

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**FABRICACION Y EVALUACION DE JUNTAS SOLDADAS DE
ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304 CON ACERO
ASTM A36 MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA
ELECTRICA AL ARCO**

Presentado ante la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Pérez G. Carlos E.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

FABRICACION Y EVALUACION DE JUNTAS SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304 CON ACERO ASTM A36 MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA ELECTRICA AL ARCO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Vicente Ignoto

Presentado ante la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Pérez G. Carlos E.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010



Caracas, 13 de mayo de 2.010

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller:

CARLOS EDUARDO PÉREZ

Titulado:

“FABRICACIÓN Y EVALUACIÓN DE JUNTAS SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304 CON ACERO AL CARBONO ASTM A36 MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA ELÉCTRICA AL ARCO”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Prof. José Gregorio La Riva
Jurado



Prof. María de los A. Rodríguez
Jurado

Prof. Vicente Ignoto
Tutor

INDICE GENERAL

Introducción	1
CAPÍTULO I	
FUNDAMENTO TEÓRICO	
1.1 ACEROS INOXIDABLES	2
1.1.1 Aceros Inoxidables	2
1.1.2 Aplicaciones de los Aceros Inoxidables	3
1.1.3 Clasificación de los Aceros Inoxidables	4
1.1.3.1 Aceros Inoxidables Martensíticos	4
1.1.3.2 Aceros Inoxidables Ferríticos	5
1.1.3.3 Aceros Inoxidables Austeníticos	5
1.1.3.4 Tipos Especiales	6
1.1.4 Acero Inoxidable Austenítico 304l	6
1.1.5 Influencia de la Composición Química sobre la Estructura	8
1.1.6 Diagrama de Schaeffler y de DeLong	9
1.1.6.1 Diagrama de Schaeffler	10
1.1.6.2 Diagrama de DeLong	12
1.1.7 Solidificación de los Aceros Inoxidables Austeníticos	14
1.1.7.1 Solidificación Primaria Austenítica	16
1.1.7.2 Solidificación Primaria Ferrítica	18
1.1.7.3 Ferrita con Morfología Vermicular	18
1.1.7.4 Ferrita con Morfología Laty	19
1.1.7.5 Ferrita con Morfología Acicular ó Widmanstatten	19
1.1.7.6 Ferrita con Morfología Globular	19
1.2 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS AUSTENITICOS	20
1.2.1 Introducción a la Soldabilidad de los Aceros Inoxidables Austeníticos	20
1.2.2 Propiedades Físicas	21
1.2.3 Agrietamiento en Caliente de las Soldaduras Austeníticas	21
1.2.4 Contenido de Ferrita en el Metal de Soldadura	23

1.2.5	Pre calentamiento y Tratamiento Térmico de las Juntas Soldadas	25
1.3	SOLDADURA POR ELECTRODO REVESTIDO SMAW	26
1.3.1	Principios del proceso SMAW	26
1.3.2	Descripción del proceso SMAW	27
1.3.3	Ventajas y limitaciones del proceso SMAW	28
1.3.4	Esquema del proceso de soldadura SMAW	31
1.3.5	Selección del tipo de corriente	31
1.3.6	Electrodos revestidos	33
1.3.7	Acción del revestimiento de los electrodos	35
1.4	SOLDEO POR GTAW GTAW	37
1.4.1	Fundamentos del proceso	37
1.4.3	Ventajas y limitaciones:	39
1.4.4	Aplicaciones del proceso de soldadura GTAW	41
1.4.5	Selección del tipo de corriente	42
1.4.5.1	Arco con corriente continua	42
1.4.5.2	Arco con corriente alterna	42
1.4.6	Equipamiento	45
1.4.6.1	Soplete o antorchas	45
1.4.7	Electrodos no consumibles	48
1.4.8	Metales de aportación	49
1.4.8.1	Varillas	49
1.4.9	Gases de protección	49
1.4.9.1	Argón	50

1.4.10	Cebado del arco	51
1.5	ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS	53
1.5.1	Ensayos Destructivos	53
1.5.1.1	Ensayo de Tracción	53 54
1.5.1.2	Ensayo de Dureza	54
1.5.1.3	Ensayo Metalográfico	54
1.5.2	Ensayos No Destructivos	55
1.5.2.1	Inspección Visual	55
1.5.2.2	Radiografía Industrial	55

CAPÍTULO II

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1.	CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES BASE Y APORTE	56
2.1.1	Análisis químico	58
2.1.2	Evaluación Metalográfica	58
2.1.3	Determinación del contenido de ferrita	60
2.1.3.1	Método químico	63
2.1.3.2	Método metalográfico	63
2.1.4	Carbono equivalente en el material base ASTM A36	64
2.1.5	Dureza	64
2.1.6	Ensayo de tracción	65
2.2	DISEÑO DE JUNTA	68
2.3	DETERMINACION PRELIMINAR DE CONJUNTOS DE PARAMETROS DE SOLDADURA (SMAW y GTAW)	69
2.4	FABRICACION DE CUPONES DE PRUEBA PRELIMINARES	69
2.5	EVALUACION DE CORDONES PRELIMINARES	72
2.5.1	Inspección visual	72
2.5.2	Evaluación macrográfica	72
2.6	SELECCIÓN DEFINITIVA DE CONJUNTOS DE PARAMETROS	73

DE SOLDADURA (SMAW y GTAW)

2.7	FABRICACION DE CUPONES DEFINITIVOS	74
2.8	EVALUACION DE CUPONES SOLDADOS	74
2.8.1	Ensayos no destructivos	76
2.8.1.1	Inspección Visual	76
2.8.1.2	Radiografía industrial	76
2.8.2	Ensayos destructivos	79
2.8.2.1	Análisis químico	80
2.8.2.2	Análisis metalográfico	81
2.8.2.3	Análisis de ferrita	81
2.8.2.3.1	Método químico 1	83
2.8.2.3.2	Método químico 2. Diagrama de Schaeffler usando la composición química de los depósitos.	83
2.8.2.3.3	Método metalográfico	84
2.8.2.4	Ensayo de microdureza	84
2.8.2.5	Ensayo de doblez	87
2.8.2.6	Ensayo de tracción	90

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANALISIS

3.1.	Caracterización de los Materiales Base y Aporte	93
3.1.1	Análisis químico	93
3.1.2	Evaluación Metalográfica	96
3.1.3	Determinación del contenido de ferrita	99
3.1.3.1	Método químico	99
3.1.3.2	Método metalográfico	101
3.1.4	Carbono equivalente en el material base ASTM A36	102
3.1.5	Dureza	103
3.1.6	Ensayo de tracción	105
3.2	Diseño de junta	108
3.3	Determinación preliminar de conjuntos de parámetros de soldadura (SMAW y GTAW)	109
3.4	Fabricación de cupones de prueba preliminares	111
3.5	Evaluación de cordones preliminares	112
3.5.1	Inspección visual	112
3.5.2	Evaluación macrográfica	113
3.6	Selección definitiva de conjuntos de parámetros de soldadura (SMAW y GTAW)	115

3.7	Fabricación de cupones definitivos	117
3.8	Evaluación de cupones soldados	118
3.8.1	Ensayos no destructivos	118
3.8.1.1	Inspección Visual	118
3.8.1.2	Radiografía industrial	119
3.8.2	Ensayos destructivos	120
3.8.2.1	Análisis químico	120
3.8.2.2	Análisis metalográfico	124
3.8.2.2.1	Cálculo de la dilución	128
3.8.2.3	Análisis de ferrita	132
3.8.2.3.1	Método químico 1	133
3.8.2.3.2	Método químico 2. Diagrama de Scheaffler usando la composición química de los depósitos.	135
3.8.2.3.3	Método metalográfico	137
3.8.2.4	Ensayo de microdureza	145
3.8.2.5	Ensayo de dobléz	152
3.8.2.6	Ensayo de tracción	154
	Registro de Calificación de procedimientos	159

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES 164

RECOMENDACIONES 165

CAPÍTULO V

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFIA 167

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Índice de figuras

Fig. 1.1	Diagrama Schaeffler.	11
Fig. 1.2	Diagrama de DeLong.	13
Fig. 1.3	Sección del diagrama de equilibrio Fe-Cr-Ni, (70% Fe).	14
Fig.1.4	Morfologías de ferrita delta según el modo primario de solidificación	15
Fig.1.5	Modo primario de solidificación para varias relaciones de Cr_{eq}/Ni_{eq} .	17
Fig. 1.6	Principales partes del arco eléctrico en la soldadura SMAW.	28
Fig. 1.7	Principios de la soldadura eléctrica al arco SMAW	31
Fig. 1.8	Soplete de Electrodo de Tungsteno y Gas (GTAW).	39
Fig. 1.9	(a) Corriente alterna; (b) Corriente alterna con impulsos de alta frecuencia.	44
Fig.1.10	esquema básico de soldadura GTAW	45
Fig. 1.11	Cebado del arco por raspado. G = fuente de alimentación.	52
Fig. 2.1	Depósitos de material de aporte (izq. ER 308L, der. E309L-16)	59
Fig. 2.2	Equipo usado en la gasometría	59
Fig. 2.3	espectroscopio de absorción atómica	60
Fig. 2.4	Pulidora	61
Fig. 2.5	Superficies estudiadas en las probetas metalográficas: 1) paralela al sentido de laminación del material y 2) perpendicular al sentido de laminación del material	62

Fig. 2.6	durómetro	65
Fig. 2.7	Probeta de tracción del material base	66
Fig.2.8	Máquina universal de tracción	67
Fig. 2.9	Extensómetro aplicado a la probeta	67
Fig. 2.10	Equipo de soldadura GTAW	69
Fig. 2.11	Antorcha de soldadura GTAW	70
Fig. 2.12	equipo de soldadura SMAW	71
Fig. 2.13	Corte de las muestras de soldadura de electrodo revestido	72
Fig. 2.14	corte de una de las muestras de soldadura por GTAW	73
Fig. 2.15	cupón antes de ser soldado	75
Fig. 2.16	Cápsula emisora de radiación	77
Fig. 2.17	Tablero de Control de Rayos X	78
Fig. 2.18	esquema de corte de los cupones para ensayos destructivos	80
Fig. 2.19	Esquema de los parámetros geométricos y de dilución determinados en el análisis macrográfico hecho a la unión de soldadura.	82
Fig. 2.20	Microscopio- indentador Vickers	85
Fig. 2.21	modelo de indentaciones de microdureza Vickers en el cordón soldado por GTAW	86
Fig. 2.22	Modelo de indentaciones de microdureza Vickers en el cordón soldado por SMAW	86
Fig. 2.23	Diseño probeta de doblez según QW-462.3 (a) del Código ASME Sección IX	88
Fig. 2.24	Probetas de doblez (SMAW superior y GTAW Inferior)	88
Fig. 2.25	Máquina de ensayos universales	89

Fig. 2.26	Probeta de tracción de la soldadura	90
Fig.2.27	probetas de tracción SMAW y GTAW	91
Fig. 3.1	Micrografías del acero ASTM A36 a 50x (inferiores) Micrografías del acero AISI 304 a 50x (superiores)	98
Fig. 3.2	Ubicación del Acero AISI 304 en el Diagrama Schaeffler	100
Fig. 3.3	Histograma de la micrografía del acero AISI 304 para determinación de ferrita	101
Fig. 3.4	Curvas Esfuerzo-Deformación del acero AISI 304	106
Fig. 3.5	Curvas Esfuerzo-Deformación del acero ASTM A36	107
Fig.3. 6	Cordones preliminares sobre chapa por GTAW	111
Fig. 3.7	Cordones preliminares sobre chapa por SMAW	112
Fig. 3.8	Macrografías de cordones sobre chapa preliminares por GTAW	114
Fig. 3.9	Macrografías de cordones sobre chapa preliminares por SMAW	115
Fig. 3.10	Cordón de soldadura GTAW	118
Fig. 3.11	Cordón soldadura SMAW	119
Fig. 3.12	Radiografía correspondiente al cordón de soldadura SMAW	119
Fig. 3.13	Radiografía correspondiente al cordón de soldadura GTAW	120
Fig. 3.14	Macrografía y micrografías de la junta soldada por GTAW	125
Fig. 3.15	Macrografía y micrografías de la junta soldada por SMAW	126
Fig. 3.16	Dilución e histograma de la junta soldada por SMAW	129
Fig. 3.17	Dilución e histograma de la junta soldada por SMAW	130
Fig. 3.18	Estimación de ferrita de la soldadura GTAW	134
Fig. 3.19	Estimación de ferrita de la soldadura SMAW	135
Fig. 3.20	Contenido de ferrita de los cordones de soldadura por el Diagrama de Schaeffler	136

Fig. 3.21	Histograma del cordón SMAW a 5X	138
Fig.3.22	Histograma del cordón SMAW a 10X	139
Fig. 3.23	Histograma del cordón SMAW a 5X	140
Fig. 3.24	Histograma del cordón SMAW a 10X	141
Fig. 3.25	Huella Vickers generada por la indentación	145
Fig. 3.26	Perfil de dureza de la soldadura GTAW	148
Fig. 3.27	Perfil de dureza de la soldadura SMAW	149
Fig. 3.28	Ensayo de dobléz, 1 dobléz de raíz soldadura TIG, 2 dobléz de cara TIG, 3 dobléz de cara SMAW, 4 dobléz de raíz SMAW	152
Fig. 3.29	Diagrama esfuerzo-deformación para probeta de SMAW 1	154
Fig. 3.30	Diagrama esfuerzo-deformación para probeta de SMAW 2	155
Fig. 3.31	Diagrama esfuerzo-deformación para probeta de GTAW 2	155
Fig. 3.32	Diagrama esfuerzo-deformación para probeta de GTAW 2	156
Fig. 3.33	Probetas de tracción ensayadas: A SMAW 1, B SMAW 2, C TIG 1, D TIG 2	158

Índice de tablas

Tabla 1.1	Composición química de los Aceros Inoxidables Austeníticos	7
Tabla 1.2	Comparación entre uso de corriente continua y alterna	32
Tabla 1.3	Características del soldeo de acuerdo con la corriente seleccionada	43
Tabla 3.1	Composición química del acero AISI SAE A304	93
Tabla 3.2	Composición química del acero ASTM A-36	94
Tabla 3.3	Composición química del metal de aporte AWS E 309L-16	94
Tabla 3.4	Composición química del metal de aporte AWS ER 308L	99
Tabla 3.5.	Valores Creq, Nieq y ferrita resultante	102
Tabla 3.6-	Nº Pixeles y % de ferrita presente en el acero AISI 304	103
Tabla 3. 7	Valores de Dureza Rockwell B (HRB) obtenidos para el material base ASTM A36	103
Tabla 3.8	Valores de Dureza Rockwell B (HRB) para el material base AISI/SAE 304.	104
Tabla 3.9	Esfuerzos máximos y Límites de Fluencias del acero AISI 304	107
Tabla 3.10	Esfuerzos máximos y Límites de Fluencias del acero AISI 304	108
Tabla 3.11.	Valores de los parámetros usados para cordones de prueba	109
Tabla 3.12.	Parámetros de los cordones de ensayo para SMAW	110
Tabla 3.13	Parámetros de los cordones de ensayo para GTAW	110
Tabla 3.14	Parámetros de soldadura para GTAW	115
Tabla 3.15	Parámetros de soldadura para SMAW	116
Tabla 3.16	Composición química de los cordones de soldadura SMAW y GTAW	121

Tabla 3.17	Composición química de la zona fundida de la junta (GTAW)	121
Tabla. 3.18	Composición química de la zona fundida de la junta (SMAW)	122
Tabla 3.19	Composición química de una junta realizada por SMAW usando AISI 304, ASTM A36 y aporte E309L16, según "Metal Handbook"	124
Tabla 3.20	Valores de N° de pixeles de los materiales que conforman las juntas	131
Tabla 3.21.	Valores de dilución de los materiales que conforman las juntas	131
Tabla. 3.22	Valores de Cr _{eq} y Ni _{eq} presentes en ambos cordones de soldadura	136
Tabla 3.23	Valores de ferrita según análisis metalográfico	142
Tabla 3.24	Resultados del contenido de ferrita resultante por cada método	143
Tabla 3.25	Valores de diagonales de la huella Vickers y su respectiva dureza al cordón SMAW	146
Tabla 3.26	Valores de diagonales de la huella Vickers y su respectiva dureza al cordón GTAW	147
Tabla 3.27	Valores de dureza según la zona correspondiente en ambos cordones	148
Tabla 3.28	Promedio de esfuerzos máximos	156

AGRADECIMIENTOS

A dios todopoderoso, nuestro creador

A mi familia por ser mi apoyo, y que con paciencia han sabido esperar para ver los frutos de mi esfuerzo.

Al profesor Vicente Ignoto por ser mi guía en este trabajo investigativo y por haberme dado la oportunidad de afrontarlo.

A la profesora Isis Plaza por orientarme al desarrollo de esta investigación y brindarme las herramientas necesarias para lograrlo.

Al Técnico Rómulo Millán por ser un excelente compañero de trabajo y haberme ayudado directamente en la ejecución y mano de obra de este trabajo.

A los profesores y estudiantes de la Escuela de Metalurgia que nos brindaron orientación apoyo en el uso de los laboratorios especializados.

A todos los profesores y compañeros de estudio de la escuela de Ingeniería Mecánica, con los cuales curse materias, los cuales contribuyeron en mi formación académica y humana en estos años vividos.

Pérez G., Carlos E.

FABRICACION Y EVALUACION DE JUNTAS SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO AISI 304 CON ACERO ASTM A36 MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA ELECTRICA AL ARCO

Tutor Académico: Prof. Ing. Vicente Ignoto. Tesis. Caracas, U.C.V., Facultad de Ingeniería. Escuela de Mecánica. 2010, nº pag.192.

En este trabajo se utilizaron los Proceso de Soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) y Soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding, SMAW), para unir a tope y en posición plana chapas de Acero Inoxidable AISI 304 con chapas de acero al carbono ASTM A-36, ambas de 4 mm de espesor. Se determinaron las variables o parámetros adecuados para la soldadura; tales como velocidad de trabajo, intensidad de corriente, siendo estos uno de los objetivos del estudio, para obtener uniones con adecuadas propiedades mecánicas y un correcto balance de fases en toda la junta después de realizado el proceso de soldadura. Se emplearon además una serie de ensayos tales como: Tracción, Dureza, Doblez, Radiografía y Metalografía para evaluar las propiedades del depósito de soldadura. Los ensayos mecánicos destructivos y no destructivos se realizaron de acuerdo a las normas para constatar la integridad del cordón y determinar cómo influye este proceso en las propiedades mecánicas de la junta soldada con respecto al metal base. A través de la metalografía se determinó la distribución de fases en el cordón y zona afectada por el calor con respecto al metal base. Entre otras conclusiones se obtuvo un proceso adecuado de soldadura por arco eléctrico de uniones a tope de acero inoxidable 304 y ASTM A36. Los estudios sobre estos tipos de Aceros, servirán como punto de partida para futuros trabajos, investigaciones y aplicaciones realizadas con este proceso.

INTRODUCCION

Los aceros inoxidable son aleaciones complejas que presentan excelentes propiedades anticorrosivas y mecánicas, son reciclables, mantienen sus propiedades a temperaturas elevadas y criogénicas, etc. Gracias a estas características tienen aplicación prácticamente todos los ámbitos de nuestra vida cotidiana, desde utensilios de cocina hasta numerosos y variados elementos industriales; contribuyendo, de manera indirecta, a satisfacer las necesidades humanas básicas tales como alimentación, salud, construcción, medio ambiente, transporte y energía. Estos aceros están constituidos por elementos aleantes que en equilibrio adecuado brindan las excelentes propiedades antes mencionadas.

En numerosas aplicaciones industriales es necesario fijar o unir elementos de acero inoxidable a estructuras de acero al carbono por lo que se debe tomar en cuenta el comportamiento metalúrgico de ambos materiales.

Para conseguir una unión aceptable se debe considerar una buena configuración de parámetros de soldadura para obtener una buena fusión y dilución de ambos metales, conservando las propiedades originales de los materiales base y evitando discontinuidades que pudieran originar fallas en condiciones de servicio.

En este trabajo, se desarrollarán los procedimientos de soldadura para la fabricación y caracterización de dos juntas soldadas a tope de acero inoxidable austenítico AISI 304 con un acero al carbono ASTM A36. Las uniones serán realizadas mediante dos procesos diferentes: Soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) y Soldadura por arco eléctrico con electrodo

revestido (Shielded Metal Arc Welding,SMAW). La caracterización de los cupones obtenidos incluirá los respectivos ensayos destructivos y no destructivos necesarios para calificar ambos procedimientos de unión.

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 favorecerán los requerimientos mecánicos antes descritos.

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.

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 en el momento de soldar

Estudios adicionales de la influencia y consecuencias de la velocidad y cantidad del gas protector que incide en zona que se está soldando, determinando cuando deja de ser efectiva la protección gaseosa por efecto de la turbulencia formada con la superficie de trabajo, servirán de guía al trabajo en cuestión.

Los efectos de los parámetros de soldadura dictaminarán la calidad final de la unión de la siguiente manera: la velocidad de soldadura influye directamente en la calidad y la fusión del material base; el amperaje interviene en la cantidad de energía que se aporta y la capacidad de fusión del material base.

OBJETIVOS

General:

Fabricación y evaluación de juntas soldadas de acero inoxidable austenítico AISI 304 con acero al carbono ASTM A36 mediante proceso de soldadura eléctrica al arco

Específicos:

- Revisar la bibliografía disponible acerca de la información concerniente a los materiales base y procesos de soldadura de arco eléctrico por electrodo de tungsteno (TIG) y electrodo revestido (SMAW).
- Caracterizar los materiales base mediante el análisis de las propiedades mecánicas, metalográficas y químicas.
- Selección de los conjuntos de parámetros (velocidad de soldadura, intensidad de corriente, voltaje y flujo del gas) que se aplicarán a las juntas a soldar a tope por plasma y fabricación de las probetas.
- Evaluar los cupones de prueba con pruebas no destructivas (inspección visual y radiografía industrial) y destructivas (ensayo de tracción, doblaje, ensayo de dureza y análisis metalográfico) y, en las

cuales de determinarán las características mecánicas y calidad de la soldadura

- Analizar los resultados

- Redacción del trabajo especial de grado.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO

TEÓRICO

.1.- ACEROS INOXIDABLES

1.1.1.- Aceros Inoxidables

Los Aceros Inoxidables según Ignoto⁽¹⁾ son una gamma de aleaciones ferrosas (base hierro) complejas, en las que intervienen un conjunto importante de elementos químicos, donde el principal es el Cromo que contienen un mínimo de 11%. El Cromo forma en la superficie del acero una película pasiva, extremadamente delgada, continua y estable. Esta película deja la superficie inerte a las reacciones químicas.

Tienen una resistencia a la corrosión natural que se forma automáticamente, es decir no se adiciona. Poseen una gran resistencia mecánica, de al menos dos veces la del acero al carbono, son resistentes a temperatura elevada y a temperaturas criogénicas. Son fáciles de transformar en gran variedad de productos y tienen una apariencia estética, que puede variarse sometiendo el acero a diferentes tratamientos superficiales para obtener acabado de espejo, satinado, coloreado, texturizado, etc.

1.1.2.- Aplicaciones de los Aceros Inoxidables

Por ser totalmente reciclables y amigables con el medio ambiente, los aceros inoxidables son ampliamente utilizados en varios sectores, desde la más sofisticada aplicación industrial hasta los utensilios domésticos. Contribuyen, de manera indirecta, a satisfacer las necesidades humanas básicas tales como alimentación, salud, construcción, medio ambiente, transporte y energía.

Algunos ejemplos de productos fabricados con aceros inoxidables son los equipos de procesos químicos y petroquímicos, equipos de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos, cámaras de combustión, sistemas de escape y filtros automotrices, vagones de ferrocarril, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, mobiliario urbano, paneles de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, tanques y recipientes, barriles de cerveza, instrumentos quirúrgicos, agujas hipotérmicas, monedas, tarjetas, ollas y sartenes, cubiertos, lavadoras, lava vajillas y utensilios de cocina.

En la industria química y petroquímica, los aceros inoxidables ofrecen elevada resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas así como un bajo costo de mantenimiento. En la industria de alimentos y bebidas y en la industria farmacéutica, proveen excelentes condiciones de higiene además de su resistencia a la corrosión y duración a largo plazo.

1.1.3.- Clasificación de los Aceros Inoxidables

Según Lancaster⁽²⁾, Pickering⁽³⁾ y el manual de soldadura de la ASM⁽⁴⁾, los aceros inoxidables de acuerdo a su microestructura se pueden clasificar en tres tipos comunes y cuatro tipos especiales:

- Aceros Inoxidables Martensíticos.
- Aceros Inoxidables Ferríticos.
- Aceros Inoxidables Austeníticos.
- Tipos Especiales: Endurecidos por Precipitación, Superausteníticos, Superferríticos y Dúplex.

1.1.3.1.- Aceros Inoxidables Martensíticos

Son la primera rama de los aceros inoxidables, llamados simplemente al Cromo y fueron los primeros desarrollados industrialmente (aplicados en cuchillería). Tienen un contenido de Carbono relativamente alto de (0.2 a 1.2)% y de Cromo de (12 a 18)%. Los tipos más comunes son el AISI 410, 420 y 431. Las propiedades básicas son: Elevada dureza (se puede incrementar por tratamiento térmico) y gran facilidad de maquinado, resistencia a la corrosión moderada. Principales aplicaciones: Ejes, flechas, instrumental quirúrgico y cuchillería.

1.1.3.2.- Aceros Inoxidables Ferríticos

También se consideran simplemente al Cromo, su contenido varía de (12 a 18) %, pero el contenido de Carbono es bajo menos de 0.2%. Los tipos más comunes son el AISI 430, 409 y 434. Las propiedades básicas son: Buena resistencia a la corrosión, la dureza no es muy alta y no pueden incrementarla por tratamiento térmico. Principales aplicaciones: Equipo y utensilios domésticos y en aplicaciones arquitectónicas y decorativas.

1.1.3.3.- Aceros Inoxidables Austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos según Ignoto⁽¹⁾ presentan una gran variedad de propiedades y características como son: estructura cúbica centrada en las caras (estructura gamma), son amagnéticos, presentan excelentes propiedades a la tenacidad, ductilidad, resistencia a la corrosión y excelente soldabilidad. No se endurecen por tratamiento térmico (temple), sino únicamente por deformación en frío o en caliente y tienen una gran estabilidad estructural. Son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, se obtienen agregando Níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita y de aquí adquieren el nombre. El contenido de Cromo varía de (16 a 28)%, el de Níquel de (3,5 a 22)% y el de Molibdeno (1,5 a 6)%. Los tipos más comunes son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317. Las propiedades básicas son: Excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene-limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas. Principales aplicaciones: Utensilios y equipo para uso doméstico, hospitalario y en la industria alimentaria, tanques, tuberías, etc.

1.1.3.4.- Tipos Especiales

Este grupo de aceros inoxidable han sido creados para aplicaciones específicas, entre los cuales podemos destacar los endurecidos por precipitación y los dúplex, los primeros poseen una composición a la cual se le agregan elementos para endurecimiento por envejecimiento y los segundos presentan una microestructura mixta de granos finos, en fracciones volumétricas aproximadamente iguales (50 y 50), lo que le otorga buenas propiedades mecánicas y anticorrosivas.

1.1.4.- Acero Inoxidable Austenítico 304

Acero inoxidable austenítico al Cr, Ni, Mo. Estabilizado al carbono, insensibilidad a la corrosión intercrystalina en soldaduras, no necesita tratamientos térmicos post-soldadura. Mejor aptitud a la deformación en frío y obtención de altos grados de pulimento, posee buena resistencia a los ácidos comúnmente empleados en la industria. El Carbono varía para los casos estándares, grado H (Alto Carbono mayor a 0,08%C) y grado L (Bajo Carbono menor a 0,030%C). En la siguiente tabla se indica la composición química de la lámina de acero inoxidable 304 L.

Tabla 1.1 Composición química de los Aceros Inoxidables Austeníticos

GRADO	304	304L	316	316L	317	317L	321	400	825	625	C-276	DUPLEX 2205
Designación UNS	S30400	S30403	S31600	S31603	S31700	S31703	S32100	N04400	N08825	N06625	N10276	S31803
CARBONO (C) max.	0,08	0,035*	0,08	0,035*	0,08	0,035*	0,08	0,30	0,05	0,10	0,02	0,03
MANGANESO (Mn) max.	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	0,50	1,00	2,00
FOSFORO (P) max.	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	----	----	0,015	0,04	0,03
AZUFRE (S) max.	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,024	0,03	0,015	0,03	0,02
SILICIO (Si) max.	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,50	0,50	0,50	0,08	1,00
CROMO (Cr) max.	18,0 a 20,0	18,0 a 20,0	16,0 a 18,0	16,0 a 18,0	18,0 a 20,0	18,0 a 20,0	17,0 a 20,0	----	19,5 a 23,5	20,0 a 23,0	14,5 a 16,5	21,0 a 23,0
NIQUEL (Ni)	8,0 a 11,0	8,0 a 13,0	10,0 a 14,0	10,0 a 15,0	11,0 a 14,0	11,0 a 15,0	9,0 a 13,0	63,0 a 70,0	38,0 a 46,0	Balance	Balance	4,5 a 6,5
MOLIBDENO (Mo)	----	----	2,0 a 3,0	2,0 a 3,0	3,0 a 4,0	3,0 a 4,0	----	----	2,5 a 3,5	8,0 a 10,0	15,0 a 17,0	2,5 a 3,5
OTROS ELEMENTOS	----	----	----	----	----	----	Ti = 5xC min. y 0,70 max.	Cu=Bal. Fe = 2,50 max.	Fe=Bal. Cu = 1,5 a 3,0 Al = 0,2 max. Ti = 0,6 a 1,2	Fe = 5,0 max. Al = 0,40 max. Ti = 0,40 max. Cb+Ta = 3,15 a 4,15 Co = 1,0 max.	Co = 2,50 max. W = 3,00 a 4,50 Fe = 4,00 a 7,00 V = 0,35 max.	N = 0,08 a 0,20

1.1.5.- Influencia de la Composición Química sobre la Estructura

Todos los aceros inoxidables 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, Te, sobre todo los inoxidables 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.

1.1.6.- Diagrama de Schaeffler y de DeLong

Los diagramas más conocidos y utilizados son el de Schaeffler⁽⁵⁾ y el de DeLong⁽⁶⁾. 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.

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 tenemos, 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.

1.1.6.1.- Diagrama de Schaeffler

En 1949, Schaeffler⁽⁵⁾ 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)⁽⁶⁾ 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, utilizando los siguientes modelos empíricos:

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 * \%Si + 0,5 * \%Nb \quad [1]$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 * \%C + 0,5 * \%Mn \quad [2]$$

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 1](#) presenta el diagrama básico de Schaeffler, el cual posee una precisión de más o menos 4% de ferrita.

Niquel Equivalente = $\%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn$

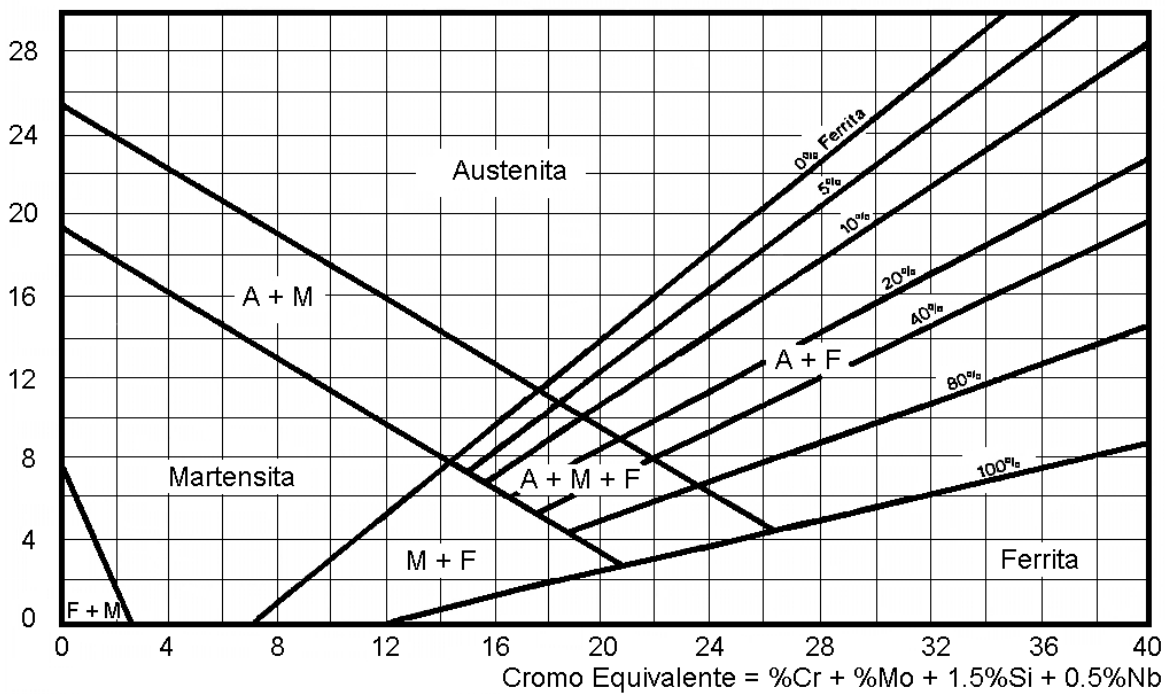


Fig. 1.1 Diagrama Schaeffler.

1.1.6.2.- Diagrama de DeLong

En 1974, DeLong⁽⁶⁾ publica su diagrama, modifica y afina el diagrama de Schaeffler, introduce un coeficiente para el Nitrógeno en la escala del Níquel Equivalente (Ni_{eq}) 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^(6, 7) 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.

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.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 * \%Si + 0,5 * \%Nb \quad [3]$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 * \%C + 30 * N + 0,5 * \%Mn \quad [4]$$

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 inoxidable.

