporte) provocan fisuras.
Corrosión	Se define como el deterioro o desgaste de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna.

**Corrosión
intergranular**

Es un fenómeno corrosivo que se inicia en los bordes de grano, debido a la decarburización del acero por el efecto difusivo del carbono hacia los bordes de grano. En los aceros inoxidable, el carbono arrastra átomos de cromo formando carburos de cromo (Cr_{23}C_6), lo cual hace que el acero pierda sus propiedades anticorrosivas.

Dilución

Se refiere al cambio en la composición química del metal de aporte causado por la mezcla con el metal base o bien con los cordones de soldadura previamente depositados. Y el coeficiente de dilución expresa el grado de mezcla del metal empleado como aporte con la pieza a rellenar. La composición del cordón puede variar significativamente y a la vez modificar las características mecánicas dependiendo del valor o porcentaje de dilución.

Ductilidad

Propiedad de algunos materiales, los cuales bajo la acción de un esfuerzo, pueden deformarse sosteniblemente hasta que se presenta la fractura; contrario a fragilidad.

Ferrita

O hierro- (alfa) es en metalurgia, la estructura cristalina del hierro. Admite hasta un 0,02 % C en solución a la temperatura eutectoide. Cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC) y tiene propiedades magnéticas.

Fragilidad

Se define como la capacidad de un material de fracturarse con escasa deformación, a diferencia de los materiales dúctiles que se rompen después de presentar deformaciones plásticas considerables.

Martensita

Es el principal constituyente de los aceros templados, está conformado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde su estado austenítico a altas temperaturas. Sus propiedades físicas varían según su contenido en carbono hasta un máximo de 0,7 %. Es muy frágil y presenta un aspecto acicular formando grupos en zigzag con ángulos de 60 grados.

Recocido

Es un tratamiento térmico que consiste en calentamiento del acero por encima de las temperaturas de transformación a la fase austenítica, seguido de un enfriamiento lento. El resultado es el equilibrio estructural y de fase en los granos del metal.

Revenido

Consiste en calentar el acero después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al

máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones.

Sensitización

Consiste en la decarburización del acero por la formación de carburos de cromo, debido al efecto de la temperatura. Normalmente es producto de un mal tratamiento térmico o un mal proceso de soldadura.

Templabilidad

Es la capacidad de una aleación de reaccionar al tratamiento térmico del temple desde la superficie hasta el núcleo del elemento. Depende de la composición química del acero y del tamaño y forma de la pieza.

Tenacidad

Es la energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura por acumulación de dislocaciones. Resulta de la combinación entre las propiedades de resistencia y ductilidad de los mismos.

RESUMEN

El presente proyecto evalúa las fallas que se presentan en la soldadura del acero inoxidable AISI 304 por medio del proceso al arco con electrodo revestido (SMAW). En el caso específico se analizan las fallas generadas en una planta textilera en elementos de máquina y tubería de conducción de agentes químicos. Se revisa el procedimiento de soldadura actual o convencional y se plantea un método experimental evaluado por medio de ensayos.

Para la comprensión total del tema, los dos primeros capítulos constituyen una recopilación teórica de los aceros inoxidables, específicamente el tipo austenítico, después se hacen ensayos prácticos por los métodos convencionales y el que se propone, para determinar las fallas y definir el procedimiento de soldadura más adecuado, empleando normas internacionales. Toda la delimitación de la investigación se resume en los párrafos subsecuentes.

El capítulo I trata el tema específico de los aceros inoxidables, sus tipos y características. La soldabilidad de cada uno de ellos y los elementos de máquina donde se emplean. Se hace énfasis en los aceros inoxidables austeníticos, se introduce el concepto de cromo y níquel equivalentes, el diagrama de Schaeffler y los tipos de corrosión que se presentan en distintos medios, con especial atención en los procesos de calentamiento y fusión.

El capítulo II describe el acero inoxidable austenítico AISI 304 y las propiedades mecánicas, químicas y físicas del mismo, entre ellas, la

soldabilidad. Se calcula con base en estándares internacionales el cromo y níquel equivalentes y, utilizando el diagrama de Schaeffler, se compara la efectividad de los electrodos más compatibles para la soldadura del acero.

En el capítulo III se realiza el diseño de la investigación con base en el análisis de problemas y defectos encontrados en procesos de soldadura realizados en elementos de acero inoxidable AISI 304, posteriormente se delimita el proceso experimental y la realización de los ensayos

En el capítulo IV y V se exponen los resultados obtenidos de los ensayos realizados y se desarrolla su respectivo análisis, para finalmente aplicarlos en casos reales, capítulo VI.

ANTECEDENTES

Con la investigación realizada en la rama de la reconstrucción de piezas, se propuso la metodología adecuada para la soldadura del acero AISI 1045 con el proceso de soldadura al arco con electrodo revestido. Aguilar y Celada (2012) comprobaron las técnicas de soldadura para el “calzado de ejes”, una de las cuales es transmitida en el ámbito local y que también es descrita por Horwitz (1984), y se comparó con el método descrito por Aguilar (2006), utilizando ensayos no destructivos de rayos X, partículas magnéticas y líquidos penetrantes.

El proyecto tuvo como resultado que la técnica más adecuada para el levantado de cordones es el procedimiento de traslape, reduciendo la probabilidad de producir defectos de socavaduras, sobremontas excesivas, porosidades e inclusiones de escoria. Por otro lado, se observó mayor rendimiento del material de aporte, y con el mismo número de pasadas se logró una capa de recubrimiento más grueso.

La confiabilidad en los procesos del mantenimiento depende de la estandarización de los procedimientos y de metodologías similares a las empleadas por Aguilar y Celada (2012), que se ajusten a las necesidades para este fin. Se pretende introducir el método propuesto en la soldadura de tubería y depósitos de aceros inoxidable austeníticos empleados en diversas aplicaciones, principalmente en una fábrica textil.

En este contexto, en la unión de tubería de conducción y tanques de almacenamiento de productos químicos de diferentes espesores, se observó

una cantidad considerable de defectos de fisuración luego de realizar trabajos de reparaciones de tubería, ya sea por calentamiento excesivo, mala selección del material de aporte o la disposición de los cordones de soldadura.

Para el año 2013 se contabilizaron 23 paros en la maquinaria de la fábrica de textiles donde labora el suscrito, por reproceso de trabajos de soldadura de acero inoxidable, generando con ello pérdidas monetarias para la empresa sin considerar el volumen de producto perdido por las fugas.

Los factores como la temperatura de precalentamiento y el postratamiento térmico generan cambios microestructurales en la zona de fusión (Kou, 2003) variando así las propiedades mecánicas y metalúrgicas. Los parámetros de temperatura y la selección del material de aporte, habitualmente son seleccionados con base en la experiencia del soldador del taller de mantenimiento. La falta de conocimiento sobre las temperaturas a controlar como expone Laufgang (2013) repercute en fallas en el elemento reparado como componentes ajenos sobre todo cuando se realizan juntas disímiles. Esto se debe también al desconocimiento de las normas respectivas de la Sociedad Americana de la Soldadura por sus siglas en inglés AWS, en cuanto a la ejecución de los procesos,

Una herramienta útil para el ingeniero de mantenimiento es el análisis causa raíz, donde al definir los esfuerzos, el ambiente de trabajo y las condiciones de operación al cual están sometidos los sistemas analizados, son base para posteriormente definir los procedimientos de soldadura a realizar; si en el caso que la falla sea por el medio ambiente o una mala selección del material de aporte, se considera el reemplazo por materiales más resistentes.

Por otro lado, si las temperaturas de trabajo no son las adecuadas se tiene la probabilidad de introducir estructuras frágiles que luego formarían fisuras (Cruz, 1988). El análisis previo del mecanismo de falla se hace relevante atendiendo a que el procedimiento varía en relación a los materiales empleados.

Por lo anterior, la presente investigación se concentra en el acero AISI 304, que es uno de los aceros inoxidable que más se emplea en la conducción de agentes químicos como expone la revista Kobe Steel (2011). El acero 304 en particular presenta buena soldabilidad, no tiene que realizar precalentamiento y en algunos casos se le hace un recocido para aliviar esfuerzos.

Los procedimientos de soldadura modifican, como se menciona previamente, las propiedades mecánicas, como lo son: la dureza, resistencia al desgaste y a la corrosión (ASM, 2005), con lo cual se debe poner a prueba las metodologías empleadas en la soldadura de aceros inoxidable que se emplean en el ámbito nacional y compararlas con el método propuesto por Aguilar Rivas y Celada (2012). Se realizaron ensayos de dureza, resistencia a la corrosión y observación microscópica basando las pruebas en normas internacionales como son las de la ASTM y la AWS, y así definir un procedimiento adecuado.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de soldadura al arco con electrodo revestido del acero inoxidable austenítico AISI 304, implica una serie de consideraciones mecánicas y metalúrgicas que inciden en la calidad de los procesos industriales. La identificación del material base, la selección adecuada del material de aporte y el diseño del proceso, deben realizarse escrupulosamente para evitar fisuraciones en el cordón de soldadura o en la zona afectada por el calor, la fisuración por corrosión y la fisuración en caliente.

En las plantas de elaboración de textiles se emplean procedimientos de soldadura en las tuberías de conducción de químicos y colorantes, por lo que, luego de varios ciclos de trabajo, las uniones soldadas tienden a fisurarse, cualquiera que sea el mecanismo previamente mencionado. Las discontinuidades que se manifiestan repercuten en fugas y pérdidas de producto, teniendo que realizar nuevamente el proceso de soldadura, lo que aumenta los costos de mantenimiento y baja la disponibilidad de la maquinaria.

En la planta de textiles donde labora el suscrito, solo en el año 2013 se contabilizaron 23 paros en maquinaria acuñados a los defectos de soldadura del equipo de conducción, complementados también con las fallas debidas al reproceso general de producción. La falta de conocimiento por parte del personal de mantenimiento en lo referente a la metalurgia de la soldadura y la identificación de los tipos de acero repercute en los problemas descritos.

La investigación realizada por Celada (2012) para identificar y realizar procedimientos adecuados de soldadura indica que se debe puntualizar el tipo

de material al cual se le aplicarán los procesos. De allí surge la siguiente interrogante: ¿Qué método de aplicación de la soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido sobre un acero inoxidable austenítico AISI 304, es el adecuado para obtener la resistencia necesaria a las sollicitaciones mecánicas que se presentan? Es necesario determinar un método adecuado para la reconstrucción de piezas fabricadas con este tipo de materiales, forma de aplicación del material de aporte, y diseño de un proceso adecuado que garantice la calidad de los resultados.

Con relación a la soldadura del acero AISI 304, la metodología propuesta para la resolución de cada caso en especial debe responder a los siguientes cuestionamientos: ¿Qué tipos de defectos se generan al aplicar un procedimiento de soldadura específico en elementos metálicos de acero inoxidable austenítico AISI 304? ¿Qué propiedades de soldabilidad se debe tener en cuenta con relación a dicho material y los materiales de aporte empleados, y como es su comportamiento durante los procesos de soldadura? ¿Qué tipos de control deben realizarse para alcanzar la resistencia mínima requerida a las sollicitaciones mecánicas que se presentan durante el uso de los elementos implicados?

Aguilar Rivas y Celada (2012) emplearon una metodología experimental de levantado de cordones logrando resultados favorables en la soldadura de acero AISI 1045, reduciendo la probabilidad de ocurrencia de fallas. En el caso específico, en la soldadura de acero inoxidable AISI 304 se están empleando métodos tradicionales que inciden en la calidad de los trabajos, por lo cual es necesario identificar los efectos puntuales que el método presenta.

La tercera etapa, o parte experimental de la presente investigación, integra el método empleado por Aguilar Rivas y Celada (2012), para lograr establecer

el procedimiento de soldadura de las tuberías y elementos mecánicos de acero inoxidable AISI 304, para cumplir con las características específicas de resistencia a las demandas mecánicas que se presentan.

JUSTIFICACIÓN

La siguiente investigación surge de la necesidad de realizar uniones y reparaciones por soldadura a tubería y elementos de máquinas de acero inoxidable AISI 304, para la conducción de productos químicos empleados en el proceso de producción en una planta textilera. Ciertas consideraciones, como las temperaturas de trabajo, amperaje y velocidad de avance se deben tener en cuenta para evitar que durante el proceso de soldadura se presente fallas que generen fugas en tuberías, fallas prematuras, oxidación, entre otros desperfectos (Lippold, 2005). Lo anterior, repercute en pérdida de productos al tratarse de tuberías de conducción de químicos o paros innecesarios por reproceso de trabajos, elevando los costos en mantenimiento y disminuyendo la disponibilidad de la maquinaria. Por otro lado, el mejoramiento de la tecnología nacional es imperativo.

En el caso específico, el problema fundamental es la falta de identificación del material base y las fallas que se manifiestan, consecuentemente la selección del material de aporte y las temperaturas de trabajo son inadecuadas, repercutiendo en los problemas antes descritos.

El presente estudio pretende identificar las fallas que se presentan en los elementos de acero inoxidable AISI 304 que inciden en el proceso y sus causas, para desarrollar procedimientos de inspección visual que ayuden al personal de mantenimiento a mejorar sus prácticas de soldadura de diseño o reparación. Siguiendo las líneas de investigación del área de diseño, específicamente en diseño y metalurgia de la soldadura de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento, se introduce un método para la realización

adecuada de los cordones de soldadura que permitirá disminuir el calor de entrada; en los aceros inoxidable las elevadas temperaturas de proceso propician la sensibilización (o sensitización) de las estructuras involucradas (Kou, 2003).

Por lo anterior, la investigación queda más que justificada. Con el proyecto se procura que cualquier soldador, técnico o ingeniero identifique los tipos de acero inoxidable, específicamente el AISI 304, que conozcan las propiedades de soldabilidad que posee y que seleccione utilizando las herramientas proporcionadas por la AWS y ASM; el material de aporte adecuado y las temperaturas de trabajo, que califique la calidad de la soldadura, ya sea visualmente o por medio de ensayos no destructivos, y así desarrolle el procedimiento adecuado de soldadura atendiendo las necesidades específicas; con el fin de disminuir las pérdidas de producto y los paros innecesarios.

OBJETIVOS

General

Establecer el procedimiento adecuado para la soldadura de piezas y tubería de acero inoxidable austenítico AISI 304, por medio del proceso soldadura al arco eléctrico SMAW

Específicos

1. Describir los defectos más recurrentes que se encuentran durante la aplicación de los procesos de soldadura de aceros inoxidables austeníticos AISI 304.
2. Identificar y definir las propiedades de soldabilidad del acero inoxidable austenítico AISI 304.
3. Revisar los procedimientos de soldadura de tubería y elementos de máquina de acero inoxidable austenítico AISI 304, que cumpla con las sollicitaciones mecánicas mínimas requeridas.

ALCANCES

El alcance del presente documento se delimita a la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido a aceros inoxidable austeníticos AISI 304, con las dos primeras fases descriptivas y la tercera de carácter explicativo. El proyecto está dirigido al mejoramiento de la práctica ingenieril en el país, tanto en su ejecución, cuanto a la enseñanza en las diversas carreras relacionadas con el tema. De igual manera, se pretende proporcionar una guía que oriente a los operarios especializados, así como a todos los talleres de soldadura que se dediquen a la reparación industrial.

La metodología propuesta permite que cualquier soldador identifique el procedimiento con facilidad. En el contexto científico, aporta nuevos conocimientos en el proceso de soldadura resaltando la diferencia que se obtiene al interponer los cordones; se señala la importancia de las temperaturas de trabajo a la cual se debe trabajar el proceso para obtener los mejores resultados.

El análisis de resistencia a la corrosión mostrará resultados de sumo interés para los ingenieros en mantenimiento; con estos resultados se espera que se logre definir los parámetros adecuados y el material de aporte más adecuado que se ajuste a las necesidades particulares. Al mismo tiempo servirá como apoyo a la Escuela de Estudios de Postgrados y a la Escuela de Ingeniería Mecánica para distinguir las diferentes microestructuras que se obtienen en la soldadura, así como los defectos que se perciben microscópicamente. En tal sentido, se realizarán las siguientes acciones indexadas:

1. Se determinarán las propiedades de soldabilidad, defectos en la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos AISI 304 y los problemas relacionados con la corrosión.
2. Se analizarán las diferencias entre los métodos de levantado de cordones, proporcionando una orientación en el empleo de mejores técnicas de soldadura, a los operarios del ramo, así como a ingenieros de mantenimiento.
3. Se observará el comportamiento microestructural de piezas soldadas y se identificarán las fallas que se puedan originar mediante métodos inapropiados de soldadura.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El tipo de estudio aplicado a la presente investigación obedece a un modelo cualitativo para establecer la metodología adecuada para la soldadura de acero inoxidable AISI 304. Para la elaboración del método se debe conocer e identificar las fallas que se presentan en los elementos investigados, el material base, el material de aporte y las temperaturas de trabajo

Para determinar las variables implicadas en el proceso, se realizó la investigación bibliográfica pertinente, cuyos resultados se sintetizan en las dos primeras fases. Posteriormente, se desarrolló un análisis crítico de los procesos de soldadura al arco con electrodo revestido (SMAW), los defectos que se obtienen al soldar acero inoxidable austenítico, específicamente el AISI 304, y las consideraciones necesarias para la soldadura. Finalmente se procede a aplicar el método de soldadura propuesto para realizar un análisis de las propiedades obtenidas, mediante ensayos de dureza, resistencia a la corrosión y evaluación de las estructuras microscópicas. El desarrollo de cada fase de la investigación se describe a continuación:

a. Fase I: Elaboración del marco teórico

Se indagan fuentes bibliográficas, trabajos relacionados con soldadura de aceros inoxidables, artículos científicos y métodos de soldadura. Con ello, se identifica el material base con el tipo de falla que se presenta. Se utiliza el diagrama de Schaeffler para calcular teóricamente el material de aporte necesario que cumpla con el mínimo requerido, las temperaturas de trabajo durante la soldadura y la forma de realizar los cordones.

b. Fase II: Pruebas y ensayos

Todo el procedimiento empleado durante la fase experimental se explica en los párrafos siguientes:

El equipo utilizado consiste en: máquina de soldar SMAW con corriente AC/DC, 220 V, amoladora de 4 in. (disco de corte y pulido), 1 sonda termopar para control de temperatura, 5 probetas de 3,81 centímetros de diámetro y 12 cm de largo, 4 planchas de acero inoxidable AISI 304 de 5/8 de pulgada de ancho por 15 centímetros de largo, 10 lb de electrodos (E 308 L, E 308), lijadora por vibración, papel esmeril con grano de 120-2500.

Para el levantado de cordones se utilizarán dos procedimientos, el método tradicional o convencional y el método de traslape propuesto por Aguilar Rivas y Celada (2012).

Los ensayos se describen de la siguiente forma: en la primera prueba se procede a efectuar los cordones de forma lineal sin oscilar. Cuando se realiza el primer cordón se debe pulir las dos orillas del mismo con el disco de corte, luego se hace el otro cordón con traslape al 50 % del anterior y de igual forma se pulen las orillas. Este procedimiento se desarrolla en todos los cordones hasta llenar toda la superficie de la probeta, tal y como describe Celada (2012).

En la segunda prueba se realizan los cordones de forma escalonada, es decir, uno a la par del otro, luego entre estos se hace otro para llenar el espacio vacío. Se pule los defectos superficiales cuando se termina de llenar la superficie.

