



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
 COORDINACIÓN DE PASANTÍAS Y TRABAJO DE GRADO
 FACULTAD DE INGENIERÍA

ACTA DE APROBACIÓN DEL INFORME DE PASANTÍA O
 TRABAJO DE GRADO

El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado:

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UNA JUNTA SOLDADA ENTRE
 ACEROS DIFERENTES, UTILIZANDO EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO
 ELÉCTRICO SMAW

Realizada por el (la) Br. CONZALEZ M ANA

C.I. N° 18067993, cursante de la carrera de Ingeniería INGENIERÍA MECÁNICA hace constar después de analizar su contenido y oír la exposición oral, considera que reúne los méritos suficientes para su aprobación asignándole la CALIFICACIÓN DEFINITIVA VEINTE 100 PUNTOS

El Jurado

Tutor académico (coordinador)
 Nombre: GIONVANNI PIZZELLA P
 C. I. 4455899

Jurado (1)
 Nombre: DONATO BONNELO
 C. I. 4131877

Jurado (2)
 Nombre: LUIS ORTEGA
 C. I. 3476801

Fecha: 06/09/2021

PARA SER LLENADO POR LA COORDINACIÓN DE PASANTÍA Y TRABAJO DE GRADO

Se recibió Original del Acta de Aprobación para ser colocada en la solvencia Académica

Nombre del Graduado:
 C. I.
 Fecha:

Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado

SEMESTRE: 2021-1 CR





UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
 COORDINACIÓN DE PASANTÍAS Y TRABAJO DE GRADO
 FACULTAD DE INGENIERÍA

ACTA DE APROBACIÓN DEL INFORME DE PASANTÍA O
 TRABAJO DE GRADO

El jurado designado por la Facultad de Ingeniería para la evaluación del Informe Final de Pasantía o Trabajo de Grado titulado:

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UNA JUNTA SOLDADA ENTRE ACEROS
DISIMILES, UTILIZANDO EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO
SHAW

Realizado por el (la) Br. ROJAS C JOSÉ L

C.I. N° 2725 633, cursante de la carrera de Ingeniería MECÁNICA hace constar después de analizar su contenido y oír la exposición oral, considera que reúne los méritos suficientes para su aprobación asignándole la CALIFICACION DEFINITIVA D^{ta} VEINTE (20) PUNTOS

El Jurado

Tutor académico (coordinador)

Nombre: GIOVANNI HIZELA
 C.I. 4455859

Jurado (1)

Nombre: DEIHO ROMANELLO
 C.I. 4131877

Jurado (2)
 Nombre: LUIS ORTEGA
 C.I. 18476801

Fecha: 06/09/2021

PARA SER LLENADO POR LA COORDINACIÓN DE PASANTÍA Y TRABAJO DE GRADO

He recibido Original del Acta de Aprobación para ser colocada en la solvencia Académica

Nombre del Graduado:

C.I.

Fecha:

Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado

SEMESTRE: 2021-1er





UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UNA JUNTA SOLDADA ENTRE
ACEROS DISIMILES, UTILIZANDO LOS PROCESOS DE SOLDADURA
POR ARCO ELÉCTRICO SMAW**

Autores:

González M. Ana M.

Rojas C. José L.

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego

Teléfonos: (0414) 4291380 – (0412) 7563248



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA**

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UNA JUNTA SOLDADA ENTRE
ACEROS DISIMILES, UTILIZANDO EL PROCESO DE SOLDADURA
POR ARCO ELÉCTRICO SMAW**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autores:

González M. Ana M.

C.I: 28067993

Rojas C. José L.

C.I: 27725633

Tutor:

Ing. Giovanni Pizzella P.

San Diego, agosto de 2021



FI-M-005-2021-ICR (TG)

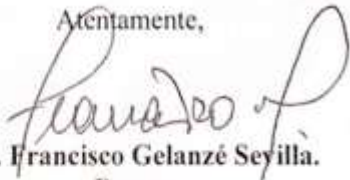
Valencia, 23 de julio de 2021

Ciudadanos:
Gonzalez M., Ana M.
28.067.993
Rojas C., José L.
27.725.633
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 03-2021 de fecha 26-05-2021 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado ***EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UNA JUNTA SOLDADA ENTRE ACEROS DISIMILES, UTILIZANDO EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO SMAW***, presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Giovanni Pizzella C.I: 4.455.859 como Tutor Académico que los asesorará en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,


Dr. Francisco Gelanzé Seyilla.
Decano



c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

FG/a.a.

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado va dedicado a Dios, quien como guía estuvo presente en el caminar de nuestra vida, bendiciéndonos y dándonos fuerzas para continuar con nuestras metas trazadas sin desfallecer. A nuestra familia, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos. Ha sido el orgullo y el privilegio pertenecer a estas dos grandes familias.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos, a nuestros profesores Giovanni Pizzella, Alicia de Pizzella y el profesor Donato Romanello, quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que podamos crecer día a día como profesionales, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Finalmente queremos dedicar esta tesis a todos nuestros amigos, por apoyarnos cuando más los necesitamos, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día y en especial, mi persona, Ana González también dedicarle este logro a mi compañero de tesis José Rojas a quien le debo su apoyo incondicional, por facilitarme los caminos para seguir, sin pedir nada a cambio y sin dudar de mi capacidad y a un gran amigo de la Universidad de Carabobo, Moisés Castillo por ayudarme a entender la ingeniería y con todo su amor, paciencia y dedicación apoyarme a lograr esta gran meta.

AGRADECIMIENTOS

En el presente trabajo agradecemos principalmente a Dios por ser nuestro guía y acompañarnos en el transcurso de nuestra vida, brindándonos paciencia y sabiduría para culminar con éxito nuestras metas propuestas. Faltarán páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial nuestros padres que con su esfuerzo y dedicación ayudaron a culminar nuestra carrera universitaria y nos dieron el apoyo suficiente para no decaer.

Agradecemos a nuestro tutor de tesis el profesor Giovanni Pizzella quien, con su experiencia, conocimiento y motivación nos orientó en la investigación. Además, agradecer todos los docentes que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarnos como personas y profesionales en la Universidad José Antonio Páez.



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA**

APROBACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ing. Giovanni Pizzella, portador de la cédula de identidad N° 4.455.859, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Ana González, portadora de la cédula de identidad N° 28.067.993 y José Rojas, portador de la cédula de identidad N° 27.725.633, titulado **EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UNA JUNTA SOLDADA ENTRE ACEROS DISIMILES, UTILIZANDO EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO SMAW**, presentado como requisito parcial para optar al título de **INGENIERO MECÁNICO**, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe .

En San Diego, mes de agosto del año dos mil veintiuno.



Ing. Giovanni Pizzella

C.I.: 4.455.859

ÍNDICE

CONTENIDO	pp.
ÍNDICE DE FIGURA.....	xii
ÍNDICE DE TABLA.....	xiv
ÍNDICE DE CUADRO.....	xiv
RESUMEN INFORMATIVO	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Formulación del problema	4
1.3 Objetivos de la Investigación.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Justificación.....	5
1.5 Limitaciones.....	6
1.6 Alcance.....	6
II MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes de la investigación.....	7
2.2 Fundamentos teóricos.....	10
2.2.1 Concepto de Acero.....	10
2.2.2 Diagrama de Fe-C	11
2.2.3 Características y Aplicaciones de Aceros.....	16
2.2.4 Clasificación de los aceros.....	18
2.2.5 Acero estructural ASTM A 36.....	20
2.2.6 Aceros inoxidables.....	22
2.2.7 Aceros inoxidables austeníticos.....	29
2.2.8 Acero inoxidable 304.....	32
2.2.9 Soldadura.....	34
2.2.10 Tipos de soldadura.....	35
2.2.11 Soldabilidad.....	37
2.2.12 Soldabilidad de aceros inoxidables Austeníticos.....	44
2.2.13 Fisuración en Caliente.....	44
2.2.14 Corrosión intergranular.....	45
2.2.15 Fragilización por fases sigma.....	45
2.2.16 Distorsiones.....	45
2.2.17 Contaminación de la soldadura.....	46
2.2.18 Características de la soldabilidad de algunos aceros inoxidables austeníticos.....	46
2.2.19 Influencia de la Composición Química sobre la Estructura...	47
2.2.20 Solidificación de los Aceros Inoxidables Austeníticos.....	48

2.2.21 Diagrama de Schaeffler y de DeLong.....	49
2.2.22 Ensayos destructivos y no destructivos.....	53
2.3 Definición de Términos Básicos.....	66
2.4 Símbolos y Abreviaturas de Términos.....	67
III MARCO METODOLÓGICO	
3.1 Tipo de Investigación.....	69
3.2 Diseño de la Investigación.....	69
3.3 Nivel de Investigación.....	70
3.4 Población y muestra.....	70
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	71
3.6 Técnicas de Procesamiento y Análisis de datos.....	71
3.7 Fases de Desarrollo de la Investigación.....	73
IV RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	
4.1 Caracterizar los aceros ASTM A36 y AISI 304 por medio de las propiedades mecánicas.....	83
4.1.1 Caracterización metalográfica.....	83
4.1.2 Caracterización química de los metales bases y de aportación.....	87
4.1.3 Determinación del contenido de ferrita.....	89
4.1.4 Determinación del carbono equivalente.....	90
4.1.5 Determinación de la dureza de los metales base.....	91
4.1.6. Determinación de las propiedades mecánicas por tracción	92
4.2 Definir las variables de soldadura a utilizar en el proceso SMAW.....	95
4.2.1 Diseño de las juntas soldadas.....	95
4.2.2 Pruebas pilotos de soldadura para determinar Los parámetros de soldadura.....	96
4.2.3 Realización de los cordones preliminares.....	98
4.2.4 Fabricación de cupones definitivos.....	100
4.3 Analizar las juntas soldadas con pruebas no destructivas y destructivas.....	101
4.3.1 Inspección Visual.....	101
4.3.2 Evaluación macroscópica de la junta.....	102
4.3.3 Inspección por rayos X industrial.....	103
4.3.4 Ensayos destructivos.....	106
4.3.5 Análisis químico.....	107
4.3.6 Análisis metalográfico de las juntas soldadas.....	108
4.3.7 Análisis del contenido de ferrita de las juntas soldadas.....	110
4.3.8 Análisis del ensayo de microdureza Vickers... ..	112
4.3.9 Ensayo de doblez de la junta soldada.....	114
4.3.10 Ensayo de tracción de las juntas soldadas.....	115
4.4 Establecer las diferencias que se pueden obtener con las juntas soldadas a diferentes condiciones de soldadura.....	117

CONCLUSIONES.....	119
RECOMENDACIONES.....	121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
ANEXO A.....	125
ANEXO B.....	127

LISTA DE FIGURAS

FIGURA

1: Diagrama de Fe-C.....	122
2: Microestructura de la Martensita.....	113
3: Presencia de Cementita (granos claros) y de Perlita (granos oscuros)	144
4: Presencia de Martensita	155
5: Presencia de bainita	155
6: Presencia de Austenita.....	166
7: Transformaciones del hierro	177
8: Clasificación de aceros.....	1919
9: Clasificación de aceros y aplicaciones.....	200
10: Esquema de la clasificación general de los aceros.....	211
11: Esquema de la clasificación general de los aceros.....	222
12: Propiedades mecánicas del acero ASTM A 36.....	222
13: Formación de la capa protectora de los aceros inoxidable.....	23
14: Propiedades generales de los aceros inoxidable.....	255
15: Efecto de los elementos de aleación sobre los aceros inoxidable	266
16: Efecto de los elementos de aleación sobre los aceros inoxidable	333
17: Composición química característica del acero inoxidable AISI-304.....	33
18: Proceso de soldadura manual con electrodo revestido (SMAW).....	36
19: Especificaciones de la AWS para los electrodos recubiertos.....	42
20: Tercer dígito, posición del electrodo.....	43
21: Último dígito: Revestimiento, corriente y polaridad	43
22: Sección del diagrama de equilibrio Fe-Cr-Ni, (70% Fe).....	49
23: Morfologías de ferrita delta según el modo primario de solidificación.....	50
24: Diagrama de Schaeffler.....	52
25: Diagrama de DeLong.....	53
26: Máquina de ensayo de tracción.....	55
27: Comportamiento típico de los materiales Esfuerzo vs Deformación.....	57
28: Curva característica Esfuerzo vs Deformación para materiales dúctiles.....	58
29: Dispositivo para Ensayo de Doblado.....	60
30: Esquema de la matriz de doblado.....	61

31: Microdurómetro Vickers marca Buehler	63
32: Algunos defectos de la soldadura	65
33: Fases de la investigación.....	73
34: Probeta de dobléz.....	81
35: Probeta en la Máquina de Ensayos de Tracción	82
36: Banco de pulido	84
37: Superficies estudiadas en las probetas metalográficas	85
38: Microscopio.	85
39: Microestructura del acero inoxidable AISI 304.....	86
40: Microestructura del acero ASTM A-36	86
41: Cupón para análisis químico del depósito de soldadura.	88
42: Determinación contenido de ferrita por medio del diagrama de Schaeffler ...	90
43: Durómetro Wilson/Rockwell.....	92
44: Esquema de las probetas de tracción	93
45: Equipo de soldadura SMAW	97
46: Depósitos de soldadura realizados con condiciones del proceso SMAW	99
47: Corte de los cordones de soldadura para inspección SMAW	100
48: Láminas de acero ASTM A36 y AISI 304 antes de soldar.....	101
49: Junta soldada definitiva para la evaluación SMAW.....	102
50: Macrografías para el proceso SMAW.	102
51: Fuente de Rayos X.....	104
52: Identificación y montaje de láminas en equipo de rayos X	105
53: Revelado de las radiografías	106
54: Radiografía industrial para la junta disímil SMAW	106
55: Esquema de corte de los cupones para ensayos destructivos.....	107
56: Macrografías de la junta soldada por SMAW	109
57: Micrografías de la junta soldada por SMAW	109
58: Esquema de los parámetros geométricos y de dilución determinados.....	111
59: Diagrama de Schaeffler para la junta realizada	112
60: Microdureza Vickers en la junta soldada.....	113
61: Prensa hidráulica Enerpac	
62: Doblado de cara y doblado de raíz en las juntas soldadas	115

63: Probetas de tracción de las juntas soldadas	116
64: Intercambiador de calor con uniones soldadas por soldadura SMAW	125
65: Uniones soldadas por SMAW entre acero ASTM A36 y acero AISI 304 ...	126

ÍNDICE DE TABLA

TABLA	Pg
1 Composición química del acero estructural A-36.....	88
2 Composición química del inoxidable AISI 304.....	88
3 Composición química del material de aporte E 309 L-16.....	88
4 Cromo equivalente y níquel equivalente para el acero AISI 304 en estudio.....	89
5 Dureza Rockwell B (HRB) para los materiales en estudio.....	92
6 Valores de esfuerzos y deformaciones obtenidos para cada acero ensayado.....	93
7 Parámetros de soldadura para las pruebas piloto.....	96
8 Parámetros iniciales, EBA y ENA para el proceso SMAW.....	98
9 Composición química de los cordones de soldadura y material de aporte para el proceso SMAW.....	107
10 Microdureza Vickers en la junta soldada por el proceso SMAW	113
11 Resistencia mecánica de la junta disímil soldada por medio del proceso SMAW.....	117

ÍNDICE DE GRÁFICO

GRÁFICO	Pg
1 Curva esfuerzo vs deformación para el acero AISI 304.....	94
2 Curva esfuerzo vs deformación para el acero ASTM A-36.....	95
3 Curva esfuerzo vs deformación para las juntas soldadas.....	116



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UNA JUNTA SOLDADA ENTRE ACEROS DISIMILES, UTILIZANDO EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO SMAW

Autores: Ana González

José Rojas

Tutor: Giovanni Pizzella

Fecha: Marzo, 2021

RESUMEN INFORMATIVO

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo general la evaluación comparativa entre dos juntas soldadas de aceros disímiles (ASTM A-36 y AISI 304) desde el punto de vista de propiedades mecánicas y su constitución microestructural. Se inició el estudio realizando una verificación de los metales base, así como también el material de aporte. Seguidamente se realizaron cupones de pruebas para determinar las condiciones de soldadura definitivas, seleccionados, basándose en la inspección visual y macroscopía, así como también en función de la energía bruta aportada y la energía neta aportada. Una vez obtenidos los parámetros definitivos de soldadura se procedió a realizar la junta definitiva y su posterior evaluación por medio de microscopía óptica, ensayos de dureza, tracción, doblado, determinación del porcentaje de ferrita en el cordón de soldadura y la inspección radiográfica. Se comprobó si la junta soldada obtuvo un incremento en sus propiedades mecánicas con respecto al material base ASTM A-36, para verificar si cumple con las exigencias del código ASME sección IX. Teniendo como conclusión que los resultados obtenidos a través de la evaluación no destructiva y destructiva del cupón soldado no evidenció la presencia de discontinuidades o defectos por lo cual los procedimientos de soldadura utilizados se consideran adecuados.

Palabras Claves: ASTM, SMAW, ASME, AWS, disímil, tracción, microestructura, ferrita, martensita, perlita.

INTRODUCCIÓN

Unir dos o más metales mediante soldadura es un proceso que se ha mantenido vigente durante años y, desde sus inicios, ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta de utilidad en la industria metalmecánica, empleada en la construcción de partes y reparaciones de piezas. Es un método de trabajo cuyo objeto es unir metales, a través de técnicas razonablemente económicas, otorgando a la unión propiedades adecuadas y compatibles con el metal base (MB). Entre los métodos utilizados se encuentra la soldadura por arco manual revestido (SMAW), la cual se destaca como uno de los procedimientos más antiguos y simples, y a pesar que han surgido otros métodos más innovadores, no ha sido desplazada del mercado debido a su sencillez y a sus bajos costos. Uno de los materiales más utilizados para este proceso son los aceros al carbono, formando uno de los grupos de materiales con mayor diversidad en los procesos industriales a nivel mundial.

La industria moderna siempre anda en procesos de expansión de sus actividades económicas lo que se traduce a una diversificación de sus procesos productivo, lo cual trae consigo la exigencia de nuevos materiales que sean altamente resistentes a la corrosión. Debido a esto, se han desarrollado y utilizado diferentes aleaciones como lo son los aceros inoxidable, estos aceros cumplen con los requerimientos necesarios para la aplicación industrial, teniendo como desventaja su elevado costo. En este sentido, se hace necesario limitar la aplicación de estos aceros a zonas y aplicaciones muy específicas; por lo que se hace necesario la realización de uniones soldadas disímiles entre el material del cual están constituidas las piezas (regularmente aceros al carbono) y el acero inoxidable. En función a lo antes planteado, se hace necesario proponer un procedimiento de soldadura adecuado para dicha unión, el cual mantenga las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión. Dentro de las distintas gamas de los aceros inoxidable se encuentra el acero inoxidable AISI 304, el cual está microestructuralmente conformado por una combinación ferrita -austenita, cuya aplicabilidad ha venido creciendo en los últimos años en las diferentes industrias. El enfoque de esta investigación es realizar una unión disímil entre un acero inoxidable AISI 304 y un acero estructural ASTM

A-36 por el proceso SMAW para estudiar el efecto en sus propiedades mecánicas en las diferentes zonas de la unión disímil con la variación de los parámetros de soldadura, y así poder establecer un procedimiento de soldadura adecuado.

Por lo demás, la investigación está estructurada en cuatro (4) capítulos conformados de la siguiente manera: En el capítulo I, se plantea el problema, se establecen los objetivos, se justifica la realización del estudio, se delimitan los alcances y las limitaciones de este. En el capítulo II, se plantean los antecedentes de la investigación y los tópicos que sustentan el desarrollo del proyecto. En el capítulo III, se describe la metodología que será utilizada para el cumplimiento de los objetivos planteados; donde se muestran aspectos como el tipo de investigación, las técnicas y procedimientos que serán utilizados para llevar a cabo dicha investigación. En el capítulo IV, se presentan los resultados obtenidos de la investigación.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.

En la industria cada vez son mayores las exigencias de los materiales dependiendo del servicio que prestarán, se espera una mejor respuesta a condiciones de presión, corrosión, resistencia eléctrica, dilatación, ductilidad, dureza, etc. Por eso han surgido aceros especiales que favorecen los requerimientos mecánicos antes descritos. Debido a esto se han desarrollado nuevas aleaciones como son los aceros inoxidable austeníticos. Estas aleaciones cumplen con los requerimientos necesarios para la aplicación industrial, teniendo como desventaja su elevado costo y es por esto que se hace necesario limitar la aplicación de estas aleaciones a zonas muy específicas.

En función a lo antes descrito, se ve la necesidad de realizar uniones soldadas disímiles entre el material del cual están constituidas las piezas (regularmente aceros al carbono) y el acero inoxidable. Teniendo en consideración este problema, es necesario proponer un procedimiento de soldadura adecuado para dicha unión, el cual mantenga las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión. Estos aceros necesitan procesos de conformado para adoptar las formas requeridas y cumplir finalmente sus funciones, y deben llevarse a cabo manteniendo las propiedades del acero sin distorsionarlos.

Por ejemplo, un elevado aporte de calor afecta la zona de la junta cambiando sus propiedades mecánicas y sus dimensiones, ya que estos materiales presentan un alto grado de expansión térmica, según Lefebvre, J. (1.993) Guidance on specifications of ferrite in stainless steel welds metals. Journal Welding in the World, Vol. 31(6). 390 – 407. Este acero es principalmente utilizado en la industria de farmacéutica, textil, marina, procesamiento de químicos, procesamiento de alimentos y minería. Su alta resistencia a la corrosión permite a este acero ser expuesto ante soluciones ácidas, acéticos, aceites y mezclas, según Lippold, J. C.

and Savage W. F. (1.980) Solidification of austenitic stainless steel weldments, part 3. Welding Journal, Vol. 61(12). 388 – 396.

El proceso de soldadura SMAW o soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido o simplemente “Soldadura Eléctrica”, como se conoce en el medio de trabajo, es un proceso de unión por fusión de piezas metálicas, en donde para lograr la unión se concentra el calor de un arco eléctrico establecido entre los bordes de las piezas a soldar y una varilla metálica, llamada electrodo, produciéndose una zona de fusión que, al solidificarse, forma la unión permanente, según Ignoto, V. (2.000). Soldadura para Ingenieros. Universidad Central de Venezuela. Centro Venezolano de Soldadura, CVS. Caracas. Venezuela.

Estudios adicionales de la influencia y consecuencias de la velocidad y cantidad del gas protector que incide en la zona que se está soldando, han determinado cuando deja de ser efectiva la protección gaseosa por efecto de la turbulencia formada con la superficie de trabajo, según Castner, H. R. (1.993). What you should know about austenitic stainless steels. Welding Journal, (4). 53 – 59. Esos estudios adicionales servirán de guía al trabajo en cuestión.

Por estas razones es necesario perfeccionar los métodos de unión de aceros austeníticos y aceros al carbono que mantengan y conserven las propiedades de servicio solicitadas y que a su vez sea rentable. Debido a que los aceros presentan propiedades diferentes hay que tomar en cuenta el efecto de la unión entre ambos y el material de aporte dependiendo de las condiciones impuestas al momento de soldar.

1.2 Formulación del problema.

Con la realización de este trabajo se busca conocer la respuesta a la siguiente interrogante: ¿Cómo influye el proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW, en las características mecánicas de una junta disímil entre un acero inoxidable AISI 304 y el acero estructural ASTM A36?

1.3 Objetivos de la investigación.

1.3.1 Objetivo General.

Evaluar una junta soldada entre aceros disímiles, utilizando el proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW.

1.3.2 Objetivos Específicos.

1. Caracterizar los aceros ASTM A 36 y AISI 304 por medio de las propiedades mecánicas derivadas del ensayo de tracción, metalografía y composición química.
2. Definir las variables de soldadura a utilizar en el proceso SMAW, seleccionando las condiciones de soldadura, sustentadas en pruebas pilotos o cupones de prueba.
3. Analizar las juntas soldadas con pruebas no destructivas (inspección visual y radiografía industrial) y destructivas (ensayo de tracción, doblaje, ensayo de dureza y análisis metalográfico) para determinar las características mecánicas de las juntas soldadas mediante el proceso SMAW entre los aceros ASTM A36 y AISI 304.
4. Establecer las diferencias que se pueden obtener con las juntas soldadas a diferentes condiciones de soldadura.

1.4 Justificación del Problema.

Debido al gran número de procesos en los cuales se encuentra uniones soldadas, surge la necesidad de disponer información respecto al comportamiento mecánico y metalúrgico de los aceros inoxidable AISI 304 y un acero estructural ASTM A 36, cuando se realizan uniones por el método de soldadura SMAW y a su vez comparar dichas propiedades, para definir criterios al momento de estudiar el proceso que se utilizó con este tipo de material.

Esta investigación tiene su importancia debido a los altos costos que conllevan los materiales importados y en la industria del país, que tienen numerosos equipos sometidos constantemente a medios que son altamente corrosivos. Para reducir estos costos, se hace necesario rediseñar algunos elementos de los equipos, de tal manera de limitar única y exclusivamente el uso de materiales costosos, en zona donde realmente sea de total necesidad y justificación su utilización. Por lo antes mencionado, se ha planteado la elaboración de juntas soldadas con materiales disímiles, de tal manera de que la zona que esté en contacto con medios corrosivos, sea de un acero inoxidable AISI 304, mientras que la zona de la pieza que no esté expuesta a dicho medio marino, sea de un acero estructuras ASTM A 36. Por ello se hace necesario estudiar los parámetros de soldadura y su efecto sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de la junta disímil soldada por medio del proceso SMAW entre ambos materiales.

1.5 Limitaciones.

Conseguir un soldador que este calificado por la American Welding Society (AWS), es una limitante importante, además de la disponibilidad de las máquinas y herramientas de ensayo, en un laboratorio de materiales calificado, por el uso que éste tiene en el periodo de clases, si es en la Universidad de Carabobo o por razones económicas, si es en una empresa privada. Por otra parte, los reactivos y materiales utilizados en la preparación de las probetas y el costo de las láminas de los aceros AISI 304 y ASTM A 36.

El tiempo de la investigación está estipulado en ocho meses, sin embargo, en el transcurso del desarrollo de la investigación pueden surgir nuevas variables que tiendan a extender este período de investigación.

1.6 Alcance.

La caracterización de los materiales se realizará en función a la metalografía, análisis químico, y prueba de tracción según norma ASTM A 370. Además de los ensayos mencionados se les realizarán también pruebas de doblado con tres puntos de apoyo a las juntas soldadas; a fin de verificar la ductilidad de las juntas. Con esta investigación se logrará evaluar las propiedades de juntas disímiles, soldadas por arco eléctrico, como lo es el proceso SMAW. Se ha de resaltar que se realizarán varias pruebas pilotos a fin de determinar la condición de soldadura a utilizar y así finalmente concluir sobre las propiedades de resistencia. Los ensayos de tracción se realizarán según normas AWS D1.1/D1.1M:2015, para doblado la norma ASTM E-190, para la dureza se utilizará la norma ASTM E-18.

Por otro lado, la evaluación del comportamiento mecánico de las juntas de acero es importante, ya que estas son las características inherentes que permiten diferenciar las formas como el material va a resistir en una condición determinada. Desde esta óptica, también hay que tener en cuenta el comportamiento que puede tener un material en los diferentes procesos de mecanizado que pueda tener, al igual que en el caso de la soldadura.

Finalmente, el informe de la investigación será obligatorio como trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico en la Universidad José Antonio Páez.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación.

Se inicia este estudio con el investigador, Pereira E. Hernán. (2009) quien en su trabajo especial de grado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela; determinó los parámetros adecuados para la unión de un acero ASTM A36 y un acero inoxidable 304L mediante la soldadura por arco eléctrico. Se realizaron estudios teóricos en cuanto a las posibilidades y parámetros adecuados para la unión, basado en las normas y análisis teórico. En la segunda parte del estudio se realizaron ensayos destructivos y no destructivos, sin poder calificar finalmente las uniones soldadas, al obviar consideraciones como limpieza entre pasadas, provocando grietas en los ensayos mecánicos. Dicha investigación aportó al presente trabajo de grado, documentación acerca de normas y parámetros específicos a utilizar para la unión disímil entre los aceros AISI 304 Y ASTM A36.

Así mismo, Janampa J. y Surco J. (2015). Estudiaron la soldabilidad del acero ASTM A36 junto con un Acero AISI 4140, en su trabajo especial de grado en la Escuela profesional de Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería de Procesos, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú. Para el estudio de esta Soldabilidad, investigaron las variables esenciales del procedimiento de soldadura, así mismo evaluaron el tipo de electrodo o material de aporte, la posición de soldadura, los parámetros de la misma bajo el criterio de aceptación de la AWS D1.1.

En la investigación demostraron que a temperaturas menores de 100°C tiene mayor tendencia a la creación de fisuras en el cordón de soldadura y en la zona afectada por el calor, sin embargo, con un precalentamiento de 150°C a 200°C crean una soldadura de buena calidad, que se garantiza mediante la aplicación de ensayos, tanto destructivos y no destructivos. Este estudio, facilitó información importante sobre la importancia del precalentamiento previo para evitar defectos en la

soldadura, además de parámetros de temperatura pertinentes para el presente trabajo de grado.

Por otra parte Rodríguez, G., Gómez, J. (2011), presentaron un trabajo de grado titulado “Análisis del comportamiento mecánico y microestructural en juntas soldada por medio del proceso G.M.A.W en aceros disimiles”, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, el cual está orientado a la determinación del comportamiento mecánico y microestructural de aceros disímiles soldados mediante el proceso GMAW por arco pulsado, en el cual se emplearon dos tipos de aceros (ASTM A36 y ASTM A131) y se realizaron uniones soldadas de aceros del mismo material y aceros disimiles.

Para llevar a cabo la investigación, se soldaron a tope las láminas de 5,15 mm de espesor, con un biselado de 30° y un talón de 2mm. Se establecieron como parámetros de trabajo para la soldadura, tres niveles de amperaje y voltaje distintos: un primer parámetro 90 Amperios y 20 Voltios, segundo parámetro 93 Amperios y 22 Voltios, y tercer parámetro 110 Amperios y 24 Voltios. Estos parámetros se determinaron mediante la inspección visual de cordones de prueba realizados previamente al estudio. Una vez concluidos los ensayos se determinó que los aceros disímiles presentan un mejor comportamiento al soldarlos con 90 Amperios y 20 Voltios, ya que el cordón de soldadura no mostró defectos visuales frente al ensayo de doblado, la dureza en la zona de fusión fue de 226.6 HV, y una resistencia máxima a la tracción de 390.37 MPa, además de una microestructura widmännstatten en la zona del cordón.

Al unir aceros de la misma clasificación, tanto en combinaciones de A36-A36 como A131-A131, se obtiene una buena microestructura y propiedades mecánicas al soldar con 93 Amperios y 22 Voltios, mostrando la primera combinación una ductilidad satisfactoria y buen aspecto físico en la zona de la soldadura, una dureza en la zona de fusión de 199.43 HV, y una resistencia máxima a la tracción de 402.80 MPa, además de una microestructura widmännstatten en la zona del cordón, y la segunda (A131-A131), una buena ductilidad y apropiado aspecto físico en la zona de la soldadura, una dureza en la zona de fusión de 211.02 HV, y una resistencia máxima a la tracción de 453.90 MPa, además de una microestructura widmännstatten

en la zona del cordón. Esta investigación sirvió de guía para la selección del amperaje y voltaje adecuado para la soldadura disímil en cuestión.

Asimismo, Luna, R. (2015), presentó una investigación titulada “Evaluación del procedimiento de soldadura de la unión disímil entre acero API x70 ps11 y ASTM A707 L5 F65”, trabajo especial de grado, Facultad de ingeniería mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú. En el presente trabajo se evaluó la especificación de procedimiento de soldadura para la unión disímil entre una brida y una tubería de materiales API 5L X70 PSL1 y ASTM A707 L5 F65 (no homologado por ASME) respectivamente, ambas de 24 pulgadas de diámetro y 21.5 milímetros de espesor. Los procesos de soldadura empleados fueron GTAW y SMAW, el primero para el pase de raíz y el segundo para los pases de relleno.

