TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA PARA EL PROCESO TIG EN LA UNIÓN A TOPE DE LÁMINAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI/SAE 304 DE 0,8 mm DE ESPESOR

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Yazawa Pavón, José Alejandro
para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA PARA EL PROCESO TIG EN LA UNION A TOPE DE LÁMINAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI/SAE 304 DE 0,8 mm DE ESPESOR

Tutor Académico: Prof. Vincenzo Ignoto

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Yazawa Pavón, José Alejandro
Para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION

Caracas, 11 de mayo de 2.009

A C T A

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller:

JOSÉ ALEJANDRO YAZAWA

Titulado:

"DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA PARA EL PROCESO TIG EN LA UNIÓN A TOPE DE LÁMINAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI/SAE 304 DE 0,8 mm DE ESPESOR"

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

P o R.

Prof. Víctor Ortman Falcón
Jurado

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
DPTO. TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Prof. José Gregorio La Riva
Jurado

Prof. Vicente Ignoto
Tutor

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela por ser la institución que me instruyo en el área de Ingeniería Mecánica

Al profesor Vincenzo Ignoto, por darme la oportunidad de poder trabajar en su proyecto FONACIT S1-2001000869, además de brindarme su ayuda durante la ejecución de este trabajo realizado en el Centro Venezolano de Soldadura CVS.

A Dios por bendecirme con la familia que tengo.

A mi mama y familia por su apoyo y sabias palabras de aliento en todo momento.

A los Ingenieros Isis Plaza, Ramón Caballero, Marcial Pérez, Engel Ochoa, Freddy Fraudita, Crisantos Villalobos y a los Técnicos Rómulo Millano, Elio Castro, Rumuardo Cuello, a todos ellos por su desinteresada colaboración y apoyo recibidos en la ejecución de este trabajo.

A mis compañeros tesistas Natanael Bencomo, Carlos Pérez, Eduard Saavedra, Ema González y a Maribel Moreira (CVS), con los cuales compartí 10 meses consecutivos trabajando en la Tesis.

A todos los profesores y compañeros de estudio de la escuela de Ingeniería Mecánica de la ilustre UCV, los cuales contribuyeron en mi formación académica, humana y a ser un mejor profesional.

Yazawa Pavón, José Alejandro

“DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA PARA EL PROCESO TIG EN LA UNIÓN A TOPE DE LÁMINAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI/SAE 304 de 0,8 mm DE ESPESOR”

Tutor Académico: Prof. Ing. Vicente Ignoto.
Ingeniería. Escuela Mecánica, 2009. Número de páginas 115.

TIG, Parámetros, Soldadura, Laminas, Acero Inoxidable

Resumen

El presente Trabajo Especial de Grado se realizo utilizando el proceso de soldadura TIG manual y sin aporte, para unir a tope y en posición plana 1G laminas de acero inoxidable austenitico AISI/SAE 304 de 0,8mm de espesor. Se procedió a determinar los parámetros adecuados de soldadura (velocidad de avance, intensidad de corriente y voltaje) siendo éste el principal objetivo del estudio, para tener uniones con propiedades mecánicas adecuadas y un depósito con balance de fases microestructurales correcto.

Se emplearon además una serie de ensayos tales como: Tracción, Dureza, Radiografía, Líquidos penetrantes, Metalografía, Doblez y Análisis químico para evaluar las propiedades del depósito de soldadura. Los Ensayos no destructivos y 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 (Austeníta y Ferrita) en el cordón y la zona afectada por el calor.

Como conclusión principal se obtuvo un procedimiento adecuado de soldadura TIG para uniones a tope de láminas delgadas de Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304. Se espera que el presente estudio sirva como un aporte acerca de estudios relacionados con la soldadura de estas aleaciones así como en el desarrollo de trabajos posteriores, investigaciones y aplicaciones realizadas con este proceso.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO I
FUNDAMENTO TEORICO

		Pag.
1.1.-	**ACEROS INOXIDABLES**	
1.1.1.-	Definición	2
1.1.2.-	Aplicación	2
1.1.3.-	Clasificación	2
1.1.3.1.-	Aceros Inoxidables Ferríticos	3
1.1.3.2.-	Aceros Inoxidables Martensíticos	3
1.1.3.3.-	Aceros Inoxidables Austeníticos	3
1.1.3.4.-	Tipos Especiales	4
1.1.4.-	Origen del Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304	5
1.1.5.-	Importancia de la composición química	6
1.1.6.-	Propiedades Mecánicas de los Aceros Inoxidables Austeníticos	7
1.1.7.-	Solidificación de los Aceros Inoxidables Austeníticos	7
1.1.7.1.-	Solidificación Primaria Austenítica	9
1.1.7.2.-	Solidificación Primaria Ferritica	10
1.2.-	**SOLDADURA TIG**	11
1.2.1.-	Principios	11
1.2.2.-	Ventajas	12
1.2.3.-	Limitaciones	13
1.2.4.-	Variables del proceso	14
1.2.4.1.-	Corriente de trabajo	14
1.2.4.2.-	Voltaje del arco	16
1.2.4.3.-	Velocidad de avance	16
1.2.4.4.-	Alimentación del metal de aporte	16
1.2.4.5.-	Gas protector	16
1.2.5.-	Técnica de soldadura TIG	18
1.2.6.-	Equipo	19
1.2.6.1.-	Antorchas	19
1.2.6.2.-	Electrodos	21
1.2.6.3.-	Fuentes de Potencia	22
1.3.-	**SOLDABILIDAD DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS**	23

1.3.1.- Soldabilidad 23
1.3.2.- Factores de importancia 24
1.3.2.1.- Propiedades físicas 24
1.3.2.2.- Precalentamiento y tratamiento térmico 24
1.3.2.3.- Elección del material de aporte y del proceso 25
1.3.2.4.- Contenido de ferrita 25
1.3.3.- Estimación del contenido de ferrita 26
1.3.4.- Consecuencias de un proceso de soldadura inadecuado 26
1.3.4.1.- Sensibilización y corrosión intergranular 28
1.3.4.2.- Fragilización 29
1.3.4.3.- Agrietamiento en caliente 30

1.4.- ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS Y DESTRUCTIVOS 31
1.4.1.- Ensayos no Destructivos 31
1.4.1.1.- Inspección Visual 31
1.4.1.2.- Líquidos Penetrantes 32
1.4.1.3.- Radiografía Industrial 32
1.4.2.- Ensayos Destructivos 32
1.4.2.1.- Ensayo de Tracción 32
1.4.2.2.- Ensayo de Dureza 33
1.4.2.3.- Ensayo de Doblez 34
1.4.2.4.- Ensayo Metalográfico 35
1.4.3.- Inspección de la soldadura 35
1.4.4.- Especificación de procedimiento de soldadura (EPS) 35
1.4.5.- Registro de calificación del procedimiento de soldadura (RCP) 37

CAPITULO II
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

2.1.- CARACTERIZACION DEL MATERIAL BASE 41
2.1.1.- Análisis químico 41
2.1.1.1.- Fluorescencia 44
2.1.2.- Contenido de Ferrita 45
2.1.3.- Ensayo de Dureza 46
2.1.4.- Ensayo de Tracción 47
2.1.5.- Metalografia 51

2.2.- REALIZACION DE LOS CUPONES DE PRUEBA 52

2.2.1.- Preparación del material base y mesa de trabajo 52
2.2.2.- Fuente de energía y antorcha 53
2.2.3.- Determinación de los parámetros de soldadura 54
2.2.4.- Fabricación de los cupones de soldadura 55
2.2.5.- Selección de los cupones de soldadura 56

2.3.- REALIZACION DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS 58
2.3.1.- Inspección visual 58
2.3.2.- Líquidos penetrantes 59
2.3.3.- Radiografía 60

2.4.- REALIZACION DE LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS 62
2.4.1.- Análisis Químico 62
2.4.2.- Contenido de ferrita 64
2.4.3.- Ensayo de Tracción 65
2.4.4.- Ensayo de Metalografía 66
2.4.5.- Ensayo de Doblez 70
2.4.6.- Ensayo de Dureza 70

CAPITULO III
ANALISIS DE RESULTADOS

3.1.- CARACTERIZACION DEL MATERIAL BASE 73
3.1.1.- Caracterización química 73
3.1.2.- Contenido de ferrita 73
3.1.3.- Caracterización Metalográfica 74
3.1.4.- Ensayo de Tracción 74
3.1.5.- Ensayo de Dureza 74

3.2.- PROCESO DE SOLDADURA 75
3.2.1.- Determinación de los parámetros de soldadura 76
3.2.2.- Fabricación y selección de los cupones 76
3.2.3.- Energía neta aportada y área del cordón 78

3.3.- CARACTERIZACION DE LA SOLDADURA 78
3.3.1.- Ensayos No Destructivos 78
3.3.2.- Ensayos Destructivos 79
3.3.2.1.- Análisis Químico 79

3.3.2.2.- Evaluación metalográfica 80
3.3.2.3.- Ensayo de Dureza 81
3.3.2.4.- Ensayo de Tracción 81
3.3.2.5.- Ensayo de Doblez 83

CAPITULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO V
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

INDICE DE FIGURAS, TABLAS, FOTOS Y GRAFICAS

FIGURAS **Pag.**

Figura 1.- Desarrollo del Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304 6
Figura 2.- Sección del diagrama de equilibrio Fe 8
Figura 3.- Morfologías de ferrita delta según el modo de solidificación 8
Figura 4.- Modo de solidificación para distintas relaciones Creq/Nieq 10
Figura 5.- Modos de polarización de la corriente 15
Figura 6.- Componentes que conforman el proceso de soldadura TIG 20
Figura 7.- Diagrama de Schaeffler 28
Figura 8.- Flujograma del procedimiento experimental 40
Figura 9.- Cálculo del contenido de ferrita por Schaeffler al metal base 46
Figura 10.- Modelo de probeta para el ensayo de dureza al metal base 47
Figura 11.- Diseño de probeta según la Norma ASTM A370 48
Figura 12.- Distribución de las probetas requeridas para los diferentes ensayos 56
Figura 13.- Calculo del contenido de ferrita en el cordón de soldadura 64

TABLAS

Tabla 1.- Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables austeníticos 304 4
Tabla 2.- Tipos de morfologías y características de la solidificación ferrítica 11
Tabla 3.- Gases de protección y sus características 18

Tabla 4.-	Composición química y sistema de identificación por código de colores de los distintos tipos de electrodos	21
Tabla 5.-	Problemas, Causas y soluciones que pueden surgir durante la realización de una operación con GTAW	23
Tabla 6.-	Valores resultante del análisis químico, certificado de calidad, composición nominal y fluorescencia	43
Tabla 7.-	Valores de la prueba de fluorescencia	44
Tabla 8.-	Resultados del Creq y Nieq en el cordón de soldadura	45
Tabla 9.-	Resultados del ensayo de Dureza del metal base	47
Tabla 10.-	Medidas características de la zona de trabajo de cada probeta del metal base sometida al ensayo de tracción	49
Tabla 11.-	Resultados del ensayo de Tracción del metal base	50
Tabla 12.-	Valores de los parámetros correspondientes a las fuentes de referencia	54
Tabla 13.-	Parámetros que se mantienen constantes durante la soldadura	55
Tabla 14.-	Parámetros que varían	55
Tabla 15.-	Parámetros de soldadura para todas las condiciones evaluadas	56
Tabla 16.-	Condiciones de soldadura seleccionadas	56
Tabla 17.-	Valores de la ENA, Área del cordón de soldadura (As)	58
Tabla 18.-	Análisis químico del cordón por fluorescencia	63
Tabla 19.-	Comparación del proceso de espectrofotometría y gasometría con la Fluorescencia en el cordón de soldadura	63
Tabla 20.-	Resultados del Creq y Nieq en el cordón de soldadura	64
Tabla 21.-	Resultados del ensayo de Tracción de los 3 cupones de soldadura	65
Tabla 22.-	Resultados del Ensayo de Dureza para la condición 1	71
Tabla 23.-	Resultados del Ensayo de Dureza para la condición 2	71
Tabla 24.-	Resultados del Ensayo de Dureza para la condición 3	71
Tabla 25.-	Valores de la temperatura a Xmm del punto de fusión.	82

FOTOS

Foto 1.-	Soldadura manual con material de aporte mediante el proceso de soldadura GTAW	19
Foto 2.-	Taladro de banco	42
Foto 3.-	Equipo Perkin Elmer, modelo AAnalyst 300	42
Foto 4.-	Equipo LELO, modelo CS-200	43
Foto 5.-	Equipo Xmet-3000TX	45

Foto 6.-	Equipo Wilson/Rockwell @ Hardness Tester Serie 500, modeloB504T	47
Foto 7.-	Equipo INSTRON, modelo1131	48
Foto 8.-	Etapas del ensayo de Metalografía	51
Foto 9.-	Micrografía en sentido de laminación con un acercamiento de 100X	52
Foto 10.-	Dispositivo en el que se suelda y fluye el gas de respaldo	53
Foto 11.-	Equipo de soldadura ESAB, 350 AC/DC Heliwelder Plus	53
Foto 12.-	Aerosoles para la realización del ensayo Líquidos penetrantes	59
Foto 13.-	Pasos a seguir en el Ensayo de Líquidos penetrante	60
Foto 14.-	Máquinas para elaborar la Radiografía Industrial	62
Foto 15.-	Radiografía revelada para la condición 1 de soldadura	62
Foto 16.-	Macrografía de los 3 cupones seleccionados en sentido de la laminación	66
Foto 17.-	Micrografía del cordón completo con un aumento de 100x al cupón 1	67
Foto 18.-	Micrografía de la ZAC con un aumento de 200x al cupón 1	67
Foto 19.-	Micrografía del cordón completo con un aumento de 100x al cupón 2	68
Foto 20.-	Micrografía de la ZAC con un aumento de 200x al cupón 2	68
Foto 21.-	Micrografía del cordón completo con un aumento de 100x al cupón 3	69
Foto 22.-	Micrografía del ZAC con un aumento de 200x al cupón 3	69
Foto 23.-	Resultado del Ensayo de Doblez	70
Foto 24.-	Vista de cara de los cordones de las 3 condiciones de soldadura	79

GRAFICAS

Grafica 1.-	Ensayo de Tracción al metal base probeta 1 y 2	50
Grafica 2.-	Ensayo de Tracción a los cupones de soldadura 1, 2 y 3	65
Grafica 3.-	RCP para el cupón 1	84
Grafica 4.-	Curvas de Exposición para Aceros, utilizada para determinar los parámetros radiográficos	96
Grafica 5.-	Esquema de medición de la temperatura a una distancia de la línea de fusión de acuerdo a la ecuación de Adams	98
Grafica 6.-	Grafica de Temperatura para las 3 condiciones de soldadura	99

SIMBOLOGIA

%	Porcentaje	cm	Centímetro
A	Amperaje	DC	Corriente Continua o Directa
CCC	Corriente Continúa Constante	CCP	Corriente Continúa Pulsada
DCEP	Corriente Continua Electrodo Positivo	DCEN	Corriente Continua Electrodo Negativo
CA	Corriente Alterna	Kg	Kilogramo
GMAW	Gas Tungsten Inert Gas	L	Litro
h	Hora	m	Metro
Hz	Hertz	min[60s]	Minuto
Ib [A]	Corriente base	mm	Milímetro
Ip [A]	Corriente pico	ms	Milisegundo
Ii	Corriente inicial	°	Grado
If	Corriente final	°C	Grados Celsius
Im	Corriente media	s	Segundo
J	Joule	T [s]	Tiempo
K [10^3]	Kilo	Tb [s]	Tiempo base
Tp [s]	Tiempo pico	TIG	Tungsten Inert Gas
Vs	Velocidad de soldadura	N	Nitrógeno
W	Watios	Ni	Níquel
C	Carbono	P	Fosforo
Cr	Cromo	Mo	Molibdeno
S	Azufre	Mn	Manganeso
Si	Silicio	Ti	Titanio
Nb	Niobio		

INTRODUCCION

Los aceros inoxidables tienen su principal aplicación en el campo industrial ya que ofrecen resistencia a la corrosión, una adecuada relación resistencia mecánica-peso, propiedades higiénicas, resistencia a temperaturas elevadas y criogénicas así como vida útil de larga duración. Son totalmente reciclables y amigables con el medio ambiente; además 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.

Estos tipos de aceros son aleaciones complejas en las que intervienen un buen número de elementos químicos. Para conseguir una soldabilidad aceptable, la zona afectada por el calor y la zona de fusión deben presentar unas propiedades lo más semejantes posible a las del material de base, tanto desde el punto de vista mecánico como de resistencia a la corrosión.

Se realiza un análisis de los fundamentos y parámetros que intervienen en la soldadura del acero inoxidable AISI/SAE 304, empleando el proceso GTAW o TIG. Se elaboran soldaduras en un solo pase, en juntas dispuestas a tope (cupón de prueba), ya que la chapa es de bajo espesor, se varían las condiciones experimentales del proceso como (I, Vs) y posteriormente se evalúan las uniones a tope con el objetivo de evaluar sus propiedades mecánicas y metalúrgicas.

Una vez establecidas las condiciones adecuadas, se realizarán una serie de ensayos destructivos (Análisis Químico, Metalográfico, Tracción y Doblez) y no destructivos (Inspección visual y Líquidos Penetrantes) para evaluar las propiedades del depósito de soldadura y calificar el procedimiento de soldadura empleando el Código ASME sección IX.

Planteamiento del problema

La selección de este tipo de acero se baso en su composición química de 18% de Cromo y 8% de Níquel por lo que presentan una estructura austenitica a cualquier temperatura, poseen baja conductividad calorífica, son amagneticos, muy dúctiles y resistentes a la corrosión atmosférica, al agua del mar, al ataque de productos alimenticios ciertos ácidos minerales y a la mayoría de los ácidos orgánicos, no se endurecen por tratamiento térmico (Temple), sino únicamente por deformación en frío o caliente es por esto que son aptos en aplicaciones donde una o más de las siguientes propiedades son importantes:

- Resistencia a la corrosión y oxidación
- Prevención de la contaminación de productos
- Facilidad en la fabricación
- Excelente formabilidad
- Facilidad de limpieza
- Alta resistencia y bajo peso
- Buena resistencia y estabilidad a temperaturas criogénicas
- Disponibilidad fácil de una gran diversidad de formas de productos.

Por otra parte tenemos la técnica de soldadura TIG (Tugnsten Inert Gas) para espesores desde 0,3 mm de espesor, es un proceso de soldadura de poca penetración que va variando según la intensidad de la corriente y la velocidad de avance, el gas inerte sirve para proteger a la soldadura del oxigeno del ambiente. La concentración de la energía térmica ocurre en una zona muy reducida de la pieza a soldar lo que hace que la deformación sea mínima, formación cónica del arco transferido con lo que se evitan efectos negativos que aparecen al cambiar la distancia entre la antorcha y la pieza a soldar y también tiene la posibilidad de trabajar con material de aporte.