La [figura 2](#) muestra el diagrama de DeLong, que tiene la virtud de incorporar la marcada influencia austenizante que tiene el nitrógeno en el equilibrio de fases.

$$\text{Niquel Equivalente} = \%Ni + 30\%C + 30\%N + 0.5\%Mn$$

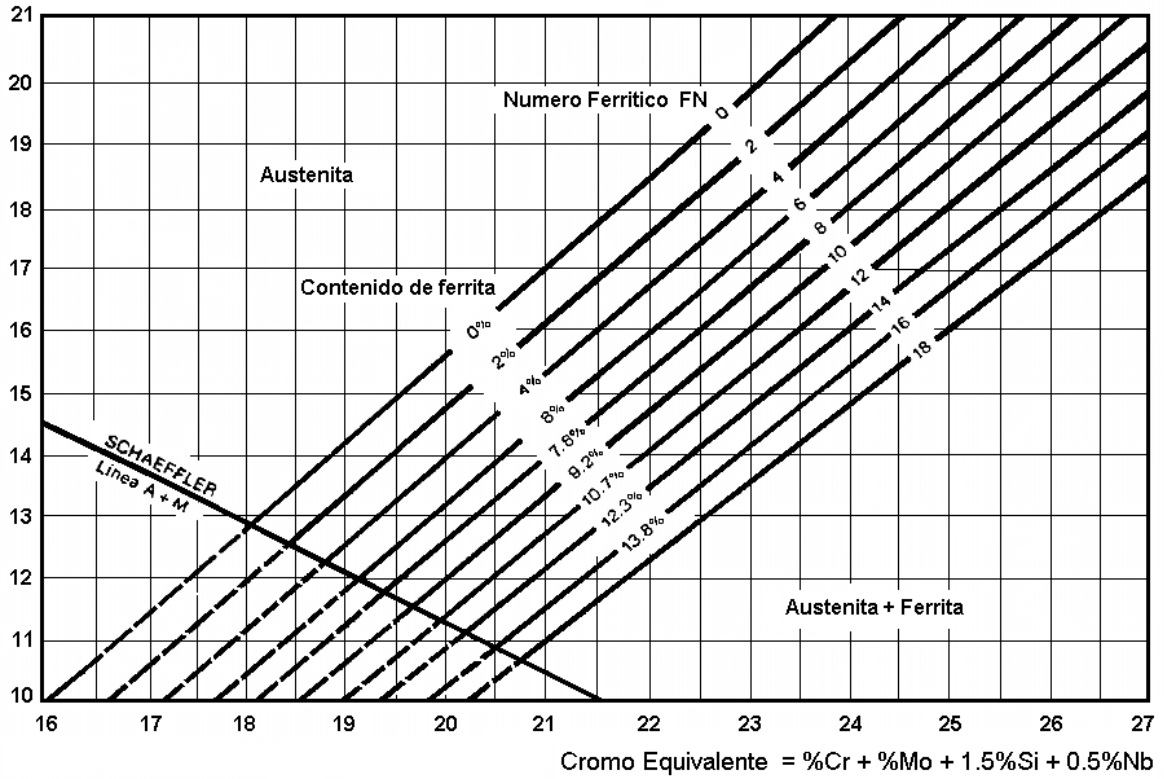


Fig. 1.2 Diagrama de DeLong.

1.1.7.- 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 3](#). 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 ^(8,9), puede presentar ciertos contenidos y morfologías de ferrita delta ⁽¹⁰⁻¹⁴⁾ metaestable a temperatura ambiente debido al efecto de segregación durante la solidificación fuera de equilibrio.

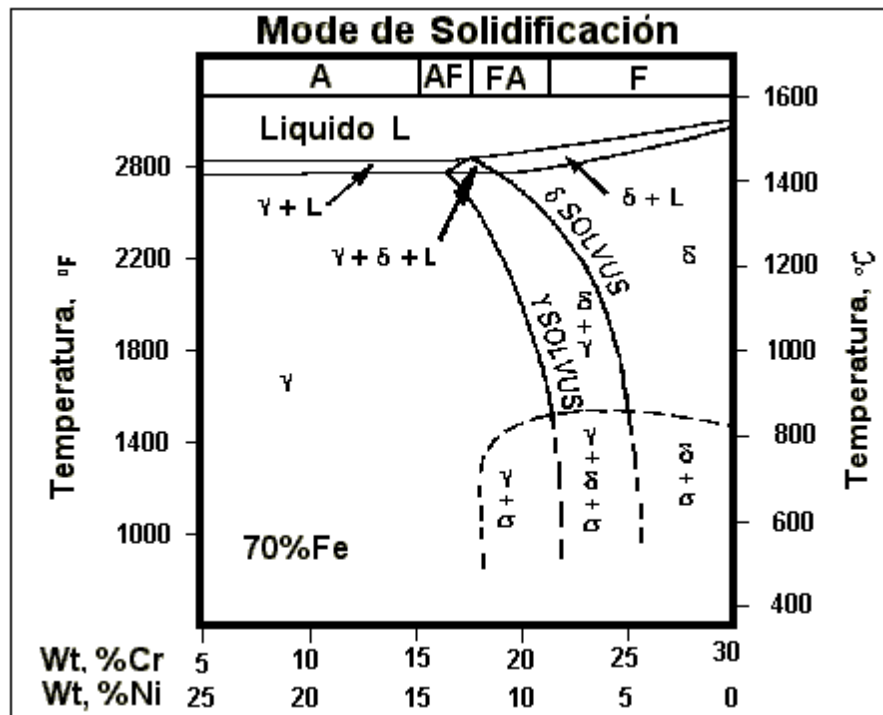


Fig. 1.3. Sección del diagrama de equilibrio Fe-Cr-Ni, (70% Fe).

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 fueron reportadas por David⁽⁹⁾, Kotecki⁽¹¹⁾, Brooks^(10,13), Suutala⁽¹⁴⁾ y Lippold⁽¹⁵⁾, las cuales se esquematizan en la [figura 4](#) para un intervalo de composiciones que se expresan en función de las relaciones de Cromo Equivalente (Cr_{eq}) y Níquel Equivalente (Ni_{eq}).

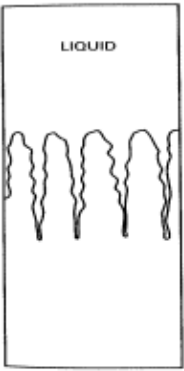
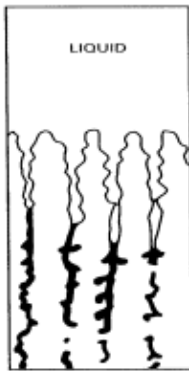



SOLIDIFICACIÓN PRIMARIA AUSTENÍTICA		SOLIDIFICACIÓN PRIMARIA FERRITICA		
				
a.- Austenita	b.- Ferrita Eutética	c.- Ferrita Vermicular	d.- Ferrita Lathy	e.- Austenita Widmanstätten

Fig.1.4 Morfologías de ferrita delta según el modo primario de solidificación.

1.1.7.1.- Solidificación Primaria Austenítica

Las secuencias de solidificación y transformación en estado sólido de los metales austeníticos, han sido estudiadas por muchos autores entre lo que se encuentran Brooks⁽¹⁰⁾ y Suutala⁽¹⁴⁾ los cuales se esquematizan en la [figura 4](#) en los casos a y b. La ferrita delta solidifica en modos o fase primaria austenítica (A) y Austenítica-Ferrítico (AF) respectivamente; esto se debe a que en el espaciado ínter dendrítico, precipita un eutéctico formado por austenita y ferrita delta. Este eutéctico, puede transformarse parcial o totalmente en austenita secundaria durante el enfriamiento, originando una estructura dúplex o totalmente austenítica en el metal de soldadura. La estructura obtenida dependiendo de la relación Cr_{eq}/Ni_{eq} puede ser del tipo celular, globular o de filamentos continuos. Los aceros inoxidable que tienen una relación Cr_{eq}/Ni_{eq} menor a 1,48 solidifican como austenita, como la fase primaria de solidificación⁽¹²⁾. La [figura 5](#) según Suutala⁽¹⁴⁾ y el gráfico WRC⁽¹⁶⁾ lo indican. El contenido de ferrita en este caso es bajo ($FN \leq 3$).

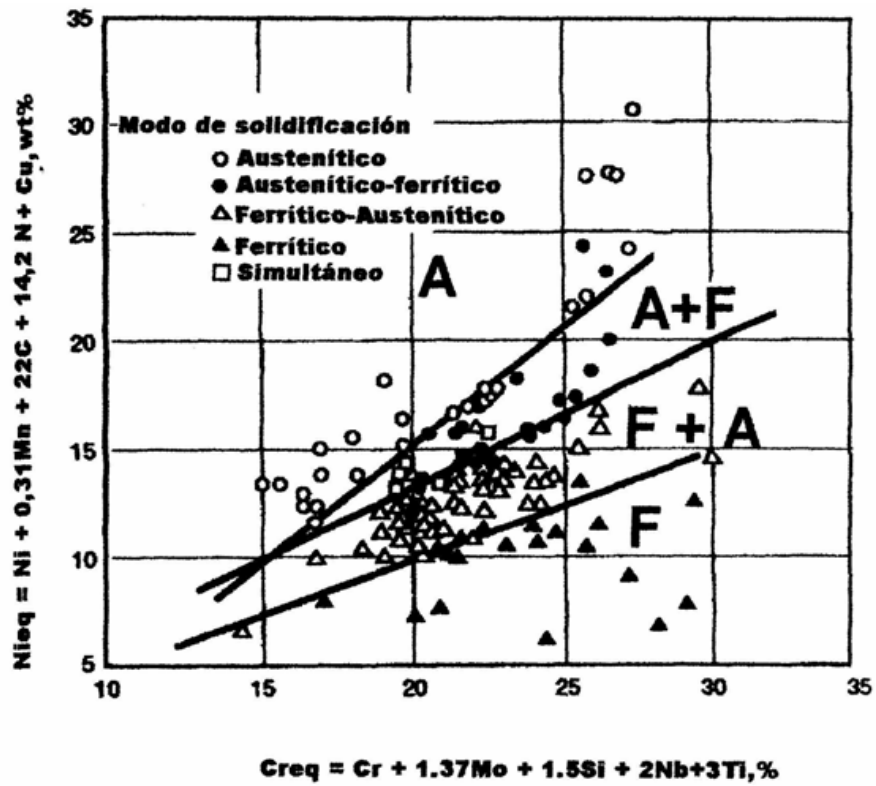


Fig.1.5 Modo primario de solidificación para varias relaciones de Cr_{eq}/Ni_{eq} .

1.1.7.2.- Solidificación Primaria Ferrítica

Los Aceros Inoxidables Austeníticos que solidifican en modo o fase primaria ferrita delta, exhiben un intervalo más amplio de morfología que se corresponde con los casos c, d fase Ferrítica-Austenítica (FA) y e como fase Ferrítica (F) de la figura 4. El contenido de ferrita varía de 3 a 20 FN.

Estudios realizados por Brooks⁽¹⁷⁾ y otros, presentan esquemas indicados en la figura 4, que relacionan las diferentes morfologías de la ferrita, a medida que la relación Cr_{eq}/Ni_{eq} se incrementa de 1,55 a 1,8. La morfología vermicular o dendrítica lathy o en placas y otras de tipo acicular o Widmanstatten, productos de la temperatura de transformación, depende de la composición y de la velocidad de solidificación y de una posterior transformación en estado sólido⁽¹³⁾.

1.1.7.3.- Ferrita con Morfología Vermicular

La ferrita con morfología vermicular o dendrítica figura 4c, es una de las más comunes que se presentan en la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos, con la presencia de una estructura dúplex, poseen un número ferrítico FN entre 5 y 15. Puede aparecer como una red esquelética alineada o con una forma de curvas suaves. Esta morfología se localiza en las regiones interdendríticas como ferrita delta primaria, formada por un eutéctico compuesto por austenita y ferrita delta. Durante el enfriamiento la austenita del eutéctico crece, consumiendo parte de la ferrita eutéctica de la fase primaria, por medio de una transformación de fases en estado sólido la cual es controlada por la velocidad de enfriamiento.

1.1.7.4.-Ferrita con Morfología Laty

La ferrita con morfología en placas o Laty [figura 4d](#), se caracteriza por presentar columnas largas de una red de ferrita entrelazadas, orientada a lo largo de la dirección de crecimiento de una matriz austenítica. Su contenido de ferrita varía entre 13 y 15, se desarrolla para relaciones de Cr_{eq}/Ni_{eq} que oscilan en el intervalo 1,48 a 1,95. Esta morfología, al igual que la Vermicular, resulta de la disolución de la ferrita durante el enfriamiento y puede presentarse algunas veces entrelazadas con ferrita del tipo Vermicular. Esta morfología es típica en métodos de soldadura con elevado contenido de ferrita enfriada rápidamente.

1.1.7.5.- Ferrita con Morfología Acicular ó Widmanstatten

La morfología Acicular o Widmanstatten [figura 4e](#), se caracteriza por un arreglo al azar de agujas de ferrita distribuidas en una matriz austenita, es decir no posee direccionalidad y nuclea enteramente dentro de la ferrita. Es promovida por altas velocidades de enfriamiento; con un FN promedio de 13 y es típica de metales de soldadura con Cr_{eq}/Ni_{eq} mayores de 1,95.

1.1.7.6.- Ferrita con Morfología Globular

La ferrita se presenta en forma de glóbulos distribuidos al azar en una matriz de austenita. La estructura no tiene direccionalidad y no está relacionada con la estructura de solidificación. Esta morfología es usualmente observada en el metal de soldadura con múltiples pasadas que se somete a un ciclo térmico durante la soldadura o fue sometido a un

tratamiento térmico después de la soldadura. El origen de esta morfología reside en la inestabilidad de forma de cualquiera de los otros tipos de morfología de ferrita. Como resultado del ciclo térmico durante las pasadas sucesivas, las estructuras Vermicular, Lathy y acicular, tienden a desaparecer dejando pequeños glóbulos desconectados de ferrita.

1.2.-_SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

1.2.1.- Introducción a la Soldabilidad de los Aceros Inoxidables Austeníticos

Se clasifican en la serie 300, de acuerdo con el American Iron and Steel Institute, AISI. Su estado normal de suministro es el de solubilizado, conseguido mediante calentamiento a una temperatura entre 1.050 °C y 1.150 °C, en función de su contenido de carbono y enfriando desde esa temperatura en agua o aire forzado.

La soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos es buena, pues no presentan ninguna transformación de fase desde la temperatura de fusión hasta la temperatura ambiente, incluso en la mayoría de los casos hasta muy bajas temperaturas (p.e. – 200 °C). Ahora bien, para realizar correctamente el soldeo, debe tenerse en cuenta la influencia de los puntos siguientes:

- Propiedades físicas.
- Agrietamiento en caliente del metal austenítico aportado.
- Contenido de Ferrita en el Metal de Soldadura.
- Pre calentamiento y tratamiento térmico del conjunto soldado.

1.2.2.- Propiedades Físicas

Cuando se sueldan aceros austeníticos es muy importante tener en cuenta sus particulares propiedades físicas. Los aceros inoxidable^s austeníticos según Ignoto⁽¹⁾ tienen un coeficiente de dilatación aproximadamente un 50% más elevado que los aceros al carbono, mientras que la conductividad térmica es aproximadamente un 40% inferior.

La contracción de las juntas soldadas será considerablemente mayor, y la soldadura deberá realizarse prestando una atención especial al riesgo de posibles distorsiones o deformaciones del conjunto soldado. Para amortiguar las tensiones es preciso tomar las precauciones siguientes:

- Realizar el soldeo con baja aportación de calor, para lo cual es indispensable seleccionar el método adecuado de soldadura.
- Distribuir el calor de forma equilibrada, lo que se consigue gracias a una planificación previa de las distintas etapas de soldadura y efectuándola lo más simétricamente posible.
- Procurar que el nivel de embridamiento del conjunto soldado sea el más bajo posible.

Por otra parte y a la vista de su baja conductividad térmica, la ZAC será más estrecha que la resultante de la soldadura de otros tipos de aceros.

1.2.3.- Agrietamiento en Caliente de las Soldaduras Austeníticas

El agrietamiento en caliente es un inconveniente típico en la soldadura de los aceros inoxidable^s austeníticos. Las grietas en los cordones son debidas a una acumulación de impurezas debidas a segregaciones en el metal de aporte último en solidificar. En tales zonas se forman superficies

débiles, que pueden romperse y generar grietas bajo la influencia de la propia tensión de contracción de la soldadura.

Existen tres formas de eliminar el agrietamiento en caliente:

a) Reducir las tensiones mecánicas: Esto se logra tomando en cuenta las recomendaciones expuestas en el punto anterior (propiedades físicas).

b) Eliminar las impurezas: Las principales impurezas implicadas en el agrietamiento en caliente son azufre (S) y fósforo (P), aunque existen otros elementos nocivos, como plomo (Pb), estaño (Sn), antimonio (Sb), bismuto (Bi), niobio (Nb) y en el metal de soldadura completamente austenítico el silicio (Si). Como, en general, los metales aportados presentan contenidos menores de estos elementos residuales que los de base, es mejor realizar el soldeo con material de aporte que sin él. En todo caso, cuanto menor sea el contenido de estas impurezas, tanto menor será el riesgo de agrietamiento en caliente, sobre todo si se trata de ejecutar cordones de soldadura con una estructura completamente austenítica.

c) Disminuir las segregaciones: La manera de disminuir las segregaciones consiste en disponer de una cierta cantidad de ferrita en la matriz austenítica del metal de soldadura. La razón de ello reside en que la ferrita es capaz de disolver elementos tales como azufre y fósforo, que de otro modo se segregarían. Además, la ferrita se distribuye a lo

largo de los granos de austenita y forma una malla plástica que resiste al agrietamiento en caliente mediante una acción similar al grapado de los granos de austenita.

Por último, en el supuesto que sea necesario un material de soldadura completamente austenítico o con un contenido mínimo de ferrita debido a las condiciones de trabajo del conjunto soldado, se puede solucionar el problema del agrietamiento en caliente del cordón completamente austenítico, utilizando un metal de aporte con mayor contenido de Mn (3 a 7%) y con contenidos bajísimos de S, P y Si.

1.2.4.- Contenido de Ferrita en el Metal de Soldadura

Una cierta cantidad de ferrita en el metal aportado tiene una influencia favorable para combatir el agrietamiento en caliente. Su presencia también es positiva al incrementar las características mecánicas del metal de soldadura pero, al mismo tiempo es desfavorable al disminuir la resistencia a la corrosión frente a ácidos oxidantes calientes y permitir la formación de fase sigma, con los inconvenientes mecánicos y químicos que esto conlleva.

Por todo ello, es imprescindible disponer de un contenido adecuado de ferrita en el metal de soldadura. Cuando no se requiera un cordón completamente exento de ferrita como ocurre en plantas de síntesis de urea, Ignoto⁽¹⁾ considera que un contenido situado entre 5 y 10% es el idóneo para beneficiarse de las ventajas de su presencia y para que sus inconvenientes queden reducidos al mínimo. Este porcentaje ideal de ferrita se consigue seleccionando adecuadamente tanto el material de aportación como los parámetros y método de soldadura.

La determinación del contenido de ferrita en un acero inoxidable depositado por soldadura puede llevarse a cabo por métodos magnéticos y metalográficos.

Schaeffler^(1, 5) determina el porcentaje de ferrita utilizando medios metalográficos. Los dispositivos de medición magnéticos son más útiles, pero deben considerarse como procedimientos de medida de carácter auxiliar. Por ello, se ha establecido un número arbitrario normalizado de ferrita (FN), que es el preferido por DeLong para asignar su contenido. A niveles bajos el número y el porcentaje son idénticos. Sin embargo, estos dos valores difieren sustancialmente cuando se presentan grandes cantidades de ferrita en los aceros inoxidables.

El contenido de ferrita del metal depositado es función de diversos factores, tales como:

- La operatoria del proceso: longitud de arco y contaminación atmosférica, especialmente de N₂.
- La forma y solape al realizar el depósito.
- La velocidad de enfriamiento del cordón.
- Los parámetros de soldeo.
- El grado de dilución del metal de base en el depositado, que afecta fundamentalmente al contenido en Cr.

Por todo lo anterior, no es extraño que puedan detectarse variaciones significativas en el contenido de ferrita de una soldadura a otra y dentro de

ella, entre la raíz y la última capa de la misma. Por ejemplo, en la soldadura de tuberías se ha encontrado que aproximadamente la mitad de las uniones examinadas diferían en 2 FN, como mínimo, de los valores obtenidos durante la cualificación del procedimiento.

En las aplicaciones en las que el contenido de ferrita en el metal aportado es crítico, el procedimiento de soldadura debe controlarse rigurosamente. Las variaciones de N_2 y Cr afectan significativamente al contenido de ferrita. Una técnica inadecuada puede producir contaminaciones por N_2 debidas al exceso de longitud del arco y a la pérdida de Cr por oxidación. El resultado puede ser una unión con bastante menos ferrita que la especificada.

1.2.5.- Pre calentamiento y Tratamiento Térmico de las Juntas Soldadas

Se puede afirmar que ninguna operación de soldadura de aceros inoxidable austeníticos exige un pre calentamiento del material, ni el mantenimiento de la temperatura entre pasadas. Tras la soldadura, en la mayoría de los casos, tampoco es necesario realizar ningún tratamiento térmico del conjunto soldado. Se efectúa únicamente cuando es exigible un destensionado del material, ya sea por razones mecánicas al tratarse, por ejemplo, de espesores muy gruesos, ya sea por razones químicas al tener que trabajar el material en presencia de un medio en el que exista riesgo de corrosión bajo tensiones.

El tratamiento térmico ideal para el destensionado de los aceros inoxidables austeníticos según Ignoto⁽¹⁾ es el de disolución entre 1.000 y 1.100 °C, seguido de enfriamiento rápido en agua. Ahora bien, en la mayoría de los casos este tratamiento es imposible de realizar por razones prácticas. En los casos en que no sea posible y se requiera un destensionado, éste se efectúa entre 850 y 950° C, eligiendo siempre una temperatura y una duración adecuadas, para que no se originen efectos secundarios nocivos, como precipitación de carburos y formación de fases intermetálicas

1.3- SOLDADURA POR ELECTRODO REVESTIDO SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

1.3.1- Principios el proceso SMAW

El sueco **Oscar Kjellberg** en 1904, descubre el electrodo recubierto, hecho trascendente en el desarrollo de la soldadura aunque la era industrial de las uniones soldadas por arco eléctrico empieza en Europa a comienzos de la década del 50. El soldeo por arco con electrodo revestido SMAW, también llamado **Manual Metal Arc (MMA)** es un proceso en el que la fusión del metal se produce gracias al calor generado por un arco eléctrico establecido entre el extremo de un electrodo metálico revestido y el metal base de una unión a soldar, ver [figura 6](#). Con el calor producido en el arco, el metal solidificado (cordón) se obtiene por la fusión del electrodo en forma de

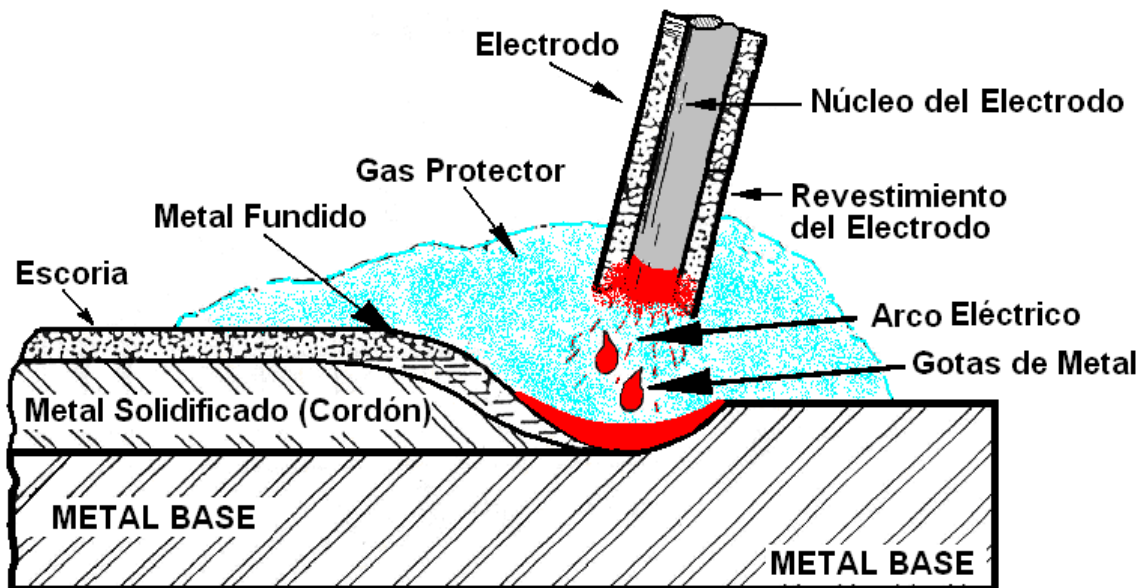
pequeñas gotas (figura 6). La protección se obtiene por la descomposición del revestimiento en forma de gases y en forma de escoria líquida que flota sobre el baño de fusión y, posteriormente, solidifica. En el arco se produce una atmósfera adecuada para que se produzca la transferencia de las gotas (metal y escoria fundida) desde el electrodo hacia el baño de fusión. La escoria por su tensión superficial y viscosidad flota y solidifica formando una capa protectora del baño fundido. El soldeo por arco con electrodo revestido también se le conoce por las siguientes denominaciones:

1.3.2- Descripción del proceso de soldadura SMAW

El soldeo por arco con electrodos revestidos (Figura 6) es uno de los procesos de mayor utilización, especialmente en soldaduras de producción cortas, trabajos de mantenimiento y reparación, así como en construcciones en campo. La mayor parte de las aplicaciones del soldeo por arco con electrodos revestidos se dan con espesores comprendidos entre 3 y 38 mm. **El proceso es aplicable a aceros al carbono, aceros aleados, inoxidable, fundiciones y metales no férricos como aluminio, cobre, níquel y sus aleaciones.**

Los sectores de mayor aplicación son la construcción naval, de máquinas, estructuras, tanques y esferas de almacenamiento, puentes, recipientes a presión y calderas, refinerías de petróleo, oleoductos y gaseoductos y en cualquier otro tipo de trabajo similar. Se puede emplear en combinación con otros procesos de soldeo, realizando bien la pasada de raíz o las de relleno, en tubería se suele emplear en combinación con el proceso

GTAW. La raíz se realiza con GTAW completándose la unión mediante soldeo SMAW.



SOLDADURA MANUAL CON ELECTRODOS REVESTIDOS

Figura 1.6 Principales partes del arco eléctrico en la soldadura SMAW.

1.3.3- Ventajas y limitaciones del proceso SMAW

VENTAJAS

El equipo de soldeo es relativamente sencillo, no muy caro y
.- portátil.

El metal de aportación y los medios para su protección durante el soldeo proceden del propio electrodo revestido. No es necesaria protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares.

-

Es menos sensible al viento y a las corrientes de aire que los procesos por arco con protección gaseosa. No obstante el proceso debe emplearse siempre protegido del viento, lluvia y nieve.

-

Se puede emplear en cualquier posición, en locales abiertos y en locales cerrados, incluso con restricciones de espacio. No requiere conducciones de agua de refrigeración, ni tuberías o botellas de gases de protección, por lo que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía.

-

Es aplicable para una gran variedad de espesores, en general mayores de 2 mm.

-

Es aplicable a la mayoría de los metales y aleaciones de uso normal.

-

LIMITACIONES

- Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición y por la necesidad de retirar la escoria, por lo que en determinadas aplicaciones ha sido desplazado por otros procesos.

- Requiere gran habilidad por parte del soldador.

- No es aplicable a metales de bajo punto de fusión como plomo, estaño, cinc y sus aleaciones, debido a que el intenso calor del arco es excesivo para ellos. Tampoco es aplicable a metales de alta sensibilidad a la oxidación como el titanio, circonio, Tántalo y niobio, ya que la protección que proporciona es insuficiente para evitar la contaminación por oxígeno de la soldadura.

- No es aplicable a espesores inferiores a 1,5 - 2 mm.

- La tasa de deposición es inferior a la obtenida por los procesos que utilizan electrodo continuo, como FCAW o GMAW. Esto se debe a que el electrodo solo puede consumirse hasta una longitud mínima (unos 5 cm.), cuando se llega a dicha longitud el soldador tiene que retirar la colilla del electrodo no consumida e insertar un nuevo electrodo.

- Aunque en teoría se puede soldar cualquier espesor por encima de 1,5 mm, el proceso no resulta productivo para espesores mayores de 38 mm. Para estos espesores resultan más adecuados los procesos SAW y FCAW.

1.3.4- Esquema del proceso SMAW

El equipo de soldadura es muy sencillo, consiste en una fuente de energía, el porta electrodo, la conexión de masa (tierra) y los cables de soldeo.

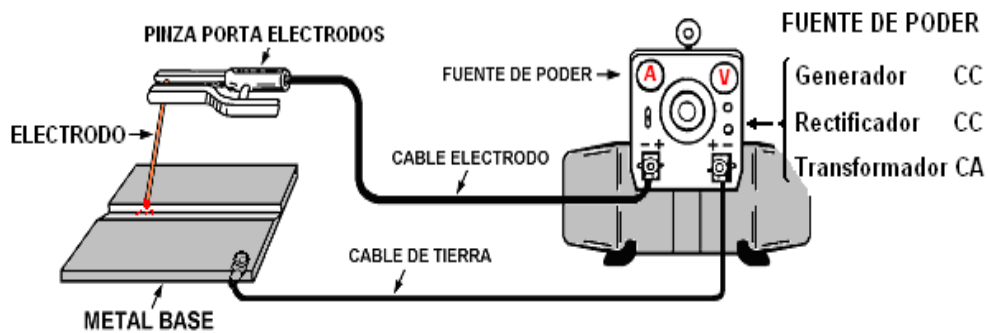


Figura 1.7 Principios de la soldadura eléctrica al arco SMAW.

1.3.5- Selección del tipo de corriente

El soldeo por arco con electrodos revestidos se puede realizar tanto con corriente alterna como con corriente continua, la elección dependerá del tipo, de fuente de energía disponible, del electrodo a utilizar y del material base. En la tabla 1 se indica la corriente adecuada en función de una serie de parámetros. En cuanto a la polaridad utilizada con corriente continua depende del material a soldar y del electrodo empleado, sin embargo se

recuerda que se obtiene mayor penetración con polaridad directa, electrodo conectado al (-).

La clase de corriente depende fundamentalmente del tipo de electrodo que se va a utilizar. A pesar de que la corriente continua es la más común, la amplia gama de electrodos actualmente en el mercado, que deben utilizarse con corriente alterna ha hecho que crezca el uso de este tipo de corriente. El costo de la energía con corriente alterna es menor que con corriente continua pero representa una parte poco relevante del costo total de soldadura, no siendo un factor decisivo la selección del tipo de corriente. En la tabla se reseñan algunas ventajas e inconvenientes de los dos tipos de corriente.

Tabla 1.2 Comparación entre uso de corriente continua y alterna

Características	CORRIENTE CONTINUA	CORRIENTE ALTERNA
Perdida de tensión En cables.	Grande Los cables han de ser tan cortos como sea posible.	Pequeña Preferible para soldar a gran distancia de la fuente.
Electrodos	Son validos todos los tipos de electrodos.	El revestimiento debe contener sustancias que restablezcan el arco.
Encendido del arco	Fácil	Más difícil sobre todo en electrodos de pequeño diámetro.
Mantenimiento del arco	Fácil	Más difícil, excepto cuando se utilizan electrodos de gran rendimiento.

Efecto de soplo magnético	Muy sensible, sobre todo cuando la soldadura está cerca de extremos de la pieza. El efecto se incrementa con la intensidad.	Es raro que se produzca. La alternancia de ciclos neutraliza los campos magnéticos.
Salpicaduras	Poco frecuentes	Más frecuentes. Debidas a la pulsación.
Posiciones de soldeo	Más fácil de usar «En posición» para soldaduras de secciones gruesas.	Fácil de usar en cualquier posición si se dispone del electrodo adecuado.
Soldadura de hojas metálicas	Preferible	Si no se actúa con gran precaución, se puede deteriorar el material debido a la dificultad de encendido del arco.
Soldaduras de secciones gruesas	Rendimiento bajo	Preferible pues al poder utilizar mayor diámetro de electrodo y más intensidad de corriente, se logra mayor rendimiento.

1.3.6- Electrodos revestidos

El elemento fundamental de este proceso es el electrodo, que establece el arco protege el baño de fusión y que, al consumirse, produce la aportación del material que, unido al material fundido del metal base, va a constituir la soldadura. Los electrodos revestidos están formados por: **Un alambre** de sección circular uniforme, denominado alma, de composición química normalmente similar a la del metal base. **El revestimiento** que es un cilindro que envuelve el alma, concéntrica con ella y de espesor uniforme, constituido por una mezcla de compuestos que caracterizan el electrodo y que cumple

varias funciones, las cuales evitan los inconvenientes del electrodo desnudo. Los electrodos tienen **longitudes normalizadas** de 150, 200, 250, 300, 350 y 450 mm, en función del diámetro del electrodo. Un extremo del alma esta sin cubrir de revestimiento, en una longitud de 20 a 30 mm., para la inserción del mismo en la pinza del portaelectrodo. Los diámetros de los electrodos también están normalizados, siendo los más comunes los de **1,6**; **2**; **2,5**; **3,25**; 4; **5**; 6; 6,3; 8; 10; 12,5 mm (diámetro del alma). Tanto en la longitud como en el diámetro se ha señalado con negrita los más comunes. Atendiendo al **espesor** del revestimiento, o a la relación entre el diámetro del alma y del revestimiento, los electrodos se clasifican en:

Delgados Los electrodos de revestimiento delgado protegen poco el metal fundido, por lo que solo se utilizan en el aprendizaje de las técnicas de soldeo.

Medios Estos electrodos obtienen mayor estabilidad del arco, permiten el soldeo con corriente alterna y protegen mejor al metal soldado, la escoria recubre al metal ya solidificado reduciendo la velocidad de enfriamiento y la oxidación.

Gruesos Los electrodos con revestimiento grueso permiten obtener las mejores cualidades del metal soldado.

1.3.7- Acción del revestimiento de los electrodos

Un electrodo revestido, como su nombre lo indica, es una varilla metálica o alambre forjado de un material compuesto de diversos productos químicos, minerales, ferroaleaciones, óxidos metálicos; que sirven como elemento del circuito eléctrico para formar el arco. Entre su extremo y el metal base, generan una atmósfera de protección a partir de la combustión de ciertos compuestos del revestimiento y el metal del núcleo se transfiere a través del arco al cordón de soldadura. En este tipo de soldadura es conveniente destacar las funciones que desempeñan los revestimientos, ya que de ellos depende fundamentalmente la calidad de los depósitos. Los revestimientos actúan de la siguiente manera.

- **Estabilizan el arco eléctrico.**
- **Forman una pantalla gaseosa que protege los metales fundidos.**
- **Sirven como medio para efectuar depósitos metálicos.**
- **Permiten la ejecución de soldaduras en posición.**
- **Forman una escoria que purifica el metal.**

- **ESTABILIZAN EL ARCO ELECTRICO**

Los revestimientos contienen ciertos componentes que ayudan a estabilizar el arco, con el fin de asegurar la continuidad del proceso sin interrupciones. Estos son principalmente sales de sodio y potasio, que se disocian en el arco formando iones conductores de electricidad, volviendo conductor el espacio que existe entre los polos. Cuando un electrodo contiene sales de sodio, es apto para ser usado con corriente continua, es decir que se puede efectuar la soldadura con un rectificador, generador o convertidor. Cuando contiene sales de potasio es apto para corriente alterna y continua, o

sea, se puede usar cualquier fuente de corriente para soldadura: transformadores, rectificadores, etc.