A las pruebas desarrolladas se les aplican ensayos de dureza, resistencia a la corrosión y evaluación microscópica de los métodos empleados, con base en normas internacionales de la ASTM y/o AWS, los cuales se describen en la tercera fase del proyecto.

c. Fase III: Resultados experimentales

La siguiente fase comprende los ensayos de laboratorio realizados a las muestras de acero inoxidable soldadas con electrodo revestido, los cuales son:

c.1.1. Ensayo de dureza

Se miden las durezas antes y después de la soldadura de las muestras de acero inoxidable según norma ASTM 18. Se utiliza un durómetro, cuyas características se describen más adelante, realizando lecturas en la escala Rockwell C.

c.1.2. Ensayo de resistencia a la corrosión

Para la observación del grado de sensitización del acero inoxidable AISI 304 luego de los procedimientos de soldadura, se aplica la prueba de ataque con ácido oxálico según ASTM A-262 A. La velocidad de corrosión en esta prueba es calculada por la marcación de los bordes de los granos, que es una medida del número de límites de grano que han sido socavados y granos arrancados. Cuando aumenta el grado de sensibilización crece el número de granos que pueden ser más fácilmente atacados, incrementando la velocidad de corrosión.

c.1.3. Ensayo de líquidos penetrantes

Se aplican ensayos de líquidos penetrantes utilizando un penetrante coloreado visible, lavable con agua, según norma ASME V, para la revelación de porosidades y fisuración superficial.

d. Análisis y discusión de resultados

El análisis de los resultados se realiza con base de los puntos anteriores, según fase 1 y la fase de ensayos de laboratorio determinando los parámetros que se adecuan a los objetivos planteados.

INTRODUCCIÓN

Cumpliendo con los objetivos específicos de investigación de la Escuela de Postgrado, específicamente en el curso de Diseño y Metalurgia de la Soldadura, y dentro del Proyecto de investigaciones Metalúrgicas del FIUSAC, coadyuvando a la implementación del material de apoyo al referido curso, en el presente trabajo se propone la soldadura de aceros específicos por medio del proceso SMAW, o soldadura al arco con electrodos revestidos.

La soldadura industrial ejecutada tanto en los procesos de construcción y en los procesos de reparación y mantenimiento en general, se desarrolla mediante una amplia variedad de alternativas, las cuales al ser aplicadas sin un previo análisis resultan en fallas prematuras y pérdidas de material. La variedad de alternativas dificultan la realización de métodos que integren todos los tipos de materiales que entran en juego, así como los procedimientos empleados para el efecto.

En los elementos mecánicos y las tuberías de conducción de agentes químicos para los procesos textiles, es habitual que se empleen aceros inoxidable, específicamente austeníticos. Al momento de soldar y reparar piezas de acero inoxidable por métodos tradicionales se introducen una gama de defectos que alteran la calidad de los trabajos, generando pérdidas monetarias, baja disponibilidad del equipo y desconfianza en el departamento de mantenimiento.

Para entender mejor la mayoría de los problemas que se presentan durante el proceso de soldadura con arco eléctrico con electrodo revestido, se

abordan los aspectos teóricos básicos para comprender los mecanismos que alteran la calidad de la soldadura, y como afecta microestructuralmente al material de aporte, el material base y la zona afectada térmicamente. Posteriormente, se tomaron fotografías de los defectos encontrados en soldaduras de tubería de acero inoxidable, intercambiadores de calor y ejes, se analizan sus causas de falla y posibles correcciones con base en el análisis teórico previo.

La fase experimental compara los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta por Aguilar Rivas y Celada (2012), con métodos tradicionales, siguiendo los lineamientos de la AWS y la ASTM para la evaluación y ejecución de los procesos de soldadura desarrollados. El procedimiento propuesto se ejecuta en los elementos antes analizados para observar su comportamiento y características de calidad.

1. ACEROS INOXIDABLES

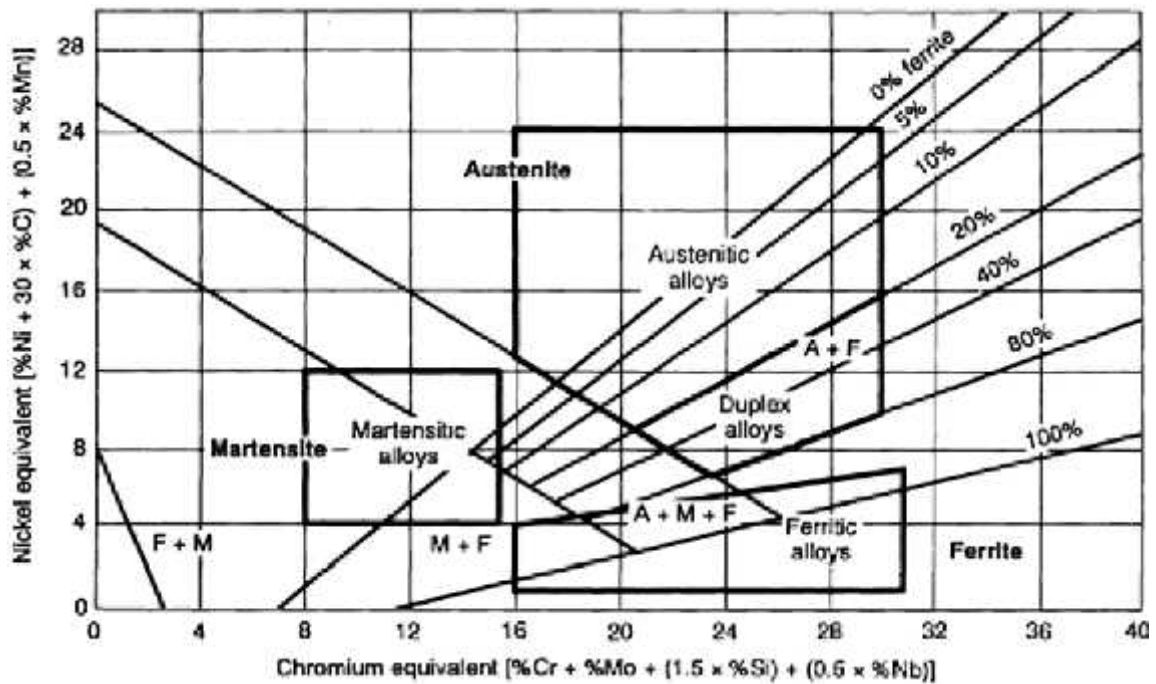
El acero inoxidable constituye un grupo de aceros de alta aleación basados en la combinación de Fe-C-Cr, y Fe-C-Cr-Ni. Para que un acero sea inoxidable según Lippold y Kotecki (2005) debe de contener un mínimo de 10,5 por ciento en peso de cromo. El porcentaje de cromo permite la formación de una capa pasiva de óxido en la superficie que evita la penetración de la oxidación y la corrosión del oxígeno del medio ambiente; fenómeno conocido como “pasividad” o pasivación.

Los medios corrosivos que eliminan la capa pasiva del acero inoxidable lo vuelven vulnerable a la corrosión en distintas formas, a saber: corrosión por *pitting* o picaduras, corrosión por cavidades y ataque intergranular, entre otros. Los mecanismos de corrosión antes mencionados son influenciados por el medio ambiente, las condiciones metalúrgicas del metal y tensiones residuales en el material. De allí, como se analizará más adelante, la importancia de realizar soldaduras adecuadas para evitar cambios metalúrgicos en el material base y de aporte o introducir tensiones residuales que favorezcan la formación de defectos.

Para poder controlar la microestructura y las propiedades de las aleaciones, se le incluyen una variedad de elementos aleantes a los sistemas básicos de Fe-C-Cr, y Fe-C-Cr-Ni, entre los que se tienen: manganeso, silicio, molibdeno, niobio, titanio y nitrógeno. Para describir en general el comportamiento de los aceros inoxidables, cuando se introducen cambios estructurales generados por los elementos aleantes, se desarrolló el concepto de cromo y níquel equivalente, para normalizar el efecto de las aleaciones en la

evolución microestructural, relativo al cromo y al níquel. Al graficar el cromo y el níquel equivalentes en ejes opuestos se demuestran las relaciones entre la composición y la microestructura para soldaduras de aceros inoxidable. El diagrama de Schaeffler (figura 1) se conoce como un “mapa” para los aceros inoxidables (Laufgang, 2013). Los rangos de composición de ferrita, martensita, austenita y aleaciones dúplex se han superpuesto en el diagrama.

Figura 1. Diagrama de Schaeffler



Fuente: Metals Handbook vol. 6, p. 1 021.

Los aceros inoxidables son conocidos por su alta resistencia a la oxidación, inclusive a altas temperaturas, por lo que a veces son referidos como “aleaciones resistentes al calor” según describe Laufgang (2013). La elevada resistencia a la oxidación a altas temperaturas se debe al contenido de cromo y se puede emplear hasta temperaturas que se aproximan a los 1 000 °C. , tal es

el caso de los rieles de caída de los lingotes en los hornos de precalentamiento empleados en laminación de acero, que se construyen con acero A310 (25Cr20Ni).

Las aplicaciones de los aceros inoxidable son innumerables, desde partes para generadores, procesos químicos, textiles, y muchos productos comerciales como cuchillos, equipo hospitalario y partes para autos. La mayoría de los aceros inoxidable son soldables si se toman las precauciones adecuadas. En la mayoría de los casos, la soldadura altera significativamente la zona soldada y la zona afectada por el calor (HAZ) relativo al metal base. Lo anterior, significa un cambio en el balance de fases, formación de constituyentes intermetálicos, crecimiento de grano, cambio microestructural, y otras reacciones, como la analizada, corrosión intergranular (Kou, 2005). En general, los problemas descritos repercuten en la degradación de las propiedades mecánicas de la unión soldada y el material base.

1.1. Tipos de aceros inoxidable

Según el Metals Handbook (2005), a diferencia de otros sistemas de clasificación de materiales, en donde habitualmente se le establece por su composición química, los aceros inoxidable se ordenan basándose en la fase metalográfica predominante. Las tres fases que se presentan son: martensita, ferrita y austenita. El Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI) utiliza un sistema de clasificación empleando tres números, y en algunos casos la enumeración está precedida o complementada con una letra, así por ejemplo; A304, A304L, A410 y A430. Las propiedades magnéticas de cada fase se emplean para identificar el tipo de acero. (Aguilar Rivas, 2006).

A continuación se expone brevemente las propiedades de cada uno extendiéndose más en el tipo austenítico:

1.1.1. Aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos o también conocidos como aceros al cromo poseen un contenido de carbono entre 0,15 % y 1,2 %, y cromo entre 11,5 % y 18 %; pueden transformarse en martensita después de un tratamiento térmico de temple, elevando la temperatura hasta el punto de austenización con enfriamiento en aire o aceite, elevando su dureza y resistencia al desgaste. La resistencia a la corrosión de este tipo de aceros inoxidables está asociada a su contenido de cromo y a su microestructura (ASM, 2005). Las aleaciones de mayor contenido de carbono exhiben una menor resistencia a la corrosión en condición de temple y revenido, debido a la mayor susceptibilidad a la precipitación de carburos de cromo.

En términos generales, se puede decir que los aceros inoxidables martensíticos presentan menor resistencia a la corrosión que los otros tipos de aceros inoxidables, pero tienen resistencia mecánica elevada. Algunas aleaciones pueden ser tratadas térmicamente para alcanzar valores de resistencia superiores a 1 400 MPa.

Se caracterizan por ser magnéticos, pueden trabajarse en frío sin dificultad, especialmente con bajo contenido de carbono, pueden maquinarse satisfactoriamente, tienen buena tenacidad, se trabajan fácilmente en caliente y tiene una baja conductividad térmica.

1.1.2. Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos mantienen la estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) del Fe alfa desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión, su estabilidad y su composición química no permite que se ubique en el campo austenítico (FCC) según el diagrama de fases durante el calentamiento (ASM Vol. 6, 2005). Son magnéticos y contienen como aleante principal, el cromo. Los aceros con un contenido de cromo superior al 16 % no pueden someterse a calentamientos de temperaturas intermedias, por riesgo de producir fase Sigma (FeCr), que provoca una reducción en la ductilidad y en la resistencia a la corrosión, razón por la que la soldadura presenta problemas.

El contenido de carbono de los aceros ferríticos es mucho menor que los martensíticos, con el fin de obtener una estructura totalmente ferrítica. Además, cuando el contenido de carbono se aproxima al 2 %, se corre el riesgo de formar carburos de cromo, empobreciendo de cromo la matriz ferrítica y disminuyendo por lo tanto su resistencia a la corrosión. Los carburos de cromo provocan fragilización en la estructura de la aleación. En relación a su comportamiento frente a la corrosión, ocupan un lugar intermedio entre los martensíticos y austeníticos.

Los aceros inoxidables ferríticos no transforman sus propiedades por tratamientos térmicos, su estructura permanece ferrítica sin ser afectada por la velocidad de enfriamiento desde altas temperaturas. Las elevadas resistencias o durezas solo se pueden alcanzar por trabajo en frío (laminado o estirado), aunque en forma bastante limitada como expresa Laufgang (2013).

En general, por su constitución, son frágiles y su tenacidad, que en gran parte es función del tamaño de grano, depende del proceso de conformado en

su fabricación. Si se afina el grano por trabajo en frío, el acero tendrá elevada tenacidad, si por el contrario, se le realizara un calentamiento a elevada temperatura intentando producir un crecimiento de grano.

A pesar de su fragilidad en frío, tienen buena tenacidad en caliente y la resiliencia aumenta extraordinariamente con calentamientos del orden de 150-200 °C (Lippold y Kotecki, 2005). La resiliencia es importante cuando existan piezas que deban trabajar en servicios especiales, o que deban ser utilizadas a temperaturas elevadas.

El efecto del nitrógeno en las propiedades de los aceros es, en cierto modo, parecido al del carbono: favorece la templabilidad y por lo tanto el endurecimiento del material. Además, su acción mejora la tenacidad, retarda el crecimiento del grano a temperatura elevada, lo que amplía mucho las posibilidades de utilización de estos aceros para trabajos en caliente (Laufgang, 2013).

Otro método para mejorar la tenacidad de los aceros ferríticos es la adición de pequeñas cantidades de columbio y titanio, que actúan en cierto modo inversamente al nitrógeno, disminuyendo su templabilidad. La introducción de níquel como elemento aleante mejora las propiedades de resistencia y límite de elasticidad, sin disminuir la tenacidad. Con determinados tenores de níquel es posible conseguir un cambio de la estructura ferrítica hacia austenítica.

1.1.3. Aceros inoxidables austeníticos

Son aceros terciarios, (Fe, Cr, Ni); contienen entre 15-25 % de Cr, 7-20 % de Ni, y 0,03-0,08 % de C. Se denominan austeníticos debido a su estructura FCC, de hierro (hierro gamma), a todas las temperaturas normales de tratamientos térmicos. La estabilidad de la fase " " la proporciona el níquel. Su presencia, como también el manganeso, carbono y nitrógeno, son necesarios para bajar la temperatura del intervalo " " y evitar la transformación alotrópica " - " (ASM Vol.6, 2005).

El estado de austenita le proporciona mayor resistencia a la corrosión que los ferríticos y martensíticos, debido que los carburos de cromo se descomponen y los elementos permanecen en solución sólida por enfriamiento rápido desde alta temperatura (Aguilar Rivas, 2006). Sin embargo, si se enfría lentamente, como en los procesos de soldadura, entre 450° y 870 °C precipitan carburos de cromo en los bordes de grano, dejando pobre en cromo la zona adyacente al borde, lo que facilita el fenómeno denominado "corrosión intergranular". Para evitarlo se puede bajar al mínimo el contenido de carbono (0,03 %), o bien agregar niobio o titanio; elementos que tienen mayor tendencia a formar carburos que el Cr, permitiéndole a este último permanecer en solución sólida con el hierro y así mantener su capacidad de resistencia a la corrosión.

Los aceros austeníticos se pueden dividir en dos categorías, según la clasificación AISI: la serie AISI 300, aleaciones de cromo-níquel y la serie AISI 200, aleaciones de cromo-manganeso-nitrógeno.

La serie AISI 300 es la más extensa y comúnmente utilizada por su bajo costo y contenidos de níquel (Lippold & Kotecki, 2005), con porcentajes de

níquel entre 6 y 37 % para estabilizar la austenita. También pueden contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que son utilizados para conferir ciertas características. Por otro lado, la serie 200, presenta tenores de níquel más bajo (hasta 6 %) y mantienen la estructura austenítica con altos niveles de nitrógeno. El manganeso, de 5 a 10 %, es necesario para aumentar la solubilidad del nitrógeno en la austenita. Se caracterizan por un alto valor de límite elástico y tensión de rotura pero su ductilidad es baja si se compara con los de la serie 300.

Las principales características de los inoxidables austeníticos se deben, en general a su estructura FCC, la cual le proporciona ductilidad, conformabilidad, tenacidad y excelente resistencia al impacto, siendo materiales que se pueden endurecer por trabajo en frío (Aguilar Rivas, 2012), aunque no por tratamientos térmicos.

La resistencia a la oxidación, como se mencionó previamente, es superior a los otros tipos de aceros inoxidables, favoreciendo los procesos de soldadura que permite que se realicen con mayor facilidad teniendo ciertas consideraciones; por ello se les emplea en la fabricación de elementos de máquina y tubería de conducción de fluidos en la industria química y petroquímica, donde la resistencia a la corrosión es una condición de servicios determinante.

Suelen ser no magnéticos, pero pueden serlo cuando se trabajan en frío. El conformado en frío es una vía para mejorar sus propiedades mecánicas, específicamente el límite elástico, que es relativamente bajo con respecto a otros materiales. La estricción o el trabajo en frío aumentan el valor del límite elástico y la tensión de rotura, consecuentemente disminuye la capacidad del acero al alargamiento.

1.1.4. Aceros inoxidables dúplex

En la actualidad, en aras de la economía y por sus propiedades anticorrosivas comparables en calidad con los aceros austeníticos, los aceros dúplex han ido adquiriendo mayor importancia, aunque en Guatemala su uso es poco común.

Según Aguilar Rivas (2014, p.34), “los aceros inoxidables dúplex son aleaciones de hierro al cromo con tenores menores de níquel, y en algunos casos de molibdeno, manganeso y nitrógeno. Están constituidos microestructuralmente por las fases ferrita (BCC) y austenita (FCC), en cantidades aproximadas de 50 % de cada fase. Presentan propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión mayores que los ferríticos y austeníticos. Son magnéticos, no pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos y su soldabilidad es muy buena. La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión en ambientes con iones de cloruros. Son propensos a la precipitación de la fase sigma, lo cual, como se señaló anteriormente, aumenta la susceptibilidad a la fragilización en función de los efectos de los tratamientos térmicos a que se someten, lo que también implica el incremento de dureza del material y la baja en la resistencia a la corrosión”.

1.2. Corrosión de los aceros inoxidables

La corrosión de los aceros inoxidables se presenta en una variedad de formas, en el presente proyecto, se centra los fenómenos que afectan al acero inoxidable austenítico; igual que sus similares los aceros austeníticos tienen también cuatro problemas asociados a las altas temperaturas ya sea de servicio o durante la fabricación por soldadura. Se encuentran los siguientes fenómenos

de corrosión: corrosión intergranular, corrosión bajo tensión, corrosión por *pitting* o picaduras y corrosión influenciada por ataque microbiológico.

1.2.1. Sensitización (corrosión intergranular)

Según el Metals Handbook Vol. 13A, (2005) la corrosión intergranular ocurre en el rango de 420-850 °C, en donde el cromo y el carbono disueltos en el hierro de estos aceros se combina y precipita en el borde de grano como carburo de cromo (Cr). La disminución de Cr de la solución sólida en las adyacencias del borde de grano deja poco Cr para formar la película protectora de óxido de cromo (pasivación).