Aunque son conocidas las cualidades del proceso de soladura por la técnica TIG al igual que las ventajas del uso del Acero Inoxidable Austenitico 304,

no se posee información precisa sobre los parámetros de soldadura (El tipo de corriente, el rango de corriente, Velocidad de avance, voltaje y flujo de gas), que se deben establecer en relación al menor calor aportado, el mejor aspecto superficial, buen refuerzo de raíz, mayor penetración, la fluidez del baño fusión, la geometría de la penetración y el comportamiento durante el cebado. Este hecho da importancia para el estudio y selección de los parámetros de soldadura por la técnica TIG, para que cuando se realiza la unión a tope en la posición plana (1G) en laminas de acero inoxidable austenitico con 1 mm de espesor, exista continuidad de las propiedades mecánicas en la pieza soldada y que el cordón de soldadura cumpla con las normas establecidas por la American Welding Society (AWS).

El problema consiste en realizar una serie de uniones soldadas por la técnica TIG con parámetros previamente seleccionados, para luego verificar mediante las diversas pruebas de fallas no destructivas y destructivas que los resultados obtenidos experimentalmente concuerdan con los teóricos, generando entonces laminas soldadas a tope de acero inoxidable austenitico de excelente calidad, quedando la técnica aprobada para ser aplicada en los diferentes campos de trabajo donde se requiera la unión de laminas delgadas de acero austenitico AISI/SAE 304.

Marco Referencial

1) Soldadura TIG con un solo componente de los flujos

La soldadura por arco de gas tungsteno se usa fundamentalmente en aquellas aplicaciones en las que es importante controlar la forma del cordón de soldadura y características metalúrgicas. Este proceso es, sin embargo, de baja productividad, especialmente en la soldadura de grandes componentes. El flujo activado TIG (ATIG), desarrollado por el Instituto de Soldadura Paton en la década de 1960, se considera ahora como una alternativa viable para aumentar la productividad del proceso. La soldadura ATIG utiliza una capa delgada de un flujo que se traduce en un gran aumento en la penetración de la soldadura. Este efecto es, en general, vinculadas a la captura de electrones en la parte exterior del arco por parte de elementos de alta electronegatividad, que restringen el arco provocando un efecto similar a la utilizada en la soldadura por arco de plasma. En general, la literatura no presenta el flujo de formulaciones ATIG de soldadura, las pocas fórmulas que tenían una naturaleza compleja. El presente trabajo evalúa el uso de soldadura ATIG en los aceros inoxidables austeníticos con los flujos de un solo componente principal. Los cambios en la geometría de soldadura se compararon con las variaciones en las señales eléctricas desde el arco y la forma de arco. El efecto sobre el flujo de la soldadura microestructura también fue estudiado. Los resultados indican que incluso el simple flujo que se utilizó puede aumentar la penetración del cordón de soldadura.

2) Características del arco y formas de protección debido a las variaciones de He-Ar- O2 en la soldadura GTAW del acero inoxidable SUS304

Las influencias de argón, helio y oxígeno en el arco de soldadura TIG, determinan la protección y la penetración de la soldadura, que después del proceso son sistemáticamente investigados por estudios a la placa de acero inoxidable SUS304. Resultados experimentales muestran que a medida que

la distancia entre la punta de los electrodos y la pieza de trabajo se acerca cambia el encendido del arco, se incrementa a medida que aumenta 1 mm y hasta 5 mm es que la protección es de buena calidad .Luego de esta distancia la capacidad baja a un 50%. Además los pequeños contenidos de oxígeno en la mezcla de He-Ar pueden cambiar significativamente la forma de soldadura y la profundidad. También dependiendo de la dirección en que se efectúe la soldadura y de la velocidad la profundidad y anchura puede verse duplicada.

3) Soldadura del acero inoxidable Dúplex 2205 mediante el proceso de soldadura

GTAW y caracterización de la junta

En este trabajo se estudio el efecto del proceso de soldadura GTAW sobre la microestructura y, por consiguiente sobre las propiedades mecánicas. Se realizaron soldaduras a tope en láminas de 6mm, mediante el proceso seleccionado por la técnica manual. Se buscaron las condiciones más adecuadas con el menor número de pases posibles para evitar el daño microestructural producido por un excesivo calentamiento del material. Con el fin de evitar la precipitación de fases intermetalicas indeseables, se aplicaron dos condiciones de enfriamientos distintos (En agua y en aire a presión). Ambas muestras presentaron resultados satisfactorios, siendo lo más relevante los valores de tenacidad obtenidos. La tenacidad de la muestra soldada y luego enfriada en aire a presión resulto mayor, no solo que la muestra enfriada en agua, sino que también al metal base. Esto se puede atribuir a la morfología exhibida por el cordón de raíz durante dicho enfriamiento. Esta morfología está constituida mayormente por austeníta de forma globular con porciones de austeníta ramificada.

CAPíTULO I

FUNDAMENTO TEORICO

1.1.- ACEROS INOXIDABLES

1.1.1.- Aceros Inoxidables

Los Aceros Inoxidables [(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. Debido a su superficie brillante se emplean mucho para fines decorativos, así como también para tuberías y tanques. Es propia de estos aceros su resistencia a la corrosión, su gran resistencia mecánica y sus resistencias a temperaturas elevadas y criogénicas. Poseen un alto nivel de maleabilidad y soldabilidad[(2)] por lo que pueden transformarse en una gran variedad de productos y dependiendo de los tratamientos a los que se puede someter puede tener diversos acabados como por ejemplo texturizado, espejo, satinado entre otros.

1.1.2.- Aplicaciones de los Aceros Inoxidables

Son utilizados para hacer equipos que se usan en una gran gama de sectores que abarca desde el sector industrial hasta el sector domestico, pasando por la industria aeronáutica, naval, petrolera y alimenticia dentro de los cuales encontramos equipos de procesos petroquímicos, de proceso de alimentos y bebidas, equipos farmacéuticos y automotrices, aplicaciones arquitectónicas y estructurales, equipos de aislamiento térmico, intercambiadores de calor, sartenes, cubiertos, ollas, lavadoras y otros utensilios de cocina.

1.1.3.- Clasificación de los Aceros Inoxidables

Según Lancaster[(3)], Pickering[(4)] junto con el manual ASM[(5)], los Aceros Inoxidables según su microestructura se dividen en tipos comunes y tipos especiales:

Tipos Comunes:

- Aceros Inoxidables Ferríticos
- Aceros Inoxidables Martensíticos
- Aceros Inoxidables Austeníticos

Tipos Especiales:

- Endurecidos por precipitación
- Duplex

1.1.3.1.- Aceros Inoxidables Ferríticos

Su contenido de cromo varía entre 12 y 18%, y el de carbono es menos de 0,2%. Poseen gran resistencia a la corrosión y dureza, la cual no se puede incrementar por tratamiento térmico, son principalmente usados para la elaboración de utensilios de cocina. Los más utilizados son AISI 409, 430 y 434.

1.1.3.2.- Aceros Inoxidables Martensíticos

Poseen un contenido de carbono alto entre 0,2 a 1,2% y el de cromo igualmente entre 12 a 18%. Poseen gran dureza la cual puede incrementarse mediante un tratamiento térmico pero la resistencia a la corrosión es moderada, son utilizados principalmente en equipos quirúrgicos, cuchillería y ejes. Los mas utilizados son el AISI 410, 420 y 431.

1.1.3.3.- Aceros Inoxidables Austeníticos

Según ASM[5], el contenido de cromo varía entre 16 a 28%, el de níquel de 3,5 a 22%, el de molibdeno de 1,5 a 6% y el de Carbono entre 0,02 y 0,03%. Según Pender[6], estos aceros poseen excelente resistencia a la corrosión, son fáciles de transformar, excelente soldabilidad, gran resistencia a temperaturas elevadas como criogénicas, son de estructura cúbica centrada en las caras, son amagnéticos, presentan propiedades a la tenacidad y ductilidad, no se endurecen por tratamiento térmico (Temple)

sino por deformación en frío o en caliente y tienen gran estabilidad estructural. Son utilizados principalmente en equipos hospitalarios, en la industria alimentaria, tanques, tuberías, etc. Los más utilizados son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317. Las Propiedades mecánicas de la familia de Aceros Inoxidables Austeníticos del tipo 304 se indican en la tabla 1.

Tabla 1.- Propiedades mecánicas de la familia de Aceros Inoxidables Austeníticos 304.

AISI/SAE	Esfuerzo de Máximo (MPa)/(Ksi)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)/(Ksi)	Elongación (%)	Reducción de área (%)
304 (A, C)	515/75	205/30	40	50
304 (B, C)	620/90	310/45	30	40
304 (25% deformado)	860/125	515/75	10	--
304 (50% deformado)	1035/150	760/110	7	--
304L C	480/70	170/25	35	50
304L (A, C)	480/70	170/25	40	50
304L (B)	620/90	310/45	30	40
304B4	515/75	205/30	30	16-27

(A) Trabajado en caliente, (B) trabajado en frió, y (C) recocido

1.1.3.4.- Tipos Especiales

Los aceros endurecidos por precipitación son Aceros Inoxidables del tipo Cr-Ni que contienen adicionalmente otros elementos de aleación como el Cu y Al, que favorecen la precipitación de fases secundarias y elevan significativamente la dureza y resistencia mecánica del material cuando es sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento. Estos materiales ofrecen una alternativa para obtener una buena resistencia mecánica por medio de un tratamiento térmico a menor temperatura que puede ser aplicado incluso después de la fabricación de la pieza o elemento mecánico. Poseen una composición a la cual se le agregan elementos para endurecimiento por envejecimiento. Los aceros inoxidables Dúplex están constituidos con una microestructura formada por dos fases: ferrita y

Austeníta. Estos materiales tienen la ventaja de poseer una elevada resistencia mecánica alcanzando valores de limite elástico entre 700-900 MPa (el doble de límite elástico que los Aceros Inoxidables Austeníticos) lo que representa en muchos casos un ahorro significativo en costos de material. Ejemplo de esto es la fabricación de tanques de almacenamiento para los buques de carga, donde el Acero Inoxidable Dúplex ha mostrado tener una resistencia superior al acero Inoxidable Austenítico y permite un ahorro significativo en peso de la estructura.

1.1.4.- Origen del Acero Inoxidable AISI/SAE 304

El Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, surge de la necesidad de conseguir un material con una alta resistencia a la corrosión, esto se consigue disminuyendo el contenido de carbono de la aleación AISI/SAE 302, luego se le realizan modificaciones para disminuir la cantidad de carburos de cromo que precipitan en el momento de soldar estos materiales alterando la resistencia mecánica. En la figura 1 se muestra un diagrama de la evolución de los Aceros Inoxidables Austeníticos en donde se muestra las reformas realizadas al acero 302 hasta conseguir las distintas variaciones.

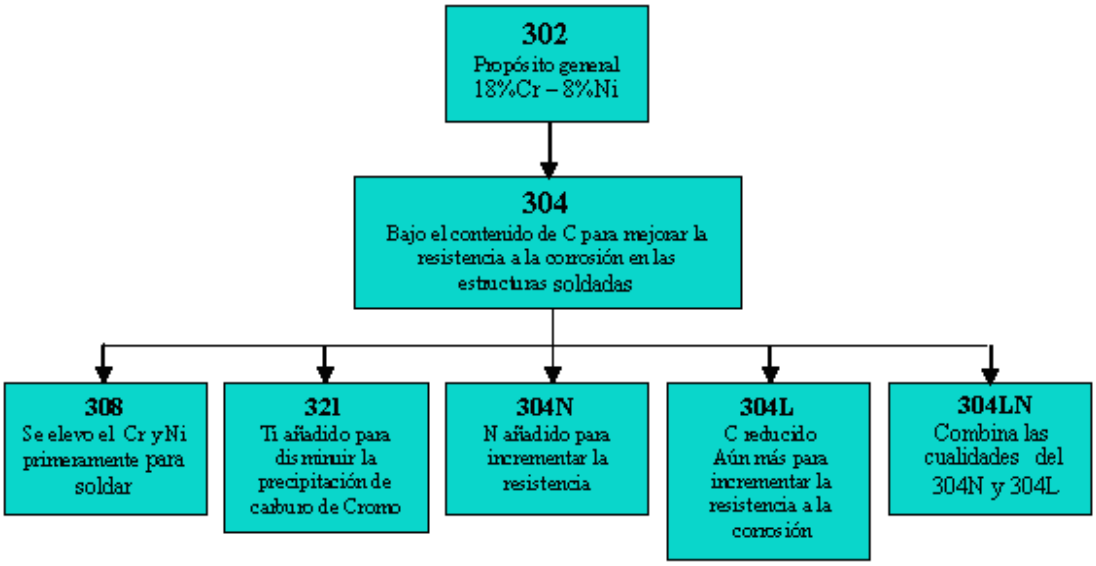


Figura 1.- Desarrollo del Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304.

1.1.5.- Importancia de la composición química del Acero

Cuando el contenido de Cromo en un acero es superior al 12% este actúa de forma pasiva ante los medios oxidantes, debido a la capa estable que se forma en la superficie, también están los otros elementos aleantes como el Si, Mn, P, Ni, Mo, Cu, Ti, entre otros que nos permiten determinar la estructura metalúrgica del acero; por lo que la mezcla de elementos de aleación del material base y del aportado debe realizarse en las proporciones adecuadas para conseguir la estructura deseada. Los elementos de aleación presentan una subdivisión básica: Los formadores de ferrita o los generadores de fase alfa (α) entre los cuales están el Hierro (Fe), Cromo (Cr), Silicio (Si), Titanio (Ti), Niobio (Nb), Molibdeno (Mo) y Manganeso (Mn). Los formadores de Austeníta o los generadores de fase gamma (γ) entre los que se encuentran el Carbono (C), Níquel (Ni), Nitrógeno (N) y Manganeso (Mn).Cuando el contenido de Mn es alto es formador de ferrita y cuando es bajo es un estabilizador de la austeníta. Para determinar el contenido necesario de elementos de aleación se usan unos diagramas en los

que intervienen los diferentes elementos de aleación así como las diferentes fases en cuestión y su influencia en la formación de una estructura determinada

1.1.6.- Propiedades de los Aceros Inoxidables Austeníticos

Tener en cuenta algunas características inherentes a la estructura[7] austenítica FCC son muy importantes cuando se pretende soldar estos Aceros Inoxidables, estas características son:

- La estructura austenítica no se fragiliza, es decir, cualquiera que sea la temperatura de servicio, la velocidad de deformación o estado de esfuerzos, el Acero Inoxidable Austenítico siempre presenta un comportamiento dúctil con un porcentaje de alargamiento que es mayor al 40%.
- La estructura austenítica presenta una elevada tasa de endurecimiento y comienza a fluir a bajas cargas. Como el límite de fluencia es bajo a medida que el material sufre deformación plástica se endurece rápidamente hasta llegar al límite máximo de resistencia, por lo que se utiliza un límite de elasticidad que corresponde a un alargamiento permanente del 0,2%.
- Según Uhlig[8] una mejor resistencia a la corrosión se obtiene a medida que el contenido de cromo aumenta. Para obtener la resistencia óptima a la corrosión las aleaciones austeníticas deben ser calentadas a 1050 – 1100 ºC y enfriadas rápidamente en agua o en chorro de aire.

1.1.7.- Solidificación de los Aceros Inoxidables Austeníticos

Dependiendo de la composición química del acero y de la velocidad a la que se enfrié, va a generar que la estructura de solidificación presente un porcentaje de ferrita delta metaestable a temperatura ambiente debido al efecto de segregación durante la solidificación fuera del equilibrio. Si el

enfriamiento se produce en equilibrio la estructura de los Aceros Inoxidables Austeníticos a temperatura ambiente corresponde al de la figura 2, pero este no es el caso para procesos como la fundición y soldadura ya que las velocidades de enfriamiento son tan rápidas que no se pueden alcanzar un estado estable, por lo que a temperatura ambiente no corresponde dicho diagrama de equilibrio.

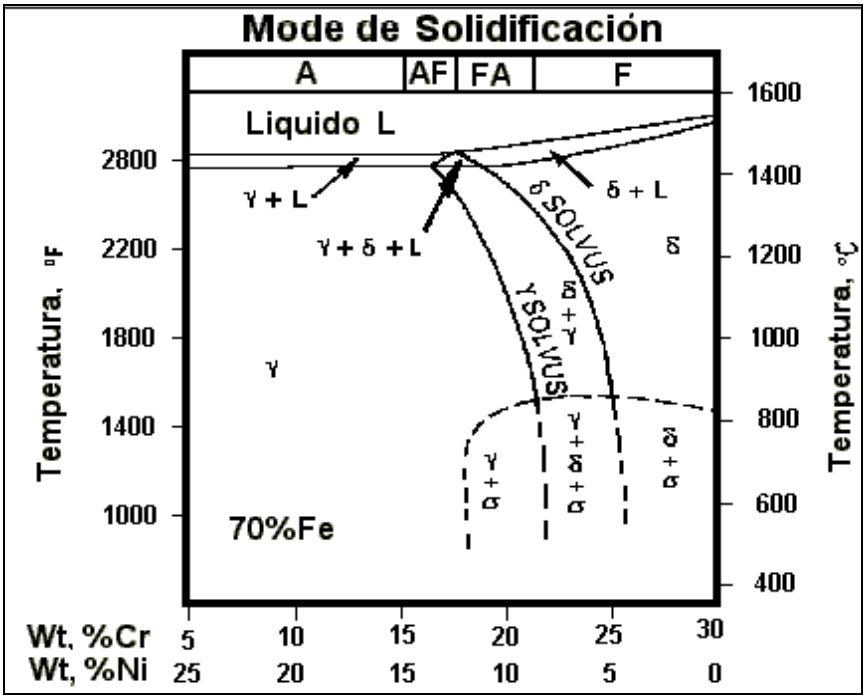


Figura 2.- Sección del diagrama de equilibrio Fe-Cr-Ni (70%Fe).

Ahora dependiendo de la composición química y del modo primario de la solidificación, la solidificación secundaria puede ser austenítica o ferritica, por lo que se origina una serie de microestructuras con diferentes formas de ferrita delta. Algunas de las secuencia posibles las reportaron David[9], Kotecki[10], Brooks[11], Suutala[12] y Lippold[13], las cuales se esquematizan en la figura 3**,** para un intervalo de composiciones que se expresan en función de las relaciones de Cromo y Níquel equivalente Creq./Nieq.