El objetivo general de la tesis es el de calificar el procedimiento de soldadura para la unión entre la brida y la tubería antes mencionadas, con la finalidad de asegurar su implementación en el sistema de transporte de gas natural por ductos. La caracterización de los materiales base se realizó a través de ensayos de análisis químico y de tracción. El análisis químico reveló que el acero ASTM A707 L5 F65 presenta variaciones con respecto a la composición química nominal del acero ASTM A707 L5 Cl4, particularmente, en los porcentajes en peso de manganeso y molibdeno. Asimismo, se realizaron ensayos de calificación del procedimiento de soldadura.

Del cupón soldado se extrajeron dos probetas para ensayos de tracción, cuatro probetas para ensayos de doblez lateral y nueve probetas para ensayos de impacto. En los ensayos de tracción la fractura se presentó en el material base y los esfuerzos máximos obtenidos fueron ligeramente mayores al esfuerzo de tracción de la junta soldada, los ensayos de doblado no revelaron defectos relevantes y en los ensayos de impacto los valores de energía absorbida por el material fueron mayores al mínimo establecido por la especificación técnica API 5L. Por otro lado, se realizaron ensayos de inspección visual y de macrografía, los cuales no revelaron discontinuidades en el cordón que afectan la calidad del mismo.

Sobre la base de los resultados obtenidos se concluyó que, según lo estipulado en el código ASME sección IX, el procedimiento de soldadura propuesto se encuentra

calificado y, por consiguiente, la ejecución del cordón de soldadura entre la brida y la tubería mencionadas debe realizarse en función de dicho procedimiento. Esta investigación aporta al estudio información sobre todos los parámetros a considerar al momento de evaluar el procedimiento de soldadura para la unión disímil, de manera que, se cumpla con los requerimientos mínimos establecidos en la norma ASME para poder calificar dicho procedimiento.

Finalmente, Chávez, S. y Jaime, O. (2017), presentaron una investigación titulada “Estudio de la soldabilidad entre un acero inoxidable y un acero al carbono mediante un proceso de soldadura por fricción”. Trabajo especial de grado, Facultad de ingeniería mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador.

En el presente estudio se analizó el comportamiento de una junta soldada de aceros disímiles mediante el proceso de soldadura por fricción, se determinó la relación que existe entre los parámetros que gobiernan la calidad de la soldadura y cuáles son los valores óptimos de los mismos variando cada uno de estos, para de esta manera garantizar una unión confiable que a su vez represente una alternativa aplicable en la industria. Mediante el uso de ensayos destructivos y no destructivos además de un análisis metalográfico se pudo obtener resultados que permitieron conocer tanto el comportamiento mecánico de la soldadura como la microestructura resultante de los materiales utilizados. Además, se comparó los resultados obtenidos en este documento con los que se presentaron usando el proceso SMAW, llegando a poder decir que la unión soldada por fricción presenta iguales e incluso mejores características que dicho proceso. Esta investigación coadyuva a nuestro trabajo en cómo será el posible comportamiento de la junta soldada de aceros mediante un proceso de soldadura, incluyendo soldadura por el proceso SMAW.

2.2. Fundamentos teóricos.

2.2.1 Concepto de Acero.

El acero es una aleación o combinación de Hierro y Carbono (alrededor de 0,05% hasta menos de un 2% de C). Algunas veces otros elementos de aleaciones específicas tales como el Cr (Cromo) o Ni (Níquel) se agregan con propósitos determinados, por lo cual, es básicamente Hierro altamente refinado de más de

98%, comenzando su fabricación con la reducción de Hierro o producción de Arrabio, que más tarde es convertido en acero.

Desde el punto de vista de su composición, los aceros se pueden clasificar en dos grandes grupos: aceros aleados y aceros al Carbono (de bajo, medio y alto contenido en carbono). Los aceros al carbono constituyen la mayor parte de todo el acero fabricado. Contienen al menos del 0,25% del peso de C. La microestructura consiste en Ferrita y Perlita, por tanto, son relativamente blandos y poco resistentes, pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad. Son de fácil mecanizado, soldables y económicos. Se utilizan para fabricar vigas, carrocerías de automóviles y láminas para tuberías de edificios y puentes.

2.2.2. Diagrama de Fe-C

En el diagrama de equilibrio o de fases hierro-carbono (Fe-C) (ver Figura 1) se representan las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura, admitiendo que el calentamiento (o enfriamiento) de la mezcla se realiza muy lentamente de modo que los procesos de difusión (homogeneización) tienen tiempo para completarse. Estos diagramas Fe-C se obtienen experimentalmente identificando los puntos críticos (temperaturas a las que se producen las sucesivas transformaciones) por métodos diversos.

Alotropía del Hierro.

El hierro puro está presente en tres estados alotrópicos a medida que se incrementa la temperatura desde la temperatura ambiente: Hasta los 911 °C (temperatura crítica AC3), el hierro ordinario cristaliza en el sistema cúbico de cuerpo centrado y recibe la denominación de hierro α (alfa) o ferrita. Es un material dúctil y maleable, responsable de la buena forjabilidad de las aleaciones con bajo contenido en carbono y es ferromagnético hasta los 770 °C (temperatura de Curie a la que pierde dicha cualidad; se suele llamar también AC2). La ferrita puede disolver pequeñas cantidades de carbono. Entre 911 y 1400 °C cristaliza en el sistema cúbico de caras centradas y recibe la denominación de hierro γ (gamma) o Austenita. Dada su mayor compacidad la Austenita se deforma con mayor facilidad y es paramagnética. Entre 1400 y 1538 °C cristaliza de nuevo en el sistema cúbico de cuerpo centrado y recibe la denominación de hierro δ (delta), que es en esencia

el mismo hierro alfa, pero con parámetro de red mayor por efecto de la temperatura. A mayor temperatura el hierro se encuentra en estado líquido.

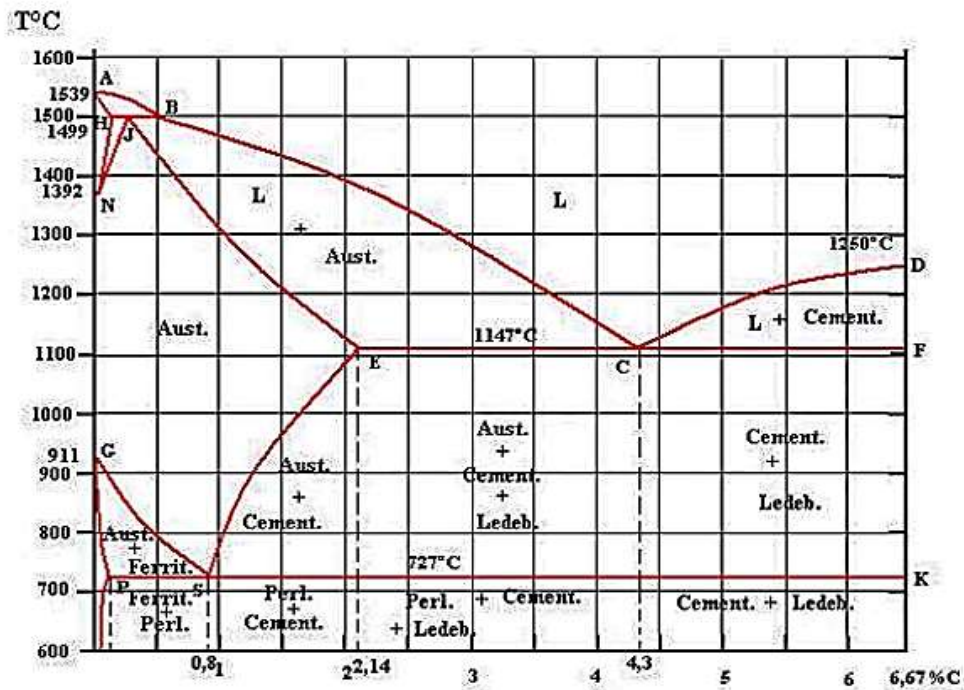


Figura 1: Diagrama de Fe-C.

Fuente: Askeland, Donald R. and Phule, Pradeep P. (2004).

Microconstituyentes

Si se añade carbono al hierro, aumenta su grado de acidez y sus átomos podrían situarse simplemente en los intersticios de la red cristalina de este último; sin embargo, en los aceros aparece combinado formando carburo de hierro (Fe_3C), es decir, un compuesto químico definido y que recibe la denominación de Cementita de modo que los aceros aleados al carbono están constituidos realmente por ferrita y Cementita.

Transformación de Austenita

El diagrama de fases Fe-C (Figura 1) muestra dos composiciones singulares:

- Un eutéctico (composición para la cual el punto de fusión es mínimo) que se denomina Ledeburita (Figura 2) y contiene un 4,3% de carbono (64,5 % de Cementita). La Ledeburita aparece entre los constituyentes de la aleación

cuando el contenido en carbono supera el 2% (región del diagrama no mostrada) y es la responsable de la mala forjabilidad de la aleación marcando la frontera entre los aceros con menos del 2% de C (forjables) y las fundiciones con porcentajes de carbono superiores (no forjables y fabricadas por moldeo). De este modo se observa que por encima de la temperatura crítica A31, los aceros están constituidos sólo por Austenita, una solución sólida de carbono en hierro γ y su microestructura en condiciones de enfriamiento lento dependerá por tanto de las transformaciones que sufra ésta.



Figura 2: Microestructura de la Martensita.

Fuente: <http://www.utp.edu.co/~publio17/aceros.htm>

- Un Eutectoide en la zona de los aceros, equivalente al eutéctico, pero en el estado sólido, donde la temperatura de transformación de la Austenita es mínima. El Eutectoide contiene un 0,80 %C (13,5% de Cementita) y se denomina perlita. Está constituido por capas alternas de ferrita y Cementita, siendo sus propiedades mecánicas intermedias entre las de la Ferrita y la Cementita. (Ver la figura 3).

La existencia del Eutectoide permite distinguir dos tipos de aleaciones de acero:

- Aceros Hipoeutectoides (menor a 0,80% C). Al enfriarse por debajo de la temperatura crítica A3 comienza a precipitar la ferrita entre los granos de Austenita y al alcanzar la temperatura crítica A1 la Austenita restante se

transforma en perlita. Se obtiene por tanto a temperatura ambiente una estructura de cristales de perlita embebidos en una matriz de ferrita.

- Aceros Hipereutectoides (mayor a 0,80% C). Al enfriarse por debajo de la temperatura crítica se precipita el carburo de hierro resultando a temperatura ambiente cristales de perlita embebidos en una matriz de Cementita.

Pues ya que este es un tratamiento térmico y su temperatura se eleva hasta dicha temperatura.

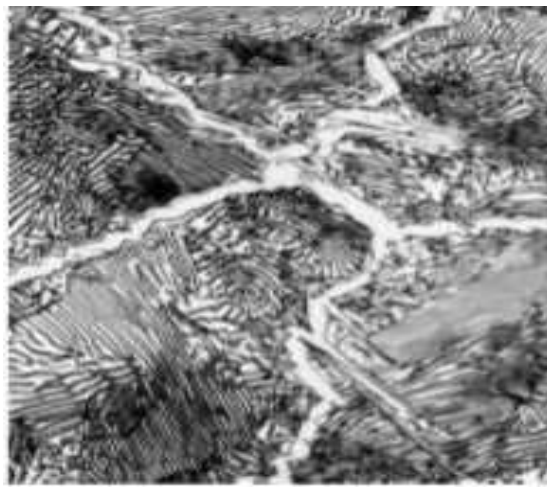


Figura 3: Presencia de Cementita (granos claros) y de Perlita (granos oscuros)

Fuente: López A. Tierno. (2020)

Otros Microconstituyentes

Las texturas básicas descritas (Perlíticas) son las obtenidas enfriando lentamente aceros al carbono, sin embargo, modificando las condiciones de enfriamiento (base de los tratamientos térmicos) es posible obtener estructuras cristalinas diferentes:

- La Martensita es el constituyente típico de los aceros templados y se obtiene de forma casi instantánea al enfriar rápidamente la Austenita. Es una solución sobresaturada de carbono en hierro alfa con tendencia, cuanto mayor es el carbono, a la sustitución de la estructura cúbica centrada en el cuerpo por tetragonal centrada en el cuerpo. Tras la Cementita (y los carburos de otros metales) es el constituyente más duro de los aceros. (Ver la figura 4).

- Velocidades intermedias de enfriamiento dan lugar a la Bainita, estructura similar a la Perlita formada por agujas de Ferrita y Cementita, pero de mayor ductilidad y resistencia que aquélla. (Ver la Figura 5).
- También se puede obtener Austenita por enfriamiento rápido de aleaciones con elementos gammágenos (que favorecen la estabilidad del hierro γ) como el níquel y el manganeso, tal es el caso por ejemplo de los aceros inoxidable Austeníticos.
(Ver la Figura 6).



Figura 4: Presencia de Martensita

Fuente: Osmond R. (1902).



Figura 5: Presencia de bainita

Fuente: López A. Tierno (2.015)



Figura 6: Presencia de Austenita.

Fuente: <http://throwate.blogspot.com/2014/02/los-aceros.html> (2.017)

Antaño se identificaron también la Sorbita y la Troostita que han resultado ser en realidad perlitas de muy pequeña distancia interláminar por lo que dichas denominaciones han caído en desuso. http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4910/html/6_diagrama_fec.html. (2.009).

El hierro es un metal alotrópico, lo cual significa que puede existir en varias formas cristalinas dependiendo de la temperatura, tal como se muestra en la Figura 7. La estructura cristalina de baja temperatura es la cúbica de cuerpo centrado (bcc), la cual está presente hasta 768°C (1414°F), ésta forma alotrópica del hierro es llamada hierro alfa (α) y es magnética, a temperaturas superiores en el rango de 768°C y 910°C (1414 y 1666°F) presenta pérdida de las propiedades magnéticas sin cambio en su estructura cristalina; por lo tanto, al hierro en este rango se le denomina como “hierro alfa (α) no magnético”. Cuando el hierro alcanza los 910°C (1666°F) sufre un reacomodo de sus átomos y sufre un cambio en su estructura cristalina, que para este caso es cúbica centrada en las caras (fcc); esta estructura permanecerá sin alteración hasta los 1400°C (2554°F); al hierro en este rango de temperaturas se le denomina como “hierro gamma (γ) que es no magnético. Al alcanzar la temperatura de 1400°C el hierro sufre nuevamente un reacomodo de sus átomos y por lo tanto cambia nuevamente su estructura cristalina a un sistema cúbico de cuerpo centrado el cual es conocido como “hierro delta (δ); ésta estructura permanecerá hasta alcanzar el punto de fusión.

2.2.3 Características y Aplicaciones de Aceros.

Según la exigencia o sollicitación de los materiales, se pueden clasificar como estructurales y funcionales.

2.2.3.1 Materiales estructurales.

Entre los materiales de construcción, como es de conocimiento general, el acero tiene una posición sumamente relevante, debido a que combina la resistencia mecánica con su capacidad de ser trabajado y su disponibilidad. Siendo así, es fácil comprender la importancia y el amplio uso de los aceros en todos los campos de la ingeniería, en las estructuras, sean estas fijas, como los edificios, puentes, etc. o sean móviles, en la industria ferroviaria, automotriz, naval, aeronáutica, etc. De esta forma, los aceros al carbono comunes, simplemente laminados y sin ningún tratamiento térmico, son plenamente satisfactorios y constituyen un porcentaje considerable dentro de los aceros estructurales. En otras aplicaciones, se exige una relación resistencia/peso más satisfactorio. Es el caso de la industria del transporte, en donde el equipo utilizado (camiones, buses, equipo ferroviario, naval, etc.) debido a las condiciones propias del servicio, debe caracterizarse por un peso relativamente bajo y una alta resistencia. Esta condición es fundamental ya que estas estructuras están sujetas a esfuerzos e impactos severos, además de una resistencia a la corrosión adecuada.

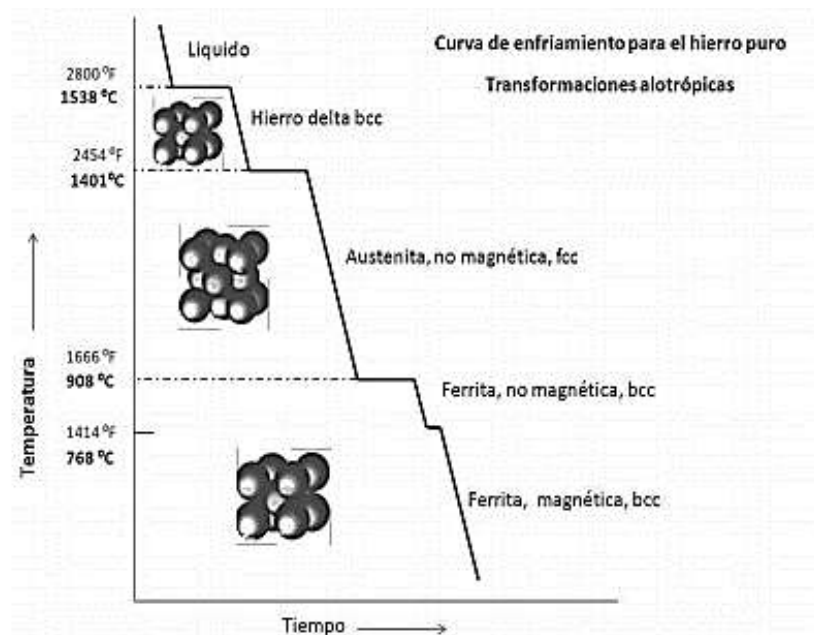


Figura 7: Transformaciones del hierro

Fuente: Arunkumar, N., Duraisamy, P. y Veeramanikandan, V. (2012).

2.2.3.2 Materiales Funcionales.

Son aquellos que se eligen por sus propiedades funcionales: eléctricas o electrónicas (conductividad, resistividad, superconductividad), magnéticas, termoiónicas, radiactivas, etc. Entre los materiales estructurales el acero es, con diferencia, el de mayor importancia por las excelentes propiedades mecánicas que presenta y por la variedad de condiciones de trabajo en las que puede emplearse. Respecto al problema frecuentemente planteado de elegir el acero más idóneo para una aplicación específica, existen varios criterios en los cuales se basan normalmente la decisión final. Anotar las propiedades requeridas por el acero para dicho servicio. Es muy difícil que un tipo de acero reúna una combinación ideal de propiedades, lo normal es que haya que reducir algunas en beneficio de otras, es decir, establecer un compromiso entre dos o más propiedades. Por ejemplo, las elevadas o muy bajas temperaturas y ambientes corrosivos disminuyen considerablemente la resistencia mecánica.

2.2.4 Clasificación de los aceros

La clasificación es la identificación específica de cada grado, tipo, o clase de acero dado por un número, letras, símbolos, nombre, o su combinación para la completa designación de un acero en particular.

En el sistema AISI-SAE, los aceros se clasifican con cuatro dígitos. El primer dígito especifica la aleación principal, el segundo modifica al primero y los dos últimos dígitos, dan la cantidad de carbono en centésimas. En algunos aceros al cromo de alto carbono hay números de cinco dígitos, los tres últimos dan el porcentaje de carbono (ver Figura 8).

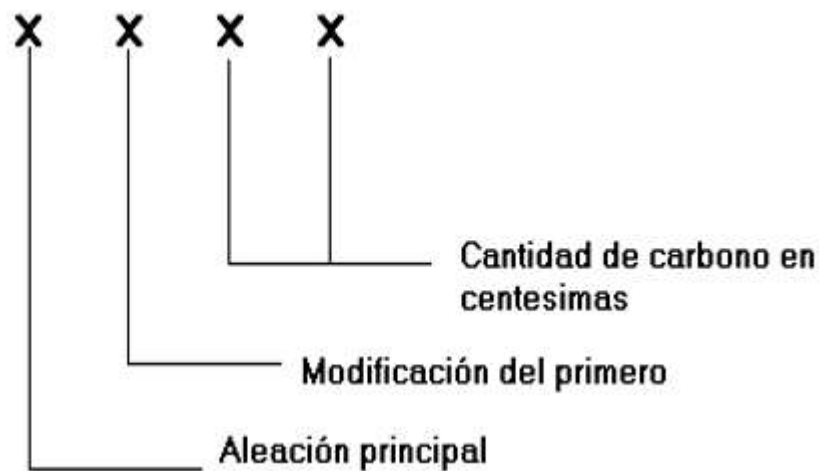


Figura 8: Clasificación de aceros.

Fuente: AWS Welding Handbook (2.001).

La clasificación de los aceros según las normas COVENIN, se basa en:

Composición química: los aceros se clasifican de acuerdo a su composición química en:

Aceros de carbono: los aceros de carbono se clasifican a su vez en aceros al carbono comunes, aceros **sulfurados** y **aceros sulfurados y refosforados**.

Proceso de obtención: a efecto de esta norma, los aceros se clasifican de acuerdo a su proceso de obtención en:

Acero Thomas

Acero Bessemer

Aceros básicos al oxígeno

Aceros eléctricos

Aceros Siemens – Martin

Grado de oxidación: Estos se clasifican según su grado de oxidación en:

Aceros calmados

Aceros efervescentes

Aceros semicalmados.

Los aceros al carbono también se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Aceros de bajo carbono. Su porcentaje de carbono es menor a 0.2%. Su microestructura está formada principalmente por ferrita. Son metales muy suaves, dúctiles y de baja resistencia. Son fáciles de deformar plásticamente.

2. Aceros de medio carbono. Su porcentaje de carbono oscila entre 0.2 y 0.5%. Su microestructura está formada por la mezcla de ferrita y perlita. Constituyen la mayoría de aceros al carbono disponibles comercialmente y sus propiedades mecánicas dependen de la cantidad de ferrita y perlita que posean.

3. Aceros de alto carbono. Su porcentaje de carbono es mayor al 05%. Tienen dureza y resistencia elevadas. Su ductilidad y tenacidad son bajas.

La Figura 9 muestra una clasificación de los aceros y algunas aplicaciones de los mismos. Otra manera de clasificar a los aceros, se muestra en la Figura 10.

Tipo de acero	Porcentaje de Carbono	Aplicaciones
Dead Mild (extra suave)	0.05 – 0.15	Estampados, tuberías sin costuras, extrusión en caliente y en frío
Mild (suaves)	0.10 – 0.20	Aceros estructurales, tornillería, elementos de máquinas y estampado
	0.20 – 0.30	Maquinarias, trabajos estructurales, engranes y trabajos de forja
Medio Carbono	0.30 – 0.40	Conexiones, cables, ganchos, tuberías y forjado
	0.40 – 0.50	Engranes, rotores, partes de máquinas tratadas térmicamente
	0.50 – 0.60	Rieles, resortes, cables
Alto Carbono	0.60 - 0.70	Martillos, tornillería, desarmadores, cortadores, mandriles y brocas
	0.70 – 0.80	Bandas de corte, martillos, tornillos laminados, pequeñas forjas
	0.80 – 0.90	Herramientas de mano, cinceles y cortadores
	0.90 – 1.40	Resortes, cables de alta resistencia, ejes, brocas de alto impacto, maquinarias.

Figura 9: Clasificación de aceros y aplicaciones.

Fuente: ASM International (1994)

2.2.5 Acero estructural ASTM A 36

El Acero ASTM A36 es un acero estructural al carbono, utilizado en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres para comunicación y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, herrajes eléctricos y señalización. La Figura 11 muestra la composición química típica de este acero.

Como la mayoría de los aceros, el ASTM A36, tiene una densidad de 7850 kg/m³ (0,28 lb/in³). El acero ASTM A36 en barras, planchas y perfiles estructurales con espesores menores de 8 pulg (203,2 mm) tiene un límite de fluencia mínimo de 250 MPA (36 ksi) y un límite de rotura mínimo de 410 MPa (58 ksi). Las planchas con espesores mayores de 8 pulg (203,2 mm) tienen un límite de fluencia mínimo de 220 MPA (32 ksi), y el mismo límite de rotura. La Figura 12 muestra estas propiedades típicas para este acero. El acero ASTM A36 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen: Planchas, Perfiles estructurales, Tubos, Láminas. Las piezas hechas a partir de acero ASTM A36 son fácilmente unidas mediante casi todos los procesos de soldadura. Los más comúnmente usados para el ASTM A36 son los menos costosos y rápidos como la soldadura por arco metálico protegido (SMAW, Shielded metal arc welding), soldadura con arco metálico y gas (GMAW, Gas metal arc welding), soldadura con electrodo de tungsteno y gas (GTAW, Gas tungsten arc welding) y soldadura oxiacetilénica. El acero ASTM A36 es también comúnmente atornillado y remachado en las aplicaciones estructurales: edificios, puentes, torres, etc.

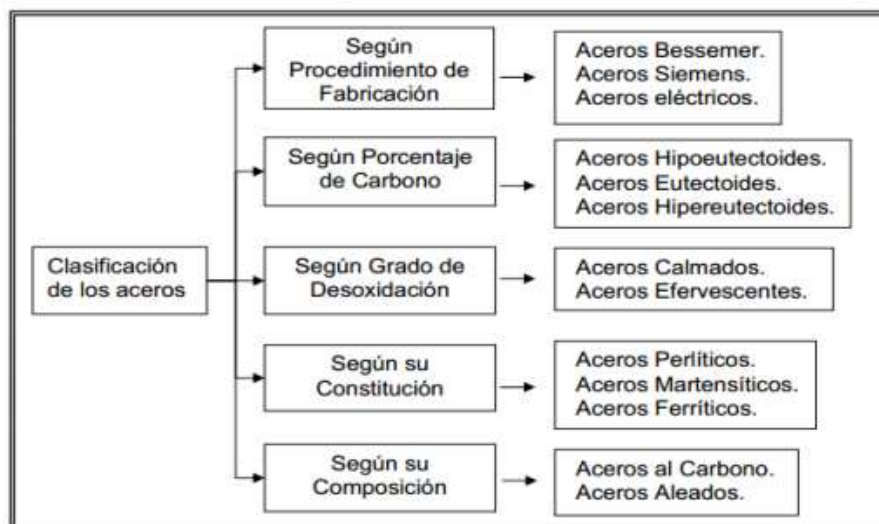


Figura 10: Esquema de la clasificación general de los aceros.

Fuente: ASM International (1994)

Minerales	% de composición
Carbono (C)	0,26% máx.
Manganeso (Ma)	1,20 máx.
Fósforo(P)	0,04% máx.
Azufre(S)	0,05% máx.
Silicio(Si)	0,40% máx.
Cobre(Cu)	0,20% mínimo

Figura 11: Esquema de la clasificación general de los aceros.

Fuente: ASTM (2004)

Limite de fluencia mínima		Resistencia a la tracción			
MPa	Psi	Psi		MPa	
		Min	Máx.	Min	Máx.
250	36000	58000	80000	410	550

Figura 12: Propiedades mecánicas del acero ASTM A 36

Fuente: ASTM (2004)

2.2.6 Aceros inoxidables.

Los aceros inoxidables se definen como una aleación de acero con un contenido mínimo del 10% de cromo en peso. La resistencia a la corrosión se debe a que el cromo, posee gran afinidad con el oxígeno, los cuales reaccionan para dar origen al óxido de cromo el cual es observado como una capa de aspecto brillante y la cual protege al acero de la corrosión en diferentes medios. Sin embargo, esta capa puede ser afectada por algunos ácidos, dando lugar a que el hierro sea atacado y oxidado por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas. La Figura 13 muestra la formación de la capa protectora del acero inoxidable.

Con estos porcentajes, el cromo forma una capa protectora y autoregenerativa de óxido de cromo Cr_2O_3 en la superficie, la cual da la propiedad de inoxidabilidad. Según Lo K.H., Shek C.H., Lai J.K.L. (2009).

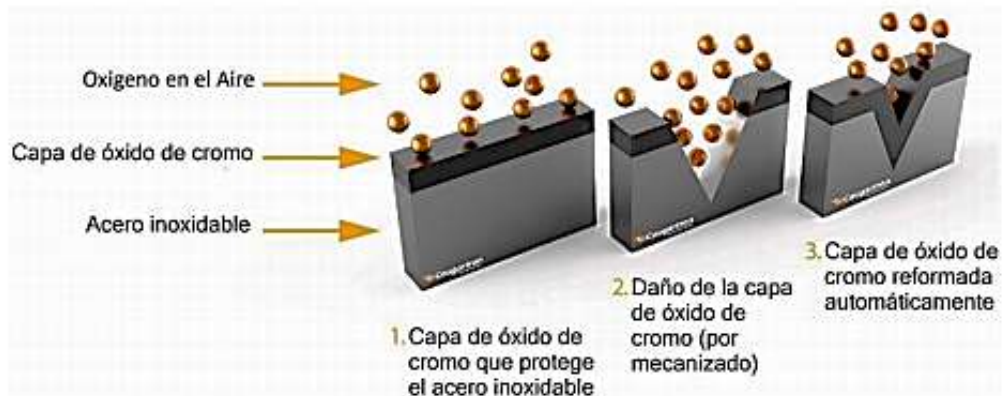


Figura 13: Formación de la capa protectora de los aceros inoxidable

Fuente: Arunkumar, N., Duraisamy, P. y Veeramankandan, V. (2012).

2.2.6.1 Clasificación de los aceros inoxidable.

El acero inoxidable puede ser clasificado en cinco familias diferentes; cuatro de ellas corresponden a las particulares estructuras cristalinas formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita y dúplex (austenita más ferrita); mientras que la quinta son las aleaciones endurecidas por precipitación, que están basadas más en el tipo de tratamiento térmico usado, que en la estructura cristalina.

a. Aceros inoxidable martensíticos.

Son la primera rama de los aceros inoxidable simplemente al cromo; representan una porción de la serie 400, sus características son: Moderada resistencia a la corrosión, endurecibles por tratamiento térmico y por lo tanto se pueden desarrollar altos niveles de resistencia mecánica y dureza, son magnéticos debido al alto contenido de carbono y a la naturaleza de su dureza, es de pobre soldabilidad. Los Martensíticos son esencialmente aleaciones de cromo y carbono, el contenido de cromo es generalmente de 10.5 a 18% y el de carbono es alto, alcanzando valores de hasta 1.2%.

b. Aceros inoxidable ferríticos.

Estos aceros inoxidable de la serie 400 AISI (American Iron & Steel Institute) mantienen una estructura ferrítica estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión, sus características son: resistencia a la corrosión de moderada a buena, la cual se incrementa con el contenido de cromo y algunas aleaciones de

molibdeno. Endurecidos moderadamente por trabajo en frío: no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Son magnéticos. Su soldabilidad es pobre por lo que generalmente se eliminan las uniones por soldadura a calibres delgados. Usualmente se les aplica un tratamiento de recocido con lo que obtienen mayor suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión. Debido a su pobre dureza, el uso se limita generalmente a procesos de formado en frío. Los Ferríticos son esencialmente aleaciones con cromo. El contenido de cromo es usualmente de 10.5 a 30%, pero contenidos limitados de carbono del orden de 0.08%. Algunos grados pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio que promueven diferentes características.

c. Aceros inoxidable austeníticos

Los aceros inoxidable austeníticos constituyen la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integra las series 200 y 300 AISI. Su popularidad se debe a su excelente formabilidad y superior resistencia a la corrosión. Sus características son las siguientes: excelente resistencia a la corrosión. Endurecidos por trabajo en frío y no por tratamiento térmico. Excelente soldabilidad. Excelente factor de higiene y limpieza. Formado sencillo y de fácil transformación. Tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas. Son no magnéticos. Los Austeníticos se obtienen adicionando elementos formadores de austenita, tales como níquel, manganeso y nitrógeno. El contenido de cromo generalmente varía del 16 al 26% y su contenido de carbono es del rango de 0.03 al 0.08%.