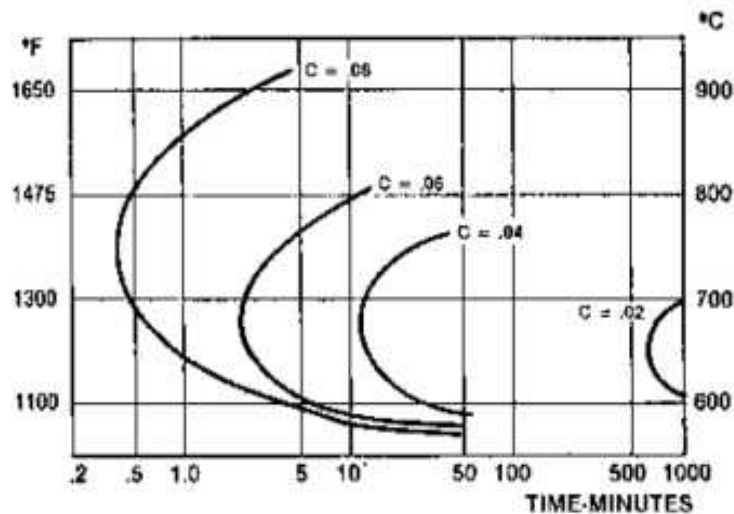
El fenómeno deja al acero inoxidable vulnerable a ciertos medios corrosivos, el efecto de formación de carburos se le conoce como sensitización (o sensibilización, en castellano). El término aún no ha sido aprobado por ninguna de las academias del idioma español (Real Academia Española de la Lengua), pero ingenierilmente se le acepta como tal.

La corrosión resultante es intergranular como consecuencia de la precipitación de los carburos de Cr. La soldadura de estos aceros produce áreas adyacentes al cordón que alcanzan las temperaturas de 420-850 °C, debido a ello el acero se sensitiza en dos bandas paralelas al cordón de soldadura levemente alejadas a este.

Como el carbono es el componente esencial en la formación de carburo de cromo y la posterior corrosión intergranular, una forma para evitar el problema es disminuir el contenido de carbono disponible para la formación de carburo de cromo; lo cual, se puede realizar de las siguientes formas:

- a) En el estudio realizado por Soria y Aguilar Rivas (2009), al disminuir la cantidad de carbono en el material de aporte a un máximo de 0,03 % C (grado L) en la soldadura, se logra minimizar los efectos de formación de carburos de cromo mitigando así la sensitización. La figura 2 muestra el efecto del contenido de carbono, cuando la presencia de este es de 0,02 por ciento o menor, la precipitación de carburos no ocurrirá excepto después de 10 horas. Si la técnica de soldeo permite un enfriamiento rápido, no hay tiempo suficiente para la formación de carburos y la sensitización del acero no ocurre (Aguilar Rivas, 2006).

Figura 2. **Gráfica de relación tiempo-temperatura para producir la susceptibilidad a la corrosión intergranular en un acero AISI 304 con varios contenidos de carbono**



Fuente: Metals Handbook vol. 6, p, 1 111.

- b) Para Lippold y Kotecki (2005) otra forma de evitar la precipitación de carburos de cromo consiste en realizar un calentamiento de redisolución de los carburos a una temperatura de 1 050 °C para luego, y desde esa

temperatura, realizar un temple de retención de fase evitando que precipiten los carburos. Este tipo de solución es válida para partes que no deban calentarse en servicio en el rango de temperaturas donde se produce sensitización (450-850 °C);

- c) Por último, para eliminar el problema del carbono en el metal base se suele emplear aceros inoxidable que contengan titanio (Ti) o niobio (Nb) (columbio) según expresa Ibañes (2005). Ambos aleantes tienen una gran afinidad con el carbono y forman carburos preferencialmente con ellos dejando al cromo en solución. A los aceros inoxidables de este tipo se los denomina “estabilizados”, por ejemplo al tipo 321 aleado con titanio o el tipo 347 aleado con niobio. Como el Ti y el Nb se volatilizan con el arco eléctrico, en la soldadura se suele utilizar el electrodo E 347 (aleado con Nb) o el E 308L (no estabilizado) como material de aporte.

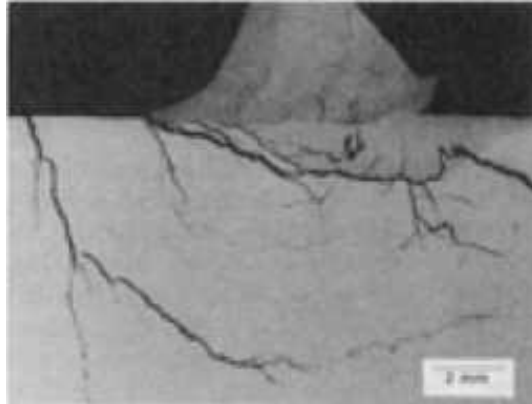
Para Lázaro (2012) cuando se emplea soldadura SMAW (electrodo revestido) en aceros estabilizados, una fina y cercana capa de material base adyacente al cordón de soldadura se calienta a temperaturas superiores a 1 050 °C donde se consigue la disolución de todos los carburos, una vez que el electrodo avanza, esa zona se enfría rápidamente en el rango de formación de carburo de Ti o Nb impidiendo su precipitación, fenómeno que ocurre especialmente en chapas de poco espesor. La zona formada, queda sensitizada con las pasadas consecutivas, debido a la concentración de calor alcanzando la temperatura de precipitación del carburo de Cr reteniendo todo el C; problema que se analiza en capítulos subsecuentes. Los carburos eventualmente se corroen dejando a ambos lados del cordón y mucho más cercana a este, que en la corrosión intergranular convencional, una fina ranura corroída, que tiene apariencia de corte con cuchillo conocido en inglés como *knife line attack* (KLA).

1.2.2. Corrosión bajo tensión (SCC, stress corrosion cracking)

Descrito por Kou (2003) la corrosión bajo tensión ocurre cuando el acero inoxidable es sujeto a la doble acción de tensiones residuales y un medio corrosivo específico. Las variables que afectan el SCC son la temperatura, el medio ambiente, la composición química del acero, el nivel de tensión sujeción de la pieza (ver tensor de cadena capítulo 3), y la microestructura. La propagación de la fisura puede ser tanto transgranular cuanto intergranular, dependiendo de la interacción de las variables descritas. El efecto intergranular de SCC puede ocurrir aunque la aleación sea insensible a tal ataque, la presencia de esfuerzos residuales en la zona afectada por el calor (HAZ) puede acelerar el ataque corrosivo y la fisura, particularmente a lo largo de zonas sensitizadas en los bordes de grano.

Por otro lado, el efecto transgranular de SCC es debido a ambientes con contenidos de cloruros (agua salada), pero también en presencia de medios cáusticos (ASM Vol. 13A, 2005). Los iones de la familia de halógenos (floruros, cloruros, bromuros y yoduros) son los responsables del desarrollo de la corrosión bajo tensión transgranular. La figura 3 que se muestra es un ejemplo de la corrosión transgranular de un acero AISI 316, se observa que la fractura se inicia en el talón de la soldadura, probablemente debido al alto estrés residual en ese punto.

Figura 3. **Corrosión transgranular de un acero AISI 316**



Fuente: Metals Handbook vol. 6, p. 1 195.

Los métodos para controlar el ataque de SCC se enlistan a continuación

- Para Laufgang (2013) se debe emplear un tratamiento térmico de recocido o aliviado de tensiones para reducir el estrés producido por el proceso de soldadura (siempre que las dimensiones lo permitan).
- Substituir por aleaciones más resistentes, altas en níquel, aleaciones ferríticas con elevado cromo, o aceros inoxidable dúplex diseñados para resistir el SCC.
- Reducir cloruros y el oxígeno del ambiente, porque la combinación de los elementos son los que representan la mayor cantidad de fallas por SCC.

1.2.3. Corrosión por picaduras, cavidades y ataque microbiológico

El ataque localizado en el metal de soldadura o en la HAZ ocurre por picaduras o cavidades, particularmente en ambientes acuosos que contiene cloruros. Los agentes microbiológicos (MIC) incurren preferencialmente en la zona soldada de los aceros inoxidables austeníticos. El problema de corrosión por agentes microbiológicos en particular, se restringe a ambientes acuosos que contiene microorganismos que se adhieren a la zona de soldadura. En la unión de tubería, la picadura por MIC suele iniciarse en la zona de fusión y se extiende a la pileta fundida. Las HAZ que han sido sensibilizadas son regiones propensas al ataque, aunque se observa que habitualmente ataca la zona de soldadura.

El MIC se percibe con mayor tendencia en aceros inoxidables AISI 304 que en el tipo AISI 316. El acabado superficial, rugosidades e imperfecciones introducidas en prácticas de soldadura u otros procesos, influencia en el ataque del MIC, al introducir superficies rugosas debido al maquinado o amolado, se facilita la adherencia de los microorganismos e introduce tensiones residuales, al mismo tiempo, zonas metalúrgicamente transformadas y corrosión por picaduras (ASM Vol. 13, 2005).

1.3. Soldabilidad de los aceros inoxidables

El concepto de soldabilidad ha sido ampliamente discutido por Celada y Aguilar Rivas (2012). En el caso de los aceros inoxidables depende principalmente de la estructura metalográfica predominante. Así se considera que la soldabilidad general de todos los aceros pertenecientes a la familia de los inoxidables martensíticos es muy baja por la transformación de la

martencita. La soldabilidad de los aceros inoxidable ferríticos va desde aceptable a baja, según la composición química y su contenido en carbono; la soldadura afecta negativamente las propiedades cambiando sus características y su microestructura (Laufgang, 2013). La soldabilidad, en cambio, de los aceros inoxidable dúplex como de los austeníticos es muy buena. Como la investigación se centra en los aceros inoxidable austeníticos los siguientes puntos explican su soldabilidad.

Los aceros inoxidable austeníticos tienen un elevado coeficiente de expansión térmica y una baja conductividad térmica respecto a los aceros ferríticos, con lo que se produce al soldarlos mayor tensión residual, baja transferencia calórica en las zonas de uniones soldadas y mayor deformación de las piezas. Se debe considerar las propiedades descritas, para diseñar una correcta secuencia de soldadura, para disminuir al mínimo los efectos referidos que, de lo contrario, podrían resultar en pérdidas o, en el caso específico, fugas.

En cuanto a los problemas posibles relacionados con efectos de precipitación y segregaciones químicas producidas durante la soldadura, se minimizan con el control de la metalurgia del metal base, la práctica de la soldadura y la selección de los electrodos o consumibles adecuados (Cañas, 2010).

Los principales precipitados según Ibañes, (2005) que aparecen en la soldadura del acero inoxidable austenítico son: ferrita- δ , fase " σ ", y carburos $M_{23}C_6$ y M_6C . La fase " σ " se usa para describir una gama de precipitados de cromo y molibdeno, que pueden precipitar directamente en el depósito de soldadura. La ferrita- δ se transforma en fases intermetálicas, como " σ " y " χ " a temperaturas entre 500 y 850 °C para la fase σ y de 650 a 950 °C para la fase " χ ". La proporción de precipitación de estas fases aumenta con el contenido de

cromo y molibdeno, y reducen considerablemente la tenacidad, ductilidad y resistencia a corrosión.

La precipitación de carburos del tipo M_23C_6 y M_6C no suele ser un problema en el depósito de soldadura (Chuaiphan, Wichan & Chandra-Ambhorn, 2012) al emplear consumibles que posean, por lo general, un bajo contenido de carbono, o bien se suelde aceros estabilizados como los AISI 321 y 347; pero en cambio, la precipitación de carburos produce un fenómeno de corrosión en la zona afectada por el calor (HAZ), mencionada previamente. Cuanto mayor sea el aporte térmico y mayor contenido en carbono tenga el metal base, más apreciable será el fenómeno de la sensitización (Ibañes, 2005).

Cuando se emplean aceros con contenidos de carbono superiores, debe realizarse un postratamiento de soldadura para redisolución de carburos, siempre y cuando el tamaño y la economía lo permita, y así recuperar la resistencia a la corrosión de la pieza soldada (Aguilar Rivas, 2013).

Otro problema asociado a la soldadura de aceros inoxidable totalmente austeníticos son las segregaciones químicas de bajo punto de fusión en borde de grano, y sobre todo en el centro de los cordones que pueden crear una pérdida de ductilidad del material en esas áreas, que se traduce en la denominada fisuración en caliente (Lippold y Kotecki, 2005); sobre todo en los aceros totalmente austeníticos (como es el caso del AISI 310).

Para evitar la fisuración en caliente, los consumibles de soldadura están calculados con composición química tal que el depósito contenga un cierto porcentaje de ferrita, que proporciona mayor resistencia mecánica y evita la

fisuración en caliente. De ahí la importancia del empleo del diagrama de Schaeffler para calcular un mínimo de 3 a 20 % de ferrita delta (Kou, 2005).

1.3.1. Defectos de soldadura

Los principales problemas en la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos se detalla en los siguientes puntos:

1.3.1.1. Formación de fase

“La fase sigma se caracteriza por ser una fase frágil y por lo tanto dura (226-247 HV), disminuyendo la tenacidad y la resistencia, además de reducir la resistencia a la corrosión. El fenómeno se le atribuye a la microsegregación de elementos como cromo, molibdeno, nitrógeno, los cuales segrean en la interfaz austenita-ferrita delta, provocando que las zonas adyacentes se encuentren empobrecidas en los elementos antes mencionados, y por lo tanto, susceptibles al ataque corrosivo localizado” (Ibañes, 2005, p.66).

La precipitación usualmente ocurre en los límites ferrita-ferrita y ferrita-austenita. La formación de la fase sigma produce el empobrecimiento en cromo y molibdeno (para los aceros con adición de molibdeno como el AISI 316) en la matriz que la rodea, por lo tanto su composición es abundante en estos elementos, causando la reducción de la resistencia a la corrosión. El efecto de la fase sigma es más pronunciado cuando se forma a baja temperatura y en cortos tiempos de permanencia.

Ibañes (2005) indica que en la soldadura de los aceros austeníticos, se requiere un porcentaje de ferrita delta, en el metal de aporte, para evitar la fisuración en caliente. Sin embargo, esta ferrita en calentamientos prolongados

tiende a transformarse en fase sigma. Debido a la microsegregación propia de la soldadura, la ferrita delta en la matriz austenítica contiene cromo para convertirse en fase sigma con una mínima difusión. La fase sigma debe ser removida según Lippold & Kotecki, (2005), con un calentamiento de redisolución a 1 100 °C. La cantidad formada durante un calentamiento dado, puede ser fácilmente determinada, si se conocen las cantidades de ferrita (fase magnética) antes y después del calentamiento.

1.3.1.2. Fisuración en caliente

Los aceros austeníticos, particularmente los que no contienen ferrita, son susceptibles al agrietamiento durante la soldadura según expresa Aguilar Rivas (2013). El agrietamiento en la solidificación ocurre por la segregación de solutos, que forman fases de bajo punto de fusión, las cuales bajo la acción de los esfuerzos de contracción, propios de la solidificación durante la soldadura, causan el agrietamiento. Las impurezas (azufre, fósforo) causan la disminución de la resistencia al agrietamiento, debido a que dichas impurezas permanecen en estado líquido hasta una temperatura muy por debajo del punto de solidificación de la fase principal. El efecto que ejercen las impurezas depende de la tensión superficial de las fases sólida-líquida (ASM Vol. 6, 2005).

El problema de fisuración en caliente puede ser disminuido al emplear electrodos con cierto contenido de ferrita en su composición, según expresado por los autores citados. La relación entre la resistencia al agrietamiento o fisuración y la cantidad de ferrita retenida durante la solidificación es bastante representativa. El problema puede ser considerado y minimizado en casos donde un determinado porcentaje de ferrita (5-35 %) puede ser retenido en el metal soldado. Sin embargo, el agrietamiento se produce en los aceros que

tienen una estructura completamente austenítica como es el caso del acero AISI 310.

2. ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304

Entre los aceros inoxidable austeníticos se encuentra el AISI 304 que por sus características mecánicas y sobre todo su soldabilidad y accesibilidad en el mercado, lo convierte en uno de los aceros que se emplean con mayor abundancia en la industria. Según varios autores citados en la bibliografía, es recomendable para construcciones ligeras soldadas en las que no es necesario el recocido u otros tratamientos térmicos, pero que requieren buena resistencia a la corrosión. Otras propiedades del tipo 304 son su servicio satisfactorio a altas temperaturas (800° a 900 °C) y buenas propiedades mecánicas. En Guatemala constituye el acero inoxidable austenítico el de mayor empleo para diversos fines, y es el más representativo en relación a los otros tipos de aceros inoxidables en general. (Aguilar, 2006).

El acero AISI 304 contiene bajo carbono con lo que se evita la precipitación de carburos durante periodos prolongados de servicio a alta temperatura, siempre que se evite la zona de sensitización como se expone en capítulos posteriores; tiene un contenido de carbono de 0,08 % como máximo, por lo que se le considera un material de fácil utilización en aplicaciones con soldadura.

El tipo 304L es recomendable cuando se tienen que soldar altos espesores de material (más de 6,35 mm o ¼ in) y la exposición a la temperatura de soldadura es mayor. Este grado contiene 0,03 % máximo de carbono. En las aplicaciones de soldadura donde es posible realizar un recocido, los carburos que se forman pueden ser eliminados por el tratamiento térmico adecuado. Además de disolver los carburos, el recocido sirve para relevar esfuerzos

residuales en el área soldada y la zona afectada por el calor, aunque en algunas ocasiones se vuelve antieconómica su realización.

2.1. Composición química

La tabla I indica los porcentajes de los elementos aleantes del acero 304 y 304 L según las normas de la AISI.

Tabla I. **Composición química del acero AISI 304**

Tipo de acero	% Cr	% Ni	% C	% Mn	% Silicio	% Fósforo	% Azufre
304	18-20	8-10.5	0,08	2	1	0,045	0,03
304L	18-20	8-10.0	0,03	2	1	0,045	0,03

Fuente: Metals Handbook vol. 6, p. 1 171.

2.2. Características físicas, metalúrgicas y mecánicas del acero inoxidable AISI 304

Lippold y Kotecki (2005) describen al acero AISI 304 con excelentes propiedades para el conformado y el soldado. Se puede usar para aplicaciones de embutición profunda, rolado y corte. Tiene buenas características para la soldadura, no requiere recocido tras la soldadura para que se desempeñe bien en una amplia gama de condiciones corrosivas.

La resistencia a la corrosión es excelente, excediendo al tipo 302 en una amplia variedad de ambientes corrosivos, incluyendo para conducción y almacenamiento de petróleo caliente o con vapores de combustión de gases.

Tiene excelente resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta 870 °C y en servicio continuo hasta 925 °C. No se recomienda para uso continuo entre 425-860 °C (por la formación de fase sigma), pero se desempeña muy bien por debajo y por encima de ese rango. Tiene una densidad según norma ASTM A 279 de 7,8 g/cm³. La tabla II expresa las propiedades del acero 304:

Tabla II. **Propiedades mecánicas del acero AISI 304**

Resistencia a la fluencia	310 MPa
Resistencia máxima	620 MPa
Elongación	30 % (en 50mm)
Reducción de área	40 %
Módulo de elasticidad	200 GPa (29000 Ksi)
Dureza Brinell (Rockwell C)	160-190 (5-13)

Fuente: Metals Handbook vol. 6, p. 1 171.

2.3. Soldabilidad del acero inoxidable AISI 304

Al igual que todos los aceros inoxidables austeníticos el AISI 304 se caracteriza por poseer una buena soldabilidad si se toman las consideraciones descritas, como son el calor de entrada y el espesor del material; para evitar los problemas de fisuración en caliente y la sensitización del material tal y como expone Cañas (2010). En la soldadura es práctica generalizada mantener la temperatura del material base (y la HAZ) lo más baja posible, esto se logra usando bajas intensidades de corriente (compatibles con una adecuada penetración y fusión), arco corto, secuencia de paso peregrino, cordones cortos,

o simplemente esperando que la pieza se enfríe entre cordón y cordón. Se debe limitar la temperatura a valores donde el material pueda tocarse con la mano (70 °C).

2.3.1. Electrodo para el proceso SMAW

Para la elección adecuada del electrodo compatible con el acero inoxidable 304 se debe hacer referencia al diagrama de Schaeffler, mencionado en el capítulo anterior, es conveniente mantener un mínimo de 3 % de ferrita en su composición y así mitigar los efectos de la fisuración en caliente.