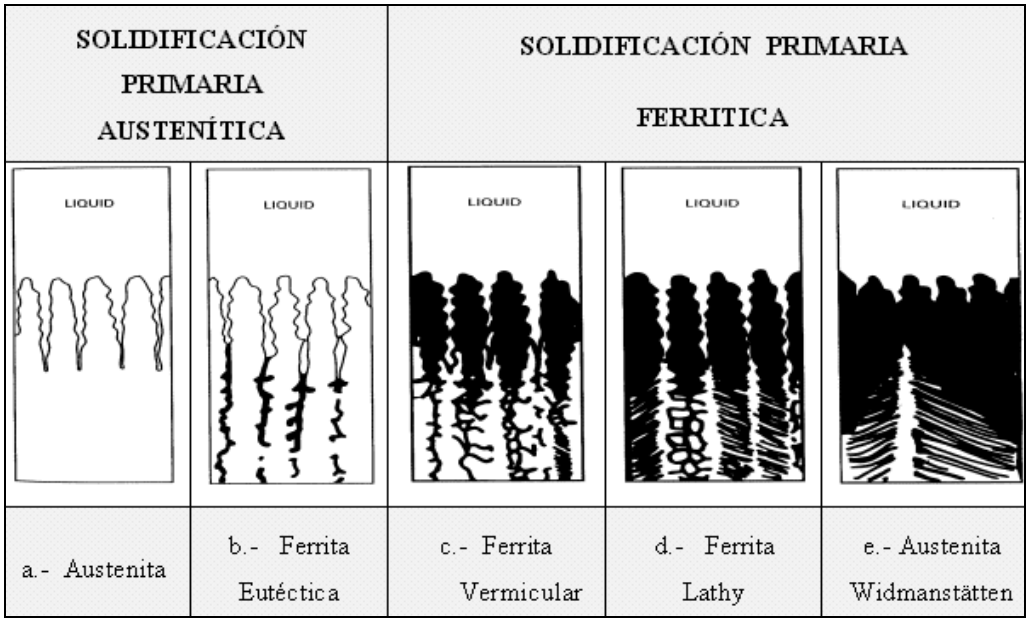


Figura 3.- Morfologías de ferrita delta según el modo primario de solidificación

1.1.7.1.- Solidificación Primaria Austenítica

Las secuencias de solidificación y transformación en estado sólido de los metales austeníticos han sido estudiadas por Brooks[11] y Suutala[12] los cuales esquematizaron como lo muestra la figura 3 en los casos a y b. La ferrita delta solidifica en fase primaria austenítica (A) y Austenítica-Ferritica (AF), esto es causado a que en el espacio interdenditrico, precipita un eutéctico formado por austeníta y ferrita delta, el cual puede transformarse total o parcialmente en austeníta secundaria durante el enfriamiento, lo que origina una estructura dúplex o totalmente austenítica en el metal de soldadura. Esta estructura resultante dependiendo de la relación Creq/Nieq puede ser del tipo celular, globular o de filamentos continuos. Los Aceros Inoxidables que poseen una relación Creq/Nieq menor a 1,48 solidifican como austeníta, como la primera fase de solidificación. La figura 4 según Suutala[12] y el grafico Welding Research Council (WRC) lo indica. El contenido en este caso es bajo (FN ≤ 3)

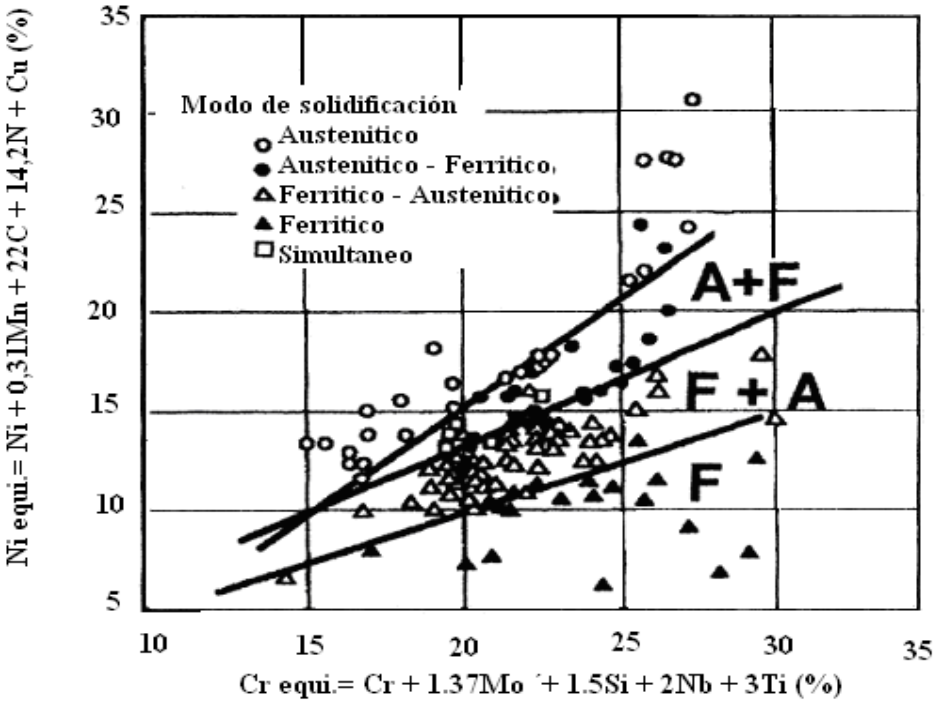


Figura 4.- Modo primario de solidificación para distintas relaciones de Creq/Nieq

1.1.7.2.- Solidificación Primaria Ferritica

Los Aceros Inoxidables Austeníticos que solidifican como fase primaria ferrita delta, muestran un rango más amplio de morfología que se corresponden con los casos c, d, fase ferritica-Austenítica (FA) y como fase ferritica (F) en la figura 3. El contenido de ferrita varía de 3 a 20 FN. Como se muestra en la figura 3 a medida que la relación Cr_{eq}/Ni_{eq} aumenta de 1,55 a 1,8 se presentan diferentes morfologías de la ferrita. Los diferentes tipos de morfología productos de la temperatura de transformación, dependen de la composición y de la velocidad de solidificación y de una posterior transformación a un estado sólido. La tabla siguiente muestra los distintos tipos de morfologías y sus respectivas características.

Morfología de la ferríta	Numero Ferrítico FN	Relación Creq/Nieq	Aspecto	Ubicación
Vermicular Figura 2C	5-15	1,9- 2,2	En forma de red esquelética alineada o con forma de curvas suaves	En regiones interdenditrico como ferrita delta primaria
Lathy Figura 2D	13-15	1,48-1,95	Columnas largas de una red de ferritas entrelazadas orientada a lo largo de la dirección de crecimiento de una matriz austenítica	En métodos de soldadura con elevado contenido de ferrita enfriada rápidamente
Acicular Figura 2E	11-15	> 1,95	Arreglo al azar de agujas de ferrita	En metal de soldadura con altas velocidades de enfriamiento
Globular		< 1,25	Glóbulos distribuidos al azar en una matriz de austeníta	En 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

Tabla 2.- Tipos de morfologías y características de la solidificación primaria ferritica.

1.2.- SOLDADURA TIG

1.2.1.- Principios del proceso

El proceso se denomina TIG por sus siglas en ingles (Tugnsten Inert Gas) pero es también llamado GTAW (Gas Tungsten-Arc Welding). Este método de soldadura se patentó en 1920 pero no se empezó a utilizar de manera generalizada hasta 1940, dado su coste y complejidad técnica. Es un proceso en el cual un arco eléctrico rodeado por una gas inerte, es establecido y controlado entre la pieza a ser soldada y un electrodo no consumible de

tungsteno, aleado a veces con torio o zirconio en porcentajes no superiores a un 2%. Se suministra un gas protector por la antorcha para proteger el electrodo, el charco de soldadura y el metal de soldadura en proceso de solidificación, el arco eléctrico se produce por el paso de corriente a través del gas protector ionizado, que conduce la electricidad. El arco se establece entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo, el calor generado por el arco funde el metal base, una vez establecido el arco y el charco de soldadura, la antorcha se mueve a lo largo de la unión y el arco funde progresivamente la superficie de la pieza de trabajo. Si se usa metal de aporte se alimenta por el borde delantero del charco de soldadura para llenar la unión.

1.2.2.- Características y Ventajas

- La gran ventaja de este método de soldadura es, básicamente, la obtención de cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que en el resto de procedimientos de soldadura, ya que el gas protector impide el contacto entre la atmósfera y el baño de fusión. Además, dicho gas simplifica notablemente el soldeo de metales no ferrosos, por no requerir el empleo de desoxidantes, con las deformaciones o inclusiones de escoria que pueden implicar. Otra ventaja de la soldadura por arco con protección gaseosa es la que permite obtener soldaduras limpias y uniformes debido a la escasez de humos y proyecciones; la movilidad del gas que rodea al arco transparente permite al soldador ver claramente lo que está haciendo en todo momento, lo que repercute favorablemente en la calidad de la soldadura. El cordón obtenido es por tanto de un buen acabado superficial, libres de salpicaduras y sin escorias, lo que incide favorablemente en los costes de producción. Además, la deformación que se produce en las inmediaciones del cordón de soldadura es menor que el producido por otros procesos.

- El proceso puede ser mecanizado o robotizado, controlando mecánicamente la pistola y/o el metal de aporte
- Facilita la soldadura en lugares de difícil acceso
- Óptimas resistencias mecánicas de la articulación soldada
- Poca generación de humo y no se requiere fundente
- Soldadura de alta calidad y precisión (sin distorsión) en todas las posiciones.
- Versatilidad - suelda prácticamente todos los metales industrialmente utilizados
- Puede producir soldaduras autógenas económicas a altas velocidades
- Excelente control del calor aportado, permite soldar secciones delgadas
- Sirve para soldar casi todos los metales (inclusive aluminio, magnesio, titanio, etc.), incluso para la unión de metales disímiles

1.2.3.- Limitaciones

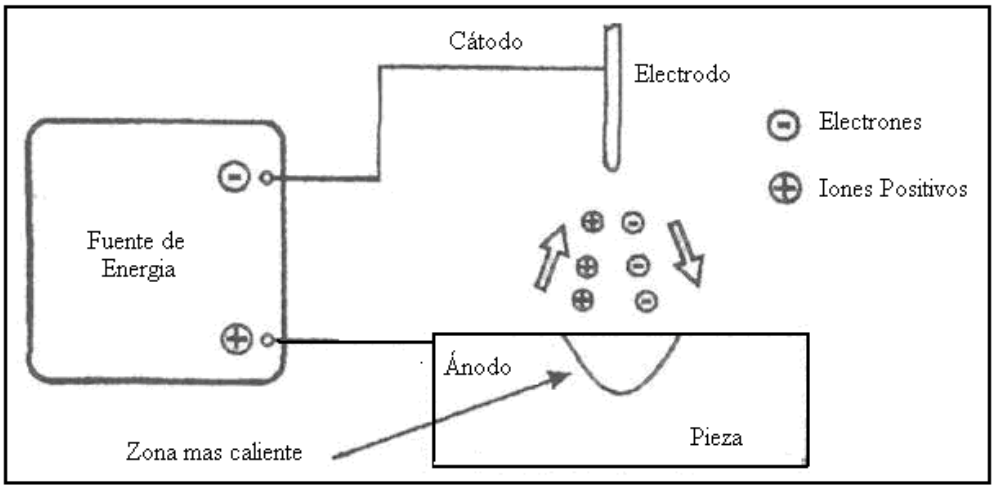
- Las cantidades de material depositado son más bajas que las que pueden alcanzarse con otros procesos de soldadura
- El soldador requiere un poco mas de destreza y coordinación cuando la soldadura sea manual
- Para secciones de más de 10 mm de espesor resulta menos económica que otros procesos de soldadura
- Es difícil proteger debidamente la zona de soldadura en lugares donde hay corrientes de contaminación ya que estas pueden causar dificultades en la zona de soldadura
- Los equipos son más costosos que los de otros procesos de soldadura. El gas inerte y el electrodo no consumible son añadidos a este costo
- Puede haber inclusiones de tungsteno si se permite que el electrodo haga contacto con el charco de soldadura
- El metal de soladura puede contaminarse si no se mantiene como es debido, el escudo de gas protector alrededor del metal de aporte(14)

1.2.4.- Variables del proceso

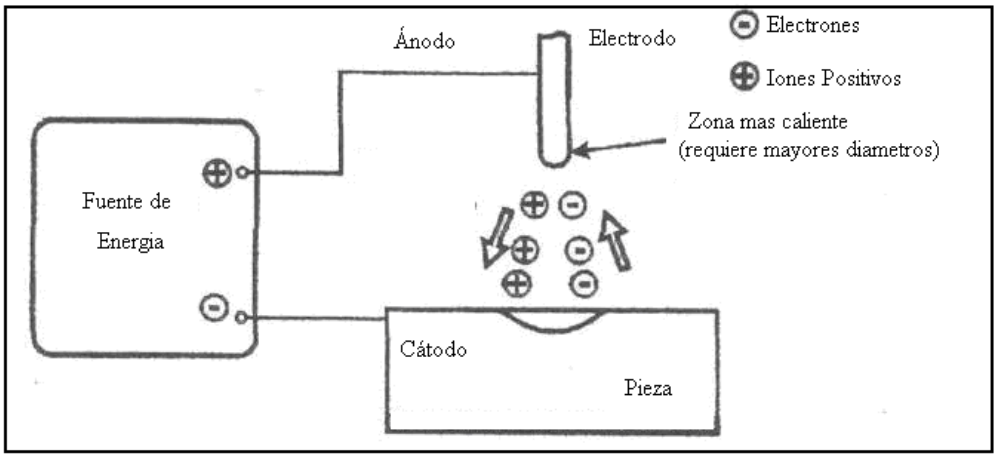
Las principales variables del proceso TIG son el voltaje del arco (Longitud del arco), la corriente de soldadura, la velocidad de avance y el flujo de gas protector.

1.2.4.1.- Corriente del arco

La corriente del arco controla la penetración de la soldadura, su efecto es directamente proporcional. La corriente del arco afecta el voltaje, si se mantiene constante la longitud del arco, su voltaje aumentara en proporción con la corriente, es por ello que si se desea mantener una longitud de arco fija, es preciso ajustar también el voltaje cuando se ajuste la corriente. El proceso puede usarse con corriente continua y con corriente alterna. La corriente continua con el electrodo negativo (CCEN), ofrece las ventajas de penetración profunda y velocidades de soldadura altas, debido a que el 70% del calor, se genera en el ánodo (pieza de trabajo) y el 30% en el cátodo (Electrodo), por lo que al producir la mayor parte del calor en la pieza de trabajo para una corriente de soldadura dada, esta polaridad producirá mayor penetración de la soldadura que si fuese corriente continua con electrodo positivo (CCEP). Estos modos de polarización se pueden apreciar en la siguiente figura 5.



Corriente Continua Electrodo Negativo (CCEN), Polaridad Directa



Corriente Continua Electrodo Positivo (CCEP), Polaridad Inversa

Figura 5.- Modos de polarización de la corriente.

La corriente alterna[14] tiene una acción de limpieza catódica que elimina óxidos refractarios de la superficie, por lo que su uso no es muy frecuente en estos aceros sino en el aluminio.

1.2.4.2.- Voltaje del arco

Depende directamente de la corriente del arco, la velocidad de avance, tipo de gas protector, y solo se utiliza para describir los procedimientos de soldadura porque es fácil de medir. El voltaje del arco sirve para controlar la longitud del arco, la cual es una variable crítica que es difícil de vigilar. La longitud del arco es importante en este proceso porque afecta el ancho del charco de soldadura este ancho es proporcional a dicha longitud.

1.2.4.3.- Velocidad de avance

Esta variable afecta tanto la anchura como la penetración de una soldadura por arco de tungsteno y gas, aunque el efecto sobre la anchura es más influyente que el de la penetración[15]. En algunas aplicaciones, la velocidad de avance se define como un objetivo, y las demás variables se seleccionan de modo que se logre la configuración de soldadura deseada a esa velocidad. En otros casos la velocidad podría ser una variable dependiente, elegida de modo que se obtenga una soldadura con la combinación de las demás variables.

1.2.4.4.- Alimentación del metal de aporte

En la soldadura manual la forma como el metal de aporte es añadido al charco influye sobre el numero de pasadas necesarias y el aspecto terminal de la soldadura. Si la velocidad de alimentación es baja, se incrementara la penetración y se aplanara el perfil de la franja, puede haber socavamiento, agrietamiento de la línea central y sobrellenada la unión. Si por el contrario la velocidad de alimentación es alta se reduce la penetración de la soldadura y se produce una franja más convexa.

1.2.4.5.- Gas protector

La función principal del gas protector es desplazar el aire de la zona de soldadura para evitar la contaminación del electrodo, del baño fundido y de

la zona afectada térmicamente. Otras funciones del gas protector y que deben tenerse en cuenta siempre que se considere la calidad de la unión soldada son:

- Influir en el voltaje y en la energía térmica aportada (calor aportado) por el arco a la soldadura
- Producir reacciones químicas con los elementos del metal base y el metal de aporte que influirán en las propiedades mecánicas de la unión soldada y su resistencia a la corrosión
- Influir en el tipo, tamaño del cordón y penetración
- Determinar la forma en que pasara el metal de aporte a través del arco

Las principales propiedades que determinan el comportamiento de los gases de protección son:

- Potencial de ionización: Tiene una gran influencia en el inicio y estabilización del arco.
- Conductividad térmica: Los gases con un valor más elevado introducirán más calor al metal base, teniendo influencia sobre el tipo de cordón y el tamaño de la zona afectada térmicamente.
- Potencial de oxidación: Permite establecer una clasificación de los gases, siendo los más oxidantes los que transferirán un menor porcentaje de elementos del metal de aporte al metal base.
- Densidad: Está relacionada con el caudal necesario para proteger adecuadamente la unión.

También puede usarse un gas purgante de respaldo para proteger el lado de abajo de la soldadura, ya que al efectuar la soldadura el aire contenido en el lado de abajo de la pieza de trabajo puede contaminar y/u oxidar la soldadura y las superficies de metal base adyacentes a dicha soldadura. Hay mayores posibilidades de lograr un perfil uniforme y ausencia de

socavamiento si se usa gas de respaldo en condiciones controladas. La siguiente tabla muestra los gases de protección y sus características.

GASES DE PROTECCIÓN	CARACTERÍSTICAS
Argón	Gas inerte de elevada densidad (1,4 veces más denso que el aire). Proporciona un arco estable, es efectivo en posición plana. Baja conductividad térmica y potencial de ionización, también es usada en soldadura de materiales ferrosos.
Helio	Gas inerte con alta conductividad térmica, baja densidad y elevado potencial de ionización, produce cordones anchos y con menos penetración que con argón. Es apropiado cuando se requiere un incremento en la velocidad de soldadura.
Argón/Helio	Mezcla usada en transferencia por corto circuito para mejorar el aporte calorífico y las características de fusión. En ocasiones se utilizan mezclas ternarias Ar/He/CO_2 para mejorar la penetración.
Argón/Oxígeno	El oxígeno mejora la estabilidad del arco y la transferencia metálica, produce un charco de soldadura fluido y controlable, disminuyendo la tensión superficial, mejora la forma y el aspecto de los cordones (penetración), así como la velocidad de soldadura, y minimiza el socavamiento.
Ar/O_2/CO_2	Mezcla de argón, hasta 5%O_2 y 10%CO_2 son versátiles pero poco utilizadas por problemas metalúrgicos como la oxidación. Proporciona una protección adecuada y características de arco deseable en la transferencia por corto circuito. Aumenta la penetración y la velocidad de soldadura.