El cromo proporciona una resistencia a la oxidación en temperaturas aproximadas de 650° C en una variedad de ambientes. Esta familia se divide en dos categorías: SERIE AISI 300.- Aleaciones cromo-níquel SERIE AISI 200.- Aleaciones cromo-manganeso-nitrógeno. La SERIE AISI 300 Es la más extensa, mantiene alto contenido de níquel y hasta 2% de manganeso. También puede contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que son adicionados para conferir ciertas características. En ciertos tipos se usa azufre o selenio para mejorar su habilidad de ser maquinados. La SERIE AISI 200 contiene menor cantidad de níquel. El contenido de manganeso es de 5 a 20%. La adición de nitrógeno incrementa la resistencia mecánica.

d. Aceros inoxidables dúplex

Son aleaciones cromo-níquel-molibdeno, sus características son las siguientes: magnéticos. No pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos. Buena soldabilidad. La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión en ambientes con iones de cloruro. Los dúplex tienen un contenido de cromo de entre 18 y 26% y de níquel de 4.5 a 6.5%. La adición de elementos de nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno imparten ciertas características de resistencia a la corrosión.

e. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación

Esta familia ofrece una alternativa a los aceros inoxidables austeníticos cuando se desea asociar elevadas características mecánicas y de maquinabilidad. Son aleaciones hierro-cromo-níquel que se caracterizan por la resistencia mecánica obtenida a partir del endurecimiento por tratamiento térmico de envejecimiento. Los aceros endurecibles por precipitación están patentados y frecuentemente se les designa con las siglas de la empresa productora.

En la Figura 14 pueden observarse algunas propiedades de estos aceros.

PROPIEDADES GENERALES DE LOS ACEROS INOXIDABLES					
Tipo	Resistencia a la corrosión	Dureza	Magnéticos	Endurecibles por tratamiento térmico	Soldabilidad
Martensíticos	Baja	Alta	Si	Si	Pobre
Ferríticos	Buena	Media baja	Si	No	Limitada
Austeníticos	Excelente	Alta *	No **	No	Excelente

*. Adquieren mayor dureza al ser trabajados en frío.

** . Adquieren cierto magnetismo al ser trabajados en frío.

Figura 14: Propiedades generales de los aceros inoxidables

Fuente: ASM International (1994).

2.2.6.2 Propiedades de los elementos de aleación.

Los elementos de aleación específicos y sus cantidades determinan el tipo de acero de aleación y sus propiedades particulares. Los efectos principales de los elementos más comunes se muestran en la Figura 15.

Elemento	propiedades
Aluminio	Empleado en pequeñas cantidades, actúa como un desoxidante para el acero fundido y produce un acero de grano fino.
Cromo	Aumenta la capacidad del endurecimiento y mejora la resistencia al desgaste y corrosión.
Cobre	Mejora significativamente la resistencia a la corrosión atmosférica.
Manganeso	Elemento básico en todos los aceros comerciales. Actúa como un desoxidante y también neutraliza los efectos nocivos del azufre, facilitando la laminación, moldeo y otras operaciones de trabajo en caliente. Aumenta también la capacidad de temple y contribuye a su resistencia y dureza. Temperatura de endurecimiento y distorsión al ser templado. Al emplearse conjuntamente con el Cromo, aumenta la dureza y la resistencia al desgaste.
Molibdeno	Mediante el aumento de la penetración de temple, mejora las propiedades del tratamiento térmico. Aumenta también la dureza y resistencia a altas temperaturas.
Níquel	Mejora las propiedades del tratamiento térmico reduciendo la temperatura de endurecimiento y distorsión al ser templado. Al emplearse conjuntamente con el Cromo, aumenta la dureza y la resistencia al desgaste.
Silicio	Se emplea como desoxidante y actúa como endurecedor en el acero de aleación.
Azufre	Normalmente es una impureza y se mantiene a un bajo nivel. Sin embargo, alguna veces se agrega intencionalmente en grandes cantidades (0,06 a 0,30%) para aumentar la maquinabilidad (habilidad para ser trabajado mediante cortes) de los aceros de aleación y al carbono.
Titanio	Se emplea como un desoxidante y para inhibir el crecimiento granular. Aumenta también la resistencia a altas temperaturas.
Tungsteno	Se emplea en muchos aceros de aleación para herramientas, impartiendo una gran resistencia al desgaste y dureza a altas temperaturas.
Vanadio	Imparte dureza y ayuda en la formación de granos de tamaño fino. Aumenta la resistencia a los impactos (resistencia a las fracturas por impacto) y también la resistencia a la fatiga.

Figura 15: Efecto de los elementos de aleación sobre los aceros inoxidables

Fuente: ASM international. Stainless steels. (1999).

2.2.6.3 Aplicaciones de los aceros inoxidables.

Los aceros inoxidables tienen un sin número de aplicaciones. A continuación, se mencionarán los usos frecuentes según su tipo.

1. Martensíticos

403.- Es primariamente empleado en partes críticas de maquinarias sometidas a altos esfuerzos y donde se requiere, además buena resistencia al calor, corrosión, desgaste abrasivo o erosión.

410.- Es de propósito general y el tipo más usado de la familia martensítica debido a sus atractivas características y su bajo costo. Se emplea en tuercas, tornillos, cubiertos, herramientas de cocina, partes de horno a bajas temperaturas, equipo para refinación de petróleo, vajillas, partes para turbinas a gas o vapor, etc. Tiene un coeficiente de expansión poco menor que el del acero al carbono, mientras que la conductividad térmica es casi la mitad correspondiente al valor para el acero al carbono. Puede desarrollar una excelente combinación de resistencia mecánica y dureza mediante adecuado tratamiento térmico. En la condición de recocido, es dúctil y es una buena opción para formado y otras operaciones de transformación donde el uso final está destinado a ambientes moderadamente corrosivos.

416.- Otra versión del tipo 410, donde el azufre o el selenio son adicionados para producir las mejores características de maquinabilidad de la clase martensítica, tiene menor desempeño en ductilidad y formabilidad que el 410. Se utiliza en conectores, cerraduras, cabezas de palos de golf, partes de bombas, flechas, partes para válvulas, etc.

420.- Es una modificación del 410, con alto contenido de carbono, que le permite alcanzar mayor dureza y mayor resistencia al desgaste, aunque menor resistencia a la corrosión. Se utiliza para instrumentos dentales y quirúrgicos, hojas de cuchillos, moldes, herramientas, etc.

422.- Diseñado para el servicio a temperaturas de hasta 650° C, combinando resistencia mecánica. Presenta maquinabilidad de mediana a baja.

431.- Diseñado para obtener altas propiedades mecánicas mediante tratamiento térmico junto con buena resistencia al impacto. Empleado para fabricar conectores, cerraduras, partes para transportadores, equipo marino, ejes de propelas, ejes de bombas, etc.

440.- Utilizados en donde se requiere una alta y extremada dureza, resistencia a la abrasión y buena resistencia a la corrosión. De baja maquinabilidad. Sus principales aplicaciones son: cuchillería, partes resistentes al secado, equipo quirúrgico, inyectoros, etc.

2. Ferríticos

405.- Conocido como un grado soldable del tipo 410 se utiliza en partes resistentes al calor, equipo para refinación de calor, racks para templado de acero.

409.- Es un acero estructural de uso general, es utilizado en aplicaciones que no requieren alta calidad de apariencia. Se usa para fabricar silenciadores y convertidores catalíticos para automóviles, cajas de tráiler, tanques de fertilizantes, contenedores.

430.- Es el más popular de los aceros inoxidable simplemente al cromo. Es un acero de propósito general, es dúctil y tiene buenas características de formabilidad, tiene buena resistencia a la corrosión. Es ideal para muebles y decoración interior. Se utiliza para adornos y molduras automotrices, materiales de construcción, equipo químico de proceso, cremalleras, partes para quemadores, adornos interiores arquitectónicos y paneles, adornos y equipos de cocina, equipo para proceso de ácido nítrico, aparatos científicos, etc.

434.- Es una variación del tipo 430 que contiene molibdeno y niobio que incrementan la resistencia a la corrosión, es particularmente ventajosa para usos automotrices exteriores.

446.- Contiene el máximo contenido de cromo de toda la familia ferrítica, por lo que tiene la mayor resistencia a la corrosión de su clase, se recomienda para uso en atmósferas de comportamiento azufroso a altas temperaturas (1000° C). No debe ser utilizado en aplicaciones en donde se requiera alta resistencia mecánica. Se utiliza para la fabricación de bases para tubos de rayos X, partes de quemadores, tubos para pirómetros, válvulas y conectores, etc.

3. Austeníticos

301.- Menor resistencia a la corrosión que otros aceros de la serie 300. Puede ser fácilmente formado y ofrece buenas propiedades de soldabilidad. Utilizado en partes de aviones, adornos arquitectónicos, cajas de ferrocarril y de trailer, cubiertas de rines, equipos para procesamiento de alimentos.

303.- Especial para propósitos de maquinado, buena resistencia a la oxidación en ambientes de hasta 900° C. Se emplea para cortes pesados. Se usa para la fabricación de partes para bombas, bushings, partes maquinadas y flechas.

304.- Todo propósito, tiene propiedades adecuadas para gran cantidad de aplicaciones. Se recomienda para construcciones ligeras soldadas que requieran buena resistencia a la corrosión. Tiene buen desempeño en temperaturas elevadas (800 a 900° C) y buenas propiedades mecánicas. Es recomendable cuando se requiera soldar altos espesores de material. Algunas aplicaciones son equipo químico de proceso, accesorios para aviones, remaches, equipo para hospitales, etc.

309.- Poseen alta resistencia mecánica, tenacidad y excelente resistencia a la oxidación en temperaturas de hasta 1000° C. Calentadores de aire, equipo químico de proceso, partes de quemadores de turbinas de gas e intercambiadores de calor son algunas de las aplicaciones más comunes fabricadas con este tipo de acero.

310.- Es frecuentemente usado en servicios de alta temperatura. Se utiliza para fabricar calentadores de aire, equipo para tratamiento térmico de aceros, equipo químico de procesos, etc.

316.- Resistente a la corrosión frente a diversos químicos agresivos, ácidos y atmósfera salina. Se utiliza para adornos arquitectónicos, equipo para el procesamiento de alimentos, farmacéutico, fotográfico, textil, etc.

321.- Es similar al 304, pero contiene una adición de titanio equivalente a cinco veces el contenido de carbono. Las principales aplicaciones de este acero son recipientes a presión y almacenamiento, partes de motores de jet, equipo químico de proceso, etc.

2.2.7 Aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos no son magnéticos y no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Son muy dúctiles y presentan excelente soldabilidad. El inoxidable austenítico más popular es el Tipo 304, que contiene básicamente 18% de cromo y 8% de níquel, con un tenor de carbono limitado a un máximo de 0,08%. Tiene gran aplicación en las industrias químicas, farmacéuticas, de alcohol, aeronáutica, naval, uso en arquitectura, alimenticia, y de transporte. Es también utilizado en cubiertos, vajillas, piletas, revestimientos de ascensores y en un sin número de aplicaciones.

En determinados medios, especialmente en aquellos que contienen iones cloruro, el inoxidable 304 muestra propensión a una forma de corrosión llamada

corrosión por picados, un tipo de corrosión extraordinariamente localizada, en la cual, en determinados puntos de la superficie del material, el medio agresivo consigue quebrar la película pasiva para después progresar en profundidad. El crecimiento de los picados se da en un proceso autocatalítico, y aunque la pérdida de masa pueda ser a veces insignificante, esta forma de corrosión es muy insidiosa, ya que muchas veces un picado es suficiente para dejar un equipo fuera de servicio.

La corrosión por rendijas, puede ser considerada como una corrosión por picado artificial. El aspecto es frecuentemente semejante al de la corrosión por picado y el proceso de crecimiento es también autocatalítico. Pero, la existencia de una rendija es necesaria para la ocurrencia del fenómeno, lo que no sucede en la corrosión por picado. Los mismos medios capaces de provocar la corrosión por picado, promueven la corrosión por rendijas en los aceros inoxidable. El molibdeno es introducido como elemento de aleación en los aceros inoxidable precisamente para disminuir la susceptibilidad a estas formas de corrosión. La presencia de molibdeno permite la formación de una capa pasiva más resistente y en casos en que el inoxidable 304 no resiste a la acción de determinados medios, corroyendo por picado o por rendijas, los inoxidable 316 y 317 constituyen una excelente solución.

Son aceros con gran utilización en las industrias químicas, de alcohol, petroquímica, de papel y celulosa, en la industria petrolífera, industria textil y farmacéutica. Cuando están sometidos por algún tiempo a las temperaturas entre 450 y 850 °C, los aceros inoxidable austeníticos están sujetos a la precipitación de carburos de cromo en sus contornos de granos, lo que los torna sensibilizados. Esta precipitación abundante de carburos, la sensibilización, resulta en la disminución del tenor de cromo en las regiones vecinas a los bordes, regiones que tienen así su resistencia a la corrosión drásticamente comprometida, tornando el material susceptible a la corrosión intergranular en ciertos medios.

Las zonas térmicamente afectadas por operaciones de soldado son particularmente sensibles a esta forma de corrosión, ya que durante el ciclo térmico de soldado parte del material es mantenido en la faja crítica de temperaturas. La consideración de este fenómeno llevó al desarrollo de los inoxidable austeníticos extra bajo carbono, 304L, 316L y 317L, en los cuales el tenor de carbono es

controlado en un máximo de 0,03%, quedando así extremadamente reducida la posibilidad de sensibilización. La utilización de estabilizadores tiene también la finalidad de evitar el problema de la sensibilización.

El titanio, adicionado como elemento de aleación, inhibe la formación de carburo de cromo debido al hecho de tener una afinidad mayor por el carbono que aquella que tiene el cromo. Así, se precipita carburo de titanio y el cromo permanece en solución sólida. Con la misma finalidad puede ser utilizado el niobio. Tanto el titanio como el niobio son estabilizadores del carbono y los aceros inoxidable así obtenidos, el 321 y el 347 son conocidos como aceros inoxidables estabilizados. El inoxidable 316 Ti es la versión estabilizada del tipo 316. Para aplicaciones en equipos que operan entre 400 y 900 °C, los aceros inoxidables estabilizados son los más recomendados, ya que conservan mejores propiedades mecánicas en esas temperaturas que los aceros de extra bajo carbono; notoriamente la resistencia al creep. En el inoxidable 904 L (20Cr-25Ni-4,5Mo-1,5Cu), la adición de elementos de aleación busca mejorar no sólo la resistencia al picado sino también la resistencia a la corrosión en medios ácidos reductores. El elevado tenor de níquel mejora también el comportamiento frente a la corrosión bajo tensión.

En los casos en que se pretende una buena resistencia mecánica y no existe gran preocupación por la corrosión intergranular, los aceros inoxidables 304H y 316H, con tenores de carbono en el rango de 0,04/0,10%, son recomendados. La precipitación de una fina red de carburos de cromo, tan perjudicial bajo el punto de vista de la corrosión, se torna benéfica cuando lo que interesa son las propiedades mecánicas. Aumentos considerables en los tenores de cromo y níquel permiten elevar la temperatura de formación de cascarilla (escamado) de los aceros inoxidables austeníticos. El inoxidable 304 es recomendado para trabajo al aire libre, a temperaturas inferiores a 925 °C en servicios continuos.

En las mismas condiciones, el inoxidable 310, con cromo 24/26% y níquel 19/22%, resiste temperaturas de hasta 1150 °C. Es un material clasificado como acero inoxidable refractario. Grandes aumentos de níquel, llevan a las aleaciones Ni-Cr-Fe, donde el elemento con mayor presencia en el material ya no es el hierro sino el níquel, Estos materiales no son conocidos como aceros inoxidables sino

como aleaciones a base de níquel y presentan excelente resistencia a la corrosión en diversos medios a altas temperaturas. El elevado tenor de níquel da también garantía de una buena resistencia a la corrosión bajo tensión. El acero inoxidable 304 es un material con excelente ductilidad.

Para casos de estampado extra profundo, un aumento en el tenor de níquel permite mejorar todavía más la ductilidad. Con esta finalidad fue desarrollado el Tipo 305. Ligeras reducciones en el tenor de níquel disminuyen la estabilidad de la austenita, permitiendo la aparición de martensita inducida por deformación en frío, consiguiéndose así excelentes propiedades para aplicaciones estructurales. Es el Tipo 301, disponible en las versiones 1/4, 1/2, 3/4 y totalmente duro y con gran utilización en las industrias ferroviarias, de trenes metropolitanos y de carrocerías de ómnibus. El Tipo 303 resulta del aumento del tenor de azufre en el 304 con la finalidad de mejorar la maquinabilidad. La ductilidad y la resistencia a la corrosión quedan comprometidas por este aumento en la cantidad de azufre. Los aceros de la serie 200, resultan de una substitución parcial de níquel por manganeso. Son utilizados en aplicaciones estructurales, presentando resistencia a la corrosión inferior al 301.

2.2.8 Acero inoxidable 304

Éste es el más versátil y uno de los más usados de los aceros inoxidables de la serie 300; motivado a que tiene excelentes propiedades para el conformado y el soldado, pues se puede utilizar para aplicaciones de embutición profunda, de rolado y de corte; de igual manera, tiene buenas características para la soldadura, no requiere recocido tras la soldadura para que se desempeñe bien en una amplia gama de condiciones corrosivas y la resistencia a la corrosión es excelente, excediendo al tipo 302 en una amplia variedad de ambientes corrosivos incluyendo productos de petróleo calientes o con vapores de combustión de gases. Además, posee excelente resistencia a la corrosión en servicio intermitente hasta 870 °C y en servicio continuo hasta 925°C.

No obstante, se recomienda abstenerse para uso continuo entre 425 - 860°C pero contrariamente a lo anterior se desempeña muy bien por debajo y por encima de ese rango. Adicionalmente, es un acero austenítico que posee un mínimo de 18% de

cromo y 8% de níquel, combinado con un máximo de 0,08% de carbono. Así mismo, es un acero no-magnetizable el cual no puede endurecerse por tratamiento al calor, pero contrariamente a lo que se ha expresado debe de ser trabajado en frío para obtener resistencias tensiles superiores. Ahora bien, el contenido mínimo de 18% de cromo proporciona resistencia a la corrosión y la oxidación, siendo las características metalúrgicas de la aleación establecidas principalmente por el contenido de níquel máximo requerido, que también extiende la resistencia a corrosión causada por los químicos reductores.

Por su parte, el carbono, una necesidad de beneficio mixto, se mantiene a un nivel (0,08% máximo.) lo cual es satisfactorio para la mayoría de aplicaciones de servicio. En la actualidad, sus usos son muy variados, se destacan los equipos para procesamiento de alimentos, enfriadores de leche, intercambiadores de calor, contenedores de productos químicos, tanques para almacenamiento de vinos y cervezas, así como partes para extintores de fuego. Las Figuras 16 y 17 muestran las propiedades mecánicas y composición química característica de este tipo de acero inoxidable, respectivamente.

Propiedad	Valor característico
Resistencia a la fluencia (MPa)	310
Resistencia máxima (MPa)	620
Elongación (%)	30
Reducción de área (%)	40
Módulo de elasticidad (GPa)	200

Figura 16: Efecto de los elementos de aleación sobre los aceros inoxidables

Fuente: ASM international. Stainless steels. (1999).

Elemento	Porcentaje en peso (%)
C	Min, 0.08
Mn	2.00
Si	0.12
Cr	18.0 – 20.0
Ni	8.0 – 10.5
P	0.045
S	0.03

Figura 17: Composición química característica del acero inoxidable AISI-304

Fuente: ASM international. Stainless steels. (1999).

2.2.9 Soldadura

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales, (generalmente metales o termoplásticos), usualmente logrado a través de la coalescencia (fusión), en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y pudiendo agregar un material de relleno fundido (metal o plástico), para conseguir un baño de material fundido (el baño de soldadura) que, al enfriarse, se convierte en una unión fija. A veces la presión es usada conjuntamente con el calor, o por sí misma, para producir la soldadura, cuestión que está en contraste con la soldadura blanda (en inglés soldering) y la soldadura fuerte (en inglés brazing), que implican el derretimiento de un material de bajo punto de fusión entre piezas de trabajo para formar un enlace entre ellos, sin fundir las piezas de trabajo.

En este orden de ideas se puede citar que muchas fuentes de energía disímiles pueden ser usadas para la soldadura, entre ellas las de llama de gas, arco eléctrico, láser, rayo de electrones, procesos de fricción o ultrasonido; en la cual la energía necesaria para formar la unión entre dos piezas de metal generalmente proviene de un arco eléctrico, mientras que la energía para soldaduras de fusión o termoplásticos habitualmente proviene del contacto directo con una herramienta o un gas caliente. Significa entonces que con frecuencia es un proceso industrial, donde la soldadura puede ser hecha en muchos ambientes diferentes, tales como al aire libre, debajo del agua o el espacio sideral, por lo que, sin importar su localización, la soldadura seguirá siendo peligrosa, y es recomendable que durante su utilización tomar precauciones para evitar ser objeto de quemaduras, descarga eléctrica, humos venenosos o la sobreexposición a la luz ultravioleta.

Si bien es cierto, hasta finales del siglo XIX el único proceso de soldadura era la soldadura de fragua, el cual los herreros han utilizado por siglos para juntar metales calentándolos y golpeándolos. En cambio, la soldadura por arco y la soldadura a gas fueron los primeros procesos en desarrollarse tardíamente en el siglo, siguiendo poco después la soldadura por resistencia. En aquellos momentos, la tecnología en soldadura avanzó rápidamente durante el principio del siglo XX; mientras que la Primera y Segunda Guerra Mundial condujeron la demanda de

métodos de junta confiables y baratos. Posteriormente a las guerras, fueron desarrolladas varias técnicas modernas en soldadura, incluyendo métodos manuales como la Soldadura manual de metal por arco, ahora uno de los más populares métodos de soldadura, así como procesos semiautomáticos y automáticos tales como la Soldadura GMAW, soldadura de arco sumergido, soldadura de arco con núcleo de fundente y soldadura por electroescoria. Los progresos continuaron con la invención de la soldadura por rayo láser y la soldadura con rayo de electrones a mediados del siglo XX.

Hoy en día, la ciencia continúa avanzando y la soldadura robotizada está llegando a ser más corriente en las instalaciones industriales, y los investigadores permanecen desarrollando nuevos métodos de soldadura y a la vez ganando mayor comprensión de la calidad y las propiedades de la soldadura. En definitiva, se dice que es un sistema, debido a que intervienen los elementos propios de este, es decir, las 5 M: mano de obra, materiales, máquinas, medio ambiente y medios escritos (procedimientos). Pues, la unión satisfactoria implica que debe pasar las pruebas mecánicas (tensión y dobléz) y las técnicas es decir los diferentes procesos (SMAW, SAW, GTAW, entre otros.) utilizados para la situación más conveniente y favorable, lo que hará que sea más económico, sin dejar de lado la ineludible seguridad.

2.2.10 Tipos de soldadura

Existen diversos métodos de soldadura y a continuación se describe el método utilizado en la presente investigación.

2.2.10.1 Soldadura por arco manual con electrodo revestido, SMAW

La característica más importante de la soldadura con electrodos revestidos, en inglés Shield Metal Arc Welding (SMAW) o Manual Metal Arc Welding (MMAW), es que el arco eléctrico se produce entre la pieza y un electrodo metálico recubierto. El recubrimiento protege el interior del electrodo hasta el momento de la fusión. Con el calor del arco, el extremo del electrodo funde y se quema el recubrimiento, de modo que se obtiene la atmósfera adecuada para que se produzca la transferencia de metal fundido desde el núcleo del electrodo hasta el baño de fusión en el material base. Estas gotas de metal fundido caen recubiertas de escoria

fundida procedente de la fusión del recubrimiento del arco. La escoria flota en la superficie y forma, por encima del cordón de soldadura, una capa protectora del metal fundido. Como son los propios electrodos los que aportan el flujo de metal fundido, será necesario reponerlos cuando se desgasten. Los electrodos están compuestos de dos piezas: el alma y el revestimiento.

Este proceso usa una fuente de alimentación para soldadura para crear y mantener un arco eléctrico entre un electrodo y el material base para derretir los metales en el punto de la soldadura. La corriente eléctrica se usa para crear un arco entre el material base y la varilla de electrodo consumible, que es de acero y está cubierto con un fundente que protege el área de la soldadura contra la oxidación y la contaminación por medio de la producción de gas CO₂ durante el proceso de la soldadura. Este proceso se puede apreciar en la Figura 18. El proceso es versátil y puede realizarse con un equipo relativamente barato, haciéndolo adecuado para trabajos de taller y trabajo de campo. Un operador puede hacerse razonablemente competente con una modesta cantidad de entrenamiento y puede alcanzar la maestría con experiencia. Los tiempos de soldadura son algo lentos, puesto que los electrodos consumibles deben ser sustituidos con frecuencia y porque la escoria, el residuo del fundente, debe ser retirada después de soldar. Además, el proceso es generalmente limitado a materiales de soldadura ferrosos, aunque electrodos especializados han hecho posible la soldadura del hierro fundido, níquel, aluminio, cobre, y de otros metales.

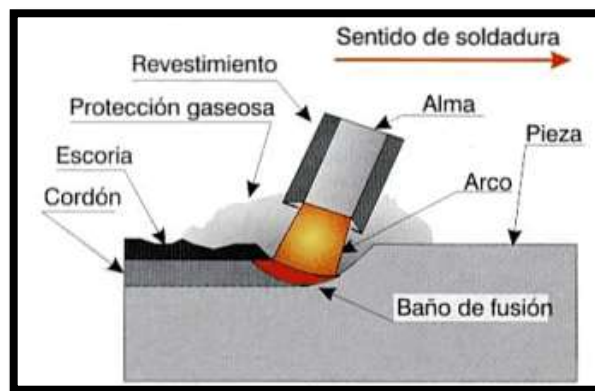


Figura 18: Proceso de soldadura manual con electrodo revestido (SMAW).

Fuente: Soldaduras sparkweld. (2.016).

2.2.11 Soldabilidad

La calidad de una soldadura también es dependiente de la combinación de los materiales usados para el material base y el material de relleno. No todos los metales son adecuados para la soldadura, y no todos los metales rellenos trabajan bien con materiales bases aceptables.

La soldabilidad en los aceros es inversamente proporcional a una propiedad conocida como la templabilidad del acero, que mide la probabilidad de formar la martensita durante el tratamiento de soldadura o calor. La templabilidad del acero depende de su composición química, con mayores cantidades de carbono y de otros elementos de aleación resultando en mayor templabilidad y por lo tanto una soldabilidad menor. Para poder juzgar las aleaciones compuestas de muchos materiales distintos, se usa una medida conocida como el contenido equivalente de carbono para comparar las soldabilidades relativas de diferentes aleaciones comparando sus propiedades a un acero al carbono simple.

El efecto sobre la soldabilidad de elementos como el cromo y el vanadio, mientras que no es tan grande como la del carbono, es por ejemplo más significativa que la del cobre y el níquel. A medida que se eleva el contenido equivalente de carbono, la soldabilidad de la aleación decrece. La desventaja de usar simple carbono y los aceros de baja aleación es su menor resistencia, hay una comprensión entre la resistencia del material y la soldabilidad. Los aceros de alta resistencia y baja aleación fueron desarrollados especialmente para los usos en la soldadura durante los años 1970, y estos materiales, generalmente fáciles de soldar tienen buena resistencia, haciéndolos ideales para muchas aplicaciones de soldadura. Según Código ASME (2007)

2.2.11.1 Máquinas de soldar con arco

Para lograr buenas soldaduras con electricidad, se necesita una máquina que controle la intensidad de la electricidad, aumente o disminuya la potencia según se requiera y que sea segura para manejarla. Hay tres tipos principales de máquina utilizadas en la soldadura con arco: Máquina de CA (corriente alterna) Máquina de CC (corriente continua) Máquina de CA y CC (una combinación de las dos) Las

máquinas de corriente alterna (CA) se llaman transformadores. Transforman la corriente de la línea de alimentación (que es de alto voltaje y de bajo amperaje) en una corriente útil, pero segura para soldar (que es de bajo voltaje y alto amperaje). Esto se efectúa dentro de la máquina con un sistema de un devanado primario, uno secundario y un reactor movable. Las máquinas de corriente continua (CC) se clasifican en dos tipos básicos: generador y rectificador. En un generador de CC, la corriente se produce por la rotación de una armadura (inducido) dentro de un campo eléctrico. Esta corriente alterna generada la captan una serie de escobillas de carbón y un conmutador o colector y la convierten en corriente continua. Los rectificadores básicos son transformadores de CA a los que se ha agregado un rectificador. La corriente alterna que suministra el transformador se envía al rectificador que la convierte o rectifica a corriente continua.

2.2.11.2 Polaridad

Una corriente eléctrica produce una fuerza magnética alrededor de su conductor. Debido a que las líneas de fuerza magnética finalizan en las terminales negativa y positiva de la corriente eléctrica, se les llama polo negativo y polo positivo. De ahí se deriva la palabra polaridad, con la cual sabemos la dirección en que circula la corriente. Cuando el cable para el electrodo se conecta en la terminal positiva de la máquina de soldar, ésta se encuentra en polaridad positiva. Cuando el cable para el electrodo se conecta en la terminal negativa de la máquina de soldar, ésta se encuentra en polaridad negativa. No es necesario cambiar los cables para cambiar la polaridad.

En la mayor parte de las máquinas, sólo hay que mover una palanca o un cuadrante en el frente de la máquina de soldar. En algunos procesos de soldadura, la polaridad que se debe utilizar se determina con el metal que se va a soldar. Sin embargo, en el proceso de SMAW, la polaridad se determina por el recubrimiento del electrodo. El factor principal que hace de este proceso de soldadura un método tan útil es su simplicidad y, por tanto, su bajo precio. A pesar de la gran variedad de procesos de soldadura disponibles, la soldadura con electrodo revestido no ha sido desplazada del mercado. La sencillez hace de ella un procedimiento práctico;

todo lo que necesita un soldador para trabajar es una fuente de alimentación, cables, un portaelectrodo y electrodos.

El soldador no tiene que estar junto a la fuente y no hay necesidad de utilizar gases comprimidos como protección. El procedimiento es excelente para trabajos, reparación, fabricación y construcción. Además, la soldadura SMAW es muy versátil. Su campo de aplicaciones es enorme: casi todos los trabajos de pequeña y mediana soldadura de taller se efectúan con electrodo revestido; se puede soldar metal de casi cualquier espesor y se pueden hacer uniones de cualquier tipo. Sin embargo, el procedimiento de soldadura con electrodo revestido no se presta para su automatización o semiautomatización; su aplicación es esencialmente manual. La longitud de los electrodos es relativamente corta: de 230 a 700 mm.

Por tanto, es un proceso principalmente para soldadura a pequeña escala. El soldador tiene que interrumpir el trabajo a intervalos regulares para cambiar el electrodo y debe limpiar el punto de inicio antes de empezar a usar electrodo nuevo. Sin embargo, aun con todo este tiempo muerto y de preparación, un soldador eficiente puede ser muy productivo.

2.2.11.3 Electrodo

A finales del siglo XIX se hicieron experimentos con un electrodo de carbón y el intenso calor del arco eléctrico para unir metales. Unos cuantos años más tarde el electrodo de carbón con una varilla o alambre de hierro desnudo, lo cual elimina la necesidad de usar una varilla separada para relleno. A principios del siglo XX, se descubrió que se mejoraban las propiedades físicas, mecánicas y químicas de la soldadura, si se aplicaba un recubrimiento sobre el alambre de hierro desnudo. Algunos de los primeros experimentos incluyeron envolver el electrodo desnudo con tela de asbesto y algodón empapada con silicato de sodio. Tanto el asbesto (amianto) como el silicato de sodio se utilizan para dar resistencia al fuego y la idea de usarlos fue evitar que el recubrimiento se quemara demasiado pronto. De estos primeros experimentos surgieron los electrodos actuales. Constan de un núcleo de alambre metálico, al cual se ha agregado un recubrimiento de productos químicos seleccionados cuidadosamente. En realidad, aunque los primeros intentos fueron un

poco burdos, los electrodos modernos incluyen, entre otras cosas, asbesto, algodón y silicato de sodio.