El diagrama de Schaeffler muestra claramente el dominio de las fases ferrítica, martensítica y austenítica (figura 2), propias de los aceros inoxidables cuando son enfriados a las velocidades de soldadura. Además, muestra las zonas de fragilización en frío debido a la presencia de martensita, la zona de fragilidad en caliente originada por la presencia de austenita, la zona de fragilidad por presencia de fase Sigma y la zona de crecimiento de grano ferrítico.

El Metals Handbook Vol. 6 (2005) expresa que cuando es necesario soldar aceros inoxidables austeníticos, dos son las condiciones necesarias para realizar el procedimiento, estos son:

- Que la composición química de la soldadura sea similar a la del material base para no comprometer la resistencia a la corrosión;
- Que la estructura tenga las características mecánicas apropiadas, similares al material base.

La segunda condición depende de en qué punto del diagrama se ubique el metal de soldadura que es una mezcla de los materiales base que pueden ser distintos (soldaduras disímiles) y del material de aporte. Para la determinación del punto óptimo para la soldadura se describe en los párrafos subsecuentes.

Se determinan las composiciones de Ni y Cr equivalente empleando el diagrama de composición utilizado, luego se intersecan estos puntos para localizar un punto intermedio en el diagrama. Para el caso del 304 los valores se observan en la tabla II, y lo mismo se realiza con los correspondientes electrodos recomendados según la norma AWS A 5.4. Los cálculos se efectúan a partir de las ecuaciones que se observan en el diagrama de la figura 1. De la aplicación de estos conceptos resultan los valores señalados en la tabla III.

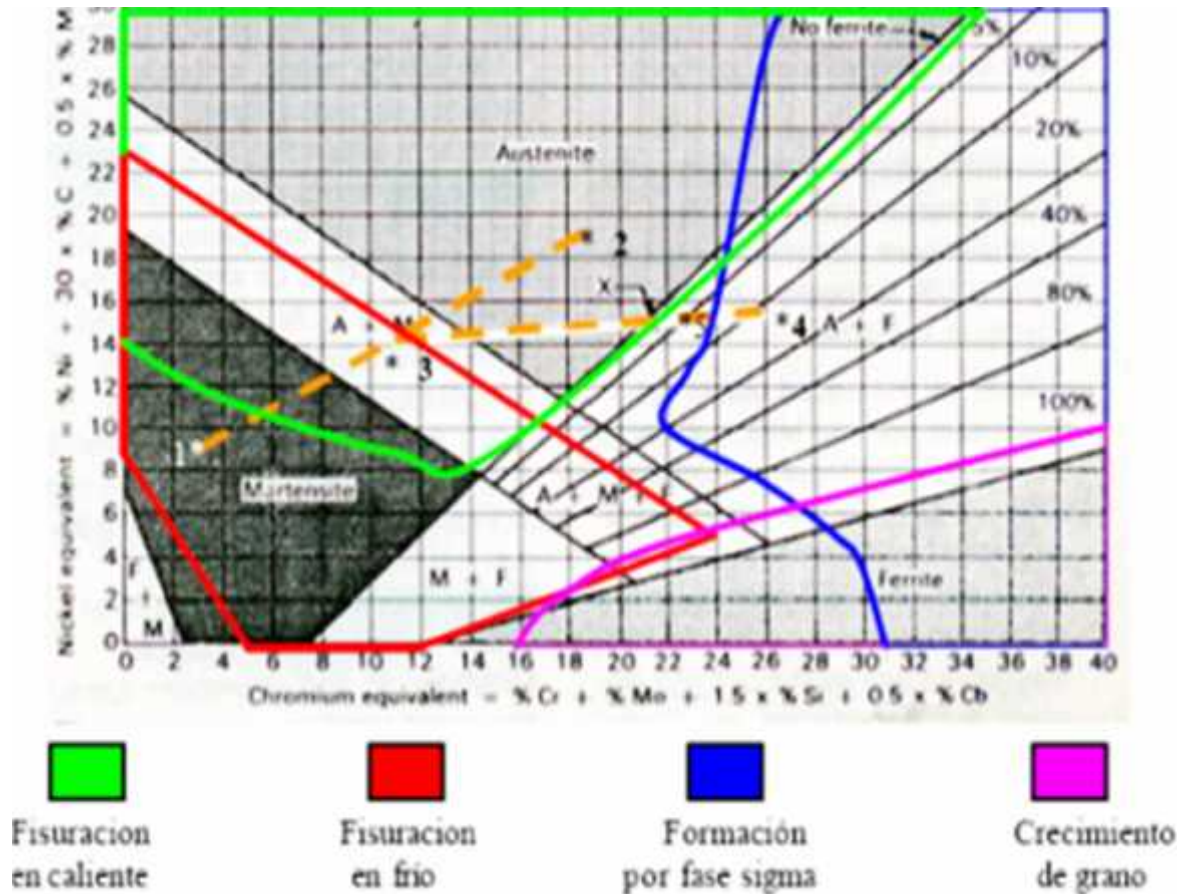
Tabla III. **Composiciones químicas de los materiales base y aporte con el cálculo del Ni y Cr equivalentes**

Acero / electrodo	Cromo	Níquel	Carbono	Manganeso	Silicio	Molibdeno	Ni _{Equiv.}	Cr _{Equiv}
304	20	10,5	0,08	2	1	0	13,9	21,5
304L	20	10	0,03	2	1	0	11,9	21,5
E 308	21	11	0,08	2,5	0,9	0,75	14,65	23,1
E 308 H	21	11	0,08	2,5	0,9	0,75	14,65	23,1
E 308 L	21	11	0,04	2,5	0,9	0,75	13,45	23,1
E 309	25	14	0,15	2,5	0,9	0,75	19,75	27,1

Nota: el valor mostrado es el porcentaje en proporción de cada elemento.

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Zonas de interés del diagrama de Schaeffler



Fuente: <http://www.mailxmail.com/curso-replicas-metalograficas-2/alcance-tecnica-3>.

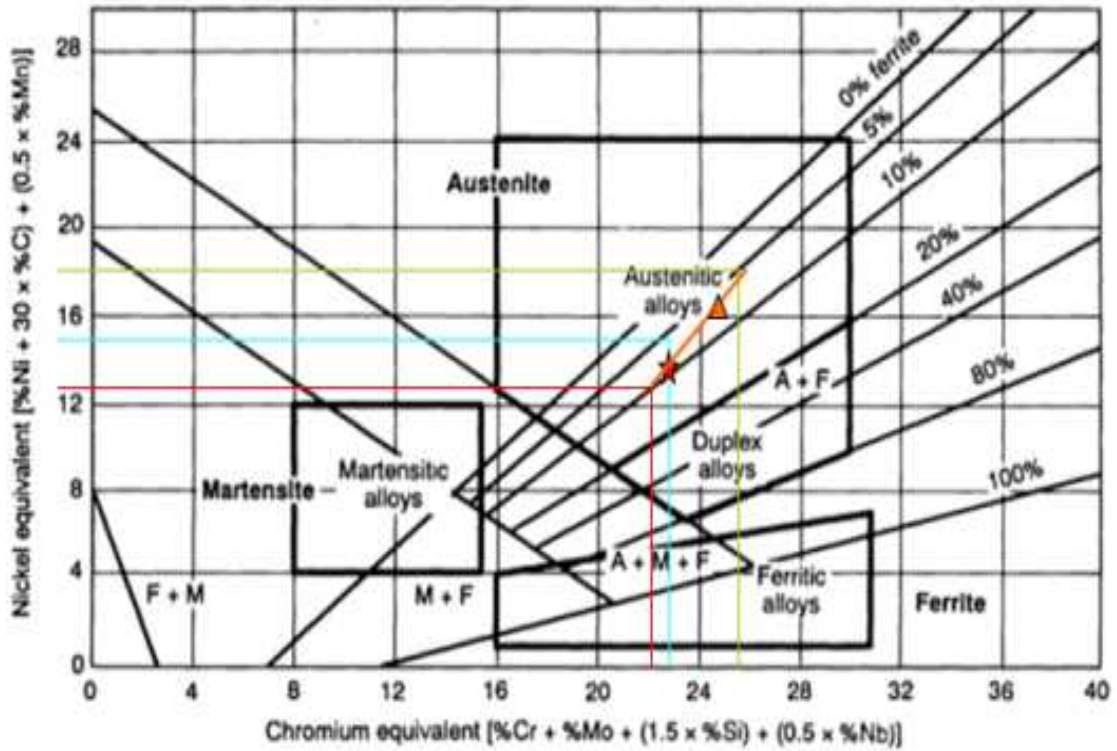
Consulta: diciembre de 2013.

Luego de identificar cada punto en el diagrama, se unen los puntos con una recta que une el material base con el material de aporte. Tomando en cuenta el porcentaje de dilución, que dependen del proceso de soldadura que se emplee (tabla IV), se calcula este porcentaje como una distancia de la recta que une los puntos partiendo del material de aporte. El nuevo punto marcado es la composición de la unión soldada.

La figura 5 muestra los puntos de la tabla III. Como se observa, al utilizar un electrodo E 308 se obtiene entre un 5-7 % de ferrita en composición, al trazar la línea con un 25-30 % de dilución correspondiente al proceso SMAW, por otro lado si se emplea un E 309 se obtiene entre un 8-9 % pero se cae dentro de los límites de la zona de formación de fase Sigma (figura 4).

En general la descripción anterior es la forma de calcular el electrodo con mejor rendimiento para la soldadura de aceros inoxidable, para los procedimientos posteriores, es decir, tratamientos térmicos pre y postsoldadura se pueden apreciar en la tabla II de la norma AWS A5.4 de la sección de anexos para los diferentes materiales; para el caso del E 308L indica que no requiere tratamiento térmico.

Figura 5. Líneas trazadas sobre el diagrama de Schaeffler para identificar los puntos de unión del material base con los electrodos según tabla III y conocer los porcentajes de ferrita correspondientes



- ★ Metal de soldadura con 25% de dilución E 308
 — Metal base 304
— Material de aporte E 308
- ▲ Metal de soldadura con 25% de dilución E 315
 — Material de aporte E 308

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Porcentaje de dilución de los procesos de soldadura**

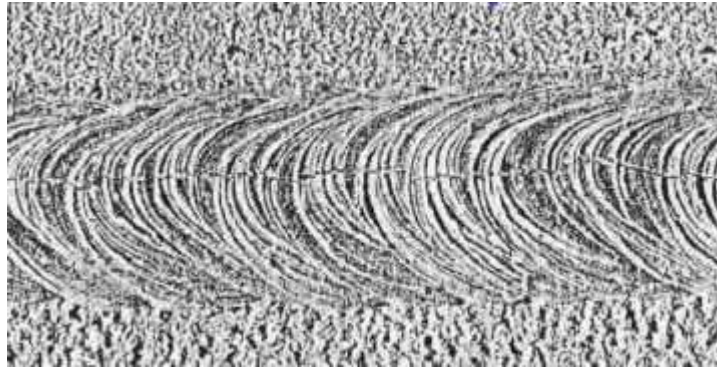
Proceso	% Dilución
SMAW	20-30
SAW	25-50
GMAW cortocirc.	15-30
GMAW spray	25-30
GTAW c/aporte	20-40
GTAW s/aporte	100

Fuente: Metals Handbook vol.6, p. 854.

2.3.2. Defectos en la soldadura de acero inoxidable AISI 304

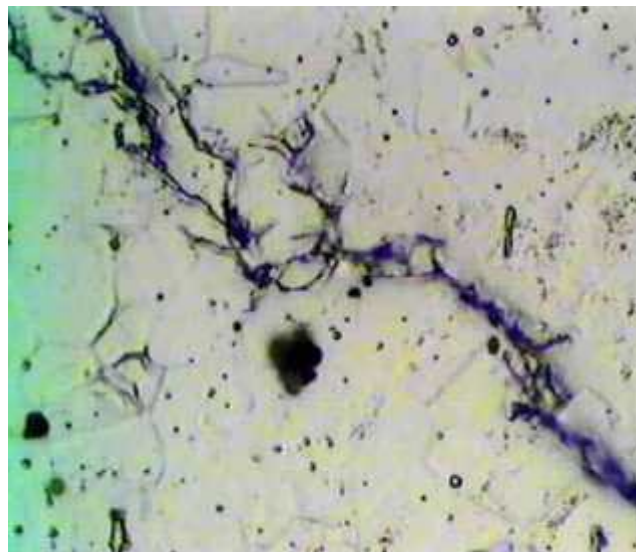
Como se mencionó previamente, el acero inoxidable 304 presenta todos los problemas de soldadura de los aceros inoxidables austeníticos y consecuentemente todos los defectos de fisuración en caliente, sensitización y corrosión bajo tensión. Las siguientes imágenes muestran los defectos citados para su mejor comprensión y evaluación:

Figura 6. **Fisura central en filete con alta restricción, soldado con alto aporte térmico y con contenido de ferrita delta marginal**



Fuente: Metals Handbook vol. 6, p. 876.

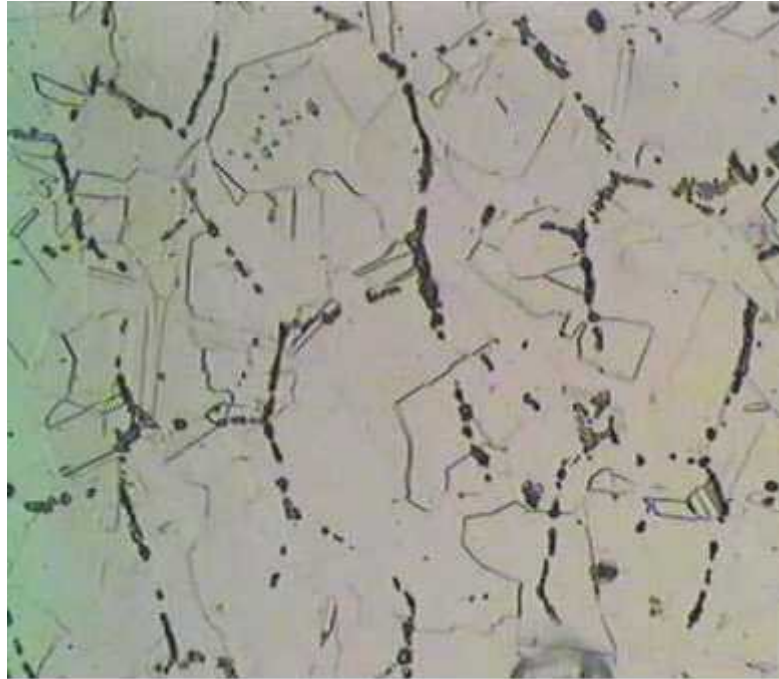
Figura 7. **Aspecto de una fisura provocada por corrosión bajo tensiones**



Fuente: <http://www.mailxmail.com/curso-replicas-metalograficas-2/alcance-tecnica-3>.

Consulta: diciembre de 2013.

Figura 8. **Corrosión intergranular de un acero AISI 304**



Fuente: <http://www.mailxmail.com/curso-replicas-metalograficas-2/alcance-tecnica-3>.

Consulta: diciembre de 2013.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para los efectos de realizar una investigación coherente con los procesos ingenieriles desarrollados en los medios guatemaltecos, y de coadyuvar a la solución de problemas reales que se presentan a menudo en la infraestructura industrial, se hizo el diseño de la investigación con base en el análisis de problemas y defectos encontrados en procesos de soldadura realizados en elementos de acero inoxidable AISI 304, estos se detallan a continuación, proponiéndose para cada caso las posibles soluciones. Los casos se enumeraron de la siguiente manera:

- Caso 1. Elemento: intercambiador de calor
Material: acero inoxidable AISI 304
Grosor de chapa: 1,5 mm
Temperatura de trabajo: 135 °C
Presión de trabajo: 120 psi
Tipo de falla: fuga de líquido en la base de la brida del tubo central

Figura 9. **Intercambiador de calor con fisura en zona de soldadura**



Fuente: elaboración propia.

La fotografía muestra fisuración en el cordón de soldadura en la parte central. La fuga se produce en un intercambiador de calor de agua y vapor. La falla se origina posiblemente por la incompatibilidad del material de aporte con el material base. En este caso, se debe seleccionar el electrodo según el análisis presentado en el primer capítulo, empleando el diagrama de Schaeffler, para lo cual se realiza el cálculo mínimo de ferrita que debe contener la soldadura para evitar que los elementos de baja temperatura de fusión debiliten la zona soldada.

- Caso 2. Elemento: tanque mezclador de suavizante
Material: acero inoxidable AISI 304
Grosor de chapa: 3 mm
Temperatura de trabajo: 80 °C
Presión de trabajo: 5-10 psi
Tipo de falla: fuga de líquido en la chapa cilíndrica

Figura 10. **Tanque de mezclado con ataque corrosivo**



Fuente: elaboración propia.

La imagen muestra que el tanque de mezclado de suavizante sufrió un ataque de corrosión por picadura. El ataque se debe a calentamientos localizados en la zona afectada por el calor y posiblemente por limpieza inadecuada e inclusiones. Los químicos que se emplean para el proceso contienen cloruros que afectan la zona adyacente de la unión. El problema se presentó debido al alto calor de entrada prolongándose en la región de 420 a 850 °C, produciendo zonas sensibles bajas en cromo reduciendo la resistencia a la corrosión del material.

- Caso 3. Elemento: tubería de conducción de proceso textil
Material: acero inoxidable AISI 304 cédula 40
Grosor de chapa: 5,49 mm
Temperatura de trabajo: 45-70 °C
Presión de trabajo: 10 psi
Tipo de falla: fuga de líquido en unión soldada

Figura 11. **Tubos de acero inoxidable con fisura en zona soldada**



Fuente: elaboración propia.

En este caso puede notarse la falta total de calidad de los cordones de soldadura realizada por personal no calificado. El problema sugiere la existencia de corrosión intergranular, esto solo podría verificarse mediante exámenes metalográficos.

El tubo de acero inoxidable de 76,2 mm (3 in.) muestra fisuración en toda la zona afectada térmicamente debido al alto amperaje empleado para el proceso y electrodo incompatible con el material base. El color blancuzco se debe a la incrustación de la soda ash o sales que aumentan la propensión al ataque por corrosión. Para la reparación de la unión se recomienda limpiar la

zona adecuadamente, biselar con un disco de corte la fisura y unos 10 mm más por cada lado para evitar que se siga prolongando.

Utilizar electrodo E 308 L de diámetro 2,4 mm (3/32 in.) compatible con el 304, usar de entre 70 a 75 amperios o más bajo posible atendiendo una buena fusión. Limpiar con martilleo sin emplear cepillo de alambre en caso de usar este último que sea exclusivo para acero inoxidable y en lo posible de cerdas de acero AISI 304.

- Caso 4. Elemento: tensor de cadena de máquina secadora
Material: acero inoxidable AISI 304
Grosor de chapa: 15 mm
Temperatura de trabajo: 25-50 °C
Tensión de trabajo: variable (depende de la operación)
Tipo de falla: doblez en la punta del tensor, ruptura de cadena.

Figura 12. **Base de tensor de cadena**



Fuente: elaboración propia.

La fisuración en la cara posterior de la zona afectada térmicamente y el doblez que se muestra en la figura se le atribuye posiblemente a corrosión bajo tensión. Fenómeno que ocurre cuando el acero inoxidable es sujeto a la doble acción de estrés por tensión y un medio corrosivo específico. La base del tensor es expuesta a un medio alcalino esto que genera corrosión. Al examinar el historial de trabajo de la pieza se determinó que fue soldada con un alto calor de entrada realizando cordones consecutivos sin dejar enfriar la pieza. El espesor de la pieza es de 15 mm, lo cual requiere un bisel apropiado para reducir el efecto de las tensiones residuales las cuales propiciaron el doble efecto de la corrosión bajo tensión.