Tabla 3.- Gases de protección y sus características.

1.2.5.- Técnicas de soldadura TIG

Las diversas técnicas para GTAW incluyen: soldadura manual, soldadura mecanizada, soldadura semiautomática y soldadura automática. La soldadura Manual implica que el soldador controla todas las funciones del proceso entre las cuales están la manipulación de la antorcha y el control de las adiciones del metal de aporte "si se está usando este", la corriente de soldadura, la velocidad de recorrido y la longitud de arco, el proceso se muestra en la siguiente foto.

Foto 1.- Soldadura GTAW manual a un tubo con material de aporte.

Técnica de la soldadura manual: una vez inicializado el arco, el electrodo se mueve describiendo un círculo pequeño hasta establecer el charco de soldadura deseado. Luego se sostiene la antorcha con un ángulo de 15° aproximadamente, respecto a la vertical y se mueve a lo largo de la unión para fundir progresivamente las superficies de empalme. El metal de aporte se añade al borde delantero del charco. La antorcha y la varilla de la soldadura se deben desplazar progresivamente y con suavidad para que el charco de soldadura, el extremo caliente de la varilla y la soldadura solidificada caliente no queden expuestos al aire que contaminaría el metal de soldadura o la zona afectada térmicamente. En general una envoltura grande de gas protector evita la exposición al aire.

1.2.6.- Equipo

El equipo está formado por 4 componentes: la antorcha, el electrodo, la fuente de potencia y el gas protector.

1.3.6.1.- La antorcha

La antorcha sostiene el electrodo de tungsteno que transporta la corriente de soldadura al arco y conduce el gas protector a la zona del arco. La mayoría de los antorchas están diseñados para manejar electrodos dentro de ciertos intervalos de tamaños y diferentes tipos y tamaños de boquillas. Casi todas

las antorchas para aplicaciones manuales tienen un ángulo de cabeza (ángulo entre el electrodo y el mango de agarre) de 120°. También hay antorchas con cabeza de ángulo ajustables. Los antorchas de TIG manuales generalmente cuentan con interruptores y válvulas auxiliares integradas a su mango para controlar la corriente y el flujo de gas. Existen 2 tipos de antorchas los enfriados por gas (utilizado en este trabajo) y los enfriados por agua.

En las antorchas enfriadas por gas el calor generado durante el proceso de soldadura se elimina mediante enfriamiento debido al flujo del gas protector, relativamente frío, a través de la antorcha. Estas antorchas [15], están limitadas a una corriente de soldadura máxima de 200 amperios. La siguiente figura muestra algunas partes que conforman el proceso TIG.

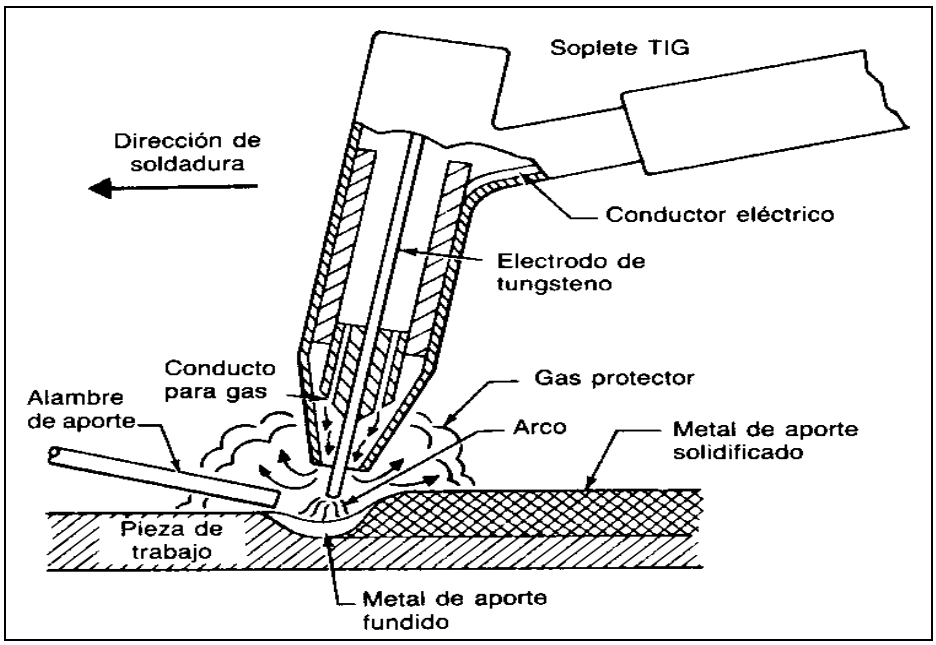


Figura 6.- Componentes que conforman el proceso TIG.

1.2.6.2.- Electrodos

Los electrodos no consumibles usados en TIG están compuestos de Tungsteno o una aleación de él. La función del electrodo de tungsteno es servir como una de las terminales eléctricas del arco que proporciona el calor necesario para soldar. El tungsteno es muy aplicado como electrodo debido a su alto punto de fusión el cual es de 3450°C aproximadamente. Los electrodos de tungsteno se clasifican de acuerdo a su composición química, como se especifica en la tabla 4, tomado de la edición más reciente de ANSI/AWS A5.2. En este sistema de clasificación la letra "E" es para indicar electrodo, el cual es usado en termino de soldadura al arco. La "W" señala el símbolo químico de tungsteno o wolframio. La letra final indica el elemento de aleación. La letra "P" designa tungsteno puro, es decir sin elementos aleantes, "Zr" es zirconio, "Th" es torio, "Ce" es cerio y "La" es lantano. Finalmente los números especifican la composición nominal del elemento aleante (en porcentaje en peso).El sistema de identificación por código de colores de los distintos tipos de electrodos se muestra también en la siguiente tabla:

Tabla 4.- Composición química y sistema de identificación por código de colores de los distintos tipos de electrodos.

Clasificación AWS	Color *	Elemento aleación	Oxido de aleación	Porcentaje en peso del oxido
EWP	Verde	-	-	-
EWCe-2	Anaranjado	Cerio	CeO_2	2
EWLa-1	Negro	Lantano	La_2O_3	1
EWTh-1	Amarillo	Torio	ThO_2	1
EWTh-2	Rojo	Torio	ThO_2	2

***** El color puede aplicarse en forma de bandas, puntos, etc. En cualquier punto de la superficie del electrodo

El electrodo usado para soldar en este trabajo de investigación fue el EWTh-2 que es aleado con torio, el cual es responsable de incrementar la vida útil del electrodo, esto es porque el torio posee una más alta emisividad de electrones l cual incrementa la capacidad de soportar altos valores de corrientes, en un 20% aproximadamente. El torio también reduce las temperaturas en el extremo del electrodo y proporciona una mayor resistencia a la contaminación de la soldadura. Con este tipo de electrodo la iniciación del arco es más fácil y el arco es más estable cuando se usa corriente directa. Además mantiene la forma de la punta del electrodo durante la soladura, lo cual es excelente. El EWTh-2 esta diseñado para corriente continúa con polaridad directa y electrodo negativo (CCEN).

1.2.6.3.- Fuente de potencia

Para seleccionar la fuente de potencia TIG se debe basar en el tipo de corriente requerida para una aplicación en particular. Los tipos de corrientes de soldadura incluyen: ca sinusoidal, ca de onda cuadrada, CC y CC a pulsos. El tipo de corriente escogida para realizar la soldadura fue la corriente directa del tipo continua con polaridad directa. Las fuentes de potencia monofásica pueden suministrar corriente tanto da CA como de CC, en tanto que las trifásicas por lo regular solo suministran CC. Si se usa corriente continua tipo directa, el electrodo de tungsteno puede conectarse ya sea al terminal negativo (Polaridad directa) o al positivo (polaridad inversa) de la fuente de potencia. En este caso se escogió que el electrodo sea el negativo (Cátodo), con esta polaridad los electrones fluyen de la pieza de trabajo al electrodo, obteniéndose como resultado una mayor penetración.

Tabla 5.- Problemas, Causas y soluciones que pueden surgir durante la realización de una operación con GTAW

Problemas	Causas	Solución
Consumo excesivo del electrodo	1. Flujo de gas insuficiente. 2. Operación con polaridad inversa 3. Tamaño incorrecto del electrodo para una corriente dada 4. Calentamiento excesivo del porta electrodos 5. Electrodo contaminado 6. Oxidación del electrodo durante el enfriamiento 7. Empleo de gas que contiene oxigeno o dióxido de carbono	1. Aumentar el flujo de gas 2. Usar electrodo mas grande o cambiar de polaridad 3. Verificar que el mandril haga un buen contacto 4. Eliminar la porción contaminada 5. Mantener el flujo de gas durante 10 o 15 segundos después de apagar el arco 7. Cambiar al gas correcto
Arco irregular	1. El metal base está sucio o grasoso 2. La unión es demasiado angosta 3. El electrodo está contaminado 4. El arco es demasiado largo	1. Usar químicos apropiado, cepillo de alambre o abrasivos 2. Abrir el surco de la unión, acercar mas el electrodo al trabajo, reducir el voltaje 3. Eliminar la porción contaminada
Porosidad	1. Impurezas gaseosa atrapadas 2. Manguera de gas defectuosa o conexiones flojas 3. Película de aceite en el metal base	1. Purgar el aire de todas las líneas antes de encender el arco. 2. Verificar que las mangueras y conexiones no tengan fugas 3. Limpiar el metal base

1.3.- SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

1.3.1.- 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 (-100°C).

1.3.2.- Factores de importancia en la soldabilidad de los A.I.A.

1.3.2.1.- Propiedades Físicas

Los Aceros Inoxidables Austeníticos, según Ignoto[2], tienen un coeficiente de dilatación de aproximadamente un 50% más alto que los aceros al carbono, mientras que la conductividad térmica es aproximadamente un 40% menor, haciendo que la zona afectada por el calor (ZAC) ,sea más estrecha que la resultante de la soldadura de otros tipos de acero por lo que la contracción de las juntas será mayor y la soldadura deberá realizarse prestando una atención especial al riesgo de posibles distorsiones del conjunto soldado.

Para amortiguar las tensiones se debe:

- Realizar el soldeo con bajo aporte de calor, por lo cual es fundamental escoger la técnica de soldadura adecuada
- Realizar una planificación previa de las distintas etapas de soldadura y efectuarlas lo mas simétricamente posible de tal manera que el calor se distribuya de forma equilibrada
- Hacer que el nivel de embridamiento del conjunto soldado sea el mas bajo posible

1.3.2.2.- Precalentamiento y tratamiento térmico de los conjuntos soldados

Este tipo de práctica se realiza únicamente cuando se trabaja con espesores de chapa gruesa o por razones químicas en donde el material esta en contacto con un medio agresivo, el cual implica un riesgo de corrosión bajo tensión. En ambos casos se acostumbra realizar un tratamiento térmico de alivio de tensiones. Fuera de estos casos particulares, ninguna operación de

soldadura de un Acero Inoxidable Austenítico requiere un precalentamiento o un tratamiento térmico.

1.3.2.3.- Elección del material de aporte y del proceso de soldadura

Las grietas en los cordones son debidas a un acumulamiento de impurezas, en aquellas zonas donde el metal solidifica de ultimo pueden formarse superficies débiles, propensas a romperse y generar grietas bajo la influencia de la propia tensión de contracción de la soldadura. Como solución a este problema se sugiere reducir las tensiones mecánicas y eliminar las impurezas. La selección del proceso de soldadura debe realizarse sobre la base de los siguientes criterios: aporte y distribución del calor, operatividad, velocidad del soldeo, inconvenientes de resistencia a la corrosión del metal depositado, disponibilidad comercial y costo.

1.3.2.4.- Contenido de ferrita

La ferrita es capaz de disolver elementos tales como Azufre y Fósforo que de otro modo segregarían, por tal motivo una cierta cantidad de esta fase en la soldadura tiene una influencia favorable en la reducción del agrietamiento en caliente; Además su presencia es positiva al incrementar las propiedades mecánicas de la unión, pero al mismo tiempo es desfavorable por disminuir la resistencia a la corrosión frente a ácidos oxidantes calientes. En sus investigaciones Rabenstiener[16] considero óptimo el contenido de ferrita entre un 5 y 15 % para beneficiarse con las ventajas de esta fase y reducir en gran medida los inconvenientes en la solidificación. El porcentaje de ferrita requerido en la unión soldada se consigue seleccionando adecuadamente tanto los parámetros del proceso de soldadura como el material de aporte. Karlsson et al[17] encuentran que la distribución de las tensiones durante la solidificación es uno de los factores que contribuyen a que sea beneficiosa la presencia de la fase. Ellos establecen desde el punto de vista de la soldadura, que los mejores resultados se obtienen cuando la secuencia de

solidificación comienza con la fase ferrítica y posteriormente la transformación de fase a austeníta en estado sólido.

1.3.3.- Estimación del contenido de ferrita

La determinación del contenido de ferrita en un Acero Inoxidable Austenítico puede llevarse a cabo por métodos químicos (diagrama de Schaeffler, diagrama de Long y WRC), Magnéticos y Metalográficos. Kotecki[18] ha manifestado que la predicción y medida de la ferrita, proporciona un considerable grado de seguridad para que el cordón esté libre de grietas. Su presencia también puede incrementar las características mecánicas del cordón de soldadura, pero, al mismo tiempo, es desfavorable al disminuir la resistencia a la corrosión. Por tales motivos se requiere certificar un contenido de ferrita en un metal de soldadura. Según Lefebvre[19], el contenido de ferrita debe oscilar entre (5 y 15%Ferrita) o (4 y 13 FN), para los Aceros Inoxidables Austeníticos. Han pasado más de 40 años desde que un gran número de investigadores se han dedicado a formular cantidades de relaciones empíricas con el fin de estimar el contenido de ferrita en el depósito de soladura partiendo de la composición química de los materiales pero solo hablaremos y utilizaremos del diagrama de Schaeffler.

1.3.3.1.- Diagrama de Schaeffler

Es un diagrama en el cual se puede predeterminar la microestructura y el contenido de ferrita de manera metalográfica para el metal base, cordón de soldadura y el material de aporte. El cromo equivalente cuyo valor va desde 0 a 40% y el Níquel equivalente cuyo valor va desde 0 a 32%, son los puntos de referencia para comparar el porcentaje de ferrita obtenido tanto por composición química como por metalografía (ASTM E 562). Es notable en el diagrama de Schaeffler[20] que se dispone de un porcentaje de ferrita en el metal de soldadura el cual va desde 0 a 18%, con el objeto de

disminuir fallas por fisuración en caliente. En este diagrama no se considera los efectos del nitrógeno durante la formación de austeníta, y el manganeso estabiliza la austeníta en su transformación a bajas temperaturas. En este diagrama el eje de las ordenadas presenta la suma de porcentajes de los elementos que forman la austeníta, multiplicados por unos coeficientes, función de la influencia austenizante del elemento de aleación. Esta suma se expresa en forma de equivalentes de Níquel, como elemento más relevante de la formación de austeníta, por otro lado el eje de las abscisas representa la suma de porcentajes de los elementos formadores de ferrita de igual manera multiplicados por un coeficiente, función de la influencia ferritizante, en este caso la suma se expresa en forma de equivalentes de cromo, que es el elemento básico formador de ferrita. Modelos empíricos para calcular el porcentaje de ferrita:

$$Cr_{eq} = \% Cr + \% Mo + 1{,}5\% Si + 0{,}5\% Nb \qquad \text{Ecuación 1}$$

$$Ni_{eq} = \% Ni + 30\% C + 0{,}5\% Mn \qquad \text{Ecuación 2}$$

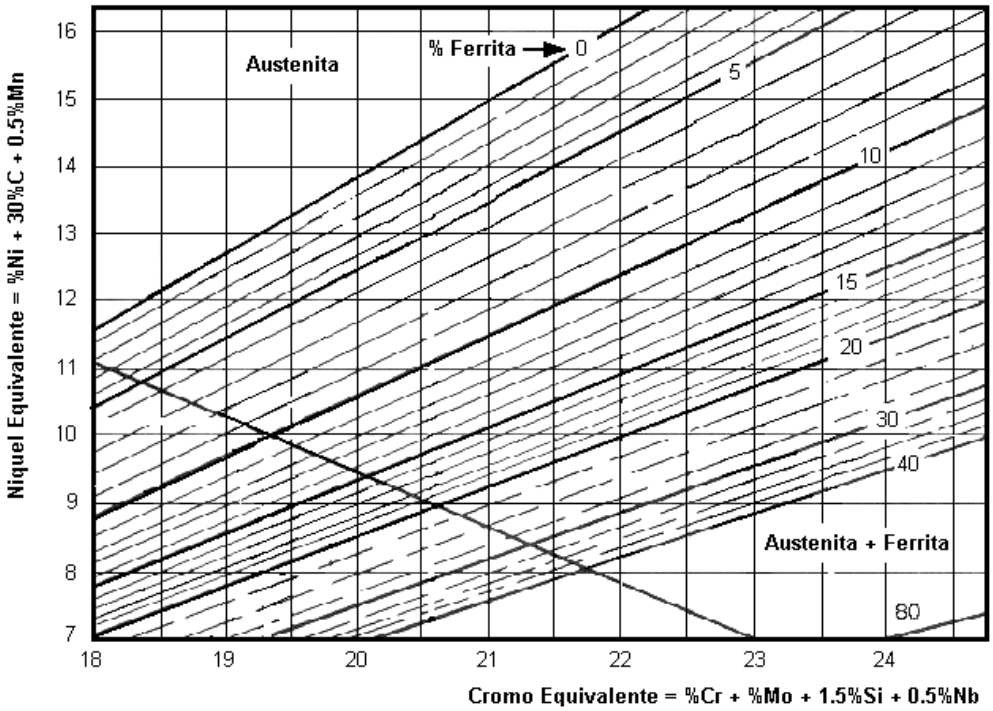


Figura 7.- Diagrama de Schaeffler.

1.3.4.- Consecuencias de un inadecuado proceso de soldadura

Cuando se elige un proceso de soldadura de manera equivocada sin hacer un estudio detallado de cómo van afectar las variables del proceso a dicha unión es muy probable que se presenten problemas en el cordón de soldadura y en el metal base de los cuales podemos citar los problemas de sensibilización y corrosión.