2.2.11.4 El alambre del núcleo

El alambre del núcleo de un electrodo, en casi todos los casos, se hace con el mismo metal que el de las piezas que se van a soldar. Por ejemplo, el acero dulce se soldaría con un electrodo con el alambre del núcleo hecho con acero dulce. El alambre sería de aluminio para soldar un metal base de aluminio; para el cobre, se emplearía alambre de núcleo de cobre, etc. La combinación de los elementos utilizados para el recubrimiento produce las características especiales de cada tipo de electrodo. La finalidad del alambre del núcleo es conducir la energía eléctrica al arco y suministrar el metal de relleno o aporte adecuado.

2.2.11.5 Recubrimientos

El recubrimiento tiene muchas funciones. Si no lo hubiera, el metal fundido se combinaría con el oxígeno y el nitrógeno del aire. Por tanto, es necesario proteger tanto el metal de aporte del electrodo como el metal base fundido que se suelda; éste es la mezcla del metal base fundido y el metal fundido del electrodo que, cuando se solidifica forma la soldadura en sí. El arco se puede proteger con una envoltura de un gas inerte, el cual no producirá una reacción química con el metal fundido. El recubrimiento de los electrodos suministra el gas protector. Este es el proceso de soldadura con metal y arco protegido (SMAW). Algunos de los elementos utilizados en los recubrimientos son magnesio, silicatos de aluminio y talco, todos ellos son formadores de escoria. Los fluoruros de calcio, carbonatos de calcio, ferromanganeso, ferrosilicio y ferrotitanio son agentes fundentes. El silicato de sodio se utiliza como agente aglutinante. La celulosa, que forma un gas, protege la zona de la soldadura.

2.2.11.6 Funciones de los recubrimientos

Las principales funciones de los recubrimientos de los electrodos son:

- a) Reducir al mínimo la contaminación del metal de soldadura con el oxígeno y el nitrógeno atmosféricos.
- b) Compensar las pérdidas de ciertos elementos durante la transferencia del metal a través del arco, porque el recubrimiento incluye aleaciones.

- c) Concentrar el arco en una zona específica porque forma una taza o copa en la punta del electrodo, que se debe a la fusión más lenta del recubrimiento.
- d) Reduce las proyecciones o salpicaduras.
- e) Agrega elementos aleantes a la junta soldada.

2.2.11.7 Escoria

El recubrimiento también forma escoria en la parte superior del metal fundido que se suelda, la cual protege al metal fundido durante el enfriamiento y también ayuda a configurar la soldadura. Se elimina después de que se ha enfriado la soldadura. La escoria, además de formar una capa protectora sobre la soldadura, también debe poseer las siguientes características:

- a) Tener un punto de fusión más bajo que el del metal que se suelda. De lo contrario, hay el peligro de que la escoria se solidifique antes que el metal de aporte depositado.
- b) Tener una densidad, en su estado fundido, que sea menor que la del metal de soldadura, para que pueda flotar en la superficie.
- c) Debe tener suficiente viscosidad para que no fluya sobre una superficie muy grande. Sirve para evitar la contaminación del metal de la soldadura con el aire atmosférico.
- d) No debe contener elementos que produzcan reacciones indeseables con el metal de soldadura.
- e) Se dilatará, pero en forma distinta a la del metal de soldadura, para que se pueda desprender de éste cuando esté frío.
- f) Tener una tensión de superficie que impida la formación de glóbulos grandes.

2.2.11.8 Tamaño del electrodo y amperaje

La medida del electrodo que se debe utilizar depende de diversos factores:

- a) El espesor del metal.
- b) Preparación de los bordes o filos de la unión.
- c) La posición de la unión (plana, vertical, sobre la cabeza).
- d) La pericia del soldador.

El amperaje que se utilice dependerá de:

- a) Tamaño del electrodo seleccionado.

b) El tipo de recubrimiento del electrodo.

c) La fuente de potencia.

2.2.11.9 Clasificación de los electrodos de acuerdo a la AWS

Los números de especificación y las clasificaciones de electrodos correspondientes se dan en el metal de soldadura sin diluir. Los electrodos de acero al carbono, acero de baja aleación y acero inoxidable también se clasifican de acuerdo con el tipo de corriente de soldadura con la que trabajan mejor, y en ocasiones de acuerdo con las posiciones de soldadura en las que pueden emplearse. Los números de especificación de la AWS y las clasificaciones de electrodos correspondientes se dan en la tabla de la Figura 19.

Tipo de electrodo	Especificaciones de la AWS
Acero al carbono	A5.1
Acero de baja aleación	A5.5
Aceros resistentes a la corrosión	A5.4
Hierro colado	A5.15
Aluminio y aleación de aluminio	A5.3
Cobre y aleaciones de cobre	A5.6
Níquel y aleaciones de níquel	A5.11
Recubrimiento	A5.13 y A5.21

Figura 19: Especificaciones de la AWS para los electrodos recubiertos.

Fuente: O. Brien, (2.006).

En ANSI/AWS A5.1, especificación para electrodos de acero al carbono para soldadura por arco, se usa un sencillo sistema de numeración para clasificar los electrodos. Por ejemplo, E7018:

- E: designa un electrodo.
- Los dos primeros dígitos (70): indican la resistencia a la tensión mínima del metal de soldadura sin diluir en ksi, en la condición “recién soldada”.

- El tercer dígito: representa la posición de soldadura (según la Figura 20).
- El último dígito: se refiere al tipo de cobertura y al tipo de corriente y polaridad con la que puede usarse el electrodo. (Figura 21).

Los electrodos de acero al carbono tienen dos niveles de resistencia mecánica: la serie 60 y la serie 70. La resistencia a la tensión mínima permisible para el metal de soldadura de la serie 60 es de 62 ksi (427 MPa). Para la serie 70, es 72 ksi (496 MPa).

Clasificación	Posición
EXX1X	Cualquier posición (De piso, Horizontal, sobre la cabeza y vertical)
EXX2X	Horizontal y de piso solamente
EXX3X	De piso solamente
EXX4X	De piso, sobre cabeza, horizontal y vertical hacia abajo

Figura 20: Tercer dígito, posición del electrodo.

Fuente: O. Brien, (2.006).

Dígito	Tipo de revestimiento	Corriente	Polaridad
0	Celulosa con sodio	CD	(+)
1	Celulosa con potasio	CA o CD	(+ o -)
2	Rutilo con sodio	CA o CD	(-)
3	Rutilo con potasio	CA o CD	(-)
4	Rutilo con polvo de hierro	CA o CD	(+ o -)
5	De bajo hidrógeno con sodio	CD	(+)
6	De bajo hidrógeno con potasio	CA o CD	(+)
7	Hierro en polvo y óxidos de hierro	CA o CD	(+ o -)
8	Bajo hidrógeno con polvo de hierro	CA o CD	(+)

Figura 21: Último dígito: Revestimiento, corriente y polaridad

Fuente: O. Brien, (2.006).

Varios electrodos de la serie 70 son del tipo de bajo hidrógeno. Sus recubrimientos tienen ingredientes con bajo contenido de humedad y de celulosa y, por tanto, de hidrógeno. El hidrógeno produce la baja ductilidad y el agrietamiento de la franja inferior que en ocasiones se observan en soldaduras muy restringidas.

2.2.12 Soldabilidad de los aceros inoxidable austeníticos

Debido a la amplia variedad en la composición química de los aceros inoxidable austeníticos, así como también de sus propiedades físicas y mecánicas se deduce que la soldabilidad en general no es igual para todos ellos. La soldabilidad de un material no depende solo de las propiedades metalúrgicas del material, sino también del procedimiento de soldeo que debe aplicarse al caso. No debe olvidarse que ambas facetas deben satisfacer los requerimientos de fabricación, así como las exigencias establecidas en las especificaciones. La soldabilidad de los aceros inoxidable austeníticos es casi única en el campo de los aceros inoxidable. En la mayoría de sus numerosas aplicaciones es muy fácil realizar soldaduras sanas y sin precalentamiento. Las juntas resultan con un alto grado de tenacidad y con propiedades comparables a aquellas del metal base, pudiendo ser puestas en servicio muchas veces sin necesidad de tratamientos térmicos post-soldadura. Estos resultados podrían ser obtenidos siempre que se realice una correcta elección del proceso de soldadura de este tipo de aceros. Sin embargo, existe un número de efectos perjudiciales que pueden ocurrir tanto en fabricación como servicio.

Entre los problemas de la soldadura de estos aceros se citan a continuación los más frecuentes.

2.2.13 Fisuración en Caliente

Debido al alto coeficiente de expansión térmica, los aceros inoxidable austeníticos están sometidos a grandes esfuerzos de contracción térmica durante su enfriamiento desde el estado líquido. Por otra parte, la segregación de elementos que promueven la formación de constituyentes de bajo punto de fusión es acentuada la solidificaron totalmente austenítica. Ambas características hacen que estos aceros tengan una altísima tendencia a la fisuración en caliente, ya sea bajo la forma de fisuras de solidificación en el metal de soldadura o como fisuras de licuación en la zona afectada por el calor del metal base y del metal de soldadura.

2.2.14 Corrosión intergranular

La susceptibilidad a la corrosión intergranular de los aceros inoxidable austeníticos está sometida al empobrecimiento en cromo de los bordes de grano austeníticos cuando la precipitación del carbono ocurre en forma de carburos de cromo. Esta precipitación se lleva a cabo en tiempos muy cortos de exposición en el rango de temperatura de 550°C a 800°C para aceros con contenidos de C > 0,03%. Dado que mayor C en el acero, la precipitación se intensifica, la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos se utiliza los grados de menor porcentaje de carbono. Una alternativa para prevenir la precipitación intergranular y por ende la sensitización es la estabilización del acero con Nb o Ti, los cuales forman carburos más estables respecto a los Cr. Por último, cabe destacar que la presencia de ferrita en el metal de soldadura es favorable tanto a la corrosión intergranular como a la corrosión bajo presión. Se asume que la precipitación de carburos de cromo se produce alrededor o dentro de la ferrita rica en cromo, por lo cual se evita así la formación de redes continuas sobre los bordes de granos, retrasándose de esta forma la sensitización; para que ocurra esto el contenido de carbono debe encontrarse por debajo del 0,06% C y el contenido de ferrita delta supere los valores mínimos especificados.

2.2.15 Fragilización por fase sigma

La fase sigma es una fase intermedia de la estructura tetragonal cuya composición de aceros inoxidable corresponde a 47% Cr – 53% Fe. Su precipitación ocurre entre los 650°C a 850°C. La propiedad de ser dura o frágil (700 a 900 Hv) hace que su presencia a temperatura ambiente represente una seria desventaja para las propiedades mecánicas del material. En algunos casos esta fase también puede incrementar la susceptibilidad del material al ataque corrosivo. La formación de la fase sigma en los aceros inoxidable está influenciada por los elementos ferritizantes, en particular por el cromo. Estos segregan en la ferrita y dado que los metales de soldadura de los aceros inoxidable austeníticos pueden contener porcentajes de la misma hasta un 12% en volumen, los mismos son proclives a presentar dicha precipitación durante servicio a altas temperaturas.

2.2.16 Distorsiones

Los aceros inoxidable austeníticos se dilatan por lo menos un 50% más que otros aceros cuando son calentados. Además, su conductividad térmica es alrededor de la mitad. Debido a esto dos factores las deformaciones pueden convertirse en un serio problema al menos que la soldadura se realice a apropiadas pautas, tanto desde el diseño como desde el procedimiento de soldadura.

2.2.17 Contaminación de la soldadura

Durante la soldadura de los aceros inoxidable austeníticos es imprescindible evitar cualquier contaminación con oxido, gases, pintura, aceites y demás elementos extraños que afectan la calidad de la soldadura. Para evitar la contaminación superficial, en la preparación y limpieza de las juntas deben utilizarse accesorios y herramientas específicas para aceros inoxidable, mientras que las técnicas de protección por gases deben ser realizadas de acuerdo a pautas y procedimientos estrictos. Los aceros inoxidable austeníticos son soldables con metales de aporte similares en composición química, produciendo metales de soldaduras austeníticas conteniendo ferrita delta en el rango de 5 a 13% en volumen, siendo la estructura de este tipo de acero totalmente austenítica. Pero si no es posible soldar con metales de aporte de similar composición química que el metal base, es importante asegurar que el metal de soldadura sea siempre noble con respecto a su composición y resistencia a la corrosión que el metal base. Esto hace que, si por alguna razón se formara una celda galvánica entre el metal de soldadura y el metal base, la corrosión galvánica se traslada al metal anódico de considerablemente mayor área superficial.

2.2.18 Características de la soldabilidad de algunos aceros inoxidable austeníticos

Los aceros inoxidable del tipo 304L y 316L están bastante inmunizados a la precipitación de carburos dentro del intervalo de los 426 a 871 °C y normalmente soportan las operaciones de soldadura o de eliminación de tensiones sin perjuicio de su resistencia a la corrosión, pero los carburos pueden precipitar en cantidades insignificantes cuando los aceros inoxidable con contenido extra bajos de carbono son calentados y mantenidos en el intervalo de la temperatura de sensibilización durante un periodo prolongado, como es el servicio. Los aceros del tipo 302, 304 y 304L difieren en el contenido de carbono y a consecuencia de esto hay una

diferencia en la cantidad de carburos precipitados en la zona afectada por el calor después del ciclo de calentamiento y de enfriamiento que ha transcurrido durante la operación. Los aceros de tipo 303 y 303- se contiene 0.20% de P máximo y 0.15% de Si y S, para así obtener un fácil mecanizado. Estos elementos (P, S y Si) son perjudiciales para la soldadura y pueden provocar una severa figuración en caliente que afecta al metal depositado. Los aceros del tipo 316Cb, 316L y 317 contienen molibdeno para incrementar su resistencia a la corrosión y la fluencia lenta (creep) pero durante el soldeo por fusión el molibdeno promueve la precipitación de carburos de la zona afectada por el calor, a menos que se retrasen por un contenido muy bajo en carbono (como el tipo 316L). Existen un grupo de aceros inoxidable austeníticos denominados austeníticos estabilizados que exhiben una alta resistencia a elevadas temperaturas.

Para trabajar en ambientes corrosivos y dentro del intervalo de sensibilización de 426 a 871°C es necesario un acero inoxidable estabilizado con Niobio más tántalo o Titanio, los tipos 318, 321, 347, 348. El metal de aportación empleado para su soldadura debe también estar estabilizado. La aplicación de un gas inerte como protección, procedimientos GTAW y GMAW pueden usarse para soldar un acero estabilizado con Titanio sin que se oxide este elemento en el arco. Los aceros inoxidable estabilizados son susceptibles a la sensibilización, la ocurre en zonas muy estrechas del metal base inmediatamente próxima a la línea de fusión. Aunque durante la soldadura los carburos del metal se encuentran en dicha zona disueltos debido al enfriamiento rápido, el subsiguiente recalentamiento alrededor de los 650°C da como resultado una precipitación preferencial de carburos de cromo.

2.2.19 Influencia de la Composición Química sobre la Estructura

Todos los aceros inoxidable contienen básicamente hierro, carbono y cromo. Los dos primeros porque son elementos intrínsecos de cualquier acero y el Cr porque es el elemento que, por encima de un 12%, les proporciona pasividad frente a medios oxidantes a través de la formación de una película estable de óxido de cromo. Como hemos indicado, también pueden incluir una serie de elementos de aleación como Si, Mn, P, S, Ni, Mo, Cu, Ti, Nb, N, B, W, Se, y Te sobre todo los inoxidable austeníticos. Ahora bien, todos estos elementos de aleación tienen una

influencia más o menos acentuada sobre cada una de las fases cristalinas que nos van a determinar la estructura metalúrgica y, por consiguiente, el tipo de acero inoxidable. Es fundamental, tanto para el acerista como para el técnico en soldadura, que la mezcla de elementos de aleación del material de base y del aportado se realice en las proporciones adecuadas para conseguir la estructura deseada, pues sin un apropiado equilibrio de elementos de aleación es imposible llegar a resultados satisfactorios. Los elementos de aleación presentan una subdivisión básica:

- Los formadores de ferrita, es decir generadores de fase alfa, también denominados alfégenos o ferritizantes, son los siguientes: Hierro (Fe), Cromo (Cr), Silicio (Si), Titanio (Ti), Niobio (Nb), Molibdeno (Mo), Manganeso (Mn).
- Los formadores de austenita, es decir, generadores de fase γ , también denominados gammágenos o austenizantes son los siguientes: Carbono (C), Níquel (Ni), Nitrógeno (N), Manganeso (Mn).

Como se observa, el Mn está incluido en los dos grupos. La razón estriba en que este elemento juega un papel doble y contradictorio: por un lado, es formador de ferrita especialmente cuando su contenido es alto y, por otro es un estabilizador de la austenita. Para el técnico en soldadura es importante poder determinar a priori el contenido necesario de elementos de aleación. Existen numerosos trabajos para relacionar este contenido y la estructura que se obtiene. Los estudios han conducido a unos diagramas en los que intervienen los diferentes elementos de aleación, así como su fuerza relativa en pro de la formación de una estructura determinada y las diferentes fases en cuestión.

2.2.20 Solidificación de los Aceros Inoxidables Austeníticos

En condiciones de enfriamiento en equilibrio, la estructura de los aceros inoxidables austeníticos a temperatura ambiente corresponde a la predicha por el diagrama de equilibrio Figura 22. Durante los procesos normales de solidificación, tales como fundición y soldadura, las velocidades de enfriamiento son tan rápidas que los estados más estables no se pueden alcanzar, por lo tanto, a temperatura ambiente las estructuras obtenidas no corresponden a las predichas por el diagrama de equilibrio. La estructura de solidificación del acero inoxidable austenítico,

dependiendo de su composición y velocidad de enfriamiento, puede presentar ciertos contenidos y morfologías de ferrita delta metaestable a temperatura ambiente debido al efecto de segregación durante la solidificación fuera de equilibrio. Dependiendo de la composición química y del modo primario de solidificación, la solidificación secundaria puede ser austenítica o ferrítica. De esta manera se originan una serie de microestructuras con distintas morfologías de ferrita delta. Algunas de las secuencias posibles de solidificación han sido reportadas por diversos investigadores y las cuales se esquematizan en la Figura 23 para un intervalo de composiciones que se expresan en función de las relaciones de Cromo Equivalente (Creq) y Níquel Equivalente (Nieq).

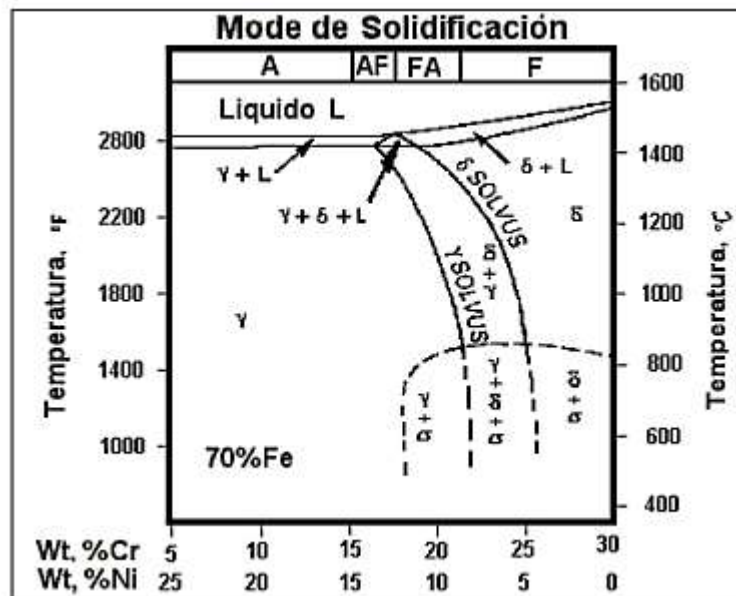


Figura 22: Sección del diagrama de equilibrio Fe-Cr-Ni, (70% Fe).
Fuente: GERDAU AZA (2.000).

2.2.21 Diagrama de Schaeffler y de DeLong

Los diagramas más conocidos y utilizados son el de Schaeffler y el de DeLong. Ambos tienen los mismos principios de ejecución y uso, aunque difieren en los elementos tomados en consideración para determinar los equivalentes de níquel y de cromo, y también en los coeficientes aplicados a estos elementos.


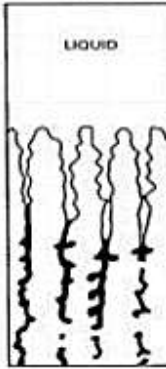



SOLIDIFICACIÓN PRIMARIA AUSTENÍTICA		SOLIDIFICACIÓN PRIMARIA FERRITICA		
				
a.- Austenita	b.- Ferrita Eutética	c.- Ferrita Vermicular	d.- Ferrita Lathy	e.- Austenita Widmanstätten

Figura 23: Morfologías de ferrita delta según el modo primario de solidificación.

Fuente: GERDAU AZA (2.000).

En el eje de las ordenadas presentan la suma de porcentajes de elementos formadores de austenita, multiplicados por unos coeficientes, función de la influencia austenizante del elemento de aleación. Esta suma se expresa en forma de equivalente de níquel, como elemento más representativo de la formación de austenita. En el eje de las abscisas se tiene, en cambio, la suma de porcentajes de elementos formadores de ferrita asimismo multiplicados por coeficientes, función de su influencia ferritizante. En este caso la suma se expresa en forma de equivalente de cromo, que es el elemento básico formador de ferrita.

2.2.21.1 Diagrama de Schaeffler

En 1949, Schaeffler publica su diagrama donde se pueden predecir las microestructuras o fases presentes y el porcentaje de ferrita tanto para el metal base como para el aporte y el cordón de soldadura. El porcentaje de ferrita es determinado por metalografía (ASTM E 562) y es comparado con lo obtenido por composición química, mediante los denominados Cromo Equivalente que oscila entre (0 – 40) % y Níquel Equivalente que oscila entre (0 – 32) %. Así mismo el

diagrama indica que es imprescindible disponer de un porcentaje adecuado de ferrita en el metal de soldadura situado entre 0 y 18% para reducir al mínimo los problemas de fisuración en caliente. Schaeffler determinó el porcentaje de ferrita, por medio de un diagrama en el cual, se puede ingresar conociendo el cromo equivalente y el níquel equivalente, los cuales se determinan utilizando los siguientes modelos empíricos:

$$Cr_{equivalente} = \%Cr + \%Mo + 1,5xSi + 0,5x\%Cb \quad Ec.1$$

$$Ni_{equivalente} = \%Ni + 30 x \% C + 0,5 x \% Mn \quad Ec.2$$

El diagrama de Schaeffler no considera los efectos del nitrógeno en la formación de austenita, y es incorrecto en el tratamiento de manganeso. El manganeso no promueve la formación de austenita a altas temperaturas como predice el diagrama, aunque estabiliza a la austenita en su transformación a baja temperatura. La Figura 24 presenta el diagrama básico de Schaeffler, el cual posee una precisión de más o menos 4% de ferrita.

2.2.21.2 Diagrama de DeLong

En 1974, DeLong publica su diagrama, modifica y afina el diagrama de Schaeffler, introduce un coeficiente para el Nitrógeno en la escala del Níquel Equivalente (Nieq) y determina su influencia sobre el contenido de ferrita. El Nitrógeno constituye un elemento altamente austenizante, está presente en determinados aceros inoxidable y puede ser absorbido durante la soldadura si la protección gaseosa es inadecuada. DeLong establece una escala de ferrita llamada FN, que es la utilizada para designar el contenido de ferrita en la soldadura, y que oscila entre 0 y 18 FN, con una precisión de más o menos 3 FN.

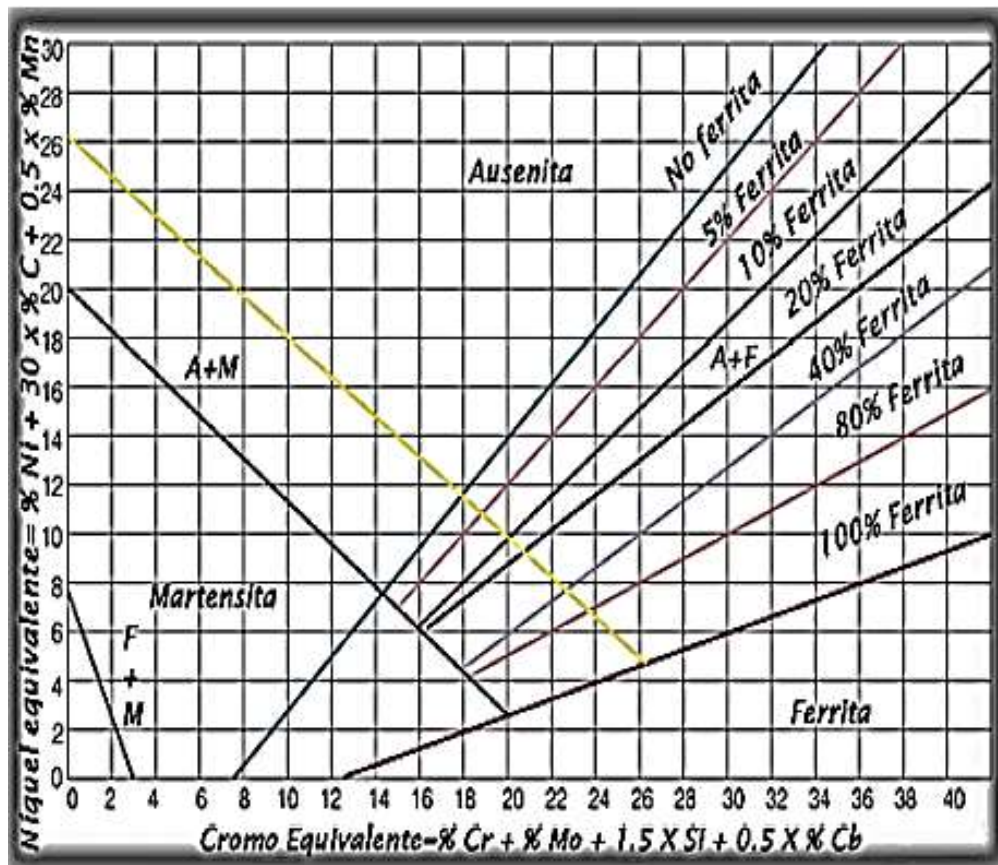


Figura 24: Diagrama de Schaeffler.

Fuente: ACERIND S.C. (2000).

El Cromo y el Níquel equivalentes se calculan de acuerdo a las ecuaciones empíricas indicadas a continuación, y en donde el Nitrógeno y el Carbono tienen un factor de correlación ó índice de 30.

$$Cr_{equivalente} = \%Cr + \%Mo + 1,5xSi + 0,5xNb \quad Ec.3$$

$$Ni_{equivalente} = \%Ni + 30x\%C + 30x\%N + 0,5x\%Mn \quad Ec.4$$

Para niveles bajos de ferrita, menores del 6%, el número de ferrita NF y el porcentaje de ferrita son idénticos. Sin embargo, estos dos valores difieren sustancialmente cuando se presentan grandes cantidades de ferrita en los aceros inoxidables. La Figura 25 muestra el diagrama de DeLong, que tiene la virtud de

incorporar la marcada influencia austenitizante que tiene el nitrógeno en el equilibrio de fases.

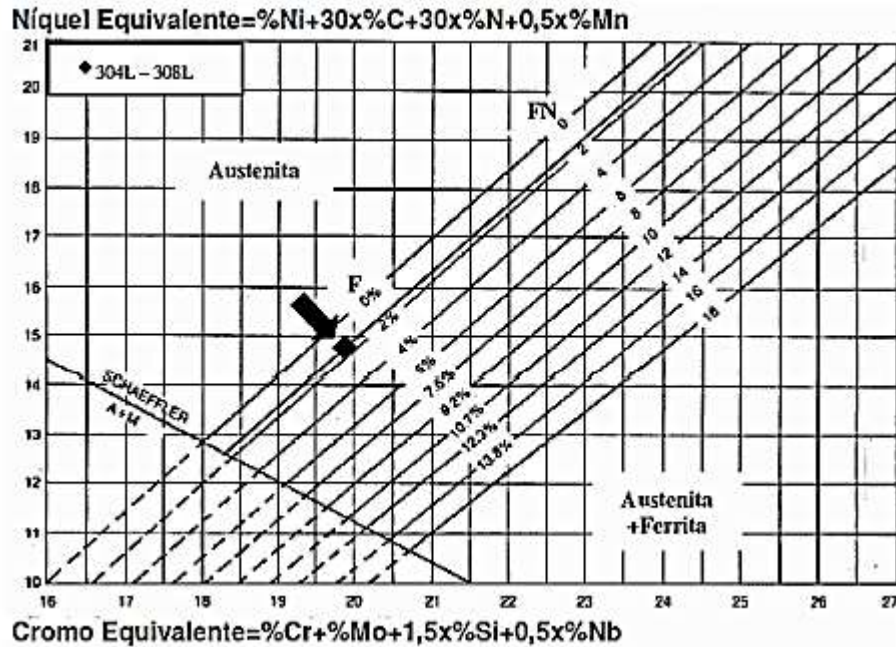


Figura 25: Diagrama de DeLong

Fuente: ACERIND S.C. (2000).

2.2.21.3 Carbono equivalente en el material base ASTM A36

Con el objeto de evaluar el posible efecto negativo del carbono y otros aleantes sobre la soldabilidad del acero ASTM A36, se procedió a calcular el carbono equivalente (CE) mediante la aplicación de una relación matemática y sustituyendo los valores de la composición química obtenidos anteriormente. El valor resultante es un indicador de la soldabilidad. Esta fórmula se encuentra especificada en el Código ASME, Sección IX QW- 403.26.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad \text{Ec.5}$$

2.2.22 Ensayos destructivos y no destructivos

Para evaluar o caracterizar a un material o a una junta soldada, es necesario realizar una serie de estudios en los cuales se pueden o no destruir o dañar las piezas

a analizar. Estos estudios se les denominan destructivos y no destructivos y a continuación se analizarán algunos de ellos.

2.2.22.1 Ensayos Destructivos

Son aquellos ensayos que originan la destrucción de la pieza o por lo menos de una parte de ella. Su función es comprobar la aptitud de los materiales para su empleo; es decir, que sus propiedades mecánicas o químicas, cumplen con los requisitos establecidos para el servicio a que serán sometidos. Son utilizados para calificar los procedimientos de soldadura, soldadores y operadores de máquinas de soldar, así como para determinar las propiedades mecánicas y metalúrgicas tanto del material base como del material de aporte (soldadura). A continuación, se presentará una descripción general de algunos de los ensayos destructivos más utilizados.

a) Ensayo de Tracción.

La prueba de tracción es la que se realiza con más frecuencia, para determinar las propiedades mecánicas de los materiales. El ensayo destructivo más importante es el ensayo de tracción, en donde se coloca una probeta en una máquina especial para este ensayo, que consiste en dos (2) mordazas, una fija y una móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil. El esfuerzo al cual se somete la probeta se determina dividiendo la fuerza aplicada por el área transversal nominal de la misma, y la deformación unitaria se obtiene dividiendo el alargamiento total por una longitud inicial de referencia. Como resultado de este ensayo se obtiene un diagrama esfuerzo-deformación. (Ver Figura 26).

La curva Esfuerzo vs. Deformación a la tracción se obtiene por la acción de la carga fija sobre una probeta estándar. Otro método para obtener la curva es especificar la rapidez de deformación como variable independiente, en cuyo caso la rapidez de carga se ajusta en forma continua para mantener la deformación requerida. En la mayoría de los materiales de ingeniería, la curva tendrá una región elástica lineal, en la cual la deformación es reversible e independiente del tiempo.

La máquina para realizar el ensayo de tracción impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionada. La celda de carga

conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, algunas máquinas poseen una impresora que gráfica en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída.