Para el desarrollo global del capítulo se describen los procedimientos para la realización de la fase experimental. Se identifica el material base con un método práctico, en este caso el acero inoxidable AISI 304, por medio del ensayo a la chispa. Por otro lado, se determinan los componentes metalográficos, y se describen los procedimientos de soldadura a realizar.

3.1. Identificación del material base

Para la identificación del material base se hace uso de la interpretación de la chispa característica del acero. El ensayo a la chispa es un método sencillo donde se emplea una esmeriladora mecanizada de alta velocidad y una muestra del acero, al pasar el material por la muela del esmeril esta emitirá ciertos destellos o estelas características del mismo. Dependiendo de la cantidad de carbono que contiene la probeta se producirán explosiones al inicio, y a lo largo de la de la chispa con determinados colores que dependen de los elementos de aleación. El tipo de destello permitirá en general determinar la cantidad de carbono y elementos aleantes que posee la probeta en

observación. Para el acero AISI 304 la tabla se emplea para comparar el material a ensayar:

Tabla V. **Tabla de diferentes chispas de aceros**

<p>Hez corto Templado: con pocos Erdurecido: con muchos ramos luminosos</p> 	<p>Acero para herramientas aleado con Cr carbono alto, ledetunta alta</p>	<p>02</p>	<p>1,55 C 12,0 Cr 0,7 Mn 1,0 V</p>
<p>El flujo de líneas continuas, algunos los estallidos de carbono, línea coqueada de naranja en la cabeza</p> 	<p>Acero para trabajo en caliente, alta aleación</p>	<p>H13</p>	<p>0,40 C 1,0 Si 5,3 Cr 1,4 Mn 1,0 V</p>
<p>El flujo de líneas rojo oscuro con brío en la punta de la lanza, pocas espinas:</p> 	<p>Acero de alta velocidad</p>	<p>M2</p>	<p>0,90 C 4,1 Cr 5,0 Mn 1,9 V 6,4 W</p>
<p>Líneas del flujo rojas, punteadas oscuras con brillo en las cabezas de la línea</p> 	<p>Acero de alta velocidad</p>	<p>T12</p>	<p>1,23 C 4,1 Cr 3,8 Mn 3,3 V 10,0 W 10,5 Co</p>
<p>Hez corto con espina como los estallidos de carbono</p> 	<p>Acero inoxidable</p>	<p>430</p>	<p>0,40 C 13,0 Cr</p>
<p>Flujo continuo, línea sin los estallidos de carbono</p> 	<p>Acero inoxidable</p>	<p>304</p>	<p><0,07 C 13,5 Cr 9,0 Ni</p>

Fuente: <http://www.mecanicc.com/2014/03/como-reconocer-los-aceros-ensayo-de.html>

Consulta: junio de 2014.

Figura 13. **Chispa del material base AISI 304**



Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en la imagen, las chispas son de tipo alargado de flujo continuo con pocas explosiones muy característico del acero inoxidable que posee bajo contenido en carbono.

3.2. Análisis microscópico

Para el análisis microscópico del material base se debe realizar un pulido tipo espejo sobre la superficie de las probetas. Para ello, se utiliza 5 probetas de 38,1 mm de diámetro por 100 mm de largo soldada empleando ambos métodos y una para examinación del material base. Se comienza por pulir la superficie (utilizando la lijadora para obtener mejores resultados) con lija de agua núm. 120 y así bajando la rugosidad de la lija hasta llegar a la núm. 2 500, finalizando con paño de lona y polvo de pulir, para la observación en el microscopio se ataca la superficie lijada con ácido oxálico según norma ASTM A 262.

Figura 14. **Muestra de acero para la realización del ensayo microscópico**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Tamaño de muestra

Se emplearon para los ensayos microscópicos 4 probetas de 38,1 mm de diámetro y 100 mm de largo soldadas a lo largo de su superficie de forma longitudinal. Para los ensayos no destructivos se utilizan 4 planchas de acero inoxidable AISI 304 de 15,87 mm grosor por 150 mm de largo. Se emplearon, con base a los cálculos realizados en el capítulo II, electrodo E 308L. Las siguientes fotografías muestran las probetas empleadas.

Figura 15. **Muestra de acero para la realización de los ensayos de redondos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Planchas de acero AISI 304 con bisel previo al ensayo de soldadura**



Fuente: elaboración propia.

3.4. Parámetros

Para los ensayos de soldadura se emplearon las siguientes herramientas y materiales:

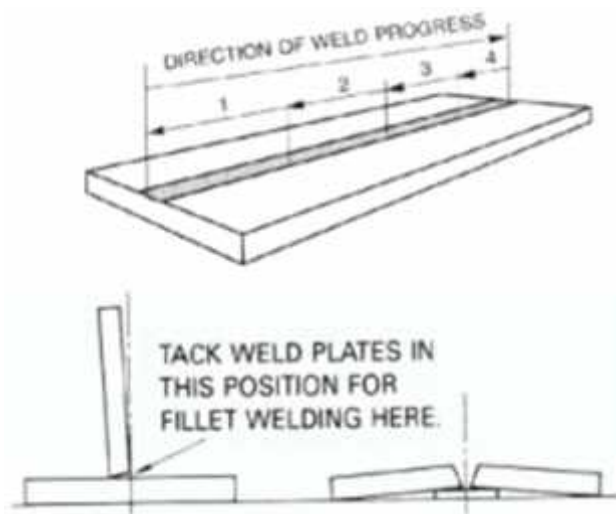
- 4,54 kg (10 lb) de electrodos (E 308 de 2,38 mm de diámetro)
- Lijadora por vibración
- Papel lija grano de 120 al 2 500
- Máquina de soldar marca Miller
- Cepillo de alambre
- Picador
- Sargento para sujetar las piezas
- Pistola termoindicadora

Para el ensayo de barras redondas de 38,1 mm de diámetro y 100 mm largo, para el método convencional se soldaron a 90 amp en corriente AC, realizando los cordones según se explica en incisos posterior, la secuencia de soldeo es de cruz entre pasadas para evitar la distorsión pero de forma consecutiva sin enfriamiento. Para el método propuesto se soldaron a 75 amp precalentando a 60 °C y enfriando con agua soldando en cruz, pero siempre antes de comenzar el segundo cordón se palpa y se mide con la pistola termoindicadora que este por debajo de los 150 °C; el levantado de cordones se explica en la siguiente sección.

Las 4 planchas de acero inoxidable AISI 304 de 15,87 mm grosor por 150 mm de largo se soldaron para la metodología propuesta a 90 amperios y precalentamiento de 60 °C, enfriamiento con chorro de agua, se emplea bisel en "X" según figura 18 y paso según figura 17. Para el método convencional se realizó a 110 amperios sin precalentamiento y cordones consecutivos, la

secuencia de paso es la misma a la figura 16 pero el soldador emplea bisel en "V".

Figura 17. Paso de cordones empleado en los ensayos de planchas



Fuente: Horwitz. *Soldadura. Aplicaciones y Práctica*. p 141.

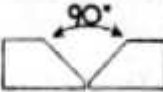
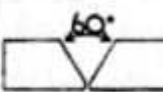
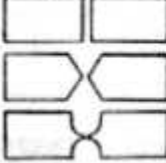







3.5. Procedimientos

Se emplearon dos procedimientos de levantado de cordones, el método tradicional y el método de traslape propuesto por Aguilar Rivas y Celada (2012). Los ensayos se describen de la siguiente forma:

- a) Para la primera prueba se procede a efectuar los cordones de forma lineal sin oscilar. Cuando se realiza el primer cordón se debe pulir las dos orillas del mismo con el disco de corte, luego se realiza el otro cordón con traslape al 50 % del anterior y de igual forma se pulen las orillas. Se

realiza este procedimiento en todos los cordones hasta llenar toda la superficie de la probeta, tal y como describe Celada (2012).

Figura 18. **Distorsión angular según el tipo de junta**

TYPE OF PREPARATION					
DISTORTION TENDENCY & RESULTING DISTORTION					

Fuente: Horwitz. *Soldadura. Aplicaciones y Práctica*. p. 178.

- b) La segunda prueba se realizará los cordones de forma escalonada, es decir, uno a la par del otro, luego entre estos se realiza otro para llenar el espacio vacío. Se pule los defectos superficiales cuando se termina de llenar la superficie. El bisel queda a disposición del soldador. Se denominará como método A para simplificar la explicación.

4. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO EXPERIMENTAL

En este capítulo se explican los resultados obtenidos de los ensayos realizados descritos en el capítulo anterior. Para verificar la calidad de la soldadura obtenida mediante los procedimientos propuestos, se aplicó la metodología de inspección visual y ensayos no destructivos. Esto se realizó de la siguiente forma:

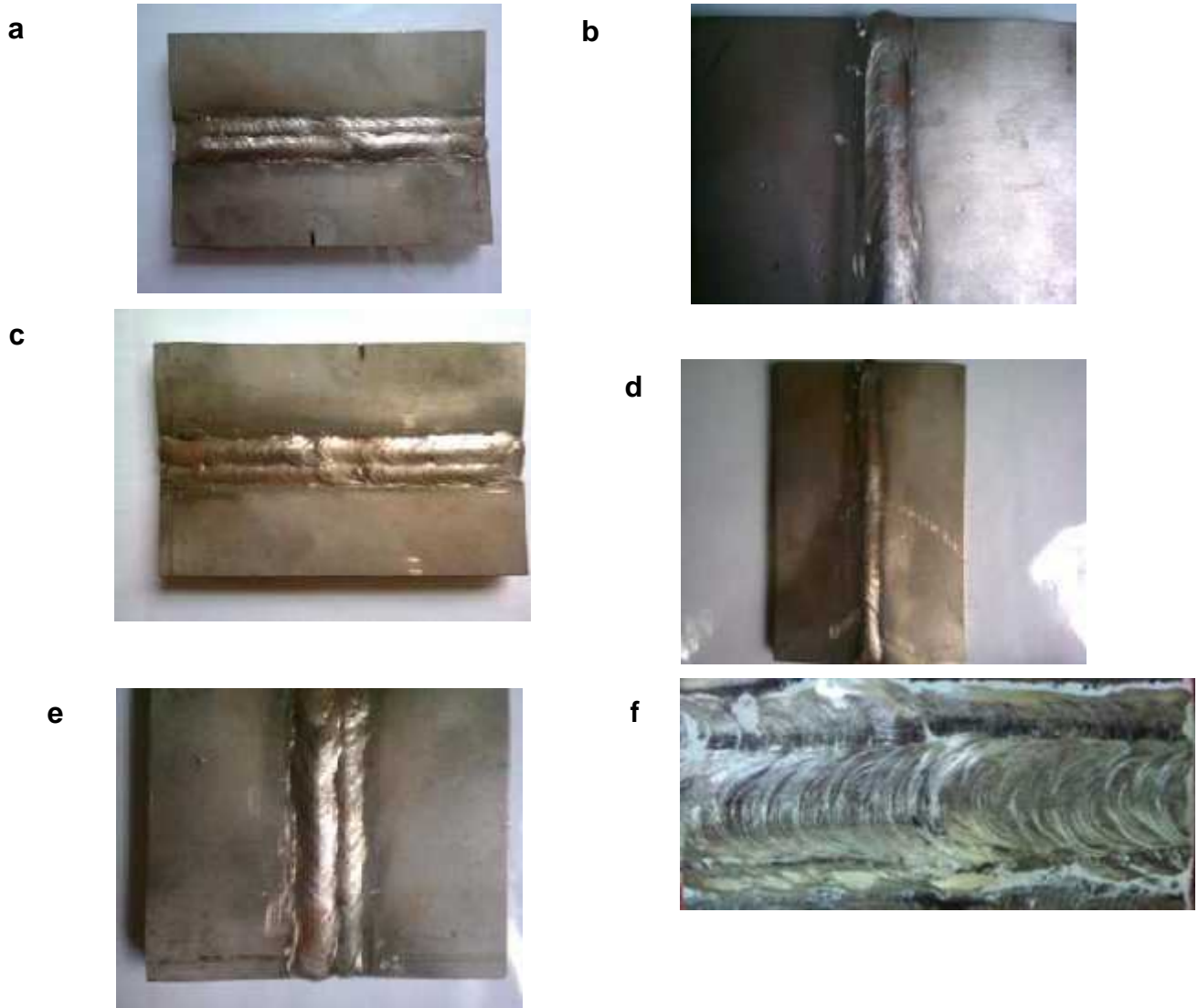
4.1. Fase experimental

A continuación se exponen las fotografías de los ensayos realizados con sus respectivos análisis:

4.1.1. Inspección de muestras

Se inspeccionan visualmente las muestras soldadas con electrodo E 308L. Las siguientes imágenes muestran los resultados obtenidos.

Figura 19. **Planchas de acero inoxidable 304 soldadas con electrodo E 308L**



a), b) Fotografía completa de plancha soldada, c) acercamiento de falla por corrosión debido a limpieza de los cordones, d) corrosión en la raíz de la soldadura, e) ampliación de la falla por corrosión un punto localizado en la raíz de la soldadura, f) cordón de soldadura empleado con socavaduras en los bordes.

Fuente: elaboración propia.

Las planchas fueron soldadas a 90 amperios utilizando cordones largos, se sujetaron las planchas de ambos lados, no se controló que la temperatura estuviese por debajo de los 150 °C. Como se aprecia en las imágenes las dos planchas se pandearon debido al alto calor de entrada, los cordones largos y el tipo de bisel inadecuado. La inspección visual sugiere la formación de carburos de cromo por la presencia de picaduras en la superficie. La distorsión encontrada genera gran concentración de esfuerzos que repercuten en la corrosión bajo tensión (el fenómeno ocurrió en el tensor de la cadena presentado en el capítulo anterior).

Para el procedimiento propuesto, la inspección visual muestra pocos defectos superficiales, la calidad de los cordones empleados expresan que se realizaron de forma adecuada. No existen socavaduras ni sobremontas, la baja cantidad de porosidad denota que se empleó un electrodo seco y se controló adecuadamente la limpieza de la pieza. En resumen, se encuentra de las 4 barras redondas y las 4 planchas seccionadas los siguientes defectos:

Tabla VI. **Defectos superficiales encontrados en la soldadura**

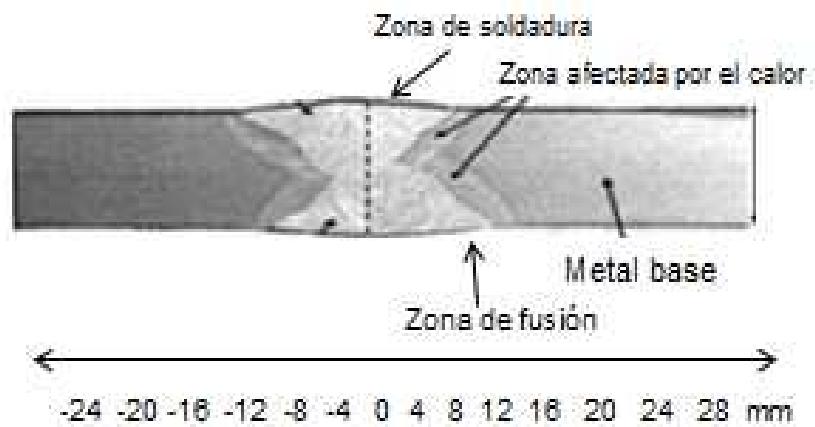
Defecto	Recurrencia	%
Porosidad	4	33 %
Sobremonta	4	33 %
Distorsión	2	17 %
Salpicadura	2	17 %

Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Ensayo de dureza

A continuación se presentan las diferentes gráficas obtenidas de los ensayos de dureza aplicados a las muestras de las platinas soldadas con electrodo E 308L, las gráficas que se muestran se miden como punto 0 la parte central de la soldadura, en el eje "x" se grafica la distancia en milímetros del centro. La dureza mostrada en el eje "y" medida en Rockwell C (apéndice figura 1 descripción del equipo utilizado). La dureza del material base se encuentra medida en la misma línea longitudinal entre 14-16 HR_C.

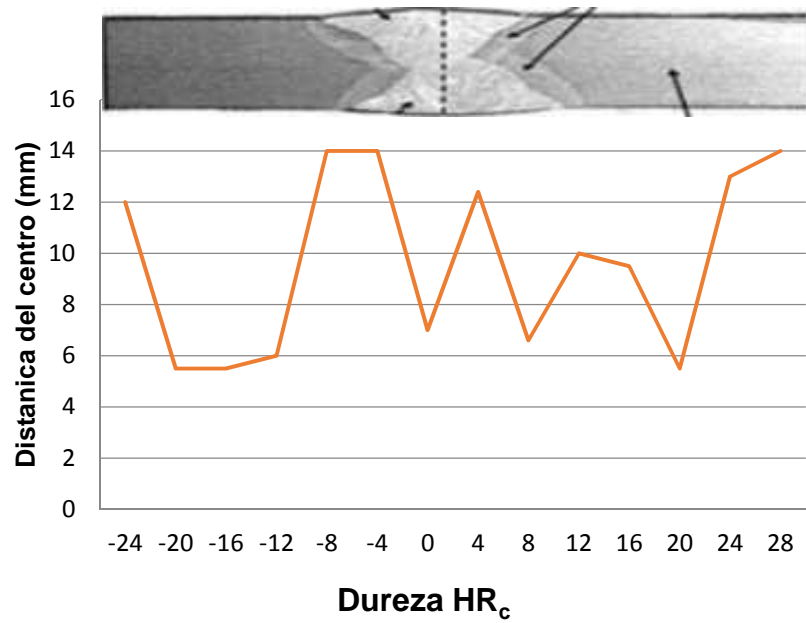
Figura 20. **Zonas y distancias de la soldadura ensayadas en durómetro**



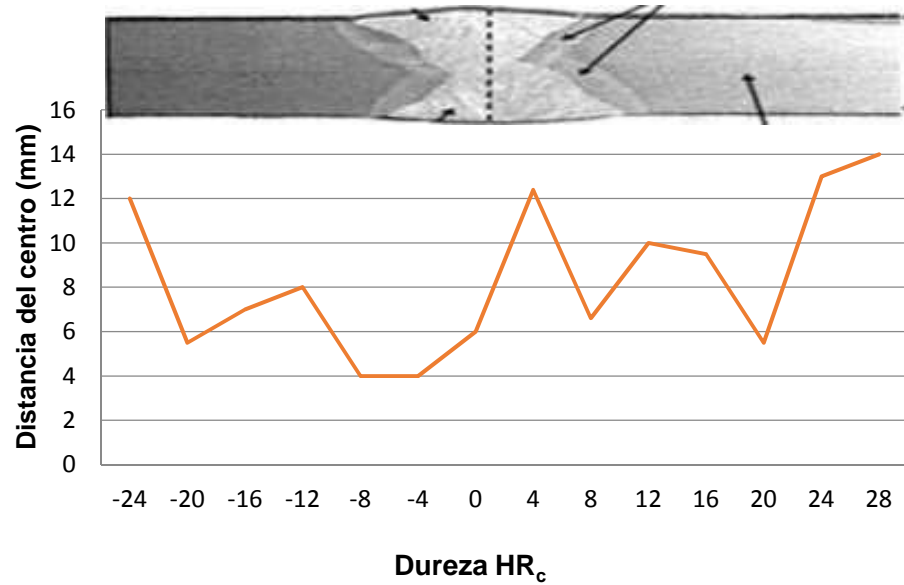
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Gráficas de la A-F del ensayo de dureza ambos métodos