- **FORMAN UNA PANTALLA QUE PROTEGE LOS METALES FUNDIDOS**

Los revestimientos contienen ciertos compuestos que se queman en el arco, generando gases, que protegen los metales fundidos; tanto el que se transfiere en el arco como el del baño, de la influencia del aire. El aire está compuesto fundamentalmente por oxígeno y nitrógeno, por lo cual los metales fundidos expuestos a él, se oxidan rápidamente, dando como resultado soldaduras de escasa cohesión y pobres propiedades mecánicas, además, si los óxidos quedan atrapados dentro del cordón, las propiedades mecánicas de este sufrirán un deterioro todavía mayor

- **SIRVEN COMO MEDIO PARA EFECTUAR DEPOSITOS METALICOS**

Aparte del metal del núcleo o varilla del electrodo, este también contiene polvos metálicos en su revestimiento, con el fin de cambiar la composición química del depósito. Muchos metales se pueden transferir desde el revestimiento, modificando la composición química del cordón y así, mejorar la resistencia mecánica, la dureza, la ductilidad, las propiedades anticorrosivas, etc., o bien para incrementar la cantidad de metal que deposita por unidad de tiempo, convirtiéndolo en un electrodo de alto rendimiento. También, contiene elementos desoxidantes que evitan la formación de poros.

- **PERMITEN LA EJECUCION DE SOLDADURAS EN POSICION**

El revestimiento al formar una escoria encima del metal fundido, ayuda a que este último permanezca en su sitio, que no gotee o caiga por efecto de la gravedad, ya que la escoria tiene cierta viscosidad y tensión superficial. Al ejecutar soldadura; en posición vertical o sobre cabeza, la escoria no debe quedar incluida en el cordón, tiene que estar encima del metal fundido, protegiéndolo hasta que se solidifique y manteniéndolo para lograr la cohesión perfecta de las partes a unir.

- **FORMAN UNA ESCORIA QUE PURIFICA EL METAL**

Estando el metal y la escoria fundidos, esta ejerce una función purificadora, eliminando elementos indeseables, tales como el azufre y fósforo, que de permanecer en el cordón, por encima del máximo tolerado, lo afectaría negativamente, ya sea desmejorando sus propiedades mecánicas o provocando grietas en las juntas soldadas.

SOLDADURA POR GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)

1.4.1.- Fundamentos del proceso

El proceso GTAW se basa en el uso de un electrodo de tungsteno (o una aleación de tungsteno) no consumible sostenido en una torcha (o soplete). Se alimenta un gas de protección para proteger el electrodo, la pileta líquida y el metal de soldadura durante la solidificación de la contaminación atmosférica. El arco eléctrico se produce por el paso de la

corriente a través del gas de protección ionizado, que conduce la electricidad. El arco se establece entre la punta del electrodo y la superficie de trabajo. El calor generado funde el metal base. Una vez establecido el arco y el charco de soldadura, el soplete se mueve a lo largo de la unión y el arco funde progresivamente las superficies de empalme. Si se usa alambre de aporte, se alimenta por el borde delantero del charco de soldadura para llenar la unión.

Todos los sistemas de soldadura GTAW tienen en común cuatro componentes básicos.

- 1. Soplete o antorcha**
- 2. -Electrodo**
- 3. Fuente de poder**
- 4. Sistema de alimentación del gas de protección.**

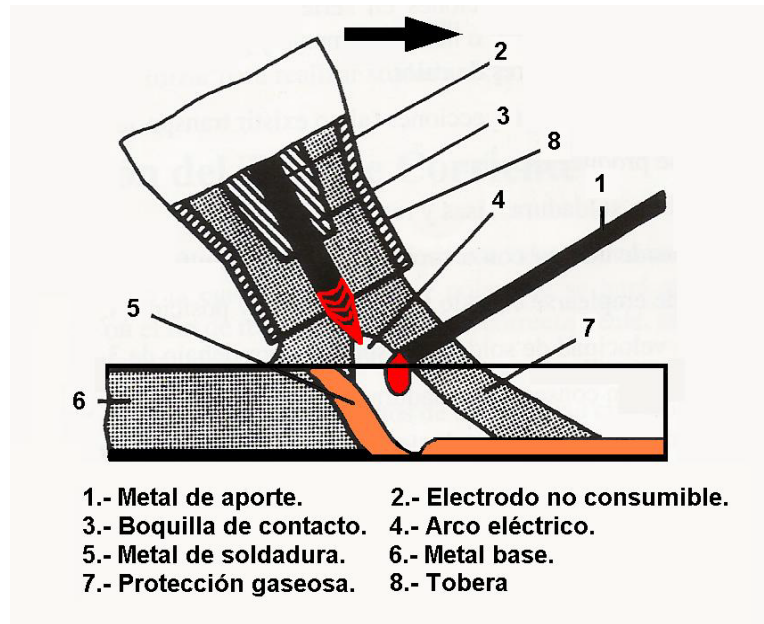


Figura 1.8 Soplete de Electrodo de Tungsteno y Gas (GTAW).

1.4.3. Ventajas y limitaciones

Los beneficios más importantes de este proceso son:

1. Produce soldaduras de buena calidad, generalmente libres de defectos
2. Esta libre de salpicaduras que ocurren con otros procesos de arco.
3. Puede utilizarse con metal de aporte o sin él, según requiera la aplicación específica.
4. Ofrece un control excelente de la penetración en la pasada de raíz.

5. Puede producir soldaduras económicas a altas velocidades.
6. Las fuentes de potencia son de costos relativamente bajos
7. Permite controlar de manera precisa las variables de soldadura.
8. Sirve para soldar casi todos los metales incluso aleaciones disímiles
9. Permite controlar en forma independiente la fuente de calor y la adición de metal de aporte.

Algunas de las limitaciones del proceso son:

1. Las tasas de deposición son más bajas que con GMAW.
2. El soldador requiere un poco más de destreza y coordinación que con los otros procesos de soldadura.
3. Para espesores mayores de 10mm (3/8") resulta más costoso que los procesos con electrodo consumible
4. Es difícil proteger la zona de soldadura en lugares donde hay corrientes de aire

Entre los problemas potenciales del proceso están:

1. Puede haber inclusiones de tungsteno si se permite que el electrodo haga contacto con la parte líquida.

2. Una inadecuada posición del metal de aporte podrá producir contaminación dl mismo.

3. Requiere buena calidad en el metal base y en el aporte.

4. Puede haber contaminación o porosidad causada por fuga del refrigerante en el caso de antorchas refrigeradas por agua.

5. Puede haber golpe, o desviación del arco, al igual que en los otros procesos por arco

1.4.4- Aplicaciones del proceso de soldadura GTAW

El proceso TIG se puede utilizar para el soldeo de todos los materiales, incluidos el aluminio y el magnesio y los materiales sensibles a la oxidación como el titanio, circonio y sus aleaciones.

Puesto que el proceso posee las virtudes necesarias para conseguir soldaduras de alta calidad y con una elevada pureza metalúrgica, exentas de defectos y buen acabado superficial, es ideal para soldaduras de responsabilidad en la industria del petróleo, química, petroquímica, alimentación, generación de energía, nuclear y aeroespacial. Como su tasa de deposición es baja, no resulta económico para soldar materiales con espesores mayores de 6-8 mm.

En estos casos el GTAW se utiliza para efectuar la pasada de raíz, empleándose otros procesos de mayor productividad para el resto de las

pasadas de relleno. También se puede utilizar para realizar soldaduras por puntos y por costuras.

1.4.5.- Selección del tipo de corriente

El proceso GTAW puede utilizarse tanto con corriente continua como con corriente alterna. La elección de la clase de corriente y polaridad se hará en función del material a soldar. Con el fin de realizar esta elección correctamente, se va a destacar algunos aspectos diferenciales de ambas alternativas. En la tabla 1 se han resumido los efectos de la polaridad cuando se suelda con corriente continua y los efectos del soldeo con corriente alterna.

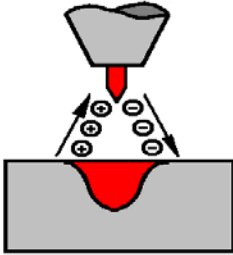
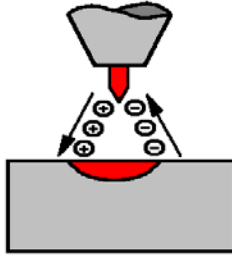
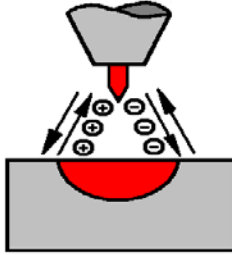
1.4.5.1- Arco con corriente continua

La polaridad recomendada en corriente continua (CC) es la directa, ya que si se suelda con polaridad inversa se tienen que utilizar intensidades tan bajas para que no se sobrecaliente el electrodo que resulta impracticable el soldar.

1.4.5.2.- Arco con corriente alterna

La corriente alterna (CA) aúna, aunque reducidas, las ventajas de las dos polaridades (Ver tabla 1) el buen comportamiento durante el semiciclo de polaridad directa y el efecto decapante del baño durante el semiciclo de polaridad inversa, por lo que suele emplearse en el soldeo de aleaciones ligeras, tales como las de aluminio y magnesio.

Tabla 1.3 Características del soldeo de acuerdo con la corriente seleccionada

Tipo de corriente	Corriente continua	Corriente continua	Corriente alterna
Polaridad	Directa	Inversa	
Flujo de electrones e iones			
Aspectos de la Penetración			
Acción decapante	No	Si	Si, una vez durante el semiciclo positivo
Balace calórico aproximado	70% en la pieza. 30% en la punta del electrodo.	30% en la pieza. 70% en la punta del electrodo.	50% en la pieza. 50% en la punta del electrodo
Penetración	Profunda y Estrecha	Ancha y menos profunda	Media
Comportamiento del electrodo	Excelente. Ej. 400A; 3,2mm	Pobre Ej. 30A; 3,2mm	Buena Ej. 225A; 3,2mm

Como principales inconvenientes presenta dificultades de cebado y de estabilidad del arco, lo que obliga a incorporar al equipo un generador de alta frecuencia. Con corriente alterna, el arco se apaga cada vez que el voltaje es nulo, dos veces cada ciclo, [figura 9\(a\)](#).

Para mejorar la estabilidad la tensión de vacío debe incrementarse. Como por ejemplo se requiere una tensión de vacío de 100V con helio como protección. La tensión necesaria puede obtenerse añadiendo al

transformador una fuente de alta frecuencia. El voltaje de la fuente de alta frecuencia puede ser del orden de 1000 V y con una frecuencia del orden de MHz Ver [figura 9\(b\)](#). La corriente de alta frecuencia puede ser aplicada continuamente, o cada vez que la corriente de soldeo pasa por cero. La selección se realiza desde el panel de control del equipo.

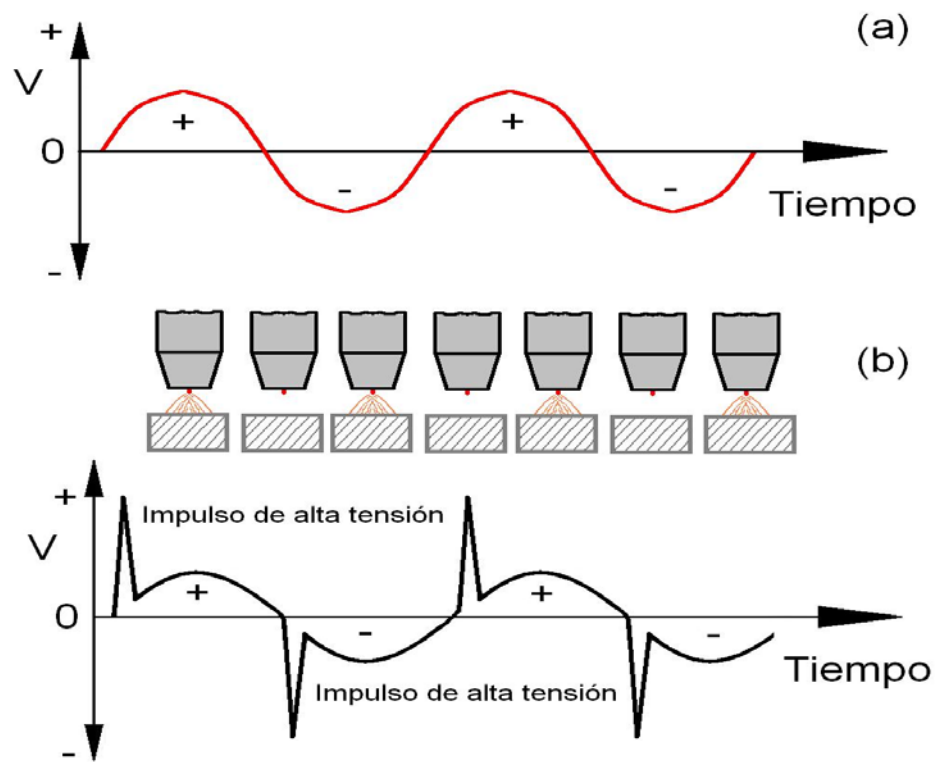


Figura 1.9 (a) Corriente alterna; (b) Corriente alterna con impulsos de alta frecuencia.

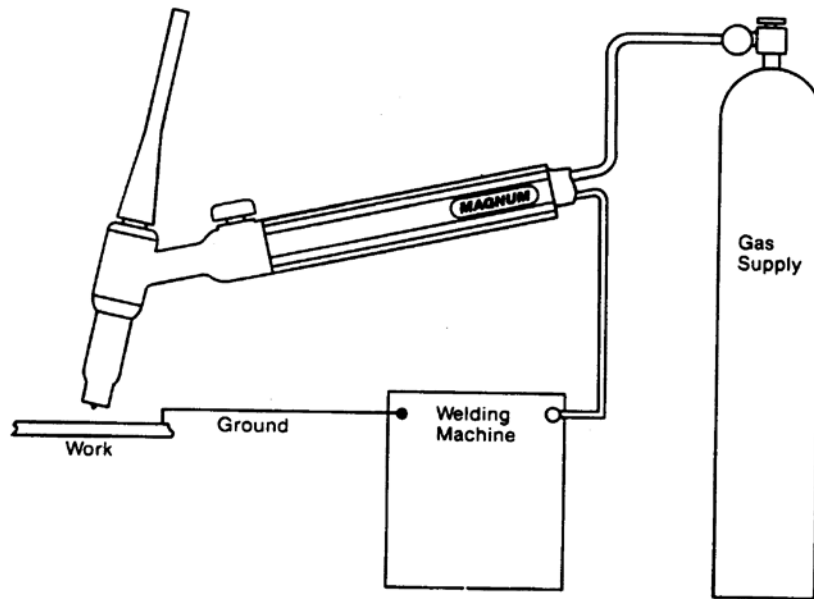


Fig. 1.10 esquema básico de soldadura GTAW

1.4.6. Equipamiento

1.4.6.1 Soplete

Los sopletes de GTAW sostienen el electrodo de tungsteno que transporta la corriente de soldadura y conducen el gas de protector a la zona de soldadura.

La elección de un soplete se basa en la corriente máxima de soldadura que pueden transportar sin recalentarse. La mayoría de los sopletes permiten manejar electrodos de distintos tamaños para un intervalo dado de boquillas.

En función de la corriente máxima de trabajo los sopletes podrán ser refrigerados con agua o con gas, estos últimos eliminan el calor por medio del gas de protección. Los sopletes refrigerados por gas están limitados a una corriente máxima de soldadura de 200 Amperes. En los sopletes enfriados por agua pueden llegar a utilizarse corrientes entre 300 y 500 Amperes.

Casi todos los sopletes para aplicaciones manuales tienen un ángulo de cabeza (el ángulo entre la posición del soplete y el mango) de 120°. También hay sopletes con cabeza de ángulo ajustable, cabeza a 90°, o cabeza en línea recta. Los sopletes manuales contienen interruptores en el mango que le permiten manejar la corriente y el gas de protección.

Los accesorios que utiliza el soplete son los mandriles y las boquillas.

Los mandriles generalmente son de cobre y el tamaño debe adecuarse al electrodo. Es importante que cuando se ajusta el electrodo por medio de la tapa del soplete haya un buen contacto entre el mandril y el electrodo. Esto permite una buena transferencia de la corriente sin sobrecalentamiento.

Las boquillas son las que dirigen el gas de protección a la zona de soldadura. Para ello en el soplete hay difusores de modo que el régimen de salida del gas sea con flujo laminar. Estos difusores se conocen como *difusores de gas* y se diseñan para insertarse alrededor del electrodo o mandril, producen un flujo más largo y uniforme de gas de protección y permiten soldar con la boquilla a 25mm o más de la superficie de trabajo, lo que permite llegar a sectores de acceso limitado.

Las boquillas se fabrican en distintos materiales resistentes al calor y con formas, diámetros y longitudes variables.

Se debe aclarar que hay un equilibrio delicado entre el diámetro de la boquilla y el flujo de gas si el flujo de gas es excesivo, para un diámetro dado, se producirá turbulencia y la protección dejara de ser efectiva. Cuando el amperaje es alto se requiere un flujo de gas elevado y por ende un diámetro de boquilla grande. La elección del tamaño de la boquilla depende de:

- Tamaño del electrodo
- Tipo de unión a soldar
- Área de soldadura que debe protegerse

1.4.7.- Electrodo no consumibles

La misión del electrodo de Wolframio ó de Tungsteno en este proceso TIG es únicamente la de mantener el arco sin aportar material al baño de fusión. Por este motivo y para evitar su desgaste, es muy importante que posea una alta temperatura de fusión. Esta es la razón por la que, cuando se emplea CC, el electrodo se suele conectar al polo negativo, pues el calor generado en el extremo es inferior y permanece más frío que si conectase al polo positivo. En general, se emplean tres tipos diferentes de electrodos que se clasifican en función de su composición en:

- **Tungsteno puro.**
- **Tungsteno aleado con torio.**
- **Tungsteno aleado con circonio.**

Al principio los electrodos fueron de Tungsteno puro, pero posteriormente se pudo comprobar que al añadir a este metal óxidos de torio o de circonio aumenta la emisividad, incrementándose el flujo de electrones, favoreciéndose el encendido y reencendido del arco y, como consecuencia, su estabilidad. Además, estos elementos permiten utilizar mayores intensidades de corriente, pues elevan el punto de utilización del electrodo. Los diámetros disponibles son 1; 1,2; 2; **2,4; 3,2**; 4; 4,8 y 5 mm, siendo los más empleados los señalados en negrita. La longitud estándar de estos electrodos es de 150 mm.

1.4.8.- Metales de aportación

1.4.8.1.- Varillas

El metal de aportación en el soldeo TIG no es siempre necesario cuando se sueldan piezas delgadas (de menos de 3 mm de espesor) utilizando una preparación de bordes recta o con bordes levantados. Cuando es necesario emplear material de aportación, éste puede alimentarse manual o automáticamente. Con la finalidad de obtener uniones sin defectos, es muy importante que el metal de aportación se mantenga libre de contaminaciones ya sea en forma de humedad, polvo o suciedad. Debe por tanto mantenerse en su paquete hasta el momento de ser utilizado. Durante el soldeo es importante que la parte caliente de la varilla esté siempre lo suficientemente cerca del baño de fusión como para que lo cubra el gas de protección. Puesto que el TIG es un proceso que no produce escorias y que se realiza en una atmósfera inerte que no provoca reacciones en el baño, el material de aportación, cuando se utilice, deberá tener básicamente una composición química similar a la del material de base. Normalmente, se presentan en forma de varillas de distintos diámetros: 1,1; 1,6; 2; 2,4; 3,2; 4 y 4,8 mm, con una longitud de 900 mm.

1.4.9.- Gases de protección

El soplete dirige el gas hacia el arco y la pileta líquida con el fin de proteger el electrodo y el metal fundido de la contaminación atmosférica. También suele utilizarse gas purgante de respaldo para proteger el lado de debajo de la soldadura y las superficies del metal base adyacente contra la oxidación durante la soldadura. El argón y el helio o la mezcla de ambos, son los gases inertes más utilizados en soldadura. El caudal de gas depende del

tamaño de la boquilla, en general se recomienda 7 a 16l/min para el argón y 14-24l/min para el helio.

1.4.9.1- Argón

El Ar es un gas monoatómico inerte con peso molecular 40. Se obtienen de la atmósfera por separación del aire licuado. Forma de ondas para tensión y corriente en soldadura con corriente alterna. Para soldadura se refina hasta 99,95%, esto es aceptable para la mayor parte de los metales excepto los reactivos y refractarios para los cuales se requiere una pureza mínima de

99,997%.

El Ar se utiliza más que el He por las siguientes ventajas:

1. Acción de arco más uniforme y silencioso
2. menor penetración
3. acción de limpieza al soldar materiales como Aluminio y el magnesio
4. menor costo y mayor disponibilidad
5. Buena protección con menores caudales
6. Mayor resistencia a ráfagas transversales
7. Más fácil iniciación del arco.

La menor penetración del Ar resulta especialmente útil para soldar materiales delgados, y para la soldadura vertical y sobre cabeza.

1.4.10.- Cebado del arco

El método más sencillo de cebado de arco (cebado por raspado) es raspando el electrodo, muy cuidadosamente, contra el metal base. Sin embargo, el riesgo de inclusiones de wolframio en el metal base es alto, para evitar esto el arco puede ser cebado en una placa adicional de cobre, conocida como pieza de arranque. Otra desventaja del cebado por raspado es la facilidad con que puede dañarse el electrodo. Una vez cebado el arco, retirar el electrodo hasta que quede a unos 3 mm de la pieza, (ver [figura 11](#)).

Para evitar los inconvenientes del cebado por raspado se utiliza una corriente de alta frecuencia y elevada tensión. Este método es el utilizado en corriente alterna y algunas veces con corriente continua. Por tanto, cuando se utiliza corriente alterna no es necesario tocar con el electrodo sobre la pieza para establecer el arco, sino poner bajo tensión el circuito de soldeo y sujetar el portaelectrodos, de forma que el electrodo quede aproximadamente horizontal y a unos 50 mm. De la pieza. A continuación, mediante un giro de muñeca, aproximar el extremo del electrodo a la pieza, hasta que quede a unos 2 ó 3 mm. De la misma. En este punto, la corriente de alta frecuencia vence la resistencia del aire y se establece el arco. El movimiento de aproximación del electrodo debe realizarse rápidamente, para conseguir que llegue el máximo caudal de gas de protección a la zona de soldeo (ver [figura 11](#)).

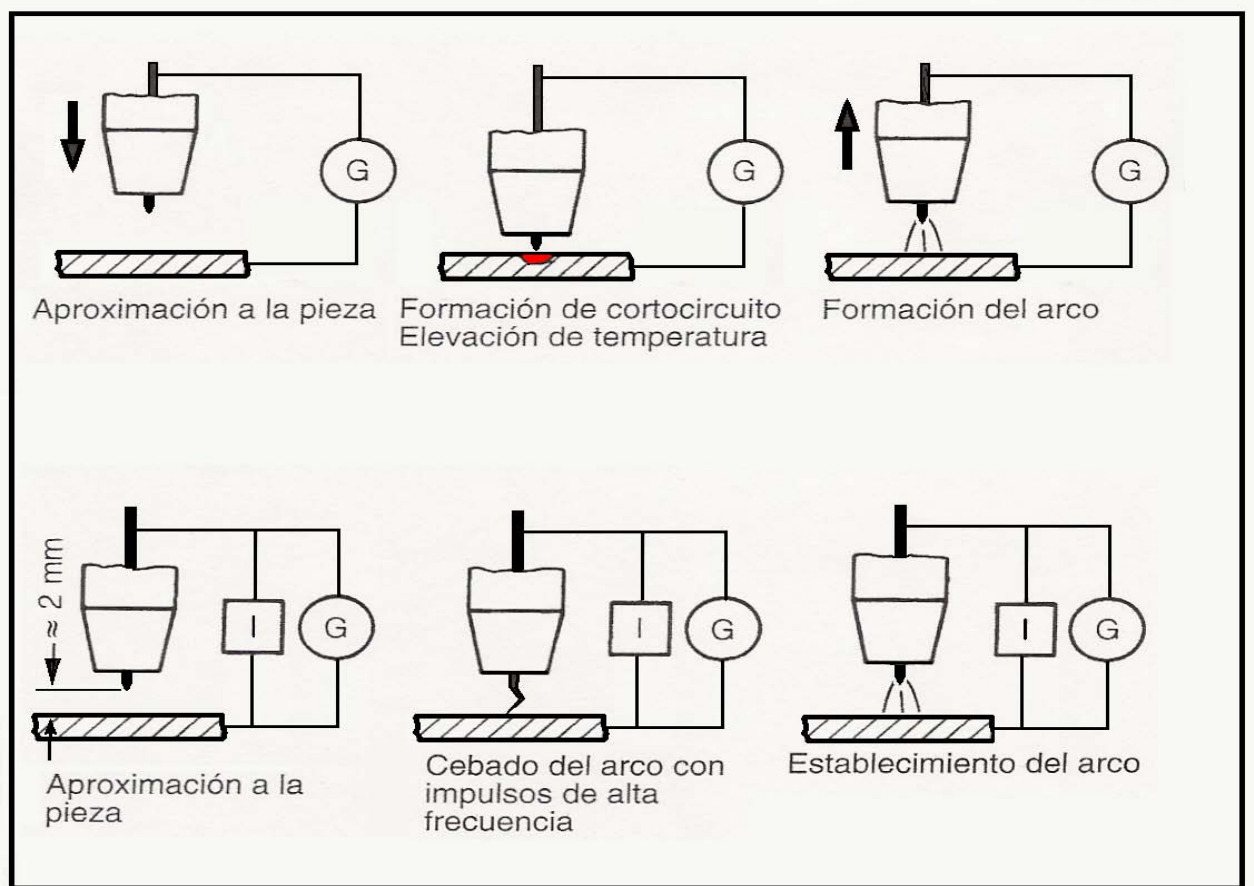


Figura 1.11 Cebado del arco por raspado. G = fuente de alimentación.

Para extinguir el arco, tanto en corriente alterna como en corriente continua, basta con retirar el electrodo hasta la posición horizontal mediante un rápido movimiento de muñeca. Este movimiento debe realizarse rápidamente a fin de evitar deterioros en la superficie de la soldadura. El inconveniente de las Corrientes de alta frecuencia es la distorsión que producen en las comunicaciones.

1.5.- ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS

1.5.1.- 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 los ensayos destructivos utilizados en el presente trabajo.

1.5.1.1.- Ensayo de Tracción

Es un ensayo de tensión uniaxial que sirve para determinar propiedades mecánicas de los materiales, entre ellas están esfuerzo máximo de ruptura, esfuerzo de fluencia y ductilidad de manera directa y es posible de obtener de manera indirecta otras propiedades como tenacidad, coeficiente de endurecimiento por deformación (n) y módulo de Young. En soldadura es importante para determinar la resistencia máxima de juntas soldadas y la

resistencia a lo largo del cordón, también la ductilidad de la unión y para certificar procedimientos de soldadura y calificar soldadores.

1.5.1.2.- Ensayo de Dureza

Este ensayo permite medir la resistencia que el material presenta a ser penetrado por un indentador. Con este ensayo se logra medir la resistencia de los cordones de soldadura y poder determinar la existencia de heterogeneidades a lo largo de la misma. Este se realiza de forma transversal al cordón de soldadura.

1.5.1.3.- Ensayo Metalográfico

Consiste en determinar con la ayuda del microscopio las características estructurales de un metal o una aleación. Mediante este ensayo se pueden reconocer el tamaño de grano: así como el tamaño, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal.

1.5.2.- 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. Entre estos ensayos tenemos:

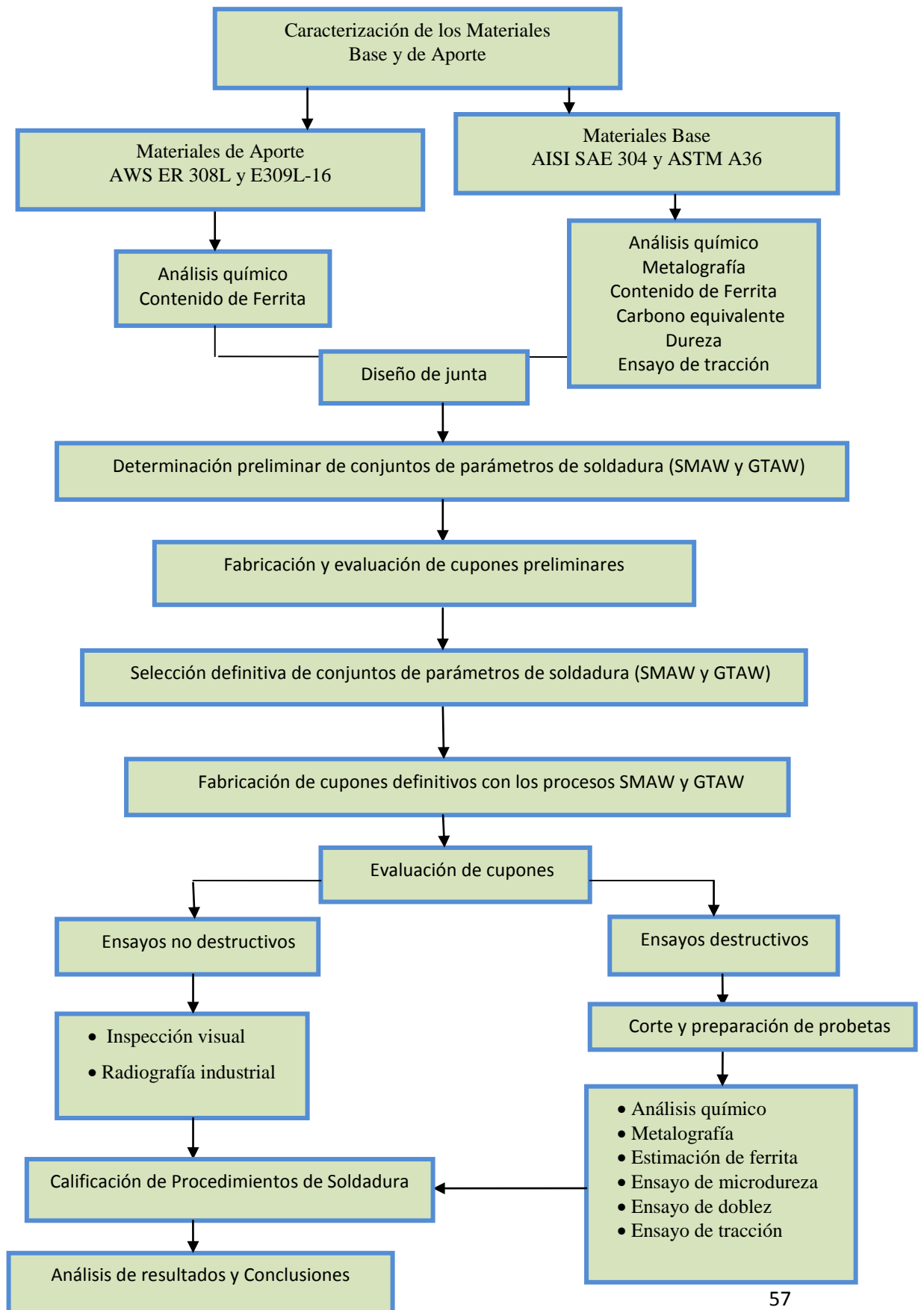
1.5.2.1.- Inspección Visual

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.

1.5.2.2.- Radiografía Industrial

Esta evaluación se realiza a las piezas soldadas para detectar 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. Esta técnica es ampliamente utilizada en la evaluación de piezas soldadas; ya que, se logran definir y ubicar con mayor claridad y exactitud los defectos sin necesidad de realizar las otras evaluaciones no destructivas, disminuyéndose los costos.

CAPÍTULO II PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL



El esquema anterior representa el procedimiento seguido en el presente estudio, cuya parte experimental se desarrolla detalladamente a continuación.

2.1. Caracterización de los Materiales Base y Aporte

2.1.1 Análisis químico

La caracterización química de los materiales se realizó por el método de Espectroscopia de Absorción Atómica (fig. 2.2), determinándose los porcentajes en peso de los siguientes elementos: silicio (Si), manganeso (Mn), níquel (Ni), cromo (Cr), molibdeno (Mo), cobre (Cu) y fósforo (P); mientras que por el método Gasométrico se determinó el porcentaje en peso del carbono (C) y azufre (S) (fig. 2.3). Para realizar este análisis se extrajeron aproximadamente 15 gr de virutas de los materiales base y aporte por medio de un taladro de mesa. El análisis fue llevado a cabo en el Laboratorio de Análisis Químico de la Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela.

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 las correspondientes a los materiales de aporte (AWS E309L-16 y AWS ER 308L) se extrajeron de cupones estandarizados para análisis químico según las normas ANSI/AWS “A5.4, Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding” y “A5.9, Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods”, respectivamente. Estos cupones consistieron 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 2.1. 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 correspondiente al proceso SMAW se removi6 cuidadosamente la escoria entre cada pase y el gas utilizado en el proceso en el GTAW fue arg6n.



Fig. 2.1. Dep6sitos de material de aporte (izq. ER 308L, der. E309L-16)



Figura 2.2. Equipo de espectroscopia de absorci6n at6mica



Figura 2.3 Equipo de Gasometría

2.1.2. Evaluación Metalográfica

El estudio metalográfico requirió un procedimiento para establecer las fases presentes en la muestra, así como evaluar su distribución. Para esto, se seccionó 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 realizó 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 realizó progresivamente con la siguiente secuencia de lijas: 120, 320 y 400. Se realizó manualmente en una sola dirección y sentido con una lija, y cuando los surcos visibles en la

superficie estuvieron en una sola dirección, se rotó la pieza 90 grados y se procedió con la siguiente lija de la secuencia, obteniéndose de esta forma una superficie de rugosidad menor en cada etapa.

3) Desbaste fino: Se llevó a cabo siguiendo la metodología descrita anteriormente pero con una secuencia de lijas de menor tamaño de grano: 600, 1200, 1600; logrando una superficie aún más lisa que la obtenida en la etapa anterior para luego proceder con el pulido.

4) Pulido: Se efectuó 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.



Figura 2.4. Pulidora

5) Ataque: Se realizó un ataque específico para cada material base:

Para el acero inoxidable austenítico fue utilizada 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 (ácido nítrico en alcohol isopropílico al 10%) y se aplicó con una gasa sobre la superficie pulida para revelar la microestructura presente.

Finalmente, se procedió a observar en el microscopio las superficies sometidas al proceso de ataque.