Figura 26: Máquina de ensayo de tracción marca. Sistemas de Ensayos, S.L
Modelo MEM-101-10-SDC
Fuente: Trexa, C.A. (2017)

El esfuerzo deformación de ingeniería en un ensayo de tracción que se define en relación con el área y longitud originales del espécimen de prueba. Dichos valores son de interés en el diseño debido a que el diseñador espera que las tensiones-deformaciones experimentadas por cualquier componente del producto no cambiaran su forma de manera significativa. Los componentes están diseñados para soportar los esfuerzos que se prevé encontrarán durante su uso.

Las ecuaciones para determinar las propiedades mecánicas con este ensayo son las siguientes:

$$S_i = \frac{P}{A_o} \quad \text{Ec. 6}$$

$$\delta = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad \text{Ec. 7}$$

$$\sigma_r = \frac{P_i}{A_i} \quad \text{Ec.8}$$

Dónde:

A_o = Área inicial (mm^2)

L_o = Longitud inicial (mm)

L_f = Longitud final (mm)

S_i = Esfuerzo de Ingeniería (MPa)

σ_r = Esfuerzo Real (MPa)

δ = Deformación Unitaria (mm/mm)

A_i = Área instantánea (mm^2)

P = Carga (N)

P_i = Carga instantánea (N)

Este ensayo, además, da como resultado, un gráfico que permite deducir puntos y zonas características que revisten gran importancia, dicho grafico se obtiene directamente de la máquina representando alargamiento, en función de la carga o la fuerza estática aplicada. Sin embargo, a partir de él se puede obtener el diagrama esfuerzo- deformación, el cual destaca las propiedades mecánicas más importantes del material. La curva típica del ensayo se observa en la Figura 27.

En los materiales dúctiles (materiales que pueden deformarse sostenidamente sin romperse), si se posee su curva característica es posible obtener propiedades que servirán para su estudio. (Ver Figura 28).

La relación esfuerzo-deformación de la figura 27 tiene dos regiones que indican dos modos distintos de comportamiento: elástico y plástico. En la región elástica, la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal, y el material muestra un

comportamiento elástico porque regresa a su longitud original si la carga (esfuerzo) se interrumpe. La relación está definida por la ley de Hooke (Groover M. 2007).

$$S_i = E \times e \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

E = Módulo de Young o de elasticidad (MPa)

El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez inherente del material. Es una constante de proporcionalidad cuyo valor es diferente para materiales distintos. Conforme el esfuerzo aumenta, se alcanza un punto final en la relación lineal en el que el material comienza a ceder. Esto se ilustra en la figura 28. Ese punto de deformación, del material se identifica en la figura por el cambio de la pendiente al final de la región lineal. Debido a que el comienzo de la deformación por lo general es difícil de ver en una gráfica de datos de prueba, es común definir ese punto como el esfuerzo con el que ocurre un avance de la deformación del 0.2% a partir de la línea recta. En forma más específica, es el punto en el que la curva esfuerzo-deformación del material interseca una recta paralela a la porción recta de la curva, pero desviada de ella por una deformación de 0.2%. El punto de deformación es una característica de la resistencia del material, y por ello es frecuente hacer referencia a él como el límite de deformación (otros nombres que recibe son esfuerzo de deformación y límite elástico). (Groover M. 2007).

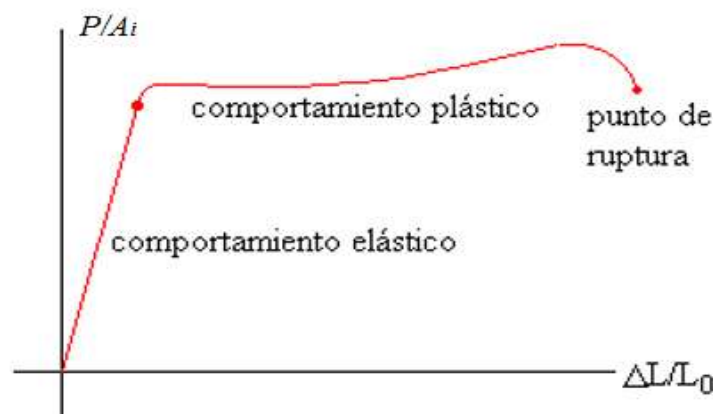


Figura 27: Comportamiento típico de los materiales. Esfuerzo vs Deformación unitaria.

Fuente: Askeland, Ingeniería y Ciencia de los materiales, (2.004)

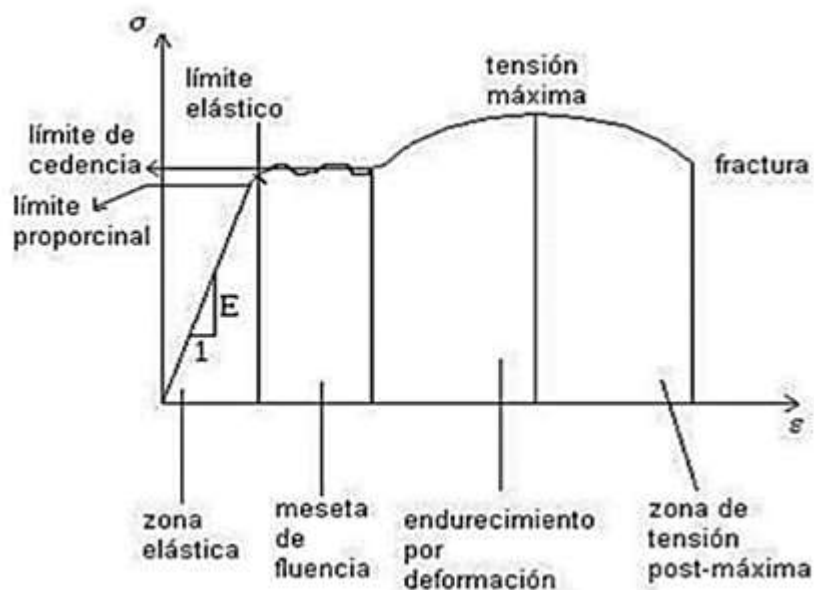


Figura 28: Curva característica Esfuerzo vs Deformación para materiales dúctiles.

Fuente: Askeland, Ingeniería y Ciencia de los materiales, (2.004)

- Módulo de Young E : representa la relación entre la tensión y la deformación en la zona proporcional.
- Límite de rotura: máximo valor de la tensión observable en un diagrama tensión-deformación. Es la máxima tensión que soporta la probeta.
- Límite de proporcionalidad: la tensión a partir de la cual deja de cumplirse la relación proporcional entre tensión y deformación.
- Límite de fluencia: Valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la fluencia.
- Estricción: Es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

El punto de deformación marca la transición hacia la región plástica y el comienzo de la deformación plástica del material. La relación entre el esfuerzo y la deformación ya no estará determinada por la ley de Hooke. Conforme se incrementa la carga más allá del punto de deformación, continúa la elongación del material, pero a una tasa mucho más rápida que la anterior, como se aprecia en la figura 28. La elongación va acompañada de una reducción uniforme del área de la sección transversal, consistente con el mantenimiento de un volumen constante. Por último,

la carga aplicada F alcanza un valor máximo, y el esfuerzo de ingeniería calculado en ese punto se denomina resistencia a la tensión o resistencia final a la tensión del material (S_u), donde $S_u = F_{\max}/A_o$. A la derecha de la resistencia a la tensión, en la curva esfuerzo-deformación, la carga comienza a declinar y es común que el espécimen de prueba comience un proceso de elongación localizada que se conoce como estrangulamiento. En lugar de continuar la deformación uniforme a todo lo largo de su longitud, comienza a concentrarse la deformación en una sección pequeña del espécimen. El área de esa sección se angosta (se estrangula) de manera significativa hasta que sobreviene la falla. El esfuerzo calculado inmediatamente antes de la falla se conoce como esfuerzo de fractura, Groover M. (2.007).

Askeland D. (2.013), habla acerca de la ductilidad, estableciendo que: la ductilidad es la habilidad de un material a deformarse de manera permanente sin romperse cuando se aplica una fuerza. Existen dos medidas comunes de la ductilidad. El porcentaje de elongación cuantifica la deformación plástica permanente en la falla (es decir, no se incluye la deformación elástica recuperada después de la fractura) midiendo la distancia entre las marcas calibradas en el espécimen antes y después de la prueba. Observe que la deformación después de la falla es menor que la deformación en el punto de ruptura, debido a que el esfuerzo elástico se recupera cuando la carga se elimina.

El porcentaje de elongación puede escribirse como:

$$\%e = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\% \quad \text{Ec.10}$$

b) Ensayo de Doblado.

Este ensayo se utiliza para medir la capacidad de deformación de la soldadura en una probeta al flexionarla alrededor de un punzón, ocasionalmente se toma el alargamiento de la fibra exterior para evaluar la capacidad de deformación.

Generalmente para estos ensayos se utiliza una prensa hidráulica donde se ubica el material entre dos apoyos y se hace bajar la prensa haciendo actuar el punzón.

En este ensayo es colocada la probeta en dos apoyos, se somete a una carga progresiva en el centro de la misma, se dobla hasta la aparición de grietas o hasta que se considere suficiente, el ángulo de doblado, los pliegues y demás detalles de

esa zona proporcionan información útil sobre el comportamiento de ese material en trabajos de flexión. (Ver Figuras 29 y 30). Este ensayo sirve para obtener una idea aproximada sobre el comportamiento del acero a la flexión o esfuerzo de doblado. Se comienza el ensayo, colocando la pieza sobre dos apoyos, cuya separación está normalizada. Se aplica luego, una fuerza controlada y que aumenta paulatinamente hasta que la probeta se dobla completamente o comienzan a aparecer las primeras grietas.

El doblado a temperatura ambiente, se realiza para determinar la ductilidad de los materiales metálicos (de él no se obtiene ningún valor específico). Este ensayo es solicitado por las especificaciones en la recepción de los aceros en barras y perfiles, para la comprobación de la tenacidad de los mismos y después de haber sido sometido al tratamiento térmico de recocido. El material se coloca entre los soportes cilíndricos, aplicando la carga lentamente hasta obtener el ángulo de doblado del mismo, o bien se observa la aparición de las primeras fisuras en la cara inferior o la sometida a la tracción. Avner, S. (1.983).



Figura 29: Dispositivo para Ensayo de Doblado.

Fuente: Laboratorio de procesos de fabricación
Facultad de Ingeniería - Universidad de Carabobo

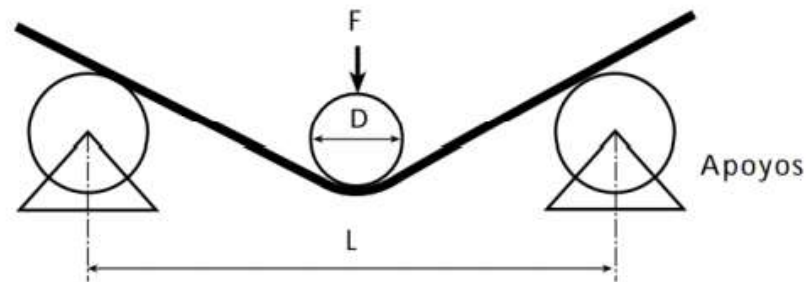


Figura 30: Esquema de la matriz de doblado.

Fuente: Propia (2.021)

El ángulo de doblez depende de los siguientes factores:

- Forma y fabricación de la probeta: a la forma y dimensiones de la probeta, estado de la superficie (sin considerar el cordón); ángulo del chaflán en V o en X.
- Realización del Ensayo: posición de la costura de la raíz del ensayo, distancia entre apoyos, diámetros del punzón, velocidad de deformación en el ensayo.

Doblado de cara.

Se utiliza para comprobar la calidad de la fusión, es decir, es para ver si la soldadura está libre de porosidad, inclusiones y falta de fusión. Para realizar el ensayo de cara se sitúa la probeta sobre los soportes cilíndricos de tal manera que la parte más ancha del cordón de soldadura se coloque hacia abajo y se aplica la presión hasta que la probeta quede en forma de U.

c) Ensayo de dureza

La dureza de un metal se mide forzando la indentación de un penetrador en la superficie del metal. El penetrador, que normalmente es una bola, pirámide o cono, está fabricado con un material mucho más duro que el material a ensayar.

En la mayoría de los ensayos de dureza normalizados se aplica lentamente una carga conocida, que presiona el penetrador contra la superficie del metal a ensayar y perpendicularmente a ésta. Después de producir la indentación, se retira el penetrador. Se calcula o se lee en un dial un número empírico de dureza basado en

el área del corte transversal de la huella producida.

Ensayos de Microdureza.

En este tipo de ensayos la penetración es del orden de algunos micrones, por lo que pueden ensayarse chapas y láminas extremadamente delgadas, o superficies tratadas en las que el espesor del tratamiento es muy delgado como es el caso de las superficies carburadas o nitruradas, así como también los recubrimientos por electrodeposición. En los ensayos de microdureza se utilizan aparatos que aplican cargas que pueden variar de 0,01 kg a 2 kg.

El ensayo de microdureza comúnmente utilizado es el ensayo de **Microdureza Vickers**. Durante las mediciones estandarizadas de dureza Vickers se hace penetrar un indentador de diamante en forma de pirámide de cuatro caras con un ángulo determinado en el vértice. La utilización de una pirámide de diamante tiene las siguientes ventajas: 1) las improntas resultan bien perfiladas, cómodas para la medición; 2) la forma de las improntas es geoméricamente semejante, por lo cual la dureza para un mismo material es constante, independientemente de la magnitud de la carga; 3) la dureza con la pirámide coincide con la dureza Brinell para los materiales de dureza media; 4) este método es aplicable con igual éxito para los materiales blandos y duros, y sobre todo para los ensayos de probetas delgadas y las capas superficiales. Para obtener la dureza Vickers de la superficie de un material se presiona contra la probeta un indentador piramidal de diamante con ángulo entre sus caras $\alpha = 136^\circ$. La pirámide se mantiene algún tiempo bajo la carga P . Luego de retirada la carga se miden las dos diagonales de la impronta dejada, con ayuda de un microscopio. El valor medio de las diagonales (d) y el valor de la carga se sustituyen en la fórmula de trabajo para obtener el valor de la dureza Vickers. En las mismas condiciones se realizan varias indentaciones más.

La Figura 31 muestra el microdurómetro marca Buehler del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.



Figura 31: Microdurómetro Vickers marca Buehler

Fuente: Laboratorio de Materiales

Facultad de Ingeniería - Universidad de Carabobo (2.021)

Para realizar el ensayo de dureza a los materiales base se empleará el ensayo de **Dureza Rockwell**. Para los materiales duros se emplea como elemento de penetración un cono de diamante de ángulo 120° , y para los semiduros y blandos una bolita de acero de $1/16''$, deduciéndose la fuerza Rockwell de la profundidad conseguida en la penetración. El cuerpo empleado para la penetración se hace incidir sobre la superficie de la pieza a ensayar con carga previa de 10Kg. La profundidad de penetración alcanzada constituye el valor de partida para la medición de la profundidad de la huella. Después se aumenta en 140Kg la carga aplicada al cono (150Kg), y en 90Kg la aplicada a la bolita (100Kg), bajándose nuevamente el valor previo. Se mide la profundidad de penetración que queda y en la escala del aparato se lee directamente la correspondiente dureza Rockwell C (HRc) cono o la Rockwell B (HRb) bolita.

d) Ensayos Metalográficos

La metalografía es la parte de la metalurgia que estudia las características estructurales o de constitución de los metales y aleaciones, para relacionarlas con las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los mismos. La importancia del

examen metalográfico radica en que, aunque con ciertas limitaciones, es capaz de revelar la historia del tratamiento mecánico y térmico que ha sufrido el material.

A través de este estudio se pueden determinar características como el tamaño de grano, distribución de las fases que componen la aleación, inclusiones no metálicas como sopladuras, micro cavidades de contracción, escorias, etc., que pueden modificar las propiedades mecánicas del metal. En general a partir de un examen metalográfico bien practicado es posible obtener un diagnóstico y/o un pronóstico.

– **Macroscopía**

Es la forma más sencilla de realizar un estudio, este consta en examinar la superficie metálica a simple vista, pudiendo determinar de esta forma las características macroscópicas, del cual se puede obtener datos sobre los tratamientos mecánicos sufridos por el material (es decir se puede determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, etc.) o determinar la distribución de defectos (grietas superficiales, rechupes, porosidades, partes soldadas, etc.).

– **Microscopía.**

Este ensayo se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio), para observar características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido el metal, debido a que los mismos nos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren es dicho proceso.

2.2.22.2 Ensayos No Destructivos

Son métodos de inspección y evaluación que se realizan a piezas y equipos puestos en servicio, con la finalidad de determinar la existencia de defectos, discontinuidades que influyen en sus propiedades mecánicas, sin que se destruya o desactive la pieza. Con estas evaluaciones se logra determinar el tamaño, forma, dimensión, ubicación y tipo de discontinuidad interna o externa de la pieza. Dos de estos ensayos se describen a continuación y serán los utilizados en esta investigación.

a) Inspección Visual (IV)

La inspección visual de soldadura, método no destructivo mediante el cual una soldadura se debe inspeccionar antes, durante y después del soldeo. Con esta técnica, se comprueba el aspecto superficial e integridad de la soldadura, además de detectarse discontinuidades abiertas con una profundidad no menor a 3mm, que son perceptibles al ojo humano. Los diferentes defectos que se pueden detectar son grietas, socavaduras, exceso o falta de penetración, salpicaduras, falta de continuidad en el cordón, poros o fisuras en frío. (Ver Figura 32).

Siendo el método de prueba no destructiva más extensamente utilizado, la inspección visual es fácil de aplicar, rápida, relativamente poco costosa, no requiere equipo especial sino únicamente una buena visión, y arroja información muy importante relativa a la conformidad general de las especificaciones de soldadura. Por conveniencia de presentación, se discutirá la inspección visual bajo cinco encabezados principales: práctica de la inspección, inspección previa a la soldadura, inspección durante la soldadura, inspección después de la soldadura, y marcación de soldaduras de reparación.

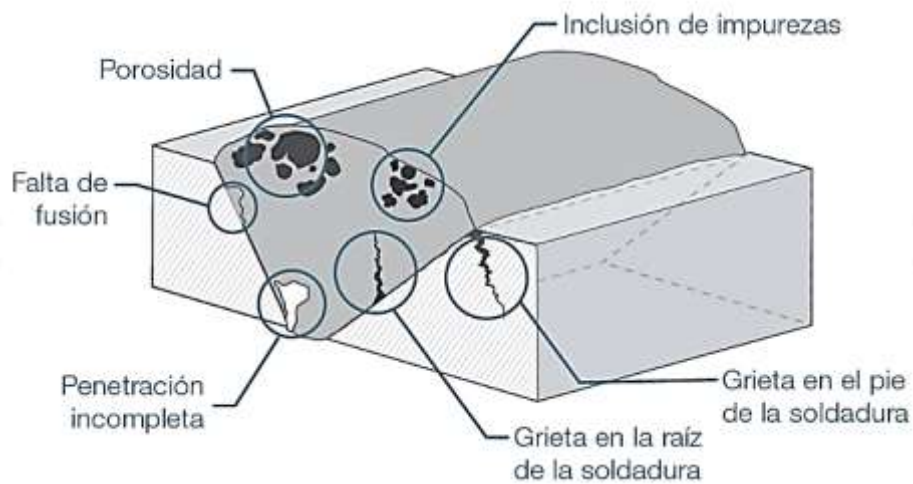


Figura 32: Algunos defectos de la soldadura

Fuente: https://static3.olympus-ims.com/data/Image/Infographic/weld_center_ES.jpg?rev=5BA0 (2.021)

b) Radiografía Industrial (RT)

La radiografía como método de prueba no destructivo, se basa en la capacidad de penetración que caracteriza a los Rayos X y a los Rayos Gama. Con este tipo de

emisiones es posible irradiar un material y, si internamente este material presenta cambios internos considerables como para dejar pasar o retener dicha radiación, entonces es posible determinar la presencia de discontinuidades internas y externas en el material, tales como poros, grietas, falta de fusión, impurezas, gases atrapados que no se distinguen a simple vista o no son reveladas por las otras evaluaciones no destructivas, simplemente midiendo o caracterizando la radiación incidente contra la radiación retenida o liberada por el material. Comúnmente, una forma de determinar la radiación que pasa a través de un material consiste en colocar una película radiográfica, cuya función es cambiar de tonalidad en el área que recibe radiación. El resultado queda plasmado en la película radiográfica situada en la parte inferior del material metálico.

2.3 Definición de Términos Básicos.

- **Acero:** es una aleación de hierro-carbono con un contenido de carbono no mayor a 20,11%, y que posee otros aleantes como Cr, Si, Mn, etc.
- **Agrietamiento:** fractura y fisura de un material.
- **Alargamiento:** Distancia que una probeta o muestra de material se dilata antes de romperse. Normalmente se expresa como un porcentaje de la longitud original de la distancia entre las señales.
- **Aleación:** sustancia con propiedades metálicas compuesta por dos o más elementos químicos de los cuales al menos uno es un metal.
- **Amperaje (A):** medida de unidades eléctricas que indica el flujo de energía eléctrica que pasa a través de un circuito.
- **Arco eléctrico:** es el espacio entre la punta del electrodo o alambre y la pieza que se va a soldar, por el cual pasa la corriente que crea el calor necesario para la fusión.
- **Biselado:** proceso en el cual se realiza un corte oblicuo en el borde de una superficie.
- **Cementita:** carburo de hierro constituyente de las estructuras del acero (Fe_3C).
- **Ductilidad:** es la capacidad que tiene un material para ser deformado plásticamente sin que este se fracture.

- **Dureza:** resistencia de un material a ser penetrado superficialmente.
- **Escoria:** residuos no deseados dejados por el proceso de soldadura.
- **Esfuerzo:** fuerza por unidad de área.
- **Ferrita:** es un componente del acero el cual posee un color blancuzco, cuya composición es aproximadamente 99.95% de hierro y el resto de carbono.
- **Ferrita Widmånstaetten:** es una microestructura ferrítica la cual posee una apariencia del grano vasto, es una microestructura frágil.
- **Grano:** cristales estructurales que, según su tamaño, puede representar zonas de enfriamiento.
- **Indentador:** penetrador utilizado en los ensayos de dureza y microdureza; en el caso de microdureza Vickers, es un penetrador de diamante en forma piramidal con un ángulo de 135°.
- **Microestructura:** disposición microscópica de granos, límites de granos, inclusiones, defectos, etc. Observados en el acero luego de ser pulido y atacado químicamente.
- **Perlita:** microconstituyente de los aceros formados por ferrita y cementita, se presenta en forma de láminas alternadas.
- **Vernier:** dispositivo empleado para efectuar mediciones de precisión y basado en dos escalas graduales de movimientos relativos.

2.4 Símbolos y Abreviaturas de Términos.

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
A	Ampere
AWS	American Welding Society
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Carbono
Cu	Cobre
Fe	Hierro
Fe ₃ C	Carburo de hierro (Cementita)
Hv	Índice de dureza Vickers
I	Intensidad de corriente medida en Ampere

Kg	Kilogramos
L	Longitud (m)
Lo	Longitud calibrada (m)
MB	Metal Base
Mo	Molibdeno
Mn	Manganeso
N	Newton
Ni	Níquel
P	Fósforo
Pulg.	Pulgadas
S	Azufre
Si	Silicio
SMAW	Soldadura manual por arco revestido
ZAC	Zona Afectada por el Calor
ZF	Zona de fusión

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

Según Arias F. (2.012): “La Investigación experimental es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)” y “La investigación documental es un proceso en la búsqueda, recuperación, análisis, crítico e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresos, audiovisuales o electrónicos. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimiento”. Este estudio es una investigación experimental y documental ya que se buscaron referencias previas y se realizaron una serie de ensayos mecánicos y metalúrgicos ya normalizados al material antes y luego de ser sometido al proceso de soldadura SMAW

3.2 Diseño de la investigación

En la perspectiva que aquí se adopta, se puede decir que el diseño de la investigación es de campo, motivado a que, se recopilan datos cualitativos encaminado a comprender, observar e interactuar con los objetos en su entorno natural. Según Arias F. (2.012): “El diseño de investigación es la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo y experimental”

El diseño de investigación que identifica este trabajo, es el de tipo experimental ya que busca controlar variables, para describir la situación y hechos que se pueden presentar, estableciendo un comportamiento de dicho conjunto de variables y así lograr establecer las causas para caracterizar las juntas soldadas de estudio, con el fin de establecer su microestructura y comportamiento mecánico, de esta manera

realizar el análisis comparativo entre los distintos tipos de electrodos buscando verificar el comportamiento mecánico de dichos electrodos con el material base.

Además, es también de diseño documental ya que, se analizan diferentes fenómenos del objeto de estudio a través de la indagación exhaustiva, sistemática y rigurosa, utilizando técnicas muy precisas; de la documentación existente que directa o indirectamente, aporte la información atinente al fenómeno que estudiara.

3.3 Nivel de investigación

Según Arias F. (2.012): “La investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere.”

Igualmente, según Arias F. (2.012): “La Investigación explicativa se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos”.

Este trabajo especial de grado puede definirse como de tipo descriptivo y explicativo. Descriptiva porque consiste en la caracterización de un hecho o fenómeno estableciendo su estructura o comportamiento. En esta investigación se analizó el comportamiento mecánico del material y la metalurgia de uniones soldadas por el método SMAW. Trata de explicar los fenómenos ocurridos en el cordón de soldadura y en el acero inoxidable AISI 304 y un acero estructural ASTM A-36 como metal base, de manera que se pueda establecer las posibles ventajas de aplicación del mismo a las piezas soldadas. Además, es explicativa porque consiste en buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. Para alcanzar los objetivos planteados en este trabajo se siguen los lineamientos de investigación documental, esto quiere decir, que se recurrió a la revisión bibliográfica y al análisis que se fundamenta en el ensayo mecánico normalizado y estudio de las muestras de manera empírica.

3.4 Población y muestra

Según Arias (2012): “la población, o en términos más precisos población objetivo, es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuáles serán extensivas las conclusiones de la investigación. Esta queda delimitada por el problema y por los objetivos del estudio”. (p.81). “La muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible” (Arias, 2012, p. 83). Tomando esto de referencia tenemos que la muestra es un grupo que será seleccionado en la zona de estudio del proyecto que representará a la población total.

En cuanto la población se consideró que está conformada por las láminas de acero estructural ASTM A36 y un acero inoxidable austenítico AISI 304, las cuales presentan dimensiones estándar 4 mm de espesor, 150 mm de ancho y 320 mm de largo. Dichas láminas fueron suministradas con recursos de los investigadores. Por otra parte, las muestras estuvieron conformadas por placas soldadas, de manera disímil, utilizando el método de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). De esas uniones disímiles se realizaron probetas para ensayos de tracción, doblado, microdureza y metalografía, utilizando las normas correspondientes y que se detallan más adelante en este capítulo.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Arias (2012) afirma:

“Se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información”. También manifiesta que: “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información”.

En esta investigación se utilizará la observación directa para recolectar los datos arrojados en la aplicación de ensayos mecánicos y metalúrgicos en el material base y en el cordón de soldadura.

Así mismo, los instrumentos utilizados para la recolección de los datos serán: computadores, microscopio óptico, máquina de tracción, equipos especializados para ensayos no destructivos (rayos X).

3.6 Técnicas de Procesamiento y Análisis de datos.

Una vez organizados los datos obtenidos de cada ensayo, se procederá a aplicar técnicas de procesamiento de datos tales como tablas, imágenes y gráficos con el fin de determinar las tendencias de la información registrada, se realizaron comparaciones para establecer de esta manera las diferencias que presentaron cada muestra.

El procesamiento y análisis de estos datos estará dado de acuerdo a las normas que se mencionaran más adelante en el procedimiento experimental, referidas a cada ensayo o pruebas realizadas. Estas normas refieren parámetros y guías.

A continuación, se presentan los pasos a seguir para cumplir con el objetivo fundamental de la investigación, incluyendo los procedimientos para la preparación de las probetas y ensayos necesarios para su posterior análisis. (Ver Figura 33)

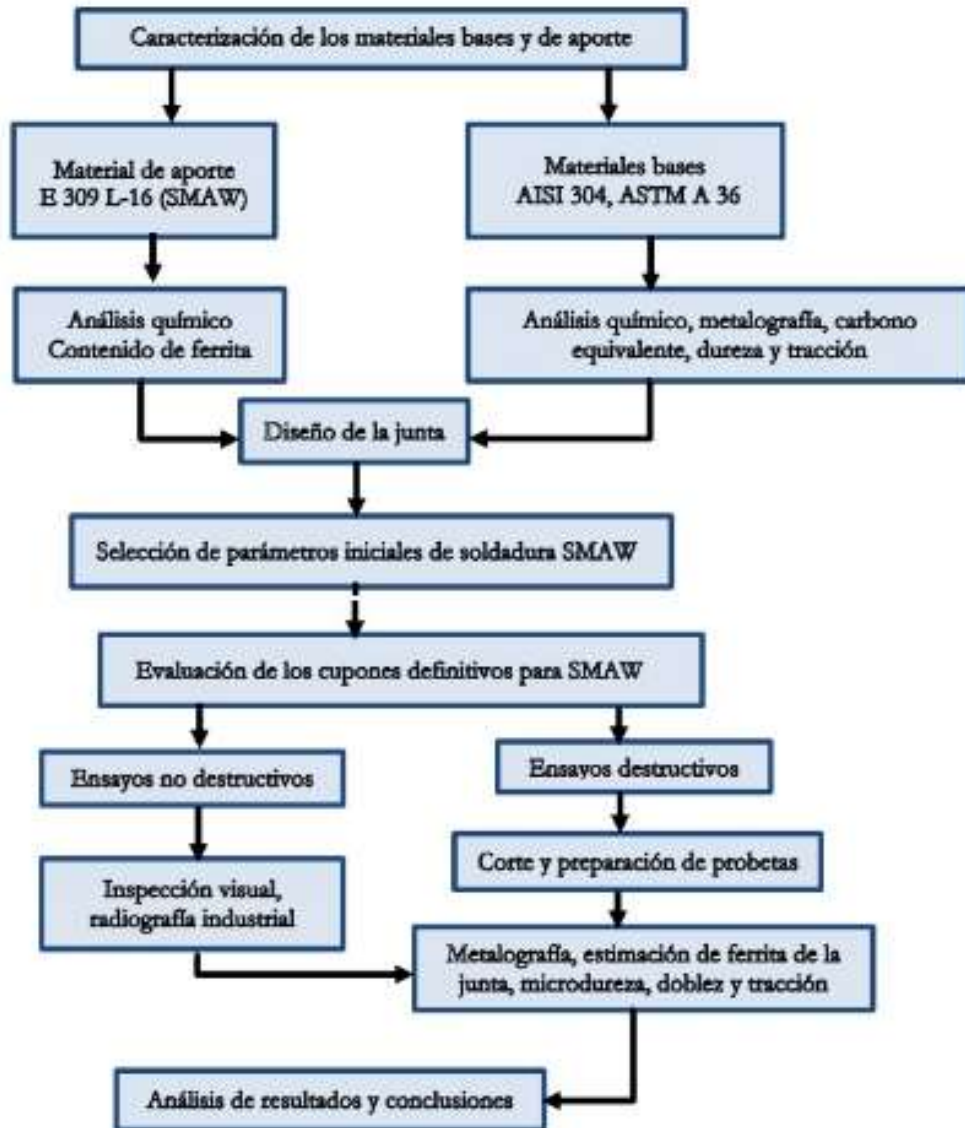


Figura 33: Fases de la investigación.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

3.7 Fases de la Investigación

El desarrollo de la presente investigación está comprendido por una serie de fases que permiten dar respuesta a los objetivos planteados en un determinado orden, brindando a los investigadores una herramienta para la planificación y mejor aprovechamiento del tiempo dedicado al proyecto.

Fase 1: Caracterizar los aceros ASTM A 36 y AISI 304 por medio de las propiedades mecánicas derivadas del ensayo de tracción, metalografía y composición química.