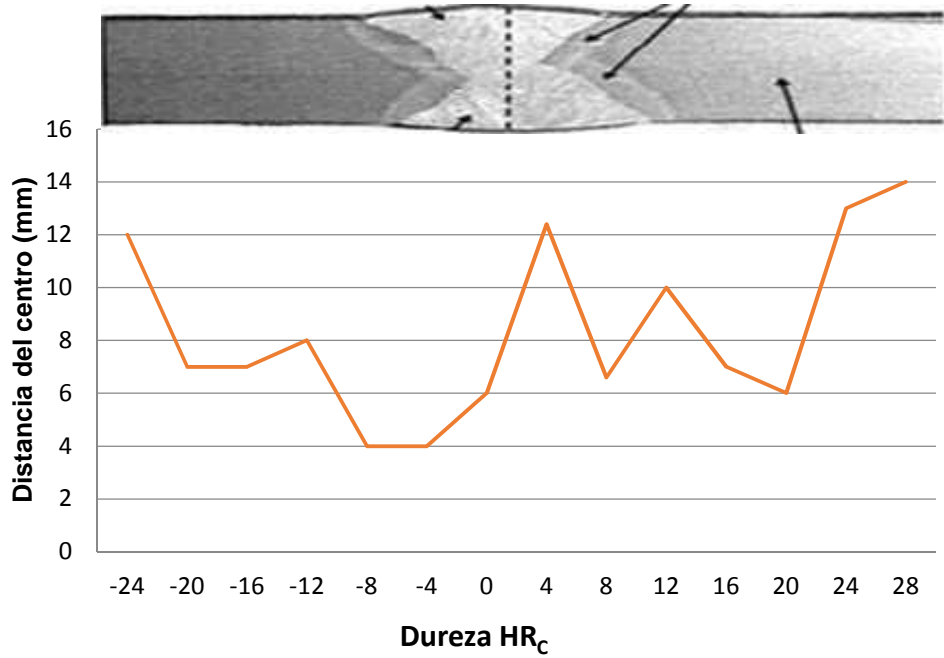
A: Dureza obtenida con el método convencional prueba 1



B: Dureza obtenida con el método convencional prueba 2



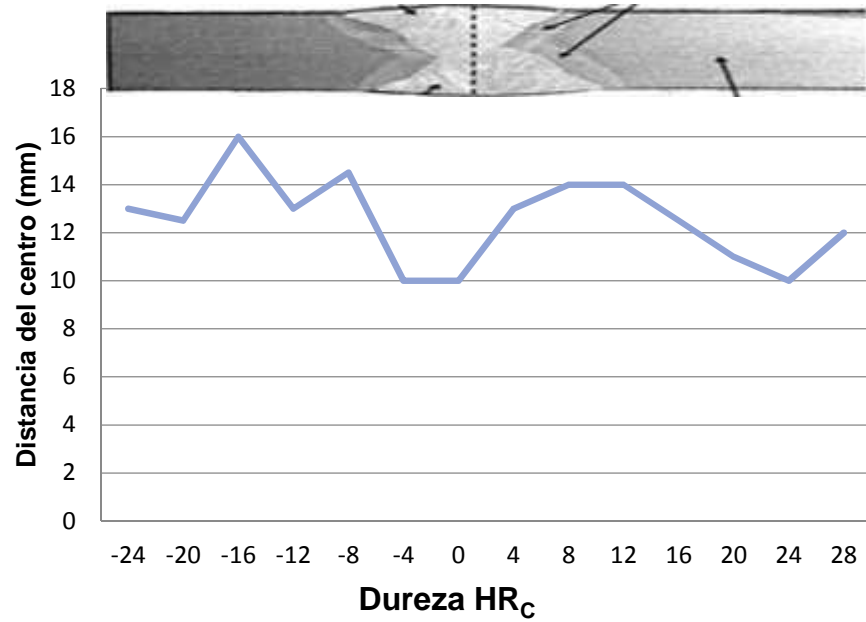
C: Dureza obtenida con el método convencional prueba 3



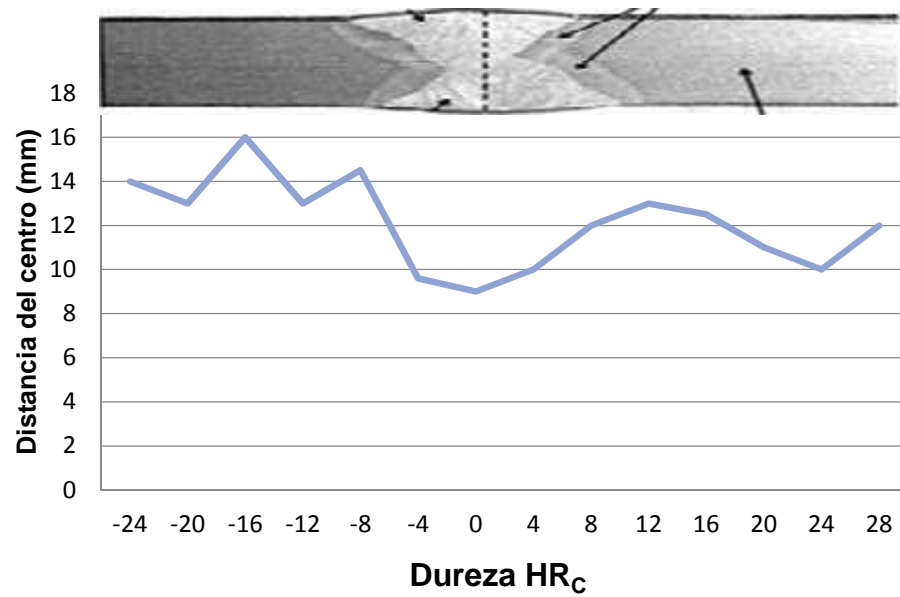
D: Dureza obtenida con el método propuesto prueba 1



E: Dureza obtenida con el método propuesto prueba 2



F: Dureza obtenida con el método propuesto prueba 3



Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en las gráficas la dureza por parte del método convencional no muestra una tendencia uniforme a lo largo de las zonas de la soldadura. En la línea central de la soldadura ambos métodos muestran un leve descenso de la dureza, el método convencional en la zona afectada térmicamente y la zona de fusión tiene incrementos y caídas de dureza, al contrario del método propuesto que señala durezas similares al material base. Se puede inferir que el método convencional muestra zonas sensitizadas debido a la presencia de carburos de cromo y por ello incrementa puntualmente la dureza.

4.1.3. Ensayo de líquidos penetrantes

Las fotografías señalan los defectos encontrados con el ensayo de líquidos penetrantes.

Figura 22. **Aplicación de líquidos penetrantes, revelador (derecha), penetrante (izquierda) a platina de (a) método convencional y (b) método propuesto**

a)



Continuación de la figura 22.

b)



Fuente: elaboración propia.

La aplicación del líquido penetrante revela que no existen fisuras superficiales en la soldadura, se aprecia porosidad mínima en dos puntos, los cuales según ASME V no son motivos de rechazo. Cabe resaltar que el método propuesto por aplicar cordón corrido y remoción de defectos no mostró ningún defecto.

4.1.4. Ensayo de resistencia a la corrosión

Para determinar la calidad de la soldadura y el efecto a las propiedades de resistencia a la corrosión se le realizó el ensayo de susceptibilidad al ataque de corrosión intergranular según norma ASTM A 262 prácticas A. Para tener un marco de comparación se colocaron dos piezas de la muestra de acero inoxidable para sensitizarlo a 650 °C durante 3 h y 20 h, enfriándolos

lentamente en cal. El ataque con ácido oxálico se observa en las siguientes fotografías.

Figura 23. **Redondo aplicado el ataque con ácido oxálico y sección de plancha soldada método convencional**



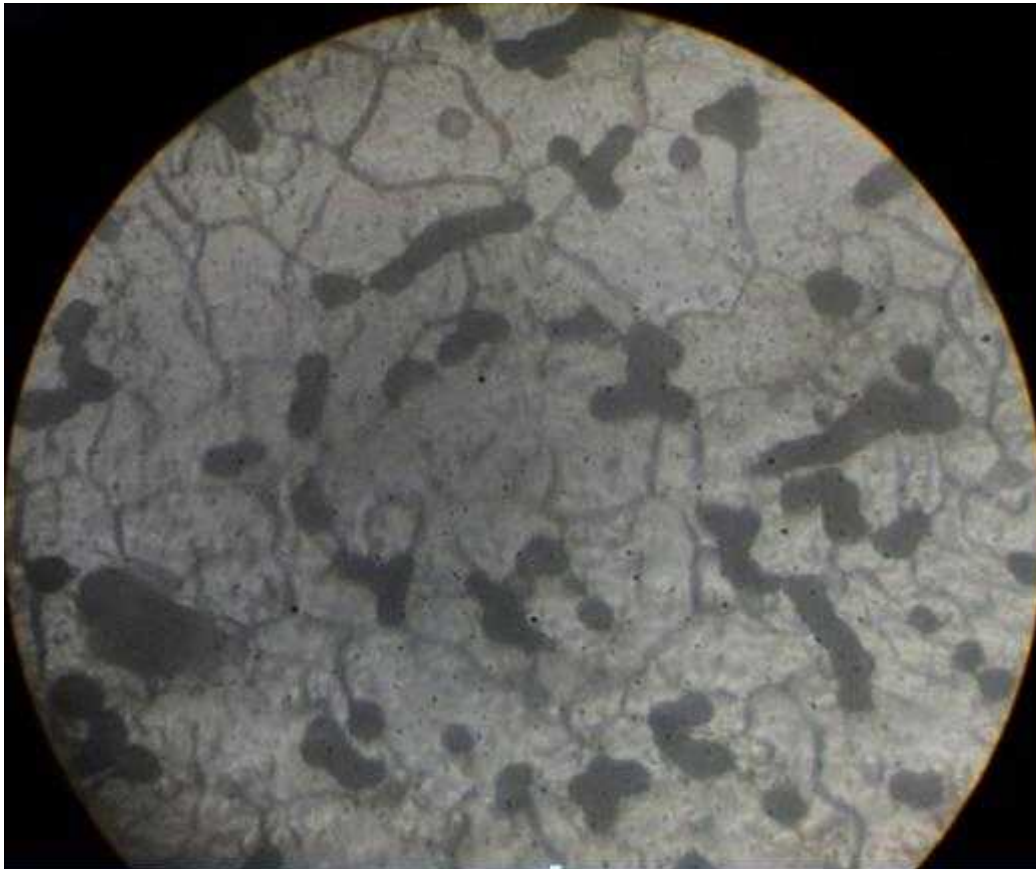
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Microfotografía del material base, estructura step según ASTM A 262 100 x ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm² 3,5 minutos**



Fuente: elaboración propia.

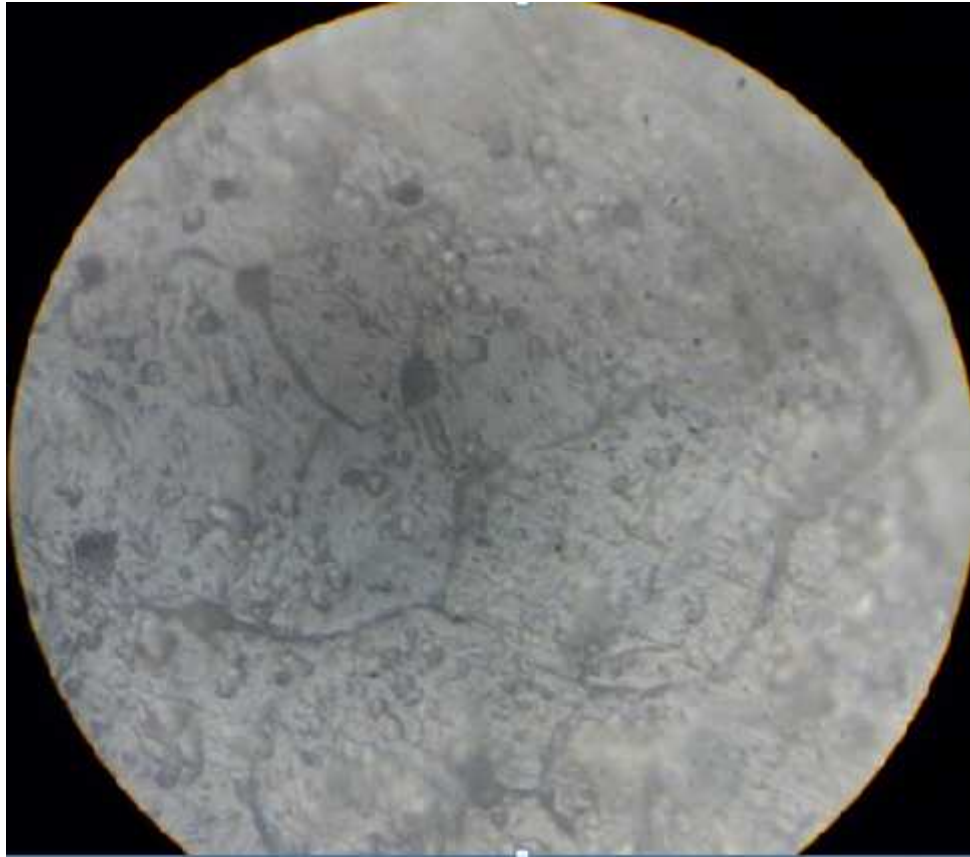
Figura 25. **Microfotografía del material base sensitizado en horno a 650 °C 3 h, estructura ditch según ASTM A 262 100 x ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm² 3,5 minutos**



Fuente: elaboración propia.

La estructura que se muestra corresponde a un ataque profundo, los bordes de granos se ven con zanjas (*ditches*) según norma ASTM A 262.

Figura 26. **Microfotografía del material base sensitizado en horno a 650 °C, 20 h, estructura “corrosión en borde de grano” según ASTM A 262 100 x ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm² 3,5 minutos**



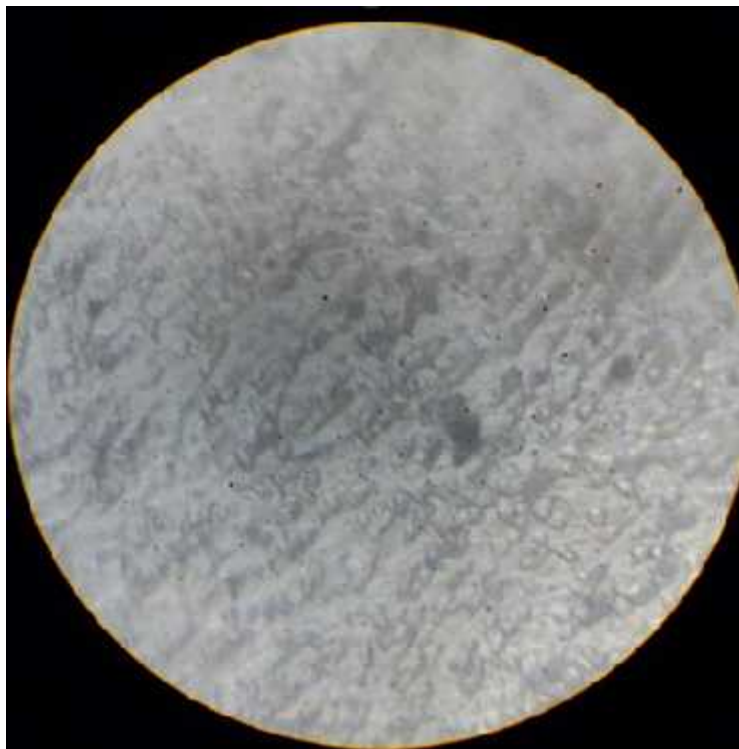
Fuente: elaboración propia.

Esta imagen, aunque confusa, tiende a parecer al material base, pero según norma ASTM A 262 corresponde a un ataque severo en los bordes de grano debido al tiempo prolongado y a la difusión del carbono hacia la zona circunferencial de la pieza; según la norma correspondería una evaluación con ácido nítrico pero, al tratarse de una comparación, queda fuera del alcance de la presente investigación.

4.1.4.1. Resultados obtenidos

En las siguientes microfotografías se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de las planchas seccionadas y redondos soldados según figura 23. Se seleccionaron las fotografías más representativas al inspeccionar minuciosamente cada una de las piezas.

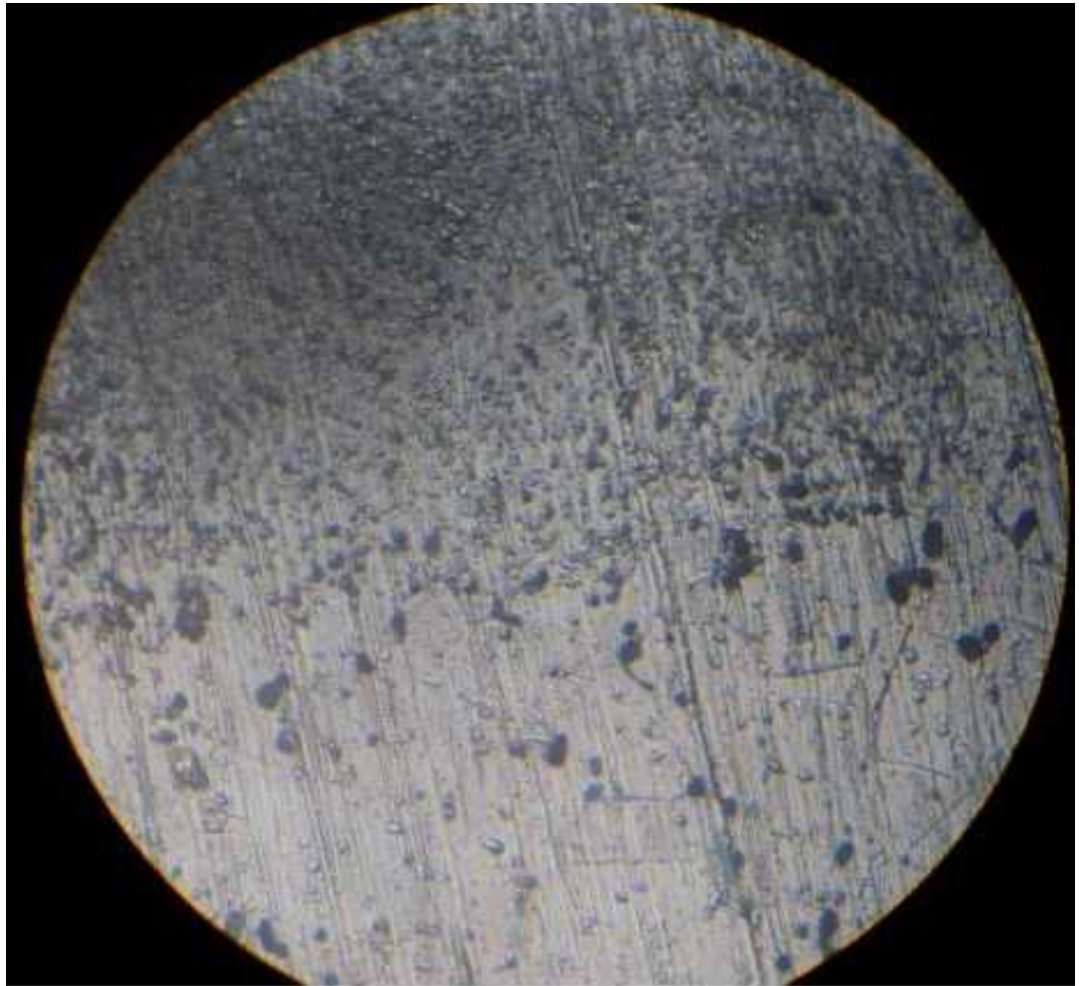
Figura 27. **Material de aporte E 308L método convencional 100 x, ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm² 3,5 minutos, temperatura ambiente**



Fuente: elaboración propia.

Se observa piscinas de ferrita aislada sin ningún rastro de ataque en los bordes de grano.