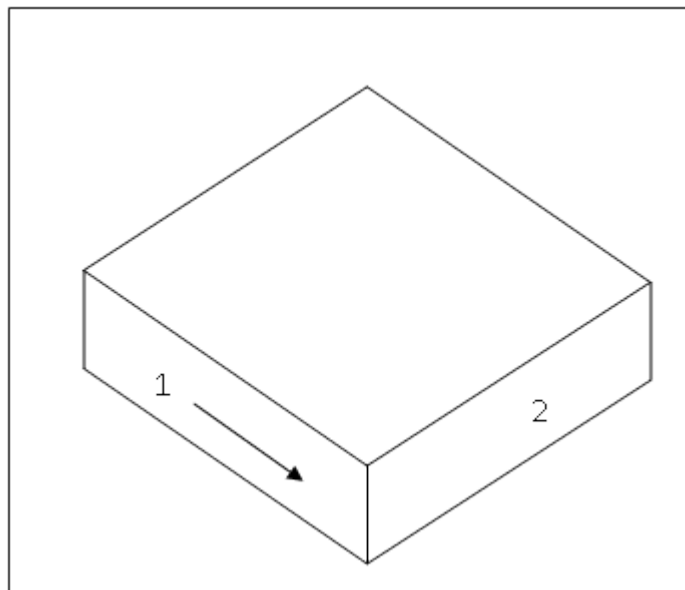


Figura 2.5. Superficies estudiadas en las probetas metalográficas: 1) paralela al sentido de laminación del material y 2) perpendicular al sentido de laminación del material

2.1.3. Determinación del contenido de ferrita

Debido a la importancia de la fase ferrítica durante la soldadura de los aceros inoxidable 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 los métodos químico y metalográfico.

2.1.3.1. Método químico

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 ambos materiales de aporte, se graficaron en el Diagrama de Schaeffler los valores calculados del cromo y níquel equivalente, Cr_{eq} y Ni_{eq} , respectivamente, utilizando las relaciones matemáticas apropiadas.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 * (\%Si) + 0,5 * (\%Nb) \quad \{1\}$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 * (\%C) + 0,5 * (\%Mn) \quad \{2\}$$

2.1.3.2. Método metalográfico

Las imágenes de las micrografías correspondientes al material base AISI SAE 304 fueron procesadas con el programa de análisis de imágenes Digital Micrograph, Versión 1.81.78, el cual permitió determinar la cantidad de ferrita presente por medio del conteo de la cantidad relativa de píxeles que

representan las fases presentes en diferentes colores, siendo el color claro la fase austenítica y el color oscuro la fase ferrítica.

2.1.4. 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.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad \{3\}$$

2.1.5. Dureza

El valor de la dureza del acero estructural ASTM A36 y el acero inoxidable AISI/SAE 304 fue medido por medio del ensayo Rockwell B, el cual se llevo a cabo de acuerdo al procedimiento y características técnicas descritas en la norma ASTM A370 ⁽¹⁸⁾. Para la realización de dicha prueba, se extrajo 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 2.6](#)



Fig. 2.6. Durómetro

2.1.6. Ensayo de tracción

Las probetas fueron cortadas y maquinadas de acuerdo al diseño establecido en la norma ASTM A-370 como la mostrada en la [Figura 2.7](#). Se ensayaron tres probetas para cada uno de los materiales.

Las probetas fueron traccionadas en la máquina de ensayos universales marca BALDWIN ubicada en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela, 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.

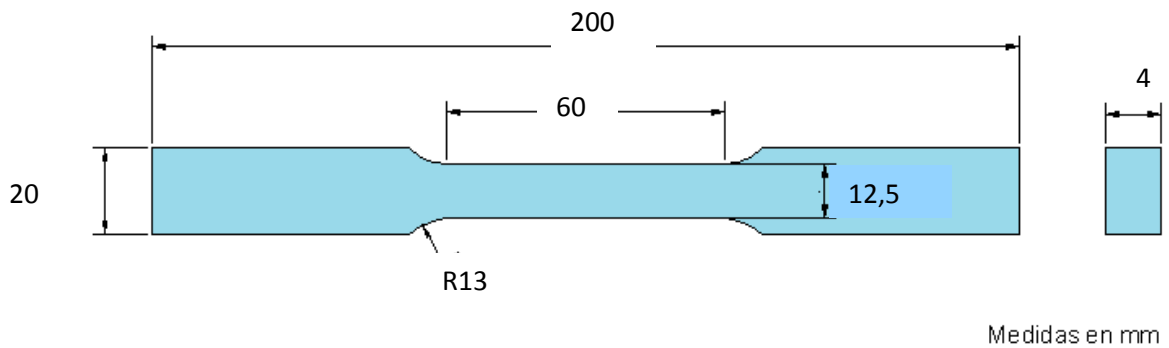


Fig. 2.7 Probeta de tracción del material base

Los valores de la carga aplicada se obtuvieron por lectura directa del dial del equipo en unidades de Kgf (F_i) y los valores de deformación (ΔL_i) se establecieron utilizando un extensómetro marca AMSLER colocado en la zona reducida de la probeta. Con estos valores y utilizando las relaciones matemáticas {4} y {5} se obtuvieron los valores de deformación unitaria (e_i) y esfuerzo unitario (S_i).

$$e_i = \frac{\Delta L_i}{L_o} \quad \{4\}$$

$$S_i = \frac{F_i}{A_o} \quad \{5\}$$

A_o = Area transversal de la zona calibrada

L_o = longitud inicial de la zona calibrada

El objetivo de este ensayo fue determinar la curva característica esfuerzo-deformación de la junta, para obtener así los valores que determinan las principales propiedades mecánicas de la unión como son: la resistencia máxima (S_{max}), el porcentaje de elongación y finalmente, usando el “método de la deformación permanente especificada” (ó método de la compensación) descrito en el apartado 13.2.1 de la norma ASTM A370 se obtuvo la resistencia a la fluencia (S_y) definida a 0,2% de la longitud

calibrada. Los equipos utilizados en el ensayo son mostrados en las figuras 2.8 y 2.9.



Fig.2.8 Máquina universal de tracción



Fig. 2.9 Extensómetro aplicado a la probeta

2.2. Diseño de junta

Se seleccionó una junta a tope con penetración completa con bordes de ranura cuadrada simple con apertura de raíz de 2,50 mm.

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.

2.3. Determinación preliminar de conjuntos de parámetros de soldadura (SMAW y GTAW)

Las variables de soldadura necesarias para fabricar los cupones preliminares mediante los procesos GTAW y SMAW se obtuvieron a partir de la revisión bibliográfica y los datos recomendados por el fabricante de los aportes.

Con los conjuntos de parámetros establecidos se procedió a calcular los valores de energía aportada por cada proceso.

2.4. 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 utilizaron fuentes de energía específicas para cada uno de los procesos de soldadura empleados.

Para la soldadura al arco eléctrico con electrodo no consumible y protección gaseosa (GTAW), se utilizó el siguiente sistema:

Generador de alta frecuencia (“350 AC/DC HELIWELDER PLUS square wave”, marca ESAB), que proporciona la potencia necesaria en forma de diferencia de potencial e intensidad de corriente; Gas de protección Argón UAP, el cual es un gas inerte necesario para evitar la contaminación del depósito fundido; y Antorcha de soldadura, la cual además de portar el electrodo de tungsteno que genera el arco eléctrico necesario para fundir el material base y el aporte en la soldadura, también posibilita la formación del cono de protección gaseosa del arco y del depósito fundido.

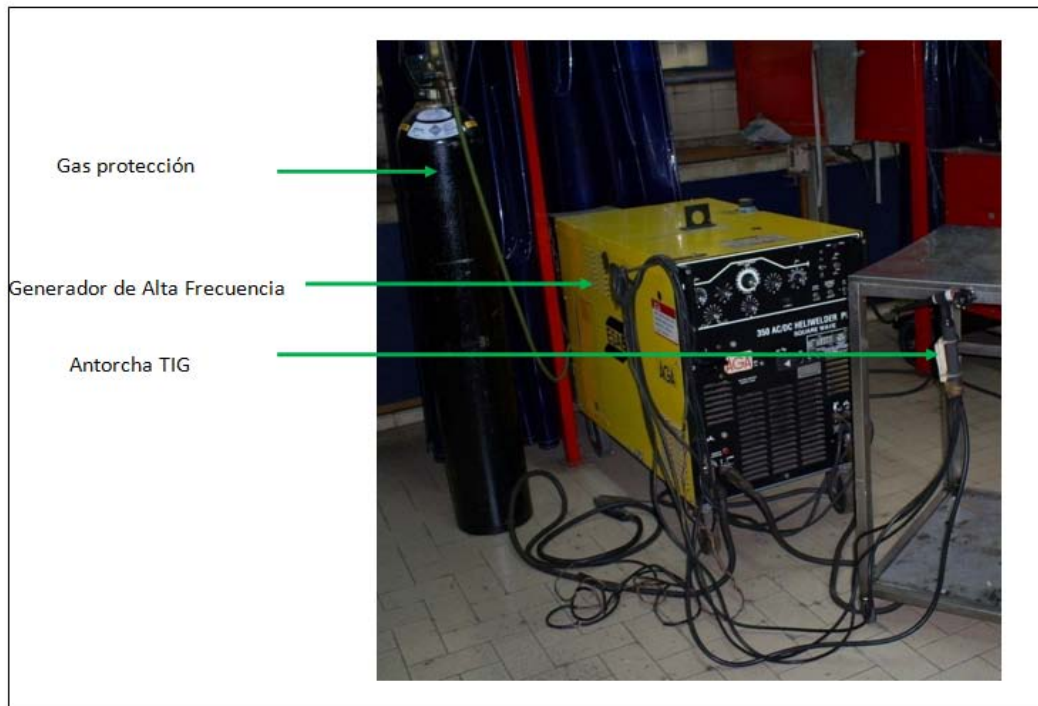


Fig. 2.10. Equipo de soldadura GTAW.



Fig. 2.11. Antorcha de soldadura GTAW.

Para la fabricación de los cupones con el proceso de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) el sistema estaba conformado por:

Generador (marca AIRCO) que proporciona el amperaje y el voltaje requerido para establecer el circuito eléctrico; Portaelectrodos, 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.

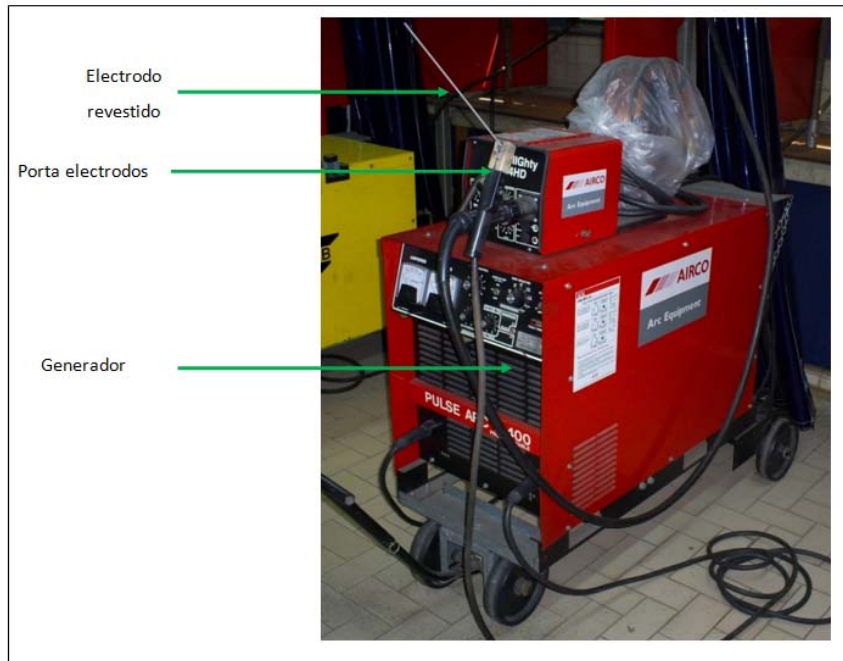


Fig. 2.12. Equipo de soldadura SMAW

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 (ASTM A 36 para GTAW y AISI 304 para SMAW). Los parámetros que fueron tomados en cuenta son: voltaje, intensidad de corriente, flujo de gas protector (solo para GTAW)

2.5 Evaluación de cordones preliminares

2.5.1. 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.

2.5.2. 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. Las probetas fueron seccionadas con una sierra de vaivén ubicada en el taller de la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.



Fig. 2.13. Corte de las muestras de soldadura de electrodo revestido.



Fig. 2.14. Corte de una de las muestras de soldadura por GTAW.

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 y 6V durante 6 s a los depositados con el proceso GTAW.

2.6. Selección definitiva de conjuntos de parámetros de soldadura (SMAW y GTAW)

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 cada uno de los procesos de soldadura aplicados que posteriormente se utilizaron para fabricar los cupones definitivos.

2.7 Fabricación de cupones definitivos

2.7.1. Fabricación de cupones mediante el proceso GTAW.

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 varillas de acero austenítico ER 308L de 3/32 de pulgadas de diámetro (2.5mm). El electrodo fue de tungsteno toriado de 2.5 mm de diámetro igualmente. El gas seleccionado fue el argón.

El equipo de soldadura utilizado fue el generador “350 AC/DC HELIWELDER PLUS Square Wave”, marca ESAB, ubicado en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería.

La soldadura fue manual en posición plana (1G) aplicando dos pases. Ambas láminas fueron colocadas sobre un banco especial de acero una pletina de respaldo de bronce que mejora la transferencia uniforme de calor y evita el contacto del metal fundido con el aire y su contaminación.

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 apertura de raíz constante en toda su longitud.

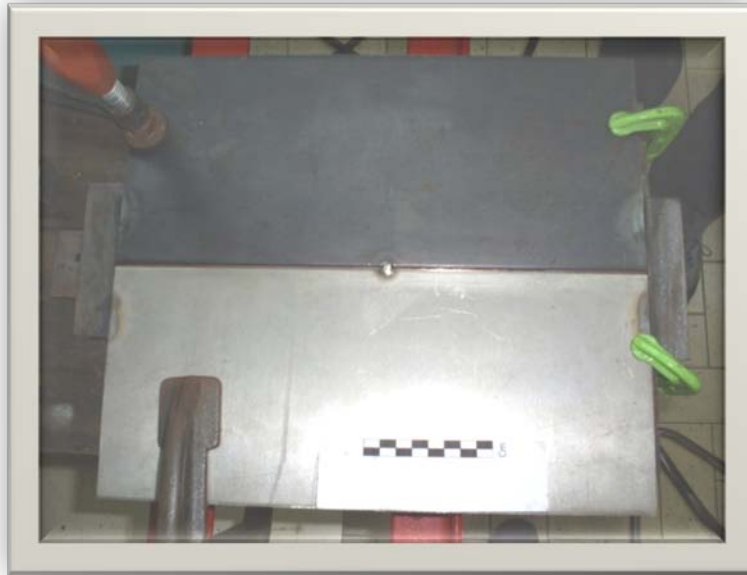


Fig. 2.15. Cupón antes de ser soldado.

2.7.2. Fabricación de cupones mediante el proceso SMAW.

El tipo de junta así como las dimensiones y el grado de los materiales base fueron iguales a la junta fabricada con el proceso GTAW. 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 similar al de la soldadura con el proceso SMAW.

2.8. Evaluación de cupones soldados

2.8.1. Ensayos no destructivos

2.8.1.1. 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.

2.8.1.2. Radiografía 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



Fig. 2.16. Fuente de Rayos X.

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



Fig. 2.17 Tablero de Control de Rayos X

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. El proceso de revelado se describe a continuación:

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.

2.8.2. Ensayos destructivos

Finalizada la etapa de inspección no destructiva se realizaron cortes transversales sobre los cupones de prueba fabricados con ambos procesos 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 realizó la evaluación metalográfica.

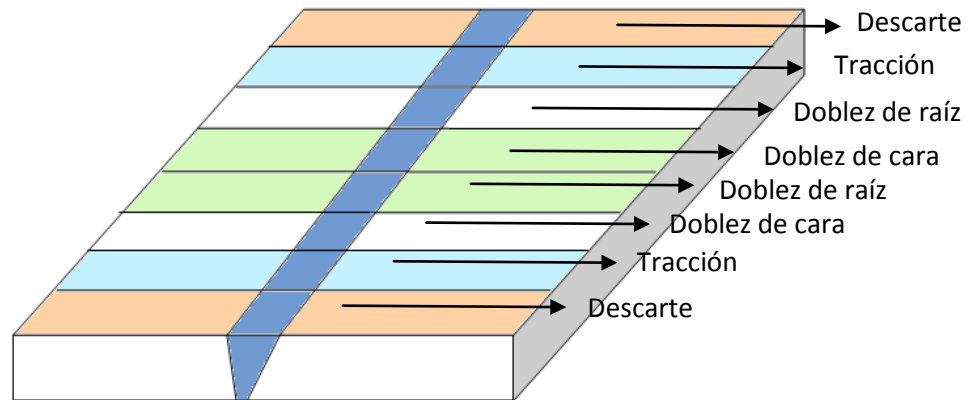


Fig. 2.18 esquema de corte de los cupones para ensayos destructivos

2.8.2.1. Análisis químico

Para establecer el porcentaje en peso de los elementos presentes en los cordones de soldadura obtenidos mediante los procesos GTAW y SMAW se procedió a realizar el análisis químico empleando los métodos de Espectroscopía de Absorción Atómica y Gasometría 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.

Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis Químico de la Escuela de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela determinándose los porcentajes en peso de los siguientes elementos: silicio (Si), manganeso (Mn), níquel (Ni), cromo (Cr), molibdeno (Mo), cobre (Cu) y fósforo (P). Mientras que, por el método Gasométrico se determinó el porcentaje en peso del carbono (C) y azufre (S).

2.8.2.2 Análisis metalográfico

Luego de soldados los cupones se procedió 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 fue necesario utilizar dos ataques diferentes:

- 1) Nital (ácido nítrico en alcohol isopropílico al 10%) para revelar la microestructura del acero al carbono y,
- 2) 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.

2.8.2.3 Análisis de ferrita

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 de tres procedimientos diferentes:

1) Método Químico 1. Conociendo 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” 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 los procesos GTAW y SMAW. Con la imagen macrográfica se procedió a realizar una copia, la cual fue convertida a 16 colores y finalmente analizada. Arrojando valores relativos de pixeles dependiendo de los colores asignados.

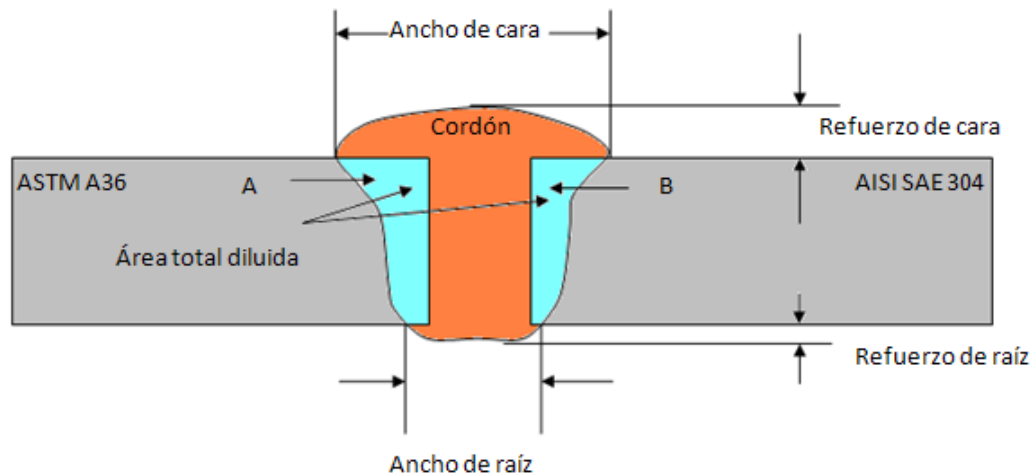


Figura 2.19. Esquema de los parámetros geométricos y de dilución determinados en el análisis macrográfico hecho a la unión de soldadura.

El porcentaje de dilución de cada metal base, así como el porcentaje de dilución total fueron calculados usando las siguientes ecuaciones reportadas por la American Welding Society para juntas de soldadura disímil:

$$\% \text{ Dilución del acero ASTM A36} = \frac{A}{A_c} \times 100 \quad \{6\}$$

$$\% \text{ Dilución del acero AISI/SAE 304} = \frac{B}{A_c} \times 100 \quad \{7\}$$

$$\% \text{ Dilución total} = \frac{A + B}{A_c} \times 100 \quad \{8\}$$

Donde:

A = Área transversal de la porción del metal base ASTM A36 diluida en el cordón de soldadura.

B = Área transversal de la porción del metal base AISI/SAE 304 diluida en el cordón de soldadura.

A_c = Área transversal total del cordón de soldadura.

Conociendo la composición química de los materiales base y los aportes, se calculan los valores correspondientes de Creq y Nieq, 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 determinara el número ferrítico, ya que sobre esa zona debería ser atravesada por líneas con porcentajes de ferrita específicos.

2) Método químico 2. Conociendo directamente la composición del cordón se procedió a ubicar directamente la cantidad de ferrita presente por cada proceso mediante el cálculo y traficación en el Diagrama de Schaeffler

de los valores de Cromo y Níquel equivalente, calculados según las ecuaciones (1) y (2).

3) Método metalográfico. Utilizando las imágenes micrográficas correspondientes a las zonas de fusión de cada proceso se procedió al análisis gráfico por medio del programa Digital Micrograph, el cual, la imagen fue convertida en formato de 16 colores mediante conteo de píxeles, permite la determinación de las cantidades relativas de las fases presentes siendo el color blanco el asignado a la austenita y el color negro el asignado a la ferrita.

Teniendo la información anterior se logró tener valor un aproximado de la ferrita presente en las zonas de fusión de ambos cordones GTAW y SMAW

2.8.2.4. Ensayo de microdureza

La determinación de la dureza se realizó 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 utilizaron las mismas probetas de análisis metalográfico.



Fig. 2.20 Microscopio- indentador Vickers

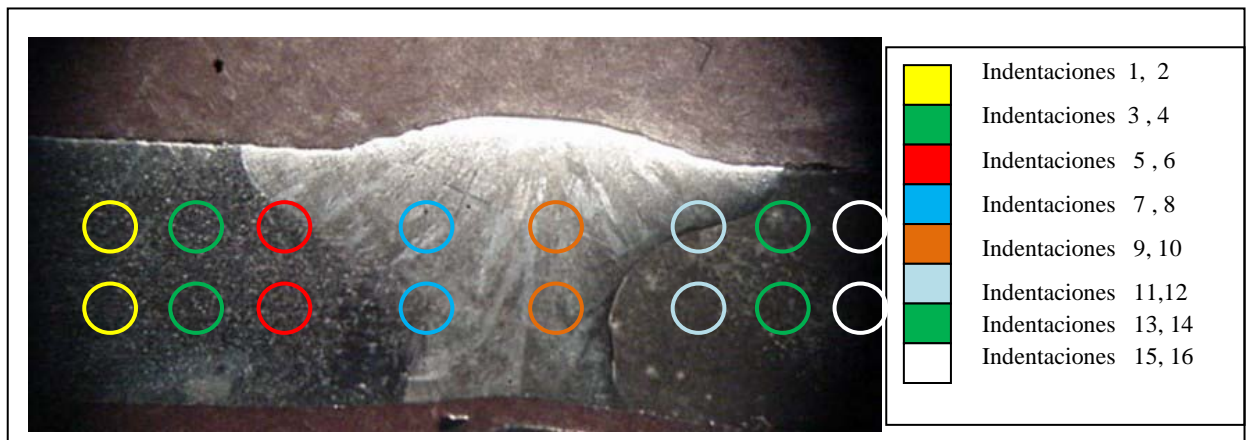
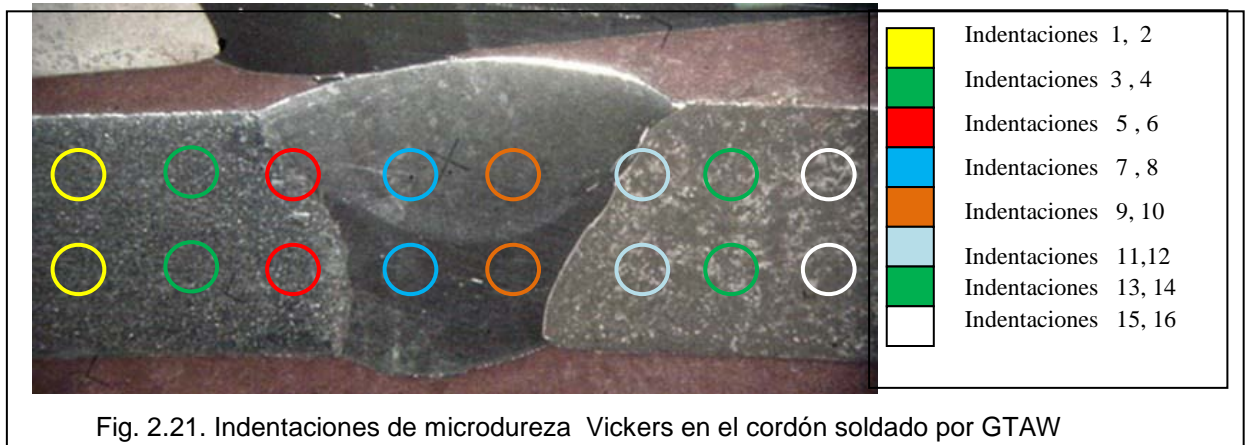
Utilizando un durómetro universal con un indentador Vickers (Fig. 2.20) y aplicando una carga de 0.2 kgf durante un tiempo estimado de 10 segundos, se procedió con la indentación en el sitio requerido. La huella obtenida es romboidal y según las medidas de sus diagonales se calculó la dureza respectiva al punto, estableciéndose de esta manera el perfil de dureza de las dos muestras soldadas (GTAW y SMAW).

Por cada muestra soldadura (tanto para GTAW como SMAW) se realizaron 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 (MB1)

- Zona afectada por el calor 1 (ZAF1)
- Zona de fusión (ZF)
- Zona afectada por el calor 2 (ZAF2)
- Material base 2 (MB2)

En cada barrido se realizaron ocho mediciones con una separación aproximada de 2 mm.



2.8.2.5 Ensayo de doblez

Mediante el ensayo de doblez se evaluó cualitativamente la ductilidad de la junta soldada.

El procedimiento de ensayo y el diseño de las probetas se realizaron según la Sección IX del Código ASME.

Las probetas fueron maquinadas a partir de tiras rectangulares de 320x40 mm hasta obtener la geometría especificada en la [Figura 2.23](#). Así mismo, los bordes fueron redondeados para evitar que actuaran 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 cuatro probetas por cada cupón (SMAW y GTAW): dos de doblez de cara y dos de doblez de raíz. Las probetas se ensayaron en una Máquina Universal de Ensayo, marca LOSENHAUSEN, modelo UHP20, ubicada en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela.

La máquina utilizada posee tres rodillos de diferentes diámetros ([Fig. 2.25](#)). Dos de estos corresponden a la bancada del sistema y el tercero actúa como punzón, aplicando una carga constante y transversal a la probeta. Fue necesario aplicarle una precarga al sistema y luego aumentar la presión por medio de los controles.

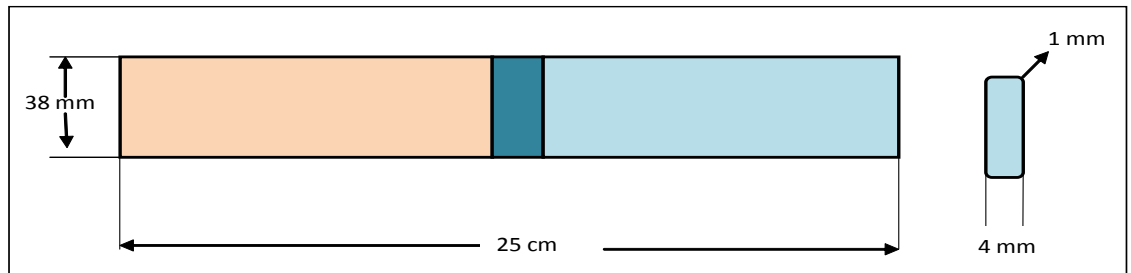


Fig. 2.23 Diseño probeta de doblé según QW-462.3 (a) del Código ASME Sección

IX



Fig. 2.24 Probetas de doblé (SMAW superior y GTAW Inferior)



Fig. 2.25 Máquina de ensayos universales

2.8.2.6. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realizó 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. El corte se realizó con una sierra vaivén en el Taller Mecánico de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. El maquinado se realizó igualmente en dicho taller utilizando una fresa adecuada para obtener la geometría requerida tal y como se muestra en la figura 2.26.

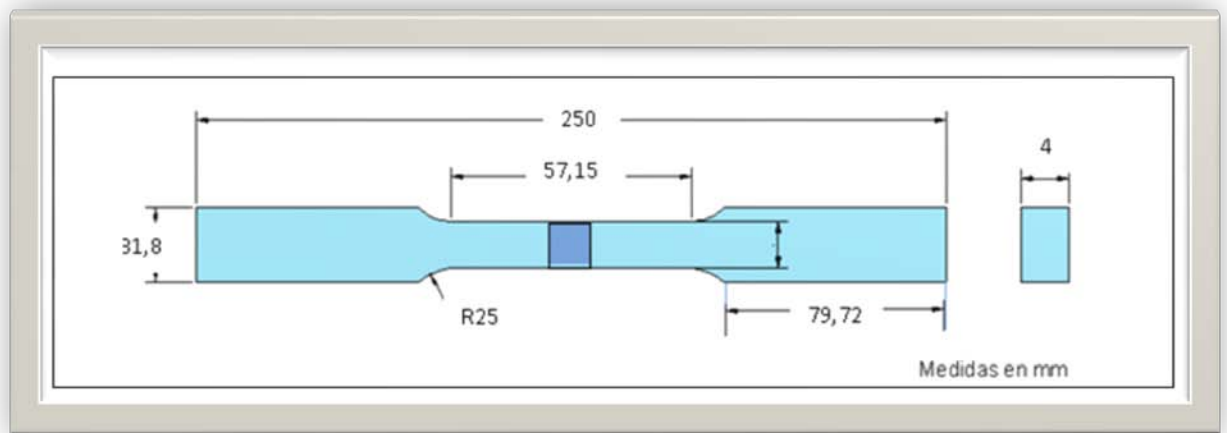


Fig. 2.26 Probeta de tracción de la soldadura

Las probetas fueron traccionadas en una máquina universal de ensayo marca BALDWIN ubicada en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Universidad Central de Venezuela. El

procedimiento utilizado para la medición de los valores de esfuerzo - deformación fue igual al utilizado en el ensayo de tracción del material base.



Fig.2.27. Probetas de tracción SMAW y GTAW.

CAPITULO III

RESULTADOS Y

ANALISIS

3.1. Caracterización de los Materiales Base y Aporte

3.1.1 Análisis químico

En las [tablas 3.1 y 3.2](#) se exponen los resultados del análisis químico de ambos materiales base.

Tabla 3.1. Composición química del acero AISI SAE A304.

Elemento	Composición (% en peso)	Norma ASTM A240 (% en peso)
C	0,044	0,070 máx.
S	0,004	0,030 máx.
Cr	17,926	17,500 - 19,500
Ni	8,050	8,000 - 10,500
Mn	1,647	2,000 máx.
Mo	0,304	-
Si	0,465	0,750 máx.

Tabla 3.2. Composición química del acero ASTM A-36.

Elemento	Valor obtenido (% en peso)	Norma ASTM A36 (% en peso)
C	0,201	0,250 máx.
S	0,008	0,050 máx.
Cr	0,001	...
Mn	0,452
Mo	0,034	...
Si	0,077	0,400 máx.

En la caracterización química de los materiales base se observó que ambos cumplían y estaban dentro del intervalo nominal de composiciones de cada uno de los elementos que los conforman, tomando como referencia las normas correspondientes: el acero AISI 304 según las normas AISI/SAE y ASTM A-240, y el acero ASTM A36 según la ASTM A36.

En las [tablas 3.3 y 3.4](#) se muestran los resultados del análisis químico para ambos materiales de aporte.

Tabla 3.3. Composición química del metal de aporte AWS E 309L-16.

Elemento	Composición (% en peso)	Norma ANSI/AWS A 5.4 (% en peso)
C	0.02	0.04 máx.
Cr	23.41	22.0-25.0
Ni	12.66	12.0-14.0
Mo	0.310	0.75 máx.
Mn	1.100	0.5-2.5
Si		0.90 máx.
P	0.035	0.04 máx.
S	0.020	0.03 máx.
Cu	0.200	0.75 máx.

Tabla 3.4. Composición química del metal de aporte AWS ER 308L.

Elemento	Composición (% en peso)	Norma ANSI/AWS A5.9 (% en peso)
C	0.06	0.08 máx.
Cr	19.50	19.5-22.0
Ni	10.52	9.0-11.0
Mo	0.150	0.75 máx.
Mn	2.010	1.0-2.5
Si		0.30-0.65
P	0.020	0.03 máx.
S	0.025	0.03 máx.
Cu	0.350	0.75 máx.

Nuevamente, en los resultados obtenidos en el análisis químico de los depósitos estandarizados es posible observar que efectivamente éstos coinciden con las especificaciones correspondientes.

Si bien los resultados del análisis químico fueron satisfactorios, es importante destacar que pueden ocurrir discrepancias con respecto a la composición real, debido a la contaminación de las muestras por residuos de la broca utilizada para la extracción de las virutas del material, también por errores de apreciación durante la preparación de las soluciones y finalmente por degradación y/o vencimiento de los reactivos específicos utilizados en el análisis.

Los elementos que componen inicialmente los metales base y los de aporte tendrán una influencia particular en el cordón de soldadura, cada uno de ellos le conferirán propiedades mecánicas y químicas a las soldadura final que tendrán un impacto relevante en condiciones de servicio de la pieza.

Todos los aceros inoxidable son básicamente aleaciones de hierro, carbono y cromo. Los dos primeros porque son elementos intrínsecos de cualquier acero y el cromo 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, Te.

El cromo provee resistencia a la oxidación y a la corrosión, el níquel y el manganeso son adicionados para estabilizar la fase austenítica en un amplio intervalo de temperaturas y prevenir la formación de martensita en condiciones de enfriamiento rápido. El nitrógeno incrementa la resistencia del acero y promueve la estabilidad de la austenita. La maquinabilidad es

aumentada con la adición de azufre, fósforo y selenio, este último a expensas de la soldabilidad.

El manganeso es efectivo en combinación con azufre para la formación de sulfuros de manganeso estables, además incrementa la solubilidad del nitrógeno e indirectamente la estabilización de la austenita.

El molibdeno mejora la resistencia a altas temperaturas y promueve la formación de ferrita al igual que el silicio, éste mejora la fluidez del charco de soldadura.

Niobio y titanio evitan la corrosión intergranular, siendo posible la formación de carburos de niobio y titanio, en lugar de carburos de cromo.