Una vez que se obtengan las láminas de los aceros ASTM A36 y AISI 304, se procederá a hacerles su caracterización con la finalidad de corroborar que realmente eran dichos materiales los que se tenían para la investigación. La caracterización se llevará a cabo por medio del estudio metalográfico, ensayos de tracción, análisis químico, contenido de ferrita para el acero inoxidable AISI 304, carbono equivalente para el acero ASTM A36 y ensayo de dureza. En esta fase se realizará un estudio de las propiedades mecánicas de los aceros ASTM A 36 y AISI 304 mediante el ensayo de tracción para evaluar principalmente alargamiento, límite elástico o carga de rotura y se analizará la microestructura del material mediante el estudio metalográfico, determinando el contenido de ferrita en el material base AISI 304, debido a la importancia de la fase ferrítica durante la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos; también se determinara el carbono equivalente en el material base ASTM A36 para evaluar el posible efecto negativo del carbono y otros aleantes sobre la soldabilidad del acero. La caracterización química de los materiales se realizará por el método de espectroscopia de absorción atómica. Con el fin de conocer información importante, como su grado de resistencia y fiabilidad o sus posibles aplicaciones.

Fase II: Definir las variables de soldadura a utilizar en el proceso SMAW, seleccionando las condiciones de soldadura, sustentadas en pruebas pilotos o cupones de prueba.

Esta fase permitirá establecer las variables de soldadura a utilizar en el proceso SMAW las cuales son el diámetro del electrodo, amperaje, longitud del arco, velocidad de avance, orientación del electrodo, polaridad y tipo de corriente, intensidad, velocidad de alimentación y distancia del electrodo o contacto con la punta de trabajo. Fundamentada en pruebas pilotos (puesta en práctica de un experimento tendiente a considerar las posibilidades de un determinado desarrollo posterior) o cupones de prueba (instrucción escrita que especifica todas las variables requeridas para realizar una soldadura).

i) Diseño de junta

Se selecciona una junta a tope con penetración completa con bordes de ranura cuadrada simple y abertura de raíz de 2,50 mm. Las caras de las juntas serán seccionadas con cizalla para evitar posibles alteraciones de la microestructura original de los materiales base por efecto térmico. Se realiza adicionalmente una limpieza superficial con un cepillo de cerdas de alambre para eliminar cualquier residuo de óxido o elemento ajeno al proceso que pudiese interferir en la coalescencia de los materiales a unir.

ii) Determinación preliminar de conjuntos de parámetros de soldadura SMAW

Las variables de soldadura necesarias para fabricar los cupones preliminares mediante el proceso SMAW se obtendrán a partir de la revisión bibliográfica y los datos recomendados por el fabricante de los aportes. Con los conjuntos de parámetros establecidos se procede a calcular los valores de energía aportada por cada proceso.

iii) Fabricación de cupones de prueba preliminares

Los cupones preliminares se obtuvieron mediante la deposición de cordones de soldadura individuales sobre chapa en posición plana. Para la soldadura de los cordones de prueba se utilizarán fuentes de energía específicas para cada uno de los procesos de soldadura empleados. La soldadura de los cordones se realizará utilizando los conjuntos preliminares de variables seleccionadas en la etapa anterior, estos cordones se realizarán sobre unas chapas de acero ASTM A 36 y AISI 304. Los parámetros que fueron tomados en cuenta son: voltaje e intensidad de corriente.

iv) Evaluación de cordones preliminares

Esta evaluación preliminar, se llevó a cabo por medio de una inspección visual y una evaluación macrográfica.

Inspección visual: Los cordones fueron analizados superficialmente para determinar su aspecto general en cuanto a uniformidad, acabado y ancho, así como la posible presencia de discontinuidades tales como porosidad, socavaduras y salpicaduras.

Evaluación macrográfica: Se realiza la evaluación macrográfica de las secciones transversales de los cordones depositados para determinar la penetración del material de aporte y las características geométricas del refuerzo de la cara. La técnica consiste en obtener una muestra del corte transversal de los cordones, luego desbastar la superficie y sumergirla en un reactivo adecuado para lograr mediante ataque electrolítico, el contraste entre la zona fundida y el material base. El desbaste inicial se realiza con la siguiente secuencia de lijas: 80, 180 y 240. El procedimiento de ataque es inmersión de la superficie a estudiar en una solución de ácido oxálico con una concentración de 10 gr en 100 ml de agua destilada aplicando un voltaje de 6V durante 15 s a las probetas correspondientes a los cordones depositados con el proceso SMAW. Con el estudio cualitativo anterior y tomando en cuenta las características óptimas en cuanto a aspecto superficial y penetración, es posible establecer entonces la combinación de parámetros más adecuada para el proceso de soldadura aplicado que posteriormente se utilizaran para fabricar los cupones definitivos.

Fase III: Analizar las juntas soldadas con pruebas no destructivas (inspección visual y radiografía industrial) y destructivas (ensayo de tracción, doblaje, ensayo de dureza y análisis metalográfico) para determinar las características mecánicas de las juntas soldadas mediante el proceso SMAW entre los aceros ASTM A36 y AISI 304.

Esta fase radica principalmente en el estudio de las propiedades mecánicas de las juntas soldadas por el proceso SMAW, mediante la aplicación de pruebas no destructivas y destructivas. La inspección visual, con esta técnica se comprueba el aspecto superficial e integridad de la soldadura, además de detectarse los diferentes defectos como: grietas, socavaduras, exceso o falta de penetración, salpicaduras, falta de continuidad en el cordón, poros o fisuras en frío. La radiografía industrial se basa en la capacidad de penetración que caracteriza a los Rayos X y a los Rayos Gamma para determinar la presencia de discontinuidades internas y externas en el material, tales como poros, grietas, falta de fusión, impurezas, gases atrapados que no se distinguen a simple vista. En el ensayo de tracción se determina la resistencia de la junta soldada, obteniendo la curva Esfuerzo vs Deformación y datos como el

módulo de Young, límite de rotura, límite de proporcionalidad, límite de fluencia y la estricción. En el ensayo de doblez se utiliza para medir la capacidad de deformación de la soldadura en una probeta al flexionarla alrededor de un punzón. El ensayo de dureza consiste en determinar la dureza forzando la indentación de un penetrador en la superficie de la junta. El análisis metalográfico que estudia las características estructurales como el tamaño de grano, distribución de las fases que componen la aleación, inclusiones no metálicas como sopladuras, micro cavidades de contracción o escorias.

i) Fabricación de cupones definitivos

Una vez seleccionado los parámetros de soldadura a ser utilizados en el procedimiento de soldadura, se procede a ejecutar los mismos para luego hacer los análisis comparativos correspondientes. La unión fue realizada a tope con dos láminas de aceros disímiles de 4 mm de espesor, 150 mm de ancho y 320 mm de largo: acero inoxidable austenítico AISI 304 y acero estructural ASTM A 36. El material de aporte consiste de electrodos revestidos AWS E309L-16, de 2.5 mm de diámetro y 25 cm de largo. La soldadura debe ser manual en posición plana (1G) aplicando un pase y utilizando un procedimiento de punteo y de sujeción mediante sargentos y pletinas para minimizar la distorsión del conjunto y desplazamientos accidentales del mismo durante la deposición de los cordones. Las placas fueron punteadas como requisito para mantener la abertura de raíz constante en toda su longitud.

ii) Evaluación de cupones soldados

Una vez soldados los cupones definitivos, se procede a su inspección por medio de ensayos no destructivos y por ensayos destructivos respectivamente.

a. Ensayos no destructivos

Los métodos de ensayos no destructivos utilizado en la presente investigación, se limitarán únicamente a la inspección visual y la radiografía.

Inspección Visual: Se realiza antes, durante y después de la ejecución de la soldadura; tomándose en cuenta la limpieza de los materiales base, dimensiones de la junta, posible desalineamiento, configuración de las variables eléctricas de la fuente, velocidad de avance, técnica de soldadura (orientación e inclinación del

electrodo, oscilación, etc.) así como forma del cordón, acabado superficial, ancho, altura de refuerzo de cara y posibles defectos (poros, socavaduras, faltas de fusión y de penetración, inclusiones de escoria y grietas) que pudieron generarse durante la soldadura.

b. Radiografía industrial: Para la evaluación radiográfica se trabaja con un gráfico que relaciona el espesor del cordón de soldadura, el voltaje (Kv) y la intensidad de corriente por tiempo (mA*min), a partir del cual se determina el tiempo de exposición y la intensidad de corriente necesaria para realizar la radiografía.

iii) Ensayos destructivos

Finalizada la etapa de inspección no destructiva se realizarán cortes transversales sobre los cupones de prueba fabricados con el proceso de soldadura, para obtener las probetas correspondientes a cada uno de los ensayos destructivos especificados según el diagrama QW-463.1(a) de la Sección IX del Código ASME. Adicionalmente se realiza la evaluación metalográfica.

1) Análisis químico

Para establecer el porcentaje en peso de los elementos presentes en los cordones de soldadura obtenidos mediante el proceso SMAW se procede a realizar el análisis químico empleando los métodos de Espectroscopia de Absorción Atómica mediante un procedimiento similar al descrito anteriormente para el material base. Sin embargo, las virutas para este análisis fueron extraídas de la zona correspondiente al eje longitudinal del cordón para minimizar la posible influencia de la dilución con los materiales base en los resultados de cada elemento.

2) Análisis metalográfico

Luego de soldados los cupones, se procede a realizar cortes transversales para exponer la penetración de la soldadura en las piezas de trabajo; tal y como lo recomienda el código ASME sección IX QW-196.1.1 y QW-462.7.3. El procedimiento utilizado en la preparación de las probetas para evaluación macrográfica fue similar al utilizado en la evaluación de las probetas de cordón sobre chapa plana, mientras que el utilizado en la evaluación micrográfica fue igual al descrito anteriormente para el análisis del material base. Sin embargo, debido a la naturaleza disímil de ambos miembros de la junta es necesario utilizar dos

ataques diferentes: Primero Nital al 2% para revelar la microestructura del acero al carbono y segundo ataque electrolítico en ácido oxálico al 10% en agua destilada, para observar la estructura del acero inoxidable. De no realizar los ataques en el orden mencionado la estructura de acero al carbono ASTM A36 es sobre atacada químicamente y no será apreciable visualmente.

3) Análisis de ferrita

De los cordones de soldadura se tomarán muestras en forma de virutas para determinar y cuantificar los elementos presentes y así poder estimar, por medio de los diagramas de ferrita, la cantidad de ferrita. Con este valor es posible predecir las fases presentes en la microestructura, así como las propiedades generales del cordón. El contenido de ferrita se estima por medio del método químico, el consiste en conocer la composición de los metales base y de los aportes y la dilución entre ellos se utiliza el procedimiento especificado por la “American Welding Society” para aplicaciones de soldadura disímil, con el fin de predecir y estimar el número ferrítico del cordón por medio del diagrama de Schaeffler.

Para la estimación de ferrita de los cordones resultantes de las soldaduras por el método químico fue necesario conocer los porcentajes de dilución, los cuales indicaron la magnitud que se produjo de la unión de los metales fundidos, utilizando el analizador gráfico Digital Micrograph con las imágenes macrográficas de los cordones realizados por el proceso SMAW. Con la imagen macrográfica se procede a realizar una copia, la cual es convertida a 16 colores y finalmente analizada. Arroja valores relativos de píxeles dependiendo de los colores asignados.

Conociendo la composición química de los materiales base y los aportes, se calculan los valores correspondientes de Cr_{eq} y Ni_{eq} , que son graficados en el diagrama de Schaeffler, luego con la dilución se grafica el punto intermedio “X” (respetando la proporcionalidad de dilución entre ellos) entre los materiales base que se une con el punto generado por el material de aporte. Posteriormente, en esta línea se ubica el punto final, que viene determinado por la dilución del material de aporte llamado punto “Y”. Con este punto se determina el número ferrítico, ya que sobre esa zona debería ser atravesada por líneas con porcentajes de ferrita específicos.

4) Ensayo de microdureza

La determinación de la dureza se realiza con el objetivo de establecer el efecto de los parámetros de soldadura empleados durante la fabricación de los cupones en dicha propiedad, así como relacionar los resultados con las microestructuras presentes. Para este ensayo se utilizarán las mismas probetas de análisis metalográfico.

Por cada muestra soldadura se realizarán dos barridos paralelos entre sí a lo largo de la superficie de la sección transversal de la junta de manera tal de incluir en cada barrido las distintas zonas de la junta:

- Material base 1 (MB 1)
- Zona afectada por el calor 1 (ZAC 1)
- Zona de fusión (ZF)
- Zona afectada por el calor 2 (ZAC 2)
- Material base 2 (MB 2)

En cada barrido se realizarán 8 mediciones con una separación aproximada de 2 mm.

5) Ensayo de doblado.

Mediante el ensayo de doblez se evalúa cualitativamente la ductilidad de la junta soldada, por consiguiente, sólo se les aplicará a las juntas soldadas y no a los materiales base. Este ensayo sirve para obtener una idea aproximada sobre el comportamiento del acero a la flexión o esfuerzo de doblado. Se comienza el ensayo, colocando la pieza sobre dos apoyos, cuya separación está normalizada. Se aplica luego, una fuerza controlada y que aumenta paulatinamente hasta que la probeta se dobla completamente o comienzan a aparecer las primeras grietas. El ensayo se utiliza para medir la capacidad de deformación de la soldadura su una probeta al flexionarla alrededor de un punzón, ocasionalmente se toma el alargamiento de la fibra exterior para evaluar la capacidad de deformación.

El diseño de las probetas para el ensayo de doblado se realiza según la norma ASME sección 9 QW – 462.3.

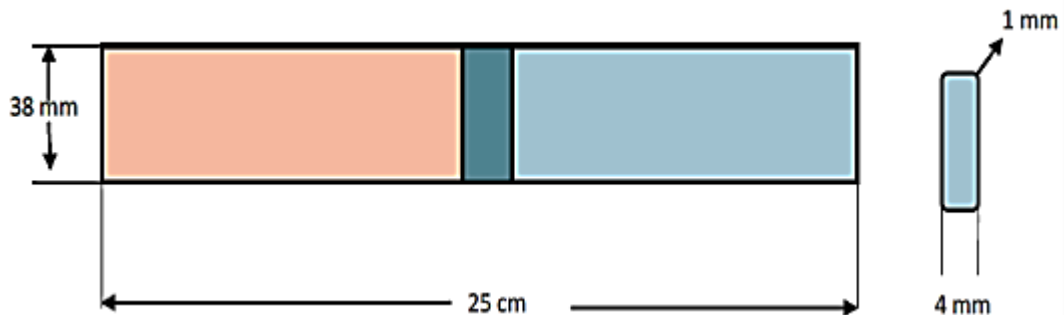


Figura 34: Probeta de doblez según QW-462.3 (a) del Código ASME Sección IX

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Las probetas serán maquinadas a partir de tiras rectangulares de 380x40 mm hasta obtener la geometría especificada. Así mismo, los bordes se conformarán redondeados para evitar que actúen como concentradores de esfuerzos; así mismo, los refuerzos de la soldadura, tanto de cara como de raíz, fueron eliminados mecánicamente con el uso de una fresadora y finalmente se aplicó desbaste por medio de lijas 80 y 120 para obtener una superficie lisa. Se evaluaron tres probetas, dos de doblez de cara y uno de doblez de raíz.

6) Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realiza para determinar propiedades específicas de la junta, tales como: resistencia máxima a la tracción, punto de fluencia, etc. Las probetas fueron seccionadas a partir de los cupones de soldadura correspondientes a cada tipo de proceso utilizado. A diferencia los metales bases, para este ensayo de las juntas soldadas se utilizará la norma ASTM E8/E8M y el mismo se llevará a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, utilizando la Máquina para ensayo de tracción FRANK (Figura 26).

Las probetas se mecanizan según la norma E8 de la ASTM, tomando en cuenta que el espesor del material base es de 4 mm se considera la pieza como “sub espécimen”. Para el caso de estudio es necesario permanecer en la zona elástica del material, se debe calcular la carga máxima que se utilizará en la máquina de tracción, también se utiliza la mínima velocidad que permite el equipo que es de 2 mm/min.



Figura 35: Probeta en la Maquina de Ensayos de Tracción
Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Fase IV: Establecer las diferencias que se pueden obtener con las juntas soldadas a diferentes condiciones de soldadura.

En esta fase se evaluarán las juntas soldadas diferenciando las características que presentan según las condiciones de soldeo a las que fueron sometidas, para así determinar cómo varían las propiedades y características de las juntas según estos parámetros establecidos durante la realización de la soldadura.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Caracterizar los aceros ASTM A 36 y AISI 304 por medio de las propiedades mecánicas derivadas del ensayo de tracción, metalografía y composición química.

A continuación, se describen los diversos resultados respecto a la composición química, forma de la microestructura, propiedades mecánicas a tracción que presentaron el acero inoxidable AISI 304 y el acero estructural ASTM A-36, en su condición inicial; es decir en la condición en que fue suministrado inicialmente. También se analiza la composición del depósito del cordón de soldadura.

4.1.1. Caracterización metalográfica.

Para estudiar el efecto de las variables del proceso de soldadura es necesario caracterizar perfectamente las aleaciones a unir, por lo tanto, para el caso del acero inoxidable AISI 304 y el acero estructural ASTM A-36 se analizó su metalografía. El ataque al cual fueron sometidas ambas aleaciones, fue una solución de 10 gr de ácido oxálico ($C_2H_2O_4$) en 100 ml de agua destilada (H_2O) para el acero inoxidable AISI 304 y para el acero ASTM A-36 se utilizó Nital al 2% por un tiempo de 22 segundos. A continuación, se presenta la microestructura del acero inoxidable AISI 304.

El estudio metalográfico requiere un procedimiento para establecer las fases presentes en la muestra, así como evaluar su distribución. Para esto, se secciona con un disco abrasivo una pequeña muestra de cada material base para proceder a su preparación metalográfica de acuerdo a las siguientes etapas:

- 1) Desbaste grueso: Éste se realiza lijando la pieza de forma manual con una lija N° 80 para nivelar la superficie y eliminar la rugosidad producida por el corte con el disco.
- 2) Desbaste intermedio: Se realiza progresivamente con la siguiente secuencia de lijas: 120, 320 y 400. Se realiza manualmente en una sola dirección y

sentido con una lija, y cuando los surcos visibles en la superficie estén en una sola dirección, se rota la pieza 90 grados y se procede con la siguiente lija de la secuencia, obteniéndose de esta forma una superficie de rugosidad menor en cada etapa.

- 3) Desbaste fino: Se llevará a cabo siguiendo la metodología descrita anteriormente, pero con una secuencia de lijas de menor tamaño de grano: 600, 800 y 1200; logrando una superficie aún más lisa que la obtenida en la etapa anterior para luego proceder con el pulido.
- 4) Pulido: Se efectúa con la pulidora metalográfica a velocidad moderada utilizando la siguiente secuencia: paño rojo y solución de alúmina de $1\mu\text{m}$ en un solo sentido, paño verde con solución de alúmina de $0,3\mu\text{m}$ en dirección perpendicular al pulido anterior, paño blanco y solución de alúmina de $0,05\mu\text{m}$ en dirección perpendicular a la anterior, logrando así una superficie totalmente especular y libre de rayas. La figura 36 muestra los discos de pulido utilizados en esta etapa.



Figura 36: Banco de pulido

Fuente: Laboratorio de Materiales Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad de Carabobo (2021)

- 5) Ataque: Se realizará un ataque específico para cada material base. Para el acero inoxidable austenítico se utilizará una solución de 10 gr de ácido oxálico ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) en 100 ml de agua destilada (H_2O). Las probetas fueron conectadas al polo positivo de la fuente o ánodo, y se utilizó como cátodo un plato de acero inoxidable, el cual contenía la solución de Acido Oxálico

en las proporciones anteriormente descritas. Utilizando una tensión de 6 voltios, y una separación de 25 mm entre la probeta y el plato de acero inoxidable, se procedió a sumergir cada probeta en dicha solución durante un tiempo de 60 segundos después de los cuales se reveló la microestructura general. Para el microataque del acero al carbono se preparó una solución de Nital al 2% (2 cc ácido nítrico en 98 cc de alcohol isopropílico) y se aplica con una gasa sobre la superficie pulida para revelar la microestructura presente. Finalmente, se procede a observar en el microscopio las superficies sometidas al proceso de ataque. La figura 37 muestra la orientación de las micrografías estudiadas y en la figura 38 se aprecia el equipo a utilizar.

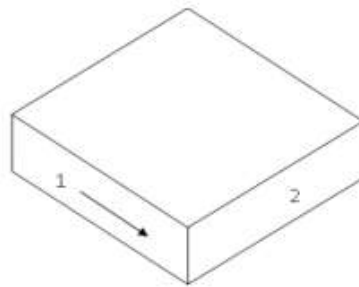


Figura 37: Superficies estudiadas en las probetas metalográficas.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)



Figura 38: Microscopio.

Fuente: Laboratorio de Materiales Escuela Ingeniería Mecánica Universidad de Carabobo (2.021)

La figura 39 muestra al acero inoxidable austenítico el cual presenta pequeñas cantidades de ferrita, debido a que durante la solidificación y bajo condiciones normales de fabricación, esto es, a velocidades de enfriamiento relativamente elevadas, ocurre la retención de ferrita de alta temperatura (denominada ferrita delta). Esta fase se observa como zonas claras entre los granos de austenita, la cual se aprecia como zonas oscuras.

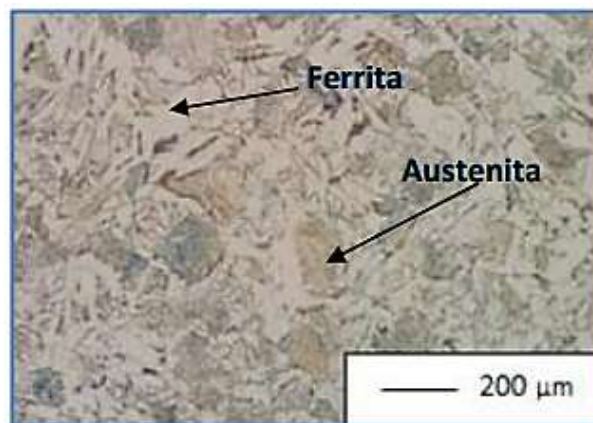


Figura 39: Microestructura del acero inoxidable AISI 304.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

En la figura 40 se pueden apreciar para el acero estructural ASTM A-36 dos fases dominantes de diferente color y forma, la fase ferrita es la que se encuentra alrededor de la fase perlita y tiene un color más claro que la fase perlita.

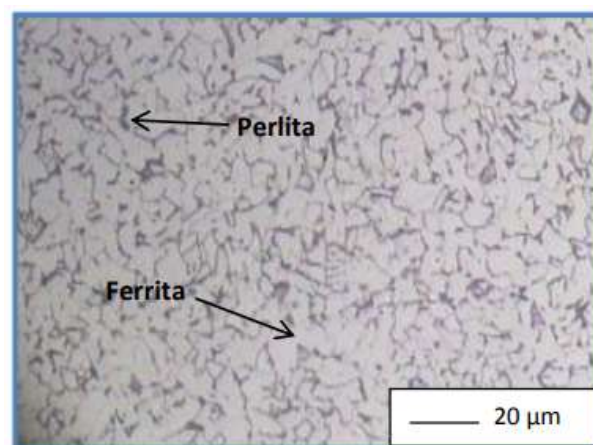


Figura 40: Microestructura del acero ASTM A-36.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

4.1.2. Caracterización química de los metales bases y de aportación

La realización de este ensayo se logró a través de la Empresa Suministros e Instalaciones Carabobo Fábrica de Niples en el espectrofotómetro Marca Drawell modelo XRF. (Ver Anexo B). Las probetas pasaron por un proceso de desbaste y posteriormente se efectuó el ensayo de espectroscopia por chispa, resultando el porcentaje de cada elemento de los aceros estudiados. La tabla 1 muestra los resultados obtenidos para el acero ASTM A-36 mientras que la tabla 2 muestra los resultados para el acero inoxidable AISI 304. La caracterización química de los materiales se realizó por el método de Espectroscopia de Absorción Atómica y así determinar los porcentajes en peso de los siguientes elementos: silicio (Si), manganeso (Mn), níquel (Ni), cromo (Cr), molibdeno (Mo), cobre (Cu), fósforo (P), carbono (C) y azufre (S). Para realizar este análisis se extrajeron aproximadamente 15 gr de virutas de los materiales base y aporte por medio de un taladro de mesa. Las virutas requeridas para el análisis de los materiales base (AISI 304 y ASTM A36) se extrajeron de secciones de cada uno de ellos; mientras que la correspondiente al material de aporte AWS E309L-16 se extrajo el cupón estandarizado para análisis químico según las normas ANSI/AWS “A5.4, Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding.

Este cupón consiste en una serie de capas de cordones contiguos para obtener muestras de metal de soldadura sin dilución con el metal base, tal y como se muestra en la figura 41. Los cordones se depositaron sobre secciones limpias de acero al carbono, en posición plana, con valores de corriente en el intervalo especificado por el fabricante del material. En el depósito para el proceso SMAW se removerá cuidadosamente la escoria entre cada pase.



Figura 41: Cupón para análisis químico del depósito de soldadura.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Tabla 1: Composición química del acero estructural A-36

C	Mn	Si	Mo	S	Fe
0,201	0,452	0,077	0,034	0,008	Bal

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Tabla 2: Composición química del inoxidable AISI 304

C	Cr	Ni	Mo	S	Mn	Fe
0,042	17,928	8,055	0,3101	0,004	1,647	Bal

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Como se puede observar, los valores obtenidos por medio del ensayo en el espectrofotómetro Drawell son muy similares a los valores de referencia respectivamente, según los estándares para estos materiales; por lo que se puede asegurar que los materiales utilizados en este estudio si se corresponden al acero estructural ASTM A-36 y el acero inoxidable AISI 304.

También se le realizó el análisis químico al material de aporte el cual fue el E 309 L-16 para el proceso SMAW, q fue utilizado para soldar dichos materiales. La tabla 3 muestra la composición química encontrada.

Tabla 3: Composición química del material de aporte E 309 L-16

C	Cr	Ni	Mo	Mn	P	S	Cu
0,02	23,41	12,66	0,310	1,100	0,035	0,020	0,200

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

4.1.3. Determinación del contenido de ferrita.

Para el acero inoxidable AISI 304, es importante determinar el contenido de ferrita presente ya que durante el proceso de enfriamiento de un acero inoxidable austenítico, parte de la ferrita presente a elevadas temperaturas queda retenida en la matriz austenítica. Según Lefebvre (1.993), un contenido de ferrita entre 5 y 15% en el metal base permite evitar el agrietamiento en caliente, mejorar las características mecánicas y disminuir la susceptibilidad a la corrosión frente a ácidos oxidantes a alta temperatura, así como la formación de la fase sigma.

Debido a la importancia de la fase ferrítica durante la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos y en el comportamiento en servicio de la junta, se determinó el contenido de ferrita en el material base AISI 304 y para ambos materiales de aporte por el método químico. Existe un segundo método el cual es el metalográfico, pero que en este trabajo se tuvo grandes limitaciones para poder efectuarlos. El método químico consiste en que a partir de los porcentajes en peso de los elementos aleantes obtenidos mediante el análisis de la composición química del material base AISI 304 y del material de aporte, se graficaran en el diagrama de Schaeffler los valores calculados del cromo y níquel equivalente, Cr_{eq} y Ni_{eq} respectivamente, utilizando las relaciones matemáticas apropiadas, descritas en el Capítulo 2. A partir del cálculo de estos dos valores, se hace uso del diagrama de Schaeffler y se puede conocer el porcentaje de ferrita en el acero AISI 304.

Conociendo el porcentaje en peso de los elementos que conforman el acero inoxidable AISI 304, ya determinado en el estudio del análisis químico de los materiales base, y aplicando el diagrama de Schaeffler se determinó el valor del número ferrítico y el porcentaje de ferrita por medio del cálculo del Cr_{eq} y Ni_{eq} , aplicando las ecuaciones 1 y 2 correspondientes, ya mencionadas en el Capítulo II. La tabla 4 muestra los valores del cromo equivalente y níquel equivalente, obtenidos para el acero AISI 304.

Tabla 4: Cromo equivalente y níquel equivalente para el acero AISI 304 en estudio.

$Cr_{equivalente}$	18,93
$Ni_{equivalente}$	10,20

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Con estos valores, se entra en el diagrama de Schaeffler mostrado en la figura 41, proporcionado por ACERIND S.C. (2000) y se determina el porcentaje de ferrita para el acero AISI 304 en estudio.

Del diagrama, se aprecia que el contenido de ferrita está en el orden de 7,5%, lo cual está dentro del rango aceptable según Lefebvre (1.993).

4.1.4. Determinación del carbono equivalente.

Con el objeto de evaluar el posible efecto negativo del carbono y otros aleantes sobre la soldabilidad del acero ASTM A36, se procedió a calcular el carbono equivalente (CE) mediante la aplicación de una relación matemática y sustituyendo los valores de la composición química obtenidos anteriormente. El valor resultante es un indicador de la soldabilidad.

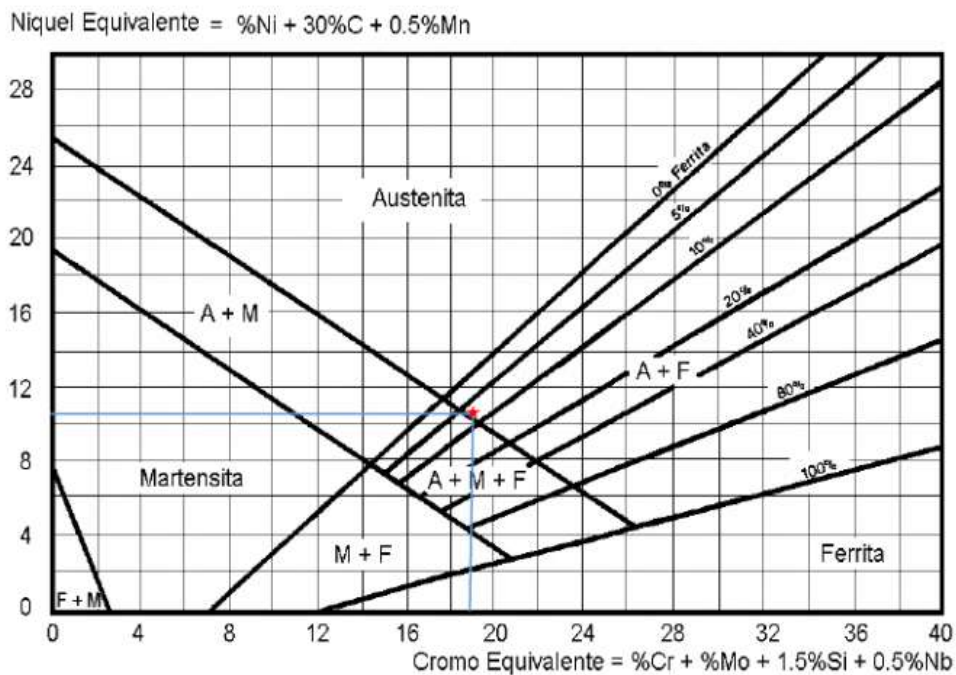


Figura 42: Determinación del contenido de ferrita por medio del diagrama de Schaeffler.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

La Ec. 5 vista en el Capítulo II, se encuentra especificada en el Código ASME, Sección IX QW- 403.26.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Utilizando la ecuación anterior, se obtuvo el valor del carbono equivalente para el acero ASTM A36 que resulto ser de 0,284. El carbono equivalente es un indicador importante de la soldabilidad ya que permite establecer la posibilidad de formación de martensita en la zona afectada por el calor de los aceros al carbono. El carbono es el principal elemento que evidencia esta propiedad y otros elementos aleantes contribuyen en cierto grado, la fórmula anterior representa la relación empírica más aceptable entre los elementos que conforman el acero a estudiar. Según el Handbook de la AWS. (2.001), generalmente los aceros con bajo nivel de carbono equivalente, entre 0,2 y 0,3, tienen excelente soldabilidad y la susceptibilidad de agrietamiento debajo del cordón por hidrógeno aumenta cuando el carbono equivalente excede 0,4; entonces se puede afirmar que el acero estructural ASTM A36 estudiado posee una excelente soldabilidad, con un valor de carbono equivalente igual a 0,284. Esto permite descartar la necesidad de incluir precalentamiento o tratamiento térmico postsoldadura de dicho material.