1.3.4.1.- Sensibilización y corrosión intergranular

Las juntas soldadas de Acero Inoxidable Austenítico suelen ser objeto de la corrosión intergranular, este tipo de corrosión se presentan en soldaduras expuestas a ambientes acuosos clorhídricos, concentrándose el ataque en el metal base específicamente en la zona afectada por el calor. La base del ataque corrosivo se encuentra relacionada a un fenómeno conocido como

sensibilización, donde aceros no estabilizados (sin Ti o Nb en la aleación), cuando son expuestos o enfriados lentamente desde intervalos de temperatura comprendidos entre 400 a 483°C, forman carburos ricos en Cromo a lo largo de los limites de grano austeníta. Este intervalo de Temperatura se conoce como intervalo de temperatura de sensibilización, debido a que la exposición dentro del intervalo hace al Acero Inoxidable Austenítico que sea particularmente sensible a la corrosión intergranular. Es posible minimizar o eliminar las probabilidades de corrosión intergranular en las soldaduras de Acero Inoxidable adoptando las siguientes medidas:

- Utilizar aleaciones con bajo contenido de Carbono, en el orden de 0,04% o menos.
- Seleccionar Aceros Inoxidables estabilizados con Nubidio y Titanio, ya que la presencia de estos elementos evita la precipitación de carburos de cromo, pues son elementos más ávidos de Carbono y Nitrógeno que el Cromo y se combina preferentemente evitando la formación de $Cr_{23}C_6$ en los límites de grano.
- Aplicación de un tratamiento de recocido a el material antes de la soldadura para remover indicios de trabajo en frió anteriores (El trabajo en frió acelera la precipitación de carburos).

1.3.4.4.- Fragilización de los Aceros Inoxidables Austeníticos

Cuando estos aceros son sometidos a temperaturas entre 480 y 890°C, se forman varias fases intermetálicas, y en las aleaciones que contienen molibdeno por lo general poseen un tope de hasta 950°C, dentro de estas fases intermetálicas la más frecuente y predominante es la fase sigma. Castner[21], define esta fase como un compuesto intermetálicos duros, frágil y no magnético, siendo un precipitado muy típico en aceros altos en cromo y al Cromo-Níquel durante recocidos en temperatura entre 600 y 900°C. Esta fase sigma está formada por 52% de Cromo y 48% de Hierro

aproximadamente, su formación está asociada a la ferrita delta del metal de soldadura y a la ferrita remanente del metal base, puede formarse de la austeníta pero es poco probable, ya que requeriría mayor tiempo y altas temperaturas para nuclear en comparación con la ferrita. Según Reyna[22] debida a su lenta velocidad de formación, la fase sigma no suele precipitar durante la soldadura, aunque se suelden aceros de estructuras dúplex (Austeníta-Ferrita), que son los más susceptibles a este fenómeno. La presencia de la fase sigma está asociada al deterioro de las propiedades mecánicas, particularmente la ductilidad y resistencia al impacto, incrementando la fragilidad, por tratarse de una fase mucho más dura que la estructura base. La cantidad de fase sigma que pueda formarse en el metal de soldadura de los Aceros Inoxidables Austeníticos es siempre menor que el contenido de ferrita presente, esto se debe a que la fase sigma requiere de un alto contenido de cromo para su formación y crecimiento, siendo la ferrita delta de mayor contenido de cromo que la austeníta, es por ello que se requiere de altos contenidos de ferrita para promover la fase sigma. Al igual que los carburos de Cromo en la sensibilización, la fase sigma puede disolverse por medio de un tratamiento de recocido de disolución o solubilización a 1050°C seguido de un temple en agua, eliminando la fragilidad inducida en el material.

1.3.4.5.- Agrietamiento en caliente de las soldaduras austeníticas

Cuando se producen agrietamientos en caliente las grietas en los cordones de soldadura son por la acumulación de impurezas debidas a segregaciones en el metal de aporte. En estas zonas se forman superficies muy débiles que pueden romperse y generar grietas bajo la influencia de la propia tensión de contracción de la soldadura. Las formas de eliminar el agrietamiento en caliente son:

- Disminuyendo las segregaciones disponiendo de una cierta cantidad de ferrita en la matriz austenítica del metal de soldadura. Esto porque la

ferrita puede disolver elementos como el azufre y fósforo, que de otro modo se segregarían, además que la ferrita se distribuye a lo largo de los granos de austeníta formando una malla plástica que resiste al agrietamiento en caliente.

- Eliminar las impurezas de azufre, fósforo, estaño, antimonio, Niobio, Bismuto y en el metal de soldadura completamente austenítico el silicio.
- Reducir las tensiones mecánicas, esto se logra tomando en cuentas las propiedades físicas del material.

El problema del agrietamiento en caliente del cordón completamente austenítico se soluciona usando un metal con un contenido de Manganeso entre 3 y 7% y contenidos de silicio, fósforo y azufre bajo.

1.4.- ENSAYOS NO DESTRUCIVOS Y DESTRUCTIVOS

1.4.1.- Ensayos no destructivos

Son métodos de inspección y evaluación que se efectúan a equipos y piezas puestos en servicio, para determinar si hay defectos, discontinuidades que afectan las propiedades mecánicas, sin que se destruya la pieza. Con estos ensayos se logra determinar el tamaño, forma, dimensión, ubicación y tipo de discontinuidad (externa o interna), Ejemplo de estos ensayos tenemos: Líquidos Penetrantes, Inspección Visual y Radiografía Industrial.

1.4.1.1.- Inspección Visual

Esta técnica permite visualizar el aspecto superficial, la integridad de la soldadura, detecta discontinuidades abiertas posibles de captar con el ojo humano; es decir, con una profundidad no menor a 3 mm. Los posibles

defectos detectables son grietas, socavaduras y exceso o falta de penetración.

1.4.1.2.- Radiografía Industrial

Esta técnica permite 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 técnicas no destructivas.

1.4.1.3.- Líquidos Penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes permite determinar la presencia de posibles grietas o cualquier otro defecto superficial que afecte la calidad de la unión con mayor precisión que una inspección visual. En esta inspección se emplea un líquido humectante que hace visible el lugar donde se encuentra una imperfección.

1.4.2.- Ensayos Destructivos

Son métodos de inspección que producen la destrucción de la pieza o por lo menos de una parte de ella, con el fin de conocer las propiedades mecánicas y químicas y comprobar que cumplen con los requisitos establecidos para el servicio a que serán sometido posteriormente. Estos métodos sirven para calificar los procedimientos de soldadura, soldadores y operadores de maquinas de soldar así como para determinar las propiedades mecánicas y metalúrgicas tanto del material base como del material de aporte. Ejemplo de estos métodos tenemos los citados a continuación:

1.4.2.1.- Ensayo de Tracción

El Ensayo de Tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada realizada con dicho material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este Ensayo mide la

resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un Ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas. En un ensayo de Tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos:

- Módulo de elasticidad o Módulo de Young, que cuantifica la proporcionalidad anterior.
- Coeficiente de Poisson, que cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza.
- Límite de fluencia o límite elástico aparente: valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- Límite elástico (límite elástico convencional o práctico): valor de la tensión en el que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado.
- Carga de rotura o resistencia a la tracción: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.
- Alargamiento de rotura: incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.

1.4.2.2.- Ensayo de Dureza

El Ensayo de Dureza es, juntamente con el de tracción, uno de los más empleados en la selección y control de calidad de los metales. Intrínsecamente la dureza es una condición de la superficie del material y no

representa ninguna propiedad fundamental de la materia. Se evalúa convencionalmente por dos procedimientos. El más usado en metales es la resistencia a la penetración de una herramienta de determinada geometría. El ensayo de dureza es simple, de alto rendimiento ya que no destruye la muestra y particularmente útil para evaluar propiedades de los diferentes componentes microestructurales del material. Los métodos existentes para la medición de la dureza se distinguen básicamente por la forma de la herramienta empleada (penetrador), por las condiciones de aplicación de la carga y por la propia forma de calcular (definir) la dureza. La elección del método para determinar la dureza depende de factores tales como tipo, dimensiones de la muestra y espesor de la misma.

1.4.2.2.1.- Dureza Rockwell

Es un método para determinar la dureza, es decir, la resistencia de un material a ser penetrado. Este constituye el método más usado para medir la dureza debido a que es muy simple de llevar a cabo y no requiere conocimientos especiales. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar prácticamente cualquier metal o aleación. Hay dos tipos de penetradores: unas bolas esféricas de acero endurecido (templado y pulido) de 1/16, 1/8, ¼ y ½ pulg, y un penetrador cónico de diamante con un ángulo de 120º +/- 30' y vértice redondeado formando un casquete esférico de radio 0,20 mm (Brale), el cual se utiliza para los materiales más duros.El ensayo consiste en disponer un material con una superficie plana en la base de la máquina. Se le aplica una precarga menor de 10 kg, básicamente para eliminar la deformación elástica y obtener un resultado mucho más preciso. Luego se le aplica durante unos 15 segundos un esfuerzo que varía desde 60 a 150 kg a compresión. Se desaplica la carga y mediante un durómetro Rockwell se obtiene el valor de la dureza

directamente en la pantalla, el cual varía de forma proporcional con el tipo de material que se utilice.

1.4.2.3.- Ensayo Metalográfico

Un ensayo de metalografía se realiza con el fin obtener toda la información que es posible encontrar en la estructura de los diferentes materiales. Este Ensayo se realiza con la ayuda de un microscopio en donde se observa la estructura de ciertas muestras, que nos permitirán concluir que tipo de aleación se tiene, contenido de carbono y tamaño de grano. Una vez se logra esto la muestra se podrá relacionar con las propiedades físicas y mecánicas que se desean.

1.4.3.- Inspección y Calidad de soldadura

De acuerdo con las especificaciones aplicables los procedimientos de inspección[23] deberán servir para determinar si es apropiado el desempeño del soldador o del operador, para calificar un procedimiento de soldadura satisfactorio y para realizar un examen completo del producto final soldado. La inspección de la soldadura del producto terminado se limita a los métodos de examen no destructivos como la inspección visual, con líquido penetrante, con partículas magnéticas, radiografía y ultrasonido. Las pruebas destructivas (De tensión, de corte, fatiga, impacto flexión, fractura sección transversal o dureza), por lo regular se limita al desarrollo de ingeniería, la calificación de procedimientos de soldadura y la calificación del rendimiento de los soldadores y operadores.

1.4.4.- Especificación del procedimiento de soldadura (EPS)

Benzo y Capodicasa[24], establecen que una EPS es un procedimiento de soldadura calificado que proporciona las directrices para elaborar una soldadura de producción y/o reparación, según los requerimientos. Una

especificación del procedimiento de soldadura, debe considerar todas las variables esenciales, no esenciales y en algunos casos, las variables esenciales suplementarias, para cada proceso de soldadura.

1).- Variables esenciales: De acuerdo a la definición del ASME[25] Sección IX, son aquellas que afectan las propiedades mecánicas de la junta. Estas deberán ser claramente documentadas y, de variar en cualquier forma, se deberá probar y calificar nuevamente el procedimiento de soldadura. Entre las variables esenciales envueltas en una EPS, pueden considerarse las siguientes:

- El proceso de soldadura
- El tipo a composición del metal base
- La geometría del metal base normalmente el espesor
- La necesidad de pre o postcalentamiento del metal base
- El material de aporte y otro material consumido durante la soldadura

2).- Variables no esenciales: Son variables que pueden variar dentro de ciertos límites, no afectan las propiedades mecánicas de la soldadura y no requieren de una recalificación del procedimiento de soldadura. Entre estas variables encontramos las siguientes:

- La progresión ascendente o descendente
- Ciertos detalles del diseño de junta
- El tamaño del electrodo o alambre
- El uso y tipo de respaldo de soldadura
- La polaridad de la corriente de soldadura
- La técnica de aplicación del proceso

3).- Variables Suplementarias

Son aquellas que pueden afectar la tenacidad de la soldadura es decir, su resistencia al impacto, entre estas variables podemos citar:

- La progresión de la soldadura ascendente y descendente
- Calor suministrado
- Precalentamiento
- Tratamiento térmico posterior

Parámetros a controlar en una EPS

1) Identificación del material base
2) Proceso de soldadura
3) Tipo, clasificación y composición del material de aporte
4) Preparación de la junta y limpieza de superficies a soldar.
5) Técnicas de la soldadura
7) Características Eléctricas
8) Posiciones de soldadura
9) Temperatura de precalentamiento y entre pases
10) Calor suministrado
11) Inspección
12) Tratamiento térmico posterior

1.4.5.- Registro de calificación del procedimiento

Los Registros de las Pruebas de Calificación (RPC), son los documentos que soportan a la EPS, por lo tanto, estos deberán estar anexos a la misma, o disponibles para su consulta. A continuación, se incluyen ciertos detalles sobre los aspectos mencionados anteriormente.

1) Selección, preparación y soldadura de muestras:

Las soldaduras ejecutadas sobre las muestras, deben ser representativas de las soldaduras de producción durante la fabricación. El tamaño, tipo y espesor, será determinado por el código aplicable.

2) Extracción y prueba de probetas de acuerdo al código aplicable:

El tipo y número de probetas a ser removidas para realizar las pruebas de ensayos no destructivos, dependerán de los requerimientos del código aplicable o de condiciones particulares. Las pruebas realizadas a la soldadura son destructivas y generalmente consisten de ensayos de tracción, doblado e impacto. En algunas ocasiones, realizan los ensayos no destructivos que se harán en las soldaduras de producción. Se deberá asegurar que el Registro de Calificación de Pruebas (RCP) indique en detalle los parámetros de soldadura utilizados, y los resultados de las pruebas exigidas.

3) Evaluación de los resultados de las pruebas realizadas:

Los resultados deberán ser analizados por el inspector responsable, con el fin de determinar si los detalles de las pruebas y sus resultados cumplen con los requerimientos aplicables.

4) Aprobación de la EPS:

La EPS será aprobada si cumple con todos los requerimientos del código o especificación de referencia. Es de hacer notar, que una EPS deberá ser recalificada si existe algún cambio en las variables esenciales de la misma

CAPÍTULO II

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la siguiente figura se muestra el flujograma que describe el procedimiento experimental empleado en esta investigación, en el mismo se destacan seis etapas principales: Caracterización del material base, selección de los parámetros de soldadura, realización de los cupones de soldadura, realización de los diferentes ensayos, análisis de resultados y conclusiones.

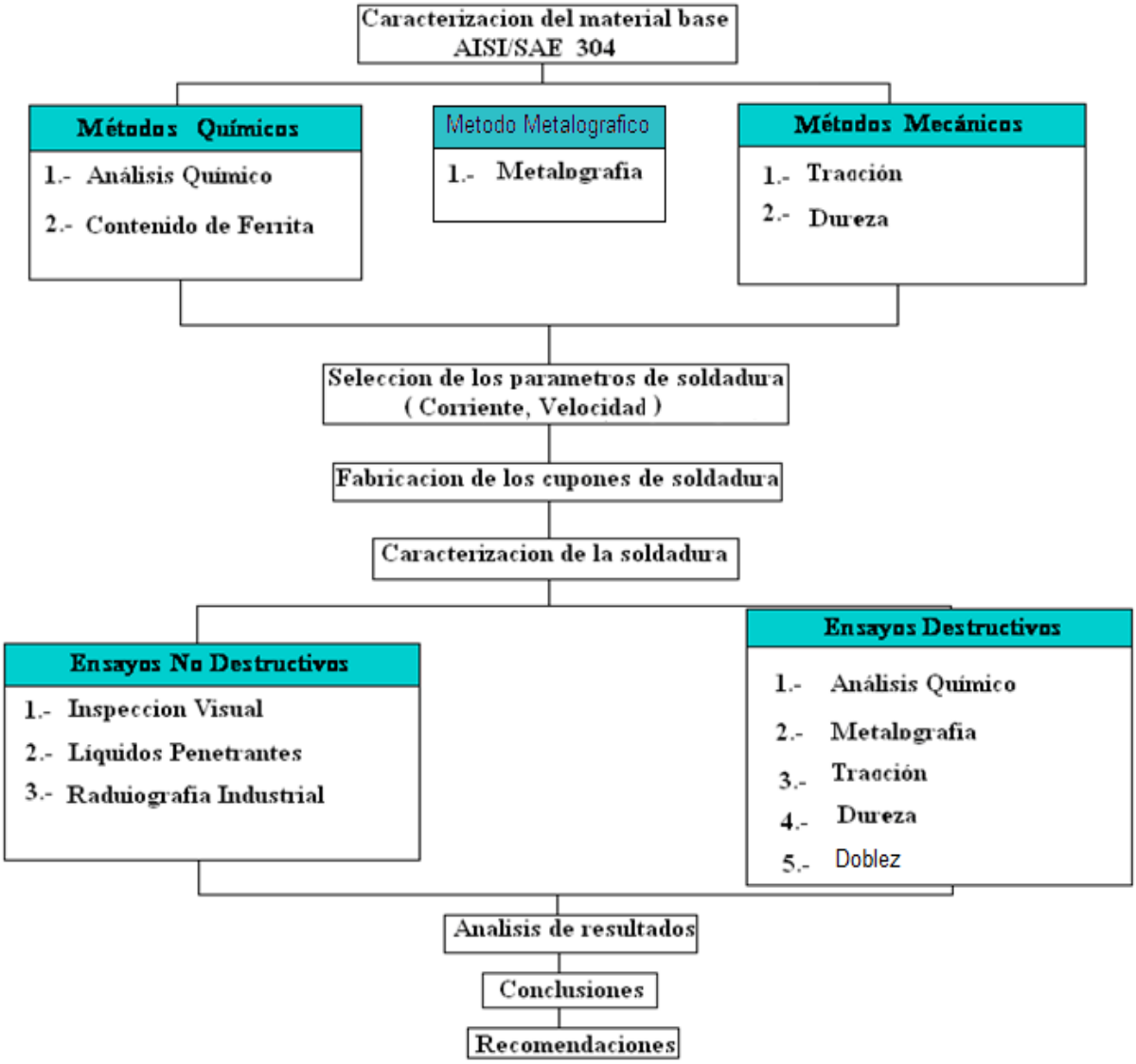


Figura 8.- Flujograma del procedimiento experimental.

2.1.- CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL BASE

El material base usado para la realización de los cupones de prueba fue el Acero Inoxidable Austenítico AISI/SAE 304, en forma de lámina con dimensiones 200 x 120 x 0,8mm. Se realizó la caracterización de las propiedades mecánicas (tracción y dureza) y la caracterización metalográfica a fin de verificar si el material efectivamente cumplía con las especificaciones indicadas por el fabricante.