3.1.2. Evaluación Metalográfica

El estudio metalográfico se realizó para establecer las características microestructurales de ambos materiales base, en la cual es posible identificar las fases presentes así como el tamaño, la forma y la distribución de los granos.

En la [figura 3.1](#) se observan las imágenes correspondientes a la evaluación microestructural de ambos aceros.

En el acero austenítico se observan 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 líneas oscuras en los límites de grano de la austenita en las superficies transversal y longitudinal de la muestra,

denominadas como 1 y 2, respectivamente y mostradas en la parte superior de la [figura 3.1](#).

De forma similar, la microestructura del acero ASTM A 36 se muestra en las imágenes denominadas 1 y 2 en la parte inferior de la [Fig. 3.1](#) como zonas de perlita (fase oscura) mezcladas con ferrita (fase clara). La perlita corresponde al compuesto eutéctico de placas de cementita intercaladas con placas de ferrita. Como puede observarse, la microestructura de la muestra es del tipo hipoeutéctico ya que la fase perlítica está mezclada con ferrita y no con cementita, debido a que el contenido de carbono de la aleación es inferior a 0,8 %. La ferrita se encuentra representada por las áreas claras que rodean a las islas de perlita (áreas grises).

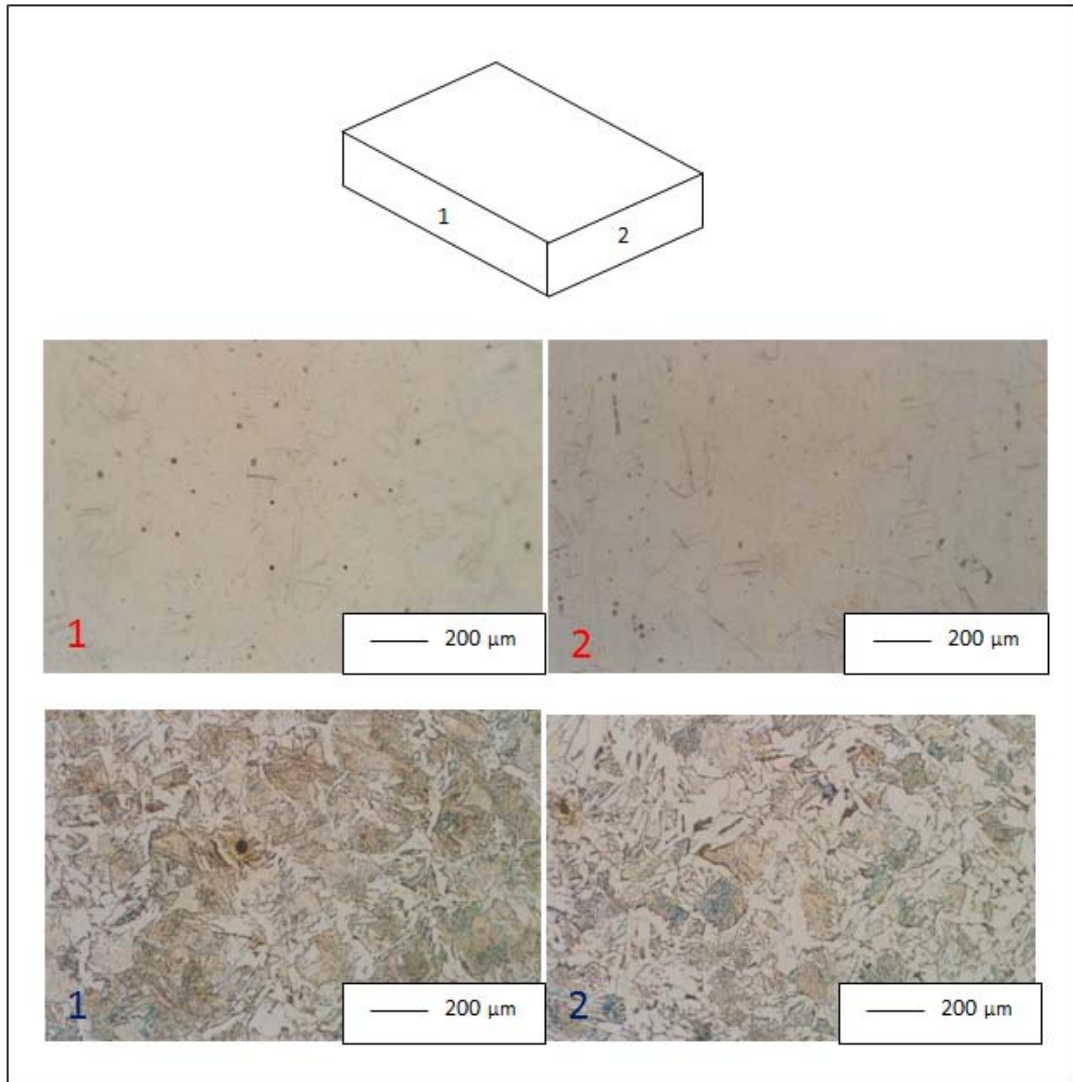


Fig. 3.1. Micrografías del acero ASTM A36 a 50x (inferiores) Fig. Micrografías del acero AISI 304 a 50x (superiores).

3.1.3. Determinación del contenido de ferrita

Como se mencionó anteriormente, 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⁽¹⁹⁾, 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.

3.1.3.1. Método químico

Conociendo el porcentaje en peso de los elementos que conforman el acero inoxidable AISI SAE 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 fórmulas {1} y {2} correspondientes ya mencionadas en la sección 2.1.3.1.

Tabla 3.5 valores Cr_{eq} , Ni_{eq} y ferrita resultante

Cr_{eq} (%)	18.93
Ni_{eq} (%)	10.20
Contenido de ferrita (%)	7.50

$$\text{Niquel Equivalente} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn$$

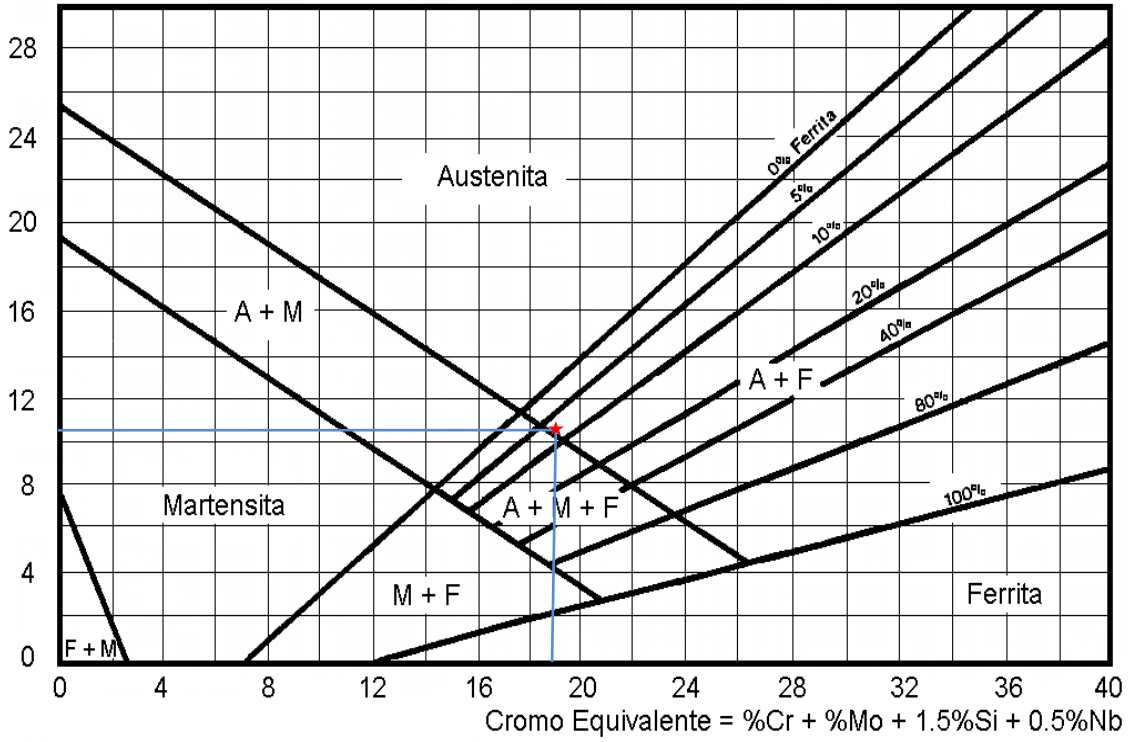


Fig. 3.2. Ubicación del Acero AISI 304 en el Diagrama Schaeffler.

3.1.3.2. Método metalográfico

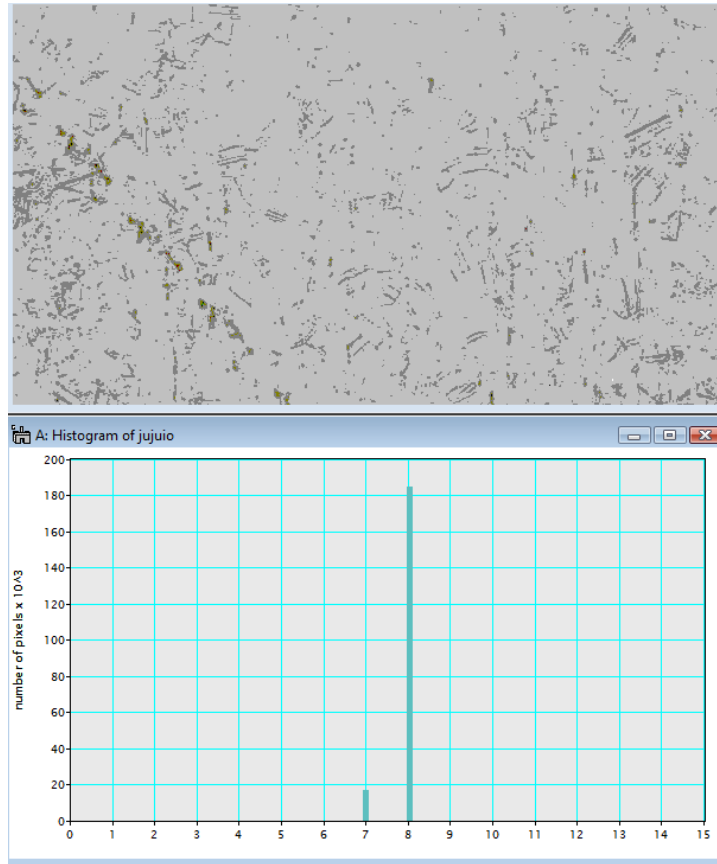


Fig. 3.3. Histograma de la micrografía del acero AISI 304 para determinación del contenido de ferrita.

La imagen anterior, obtenida utilizando el analizador gráfico Digital Micrograph, muestra los resultados del conteo de píxeles de una imagen micrográfica del acero AISI SAE 304, en la cual las fases principales presentes son la ferrita y la austenita. Los valores resultantes fueron: 18166 píxeles de color gris oscuro, correspondiente a la ferrita, y 186952 píxeles de color gris claro, correspondiente a la austenita; obteniéndose como resultado:

Tabla 3.6. N° Pixeles y % de ferrita presente en el acero AISI 304

	Pixeles Ferrita	Pixeles Austenita	Total	Ferrita (%)
AISI SAE 304	18166	186952	205118	8.85

3.1.4. Carbono equivalente en el material base ASTM A36

Utilizando la ecuación {3} presentada en la sección 2.1.4. Se obtuvo el valor del carbono equivalente para el acero ASTM A36 que resultó 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.

Las cantidades utilizadas en la relación fueron las halladas en el análisis químico del acero.

Según el Handbook de la AWS ⁽²⁴⁾, 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.

3.1.5. Dureza

Los valores obtenidos en los ensayos de dureza realizados a los aceros ASTM A36 y AISI/SAE 304 se presentan en las [tablas 3.7 y 3.8](#) respectivamente. En cada tabla son mostrados los resultados de cada medición junto con el valor del promedio y su desviación estándar en escala Rockwell B (HRB).

Tabla 3.7. Valores de Dureza Rockwell B (HRB) obtenidos para el material base ASTM A36.

Medición	Valor de Dureza (HRB)
1	71,000
2	72,000
3	71,000
4	73,000
5	72,000
6	69,000
7	68,000
8	71,000
Promedio =	70,880

Tabla 3.8. Valores de Dureza Rockwell B (HRB) para el material base AISI/SAE 304.

Medición	Valor de dureza (HRB)
1	85,000
2	86,000
3	89,000
4	89,000
5	87,000
6	87,000
7	86,000
8	88,000
Promedio =	87,130
Requerimiento ASTM A240	92

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/SAE 304 está dentro del intervalo establecido en las normas ASTM A36 y ASTM A240 respectivamente.

3.1.6. Ensayo de tracción

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.

El acero presenta inicialmente un comportamiento elástico, es decir, vuelve a su estado original sin deformación permanente. Esta propiedad elástica ocurre hasta un determinado esfuerzo en donde a partir de éste el acero presenta un comportamiento plástico, en el cual ocurren deformaciones permanentes. Estos comportamientos son esencialmente tomados en cuenta para el diseño según las condiciones de servicio de las piezas. El valor que separa ambos comportamientos se conoce como esfuerzo de fluencia y para el caso de los aceros está bien definido.

Para el acero inoxidable el valor mínimo es 205MPa según la norma ASTM A-240 ⁽²⁵⁾ y de 250MPa como mínimo para el acero estructural ASTM A-36, según la norma del mismo nombre. Los resultados promedio experimentales fueron 331.67MPa para el acero inoxidable y 264.33 MPa para el acero estructural. Ambos valores se encuentran por encima del mínimo exigido, cumpliéndose así el requerimiento de sus respectivas normas.

Otro valor de importancia es el esfuerzo máximo, en el cual se produce la fractura de la pieza, éste esfuerzo es la carga máxima axial aplicada por unidad de área, que en este caso es la del cuello de la probeta en donde ésta es mínima.

El esfuerzo máximo aparece referenciado con valores mínimos igualmente en las normas de los aceros estudiados, para el acero AISI 304 el

valor requerido es de 515MPa en la norma ASTM A240 y para el acero estructural ASTM A36 el valor exigido es de entre 400 y 550MPa según la norma de igual nombre.

Los valores resultantes promedio fueron 668.36 MPa para el acero inoxidable y 442.30 MPa para el acero estructural A36, cumpliéndose igualmente con los valores exigidos por sus respectivas normas.

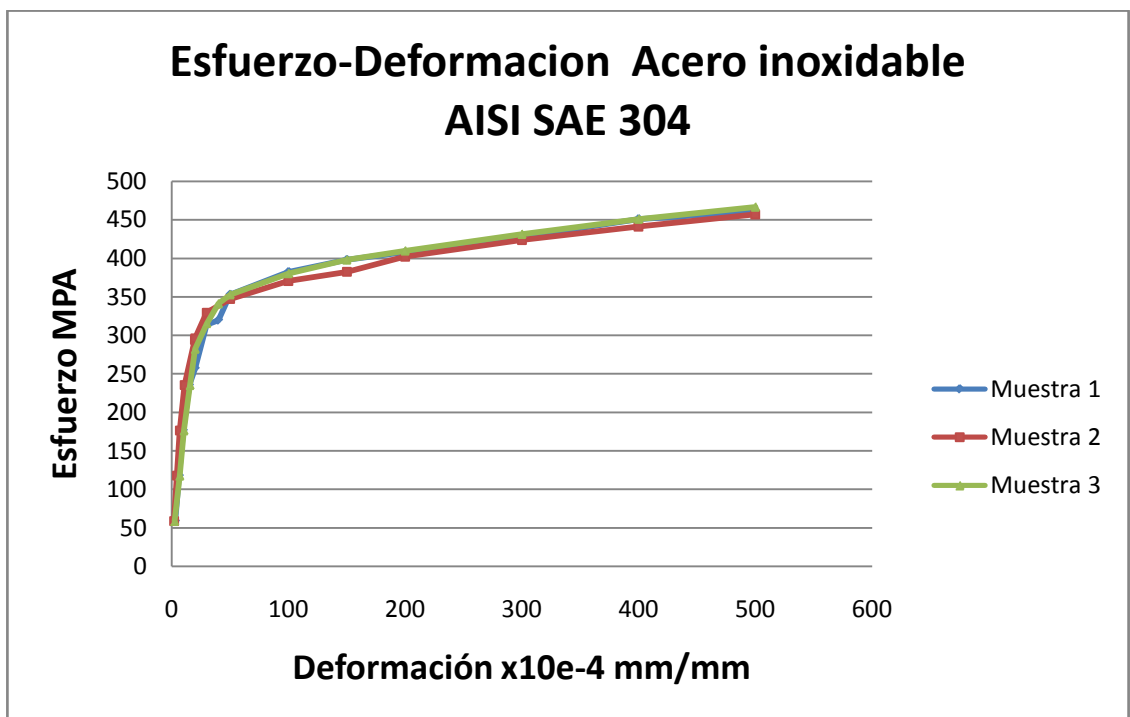


Fig. 3.4. Curvas Esfuerzo-Deformación del acero AISI 304.

Tabla 3.9. Esfuerzos máximos y Límites de Fluencias del acero AISI 304.

Acero AISI/SAE 304	Smáx (MPa)	Sy del 0,2% (MPa)	ΔL en 50 mm (%)
Probeta 1	660.52	320,000	52,000
Probeta 2	678.16	330,000	56,000
Probeta 3	666.40	345,000	56,000
Promedio	668.36	331,670	54,700
Norma ASTM A240	515 mínimo	205 mínimo	40 mínimo

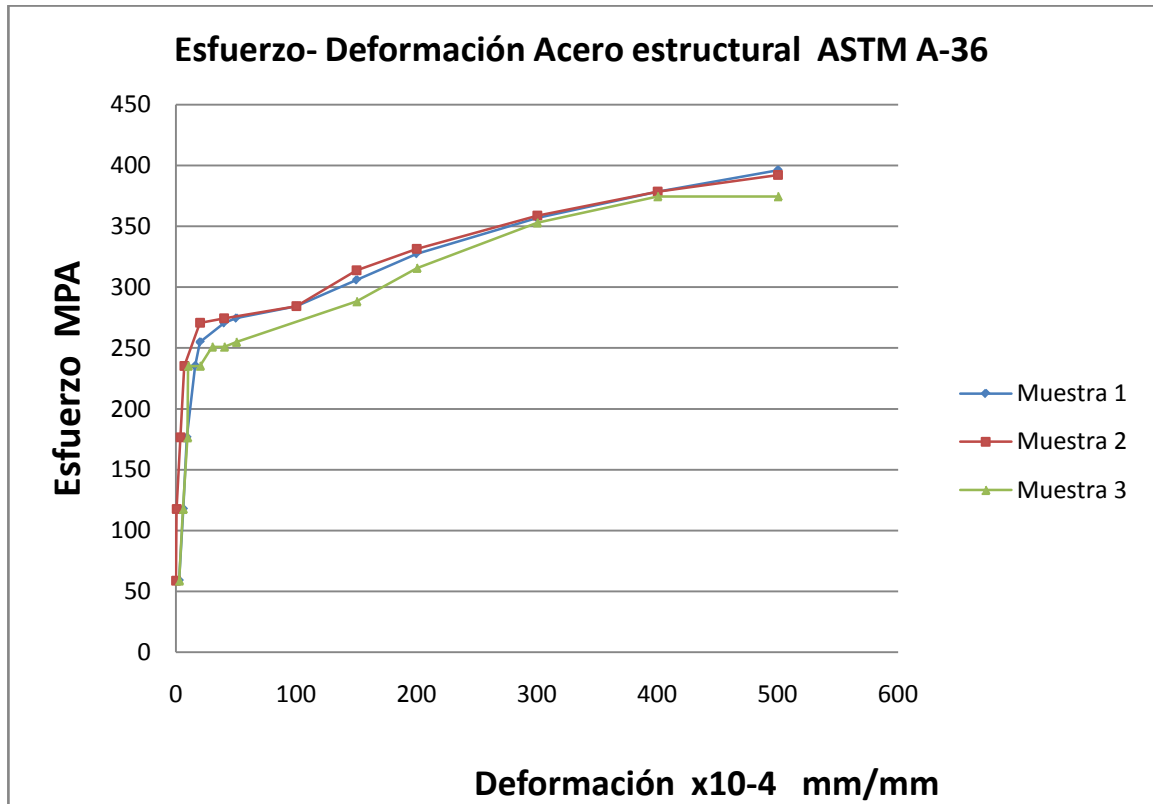


Fig. 3.5. Curvas Esfuerzo-Deformación del acero ASTM A36.

Tabla 3.10. Esfuerzos máximos y Límites de Fluencias del acero ASTM A36.

Acero ASTM A36	Smáx (MPa)	Sy del 0,2% (MPa)	ΔL en 50 mm (%)
Probeta 1	446.88	270,00	38,200
Probeta 2	441.01	276,00	33,000
Probeta 3	439.04	265,00	35,000
Promedio	442.30	264,33	35,400
Norma ASTM A36	400 - 550	250 mínimo	23 mínimo

En los gráficos esfuerzo – deformación 3.4 y 3.5 los valores de esfuerzo máximo 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. En las tablas 3.9 y 3.10 si aparecen los valores de esfuerzo máximo porque aunque no se obtuvieron los datos de deformación si se obtuvieron los esfuerzos últimos por medio del dial que registra los esfuerzos en la máquina universal de ensayos.

3.2. Diseño de junta

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 un 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.

3.3. Determinación preliminar de conjuntos de parámetros de soldadura (SMAW y GTAW)

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.

Para la soldadura con el proceso GTAW se usaron como referencia los parámetros del proceso de soldadura eléctrica con arco de plasma (PWM 300 Welding torch ⁽²⁶⁾) con arco transferido, ya que ésta es una modificación del sistema GTAW que conserva como fuente de aporte térmico el calor generado por el circuito eléctrico y adiciona el obtenido a través del plasma. Igualmente se utilizó como referencia la información contenida en el handbook de soldadura de arco eléctrico, en donde se especifican los rangos de parámetros para la soldadura de acero austenítico inoxidable

Para ambos casos se obtuvieron los siguientes rangos de prueba:

Tabla 3.11. Valores de los parámetros usados para cordones de prueba.

Proceso	Corriente (amp)	Voltaje (V)	Velocidad avance (mm/s)	Flujo gas protector (l/min)
GTAW	150-155-165	32	aprox. 1,4	8-12
SMAW	60-70-80	23-26-27	aprox 1,3	-----

Con los valores definitivos de los parámetros para ambos casos se procedió a calcular los valores de energía aportada por cada proceso.

Energía de aportación es la energía bruta aportada en el proceso

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

En donde:

U = tensión de la corriente de soldeo, en voltios.

I = intensidad de corriente de soldeo, en amperios.

v= velocidad de avance de la soldadura, en cm/min.

$$ENA = \rho \cdot EBA$$

ENA= energía neta aportada

ρ = rendimiento del proceso (SMAW = 0.75 , GTAW = 0.65)

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.

Tabla 3.12. Parámetros de los cordones de ensayo para SMAW.

Cordón	Corriente (amp)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (mm/min)	Energía bruta aportada (EBA) (KJ/mm)	Energía neta aportada (ENA) (KJ/mm)
1	60	23	66	1,25	0,94
2	70	26	78	1,40	1,05
3	80	27	84	1,54	1,16

Tabla 3.13. Parámetros de los cordones de ensayo para GTAW.

Cordón	Corriente (amp)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (mm/min)	Flujo gas protector (l/min)	Energía bruta aportada (EBA)(KJ/mm)	Energía neta aportada (ENA) (KJ/mm)
(A)	165	32	70	8	4,53	2,94
(B)	165	32	84	12	3,78	2,45
(C)	150	32	90	12	3,20	2,08
(D)	150	32	84	8	3,43	2,23
(E)	155	32	96	12	3,10	2,02
(F)	155	32	72	8	4,13	2,69

3.4. Fabricación de cupones de prueba preliminares

En la siguiente figura se observan los cupones preliminares depositados empleando los conjuntos de parámetros establecidos en la etapa anterior utilizando ambos procesos.

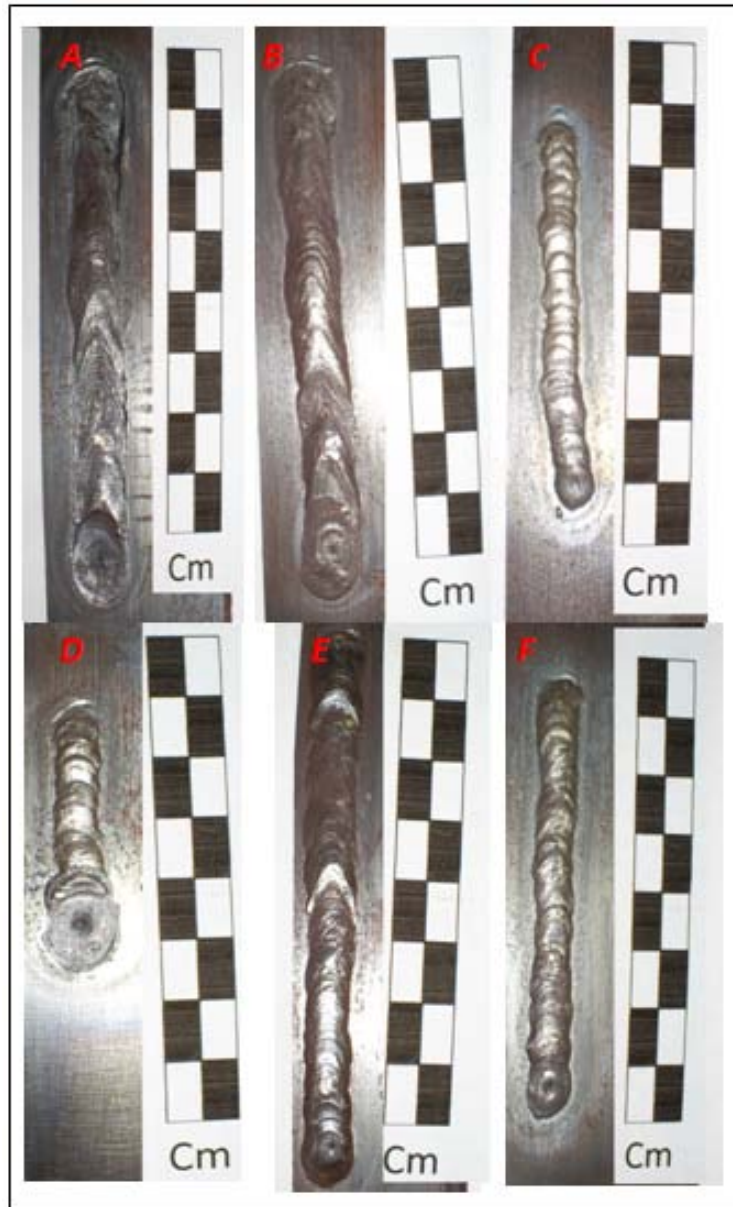


Fig.3. 6. Cordones preliminares sobre chapa por GTAW.



Fig. 3.7. Cordones preliminares sobre chapa por SMAW.

3.5 Evaluación de cordones preliminares

3.5.1. Inspección visual

En los cordones soldados con ambos procesos no se observaron salpicaduras, agrietamientos, socavaduras o porosidades que pudieran afectar la aceptabilidad de los mismos; tal y como se evidencia en las [figuras 3.6 y 3.7](#).

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 los cordones más anchos y con altura de refuerzo de cara menor corresponden a los cordones A, B y 3; 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 1, 2, D y C.

3.5.2. Evaluación macrográfica

En el análisis macrográfico 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, específicamente para los denominados A, B y 3; y en el caso inverso para los cordones con menor aporte calórico: F, D, E, C y 1.

Según el Handbook AWS, 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.

En las imágenes [A B C y F](#) de la [figura 3.8](#) (proceso GTAW), se observa que los cordones presentaron poca penetración debido a la baja energía de aporte, con valores que oscilaron desde 2,02 KJ/mm hasta 2,45 KJ/mm. Sin embargo, en la imagen 3A, la penetración excesiva se evidencia en la presencia de material depositado en la superficie posterior del material base (4 mm de espesor) lo cual coincide con la energía de aporte máxima (2,94 KJ/mm).

En la [figura 3.9](#), las imágenes 1, 2 y 3 corresponden a los cordones depositados mediante el proceso SMAW. Los parámetros utilizados fueron los recomendados por el fabricante del electrodo según el diámetro del mismo, esto es, el amperaje debía fijarse en un valor entre 60 y 80 A. Se reportó un voltaje promedio ya que éste varió ligeramente según la separación de la punta del electrodo a la pieza de trabajo.

En las imágenes de la [fig. 3.9](#), es posible apreciar un aumento gradual de la penetración que, al igual que en el caso anterior, concuerdan con el aumento de amperaje utilizado y en consecuencia, con la energía correspondiente aportada; siendo tales valores 0,94; 1,05 y 1,16 KJ/mm, tal y como se indica en la [tabla 3.12](#).

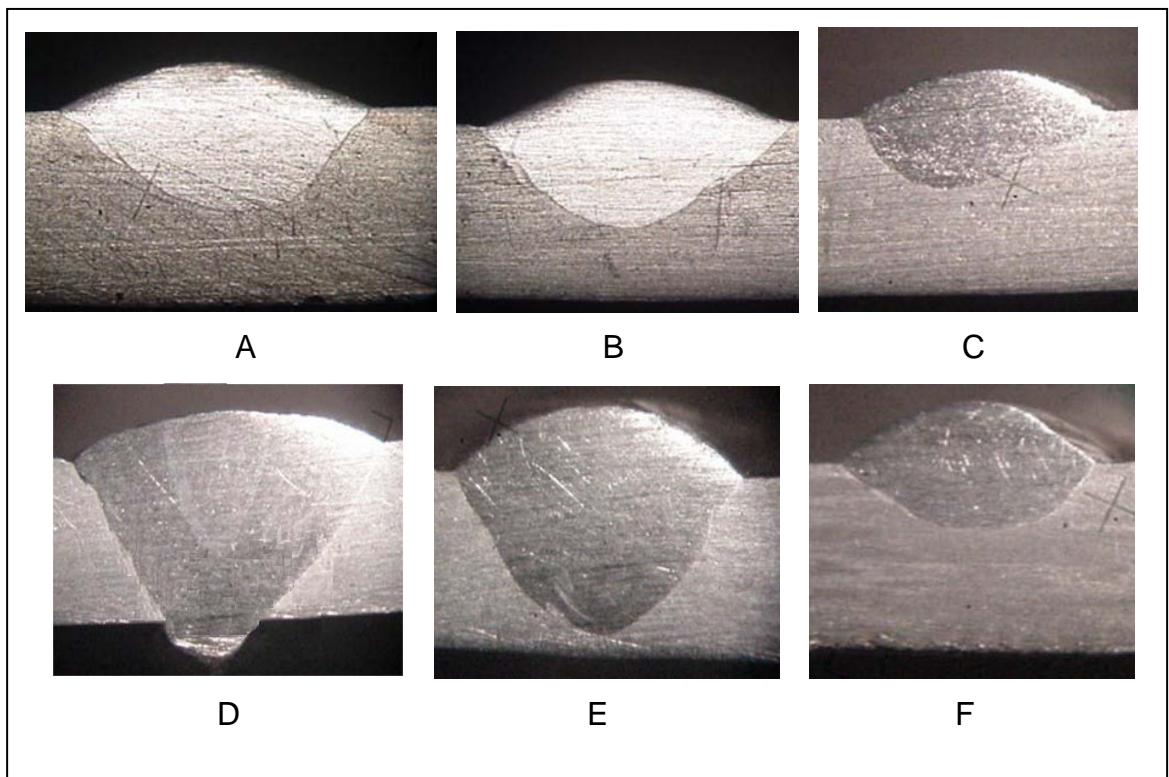


Fig. 3.8. Macrográficas de cordones sobre chapa preliminares por GTAW

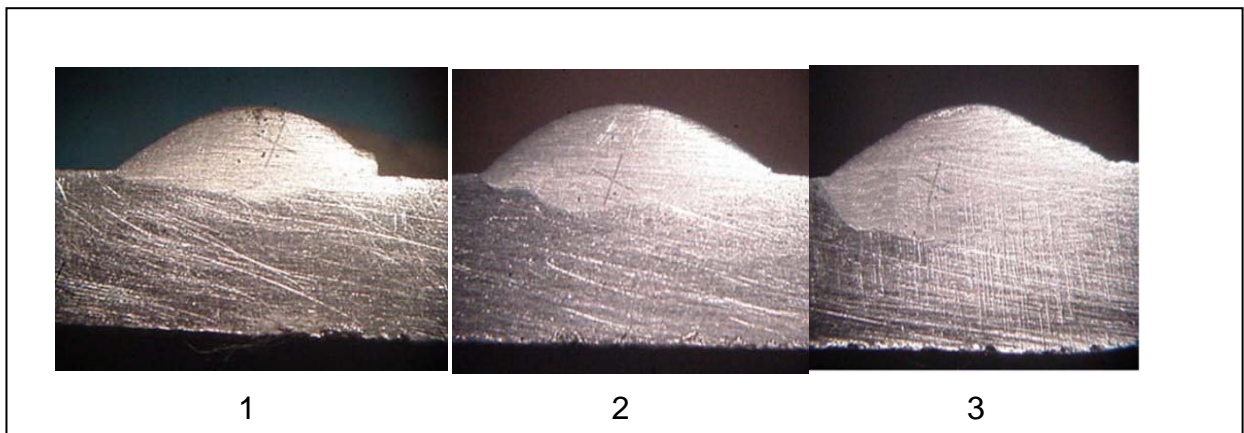


Fig. 3.9. Macrográficas de cordones sobre chapa preliminares por SMAW

3.6. Selección definitiva de conjuntos de parámetros de soldadura (SMAW y GTAW)

A partir de los resultados de la inspección visual y macrográfica se escogieron los conjuntos de parámetros que produjeron cordones con características superficiales y de penetración óptimas. En las [tablas 3.14 y 3.15](#) se presentan dichos conjuntos de parámetros.

Tomando en cuenta estos aspectos y los estudios anteriores se escogió realizar los cordones de soldadura definitivos con los siguientes parámetros:

Tabla 3.14. Parámetros de soldadura para GTAW.

Velocidad de avance	1.2 mm/sg
Amperaje	155 Amp
Voltaje	32 V
Flujo	12 l/min

Energía bruta aportada (EBA)	4,133 KJ/mm
Energía neta aportada (ENA)	2,686 KJ/mm

Tabla 3.15. Parámetros de soldadura para SMAW.

Velocidad de avance	1.4 mm/sg
Amperaje	80 Amp
Voltaje	27 V
Energía bruta aportada (EBA)	1,440 KJ/min
Energía neta aportada (ENA)	1,080 KJ/min

Los parámetros del proceso GTAW coinciden con los utilizados para depositar el cordón correspondiente a la imagen E de la [fig. 3.8](#), debido a que la penetración obtenida fue intermedia.