4.1.5. Determinación de la dureza de los metales bases.

El valor de la dureza del acero estructural ASTM A36 y el acero inoxidable AISI 304 fue medido por medio del ensayo Rockwell B, el cual se llevó a cabo de acuerdo al procedimiento y características técnicas descritas en la norma ASTM A370, GERDAU A. (2.000). Para la realización de dicha prueba, se tomó una probeta longitudinal de cada material base, en las que se hicieron 8 mediciones en la superficie transversal al sentido de laminación. El equipo utilizado en este ensayo fue un durómetro marca Wilson/Rockwell, mostrado en la figura 43.

Los valores obtenidos en los ensayos de dureza Rockwell B (HRB) realizados a los aceros ASTM A36 y AISI 304 se presentan en la tabla 5. En la tabla son mostrados los resultados de cada medición junto con el valor del promedio de la dureza HRB.

La dureza es una propiedad característica del material, viene representada por la resistencia a ser penetrados por indentadores específicos según el tipo de dureza a estudiar, en este caso, un indentador esférico para la de tipo Rockwell B. Este estudio es usado principalmente para la apreciación relativa luego de algún proceso aplicado al

material, como pueden ser tratamientos superficiales o tratamientos térmicos. Los resultados obtenidos muestran que el valor promedio de dureza Rockwell B de los aceros ASTM A36 y AISI 304 está dentro del intervalo establecido para cada uno de estos materiales.

Tabla 5: Dureza Rockwell B (HRB) para los materiales en estudio

Dureza Rockwell B (HRB)									
Medición	1	2	3	4	5	6	7	8	Promedio
AISI 304	85	86	89	89	87	87	86	88	87,13
ASTM A36	71	72	71	73	72	69	68	71	70,88

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)



Figura 43: Durómetro Wilson/Rockwell.

Fuente: Laboratorio de Materiales Escuela de Ingeniería Mecánica Universidad de Carabobo. (2021)

4.1.6. Determinación de las propiedades mecánicas por tracción.

Preparación de probetas para tracción.

Las probetas fueron cortadas y maquinadas de acuerdo al diseño establecido en la norma ASTM A-370 (Ver Apéndice A₁) como la mostrada en la Figura 44. Se ensayaron tres probetas para cada uno de los materiales.

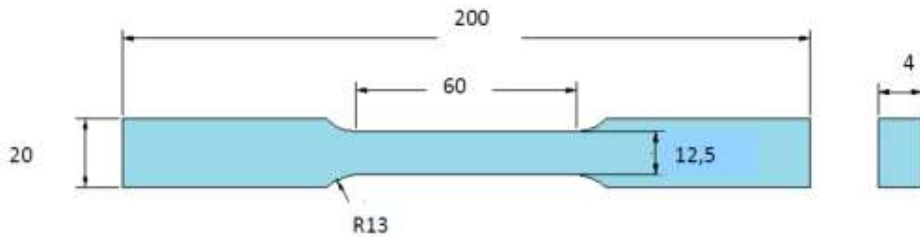


Figura 44: Esquema de las probetas de tracción.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Las probetas serán traccionadas en la máquina de ensayos universales para ensayo de tracción marca FRANK del Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. En la Figura 26 (Capítulo II) se muestra la máquina empleada para la realización de dicho ensayo. Determinando la curva característica Esfuerzo vs Deformación, mediante la obtención y registro de los datos de fuerza aplicada y elongación, respectivamente, hasta que ocurrió la fractura de las muestras.

Se observó que las curvas generadas en este ensayo para ambos aceros presentaron el comportamiento típico las aleaciones estudiadas, delimitándose claramente las zonas elásticas y plásticas. La Tabla 6 muestra los valores obtenidos en el ensayo de tracción para ambos aceros y las figuras 45 y 46 muestran las curvas esfuerzo deformación características, obtenidas para ambos aceros.

Tabla 6: Valores de esfuerzos y deformaciones obtenidos para cada acero ensayado.

Material	Probeta	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	S_y (Fluencia) (MPa)	Deformación (%)
AISI 304	1	660,52	320	52
	2	666,40	330	51
	3	678,16	345	51
	Promedio	668,36	331,67	51,3
ASTM A-36	1	446,88	270	52

	2	439,04	276	51
	3	441,01	265	52
	Promedio	442,30	264,33	51,6

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

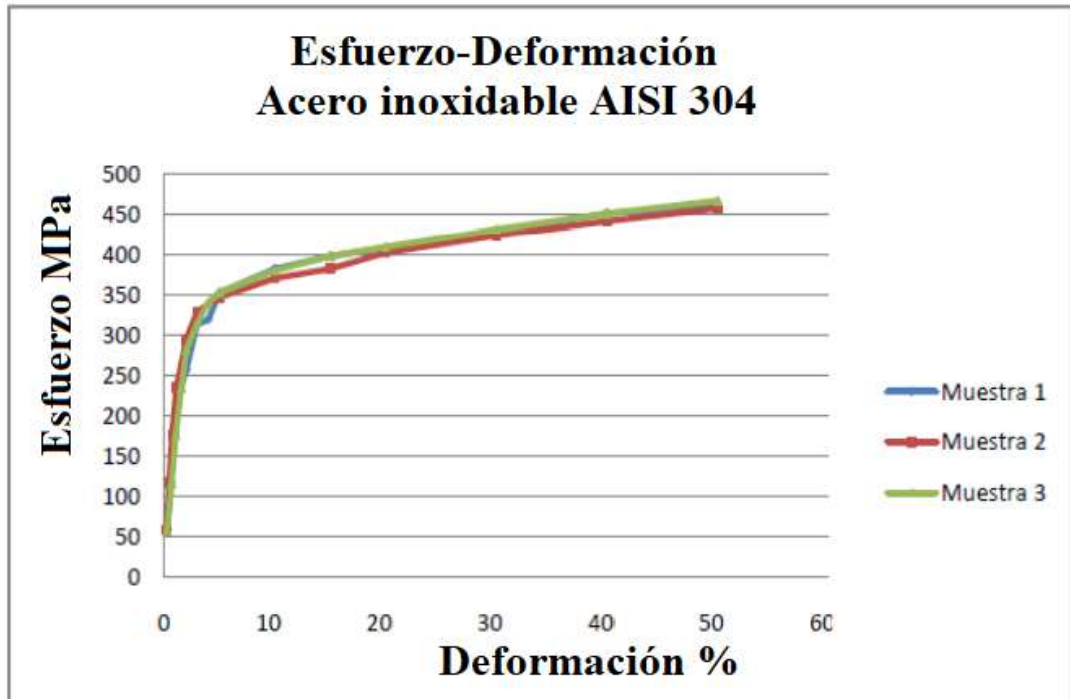


Gráfico 1: Curva esfuerzo vs deformación para el acero AISI 304

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

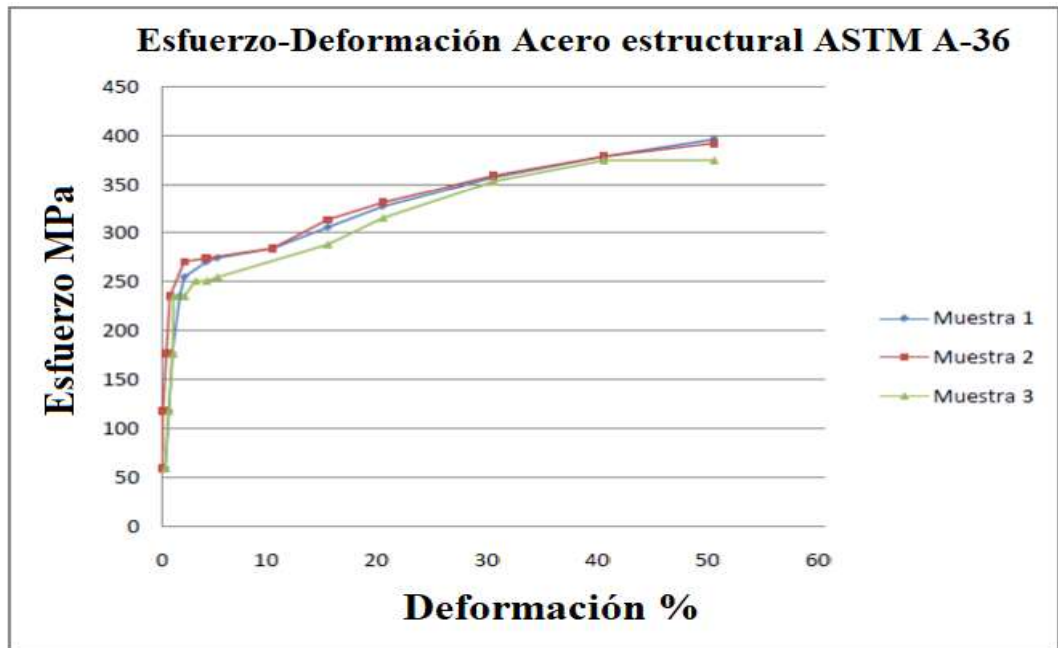


Gráfico 2: Curva esfuerzo vs deformación para el acero ASTM A-36

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

En los gráficos esfuerzo – deformación los valores de esfuerzo de rotura no aparecen reflejados, ya que en el momento de la ejecución del ensayo el extensómetro fue retirado antes de la fractura para evitar su posible daño, de esta manera los gráficos resultan parciales pero suficientes para evidenciar el esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo.

4.2 Definir las variables de soldadura a utilizar en el proceso SMAW, seleccionando las condiciones de soldadura, sustentadas en pruebas pilotos o cupones de prueba.

4.2.1 Diseño de las juntas soldadas

El tipo de junta seleccionado fue a tope con penetración completa, sin embargo, como el espesor de ambas láminas era de 4 mm, se utilizó la preparación de bordes con ranura cuadrada simple con apertura de raíz igual al diámetro del aporte 2,50 mm con el propósito de obtener cordones con penetración completa y fusión adecuada de ambas caras de los materiales base. Para el diseño de la junta se tomaron en cuenta dos factores principales: el proceso de soldadura a utilizar y el espesor de las piezas. El diseño de junta seleccionado se realizó tomando como factor determinante la cantidad de dilución esperada entre ambos materiales base con el material de aporte. Las caras de las juntas fueron seccionadas con cizalla para evitar posibles alteraciones de la microestructura

original de los materiales base por efecto térmico. Se realizó adicionalmente una limpieza superficial con un cepillo de cerdas de alambre para eliminar cualquier residuo de óxido o elemento ajeno al proceso que pudiese interferir en la coalescencia de los materiales a unir.

4.2.2 Pruebas pilotos de soldadura para determinar los parámetros de soldadura.

A partir de revisión bibliográfica para el proceso SMAW según el diámetro del electrodo se tomaron en cuenta los valores de los parámetros de operatividad recomendados por el fabricante del electrodo revestido. Los rangos de las pruebas pilotos que se tomaron en consideración se muestran en la tabla 7.

Tabla 7: Parámetros de soldadura para las pruebas piloto

Proceso	Corriente (Amp)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (mm/s)
SMAW	60-70-80	23-26-27	Aprox 1,3

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Para la fabricación de los cupones con el proceso de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) el sistema está conformado por un Generador marca AIRCO (Figura 45), que proporciona el amperaje y el voltaje requerido para establecer el circuito eléctrico; porta electrodos, como su nombre lo indica es el componente que soporta el electrodo revestido y de forma manual establece y mantiene el arco eléctrico entre el electrodo y el material base. La soldadura de los cordones se realizó utilizando los conjuntos preliminares de variables seleccionadas en la etapa anterior, estos cordones se realizaron sobre unas chapas de acero.



Figura 45: Equipo de soldadura SMAW

Fuente: Autoservicio Saviano, SRL. (2015)

Con los valores definitivos de los parámetros para el proceso se procedió a calcular los valores de energía aportada.

Energía de aportación es la energía bruta aportada en el proceso, la cual se determina por la siguiente expresión.

$$EBA = U \cdot I \cdot 60 / v.$$

En donde: U es la tensión de la corriente de soldeo en voltios, I es la intensidad de corriente de soldeo en amperios y v es la velocidad de avance de la soldadura, en cm/min.

La energía neta aportada se determina por la expresión

$$ENA = \rho \cdot EBA$$

Siendo ENA la energía neta aportada y ρ el rendimiento del proceso (SMAW = 0.75). Con los valores antes mencionados se procedió a establecer las configuraciones de cada uno de los procedimientos utilizados para la fabricación de los cordones de prueba. La tabla 8 muestra los valores de la energía bruta aportada y la energía neta aportada para el proceso SWAW, con los parámetros iniciales seleccionados.

Tabla 8: Parámetros iniciales, EBA y ENA para el proceso SMAW

Condición	Corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (mm/min)	EBA (KJ/mm)	ENA (KJ/mm)
S1	60	23	66	1,25	0,94
S2	70	26	78	1,4	1,05
S3	80	27	84	1,54	1,16

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

4.2.3 Realización de los cordones preliminares.

Una vez establecidos los parámetros preliminares de soldadura, se procedió a realizar los depósitos con dichos parámetros para su posterior observación y análisis. La figura 46 muestra los diferentes cordones realizados por el proceso SMAW, según las condiciones preliminares establecidas.

4.2.3.1 Inspección visual

En los cordones soldados no se observaron salpicaduras, agrietamientos, socavaduras o porosidades que pudieran afectar la aceptabilidad de los mismo; tal y como se evidencia en las figura 46. A partir del análisis del aspecto superficial de los cordones depositados se desprende que la cantidad de calor aportado durante la soldadura, a través de la variación del amperaje y el voltaje, puede considerarse como el factor principal que influyó en los resultados; ya que el cordón más ancho y con altura de refuerzo de cara mayor corresponde al cordón S3 (debido a que se utilizó como parámetros 80 Amperios y 27 Voltios, lo que implica una mayor dilución del material, además que favorece a una buena penetración y minimiza las inclusiones y discontinuidades del cordón), mientras que los realizados con menor aporte de energía calórica evidenciaron un ancho menor y una altura de refuerzo de cara mayor como se observa en los cordones S1 y S2.



Figura 46: Depósitos de soldadura realizados con las condiciones del proceso SMAW

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

4.2.3.2 Evaluación macrográfica

Se realizó la evaluación macrográfica de las secciones transversales de cada uno de los cordones depositados para determinar la penetración del material de aporte y las características geométricas del refuerzo de la cara. La técnica consistió en obtener una muestra del corte transversal de los cordones, luego desbastar la superficie y sumergirla en un reactivo adecuado para lograr mediante ataque electrolítico, el contraste entre la zona fundida y el material base. La figura 47 muestra el seccionamiento del cordón de soldadura con electrodo revestido SMAW.

El desbaste inicial se realizó con la siguiente secuencia de lijas: 80, 180 y 240. El procedimiento de ataque fue inmersión de la superficie a estudiar en una solución de ácido oxálico con una concentración de 10 gr en 100 ml de agua destilada aplicando un voltaje de 6V durante 15 s a las probetas correspondientes a los cordones depositados con el proceso SMAW. Con el estudio cualitativo anterior y tomando en cuenta las características óptimas en cuanto a aspecto superficial y penetración, fue posible establecer entonces la combinación de parámetros más adecuada para el proceso SMAW aplicados que posteriormente se utilizaron para fabricar los cupones definitivos.



Figura 47: Corte de los cordones de soldadura para inspección SMAW
Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

4.2.4 Fabricación de cupones definitivos

Una vez seleccionado los parámetros de soldadura a ser utilizados en el procedimiento de soldadura, se procedió a ejecutar los mismos para luego hacer los análisis comparativos correspondientes. La unión fue realizada a tope con dos láminas de aceros disímiles de 4 mm de espesor, 150 mm de ancho y 320 mm de largo: acero inoxidable austenítico AISI 304 y acero estructural ASTM A 36. El material de aporte fueron electrodos revestidos AWS E309L-16, de 2.5 mm de diámetro y 25 cm de largo. La soldadura fue manual en posición plana (1G) aplicando un pase y utilizando un procedimiento de punteo y fijación. Se empleó un sistema de sujeción mediante sargentos y pletinas para minimizar la distorsión del conjunto y desplazamientos accidentales del mismo durante la deposición de los cordones. Las placas fueron punteadas como requisito para mantener la abertura de raíz constante en toda su longitud, como se aprecia en la Figura 48.

Cabe destacar que durante la pasantía realizada por uno de los investigadores en la empresa NEGROVEN, se pudo observar una unión soldada entre ambos materiales de estudio, se trata de un intercambiador de calor cuyos tubos, de acero inoxidable AISI 304 se soldaron a la carcasa, de acero estructural ASTM A 36, es de hace 4 años y no ha presentado problemas, la unión puede verse en el anexo A.



Figura 48: Láminas de acero ASTM A36 y AISI 304, antes de soldar

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

4.3 Analizar las juntas soldadas con pruebas no destructivas (inspección visual y radiografía industrial) y destructivas (ensayo de tracción, dobléz, ensayo de dureza y análisis metalográfico) para determinar las características mecánicas de las juntas soldadas mediante el proceso SMAW entre los aceros ASTM A36 y AISI 304.

4.3.1 Inspección Visual

Se realizó antes, durante y después de la ejecución de la soldadura; tomándose en cuenta la limpieza de los materiales base, dimensiones de la junta, posible desalineamiento, configuración de las variables eléctricas de la fuente, velocidad de avance, técnica de soldadura (orientación e inclinación del electrodo, oscilación, etc.) así como forma del cordón, acabado superficial, ancho, altura de refuerzo de cara y posibles defectos (poros, socavaduras, faltas de fusión y de penetración, inclusiones de escoria y grietas) que pudieron generarse durante la soldadura.

Una vez fabricados los cupones, el objetivo fue identificar posibles discontinuidades como porosidades, faltas de penetración, socavaduras, grietas y salpicaduras entre otras ya que estas discontinuidades podrían considerarse defectos que actuarían reduciendo el área efectiva del material y/o como concentradores de

esfuerzos. Sin embargo, en la presente inspección visual no se detectaron discontinuidades, razón por la cual la junta se considera aceptable de acuerdo a los criterios de aceptación establecidos en el párrafo QW-194, de la Sección IX del Código ASME, (2.007). La figura 49 muestra la junta soldada realizada por el proceso SMAW con los parámetros definitivos seleccionados en la sección anterior.

4.3.2 Evaluación macroscópica de la junta.

En el análisis macroscópico se confirmaron los resultados de la inspección visual en cuanto al ancho del cordón y la altura del refuerzo de cara. Se pudo apreciar que los cordones con mayor aporte de energía calórica fueron más anchos y con menor altura. Según el AWS Welding Handbook, (2.001), la penetración de un cordón de soldadura depende principalmente de la cantidad de energía aportada, es decir, del amperaje, voltaje y velocidad de avance del electrodo.



Figura 49: Junta soldada definitiva para la evaluación, SMAW.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

La figura 50 muestra las macrografías de los cordones realizados por el proceso SMAW.

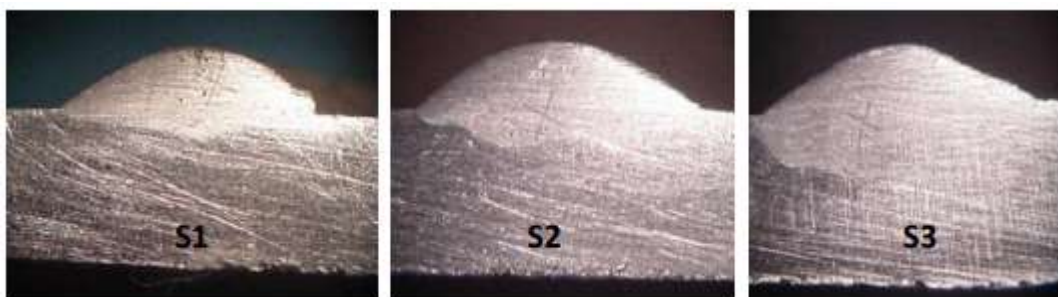


Figura 50: Macrografías para el proceso SMAW.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Como se puede observar, la condición S3, presenta una mejor penetración del cordón y un ancho mayor respecto a las condiciones S1 y S2, lo cual es consistente con el resultado de la inspección visual, en donde se indica que el mejor resultado se obtuvo para la condición S3 para el proceso SMAW.

4.3.3. Inspección por rayos X industrial.

Para la evaluación radiográfica se trabajó con un gráfico que relaciona el espesor del cordón de soldadura, el voltaje (Kv) y la intensidad de corriente por tiempo (mA*min), a partir del cual se determinó el tiempo de exposición y la intensidad de corriente necesaria para realizar la radiografía. La película se colocó dentro de una funda negra orientada a lo largo del cordón de soldadura. Se realizó la exposición y posteriormente se procedió a revelar la película empleando un procedimiento similar a un revelado fotográfico. La radiografía se analizó en un negatoscopio el cual posee una luz blanca de alta intensidad. Dicho equipo se muestra en la figura 51.

La película utilizada fue una película AGFA tipo D4 que se seleccionó según el espesor del cordón de soldadura en cada cupón de prueba. Posteriormente fue determinado el voltaje de trabajo, la intensidad de corriente y el tiempo de exposición de acuerdo con la recomendación del fabricante AGFA. Los valores establecidos se indican a continuación:

- Voltaje = 120 KV
- Tiempo de exposición = 7 min
- E = 14 mA.min Espesor = 6 mm
- Intensidad de corriente = 2 mA



Figura 51: Fuente de Rayos X.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

El tiempo seleccionado fue sobrestimado debido a que los controles que regulan el voltaje y la intensidad de corriente del equipo utilizado son analógicos, y con el objeto de prevenir deficiencias debidas a posible degradación de las propiedades originales de las películas utilizadas. La película radiográfica fue colocada dentro de una funda negra y esta fue colocada debajo del cupón de prueba a lo largo del cordón de soldadura a 70 cm de distancia de la cápsula desde donde se enfocan los rayos X. Una vez expuestas a la radiación, las películas fueron reveladas en un cuarto oscuro para evitar que al ser extraídas de la funda se velarán. Una vez que se ha sellado el sobre ya se puede encender la luz y se procede a identificar la lámina soldada con letras de plomo y un indicador patrón de espesor de grietas para luego ponerlo debajo de la plancha soldada de forma centrada. (Ver figura 52) (Ver figura 53):

1. Revelador: Las dos películas fueron sumergidas en una bandeja que contenía una solución agua-revelador, marca AGFA según la concentración descrita en el producto, dependiendo el tiempo de exposición del grado de concentración de la mezcla y especificado por el fabricante del producto revelador. El tiempo fue de aproximadamente 5 minutos.
2. Agua: Ambas películas fueron sumergidas simultáneamente en una bandeja con agua, con la finalidad de limpiarlas e inhibir la acción de la solución reveladora durante 30s aproximadamente.

3. Fijador: Una vez limpias, las películas se sometieron a la etapa de fijado. En esta etapa se empleó una solución agua-fijador, marca AGFA, según la concentración descrita en el producto. El tiempo de exposición fue el especificado por el fabricante del producto fijador, el cual es el adecuado para fijar o detener el proceso de revelado. El tiempo de exposición fue de 2,5 minutos.

4. Agua: Una vez culminada la etapa anterior, las dos películas se sumergieron simultáneamente en una bandeja con agua para limpiarlas y eliminar el exceso de fijador.

5. Secado: Ambas películas fueron llevadas a un horno secador para garantizar un secado uniforme, evitando así la aparición de manchas.

Este método no destructivo se aplicó con el objeto de realizar el análisis interno de la junta para evidenciar discontinuidades no detectables mediante inspección visual tales como poros, escorias, faltas de fusión y grietas. La figura 53 y 54 presenta la radiografía realizada a la junta soldada. La radiografía fue examinada empleando un negatoscopio para obtener las condiciones de brillo y contraste óptimas. En la figura 52, se puede observar faltas de fusión en el comienzo, el final y las zonas de punteo de las soldaduras. Sin embargo, esta condición cumple con el criterio de aceptación indicado en el código ASME sección IX (QW- 191.2.2), (2.007).



Figura 52: Identificación y montaje de láminas en equipo de rayos X.

Fuente: Laboratorio de Rayos X, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la U.C.V (2021)



Figura 53: Revelado de las radiografías.

Fuente: Laboratorio de Rayos X, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la U.C.V (2021)



Figura 54: Radiografía industrial para la junta disímil SMAW

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

4.3.4. Ensayos destructivos

Finalizada la etapa de inspección no destructiva se realizaron cortes transversales sobre los cupones de prueba fabricados con el proceso de soldadura, para obtener las probetas correspondientes a cada uno de los ensayos destructivos especificados según el diagrama QW-463.1(a) de la Sección IX del Código ASME. Adicionalmente se realiza la evaluación metalográfica. La figura 55 muestra la distribución de las probetas en los cupones definitivos.



Figura 55: Esquema de corte de los cupones para ensayos destructivos

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

4.3.5 Análisis químico

Para establecer el porcentaje en peso de los elementos presentes en los cordones de soldadura obtenidos mediante el proceso SMAW se procede a realizar el análisis químico empleando los métodos de Espectroscopia de Absorción Atómica en Suministros e Instalaciones Carabobo, mediante un procedimiento similar al descrito anteriormente para el material base, (Ver anexo B). Sin embargo, las virutas para este análisis fueron extraídas de la zona correspondiente al eje longitudinal del cordón para minimizar la posible influencia de la dilución con los materiales base en los resultados de cada elemento. Luego de la inspección no destructiva de los cupones se procedió a realizar el análisis químico de los mismos, para de esta manera conocer la composición porcentual de los elementos presentes en el cordón de la junta. Estos resultados, mostrados en la Tabla 9, se utilizaron posteriormente para determinar el contenido de ferrita existente en dicho cordón mediante el método químico. Debido a la dilución entre los materiales base y aporte, se observa una variación de la composición química que se refleja en la composición del cordón soldado.

Tabla 9: Composición química de los cordones de soldadura y material de aporte para el proceso SMAW

ELEMENTO	SMAW	AWS E 309L-16
C	0,07	---
Cr	17,21	23,41

Ni	9,02	12,66
Mo	0,25	0,31
Mn	0,70	1,10
Si	0,50	0,80
S	0,12	---
Cu	0,30	0,20
Fe	69,41	---
Ti	0,25	---
V	0,15	---
Co	0,57	---
W	0,07	---
Nb	0,03	---

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Según Sindo Kou (2.003), las variaciones en la composición química de la zona fundida con respecto a la composición nominal pueden atribuirse a principalmente a las reacciones metal-gas y metal-escoria, así como a la evaporación de los aleantes debido a las elevadas temperaturas del arco eléctrico y a la dilución entre los materiales base y aporte. Sin embargo, se consideró que la discrepancia en la cantidad de algunos elementos se originó principalmente en las diferencias de composición entre el aporte utilizados, la dilución con los metales base y la diferencia de los parámetros de soldadura con los cuales se depositaron. Con respecto al tipo de proceso, la cantidad de calor aportado, las temperaturas alcanzadas y la técnica utilizada pudo originar volatilización de algunos elementos.

4.3.6. Análisis metalográfico de las juntas soldadas

En la Figura 56, se observan las macrografías de las juntas soldadas por el proceso SMAW. Para cada junta se tomaron 6 micrografías según se observa en las macrografías anteriores y que se muestran en la figura 57, correspondientes a las zonas de interés de toda junta soldada, es decir, las zonas afectadas térmicamente a la derecha e izquierda del cordón, las zonas de transición a la derecha e izquierda del cordón y el cordón de soldadura propiamente dicho.

Las macrográficas muestran que las juntas soldadas presentan buena penetración, muy uniformes y sin defectos o discontinuidades importantes, las cuales es aceptables según el código ASME sección IX (QW- 191.2.2). En la figura 57, las micrográficas D, E y F, se corresponden a la zona del metal base ASTM A-36 En la zona correspondiente al material base del acero ASTM A36 en donde se observaron granos de perlita (fase oscura), correspondientes a la mezcla eutectoide de cementita y ferrita, rodeados por granos de ferrita (fase clara), las cuales son las fases típicas de un acero hipoeutectoide.



Figura 56: Macrográficas de la junta soldada por SMAW.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

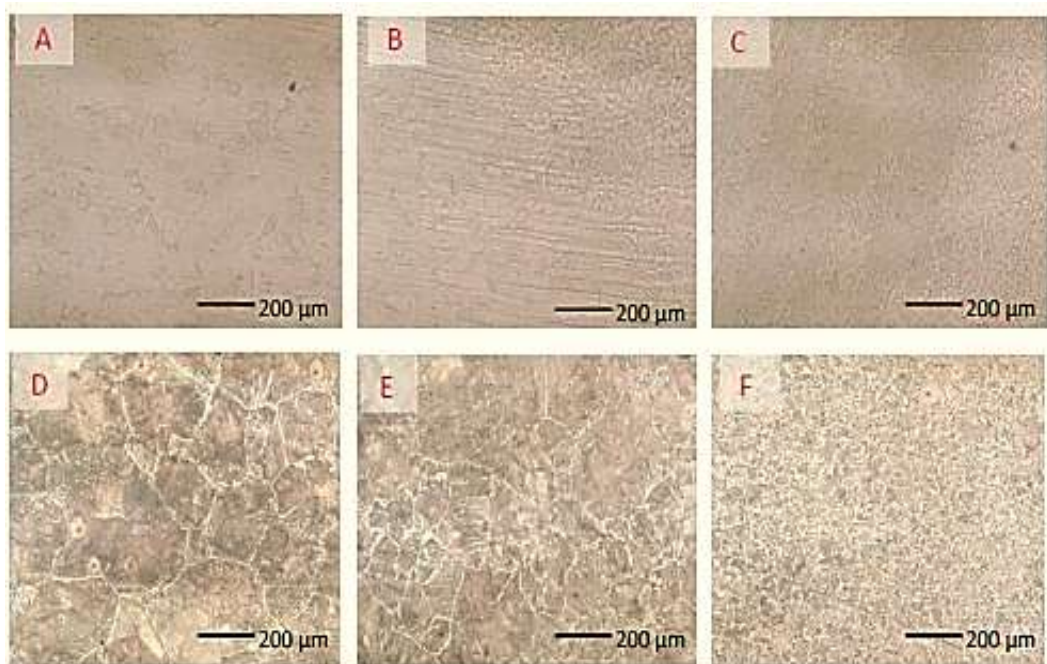


Figura 57: Micrográficas de la junta soldada por SMAW.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Es posible apreciar que los granos de perlita varían gradualmente de tamaño, siendo los que están más cercanos a la zona de fusión los de mayor tamaño y los del material base corresponden a los de menor tamaño. En la micrografía A se observa la microestructura típica de un acero inoxidable austenítico, la cual está constituida por una matriz austenítica (áreas claras), en la que se distingue la presencia de cierta cantidad de ferrita delta retenida en la estructura (líneas oscuras). En la interfase entre el acero inoxidable y la zona de fusión se observaron las dendritas típicas de ferrita (fase oscura) con morfología vermicular en una matriz de austenita (fase clara); dichas dendritas tienen un crecimiento epitaxial, es decir, van nucleándose según la orientación de los cristales del material base adyacente que no fue fundido, como se observa en la micrografía B de la figura 57. En la imagen C de las figuras anteriores, se observó que la dirección de formación de las dendritas corresponde a la dirección de solidificación del depósito de soldadura (crecimiento competitivo).