2.1.1.- Análisis químico

La caracterización del material base desde el punto de vista químico se realizó con el objeto de verificar el porcentaje en peso de los elementos presentes tales como: Carbono, Cromo, Níquel, Molibdeno, Azufre, Silicio, Fósforo y Azufre. Por medio del método denominado Espectrofotometría de Absorción Atómica que consiste básicamente en extraer 8 gramos de viruta de la lámina del material base por medio de un taladro de banco que posteriormente se separa en tres grupos de 1,5 gr cada uno: un grupo se disuelve en Acido Nítrico (HNO_3), otro en Acido Fluorhídrico (HF) y otro en Acido Clorhídrico (HCL) y posteriormente son sometidos a unos procesos de diluciones para que posteriormente utilizando el equipo marca Perkin Elmer, modelo AAnalyst 300 se determine el contenido de Manganeso, Fósforo, Cromo, Níquel y Silicio en el metal base. Los contenidos de Azufre y Carbono se determinaron con el método gasometría con el equipo marca LECO, modelo CS-200. El análisis químico se llevo a cabo en el Laboratorio Instrumental de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UCV. Las siguientes fotos muestran los equipos que se usaron para la realización del análisis químico

Foto 2.- Taladro de Banco

Foto 3.- Equipo Perkin Elmer, modelo AAnalyst 300 (Espectrofotómetro)

Foto 4.- Equipo LECO, modelo CS-200 (Analizador de Azufre y Carbono).

En la tabla 6 se presenta las composiciones químicas incluyendo los contenidos porcentuales de los diferentes elementos según el fabricante del material (AUSTINOX), los obtenidos a partir del análisis químico, los valores nominales según la norma (ASTM A240) y los resultados del método de fluorescencia.

Tabla 6.- Composición química del material base.

COMPOSICION QUÏMICA	%C	%Cr	%Mn	%S	%Si	%Ni	%P
NORMA ASTM 240	0,08	18-20	2	0,03	0,75	8-10,5	0,045
AUSTINOX	0,054	18,183	1,65	0,06	0,393	8,156	0,031
Espectrofotometría y Gasometría	0,0354	18,41	1,810	0,06	0,396	8,212	0,011
FLUORESCENCIA		18,006	1,808			8,206	

2.1.1.2.- Fluorescencia

En la prueba de fluorescencia se realizaron 5 mediciones con el equipo Xmet-3000TX, a fin de corroborar el análisis químico realizado anteriormente. Los resultados de dichas mediciones aparecen en la tabla 7. Este procedimiento se realizó en el Laboratorio Instrumental de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UCV.

Tabla 7.- Valores de la prueba de fluorescencia

# Medición / Elemento	1	2	3	4	5	Promedio
Ti	0,00	0,08	0,00	0,00	0,3	0,076
V	0,14	0,11	0,19	0,26	0,09	0,158
Cr	17,54	18,44	18,04	16,95	19,06	18,006
Mn	1,78	1,93	2,01	2,16	1,16	1,808
Fe	70,76	70,59	71,08	72,28	71,92	71,326
Co	0,84	0,47	0,4	0,46	0,00	0,434
Ni	9,11	8,5	8,24	7,71	7,47	8,206
Cu	0,4	0,34	0,35	0,41	0,4	0,38
W	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,014
Nb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,006	0,006
Mo	0,34	0,3	0,32	0,43	0,37	0,342

El método de Fluorescencia permite determinar el contenido de numerosos aleantes de una forma fácil y rápida en un único disparo, tales como titanio, vanadio, cobalto, etc ; Sin embargo, para efectos de comparación con los valores obtenidos a partir de las otras fuentes, se tomaron en cuenta solamente los porcentajes de cromo, níquel y manganeso. En la siguiente foto se muestra el equipo Xmet-3000TX con el que se realizo la fluorescencia.

Foto 5.- Equipo Xmet-3000TX.

2.1.2.- Estimación del contenido de ferrita

La estimación del porcentaje de ferrita se realizó utilizando el método químico. Mediante las ecuaciones empíricas (1 y 2) desarrolladas por Schaeffler y conociendo la composición química de la chapa de acero inoxidable, se estimaron los valores de cromo equivalente (Cr eq) y níquel equivalente (Ni eq) (tabla 8). Posteriormente, dichos valores se graficaron en el diagrama de Schaeffler (figura 7), obteniéndose una estimación del porcentaje de ferrita presente en el material base.

Tabla 8.- Resultados del Cr eq y Ni eq en el metal base

Calculo	Material base
Cr eq	19,34
Ni eq	10,172
%Ferrita	9,3

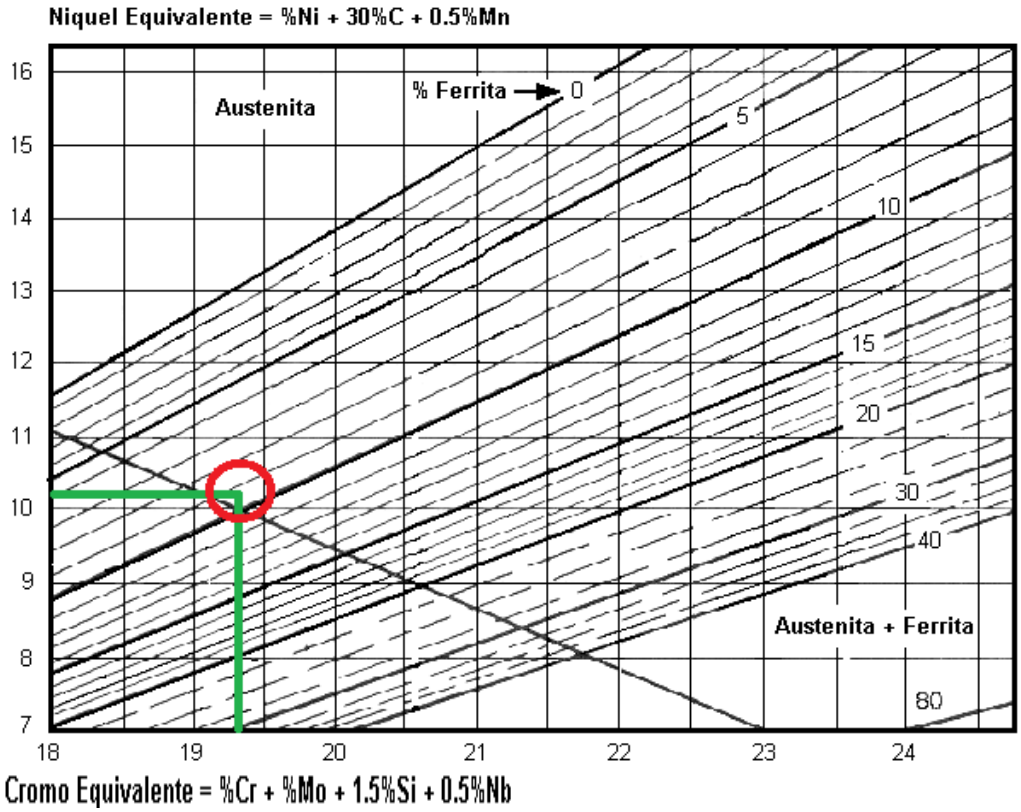


Figura 9.- Cálculo del contenido de ferrita en el metal base por Shaeffler.

2.1.3.- Ensayo de Dureza del material base

Se realizo el ensayo para determinar la dureza tipo Rockwell B por medio del equipo Wilson/Rockwell @ Hardness Tester Serie 500, modelo B504-T, con una precarga de 10 Kg, 100 Kg. de carga y un identador tipo esfera de 1/16". La siguiente foto muestra el equipo con el que se realizo dicho ensayo.

Foto 6.- Equipo Wilson/Rockwell @ Hardness Tester Serie 500, modelo B504-T.

Para realizar el ensayo se extrajo una sección de 3x3 cm y se realizaron mediciones de dureza en 4 puntos distintos. La siguiente figura representa el esquema de la probeta especificada.

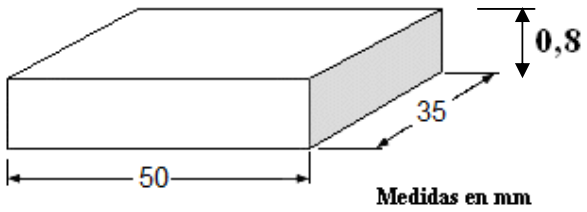


Figura 10.- Modelo de probeta para realizar el ensayo de dureza al metal base

La siguiente tabla muestra los valores obtenidos en Dureza Vickers empleando la tabla de conversión.

Tabla 9.- Resultados de la dureza Vickers con una carga de 10Kg al metal base

Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Promedio	Desviación estándar
154	154	154	154	154	0

2.1.4.- Ensayo de Tracción

El diseño de las probetas para realizar el ensayo de tracción se realizó de acuerdo a lo especificado en la norma ASTM A370 (27). El esquema se presenta en la siguiente figura.

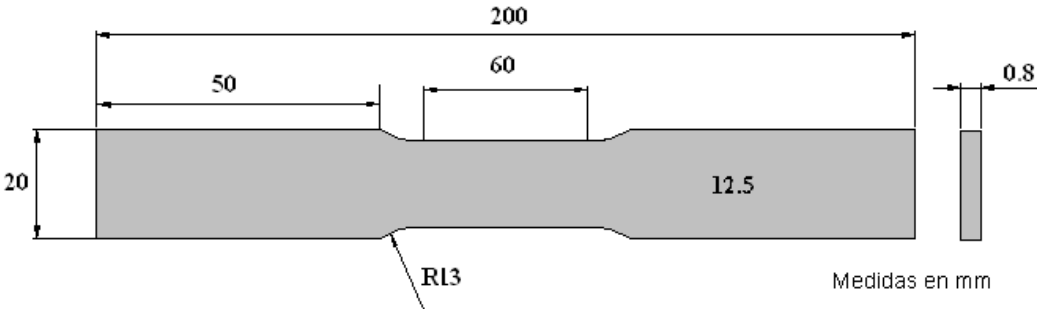


Figura 11.- Diseño de la probeta de tracción según la norma ASTM A370.

El Ensayo se realizo con el equipo INSTRON, modelo 1131 con una celda de carga de 2500Kg. El equipo posee una tarjeta de adquisición de datos marca NATIONAL INSTRUMENT Serie MSI 6221 y un ambiente de instrumentación virtual Lab View. La siguiente foto muestra el equipo con el que se realizaron los Ensayos de Tracción tanto para el material base como para las probetas soldadas.

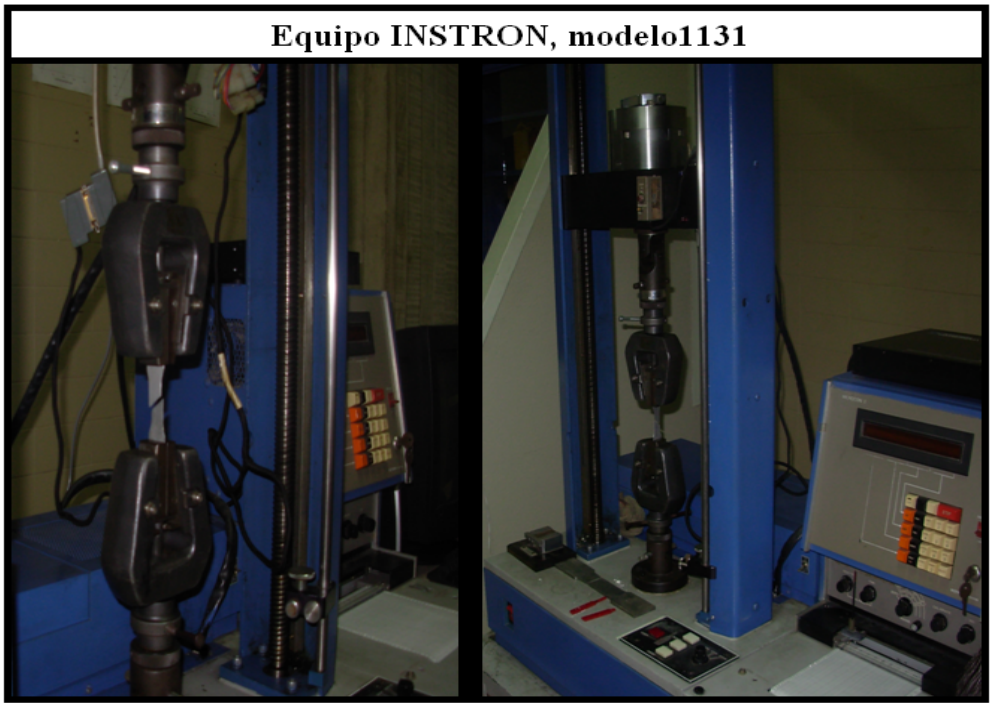


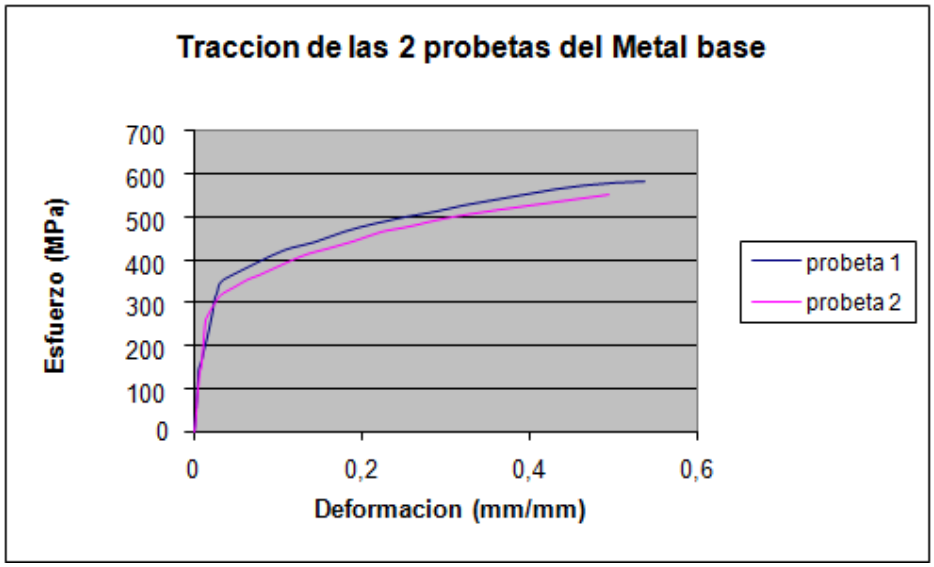
Foto 7.- Equipo INSTRON, modelo1131.

Este ensayo se realizo con el objeto de determinar el esfuerzo real de fluencia (σ_y), el esfuerzo real a carga máxima (σ_{max}) y el % de elongación del metal base a fin de comparar los resultados obtenidos con los valores establecidos en la norma ASTM A240. Para la realización de este ensayo en el equipo utilizado son necesarios ciertos datos característicos de las probetas tales como las áreas transversales de cada una de las probetas por lo cual se empleó un Vernier para determinar el espesor, ancho y largo de cada una. Los datos obtenidos de estas mediciones se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 10.- Medidas características de la zona de trabajo de cada probeta del metal base sometida al ensayo de tracción

Probeta	Espesor(mm)	Ancho(mm)	Largo (mm)	Área (mm^2)
Probeta 1	0,8	13,1	50	10,4
Probeta 2	0,8	12,5	50	10

El equipo muestra en la pantalla de la computadora una grafica de Carga Vs. Tiempo y mediante una serie de cálculos matemáticos se obtiene la grafica Esfuerzo Vs. Deformación. A continuación se muestran las graficas que resultaron de los ensayos de tracción de ambas probetas.



Grafica1.- Ensayo de Tracción al metal base probeta 1 y probeta 2.

En la tabla 11, se presentan los resultados de los ensayos realizados. Se observa que el valor promedio de carga máxima (σ_{max}) es de 561,5 MPa, el esfuerzo de fluencia (σ_{ys}) de 340 MPa, y un % de elongación de 42% en la zona calibrada.

Tabla 11.- Resultados del Ensayo de Tracción del metal base.

MATERIAL	σys (MPa)	σmax.(MPa)	%Elongación
Probeta 1	360	574	41
Probeta 2	320	549	43
Promedio	340	561,5	42
Desviación Estándar	28,28	17,67	1,41

Este ensayo se realizó en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UCV.

2.1.5.- Metalografía

Para la evaluación metalográfica del material base se seccionó por medio de una cortadora de disco refrigerada en sentido longitudinal al de laminación una muestra en forma de rectángulo. Las muestras fueron desbastadas con una secuencia de lija 120, 180, 320, 400, 500, 600, 800,1200. La secuencia de pulido fue: lona blanca con alúmina de 1μm, lona verde con alúmina de 0,3μm y lona roja con alúmina de 0,05μm. Las probetas ya pulidas fueron atacadas con una solución electrolítica de ácido oxálico[29] $C_2H_2O_4$ (10 g de ácido en 100 cc de agua) en condiciones de 23V durante 15 segundos, luego las micrografías fueron observadas y fotografiadas con un aumento de 100X empleando un microscopio óptico Olympus PMG3 en conjunto a una pantalla digital marca JVC modelo TK-C13800.

Foto 8.- Etapas del Ensayo de Metalografía.

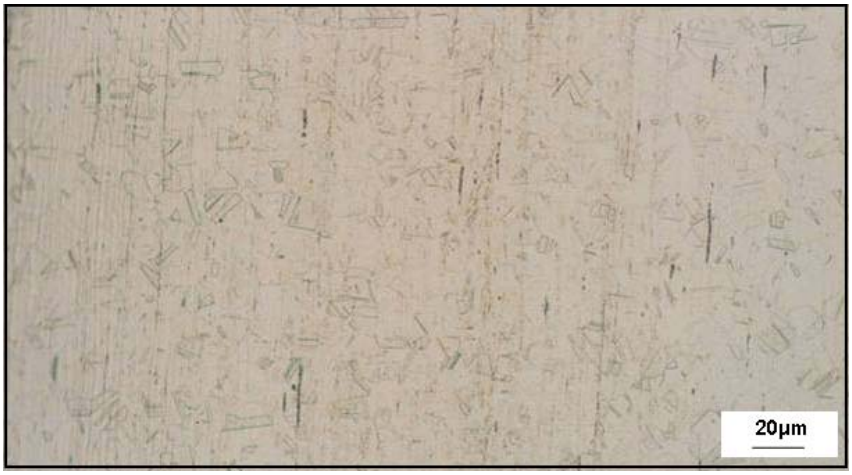


Foto 9.- Micrografía en sentido de laminación con un acercamiento de 100X

2.2.- Fabricación de los cupones de soldadura

2.2.1.- Preparación del material base y mesa de trabajo

Antes de depositar los cordones de soldadura, las superficies de las láminas de Acero Inoxidable fueron limpiadas cuidadosamente mediante cepillo de alambre y lija a fin de eliminar posibles residuos de grasa, aceite o cualquier otro tipo de contaminante presente en la superficie. Igualmente se dispuso de un ambiente de trabajo lo más cómodo posible para realizar las operaciones de soldadura. La mesa de trabajo también fue limpiada adecuadamente. Se fijo el dispositivo para el gas de respaldo a la mesa de trabajo y se sujetaron las láminas a ser soldadas con unos sargentos a dicho dispositivo con el fin de disminuir la deformación de las láminas debido al aporte de calor. A continuación se presenta una foto del dispositivo utilizado para el gas de respaldo.

Foto 10.- Dispositivo para gas de respaldo.