Por otra parte, los correspondientes al proceso SMAW fueron los empleados en el depósito del cordón de la imagen 3 de la [fig. 3.9](#), debido a la mayor penetración obtenida.

La selección de ambos conjuntos se basó en la ausencia de discontinuidades que pudiesen afectar negativamente el desempeño de la junta en condiciones reales de servicio. Igualmente, se tomó en cuenta el grado de penetración, el cual permite predecir la fusión adecuada en la raíz de la junta dependiendo del aporte de energía. Sin embargo, si éste es muy elevado se favorece la posible distorsión de la junta, especialmente, el componente correspondiente al acero inoxidable, ya que esta aleación presenta un alto coeficiente de dilatación térmica y una baja conductividad térmica.

3.7 Fabricación de cupones definitivos

Luego de establecidos los parámetros óptimos de soldadura se procedió entonces a la fabricación de las juntas soldadas.

La sujeción de las piezas se realizó para minimizar la deformación del cupón debida al efecto de la dilatación térmica. En este tipo de uniones disímiles es importante la consideración adicional de la diferencia de coeficientes de dilatación térmica entre ambos materiales base, ya que en este caso el acero inoxidable AISI 304 posee un coeficiente 5 veces mayor al del acero estructural ASTM A36, lo que adicionalmente produce una elevada concentración de esfuerzos residuales en la junta.

Durante la fabricación también se tomó en cuenta la diferencia entre los coeficientes de conducción térmica de ambos materiales, ya que debido a esto el acero inoxidable requiere menos energía para fundirse que el acero ASTM A36. La disipación de calor por conducción es menor en el acero inoxidable generándose un incremento térmico en el punto de incidencia del electrodo superior al que ocurre en el A36, lo que implica que el primero alcanzará la temperatura de fusión antes que el segundo. Con el objeto de

garantizar que la fusión de ambos materiales sea lo más uniforme posible se direcciona la punta del electrodo hacia el material con mayor conductividad térmica, es decir, el acero estructural A36.

3.8. Evaluación de cupones soldados

3.8.1. Ensayos no destructivos

3.8.1.1. Inspección Visual

El primer método de inspección no destructiva utilizado para la evaluación de los cordones fue el ensayo visual; sin embargo, es de hacer notar que la misma se realizó antes, durante y después del proceso de 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 ambas juntas se consideraron aceptables de acuerdo a los criterios de aceptación establecidos en el párrafo QW-194, de la Sección IX del Código ASME.



Fig. 3.10. Cordón de soldadura depositado con el proceso GTAW.



Fig. 3.11. Cordón soldadura depositado con el proceso SMAW.

3.8.1.2. Radiografía industrial

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. Luego del procedimiento descrito en la [sección 2.8.1.2](#), se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en las figuras 3.12 y 3.13.



Fig. 3.12 Radiografía correspondiente al cordón de soldadura SMAW



Fig. 3.13 Radiografía correspondiente al cordón de soldadura GTAW

Ambas radiografías fueron examinadas empleando un negatoscopio para obtener las condiciones de brillo y contraste óptimas.

En las [figuras 3.12 y 3.13](#), se pueden observar faltas de fusión en el comienzo, el final y las zonas de punteo de las soldaduras. Sin embargo, ambas condiciones cumplen con el criterio de aceptación indicado en el código ASME sección IX (QW- 191.2.2).

3.8.2. Ensayos destructivos

3.8.2.1. Análisis químico

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 los cordones de ambas juntas. Estos resultados, mostrados en la [tabla 3.16](#), se utilizaron posteriormente para determinar el contenido de ferrita existente en dichos cordones mediante el método químico.

Tabla 3.16. Composición química de los cordones de soldadura SMAW y GTAW.

Elemento (%)	AWS E 309L-16 (SMAW)	AWS ER 308L (GTAW)
C	0,07	0,11
Cr	17,21	17,91
Ni	9,02	7,34
Mo	0,25	0,15
Mn	0,70	1,49
Si	0,50	0,36
S	0,12	0,01
Cu	0,30	0,19
Fe	69,41	73,50
Ti	0,25	0,06
V	0,15	0,16
Co	0,57	0,98
W	0,07	0,08
Nb	0,03	0,01

Tabla 3.17. Composición química de la zona fundida de la junta (GTAW).

Elemento	Cordón GTAW	AWS ER 308L	Norma ANSI/AWS A5.9 para ER308 (% en peso)
C	0,11	-	0.08 máx.
Cr	17,91	19.50	19.5-22.0
Ni	7,34	10.52	9.0-11.0
Mo	0,15	0.15	0.75 máx.
Mn	1,49	2.01	1.0-2.5
Si	0,36	0,61	0.30-0.65
P	-	-	0.03 máx.
S	0,01	-	0.03 máx.
Cu	0,19	0.35	0.75 máx.

Tabla 3.18. Composición química de la zona fundida de la junta (SMAW)

Elemento	Cordón (SMAW)	AWS E 309L-16	Norma ANSI/AWS A 5.4 para E 309L-16 (% en peso)
C	0,07	-	0.04 máx.
Cr	17,21	23.41	22.0-25.0
Ni	9,02	12.66	12.0-14.0
Mo	0,25	0.31	0.75 máx.
Mn	0,70	1.10	0.5-2.5
Si	0,50	0.80	0.90 máx.
P	**	-	0.04 máx.
S	0,12	-	0.03 máx.
Cu	0,30	0.20	0.75 máx.

Debido a la dilución entre los materiales base y aporte, se observa una variación de la composición química que se refleja en la composición de los cordones soldados.

Según Sindo Kou ⁽²⁷⁾, 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 los aportes utilizados, la dilución con los metales base y la

diferencia de los procesos 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.

En líneas generales se aprecian los siguientes cambios en las [tablas 3.17 y 3.18](#).

El contenido de carbono de la zona fundida aumentó en ambas juntas y los contenidos de Cr y Ni de ambas juntas disminuyeron. Estos dos elementos, que son determinantes en el comportamiento inoxidable del acero, resultaron estar presentes en cantidades similares en ambos cordones. El molibdeno se mantuvo igual en ambos cordones. El contenido de manganeso disminuyó y el cobre disminuyó en GTAW y aumentó en SMAW.

Una idea de los valores obtenidos para este tipo de uniones puede apreciarse en la [tabla 3.19](#) en la cual se muestran los valores obtenidos para una unión entre un acero AISI 304 y un ASTM A-36 por SMAW usando un electrodo E309L-16. (Según metal handbook)

Tabla. 3.19. Composición química de una junta cualquiera realizada por SMAW usando AISI 304, ASTM A36 y aporte AWS E309L16, según "Metal Handbook"

Elemento	% peso
C	0.06
Mn	1.34
Si	0.51
Cr	19.90
Ni	10.38
Mo	0.15
N	0.05

3.8.2.2 Análisis metalográfico

En las figuras 3.14 y 3.15, se observan las macrografías obtenidas de ambas juntas fabricadas mediante los procesos GTAW y SMAW, respectivamente.



Fig. 3.14. Macrografía y micrografías de la junta soldada por GTAW.

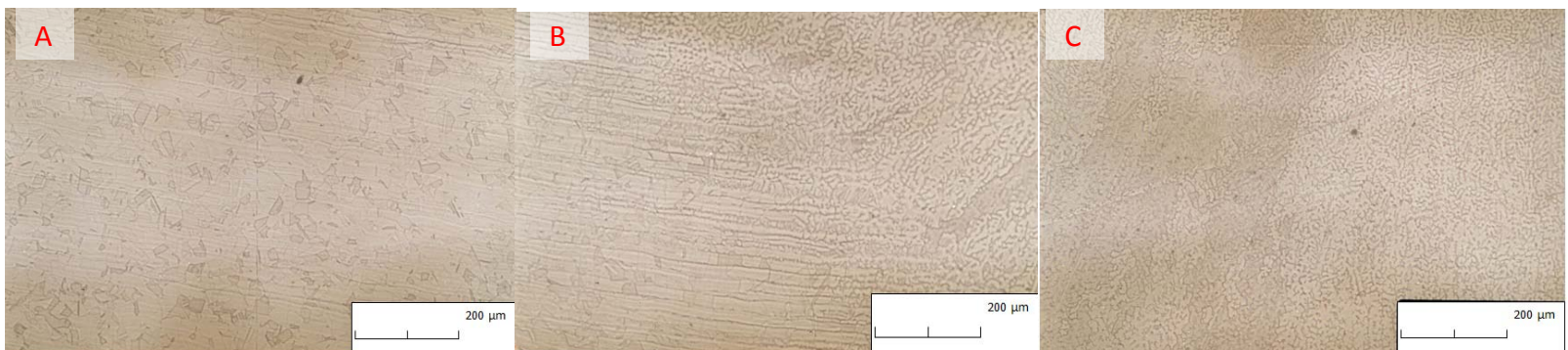
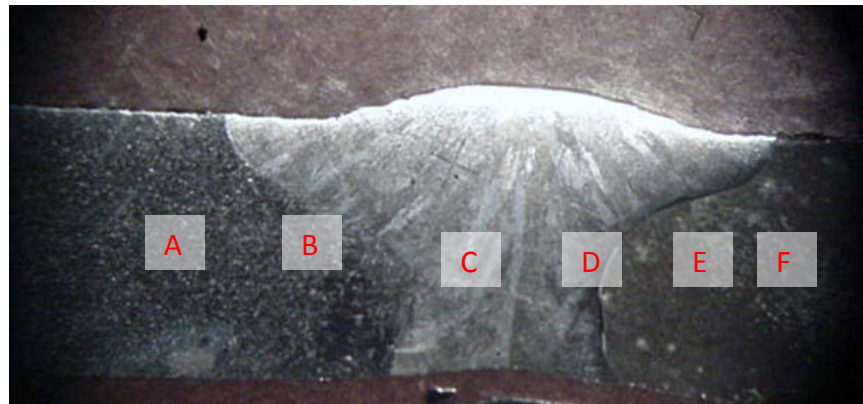
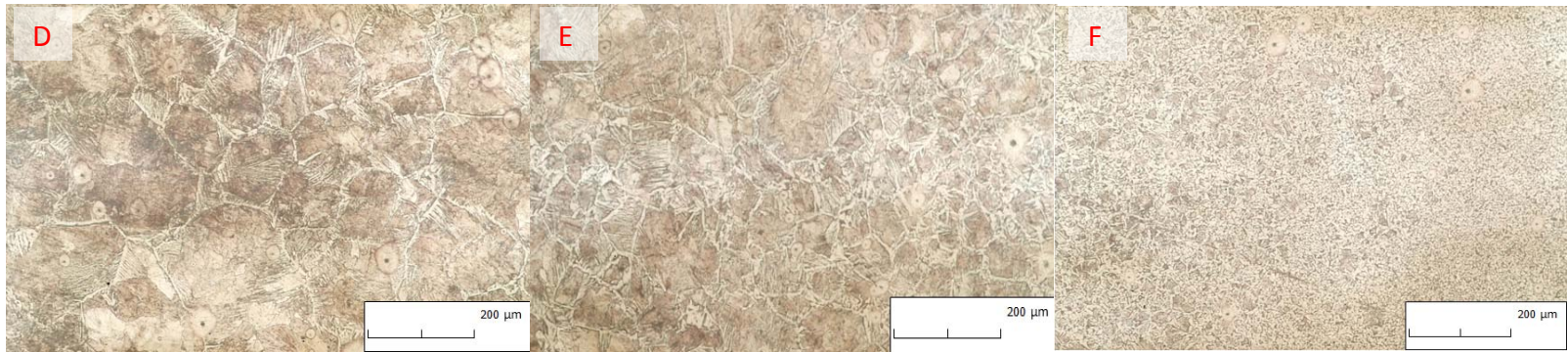


Fig. 3.15. Macrografía y micrografías de la junta soldada por SMAW.

En ambas uniones se observaron las estructuras metalográficas características de este tipo de junta disímil según lo reportado por investigadores como Brooks, Kotecki⁽¹¹⁾ y Castner⁽¹²⁾. En la zona correspondiente al material base del acero ASTM A36 se observaron granos de perlita (fase oscura), correspondientes a la mezcla eutéctica de cementita y ferrita, rodeados por granos de ferrita (fase clara), las cuales, según AVNER, son las fases típicas de un acero hipoeutectoide (Imágenes D, E y F de las Fig. 3.14 .3.15).

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. El crecimiento de los granos se debió, según el diagrama de Transformación-Tiempo-Temperatura del acero inoxidable, a la menor velocidad de enfriamiento debido al mayor aporte de calor que promueve la difusión de carbono, siendo el punto más cercano al cordón donde se alcanza exactamente la temperatura de fusión. Esta variación se observa específicamente en las micrografías D, E y F de las Fig. 3.14 .3.15.

En las micrografías A de ambas figuras anteriores 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). Según Sindo Kou⁽²⁷⁾, 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 las micrografías B de las fig.3.14 y 3.15. En las imágenes C de las fig. 3.14 y 3.15 se observó que la dirección de formación de las dendritas corresponde a la dirección de solidificación del depósito de soldadura (crecimiento competitivo).

La morfología presente en ambos casos corresponde a una solidificación primaria ferrítica FA (reportadas por David, Kotecki, Brooks, Suutala y Lippold) tal como se apreció en las micrografías. La morfología de la ferrita puede predecirse en el diagrama de fase pseudobinario correspondiente a la sección del diagrama de fase ternario Fe-Cr-Ni con un porcentaje de hierro de 70%. La solidificación primaria depende de la composición en peso de Cr y Ni del acero inoxidable y con ellos se obtiene un modelo del enfriamiento del acero. Este modo de solidificación se genera con cantidades de cromo y níquel que van desde 18% Cr y 12% Ni hasta 21% Cr y 9% Ni aproximadamente. Para un acero austenítico con 18% Cromo y 8% Ni, caso particular en ambas soldaduras, se obtiene, por consiguiente, teóricamente una solidificación primaria ferrítica FA.

3.8.2.2.1 Cálculo de la dilución

Por el método descrito en la sección 2.8.2.3 se procedió a hacer el análisis del perfil de ambas soldaduras utilizándose el analizador gráfico Micrograph, tal y como se observa en las [figuras 3.16 y 3.17](#).

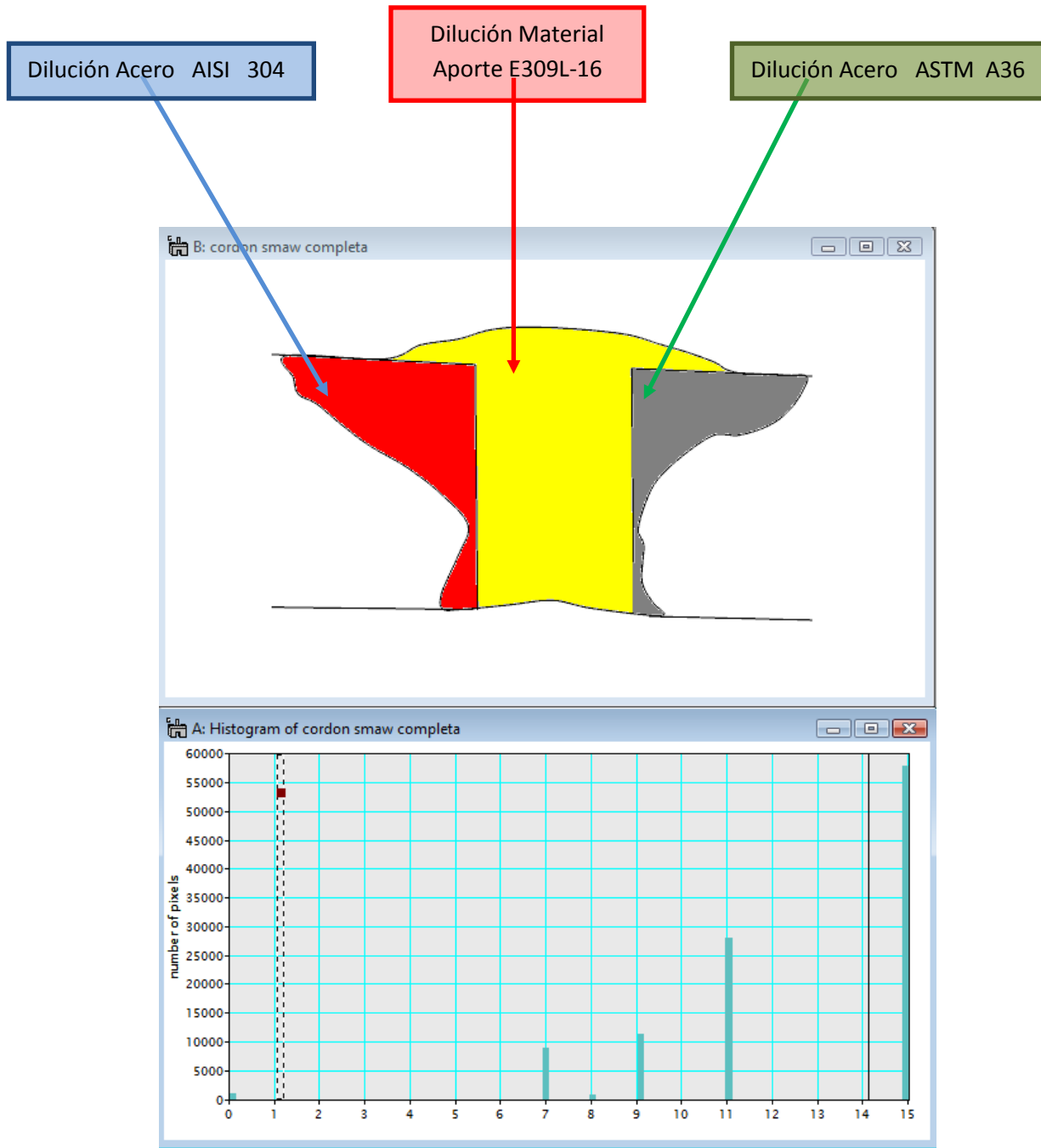


Fig. 3.16 Dilución e histograma de la junta soldada por SMAW

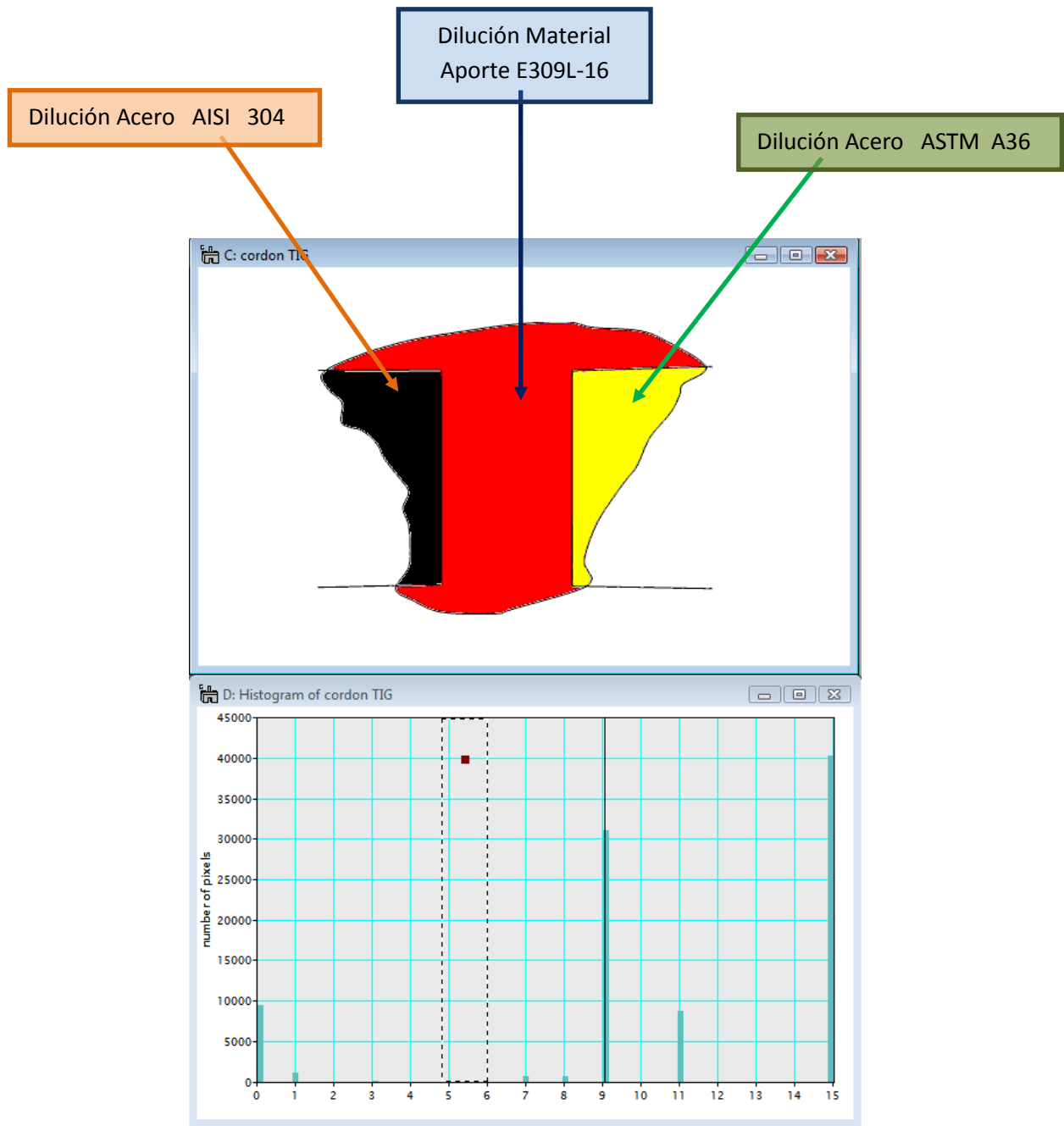


Fig. 3.17. Dilución e histograma de la junta soldada por SMAW.

Tabla 3.20. Valores de N° de pixeles de los materiales que conforman las juntas obtenidas con los procesos SMAW y GTAW.

	Material base AISI 304 (pixeles)	Material base A36 (pixeles)	Aporte (pixeles)	Total (pixeles)
SMAW	11538	9224	28294	49056
GTAW	9639	8875	31214	49728

Tabla 3.21. Valores de dilución de los materiales que conforman las juntas obtenidas con los procesos SMAW y GTAW.

% Dilución	SMAW	GTAW
AISI 304	23,52	19,38
ASTM A36	18,80	17,84
Materiales base	42,32	37,22
Aportes	57,68	62,78
Relativa AISI 304	55,58	52,06
Relativa ASTM A36	44,42	47,93

Los valores obtenidos en las [tablas 3.20 y 3.21](#) mediante las [ecuaciones \(6\), \(7\) y \(8\)](#) de la sección 2.8.2.3 permitieron determinar la proporción de ambos materiales base que se fundió y pasó a formar parte del cordón de soldadura (denominado “X”). Estos valores servirán posteriormente para calcular con mayor precisión la estimación de la ferrita según el diagrama de Schaeffler, ya que cuando no son conocidos debe asumirse por defecto una dilución del 50 % de cada material base. En particular, en los casos estudiados se observa que la dilución real difiere de esa cantidad, ya que el porcentaje correspondiente del AISI 304 es superior en ambos casos mientras que es inferior para el ASTM A36.

Igualmente, en la tabla se observan los valores correspondientes a la dilución del material de aporte utilizado (denominado “Y”), los cuales también son necesarios para el cálculo de la estimación de ferrita.

En ambas juntas se observó que en la contribución relativa de ambos materiales base, la del acero AISI 304 fue de 55.58% con el proceso SMAW y de 52.06% para el proceso GTAW, ya que este material, como se ha mencionado anteriormente, posee un coeficiente de conducción de calor menor, así que la posibilidad de alcanzar el punto de fusión es más rápida a diferencia del acero ASTM A36 que posee un coeficiente de conducción de calor menor, y requiere una tasa de aporte de energía calórica mayor.

3.8.2.3 Análisis de ferrita

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.

En general, la microestructura de un depósito de acero inoxidable austenítico consiste principalmente de austenita con cierto contenido de ferrita que varía desde 0 hasta 30FN (número ferrítico). Para procesos de soldadura al arco eléctrico, el balance de esta fase es dependiente en primer lugar de la composición química del depósito de soldadura y en segundo lugar de las variables del proceso de soldadura que inciden sobre la solidificación y velocidad de enfriamiento del depósito. (Handbook AWS)

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 (Hb AWS).

La ferrita es deseable en el cordón ya que le confiere propiedades que pueden ser beneficiosas bajo ciertas condiciones de servicio. Según Manuel Reina Gómez ⁽²⁸⁾, 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. Esto se debe a que estos elementos forman compuestos de bajo punto de fusión que tienden a ser segregados durante la solidificación del material, formando zonas débiles en la línea central del cordón. (Manuel Reina Gómez). 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. (Hb AWS)

Como se indicó en la sección 2.8.2.3 del procedimiento experimental, la estimación del contenido de ferrita se realizó mediante tres métodos diferentes para ambas juntas.

3.8.2.3.1 Método Químico 1. Diagrama de **Schaeffler** tomando en cuenta la dilución de los metales base y aporte.

En las [figuras 3.18 y 3.19](#), se muestran los resultados de % de ferrita para el proceso GTAW y el proceso SMAW, respectivamente, considerando los resultados de dilución de la [tabla 3.21](#).

$$\text{Niquel Equivalente} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn$$

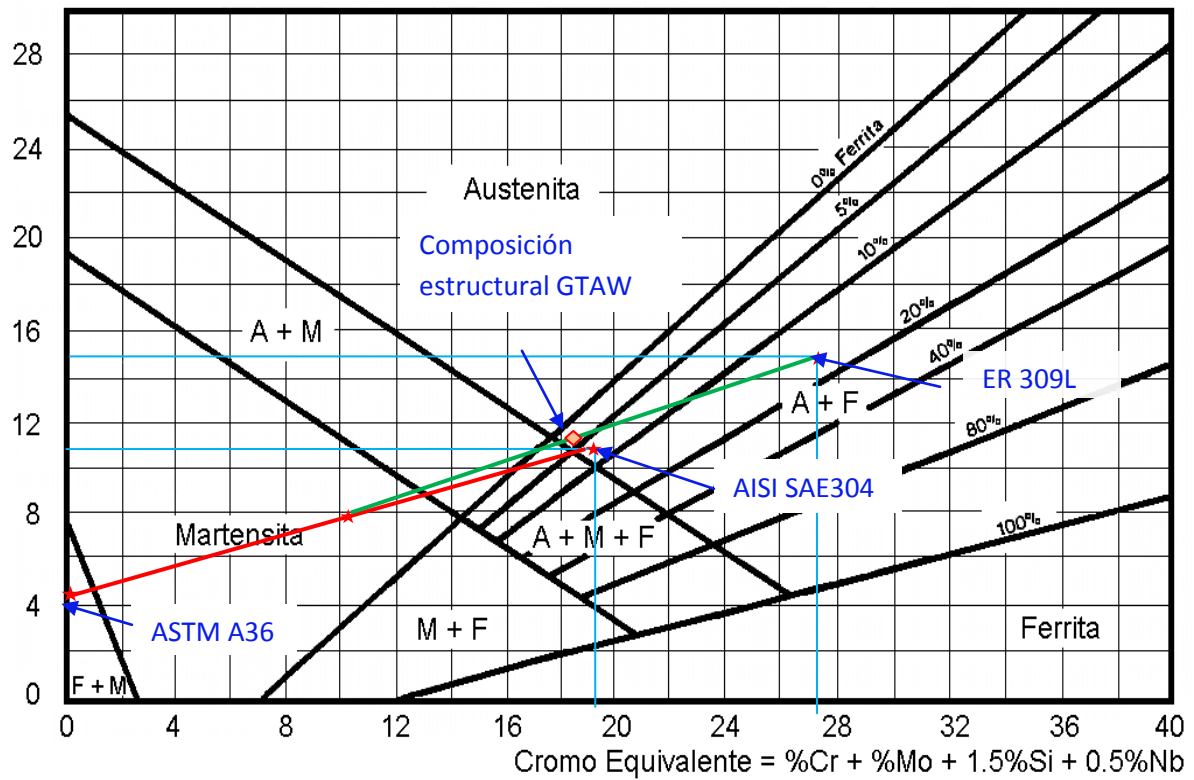


Fig. 3.18 Estimación de ferrita de la soldadura GTAW.

$$\text{Niquel Equivalente} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn$$

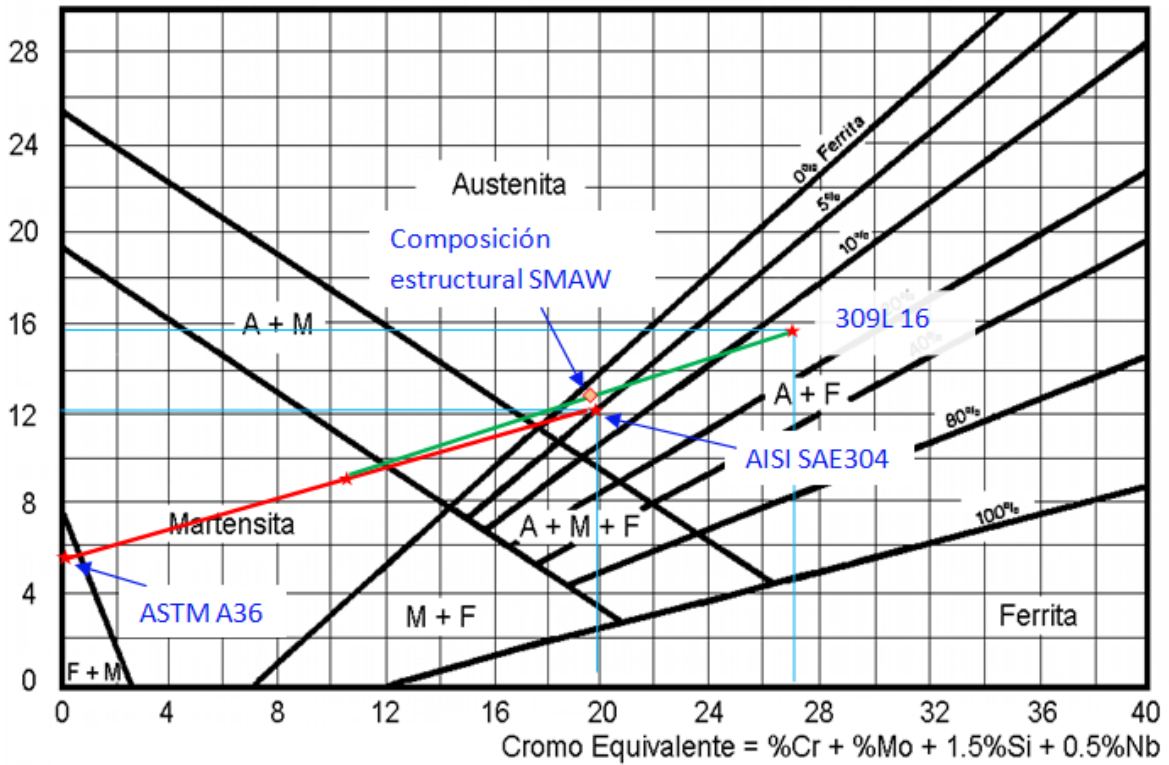


Fig. 3.19. Estimación de ferrita de la soldadura SMAW.

3.8.2.3.2 Método químico 2. Diagrama de Schaeffler usando la composición química de los depósitos.

Los valores de Cr_{eq} y Ni_{eq} calculados para las juntas se muestran en la [tabla 3.22](#) utilizando los resultados del análisis químico presentado en las [tablas 3.17 y 3.18](#).

Tabla 3.22. Valores de Cr_{eq} y Ni_{eq} presentes en ambos cordones de soldadura.

Diagrama Schaeffler		
	GTAW	SMAW
Cr eq	18,603	18,224
Ni eq	11,395	11,445

Estos valores se graficaron directamente sobre el diagrama de Schaeffler obteniéndose otro elemento de juicio sobre el valor del % de ferrita en ambos cordones de soldadura. En la siguiente figura se muestra la ubicación del punto de intersección obtenido según los valores de Cr_{eq} y Ni_{eq} .

$$\text{Niquel Equivalente} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn$$

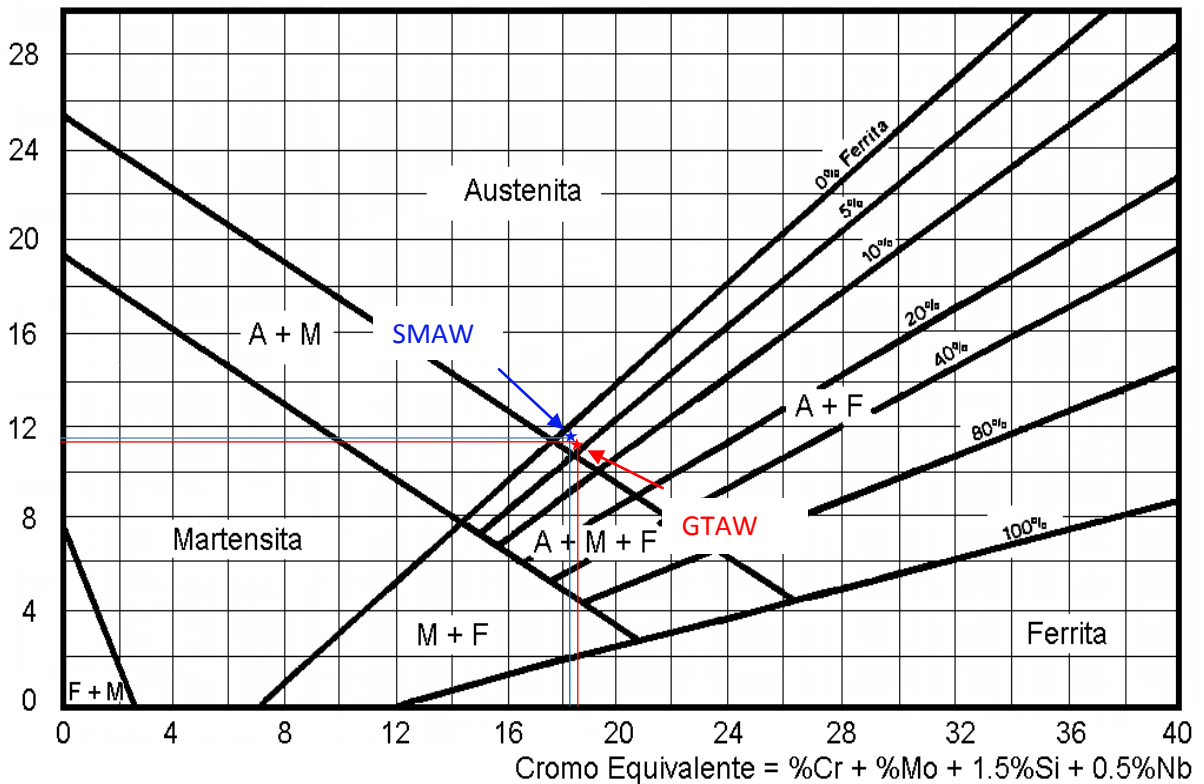


Fig. 3.20 Contenido de ferrita de los cordones de soldadura según el Diagrama de Schaeffler.