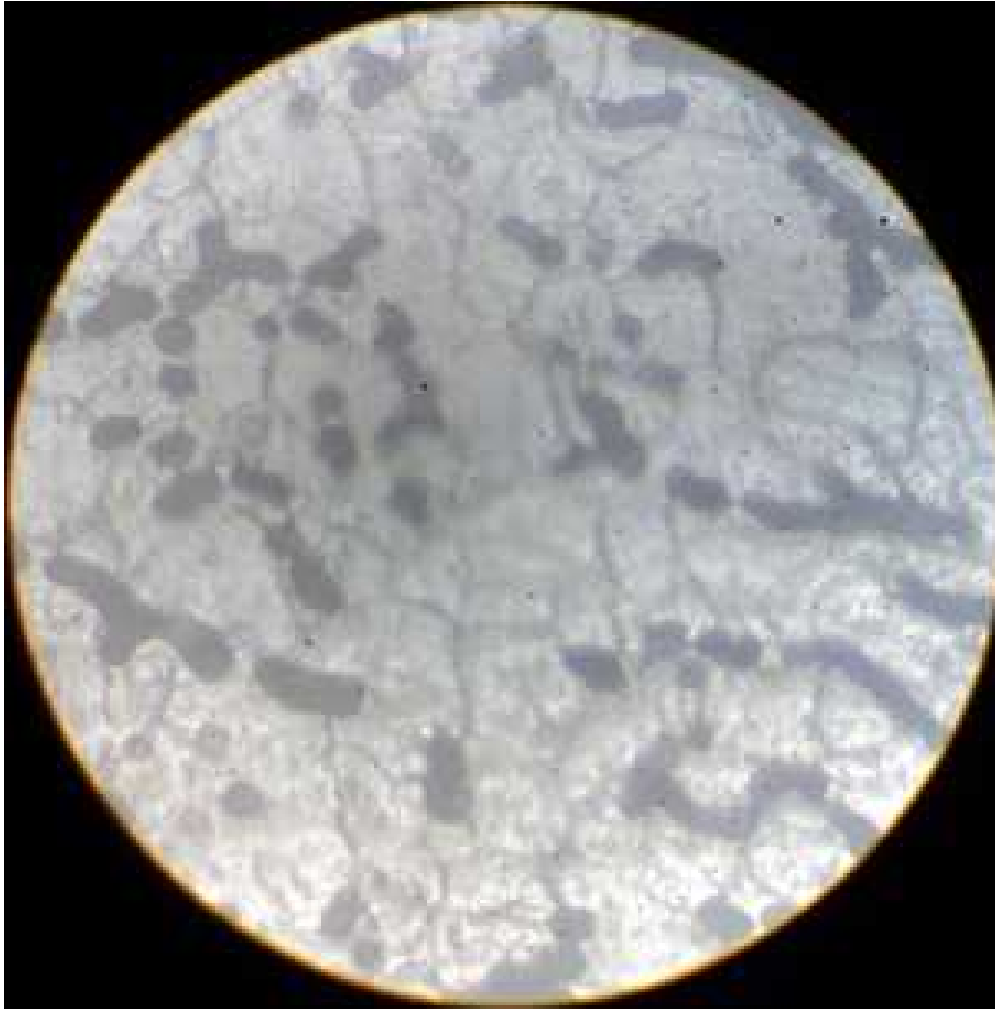
Figura 28. **Zona de fusión y material de aporte (HAZ) método convencional 50 x, ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm² 3,5 minutos**



Fuente: elaboración propia.

En la zona superior se observa los rasgos de la piscina de ferrita aislada, pero en la zona central lado derecho (zona afectada por el calor) se aprecia ciertos bordes de grano marcados. En la siguiente microfotografía se realiza un acercamiento para visualizar mejor el fenómeno.

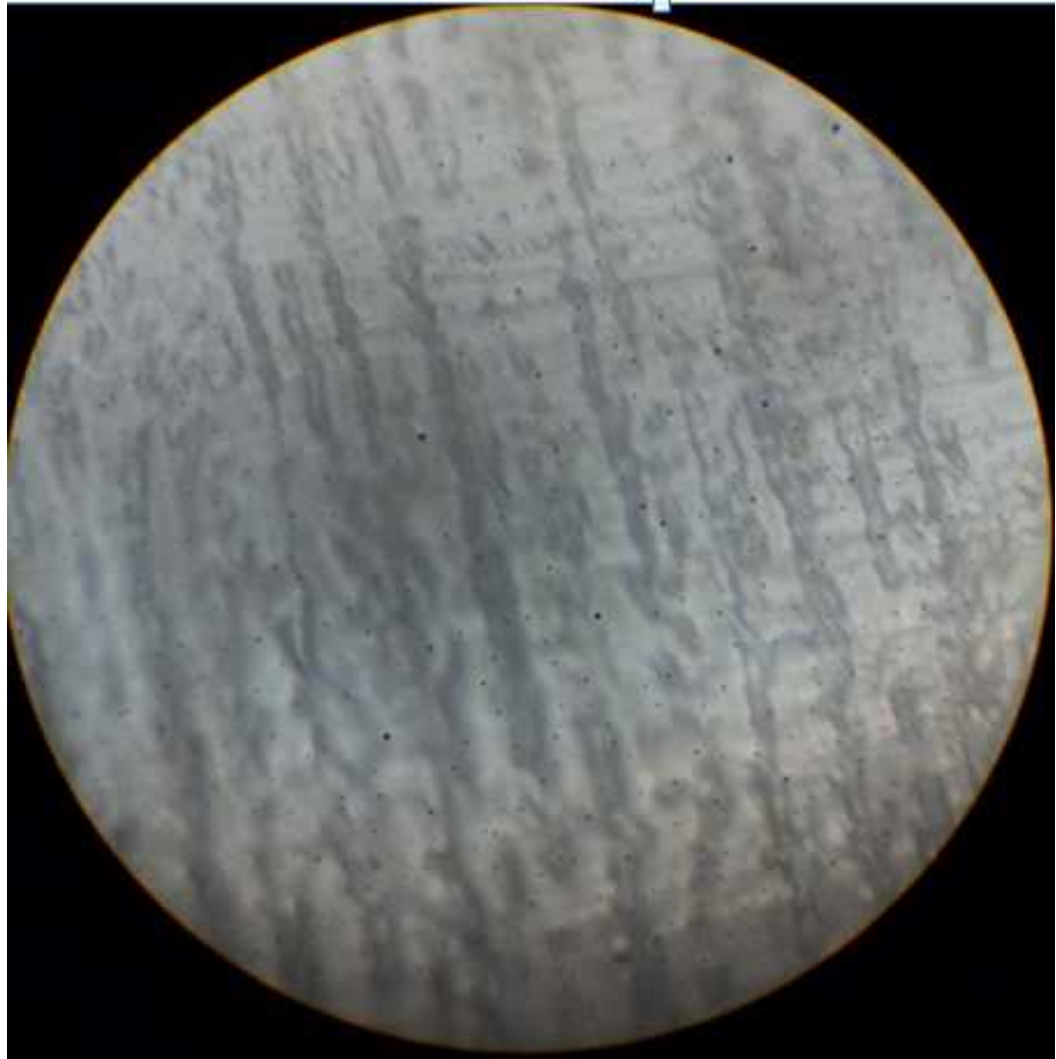
Figura 29. **La misma probeta de la figura anterior, zona afectada por el calor, pero 100 x**



Fuente: elaboración propia.

En efecto al comparar la figura 29 con la figura 25 se observa el ataque corrosivo en los bordes de grano, aunque la pieza no permanece tiempos prolongados en la zona crítica el material queda expuesto, formando carburos de cromo susceptibles al ataque señalado.

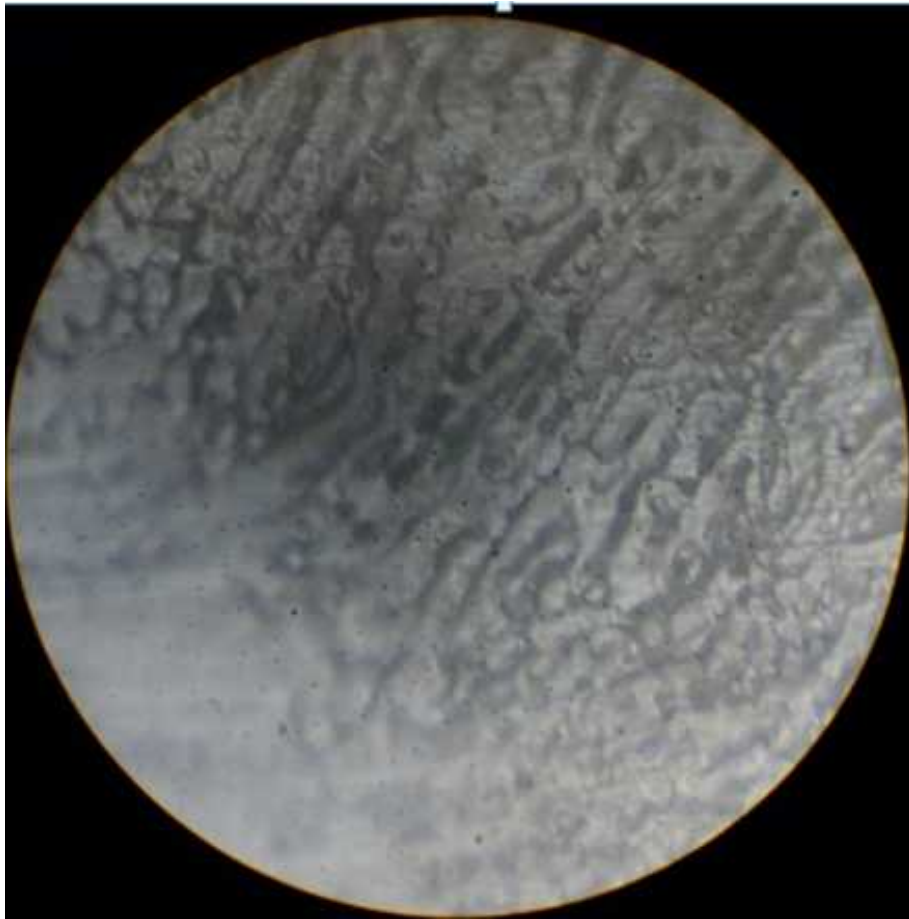
Figura 30. **Material de aporte E 308L método propuesto 100 x, ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm² 3,5 minutos**



Fuente: elaboración propia.

La imagen muestra piscinas de ferrita aislada sin ningún rastro de ataque en los bordes de grano.

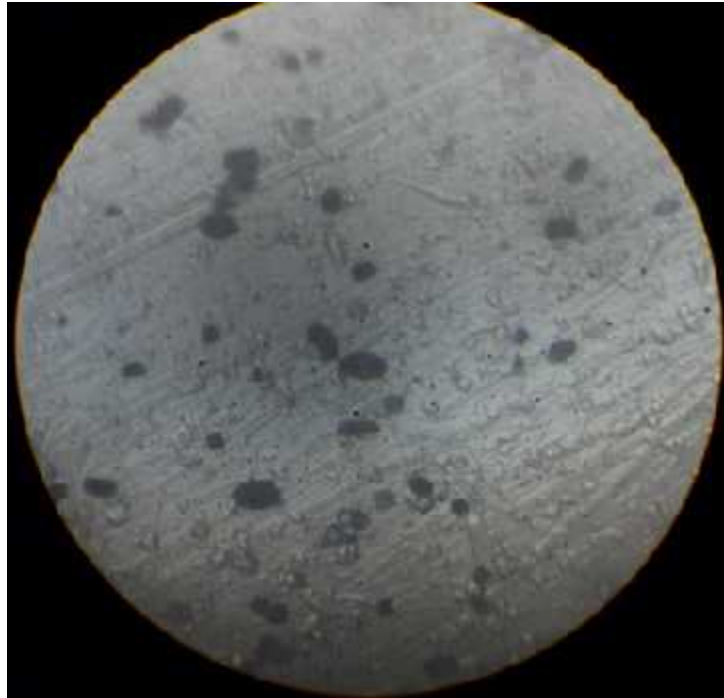
Figura 31. **Zona de fusión y material base (HAZ) método propuesto**
100 x, ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm²
3,5 minutos



Fuente: elaboración propia.

Se observan piscinas de ferrita aislada sin ningún rastro de ataque en los bordes de grano, tanto en la zona afectada por el calor (borde inferior izquierdo) como el material de aporte y zona de fusión, si se continuara se llegaría al material base, el cual está señalado en la microfotografía siguiente.

Figura 32. **Material base (HAZ) método propuesto 100 x, ataque ácido oxálico 10 %, 15 v a 1,5 A/cm² 3,5 minutos**



Fuente: elaboración propia.

En la estructura de grada *step* material base no se observa ningún grano atacado en la zona afectada por el calor (borde superior derecho).

Al realizar una evaluación individual en 3 probetas del método convencional se observó una tendencia marcada mostrada en la figura 28 a 50x. En ciertas zonas al aumentar a 100 x se aprecia estructuras con mayor proporción de zanjas o *ditches*, en los límites de grano, y al compararlo con la figura 26, demuestra la susceptibilidad al ataque corrosivo. Por parte del procedimiento propuesto, tanto el material de aporte como en la zona de fusión, se aprecia piscinas de ferrita aislada o *isolated ferrite pools* (figuras 30 y 31) hasta llegar a la zona del material base figura 32.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la presente sección se analizan los resultados de los ensayos realizados, lo cual será representativo para la toma de decisiones en lo referente a la escogencia del procedimiento de soldadura a emplear:

5.1. Inspección visual

De acuerdo a los resultados obtenidos por medio de la inspección visual se aprecia en las platinas de las muestras soldadas por el método convencional y las barras redondas, que en cuatro de las platinas soldadas hay porosidad, en dos de las muestras socavaduras y sobremontas en los últimos cordones soldados, en dos se distorsionaron y dos presentaban salpicaduras. Lo anterior, se debe a la forma de distribuir los cordones al realizarlos uno sobre otro se produce socavaduras en los límites del cordón, al oscilar se generan surcos dispares y, al momento de realizar el segundo cordón el defecto queda por debajo de este último.

La distorsión encontrada se debe al bisel empleado y a la temperatura elevada de trabajo, originando tensiones residuales elevadas. Las salpicaduras se deben al amperaje variable empleado.

De las planchas seccionadas, según se aprecia en la figura 23, se observa un defecto subsuperficial, en este caso inclusión de escoria, causado por lo expuesto anteriormente, el cordón sin pulir entre pasadas limita la limpieza de la pieza e introduce toda clase de defectos.

En los resultados del procedimiento propuesto no se observan las fallas mencionadas, lo que indica que al pulir las orillas del cordón se eliminan los defectos, y que el pulido superficial excluye la irregularidad de los cordones, por lo que se producen soldaduras uniformes y se evitan los defectos producidos entre pasada y pasada.

5.2. Ensayo de líquidos penetrantes

El ensayo de líquidos penetrantes, al igual que la inspección visual, mostró defectos de porosidad, sobremontas y socavaduras. No se observaron defectos que afecten la calidad de la soldadura según ASME V y no son motivo de rechazo. Por otro lado, comparando ambos procedimientos ensayados, al método propuesto no se le observan defectos de porosidad que, según lo explicado en el punto anterior, se le atribuye a la geometría y la distribución realizada de los cordones de soldadura.

5.3. Ensayo de dureza

Las gráficas mostradas en el ensayo de dureza son concluyentes, las planchas soldadas exhiben una tendencia marcada en el caso del procedimiento propuesto. En la zona de soldadura se observa una leve disminución de la dureza debido al material de aporte blando comparado con el metal base. En la zona de fusión y la zona afectada por el calor se observa dureza muy similar al material base y probablemente de composición química parecida, la zona afectada por el calor no se extiende demasiado aproximadamente 6 mm medido desde la zona central.

El método convencional muestra una tendencia heterogénea a lo largo de las secciones ensayadas. Al igual que el método propuesto se le observa una

disminución de la dureza en la soldadura, la zona de fusión tiene variaciones considerables llegando en ciertos puntos a superar al material base, luego la zona afectada por el calor es más extensa y la dureza disminuye en ciertos puntos y en otros aumenta en comparación al metal base, hasta llegar a los 20 mm donde se encuentra la zona de metal base (durezas similares). Se puede inferir, aunado a la inspección visual que, los calentamientos focalizados probablemente generan carburos de cromo, lo cual afecta directamente los resultados de dureza puntal encontrada, posteriormente se visualizan en el ensayo microscópico de ataque con ácido oxálico .

5.4. Ensayo microscópico de ataque con ácido oxálico

Luego de analizar las probetas de redondos y planchas soldadas se observó en las probetas trabajadas con el método convencional, algunos granos atacados (figura 28) en la zona afectada por el calor. Al realizar el análisis a lo largo de toda la circunferencia soldada a 50x se notó zonas donde existen bordes de granos atacados, se infiere, al unir los resultados del ensayo de dureza, que el procedimiento expuso ciertas zonas por tiempos prolongados en el rango de 450^o-900 °C (formación de carburos).

El fenómeno se le puede atribuir al poco tiempo de enfriamiento que se le da a las piezas entre pasadas de cordón y la irregularidad de la superficie que limita la transferencia calórica. La figura 28 muestra la región de los bordes, en donde se observan zanjas (*ditches*) poco profundas pero que marcan una tendencia a la oxidación.

El método que se propone al emplear un rápido enfriamiento con algún fluido evita que el material base y la zona afectada por el calor se sitúen en el rango de temperaturas de formación de carburos. Además, la limpieza entre

pasadas y el pulido superficial precalientan la pieza, a bajas temperaturas, evitando choques térmicos que pudieran generar microfisuras, fenómeno que no se observó en ninguna de las probetas tratadas por ambos métodos.

La tabla que mostró esta situación resume los defectos encontrados luego de analizar los resultados obtenidos de los ensayos de dureza, líquidos penetrantes y el ensayo de corrosión.

Tabla VII. **Defectos encontrados en los ensayos de soldadura**

Defecto	Recurrencia	Porcentaje
Porosidad	4	25,0 %
Sobremonta	4	25,0 %
Corrosión intergranular	3	18,8 %
Distorsión	2	12,5 %
Salpicadura	2	12,5 %
Inclusiones de escoria	1	6,2 %

Fuente: elaboración propia.

Cabe mencionar, que los defectos encontrados como inclusiones de escoria aparecieron durante el seccionamiento de las muestras de las planchas. Se reitera que los defectos listados en tabla VII se manifestaron en el procedimiento convencional de soldadura.

En lo referente al procedimiento de soldadura empleado, se resalta que se puede implementar procesos alternos de soldadura como los son el GMAW o GTAW, donde se utiliza gas inerte para proteger la unión soldada.

En futuros estudios, siguiendo las líneas de investigación del curso de Diseño y Metalurgia de la Soldadura, habrá que observar el comportamiento de los procesos mencionados previamente, en lo referente a la corrosión intergranular.

Por otro lado, se deberá evaluar la posibilidad de implementar cobertores epóxicos que mejoren la calidad de la soldadura en casos específicos, donde se tiene abrasión como medio de desgaste en elementos como: impulsores de bombas construidos de aceros inoxidable o reparación de válvulas empleadas en procesos de conducción de aguas para la generación de electricidad.

5.5. Consideraciones para la aplicación del método propuesto

Antes de comenzar cualquier soldadura en aceros y específicamente en acero inoxidable debe removerse toda la suciedad como grasa o materia foránea por intermedio de decapado, desengrasado, mecanizado o amolado; el cual como se presentará en la sección siguiente se realiza previo a la soldadura, en el caso de la tubería de conducción de agentes químicos. Debe usarse exclusivamente cepillos de acero inoxidable para evitar contaminación.

Para soldadura plana el electrodo debe mantener un ángulo de 15° y la parte superior inclinada en el sentido de avance. El arco debe mantenerse lo más corto posible sin oscilar como se mencionó en el capítulo 3. Para soldadura vertical, el electrodo debe mantenerse perpendicular a la chapa y usarse una en

lo más mínimo la oscilación en la pasada de raíz. Para soldadura sobre cabeza el depósito debe realizarse en cordones rectos y cortos.

El método que se propone, en función de los resultados obtenidos, tanto por la observación microscópica, cuanto de los ensayos de corrosión y dureza no compromete la resistencia a la corrosión de los elementos analizados. El depósito debe realizarse con la intensidad de corriente necesaria y con cordones rectos. Los cordones rectos minimizan el calor aportado y reducen la tendencia a la fisuración. Siempre se debe llenar los cráteres antes de cortar el arco.