4.3.7. Análisis del contenido de ferrita de las juntas soldadas.

Es de vital importancia conocer el contenido de ferrita, ya que éste interviene en la calidad resultante de la unión y en su posterior comportamiento en servicio. La ferrita es una microestructura generada en este caso, durante la solidificación del acero. El balance de los elementos formadores de ferrita (alfágenos) y los formadores de austenita (gammágenos) en el depósito de soldadura es el que influye en la tendencia de estabilización de una u otra fase. La ferrita es deseable en el cordón ya que le confiere propiedades que pueden ser beneficiosas bajo ciertas condiciones de servicio. La ductilidad de esta fase promueve un comportamiento plástico en el cordón, ya que actúa como una malla que rodea a los granos de austenita, reduciendo así la tendencia de fractura del cordón, igualmente, esta fase permite disolver los contenidos de fósforo y azufre, minimizando la ocurrencia de agrietamiento en caliente. Sin embargo, esta fase puede ser desfavorable a temperaturas criogénicas y a altas temperaturas. A bajas temperaturas reduce las propiedades de impacto y ductilidad; y a altas temperaturas promueve la formación de la fase sigma que afecta negativamente dichas propiedades.

De los cordones de soldadura se tomaron muestras en forma de virutas para determinar y cuantificar los elementos presentes y así poder estimar, por medio de los diagramas de ferrita, la cantidad de ferrita. Con este valor es posible predecir las fases presentes en la microestructura, así como las propiedades generales del cordón. El contenido de ferrita se estimó por medio del método químico, el consiste en conocer la composición de los metales base y de los aportes y la dilución entre ellos se utilizó el procedimiento especificado por la “American Welding Society” o AWS, para aplicaciones de soldadura disímil, con el fin de predecir y estimar el número ferrítico del cordón por medio del diagrama de Schaeffler. Para la estimación de ferrita de los cordones resultantes de las soldaduras por el método químico fue necesario conocer los porcentajes de dilución, los cuales indicaron la magnitud que se produjo de la unión de los metales fundidos, utilizando el analizador gráfico Digital Micrograph con las imágenes macrográficas de los cordones realizados por el proceso SMAW. Con la imagen macrográfica se procedió a realizar una copia, la cual fue convertida a 16 colores y finalmente analizada arrojando valores relativos (Ver figura 58).

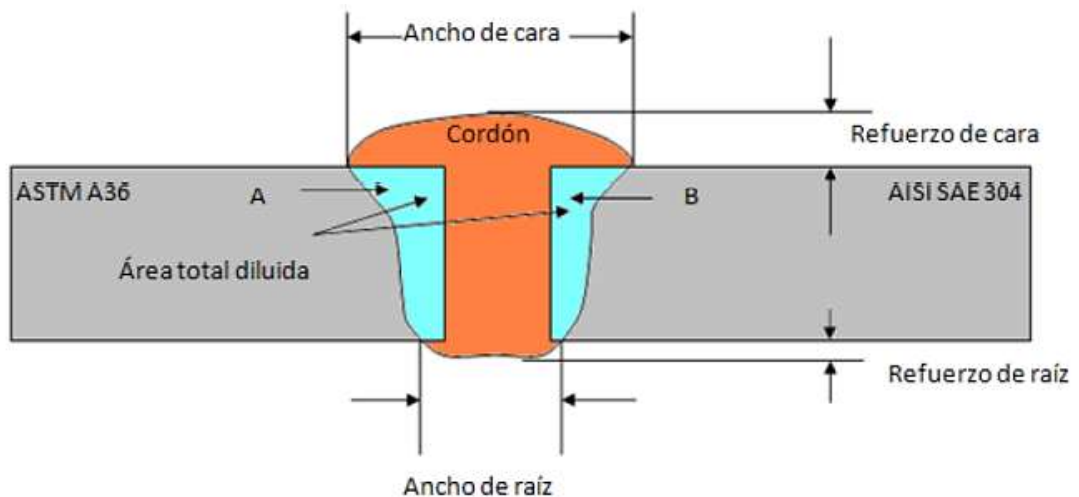


Figura 58: Esquema de los parámetros geométricos y de dilución determinados en el análisis macrográfico hecho a la unión de soldadura.

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

En la figura 59, se muestran los resultados del porcentaje de ferrita para el proceso SMAW, considerando los resultados del cromo equivalente y del níquel equivalente y en función de la dilución estimada para cada proceso, la cual está en el orden de 55% para el proceso SMAW. Estos resultados se obtuvieron con la ayuda del diagrama de Schaeffler en donde se puede apreciar el porcentaje de ferrita presente en la junta.

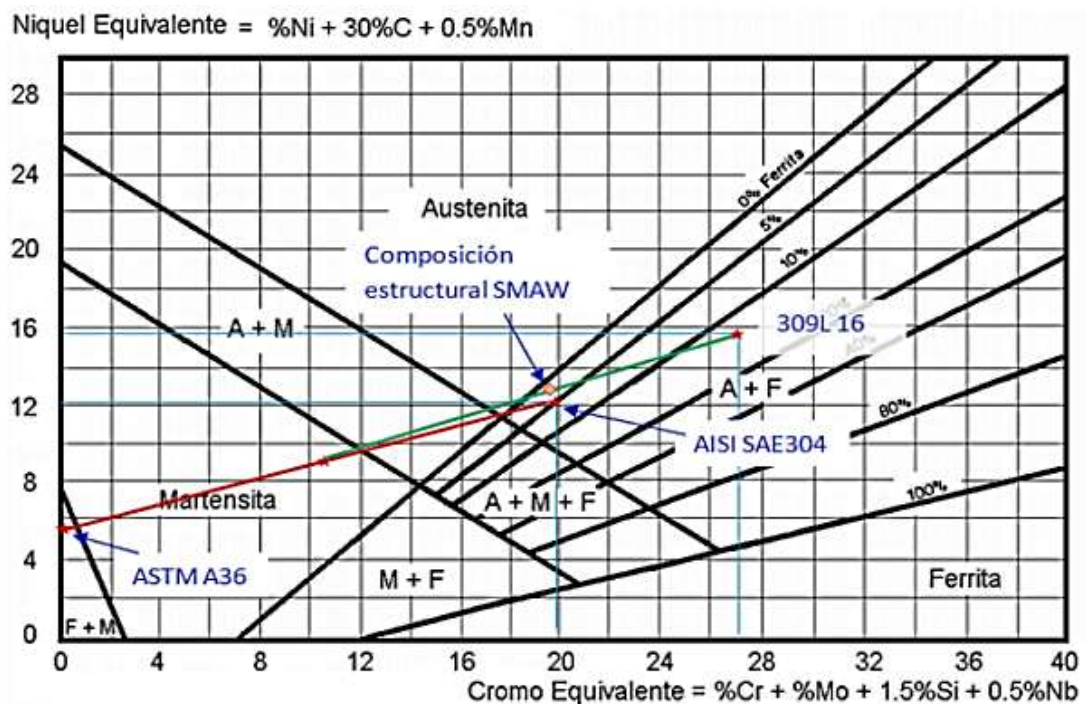


Figura 59: Diagrama de Schaeffler para la junta realizada por el proceso SMAW

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Del análisis de la figura anterior, se puede apreciar que para el proceso SMAW, se estima un contenido de ferrita en el cordón de soldadura de un 2%. Son estos valores bajos de ferrita esperada, no se requiere un precalentamiento previo ni tratamiento post soldadura para evitar la formación de fases sigmas que son indeseables en los procesos de soldadura.

4.3.8. Análisis del ensayo de microdureza Vickers.

En este análisis se tomaron 8 puntos de indentación a lo largo de la sección transversal de la junta soldada para ambos procesos. En cada zona de indentación,

se tomaron 3 mediciones de microdureza Vickers y la Tabla 10 muestra los valores promedio en cada una de las 8 zonas donde se tomó dicha microdureza. De las 8 zonas medidas, dos corresponden al metal base AISI 304, una a la zona ZAT del lado del acero AISI 304, dos en la zona de fusión, otra de la zona ZAT del lado del acero ASTM A-36 y las dos últimas corresponden al acero ASTM A-36; según se puede apreciar en la figura 60.

Tabla 10: Microdureza Vickers en la junta soldada por el proceso SMAW

	AISI 304		ZAT	ZONA DE FUSIÓN		ZAT	ASTM A 36	
Proceso	1	2	3	4	5	6	7	8
SMAW	204	199	204	205	184	162	147	151

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

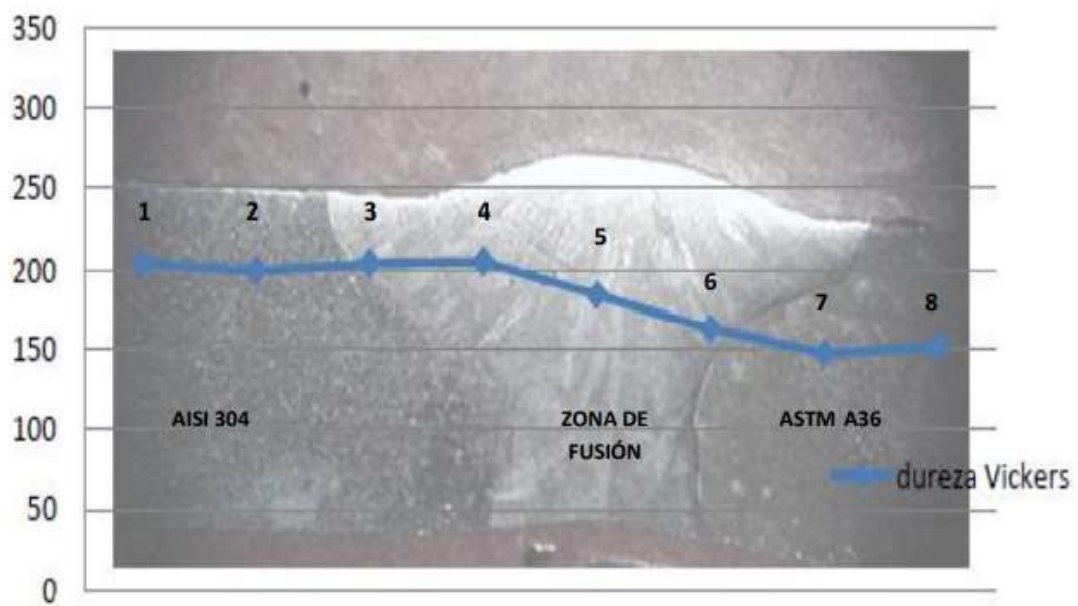


Figura 60: Microdureza Vickers en la junta soldada por el proceso SMAW

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

En las zonas de fusión se observó que la dureza varió gradualmente con respecto a los valores de esta propiedad en los materiales base aledaños.

La zona afectada por el calor del acero ASTM A 36 presentó una dureza similar a su estado inicial, ya que pese a estar sometido a esfuerzos residuales generados por la diferencia de coeficientes de expansión térmica de ambos metales base, los granos de perlita que la conforman presentaron un cambio de tamaño, aumentando hacia el cordón de soldadura y refinándose hacia el material base progresivamente tal y como es esperado para la zona afectada por el calor (ZAC) para un acero al carbono. En ambos procesos de soldadura se observó que la dureza del acero inoxidable AISI 304 permaneció prácticamente invariable desde la zona del material base hasta la zona afectada por el calor.

4.3.9. Ensayo de doblé de la junta soldada.

En el ensayo de doblé se evaluó la ductilidad de las juntas deformando los cupones mediante un punzón de la prensa hidráulica marca Enerpac ubicada en el laboratorio de procesos de fabricación de la Universidad de Carabobo (figura 61), de forma tal que la deformación máxima ocurriese en las superficies a evaluar de los cordones (cara y raíz), tal y como lo recomienda el párrafo QW-154 del Código ASME, Sección IX.



Figura 61: Prensa hidráulica Enerpac.
Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Aplicando esta metodología se logró exponer la junta a la máxima deformación requerida por el ensayo y en la inspección visual de las superficies no se observaron discontinuidades abiertas en el cordón de soldadura o en la ZAC, cumpliéndose de esta forma con el criterio de aceptación del Código aplicado en el cual se indica que la junta no debe mostrar discontinuidades abiertas que tengan una longitud superior a 3,2 mm. En la figura 62, se muestran las diferentes probetas ensayadas y analizadas en las cuales no se apreciaron discontinuidades superiores a lo establecido en el Código ASME, Sección IX.



Figura 62: (a) Doblado de cara y (b) doblado de raíz en las juntas soldadas por el proceso SMAW

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

4.3.10. Ensayo de tracción de las juntas soldadas.

Las juntas soldadas también fueron evaluadas a tracción para determinar sus propiedades mecánicas, tales como esfuerzos de fluencia, máximo y rotura, así como también la deformación máxima a la rotura.

Por el proceso SMAW analizado, se ensayaron tres probetas de tracción, (Ver Figura 63), por recomendación de los docentes y técnicos del Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo se

utilizó la Norma ASTM E-8M, que se muestra en el Apéndice A₂. Las probetas fueron traccionadas en la máquina de ensayos universales marca FRANK ubicada en el ya citado laboratorio de la Universidad de Carabobo, que puede observarse en la Figura 26, determinando la curva característica Esfuerzo vs Deformación, mediante la obtención y registro de los datos de fuerza aplicada y elongación, respectivamente, hasta que ocurrió la fractura de las muestras. Las curvas obtenidas se muestran superpuestas en el grafico 3. Como parámetro de aceptación de la resistencia de las juntas, se toma que la menor resistencia que las mismas deben tener no puede ser inferior que la resistencia del metal base que arrojó menores resistencias mecánicas a la tracción. En el caso de estudio, esta se corresponde al metal base ASTM A-36, la cual posee un esfuerzo de fluencia promedio de 264 MPa, un esfuerzo máximo promedio de 442,30 MPa y un porcentaje de deformación de 51,6%. En la tabla 11 se observan los valores característicos encontrados del ensayo de tracción para la junta soldada.

El grafico muestra las gráficas obtenidas de los ensayos de tracción para la junta soldada por el proceso SMAW.



Figura 63: Probetas de tracción de las juntas soldadas por el proceso SMAW

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

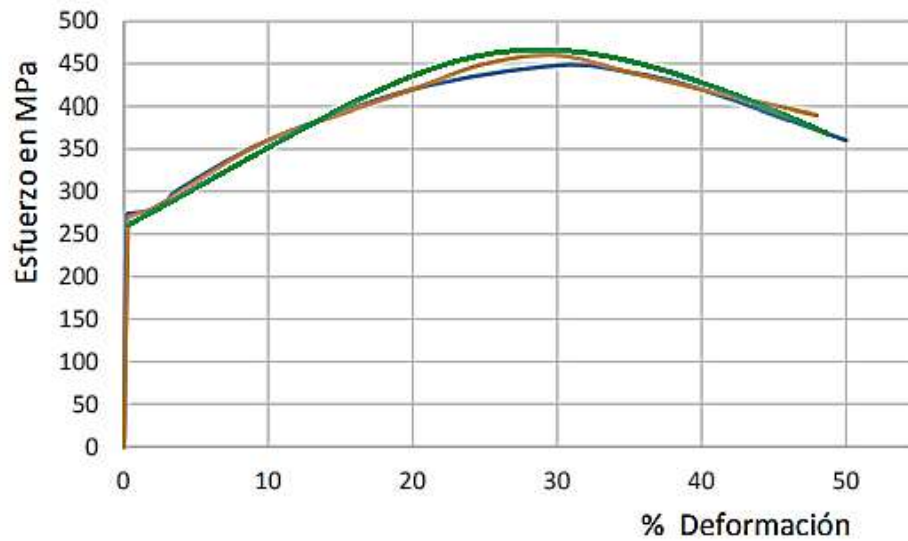


Gráfico 3: Curva esfuerzo vs deformación para las juntas soldadas
Por el proceso SMAW
Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Tabla 11: Resistencia mecánica de la junta disímil soldada
por medio del proceso SMAW

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
S_y (MPa)	275	270	272	272,33
S_u (MPa)	448	454	460	454
S_{rup} (MPa)	360	365	370	365
% ϵ_{max}	50	49	48	49

Fuente: González A. - Rojas J. (2021)

Como se puede observar, los valores de esfuerzo de fluencia, máximo y de rotura están por encima de los mismos esfuerzos que el material base ASTM A-36, quien es el que posee menor resistencia entre los dos materiales base. Esto significa que la junta soldada pasa la prueba de aceptación con respecto al ensayo de tracción. El incremento de los esfuerzos trae como consecuencia una disminución de la capacidad de alargamiento del material, lo cual es de esperarse.

4.4 Establecer las diferencias que se pueden obtener con las juntas soldadas a diferentes condiciones de soldadura.

Al comparar las propiedades mecánicas de las juntas disímiles, se pudo constatar que para el proceso de soldadura SMAW se obtuvo un incremento de las propiedades con respecto a las juntas disímiles, para el acero ASTM A-36 y para el acero inoxidable AISI 304 hubo disminución de sus propiedades mecánicas. Sin embargo, estas diferencias no son tan significativas ya que para el acero ASTM A-36 se evidenció tan solo un incremento del 3.03% del esfuerzo de fluencia para la junta soldada con el proceso SMAW y de igual manera se evidenciaron incrementos del 2,65% y 3,7% en los esfuerzos máximo y de rotura respectivamente. Sin embargo, en cuanto a la elongación máxima, la junta soldada con el proceso SMAW, obtuvo un decremento de un 5,04% y de 3,92% para el ASTM A-36 y para el acero inoxidable AISI 304 respectivamente.

El incremento de los esfuerzos trae como consecuencia una disminución de la capacidad de alargamiento del material, lo cual era de esperarse.

CONCLUSIONES

Al realizar los respectivos análisis químico, ensayos de tracción y análisis metalográfico, se pudo verificar que los materiales en estudio se corresponden exactamente a los aceros ASTM A-36 y al AISI 304, basándose en las especificaciones respectivas para ambos materiales. Se pudo constatar los valores característicos de esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y elongación máxima que identifican a estos aceros, al igual que los microconstituyentes de los mismos.

Los conjuntos de parámetros seleccionados para la fabricación de juntas disímiles entre los aceros AISI 304 y ASTM A3-6 empleando el proceso SMAW, con el material de aporte AWS E 309L-16, resultan adecuados para su utilización en condiciones reales de servicio según los requerimientos de la Sección IX del Código ASME.

La disminución de aporte de calor a través del aumento de la velocidad de avance y la disminución del voltaje y/o el amperaje genera zonas de fusión con menor penetración y mayor refuerzo de cara, indistintamente del proceso de soldadura utilizado.

Los resultados obtenidos a través de la evaluación no destructiva y destructiva de ambos cupones soldados no evidenciaron la presencia de discontinuidades y/o defectos por lo cual los procedimientos de soldadura utilizados se consideran adecuados.

El contenido de la fase ferrítica presente en los cordones de soldadura mediante los procedimientos de soldadura desarrollados oscilaron entre 2% y 5%, el cual es suficiente para reducir la susceptibilidad al agrietamiento en caliente sin alterar las propiedades anticorrosivas de este acero.

Al comparar las propiedades mecánicas de las juntas disímiles, se pudo constatar se obtuvo un incremento de las propiedades con respecto a las juntas disímiles, para el acero ASTM A-36 y para el acero inoxidable AISI 304 hubo disminución de sus propiedades mecánicas. Sin embargo, estas diferencias no son

tan significativas ya que para el acero ASTM A-36 se evidenció tan solo un incremento del 3.03% del esfuerzo de fluencia para la junta soldada con el proceso SMAW y de igual manera se evidenciaron incrementos del 2,65% y 3,7% en los esfuerzos máximo y de rotura respectivamente. Sin embargo, en cuanto a la elongación máxima, la junta soldada, obtuvo un decremento de un 5,04% y de 3,92% para el ASTM A-36 y para el acero inoxidable AISI 304 respectivamente.

El incremento de los esfuerzos trae como consecuencia una disminución de la capacidad de alargamiento del material, lo cual es de esperarse.

RECOMENDACIONES

Algunas recomendaciones complementarias a este trabajo, se pueden resumir en las siguientes sugerencias.

Utilizar otros procesos de soldadura tales como GMAW (gas metal arc welding), SAW (submerged arc welding) y FACW (flux cored arc welding) a fin de comparar y analizar el comportamiento de las uniones soldadas entre el ASTM A-36 y el acero inoxidable AISI 304 por medio de estos procesos.

En lugar del acero estructural ASTM A-36, utilizar otros aceros al carbono comerciales o el acero naval ASTM A131 y así comparar su soldabilidad con el acero inoxidable AISI 304.

Utilizar otros tipos de electrodos para así tener un rango de comparación mayor y observar cómo influye el tipo de electrodo en la soldabilidad de los aceros ASTM A-36 y AISI 304.

BIBLIOGRAFÍA

- ACERIND S.C. (2000). “Soldadura de los aceros inoxidable”. https://inoxidable.com/soldadura_parte_II.pdf. [Citada 07/01/2021].
- Arias F. (2012). “El proyecto de investigación”. 6ta edición, Introducción a la metodología científica.
- Arunkumar, N., Duraisamy, P. y Veeramanikandan, V. (2012). “**Evaluation of Mechanical Properties of Dissimilar Metal Tube Welded Joints Using Inert Gas Welding**”. International journal of engineering research and applications (IJERA). 2. (5). 1709 – 1717.
- ASM International (1994). “**Stainless Steels**”, 3th edition, ASM International, USA.
- ASM International. Stainless steels. (1999). Ed. J.R. Davis. third. s.l.: ASM international. 0-87170-503-6.
- Askeland, Donald R. and Phule, Pradeep P. (2004). “*Ciencia e Ingeniería de los Materiales*”. Editorial Thomson. 4ta Edición. D.F. México. Pág. 231-497.
- ASTM (2004) “**Steel--Plate, Sheet, Strip, Wire_ Stainless Steel Bar**”. Volume 01.03
- ASTM E-190. “*Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds*”. ASTM (2004) Standards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01 Metals -- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph
- ASTM E-8M. “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*” ASTM (2004) Standards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01 Metals -- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph
- ASTM E-384-99. “*Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials* “. ASTM (2004) Standards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01 Metals -- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_ Metallograph.

- ASTM 407-7. *“Heat –resisting chromium and chromium- Nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications”*.
ASTM (2004) Standards\ASTM 2004 PART IA\ASTM 2004 Volume 03.01
Metals -- Mechanical Testing_ Elevated and Low-Temperature Tests_
Metallograph,
- Avner, Sidney. (1.983) **“Introducción a la metalurgia Física”**. Segunda edición.
Editorial Mc Graw-Hill, México. Pp 187,1889.
- AWS Welding Handbook. Ninth Edition volume 2. Welding process, part 1. (2.001)
American Welding Society 550 N.W. LeJeune Road Miami, FL 33126.
- AWS D1.1/D1.1M, (2015) An American National Standard. American Welding
Society (AWS) D1 Committee on Structural Welding. 23rd Edition. Printed
in the United States of America
- Brien, O. (2.006). **“Manual de Soldadura”**, Naucalpan de Juárez, México:
Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
- Chávez, S. y Jaime, O. (2.017). **“Estudio de la soldabilidad entre un
acero inoxidable y un acero al carbono mediante un proceso de soldadura
por fricción”**. Trabajo especial de grado, Facultad de ingeniería mecánica,
Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador.
- Codigo ASME (2007). **“Organización Código ASME IX”**, Welding and Brazing
Qualifications.
- GERDAU AZA. (2.000). **“Compendio de normas para productos de acero”**.
Tercera edición.
- Ignoto, V. (2000). **“Soldadura para Ingenieros”**. Universidad Central de
Venezuela. Centro Venezolano de Soldadura, CVS. Caracas. Venezuela.
- Janampa, J. y Surco, J. (2015). **“Estudio de la soldabilidad del acero ASTM A-
36 con acero VCL mediante el proceso SMAW y posterior calificación del
procedimiento de soldadura”**, Trabajo especial de grado, Escuela
profesional de Ingeniería de materiales, Facultad de Ingeniería de procesos,
Universidad nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Lefebvre, J. (1993). **“Guidance on specifications of ferrite in stainless steel welds
Metals”**. Journal Welding in the World, Vol. 31(6). 390 – 407.

- Lippold, J. C. and Savage W. F. (1980.). “**Solidification of austenitic stainless steel Weldments**” part 3. Welding Journal, Vol. 61(12). 388 – 396.
- Lo K.H., Shek C.H., Lai J.K.L. (2009) “**Recent developments in stainless steels, Materials Science and Engineering**” R, V.65. 39-104.
- López A. Tierno. (2.015). “**Constituyentes de los aceros**” [En línea]. Disponible: <http://auladetecnologias.blogspot.com> [Citada 30-08-2015].
- “Microestructura del acero 1%C, red blanca de cementita” [En línea]. Disponible: <http://www.utp.edu.co/~publio17/aceros.htm> [Citada 30-12-2020].
- Luna, R. (2.015). “**Evaluación de procedimiento de soldadura de la unión disímil entre acero API x70 psl1 y ASTM A707 L5 F65**” Trabajo especial de grado, Facultad de ingeniería mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú.
- Pereira H.E. (2009). “**Determinación de las condiciones de soldadura entre un acero ASTM A36 y uno Inoxidable AISI 304L**”, Trabajo especial de grado, Coordinación de Ingeniería de Materiales, Decanato de estudios profesionales, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- Rodríguez, G., Gómez, J. (2,011). “**Análisis del comportamiento mecánico y microestructural en juntas soldada por medio del proceso G.M.A.W en aceros disimiles**”. Trabajo especial de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia. Venezuela.
- Soldaduras sparkweld, “**Que es la soldadura SMAW**” (2016). [En línea]. Available: <https://sparkweld.wordpress.com/2016/03/19/que-es-la-soldadura-smaw/>. [Último acceso: 3 1 2021].
- Soldexa Oerlikon. (2010). “**Manual de soldadura**”. Séptima edición. Lima. Perú.

ANEXO A

Aplicación de soldadura SMAW entre acero ASTM A36 y acero AISI 304

En la empresa NEGROVEN S.A. de Valencia Estado Carabobo, hace 4 años se realizaron diversas uniones soldadas entre acero ASTM A36 y acero AISI 304 para el mantenimiento y reparación de un intercambiador de calor de 102 tubos ubicado en el extremo de un reactor. Esta reparación se llevó a cabo debido a que un diferencial de temperatura produjo una dilatación térmica brusca la cual deformo el haz de tubos rompiendo así las soldaduras realizadas anteriormente.

Se realizaron así 67 uniones soldadas con el proceso de soldadura SMAW y el uso de un electrodo para acero inoxidable para la unión de los aceros ASTM A36 y AISI 304.

Hasta la fecha las uniones soldadas no han presentado ningún tipo de falla, resisten altas temperaturas, las dilataciones térmicas y también los factores corrosivos al que se encuentran expuestas. Se puede decir que es una soldadura óptima para dicha aplicación.



Figura 64: Intercambiador de calor con uniones soldadas por soldadura SMAW entre acero ASTM A36 y acero AISI 304

Fuente: Negroven, S.A. (2021)



Figura 65: Uniones soldadas por soldadura SMAW entre acero ASTM A36 y acero AISI 304

Fuente: Negroven, S.A. (2021)

ANEXO B

Composición Química



Valencia, abril 15 de 2021

Sr. José Rojas
Universidad José Antonio Páez

Análisis 21-04-2021
Composición química de muestra
Muestra de acero inoxidable.

Análisis de composición química por medio de Espectroscopía por rayos X, muestras de acero inoxidable tipo lámina, (porcentaje en peso)

Muestra	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Fe
1	0,042	0,301	1,647	18,928	8,655	0,030	0,004	0,002	Bal
	0,040	0,298	1,650	18,931	8,652	0,030	0,004	0,003	Bal

Equipo Espectrómetro de rayos X portátil, Marca Drawell, modelo XRF.

Instalaciones y Suministros Carabobo C.A.
Venezuela

Carlos Farfán
Supervisor de calidad

Ubicación: Complejo Los Jarales, Avenida El Parque, Manzana MC4, Parcelas 7, 8 y 9
Teléfono: (+58) 241 - 871.03.45 / 871.39.72 / 871.01.53 / 871.22.91 / 872.36.79 / 872.51.34
Fax Directo: (+58) 241 - 872.17.12 E-mail: vcontacto@suministroscarabobo.com
scarabobo@gmail.com Municipio San Diego - Estado Carabobo - Venezuela



Valencia, abril 15 de 2021

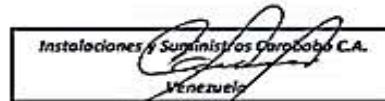
Sr. José Rojas
Universidad José Antonio Páez

Análisis 22-04-2021
Composición química de muestra
Muestra acero al carbono

Análisis de composición química por medio de Espectroscopía por rayos X, muestras de
acero tipo lámina, (porcentaje en peso)

Muestra	C	Si	Mn	Mo	S	Fe
1	0,201	0,077	0,452	0,034	0,008	Bal
	0,199	0,074	0,455	0,034	0,008	Bal

Equipo Espectrómetro de rayos X portátil, Marca Drawell, modelo XRF.



Carlos Farfán
Supervisor de calidad

Ubicación: Complejo Los Jarales, Avenida El Parque, Manzana MC4, Parcelas 7, 8 y 9
Teléfono: (+58) 241 - 871.03.45 / 871.39.72 / 871.01.53 / 871.22.91 / 872.36.79 / 872.51.34
Fax Directo: (+58) 241 - 872.17.12 E-mail: vcontacto@suministroscarabobo.com
scarabobo@gmail.com Municipio San Diego - Estado Carabobo - Venezuela



Valencia, abril 15 de 2021

Sr. José Rojas
 Universidad José Antonio Páez

Análisis 23-04-2021
 Composición química de muestra
 Depósito de soldadura

Análisis de composición química por medio de Espectroscopía por rayos X, muestras de
 cordón de soldadura, (porcentaje en peso)

Muestra	C	Cr	Ni	Mo	Mn	P	S	Cu
1	0,02	23,41	12,66	0,310	1,100	0,035	0,020	0,200
	0,019	23,40	12,964	0,308	1,08	0,036	0,021	0,203

Equipo Espectrómetro de rayos X portátil, Marca Drawell, modelo XRF.

Instalaciones / Suministros Carabobo C.A.
 Venezuela

Carlos Farfán
 Supervisor de calidad

Ubicación: Complejo Los Jarales, Avenida El Parque, Manzana MCA, Parcelas 7, 8 y 9
 Teléfono: (+58) 241 - 871.03.45 / 871.39.72 / 871.01.53 / 871.22.91 / 872.36.79 / 872.51.34
 Fax Directo: (+58) 241 - 872.17.12 E-mail: vcontacto@suministroscarabobo.com
 scarabobo@gmail.com Municipio San Diego - Estado Carabobo - Venezuela



Valencia, mayo 13 de 2021

Sr. José Rojas
Universidad José Antonio Páez

Análisis 13-05-2021
Composición química de muestra
Virutas de soldadura

Análisis de composición química por medio de Espectroscopía por rayos X, muestras virutas de soldadura, (porcentaje en peso)

Elemento	C	Cr	Ni	Mn	Mn	Si	S	Cu	Fe	Ti	V	Co	W	Nb
SMAW	0,07	17,21	9,02	0,25	0,71	0,50	0,12	0,30	69,41	0,25	0,15	0,57	0,07	0,03
AWS E 309L-16	---	23,41	12,66	0,31	1,10	0,80	---	0,20	---	---	---	---	---	---

Equipo Espectrómetro de rayos X portátil, Marca Drawell, modelo XRF.


 Instalaciones y Suministros Carabobo C.A.
 Venezuela

Carlos Farfán
Supervisor de calidad

Ubicación: Complejo Los Jarales, Avenida El Parque, Manzana MC4, Parcelas 7, 8 y 9
 Teléfono: (+58) 241 - 871.03.45 / 871.39.72 / 871.01.53 / 871.22.91 / 872.36.79 / 872.51.34
 Fax Directo: (+58) 241 - 872.17.12 E-mail: vcontacto@suministros-carabobo.com
 scarabobo@gmail.com Municipio San Diego - Estado Carabobo - Venezuela