Los elementos ferritizantes y austenizantes son los datos para el cálculo de la estimación de la ferrita por medio de relaciones empíricas. Estas relaciones difieren en cuanto a los elementos aleantes y sus propiedades estabilizadoras de las fases predominantes luego de la soldadura.

En esta investigación se empleó el Diagrama de Schaeffler ya que éste incluye un intervalo de composiciones de Cr_{eq} y Ni_{eq} más amplio por lo que es el recomendado según el [handbook aws](#) para la estimación de ferrita en una unión disímil entre un acero inoxidable y un acero al carbono o acero de baja aleación, situaciones en las cuales se esperaría una variación importante en cuanto a la composición final del depósito debidas principalmente a la dilución.

Se debe tener en cuenta que entre los métodos disponibles para determinar el contenido de ferrita se encuentran el metalográfico y el magnético, siendo el primero el más recomendable ya que permite una medición primaria mientras que la del segundo es una medición secundaria. Debido a esto, el diagrama de Scheaffler es recomendable, ya que el mismo fue desarrollado a partir de ensayos metalográficos. El método magnético puede presentar distorsiones, debido a que está basado en la determinación de la permeabilidad magnética del material, propiedad presente no solo en la ferrita sino también en la fase martensítica, la cual también podría estar presente en microestructura. De ser así, las mediciones obtenidas serían erradas ya que no es posible discriminar a cuál de las fases y en qué proporción contribuye cada una a la medición.

3.8.2.3.3. Método metalográfico

En las [figuras 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24](#) se observan las micrografías y sus respectivos histogramas obtenidos usando el programa Digital Micrograph mediante el análisis de número de pixeles de los cordones de soldadura.

SMAW

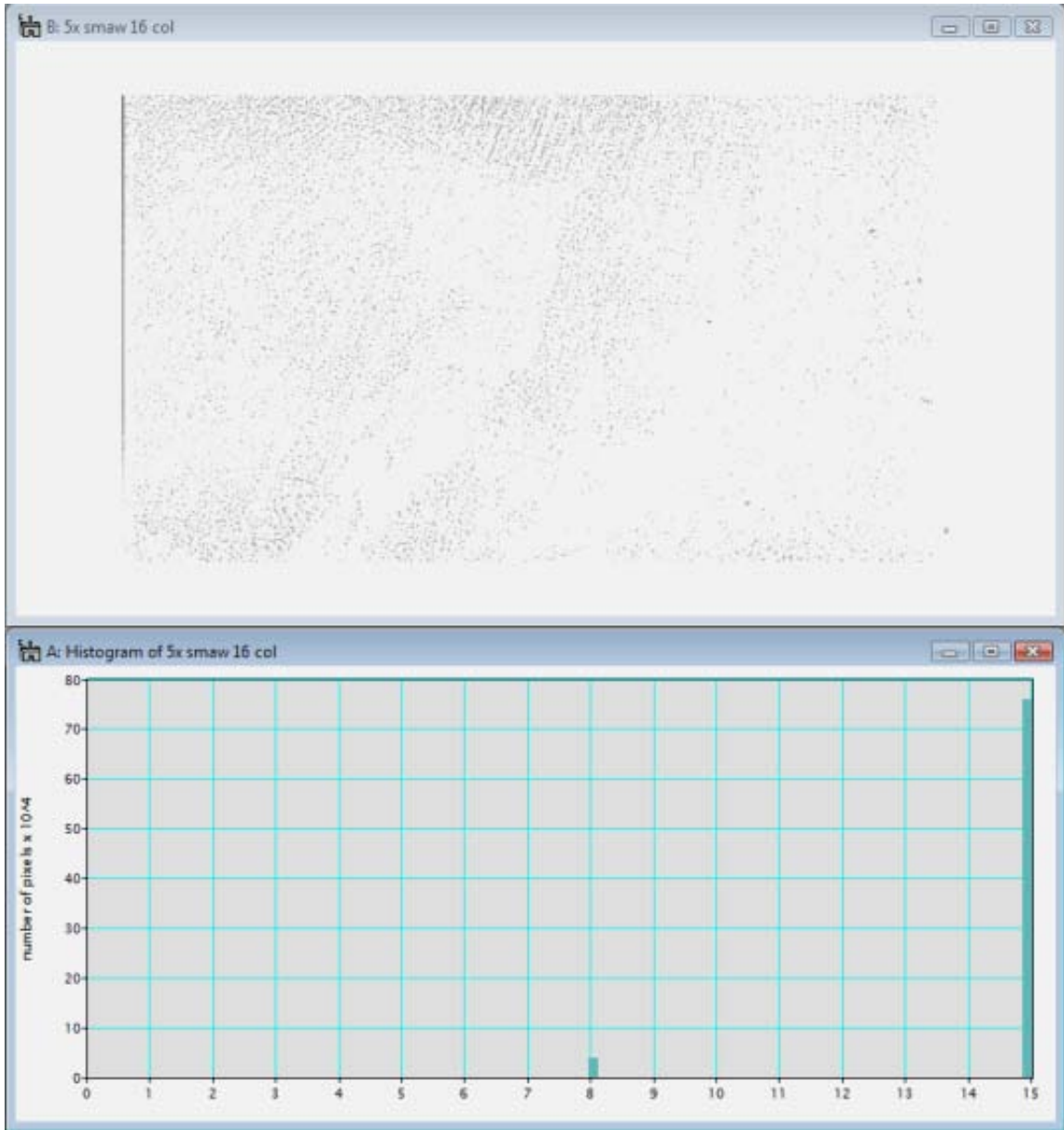


Fig. 3.21. Histograma del cordón SMAW (5X).

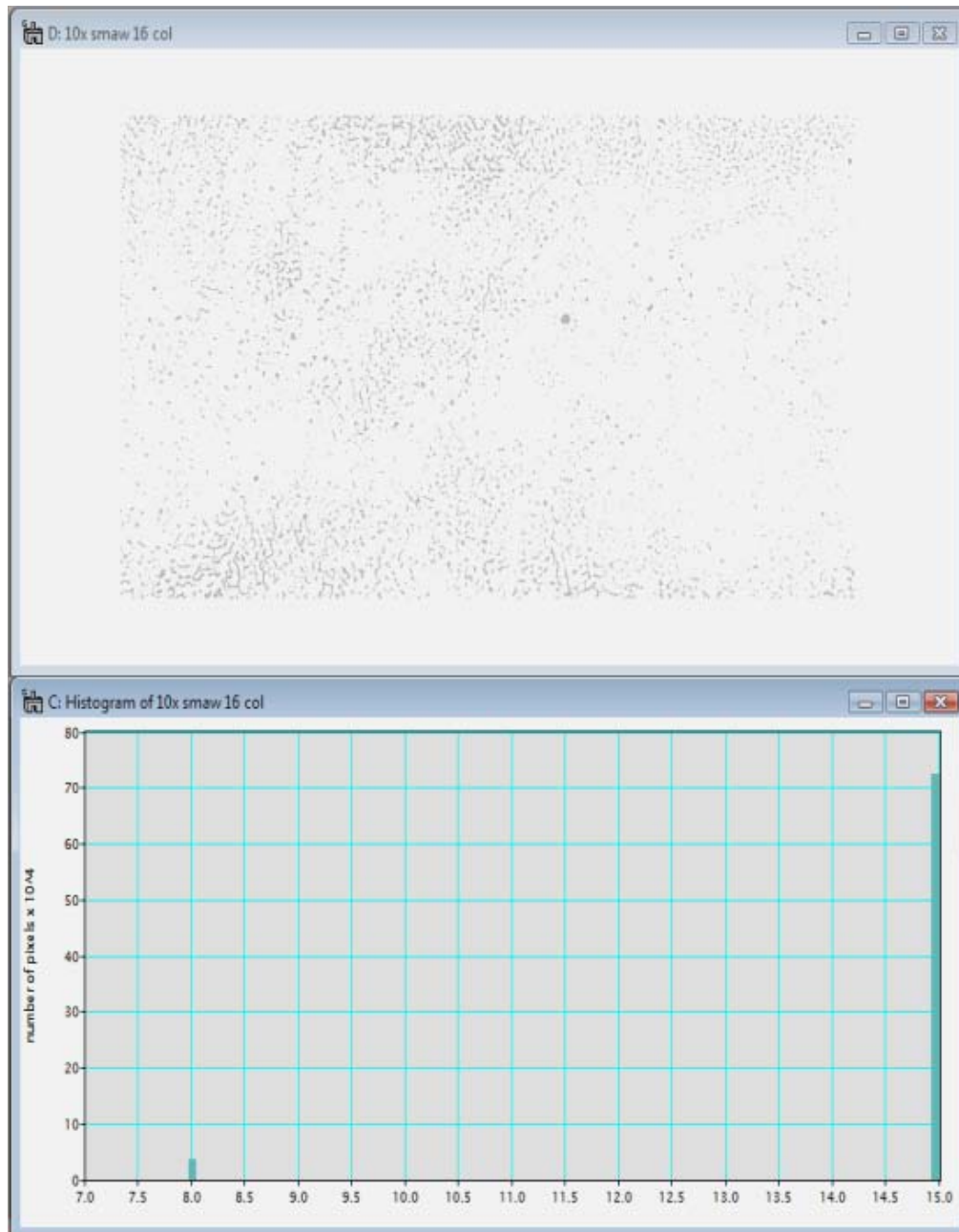


Fig.3.22. Histograma del cordón SMAW (10X).

GTAW

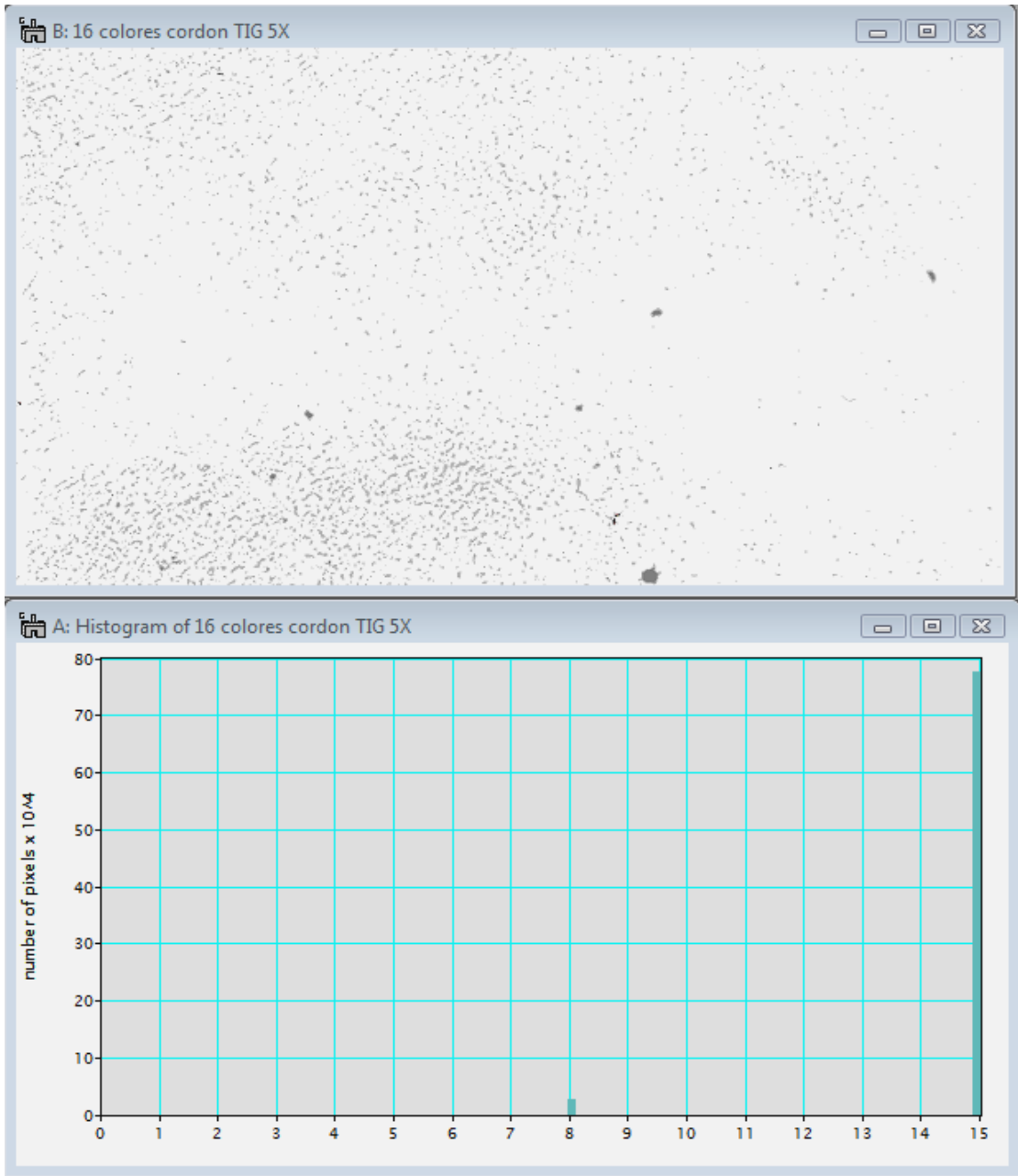


Fig. 3.23. Histograma del cordón SMAW (5X).

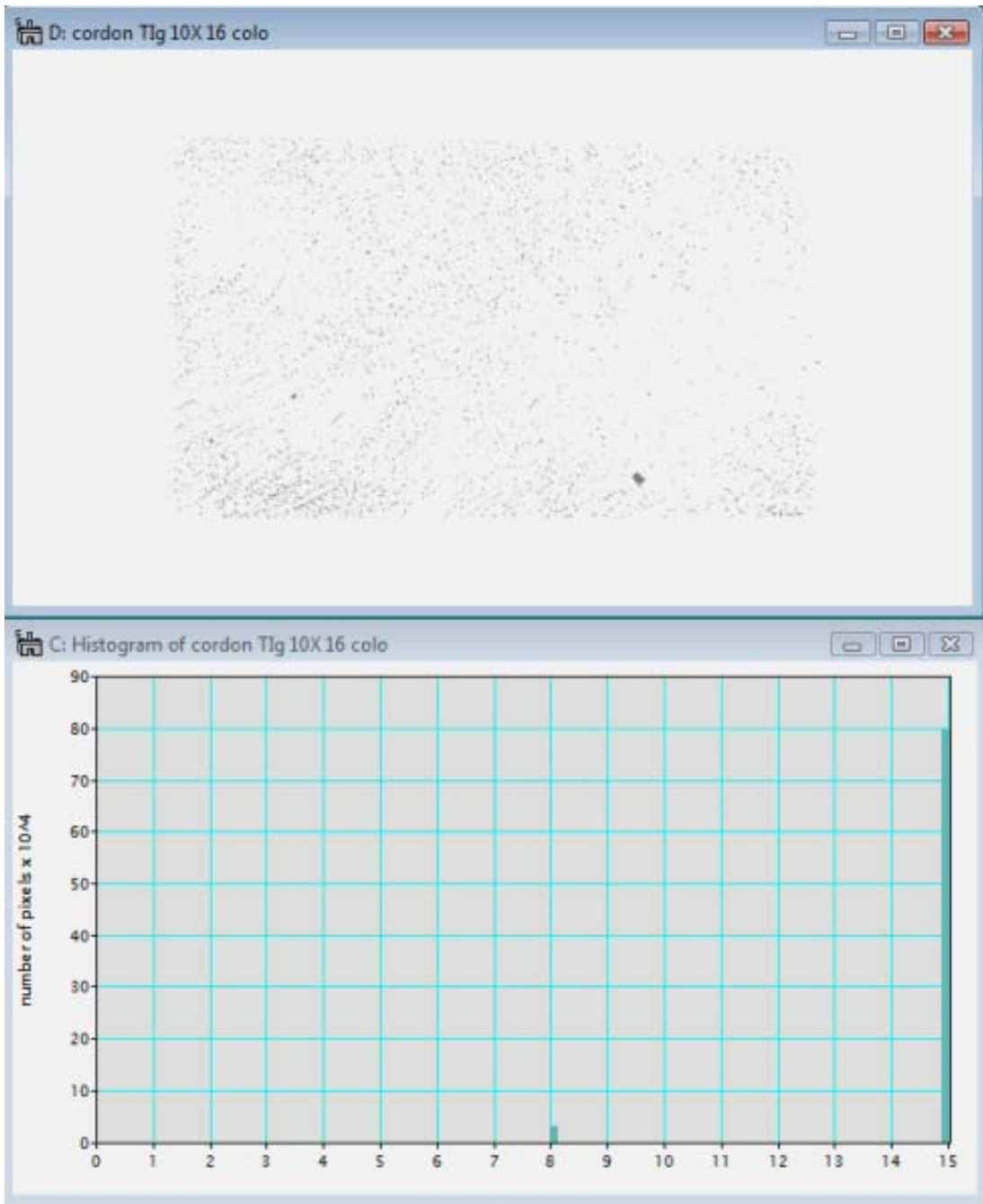


Fig. 3.24. Histograma del cordón SMAW (10X)

El método gráfico de análisis representa una herramienta de medición interesante, ya que se basa en el uso de un sistema digital para el conteo de los puntos que representan las fases.

Para este estudio se analizaron dos imágenes de cada junta realizada, con el fin de aumentar la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados. Las dos imágenes de cada cordón diferían en el aumento de la escala y en el área seleccionada de la muestra metalográfica.

Este método se aplicó para obtener otro criterio con el cual evaluar la cantidad de ferrita presente en las juntas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en este método intervienen variables que pueden afectar los resultados, entre ellos el ajuste de contraste y brillo de la imagen al momento de realizar las mediciones. En la tabla XX se muestran los resultados de los porcentajes de ferrita obtenidos.

Tabla. 3.23. Valores de contenido de ferrita según análisis metalográfico.

	Austenita (píxeles x 10 ⁴)	Ferrita (píxeles x 10 ⁴)	Total (píxeles x 10 ⁴)	%ferrita
Micrografía GTAW 50X	778420	29055	807475	3,60
Micrografía GTAW 100x	801866	32295	834161	3,87
			promedio	3,73
Micrografía SMAW 50X	762287	28197	790484	3.56
Micrografía SMAW 100X	727729	26188	753917	3.47
			promedio	3.52

En la [tabla 3.24](#) se muestran los contenidos de ferrita estimados empleando los tres métodos en ambas juntas. Si bien en tales métodos se determinó el porcentaje de ferrita, es de hacer notar que esta cantidad es equivalente al número ferrítico para valores menores a 8, sin embargo para valores superiores se presentan discrepancias

Tabla 3.24 Resultados del contenido de ferrita resultante por cada método.

Método	FN GTAW (aprox)	FN SMAW (aprox)
Método químico 1	4	2
Método químico 2	4	2
Método metalográfico	3,73	3.52

Según la literatura, el contenido de ferrita producido en el modo de solidificación primaria ferrítica varía entre 3FN y 20FN. (Hb AWS).

Por otra parte, se ha comprobado que los materiales de soldadura de la serie 300 teniendo una cantidad de ferrita controlada de entre 3FN y 8 FN se consideran prácticamente inmunes a la fisuración en caliente. (Hand Book aws). Igualmente según el handbook ASM (pág. 1691), el contenido mínimo para evitar la fisuración en caliente es de 4FN. Sin embargo, a pesar de esta convención deben tomarse en consideración algunos aspectos adicionales:

- El valor nominal 4FN se basó en la medición superficial del contenido de ferrita a lo largo de la línea central del cordón de soldadura por lo que variará en los casos en que la junta soldada sea sometida a tratamientos térmicos postsoldadura y/o fabricada depositando varios pases. En este trabajo, la junta obtenida mediante el proceso GTAW se obtuvo aplicando dos pases, por lo que se esperaría que el contenido final promedio de ferrita disminuyera debido al aporte adicional de calor en el segundo pase, el cual favorece la transformación en estado sólido $\alpha \rightarrow \gamma$ en la microestructura del cordón adyacente.
- Este valor fue convenido utilizando materiales con contenido estándar de impurezas, principalmente de fósforo y azufre; sin embargo, la posibilidad de ocurrencia de fisuración en caliente es

directamente proporcional al nivel de tales elementos. Todo esto independientemente de los valores de ferrita.

- El certificado de calidad de los materiales de aporte garantiza la obtención de un contenido de ferrita mínimo de 4FN; sin embargo, en esta investigación se deben tomar en cuenta el efecto de variables adicionales que afectarían dicho contenido, tales como la posible presencia de nitrógeno proveniente del aire atrapado debido a errores en la técnica de soldadura durante la deposición del material, tales como manipulación deficiente del electrodo por parte del soldador (SMAW) o flujo de gas de protección inadecuado (GTAW) y particularmente la dilución del material de aporte con los materiales base.

En las juntas estudiadas en este trabajo se obtuvieron valores de número ferrítico entre 2FN hasta 5FN, resultados que permiten asegurar según lo antes expuesto, que las juntas fabricadas empleando los procedimientos de soldadura desarrollados no presentarían riesgo de sufrir fisuración en caliente.

Si bien, los resultados del método gráfico no coincidieron exactamente con los de los métodos químicos, los resultados obtenidos a partir de los métodos químicos para cada junta fueron prácticamente iguales revelando así su precisión y confiabilidad.

Es apreciable en las [figuras 3.18 y 3.19](#), un efecto muy particular que ocurre típicamente según el handbook de la AWS en la unión los aceros de material base tipo 304 y 304L con materiales de aporte ER308 o ER309, el cual consiste al hecho que los niveles de ferrita del cordón resultan ser más bajos que los niveles de ferrita del acero inoxidable y del material de aporte. Esto pudiera atribuirse a los bajos valores de silicio que adquiere el cordón según su análisis químico en comparación con los que poseen tanto el acero inoxidable como el

material de aporte. Este efecto no resulta despreciable ya que este elemento posee un alto poder ferritizante.

3.8.2.4. Ensayo de microdureza

En la [figura 3.25](#) se observa la imagen correspondiente a una de las indentaciones obtenidas en la determinación de la dureza Vickers y en las [tablas 3.25 y 3.26](#) se presentan los valores medidos de las diagonales de la indentación y la dureza correspondiente a cada medición.

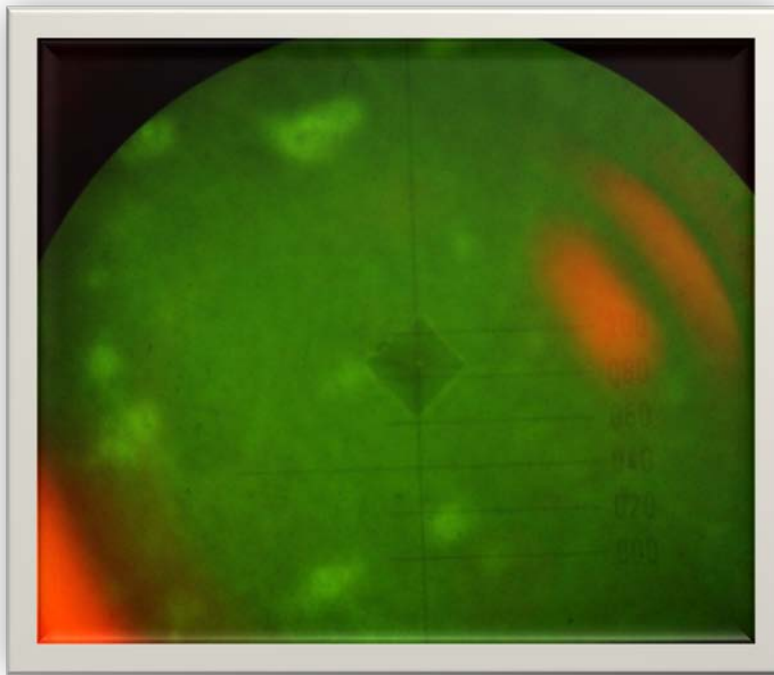


Fig. 3.25. Huella Vickers generada por la indentación.

Tabla 3.25. Valores de diagonales de la huella Vickers y la dureza correspondientes al cordón obtenido por el proceso SMAW.

Dureza Vickers SMAW						
Indentación	Diagonal 1 (unidades)	Diagonal 2 (unidades)	Prom (unidades)	Prom (mm)	Diagonal prom ^2(mm)	Dureza vickers (HV)
1	43,00	42,00	42,50	0,0425	0,0018	205,33
2	43,50	42,00	42,75	0,0428	0,0018	202,94
3	42,50	43,00	42,75	0,0428	0,0018	202,94
4	43,50	43,50	43,50	0,0435	0,0019	196,00
5	43,00	43,00	43,00	0,0430	0,0018	200,58
6	42,50	42,00	42,25	0,0423	0,0018	207,77
7	43,00	41,00	42,00	0,0420	0,0018	210,25
8	44,00	42,00	43,00	0,0430	0,0018	200,58
9	46,00	44,50	45,25	0,0453	0,0020	181,13
10	45,50	43,50	44,50	0,0445	0,0020	187,29
11	51,00	47,00	49,00	0,0490	0,0024	154,47
12	46,50	46,50	46,50	0,0465	0,0022	171,53
13	52,00	51,00	51,50	0,0515	0,0027	139,84
14	49,00	49,00	49,00	0,0490	0,0024	154,47
15	51,50	49,50	50,50	0,0505	0,0026	145,43
16	49,00	48,00	48,50	0,0485	0,0024	157,67

20 unidades equivalen a 0.02 mm

Tabla 3.26. Valores de diagonales de la huella Vickers y la dureza correspondientes al cordón obtenido por el proceso GTAW.

Dureza Vickers GTAW						
Indentación	Diagonal 1 (unidades)	Diagonal 2 (unidades)	Promedio (unidades)	promedio (mm)	Diagonal promedio $\sqrt{2}$ (mm)	Dureza vickers (HV)
1	43,50	42,50	43,00	0,043	0,0018	200,58
2	41,00	41,00	41,00	0,041	0,0017	220,63
3	43,50	42,50	43,00	0,043	0,0018	200,58
4	45,50	45,50	45,50	0,046	0,0021	179,15
5	44,00	42,50	43,25	0,043	0,0019	198,27
6	43,00	44,00	43,50	0,044	0,0019	196,00
7	40,00	39,50	39,75	0,040	0,0016	234,72
8	40,00	39,00	39,50	0,040	0,0016	237,71
9	40,00	39,00	39,50	0,040	0,0016	237,71
10	45,00	45,00	45,00	0,045	0,0020	183,15
11	52,00	55,00	54,50	0,055	0,0030	124,86
12	53,00	56,00	56,00	0,056	0,0031	118,27
13	56,00	55,00	55,50	0,056	0,0031	120,41
14	55,00	52,00	50,00	0,050	0,0025	148,35

En la [tabla 3.27](#) se presentan los valores de dureza obtenidos y promediados por cada una de las zonas del área transversal para cada junta.

Tabla 3.27. Valores de dureza según la zona correspondiente en ambos cordones.

Zona	Dureza vickers SMAW	Dureza vickers GTAW
material base (AISI 304) izq.	204,134	210,607
material base (AISI304) der	199,468	189,866
Zona afectada por el calor (ZAC AISI 304)	204,176	197,136
Zona fundida	205,417	236,215
Zona fundida	184,211	210,428
Zona afectada por el calor (A36)	162,997	121,565
material base (A36) izq.	147,152	124,191
material base (A36) der	151,550	123,797

En las [figuras 3.26 y 3.27](#) se presentan los perfiles de dureza promedio para cada una de las juntas estudiadas.

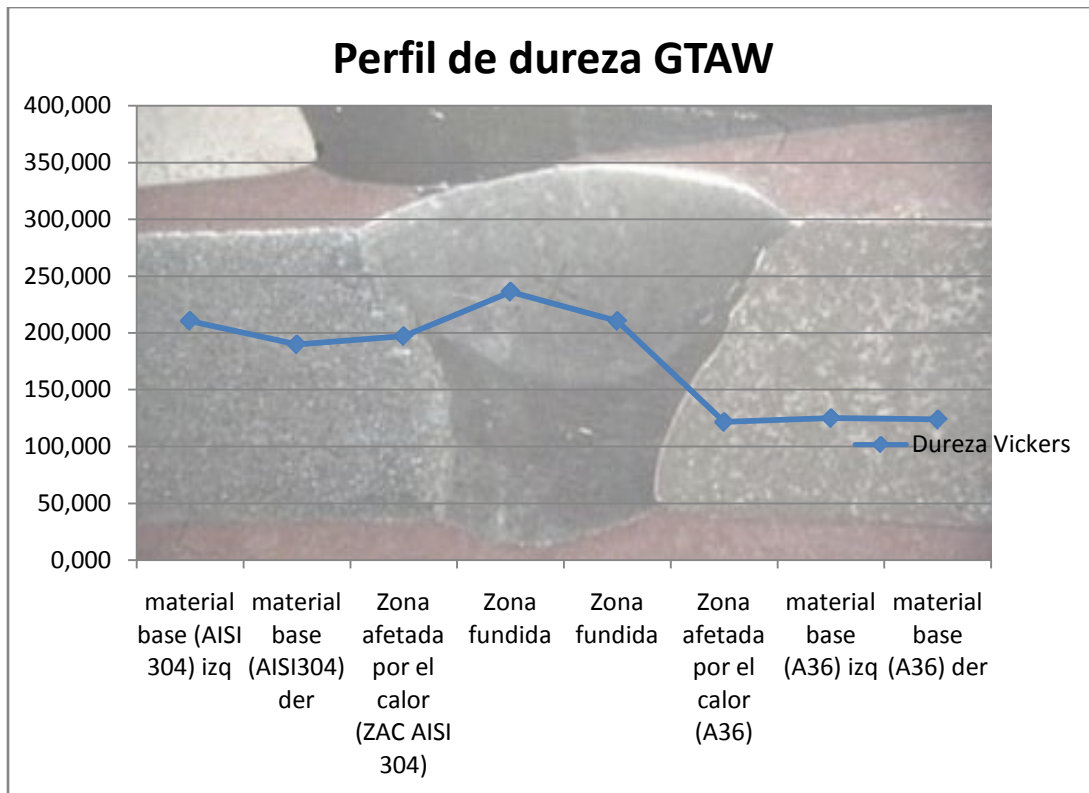


Fig. 3.26. Perfil de dureza de la soldadura GTAW.

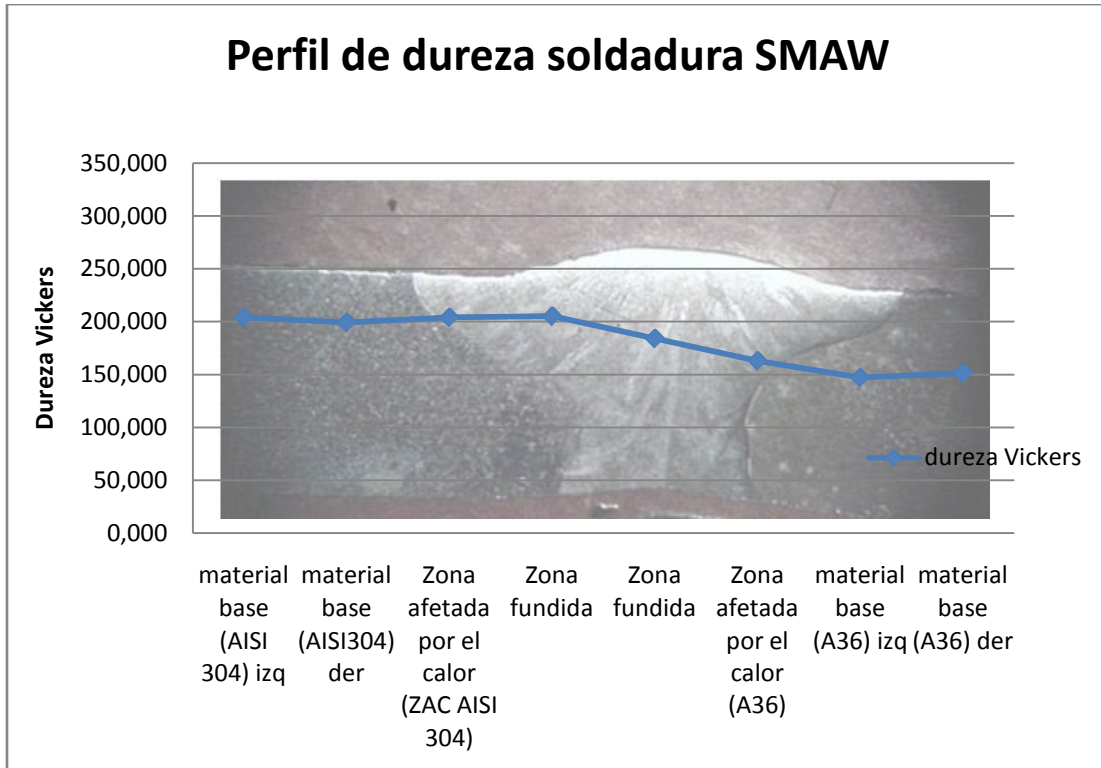


Fig. 3.27. Perfil de dureza de la soldadura SMAW.

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 como se muestra en las [fig. 3.26](#) y [3.27](#). Un comportamiento similar se observó para el acero al carbono ASTM A 36.

La soldadura disímil o heterogénea presenta la particularidad de unir materiales con características diferentes que se reflejan directamente en las propiedades del cordón generado. Para el caso estudiado de juntas entre un acero al carbono y un acero inoxidable es notoria la generación de esfuerzos residuales producto de la marcada diferencia de coeficientes de expansión térmica y coeficientes de conductividad térmica. (Welding handbook y Manuel Reina Gómez).

La conductividad térmica se refiere a la velocidad del flujo de calor a través del metal. Según Sindo Kou, cuando esta velocidad es lenta existe la

tendencia a la acumulación de calor que en consecuencia aumenta la temperatura y la deformación de la pieza. Esta deformación está relacionada con el coeficiente de expansión térmica y dependiendo de la deformación relativa de los diferentes tipos de aleaciones que intervienen en la junta se generaran esfuerzos residuales en el cordón de soldadura. En las juntas estudiadas, el acero inoxidable presenta un coeficiente de conductividad térmica menor y de expansión térmica mayor al del acero al carbono, lo cual se traduce en una menor tasa de transferencia de calor y una mayor deformación de la junta ocasionando los esfuerzos anteriormente mencionados.

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. En la zona de fusión del cordón soldado con el proceso GTAW se observó una dureza máxima de 236 HV, un 18% superior a la dureza de la ZAC del acero inoxidable. Éste aumento puede ser atribuido a los esfuerzos residuales generados por la diferencia de coeficientes de expansión térmica de ambos metales base, considerando que el aporte de calor a la junta fabricada con el proceso GTAW fue mayor que el SMAW. En el caso del proceso GTAW, la ENA es superior a la del proceso SMAW y adicionalmente la junta correspondiente al proceso GTAW se fabricó realizando depositando dos cordones de soldadura. (capt 6 Welding handbook).