El amperaje a emplear no deberá ser muy bajo, produciendo un arco inestable, en ocasiones, provocando que el electrodo se adhiera al material base lo cual produce inclusiones de escoria, un excesivo salpicado e irregularidad en el cordón. Un amperaje elevado y/o un arco muy largo producirán un salpicado excesivo con pérdida de material, fisuración y pérdida de resistencia a la corrosión por la difusión del cromo formando carburos. Antes de efectuar una soldadura, se recomienda realizar pruebas con materiales de chapas aproximadas para verificar el amperaje adecuado.

El seguimiento del procedimiento de soldadura apropiado produce cordones lisos y densos, donde la escoria puede removerse totalmente con facilidad, dejando una superficie limpia para recibir el siguiente cordón. Para asegurar la calidad del trabajo, se insiste en que debe removerse toda la escoria y eliminarse las depresiones (por amolado) tanto superficiales como laterales, en el caso de soldadura de varias pasadas, siempre implementado el traslape al 50 % del anterior.

6. APLICACIONES DEL MÉTODO PROPUESTO

Luego de verificar los procedimientos de soldadura, el método propuesto se aplica en elementos de acero inoxidable para su comprobación en procesos reales, los cuales se describen a continuación:

6.1. Reparación y soldadura de tubería de 76,2 mm (3 in) para planta de tratamiento aguas residuales

Al principio del capítulo 3, se describió el problema de soldadura en la conducción de tubería, donde presentaba picaduras en la zona soldada, posiblemente causada por inclusiones de escoria o material foráneo que formaba corrosión por picadura y que posteriormente repercutía en fugas.

Para el caso en particular se soldó la tubería de acero inoxidable AISI 304 de 76,2 mm (3 in.), se removió totalmente la soldadura anterior empleado disco de amolar, se empleó electrodo E 308 L de 2,4 mm de diámetro, amperaje de 85-90 y bisel tipo "V" en ambas caras. El paso de cordón lo más corto posible y soldando en toda la circunferencia. Se pulieron las orillas, como se demostró en la sección anterior, se empleó como medio de enfriamiento chorro de aire hasta palparlo y medir que la temperatura estuviese por debajo de los 80 °C.

6.2. Fabricación de tensor de cadena

El tensor de la cadena se realizó nuevamente empleando plancha de acero inoxidable AISI 304 de 15,87 mm de espesor. Se cortaron las piezas con disco de corte de 1 mm de espesor para acero inoxidable, el acabado se realizó

en fresadora. Para la soldadura se utilizó electrodo E 308L de 2,4 mm de diámetro, amperaje de 70-75. Se utilizó la técnica de traslape al 50 % para los cordones, precalentando la pieza a 80 °C para evitar el choque térmico, la distorsión se controló empleando sujeción de ambos lados y realizando un bisel en “V”, durante la soldadura se enfrió con agua para mantener la temperatura por debajo de los 120 °C.

Figura 33. **Tensor de cadena terminado**



Fuente: elaboración propia.

6.3. Reparación de tubo de intercambiador de calor

Para la falla en tubo de intercambiador de calor se empleó la misma técnica que en la tubería de conducción de agua residual, considerando que los agentes químicos empleados en el proceso como ácidos y cloruros repercuten en la resistencia a la corrosión de la soldadura, se limpió empleando acetona la zona a trabajar. El espesor de la chapa es de 1,5 mm, no se consideró

necesario el precalentamiento, la falla se removió totalmente con disco de corte de 1 mm de punta a punta con 2 mm más de cada lado, se trabajó empleando electrodo E 308L de 2,38 mm (3/32 in.) de diámetro a 75 amperios. La zona a soldar se cubrió con 2 pasadas de electrodo, el enfriamiento se controló con agua y limpiándose respectivamente.

Figura 34. **Soldadura de intercambiador de calor**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Los defectos más recurrentes que se encontraron en los elementos ensayados en acero inoxidable austenítico soldados al arco eléctrico con electrodo revestido consistieron en: un 25,0 % de porosidad, 25,0 % en sobremonta, 18,8 % por corrosión intergranular y corrosión bajo tensión, 12,5 % en distorsión, 12,5 % en salpicaduras, y 6,2 % en inclusiones de escoria; debido a su recurrencia en: limpieza inadecuada de la pieza de trabajo, distribución de los cordones de soldadura, temperaturas elevadas y enfriamiento inconveniente de las secciones soldadas y arco inestable.
2. Se identificó al acero inoxidable austenítico AISI 304, como un acero que presenta un alto grado de soldabilidad durante la aplicación del proceso SMAW. Adquiere alta soldabilidad al emplear el electrodo AISI 308 L teniendo mejor compatibilidad con el material base. La temperatura de soldadura deberá ser inferior a los 150 °C y mantener cordones cortos con baja o nula oscilación de arco. Si la chapa del material es superior a 3 mm se puede emplear precalentamiento de 50-60 °C y para el enfriamiento se debe de realizar de forma rápida con algún fluido y evitar la zona de 450-900 °C.
3. Al revisar el procedimiento experimental de levantado de cordones por el método propuesto, se comprobó mejor calidad de las soldaduras de acero inoxidable austenítico AISI 304 reduciendo los defectos, principalmente los consistentes en inclusiones de escoria, sobremontas y el más representativo la corrosión intergranular, al disminuir el calor de

entrada en las piezas de trabajo. Al mismo tiempo, se emplea menor cantidad de material de aporte y no altera la resistencia a la corrosión del acero. Por otro lado, el procedimiento tradicional de soldadura genera focos de calor en la zona afectada térmicamente lo cual compromete la resistencia a la corrosión.

RECOMENDACIONES

1. Para mejorar la calidad de las piezas soldadas es necesario realizar una evaluación del medio al cual se someterá la pieza tratada. El acero inoxidable 304 es vulnerable al ataque de cloruros, los cuales son empleados en diversos procesos industriales.
2. Al utilizar un fluido para el enfriamiento rápido de las piezas soldadas, se debe limpiar exhaustivamente el área de trabajo. En el caso que se emplee agua como medio de enfriamiento, se corre el riesgo de introducir hidrogeno en el área soldada y fragilizar la pieza de trabajo. Puede emplearse un paño de trapo con acetona u otro agente libre de hidrogeno para tal fin.
3. Evaluar las características y requisitos necesarios de las soldaduras para cada caso en particular, y en lo posible evaluar la utilización de revestimientos epóxicos que coadyuven a la resistencia frente a la corrosión del acero inoxidable.
4. Durante la realización del ensayo de corrosión tener extrema precaución con los vapores generados por el ácido oxálico, empleando equipo de protección individual.
5. Realizar prácticas como las diseñadas en el presente trabajo, y en lo posible hacerlas en el laboratorio de Metalurgia de la Soldadura de la FIUSAC, contribuyendo al desarrollo de investigaciones que apoyen a la prevención de la corrosión.

6. Para continuar las líneas de investigación específicamente en el área del curso de Diseño y Metalurgia de la Soldadura, implementar el procedimiento propuesto en otros tipos de procesos al arco eléctrico como son: GTAW y GMAW; realizando la evaluación con los ensayos correspondientes principalmente, el ensayo de corrosión.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, R (1989). *Introducción a la inspección de soldaduras*. Proyecto Regional de Ensayos No Destructivos para América Latina y el Caribe (1)(1), RLA-82-T01, ONU-CNEA. 1-61.
2. Aguilar, R (2006). *Corrosión y aceros inoxidable*s. Proyectos de Investigaciones Metalúrgicas INDESA-SIE (1)(1), 1-87.
3. Aguilar, R. & Soria L. (2008). *Investigación y reparación de falla por fatiga en un balancín para la trituración de piedra en la fabricación de cemento*. FIUSAC (1)(5), 7-11.
4. Aguilar, R. & Soria, E. (2009). *Inspección y reparación de falla de un crisol para galvanizado de chapas de acero*. FIUSAC (1)(5), 10-14.
5. Aguilar, R. & Soria, E. (2012). *Inspección y análisis de falla por corrosión en una tubería de acero inoxidable*. FIUSAC (1)(7), 12-18.
6. American Welding Society (2000). *Welding Inspection Handbook*. Miami: AWS.
7. ASM International (2005). *Corrosion: fundamentals, testing and protection*. Metals Handbook (13A). ASM International. Ohio.
8. ASM International (2005). *Heat treating*. Metals Handbook (4). ASM International. Ohio.

9. ASM International (2005). *Metallography and microstructures*. Metals Handbook (9). ASM International. Ohio.
10. ASM International (2005). *Welding, brazing and soldering*. Metals Handbook (6). ASM International. Ohio.
11. Cañas, L. (2010) *Estudio de la soldabilidad del acero inoxidable 304 con la aplicación de procesos SMAW, GTAW Y GMAW*. (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Metalúrgica) Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias Físico-Químicas. Colombia, Bucaramanga.
12. Celada, E & Aguilar, R. (2013). *Soldabilidad del acero AISI 1045 con electrodos E8018B2 y E9018B3*. FIUSAC (1)(4), 7-13.
13. Celada, E (2012). *Metodología para el reacondicionamiento de ejes de acero al carbono, AISI 1045, por medio de soldadura*. (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica). Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
14. Cruz, J (1988). *Soldadura de aceros inoxidables y análisis práctico por medio de los ensayos no destructivos*. Guatemala: (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica). Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
15. Chuaiphan, W & Chandra-Ambhorn (2012). *Dissimilar welding between AISI 304 stainless steel and AISI 1020* (Thesis of Material and Metallurgical Engineering Program) Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. China.

16. Gaona-Tiburcio, C. (2000). *Estudio de corrosión bajo tensión en los aceros inoxidable 17-4 PH y 17- 7 PH en presencia de NaCl y NaOH (20 %) a 90 °C*. Metalurgia. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (3)(4), 5-13.
17. Gonzáles, O & Santos, G. (2003). *Evaluación del grado de sensibilización en el acero inoxidable AISI 304*. Revista de Metalurgia (1)(6). 80-85.
18. Horwitz, H. (1984). *Soldadura. Aplicaciones y práctica*. México: Representaciones y Servicios de Ingeniería.
19. Ibañes, J. (2005). *Estudio de la soldadura en aceros austeníticos*. (Tesis en Licenciatura en Ingeniería Industrial y Sistemas) Universidad de Piura. Lima, Perú.
20. Kobe Steel (2011). *Arc welding of specific steels and cast iron*. Japan: Kobe Steel LTDA
21. Kobe Steel (2011). *Weld imperfections and preventive measures*. Japan: Kobe Steel LTDA.
22. Kou, S (2003). *Welding metallurgy*. New Jersey: John Wiley & Sons.
23. Laufgang, S. (2013). *Aceros inoxidable*. Termosoldex (1)(1), 1-40.
24. Lázaro, A. (2012). *Propiedades y soldabilidad de los aceros inoxidable*. Lincoln Electric. (1)(1), 1-36.

25. Lippold, J & Kotecki, D. (2005). *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel*. New Jersey: John Wiley & Sons.
26. Norma ASME V (2010). *Nondestructive Examination*.
27. Norma ASTM A 262 (2005). *Detectar la susceptibilidad del acero inoxidable al ataque de corrosión intergranular*.
28. Norma ASTM E 18 (2007). *Ensayo de dureza Rockwell de materiales metálicos*.
29. Norma AWS A5.4 (2008). *Specification for stainless steel electrodes for Shielded Metal Arc Welding*.
30. Ramírez, H, (2013). *Notas del curso de Diseño y Metalurgia de la Soldadura*.
31. Rocha, J. (2011) *Ensaaios de corrosão intergranular em aços inoxidáveis austeníticos após sensibilização, de acordo com as Práticas A E segundo ASTM A262*. Ambiente e Sostenibilidad. (3)(5), 250-271.
32. Soria L, & Aguilar, R. (2013). *Corrosión por picaduras en tuberías soldadas de acero inoxidable causas y soluciones*. FIUSAC (1)(8), 17-24.

APÉNDICES

Figura 1. **Durómetro empleado para los ensayos de dureza**



Marca:	Rockwell Hardness Tester
Modelo:	HR-150^a
No.:	1298
Año:	2000

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Tabla I. **Composiciones químicas de los diferentes tipos de aceros inoxidables**

Type	UNS designation	Composition, % ^(a)								
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Other	
Austenitic Types										
201	S20100	0.15	5.5-7.5	1.00	16.0-18.0	3.5-5.5	0.06	0.03	0.25 N	
202	S20200	0.15	7.5-10.0	1.00	17.0-19.0	4.0-6.0	0.06	0.03	0.25 N	
205	S20500	0.12-0.25	14.0-15.5	1.00	16.5-18.0	1.0-1.75	0.06	0.03	0.32-0.40 N	
301	S30100	0.15	2.00	1.00	16.0-18.0	6.0-8.0	0.045	0.03	...	
302	S30200	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	...	
302B	S30215	0.15	2.00	2.0-3.0	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	...	
303	S30300	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.15 min	0.6 Mo ₂ S	
303Se	S30325	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.06	0.15 min Se	
304	S30400	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	...	
304E1	S30409	0.04-0.10	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	...	
304E2	S30403	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	0.045	0.03	...	
304LN	S30453	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	0.045	0.03	0.10-0.16 N	
302Cu	S30430	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Cu	
304N	S30451	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.16 N	
305	S30500	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	10.5-13.0	0.045	0.03	...	
308	S30800	0.08	2.00	1.00	19.0-21.0	10.0-12.0	0.045	0.03	...	
309	S30900	0.20	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	...	
309S	S30908	0.08	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	...	
310	S31000	0.25	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	...	
310S	S31008	0.18	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	...	
314	S31400	0.25	2.00	1.5-3.0	23.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	...	
316	S31600	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo	
316E	S31620	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.20	0.10 min	1.7-2.5 Mo	
316E1	S31609	0.04-0.10	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo	
316L	S31603	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo	
316LN	S31653	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo, 0.10-0.16 N	
316N	S31651	0.08	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo, 0.10-0.16 N	
317	S31700	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Mo	
317L	S31703	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Mo	
321	S32100	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	5 x %C min Ti	
321E	S32109	0.04-0.10	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	5 x %C min Ti	
340	S34000	0.18	2.00	0.75-1.5	17.0-20.0	34.0-37.0	0.04	0.03	...	
347	S34700	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	10 x %C min Nb	
347E1	S34709	0.04-0.10	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	8 x %C min, 1.0 max Nb	
348	S34800	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	0.2 Co, 10 x %C min Nb, 0.10 Ta	
348E1	S34809	0.04-0.10	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	0.2 Co, 8 x %C min, 1.0 max Nb, 0.10 Ta	
384	S38400	0.08	2.00	1.00	15.0-17.0	17.0-19.0	0.045	0.03	...	

Fuente: Metals Handbook vol. 1, p. 1 305.

Tabla II. **Requerimientos mecánicos para la soldadura aceros
inoxidables con el proceso SMAW**

AWS Classification	Tensile Strength, min		Elongation min Percent	Heat Treatment
	ksi	MPa		
E209-XX	100	690	15	None
E219-XX	90	620	15	None
E240-XX	100	690	15	None
E307-XX	85	590	30	None
E308-XX	80	550	35	None
E308H-XX	80	550	35	None
E308L-XX	75	520	35	None
E308Mo-XX	80	550	35	None
E308MoL-XX	75	520	35	None
E309-XX	80	550	30	None
E309L-XX	75	520	30	None
E309Cb-XX	80	550	30	None
E309Mo-XX	80	550	30	None
E309MoL-XX	75	520	30	None
E310-XX	80	550	30	None
E310H-XX	90	620	10	None
E310Cb-XX	80	550	25	None
E310Mo-XX	80	550	30	None
E312-XX	95	660	22	None
E316-XX	75	520	30	None
E316H-XX	75	520	30	None
E316L-XX	70	490	30	None
E317-XX	80	550	30	None
E317L-XX	75	520	30	None
E318-XX	80	550	25	None
E320-XX	80	550	30	None
E320LR-XX	75	520	30	None
E330-XX	75	520	25	None
E330H-XX	90	620	10	None
E347-XX	75	520	30	None
E349-XX	100	690	25	None
E383-XX	75	520	30	None
E385-XX	75	520	30	None
E410-XX	75	450	20	a
E410NiMo-XX	110	760	15	c
E430-XX	65	450	20	d
E502-XX	60	420	20	b
E505-XX	60	420	20	b
E630-XX	135	930	7	e
E16-B-2-XX	80	550	35	None
E7Cr-XX	60	420	20	b
E2209-XX	100	690	20	None
E2553-XX	110	760	15	None

NOTES:

- Heat to 1350 to 1400°F (730 to 760°C), hold for one hour, furnace cool at a rate of 100°F (60°C) per hour to 600°F (315°C) and air cool to ambient.
- Heat to 1550 to 1600°F (840 to 870°C), hold for two hours, furnace cool at a rate not exceeding 100°F (55°C) per hour to 1100°F (595°C) and air cool to ambient.
- Heat to 1100 to 1150°F (595 to 620°C), hold for one hour, and air cool to ambient.
- Heat to 1400 to 1450°F (760 to 790°C), hold for two hours, furnace cool at a rate not exceeding 100°F (55°C) per hour to 1100°F (595°C) and air cool to ambient.
- Heat to 1875 to 1925°F (1025 to 1050°C), hold for one hour, and air cool to ambient, and then precipitation harden at 1135 to 1165°F (610 to 630°C), hold for four hours, and air cool to ambient.

Fuente: Norma AWS A5.4, p.3.

Tabla III. Resistencia de los acero inoxidable austeníticos a distintas clases de ambientes

Tipo	Leve corrosión atmosférica y agua fresca	Ambiente		Agua Salada	Químico		
		Industrial	Marino		Leve	Oxidante	Reductor
201	X	X	X	.....	X	X	.....
202	X	X	X	.....	X	X	.....
205	X	X	X	.....	X	X	.....
301	X	X	X	.....	X	X	.....
302	X	X	X	.....	X	X	.....
302B	X	X	X	.....	X	X	.....
303	X	X	.....	.....	X	.....	.....
303Se	X	X	.....	.....	X	.....	.....
304	X	X	X	.....	X	X	.....
304H	X	X	X	.....	X	X	.....
304L	X	X	X	.....	X	X	.....
304N	X	X	X	.....	X	X	.....
S30430	X	X	X	.....	X	X	.....
305	X	X	X	.....	X	X	.....
308	X	X	X	.....	X	X	.....
309	X	X	X	.....	X	X	.....
309S	X	X	X	.....	X	X	.....
310	X	X	X	.....	X	X	.....
310S	X	X	X	.....	X	X	.....
314	X	X	X	.....	X	X	.....
316	X	X	X	X	X	X	X
316F	X	X	X	X	X	X	X
316H	X	X	X	X	X	X	X
316L	X	X	X	X	X	X	X

Nota: La “x” marca la aplicación del material al ambiente especificado.

Fuente: Metals Handbook vol. 1 p. 1 312.

Tabla III. Resistencia de los acero inoxidable austeníticos a distintas clases de ambientes continuación

Tipo	Leve corrosión atmosférica y agua fresca	Ambiente		Agua Salada	Químico		
		Industrial	Marino		Leve	Oxidante	Reductor
316N	X	X	X	X	X	X	X
317	X	X	X	X	X	X	X
317L	X	X	X	X	X	X	X
321	X	X	X	.....	X	X	.....
321H	X	X	X	.....	X	X	.....
329	X	X	X	X	X	X	X
330	X	X	X	X	X	X	X
347	X	X	X	.....	X	X	.....
347H	X	X	X	.....	X	X	.....
348	X	X	X	.....	X	X	.....
348H	X	X	X	.....	X	X	.....
384	X	X	X	.....	X	X	.....

Nota: La “x” marca la aplicación del material al ambiente especificado.

Fuente: Metals Handbook vol. 1 p. 1 312.