2.2.2.- Fuente de energía y Antorcha

Se trabajó con un fuente de energía marca ESAB, modelo 350 AC/DC HELLIWELDER PLUS, CONSTANT CURRENT – SQUARE WAVE POWER SOURCE FOR SMA & GTAW WELDING, la cual permite ajustar el tiempo de preflujo de gas, el tiempo de postflujo de gas, el tiempo de pendiente de subida y el tiempo de la pendiente de bajada. La siguiente foto muestra el equipo de soldadura con el que se trabajo.

Foto 11.- Equipo de soldadura ESAB, 350 AC/DC Heliwelder Plus.

2.2.3.- Determinación de los parámetros de soldadura

La selección de los parámetros de soldadura se realizó en base la información obtenida a partir de diferentes fuentes de referencia:

- Manual N°0-2005 de la marca Thermal Dynamics modelo PWH/M-2A
- Guía EWM Higtech Welding
- Handbook de la ASM
- Laboratorio Labsolda
- Foro Cesol de Internet

Establecen unos parámetros de soldadura en función del espesor y tipo de material

Se basaron en la experiencia que tienen y dan una opinión no certificada

Tabla 12.- Valores de los parámetros correspondientes a las fuentes de referencia:

Fuente Bibliográfica	Espesor (mm)	Corriente (A)	Velocidad de avance (cm/min)	Flujo de gas (l/min)	Voltaje (V)
Manual PWH/M-2A Welding Torch	0,8	20-25	30	3,8 a 7,1	25
Laboratorio Labsolda	0,8	40	35	7	25
Manual EWM Higtech Welding TIG	1	45	35	7	25
ASM Handbook	0,63	45	40	7,1	-
Foro CESOL Internet	1	50	40	-	-

A partir de la información presentada en la tabla anterior se seleccionaron seis conjuntos condiciones de parámetros manteniendo constantes unos y variando otros. Los parámetros constantes se muestran a continuación:

Tabla 13.- Parámetros que se mantienen constante

Voltaje	25 Voltios
Angulo de inclinación	15° Respecto la vertical
Longitud de arco	≈ 3mm
Tiempo de pre-flujo de gas	5s
Tiempo de Post-flujo de gas	5s
Flujo de gas de respaldo	10 l/min
Tipo de electrodo	EWTh-2
Espesor de la chapa	0,8mm
Polaridad	Directa

En la tabla siguiente se indican los valores de los parámetros que se variaron (corriente y velocidad de avance):

Tabla 14.- Parámetros que varían.

Cupones	Corriente (A)	Velocidad de soldadura (cm/min)
1	25	30
2	30	30
3	40	35
4	45	35
5	45	40
6	50	40

2.2.4.- Fabricación de los cupones de soldadura

Una vez establecidas las condiciones de unión para cada cupón se procedió a realizar la soldadura de los mismos (junta a tope de ranura cuadrada, posición plana). El diseño de los cupones se realizó bajo el siguiente esquema indicado en la figura 9 muestra de manera esquemática como fueron cortados los cupones de prueba.

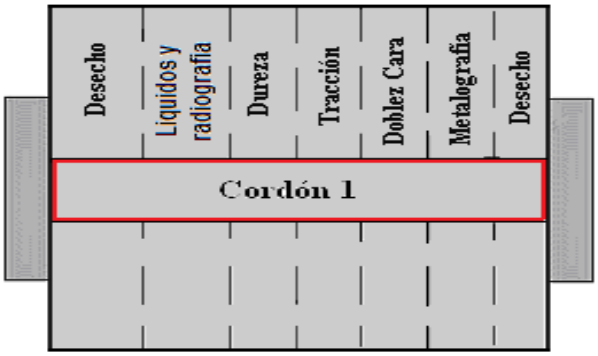


Figura 12.- Distribución de las probetas requeridas para los diferentes ensayos.

En la siguiente tabla se muestra el resultado de la inspección visual de los seis cupones.

Tabla 15.- Parámetros de soldadura para todas las condiciones evaluadas

Condiciones	Penetración	Ancho
1	Total	1,1
2	Se perforo	-
3	Incompleta	2,5
4	Total	3
5	Total	2,8
6	Se perforo	-

2.2.5.- <u>Selección de los cupones de soldadura</u>

Mediante inspección visual tomando en cuenta el aspecto del cordón, la penetración y el ancho se seleccionaron los tres que presentaron mejores características. Finalmente se seleccionaron los cupones soldados con las condiciones 1, 4 y 5, que se renombraron como 1, 2 y 3, respectivamente. En la tabla 16 se resumen los parámetros utilizados para fabricar dichos cupones.

Tabla 16.- Condiciones de soldadura seleccionada.

Cupón de soldadura	Voltaje (V)	Longitud de arco (mm)	Flujo de gas (L/min)	Corriente (A)	Velocidad de soldadura (cm/min)
1	25	3	7	25	30
4	25	3	7	45	35
5	25	3	7	45	40

Adicionalmente para los cupones definitivos (1, 4 y 5) se realizaron los cálculos necesarios a fin de determinar la energía neta aportada (ENA) y el área de la sección transversal del cordón (As).

<u>Energía Neta Aportada (ENA)</u>

Aporte Calórico o Energía Bruta Aportada (EBA)

$$(EBA) = (V*I*60)/ (\upsilon*1000) \ [KJ/mm] \qquad \text{Ecuación 3}$$

Donde: V [v]; I [A] y V [mm/min]

Para la condición 1 tenemos:

EBA = (25*25*60)/(30*1000) = 0,125 KJ/mm

Esta ecuación de acuerdo a los parámetros que involucra es una función directa del proceso de soldadura. Es decir, el valor de aporte calórico depende de la intensidad de corriente (A), el voltaje (V) y la velocidad de soldadura (mm/min). Para el cálculo de la Energía Neta Aportada (ENA), el área del cordón de soldadura y el calor latente de fusión se utilizaron las siguientes ecuaciones y coeficientes $\rho 1$, $\rho 2$

Donde:

$\rho 1$ es la eficiencia térmica del proceso (2) TIG => $\rho 1 = 0{,}65$

$\rho 2$ es el rendimiento térmico (depende del proceso y material) (2) => $\rho 2 = 0{,}3$

$$ENA = \rho 1 * EBA \quad [J/mm]$$

Ecuación 4

Para la condición 1 tenemos:

ENA 1= 0,65*0,125= 0,08125 J/mm

Área de la sección transversal del cordón (As)

$$As = \rho_2 . ENA/Q = \rho_2 \rho_1 . EBA/Q$$

Ecuación 5

Entonces:

$$Q = (T_f + 273)^2 / 300.000 \quad (J/mm^3)$$

Ecuación 6

Donde:

Tf = Temperatura de fusión del metal => Acero AISI/SAE 304 = 1450ºC

$Q = (1450 + 273)^2 / 300000 = 9{,}895 \ J/mm^3$

Para la condición 1 tenemos:

$$As = \rho_2 \rho_1 . EBA/Q$$

$As = (0{,}65 * 0{,}3 * 0{,}125)/9{,}895 = 2{,}46 mm^2$

La siguiente tabla muestra los resultados de la energía neta aportada (ENA) y el área de la sección transversal del cordón (As) de los 3 cupones de soldadura seleccionados.

Tabla 17.- Valores de la ENA y As de los 3 cupones de soldadura seleccionados.

Condición de Soldadura	ENA (J/mm)	As (mm^2)
1	81,25	2,32
2	111,42	3,19
3	125,35	3,58

2.3.- Realización de Ensayos no Destructivos a los cupones soldados

2.3.1.- Inspección Visual

La inspección visual se realizó antes, durante y después del proceso de soldadura para todas las condiciones utilizadas. La inspección previa permitió asegurar que el diseño de la junta fuese adecuado y que su superficie estuviese libre de irregularidades, así como de óxidos y grasa. Durante el proceso se verificó que la velocidad de avance fuese constante y que los demás parámetros estuviesen ajustados a lo establecido en la tabla 13. Finalmente, se inspeccionó la junta para determinar la posible presencia de discontinuidades superficiales tales como porosidades, grietas, falta de penetración y falta de fusión.

2.3.2.- Líquidos penetrantes

En el Ensayo de líquidos penetrantes se utilizaron 3 aerosoles: el limpiador, el penetrante y el revelador los tres marca Magnaflux. En la siguiente foto se muestra dichos aerosoles.

Foto 12.- Aerosoles para la realización del ensayo Líquidos penetrantes.

A continuación se presentan los pasos que se realizaron para la realización de este ensayo:

Etapa 1: Limpieza previa de la superficie

- Se limpió el cupón de prueba con un cepillo de alambre y un trapo humedecido con gasolina para remover la presencia de cualquier óxido o suciedad.

Etapa 2: Aplicación del penetrante

- Se aplicó el penetrante sobre el cordón manteniendo una distancia de aproximadamente 20 cm sobre la superficie y se dejó actuar por 10 minutos para permitir que penetrara en las posibles discontinuidades.

Etapa 3: Aplicación del Limpiador

- Se aplico el aerosol limpiador sobre un paño y se froto con este la superficie de la probeta eliminando el exceso de penetrante.

Etapa 4: Aplicación del Revelador

- Después se aplicó una película delgada y uniforme del revelador sobre la superficie manteniendo nuevamente una distancia de 30 cm (aproximadamente). Se dejó actuar por 10 min para posteriormente realizar la inspección.

Finalmente se inspeccionó visualmente el cupón para establecer la presencia de indicaciones. Este ensayo se realizo en el Laboratorio del Centro Venezolano de Soldadura. A continuación se muestra se muestran unas fotos indicando las etapas del proceso Tal y como es posible observar en la

imagen del Paso 3 no se evidenciaron indicaciones correspondientes a alguna discontinuidad.

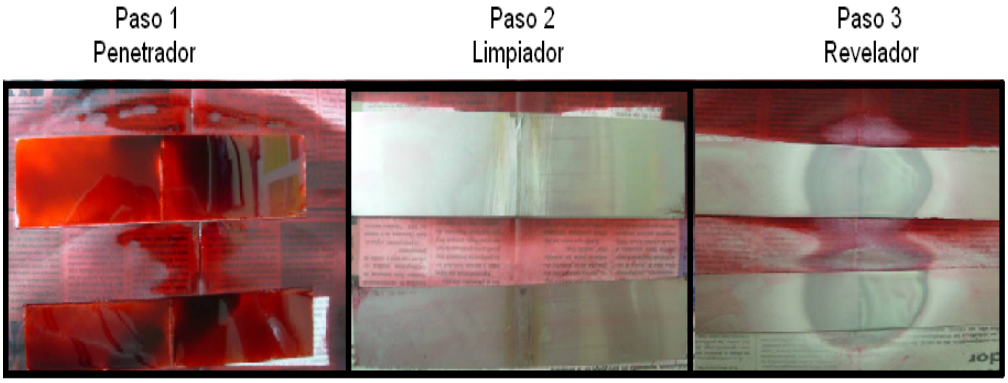


Foto 13.- Pasos para realizar el Ensayo de Líquidos penetrantes.

2.3.3.- Radiografía Industrial

Para la realización de la inspección por radiografía se midió el espesor del cordón de soldadura para determinar el tipo de película radiográfica a utilizar. Posteriormente se estableció el voltaje de trabajo (Kv), la intensidad de corriente (mA) y el tiempo de exposición (min) necesarios, para esto se utilizo el diagrama de exposición correspondiente a la película a utilizar (D4). Los valores establecidos se muestran a continuación:

Espesor:	0,8mm
Voltaje:	120KV
Intensidad de corriente:	2,5mA
Tiempo de exposición:	1min

La película se colocó dentro de una funda a lo largo del cordón de soldadura. Se realizó la exposición y posteriormente se procedió a revelar la película con un procedimiento similar a un revelado fotográfico común. Las películas fueron reveladas en un cuarto oscuro con luz roja para evitar que la película se velara una vez extraída de la funda. El proceso de revelado utilizado se describe a continuación:

1. Revelador: La película se sumergió en una bandeja con una solución de Agua-Revelador según la concentración descrita en el producto, así mismo el tiempo de exposición al mismo fue también el especificado por el fabricante.
2. Agua: Posteriormente la película se sumergió en una bandeja con agua, con la finalidad de limpiarla y frenar los efectos de la solución reveladora.
3. Fijador: En esta etapa se sumergió la película en una bandeja con una solución Agua-Fijador, según la concentración descrita en el producto. El tiempo de exposición fue el especificado por el fabricante.
4. Agua: Una vez culminada la etapa anterior, la película nuevamente se sumergió en una bandeja con agua para limpiarla y eliminarle el exceso de fijador.
5. Secado: La película se introdujo en un horno secador para eliminar cualquier resto de humedad.

Una vez finalizado el proceso de revelado la película se analizó en un negatoscopio. La radiografía no mostró indicaciones a lo largo del cordón de soldadura en los tres cupones de prueba. A continuación se muestran fotos de los equipos utilizados para este ensayo y una radiografía revelada para el cupón de soldadura 1.

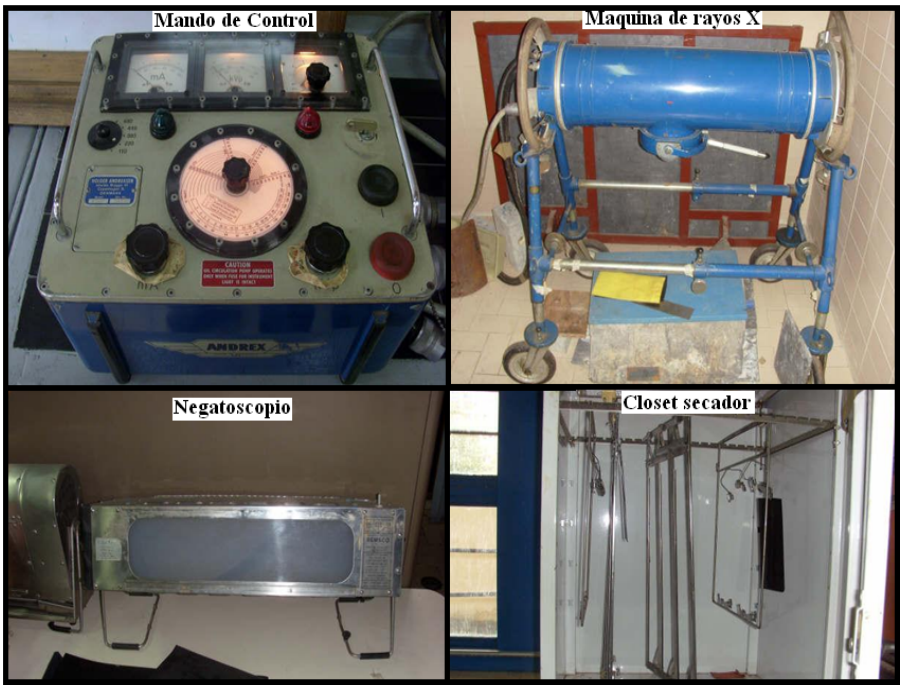


Foto 14.- Máquinas para elaborar la Radiografía Industrial.

Foto 15.- Radiografía del cupón 1 (A = 25, Vs = 30cm/min).

2.4.- Realización de los Ensayos Destructivos a los cupones soldados

2.4.1.- Análisis Químico

Para el análisis químico del cordón de soldadura se procedió de forma similar que en el análisis del metal base.

Tabla 18.- Análisis químico del cordón de soldadura por Fluorescencia.

# Medición / Elemento	1	2	3	4	5	Promedio
Ti	0,00	0,00	0,02	0,03	0,03	0,026
V	0,12	0,11	0,17	0,09	0,29	0,156
Cr	17,5	18,4	18	18,5	17,9	18,06
Mn	1,5	1,2	1,5	1	1,3	1,3
Fe	73,1	72,2	72,3	72,7	73	72,66
Co	0,84	0,47	0,4	0,46	0,00	0,434
Ni	9,11	8,5	8,24	7,71	7,47	8,206
Cu	0,4	0,34	0,35	0,41	0,4	0,38
W	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,014
Nb	0,00	0,00	0,00	0,005	0,005	0,005
Mo	0,472	0,480	0,470	0,462	0,471	0,471

Tabla 19.- Comparación del proceso de espectrofotometría y gasometría con la Fluorescencia en el cordón de soldadura.

Cordón de Soldadura	Composición Química (%en peso)							
	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%S	%P
Cupón 1	0,029	0,49	1,44	18,03	8,48	0,471	0,03	0,039
Cupón 4	0,056	0,63	1,92	18,76	8,65	0,421	0,01	0,023
Cupón 5	0.033	0,54	1,76	18,09	8,51	0,569	0,03	0,034
Promedio de los cupones	0,039	0,553	1,706	18,293	8,546	0,487	0,023	0,032
Norma ASTM A240	0,08	0,75	2	18-20	8-10,5	-	0,03	0,041

2.4.2.- Contenido de ferrita

Para determinar el contenido de ferrita en el cordón de soldadura se procedió de la misma manera que con el metal base y los resultados se muestran en la tabla siguiente

Calculo	Cordón de soldadura
Cr equi.	19,61
Ni equi.	10,56
%Ferrita	9

Tabla 20.- Resultados del Creq y Nieq en el cordón de soldadura.