La zona afectada por el calor del acero ASTM A 36 de ambas juntas presentaron una dureza similar a su estado inicial, ya que pese a estar sometidas a esfuerzos residuales por las causas mencionadas anteriormente, 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 (apreciable en las [figuras 3.14](#) [3.15](#)), tal y como es esperado para la zona afectada por calor (ZAC) para un acero al carbono según handbook ASM (pdf pág. 181). Los granos cercanos a la zona de fusión fueron recocidos, aliviando tensiones y pudiéndose apreciar su crecimiento de grano con respecto al metal

base [fig. 3.14 y 3.15](#). Para este aumento de grano, ocasionado por la exposición prolongada a temperaturas elevadas pero inferiores al punto de fusión, según [Avner pág. 146](#) se espera una disminución de la dureza y aumento de la ductilidad. Sin embargo Horwitz señala que al soldar aceros simples con bajo contenido de carbono los cambios estructurales que ocurren en la zona cercana a la soldadura no afectan apreciablemente la dureza y resistencia de las piezas, como queda expuesto en la [tabla 3.26](#) en donde los valores de dureza de toda la zona del material A36 permanecen relativamente constantes. En las [fig. 3.14 y 3.15](#) se aprecian la línea de tendencia constante en el perfil de dureza de la zona del acero al carbono.

Según Handbook AWS, los aceros inoxidable austeníticos no se endurecen por tratamiento térmico debido a que no se presentan cambios de fase en el intervalo de temperatura de fusión hasta la temperatura ambiente, tal y como se observa en el diagrama ternario Cromo-Hierro-Níquel donde los aleantes cumplen una doble función: estabilizar la fase austenítica durante todo el intervalo de temperaturas y evitar la posible formación de las fases martensita y bainita, independientemente de la velocidad de enfriamiento. (Welding handbook, stainless steel and heat treatment).

Con respecto a la metodología utilizada en la aplicación de este ensayo se debe considerar la influencia en los resultados de la apreciación en la medición de las diagonales de las indentaciones; ya que una variación de 0,01 mm en una de las diagonales medidas, se puede reflejar al final como una variación en cuatro (4) unidades de dureza.

3.8.2.5 Ensayo de doblado



Fig. 3.28. Ensayo de doblado: (1) Doble de raíz soldadura GTAW, (2) Doble de cara GTAW, (3) Doble de cara SMAW, (4) Doble de raíz SMAW.

En el ensayo de doblez se evaluó la ductilidad de las juntas deformando los cupones mediante un punzón, 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.

En el párrafo QW 161 del mencionado Código se proponen varios tipos de arreglo para realizar el ensayo de doblez guiado. El arreglo recomendado para este tipo de uniones disímiles es la configuración "Wrap Around Jig", ya que logra por medio de un rodillo móvil someter toda la pieza al doblez independientemente de los distintos grados de ductilidad de los materiales que conforman la junta, como ocurre en el presente trabajo, en el cual existe una diferencia de ductilidad entre el acero AISI 304 y el ASTM A36. Sin embargo, en el presente estudio se utilizó el tipo "Roller Jig", la cual era la configuración disponible en el Laboratorio de Ensayos Generales de la Escuela de Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, obteniéndose la máxima deformación en el cordón de soldadura mediante la aplicación gradual del esfuerzo y desplazamientos del cupón.

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.

3.8.2.6. Ensayo de tracción

A partir de los valores de esfuerzo unitario (σ) y deformación unitaria (ϵ) según el método descrito en la [sección \(2.1.6\)](#) se elaboraron las curvas correspondientes al comportamiento esfuerzo-deformación de las probetas obtenidas de los procesos de soldadura realizados.

Las probetas utilizadas en los ensayos de tracción se denominaron SMAW 1, SMAW 1, GTAW 1 y GTAW 2. En las [figuras 3.29, 3.30, 3.31 y 3.32](#) se observan las curvas obtenidas durante el ensayo de cada probeta.

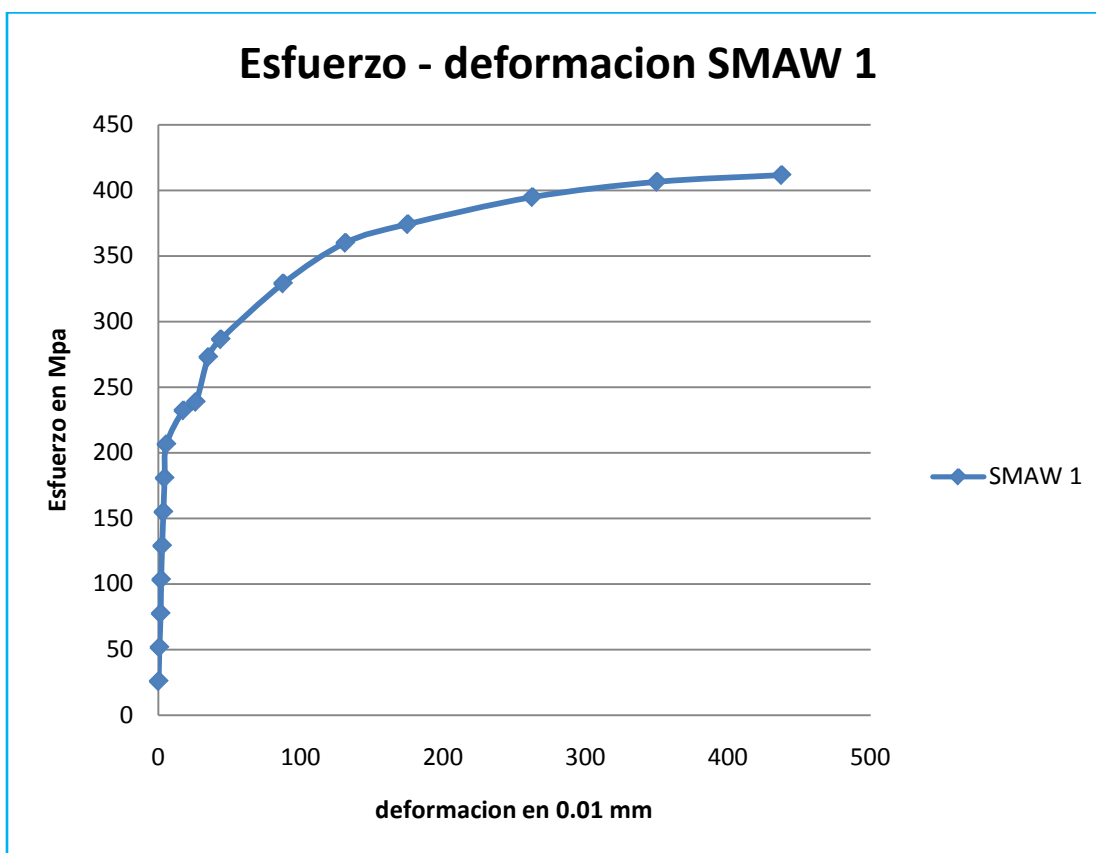


Fig. 3.29. Diagrama esfuerzo-deformación para probeta de SMAW 1.

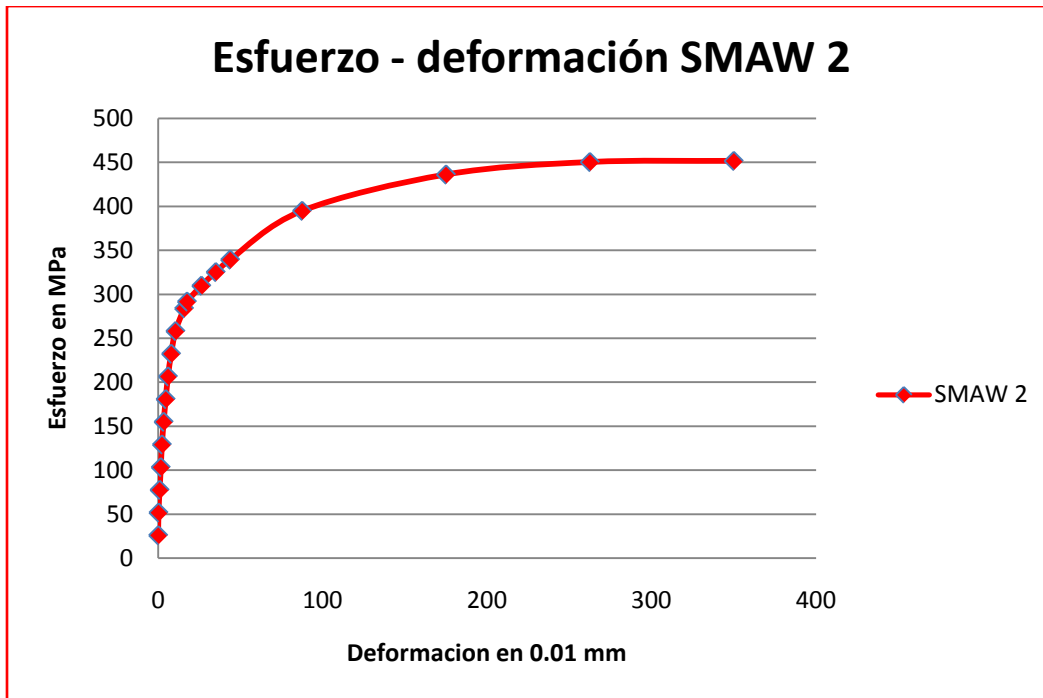


Fig. 3.30. Diagrama esfuerzo-deformación para probeta de SMAW 2.

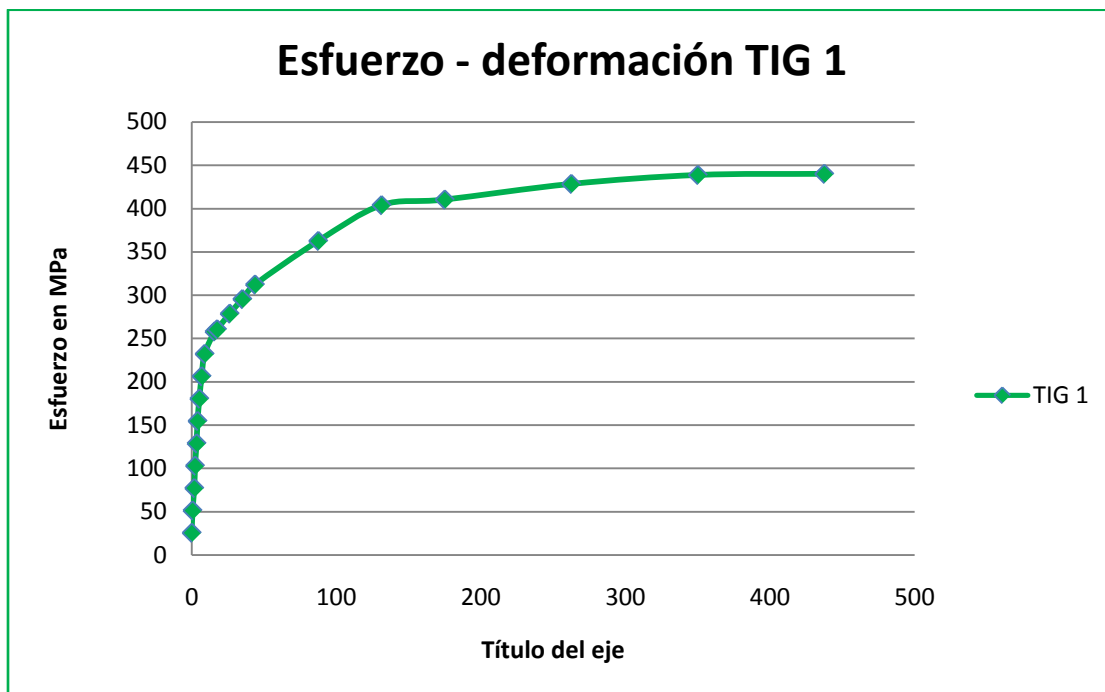


Fig. 3.31. Diagrama esfuerzo-deformación para probeta de GTAW 2.

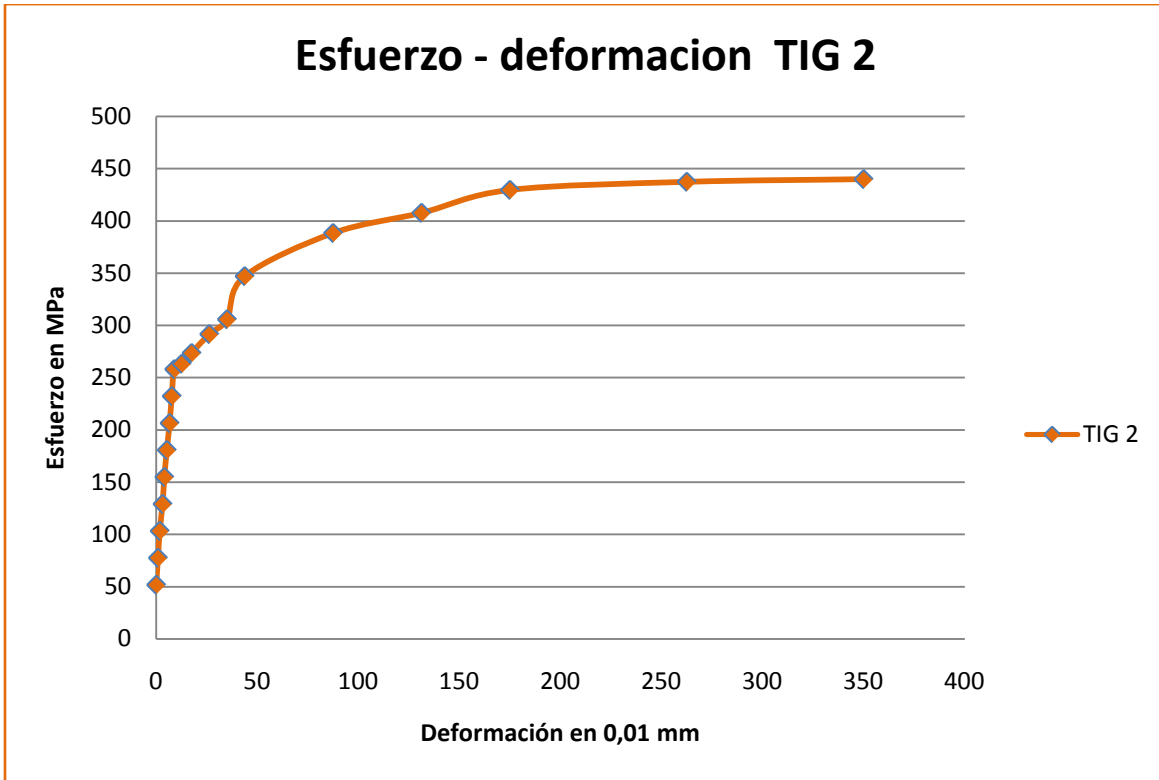


Fig. 3.32. Diagrama esfuerzo-deformación para probeta de GTAW 2.

Tabla 3.28. Promedio de esfuerzos máximos.

Probeta	Esfuerzo máximo MPa	Sy del 0,2% (MPa)	ΔL en 50 mm (%)
SMAW 1	411.51	261	22,20
SMAW 2	451.50	293	23,30
promedio	431.50	277	22,75
GTAW 1	440.01	298	24,10
GTAW 2	439.89	294	23,90
promedio	439.95	296	24,00
Norma ASTM A36	400 min	250 min	23,00 min

El objetivo principal de este ensayo fue determinar el esfuerzo máximo de las probetas, cuya magnitud se toma como referencia en el criterio de aceptación según el código ASME, Sección IX.

En ambas probetas fabricadas con el proceso GTAW y en una de las obtenidas con el proceso SMAW se pudo observar que, como era de esperarse, la falla ocurrió en la junta, del lado del acero estructural y no en el metal de soldadura ni en el otro metal base, ya que según la American Welding Society ([whss, pg 259](#)), los aceros inoxidable austeníticos tienen mejores propiedades de ductilidad y resistencia que los aceros al carbono y de baja aleación. Se evidencia en el encuellamiento que se produce antes de la fractura de la pieza y el cual es característico de la fractura dúctil. Sin embargo, en otra probeta obtenida por el proceso SMAW se observó el inicio del encuellamiento en la sección de la probeta correspondiente al acero ASTM A36 pero finalmente, la fractura ocurrió en la zona de la fusión de la soldadura. Esta fractura pudo ser producto de la presencia de discontinuidades superficiales generadas por el mecanizado y por el proceso de soldadura tales como grietas, porosidades e impurezas que actúan como concentradores de esfuerzo y que facilitan el crecimiento de las grietas en la superficie. Además la falta de gas de respaldo para la raíz del cordón puede provocar defectos, debido a que esta zona fundida no estuvo protegida y por ende pudo haberse contaminado con algunos gases existentes en la atmósfera.


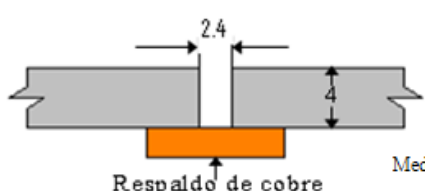
El criterio de aceptación del Código ASME Sección IX (QW-153) para juntas disímiles propone que las propiedades de la junta deben ser por lo menos iguales al acero más débil de los dos materiales base que lo componen, para así asegurar que la zona de soldadura no será el eslabón más débil de la junta. Sin embargo aunque una de las probetas haya fracturado por el área de la soldadura se puede constatar según la [tabla 3.28](#) que los valores de esfuerzo máximo de todas las probetas resultaron ser superiores a 400 MPa, el cual es el esfuerzo máximo nominal del acero ASTM A36. De igual manera los esfuerzos de fluencia y variación de longitud resultaron ser mayores al acero más débil.

En la [fig. 3.33](#) se aprecian las probetas fracturadas. La imagen designada con “A” corresponde a la probeta SMAW en la cual es posible observar la fractura en la zona de fusión de la soldadura y en las imágenes designadas como B, C y D se observa la fractura en la sección correspondiente al acero ASTM A36.



Fig. 3.33 probetas de tracción ensayadas: A SMAW 1, B SMAW 2, C GTAW 1, D GTAW 2

REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTOS

 CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.		UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO RCP									
RCP N°:			FECHA:			CODIGO REF:					
EPS N°:			C.I.:			IDENTIFICACION:					
NOMBRE SOLDADOR:			HOJA: 1/2								
PROCESO OFW () GMAW () SAW () SMAW (x) GTAW () Otro ()			TIPO (x) Manual () Semiautomático () Automático								
Procesos Especiales:											
DISEÑO DE JUNTA											
Tipo de Junta: Ranura Ranura (X) Filete () Otra:			DETALLE:								
Respaldo: Si (X) No ()											
Material del Respaldo: Cobre			Medidas en mm								
Espesor de Recargue: N. A.											
METALES BASE											
Especificación, Grado o Tipo: ASTM A36			Especificación, Grado o Tipo: AISI/SAE 304								
N°P: 1 N° Grupo: 1			N°P: 8 N° Grupo: 1								
Plancha (X) Espesor: 4.mm.			Plancha (X) Espesor: 4.mm.								
METAL DE APORTE											
		Aporte (A)		Aporte (B)		Aporte (C)		Aporte (D)			
Especificación Fabricante		E 309L 16									
AWS (Clase)		E 309L									
N° F		6									
Diámetro		2.38 mm.									
Espesor Material Depositado		4 mm									
POSICION Y ALINEACION DE LA JUNTA					TECNICA						
Posición: 1G					Cordón: Recto (X) Ondulado ()						
Progresión: N/A					Oscilación: N.A.						
N° de puntos: 4					Electrodo: Múltiple () Sencillo (X)						
Distancia entre puntos: 110 mm.					Pases por lado: Múltiples () Sencillo (X)						
PRECALENTAMIENTO					POST-CALENTAMIENTO						
Temperatura mín. precalentamiento:					Intervalo de temperatura:						
Temperatura máx. entre pases:					Tiempo de permanencia:						
Tiempo de permanencia:					Enfriamiento:						
Otros:					Otros:						
GAS					LIMPIEZA						
		Tipo Composición Flujo (Lts/min)									
Protección		Activo		Inicial: Cepillo metálico, lija y gasolina. Entre pases N.A.							
Arrastre		N.A.									
Respaldo		N.A.									
Otros		N.A.									
PARAMETROS ELECTRICOS											
Pase	Proceso	MAT. DE APORTE		CORRIENTE (A)				Voltaje (V)	Velocidad de Avance (cm/min)	Velocidad de Alimentación (m/min)	
		Clase AWS	φ [mm]	Tipo	Polaridad						Im
1	S.M.A.W	E 309L	2.38	Pulsada	Inversa			80	27	8.4	N/A
OBSERVACIONES:											



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
 ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA
 REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO
RCP

RCP N°:
EPSN°:

FECHA:
CODIGO REF:

NOMBRE SOLDADOR: _____ C.I.: _____ IDENTIFICACION: _____ HOJA: 2/2

ENSAYO DE TRACCION

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Area (mm ²)	Resistencia a la tracción		Tipo y Ubicación de Fractura	Observaciones
				Ksi	MPa		
1	18,800	3,950	75,420	59,680	411,510	Dúctil, Cordón de soldadura	Cumple con requerimiento
2	18,600	4,000	76,000	65,484	451,50	Dúctil, Metal base ASTM A36	Cumple con requerimiento

ENSAYOS DE DOBLEZ

Tipo de DobleZ	Resultado
DobleZ transversal de cara	Cumple con requerimiento
DobleZ transversal de raiz	Cumple con requerimiento

RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUIMICO AI DEPOSITO

Elementos	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Mn	%Si	%S
Cordón	0,07	17,21	9,02	0,25	0,70	0,50	0,12

OBSERVACIONES:

OTROS ENSAYOS

Tipo de ensayo: Microdureza y evaluación metalográfica.


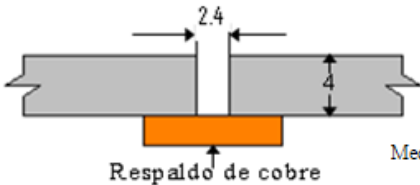
Observaciones: Los resultados obtenidos son bastante satisfactorios.


Otros: Adicionalmente se realizo la evaluación no destructiva de la soldadura por medio de las pruebas de inspección visual, líquidos penetrantes e inspeccion radiografica, en los cuales no se encontro ninguna clase de discontinuidades.

SE CERTIFICA QUE TODO LO INDICADO EN ESTE REGISTRO, ES CORRECTO Y QUE LAS PROBETAS FUERON SOLDADAS Y ENSAYADAS DE ACUERDO CON LOS REGISTROS DE LA SECCION IX DEL CÓDIGO ASME

Br. Carlos Eduardo Pérez G.
Tesisista – C.V.S.

Ing. Vicente Ignoto
Coordinador – C.V.S.

 CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.		UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO RCP									
		RCP N°:			FECHA:						
EPS N°:		CODIGO REF:			HOJA: 1/2						
NOMBRE SOLDADOR:		C.I.:		IDENTIFICACION:							
PROCESO OFW () GMAW () SAW () SMAW () GTAW (X) Otro () Procesos Especiales:			TIPO (x) () () Manual Semiautomático Automático								
DISEÑO DE JUNTA											
Tipo de Junta: Ranura <input checked="" type="checkbox"/> Filete () Otra: _____ Respaldo: Si (X) No () Material del Respaldo: Cobre Espesor de Recargue: N. A.		DETALLE:  <p style="text-align: center;">Respaldo de cobre</p> <p style="text-align: right;">Medidas en mm</p>									
METALES BASE											
Especificación, Grado o Tipo: ASTM A36 N°P: 1 N° Grupo: 1 Plancha <input checked="" type="checkbox"/> Espesor: 4 mm.			Especificación, Grado o Tipo: AISI/SAE 304 N°P: 8 N° Grupo: 1 Plancha <input checked="" type="checkbox"/> Espesor: 4 mm.								
METAL DE APORTE											
		Aporte (A)	Aporte (B)	Aporte (C)	Aporte (D)						
Especificación Fabricante		ER 308L									
AWS (Clase)		ER 308L									
N° F		6									
Diámetro		2.38 mm.									
Espesor Material Depositado		4 mm									
POSICION Y ALINEACION DE LA JUNTA				TECNICA							
Posición: 1G Progresión: N/A N° de puntos: 3 Distancia entre puntos: 150 mm.				Cordón: Recto (X) Ondulado () Oscilación: N.A. Electrodo: Múltiple () Sencillo (X) Pases por lado: Múltiples (x) Sencillo ()							
PRECALENTAMIENTO				POST-CALENTAMIENTO							
Temperatura mín. precalentamiento: Temperatura máx. entre pases: Tiempo de permanencia: Otros:				Intervalo de temperatura: Tiempo de permanencia: Enfriamiento: Otros:							
GAS				LIMPIEZA							
		Tipo	Composición	Flujo (Lts/min)							
Protección		Activo									
Arrastre		N.A.									
Respaldo		N.A.									
Otros		N.A.									
PARAMETROS ELECTRICOS											
Pase	Proceso	MAT. DE APORTE		CORRIENTE (A)				Voltaje (V)	Velocidad de Avance (cm/min)	Velocidad de Alimentación (m/min)	
		Clase AWS	φ [mm]	Tipo	Polaridad						
2	G.T.A.W	ER 308	2.38		Inversa			155	32	7.2	N/A
OBSERVACIONES:											

 CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA METALURGIA - U.C.V.	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA REGISTRO DE CALIFICACION DE PROCEDIMIENTO RCP																													
	RCPN°: EPS N°:	FECHA: CODIGO REF:																												
NOMBRE SOLDADOR:		C.I.:	IDENTIFICACION:	HOJA: 2/2																										
ENSAYO DE TRACCION																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Probeta</th> <th rowspan="2">Ancho (mm)</th> <th rowspan="2">Espesor (mm)</th> <th rowspan="2">Area (mm²)</th> <th colspan="2">Resistencia a la tracción</th> <th rowspan="2">Tipo y Ubicación de Fractura</th> <th rowspan="2">Observaciones</th> </tr> <tr> <th>Ksi</th> <th>MPa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>18,800</td> <td>3,960</td> <td>75,420</td> <td>63,800</td> <td>440.01</td> <td>Dúctil, Metal base ASTM A36</td> <td>Cumple con requerimiento</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>18,700</td> <td>4,000</td> <td>76,000</td> <td>63,819</td> <td>439.89</td> <td>Dúctil, Metal base ASTM A36</td> <td>Cumple con requerimiento</td> </tr> </tbody> </table>	Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Area (mm ²)	Resistencia a la tracción		Tipo y Ubicación de Fractura	Observaciones	Ksi	MPa	3	18,800	3,960	75,420	63,800	440.01	Dúctil, Metal base ASTM A36	Cumple con requerimiento	4	18,700	4,000	76,000	63,819	439.89	Dúctil, Metal base ASTM A36	Cumple con requerimiento				
Probeta					Ancho (mm)	Espesor (mm)			Area (mm ²)	Resistencia a la tracción		Tipo y Ubicación de Fractura	Observaciones																	
	Ksi	MPa																												
3	18,800	3,960	75,420	63,800	440.01	Dúctil, Metal base ASTM A36	Cumple con requerimiento																							
4	18,700	4,000	76,000	63,819	439.89	Dúctil, Metal base ASTM A36	Cumple con requerimiento																							
ENSAYOS DE DOBLEZ																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de DobleZ</th> <th>Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DobleZ transversal de cara</td> <td>Cumple con requerimiento</td> </tr> <tr> <td>DobleZ transversal de raíz</td> <td>Cumple con requerimiento</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>					Tipo de DobleZ	Resultado	DobleZ transversal de cara	Cumple con requerimiento	DobleZ transversal de raíz	Cumple con requerimiento																				
Tipo de DobleZ	Resultado																													
DobleZ transversal de cara	Cumple con requerimiento																													
DobleZ transversal de raíz	Cumple con requerimiento																													
RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO AL DEPOSITO																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Elementos</th> <th>%C</th> <th>%Cr</th> <th>%Ni</th> <th>%Mo</th> <th>%Mn</th> <th>%Si</th> <th>%S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cordón</td> <td>0,11</td> <td>17,91</td> <td>7,34</td> <td>0,15</td> <td>1,49</td> <td>0,36</td> <td>0,01</td> </tr> </tbody> </table>					Elementos	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Mn	%Si	%S	Cordón	0,11	17,91	7,34	0,15	1,49	0,36	0,01										
Elementos	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Mn	%Si	%S																							
Cordón	0,11	17,91	7,34	0,15	1,49	0,36	0,01																							
OBSERVACIONES:																														
OTROS ENSAYOS																														
Tipo de ensayo: Microdureza y evaluación metalográfica. Observaciones: Los resultados obtenidos son bastante satisfactorios. Otros: Adicionalmente se realizo la evaluación no destructiva de la soldadura por medio de las pruebas de inspección visual, líquidos penetrantes e inspección radiográfica, en los cuales no se encontro ninguna clase de discontinuidades.																														
SE CERTIFICA QUE TODO LO INDICADO EN ESTE REGISTRO, ES CORRECTO Y QUE LAS PROBETAS FUERON SOLDADAS Y ENSAYADAS DE ACUERDO CON LOS REGISTROS DE LA SECCION IX DEL CÓDIGO ASME																														
_____ Br. Carlos Eduardo Pérez G. Tesista – C.V.S.		_____ Ing. Vicente Ignoto Coordinador – C.V.S.																												

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los conjuntos de parámetros seleccionados para la fabricación de juntas disímiles entre los aceros AISI 304 y ASTM A36 empleando los procesos GTAW y SMAW, con los aportes ER 308L y E 309L-16, respectivamente 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 modo de solidificación primario observado en el metal de soldadura fue ferrítico con la subsiguiente transformación a austenita (tipo FA), resultando entonces una microestructura compuesta por cierta cantidad de ferrita delta vermicular en una matriz austenítica.

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.

RECOMENDACIONES

Ampliar el rango de las variables de flujo de gas utilizado

Realizar Microscopia Electrónica de Barrido y Transmisión para lograr identificar y cuantificar las posibles fases intermetálicas que pudieron precipitar durante la soldadura y determinar su influencia en las propiedades mecánicas de la junta soldada.

Realizar estudios para evaluar la influencia de otros gases o mezclas que contengan cierta cantidad de Nitrógeno, para mantener el balance de fases Austenita/Ferrita y determinar su influencia en las propiedades mecánicas y metalúrgicas de la junta.

Realizar otros tipos de ensayos mecánicos tales como charpy y fatiga, para evaluar el comportamiento de las juntas con este proceso.

Caracterizar estos procesos de soldadura con la misma configuración de variables pero aplicando altas y bajas temperaturas para conocer su comportamiento bajo estas condiciones de servicio

Caracterizar estos procedimientos de soldadura en condiciones conocidas que fomenten la corrosión en la junta para evaluar el impacto sobre las mismas.

Comparar los resultados de esta tesis con los resultados obtenidos de otras tesis en la cual se hayan usado otros procesos de soldadura.

CAPÍTULO V
REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFIA

1. IGNOTO, V. 2000 Soldadura para Ingenieros. Caracas.
2. LANCASTER J.F. 1993 Metallurgy of Welding. Chapman & Hall (5^a ed.). London.
3. PICKERING F.B. 1978 Physical Metallurgy and the Design of Steels. Applied Science, UK London. 165 – 171.
4. ASM Metals Handbook. Welding and Brazing, 1995 9^a ed. USA. Vol. 6. 456 – 469.
5. SCHAEFFLER A.L. Constitution diagram for stainless steel weld metal. Metal Progress, 1949. Vol. 56(11). 680 – 681.
6. DELONG W.T., Ostrom G. and Szumachowski E. 1956. Measurement and calculation of ferrite in stainless steel weld metal. Welding Journal, Vol. 35(11). 521 – 528.
7. DELONG W.T. 1974. Ferrite in austenitic stainless steel welds metal. Welding Journal, Vol. 53(7). 273 – 286.
8. ASM Metals Handbook. Corrosion of Weldments. 9^a ed. 1987. Vol. 13. 344 – 368.

9. DAVID, S. A. Iron-nickel-chromium ternary diagram. *Welding Journal*, 1981. Vol. 60. 63 – 71.
10. BROOKS, J. A., Thompson A. W. and Williams J. C. Fundamental study of the beneficial effects of delta ferrite in reducing weld cracking. *Welding Journal*, 1984. Vol. 63(3). 71 – 83.
11. KOTECKI, D. J. Welding parameter affects on open-arc stainless steel weld metal ferrite. *Welding Journal*, 1978. Vol. 57(4). 109 – 117.
12. CASTNER, H. R. What you should know about austenitic stainless steels. *Welding Journal*, (4). 1993. 53 – 59.
13. BROOKS, J. A. and Krafcik J. S. On the origin of ferrite morphologies of primary ferrite solidified stainless steel welds, trends in Welding research. ASM 1993.
14. SUUTALA, N. and Moisio T. The use of chromium and nickel equivalents in solidification phenomena in austenitic stainless steels. Solidification technology in the foundry and cast house, the metals society preprint. London 1980.
15. LIPPOLD, J. C. and Savage W. F. Solidification of austenitic stainless steel weldments, part 3. *Welding Journal*, 1980. Vol. 61(12). 388 – 396.
16. KOTECKI, D. J. and Siewert T. A. WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metal. A modification of the WRC-1988 diagram. *Welding Journal*, 1992. Vol. 71(5). 171 – 178.

17. BROOKS, J. A. 1982 Ferrite Morphology in high molybdenum stainless steel. *Welding Journal*, (5). 131 – 133.
- 18 American Society for Testing and Materials ASTM A-370. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. 300 – 355.
19. LEFEBVRE, J. 1993 Guidance on specifications of ferrite in stainless steel welds metals. *Welding in the World*, Vol. 31(6). 390 – 407.
20. DOUMANIDIS, C. C. 1998. Thermal Modeling and Adaptive Control of Scan Welding. *Welding Journal* (11). 465 – 476.
21. KEHL, George L. 1954 Fundamentos de la Práctica Metalográfica. Editorial Aguilar. Madrid-España. 406 – 407.
22. American Society of Mechanical Engineers (ASME) 2001 sección IX. New York. 124.
- 23 American Welding Society AWS. B4.0-98. 1998 Standard methods for mechanical testing of welds. Miami-USA
24. *Welding Handbook* AWS1991. “Welding Process” (8ª ed.).. Vol. 2.
- 25 American Society for Testing and Materials ASTM A-240. Heat-resisting chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet and strip for fusion-welded unfired.104.

26 "PWM 300 WELDING TORCH" Instruction Manual number 0-2031
9/21/94 Thermal Dynamics .pág. 10

27 SINDO KOU, 2003 "Welding Metallurgy", 2da edicion

28 REINA GOMEZ, Manuel 2010. Soldadura De Los Aceros: Aplicaciones, 4ta
Edic.