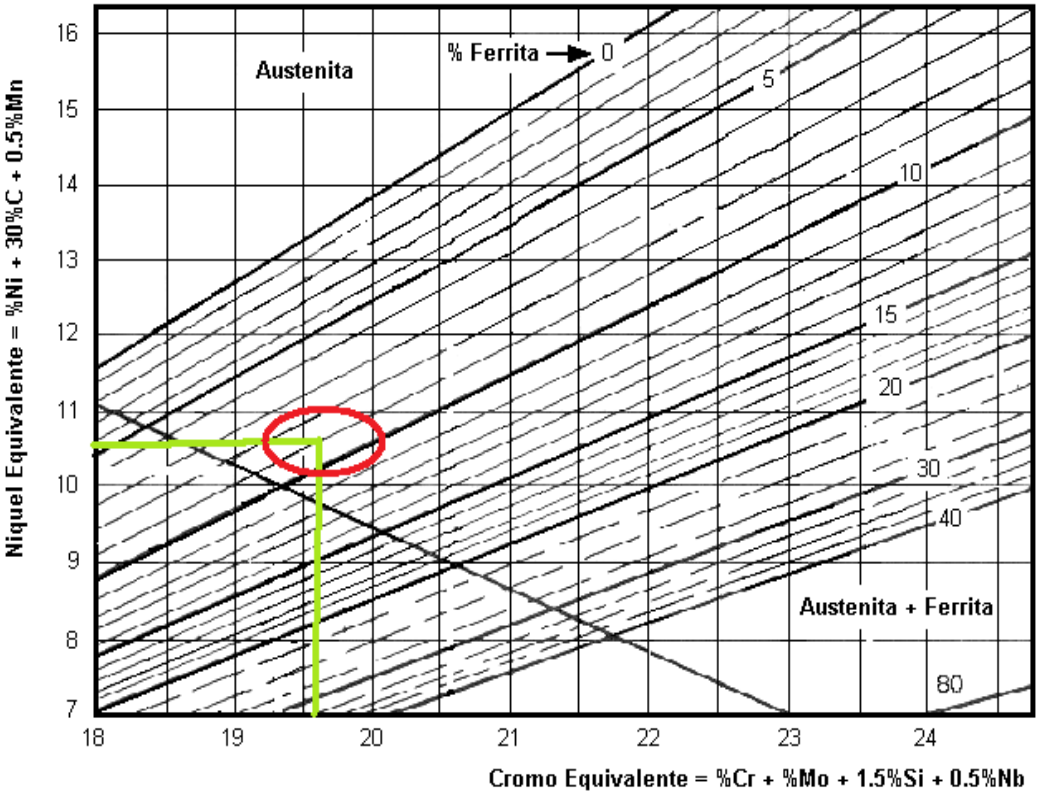
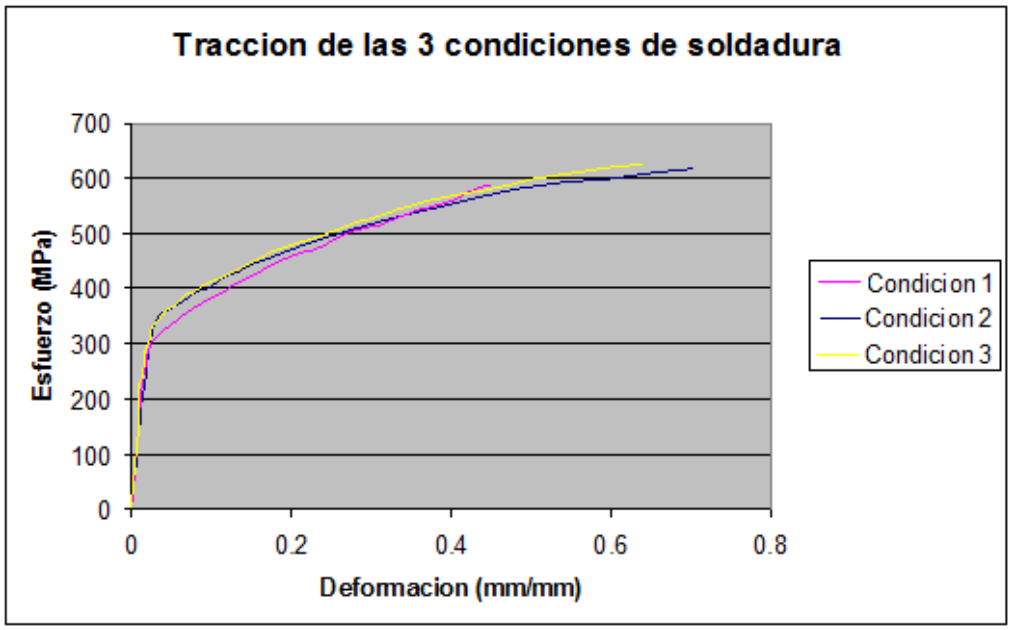


Figura 13.- Cálculo del contenido de ferrita en el cordón de soldadura según Shaeffler.

2.4.3.- Ensayo de Tracción

El Ensayo de Tracción para los 3 mejores cupones de soldadura se realizo de igual manera siguiendo las medidas establecidas en la Norma ASTM A 370 para la realización de la probeta, y los resultados de las 3 graficas se ven a continuación para cada probeta:



Grafica 2.- Resultado del Ensayo de Tracción de las 3 condiciones de soldadura.

Tabla 21.- Resultados del Ensayo de Tracción de la 3 condiciones de soldadura.

MATERIAL	σys (MPA)	σmax.(MPa)	% Elongación
Cupón 1	340	587	44
Cupón 4	380	616	47
Cupón 3	360	625	49

2.4.4.- Metalografía

Para este ensayo se corto el cordón de soldadura de las 3 condiciones seleccionadas en forma de rectángulos pequeños y el procedimiento fue exactamente igual al del metal base. Las evaluaciones metalográficas a escala macro se realizaron a fin de determinar los perfiles geométricos de los cordones de soldadura, penetración y presencia de discontinuidades como inclusiones. La siguiente foto muestra la macrografía de las 3 condiciones de soldadura evaluadas:

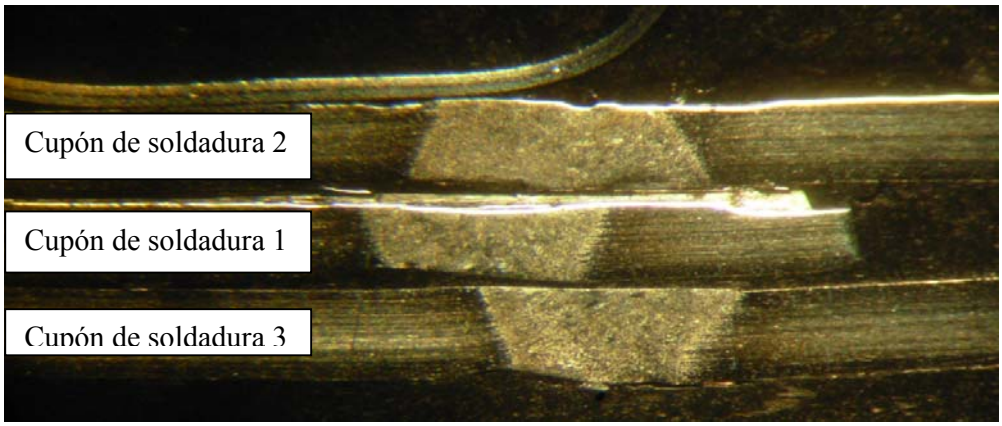


Foto 16.- Macrografía de los 3 mejores cupones en sentido de la laminación.

Inmediatamente de realizar la macrografía se realizo la micrografía en sentido de la laminación de las 3 láminas y se observo.

Probeta 1:

Foto 17.- Micrografía del cordón 1

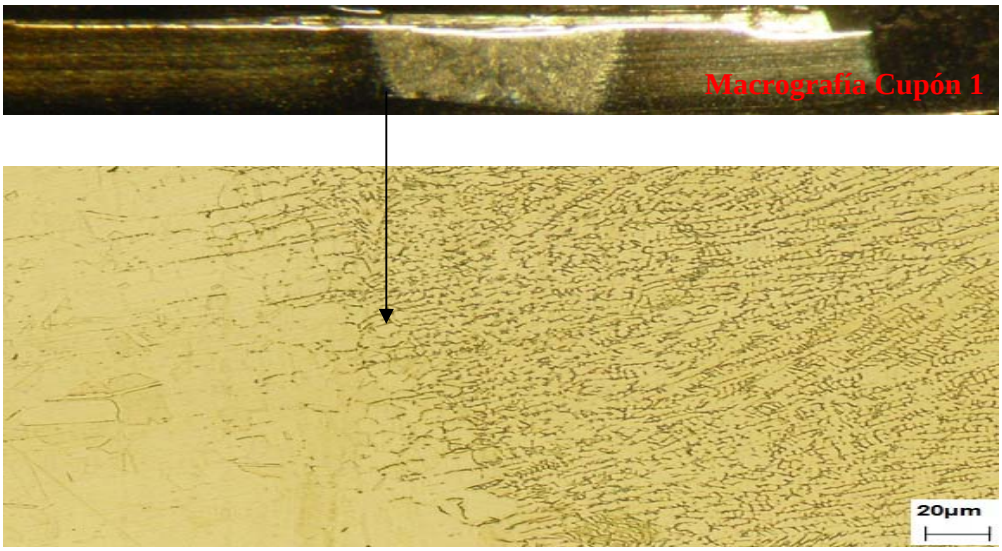


Foto 18.- Micrografía del cupón 1

Probeta 2:

Foto 19.- Micrografía del cordón 4

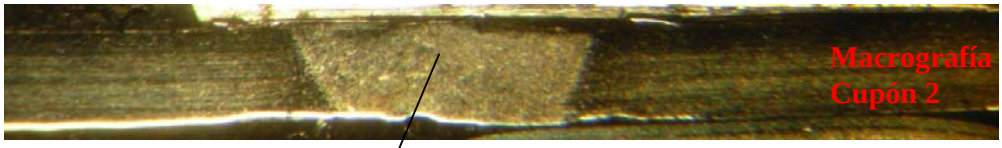
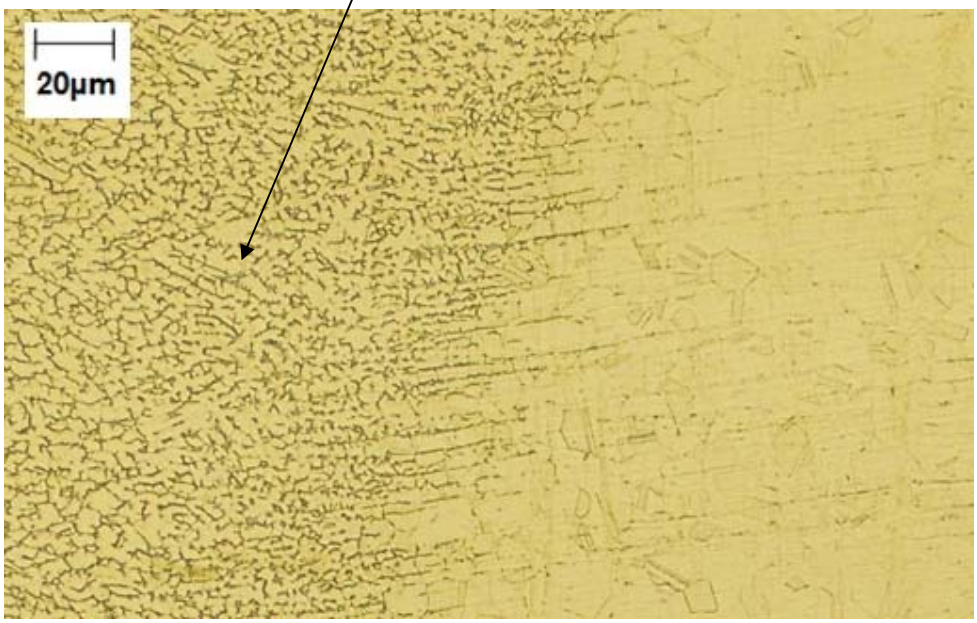
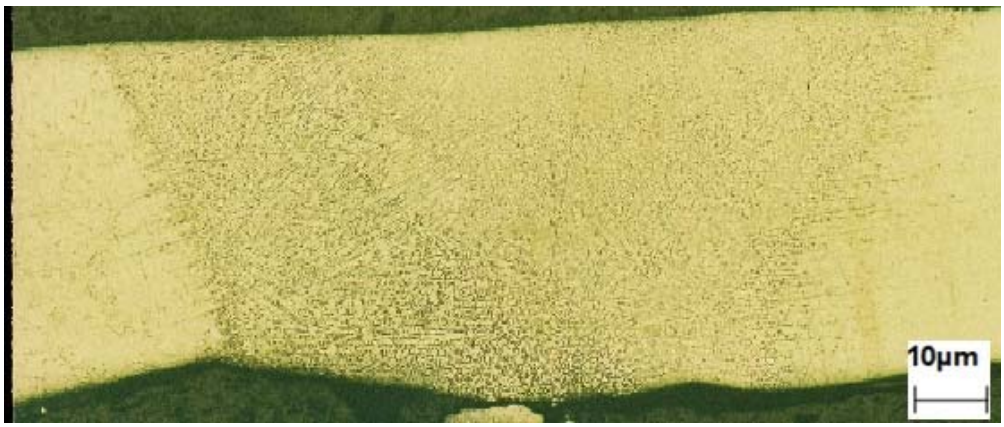


Foto 20.- Micrografía del cupón 4.



Probeta 3:

Foto 21.- Micrografía de cordón 5.



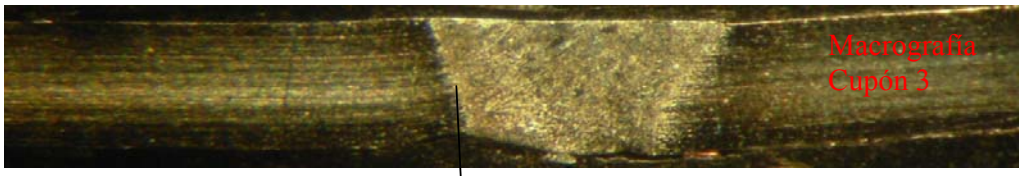


Foto 22.- Micrografía del cupón 5.

2.4.5.- Doblez

El ensayo se realizó según lo requerido en el Código de Soldadura Estructural de Láminas de Acero (ANSI/AWS D1.3), el cual establece las dimensiones de la junta para espesores menores de 4,8mm y especifica que para juntas soldadas desde un solo lado el doblez debe ser de 180º, haciendo coincidir el eje de doblez con el eje de la soldadura, y que la raíz de la soldadura debe estar en la cara del doblez. En la figura 11 se observa el esquema del ensayo y la foto 23 muestra las probetas dobladas.

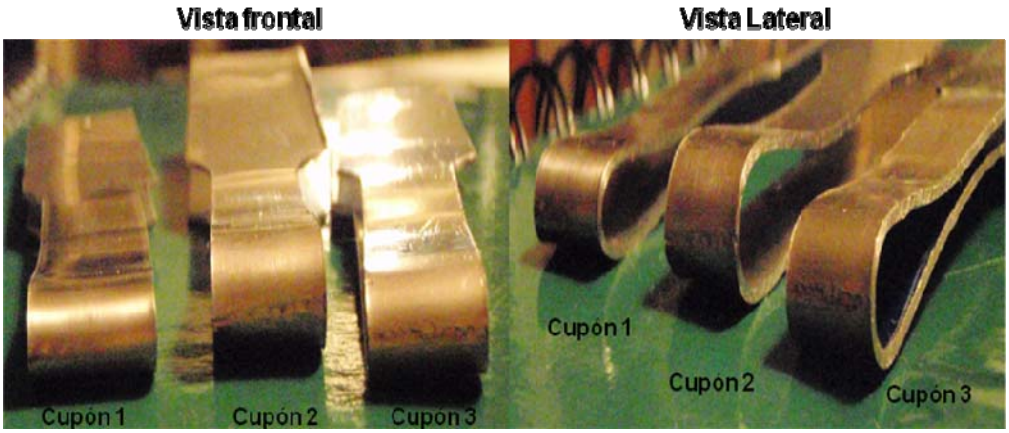


Foto 23.- Resultado del Ensayo de Doblez de cara.

2.4.6.- Dureza

Las mediciones de Dureza fueron realizadas en los tres cupones de soldadura seleccionados de igual manera que como se hizo para el metal base solo que en este caso se recortaron cuadrados de 2cm de lados. Cabe señalar que la (ZAC) o interfaz entre la ZF y el metal base es mínima pudiéndose decir que prácticamente no existe y es por ello que no se toma en cuenta en la medición de la dureza. Los resultados del ensayo de dureza son reportados en las tablas siguientes:

Tabla 22.- Evaluación de la dureza HV10 del cupón 1.

Medición	Metal base (MB)	Zona de Fusión (ZF)	Metal base (MB)
1	153	154	153
2	154	154	154
3	153	154	153
4	153	154	153
Desviación Estándar	0.5	0.0	0.5
Promedio	153,3	154	153,3

Tabla 23.- Evaluación de la dureza HV10 del cupón 4.

Medición	Metal base (MB)	Zona de Fusión (ZF)	Metal Base (MB)
1	151	155	153
2	152	154	154
3	154	153	154
4	154	155	153
Desviación Estándar	1,5	0,9	0,5
Promedio	152,7	154,2	153,5

Tabla 24.- Evaluación de la dureza HV10 del cupón 5.

Medición	Metal base (MB)	Zona de Fusión (ZF)	Metal base (MB)
1	154	158	154
2	155	159	154
3	154	157	153
4	154	157	154
Desviación Estándar	0,5	0,9	0,5
Promedio	154,2	157,75	153,7

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.- Caracterización del Material Base

La caracterización del material base se realizó en función de su composición química, contenido de ferrita, microestructura y propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y dureza), a objeto de verificar si cumplía con las especificaciones indicadas por las normas y reportadas por el fabricante.

3.1.1.- Caracterización Química del Material Base

En el análisis químico realizado se pudo observar que la composición se encontraba dentro de los valores nominales especificados para el acero inoxidable austenítico 304 según la norma ASTM A240, lo que garantizó que el trabajo realizado se desarrolló con el material especificado en el tema en cuanto a su composición. Los resultados del análisis químico se muestran en la tabla 6.

3.1.2.- Contenido de Ferrita en el Metal Base

El contenido de Ferrita en el material base se determinó por el Método Químico usando el diagrama de Schaeffler en el que se calculó el Cromo Equivalente (Creq) y Níquel Equivalente (Nieq) partiendo de la composición química obtenida de la lámina de acero inoxidable AISI/SAE 304 (ver Figura11). A pesar de ser un acero austenítico, se determinó que el mismo posee una cierta cantidad de ferrita lo cual es usual, tal y como lo reportó Lefebvre[31]. Lefebvre además estableció que el rango de ferrita idóneo para combatir el agrietamiento en caliente y mejorar las características mecánicas, además de disminuir la susceptibilidad a la corrosión frente a ácidos oxidantes a alta temperatura y la formación de la fase Sigma, es entre 5 y 15% de ferrita. En este trabajo se obtuvo un porcentaje de ferrita de 9,3%, lo que indica que el material se encuentra en el intervalo que se establece como óptimo y se desprende que la ocurrencia de los problemas descritos anteriormente es poco probable.

3.1.3.- Caracterización Metalográfica del Material Base

La importancia de conocer el estado inicial de la microestructura del material base mediante el análisis metalográfico radica en la necesidad de observar el cambio de tamaño y morfología de los granos que pueden producirse durante el proceso de soldadura con respecto a la condición inicial del mismo, ya que la deposición de cordones de soldadura someten al material base a diferentes condiciones de calentamiento y enfriamiento que producen variaciones microestructurales dentro del mismo en función del calor aportado. La caracterización metalográfica se realizó en sentido transversal al sentido de laminación (foto 9), y en ellas se identificaron y cuantificaron las fases presentes: austenita (matriz clara) y ferrita (fase oscura), ubicada esta última entre los límites de los granos austeníticos.

3.1.4.- Ensayo de Tracción

La caracterización mecánica del metal base se realizó según la norma ASTM A370, obteniéndose los valores del esfuerzo real de fluencia (σ_y), el esfuerzo real a carga máxima (σmáx.) y el porcentaje de elongación. Los resultados del ensayo de tracción fueron σ_y = 340MPa; σmáx. = 561,5MPa y porcentaje de elongación = 42. Estos resultados concuerdan con los valores dados por el fabricante y cumplen con lo establecido por la norma ASTM A 240, la cual establece un mínimo para σy de 205MPa, para σmáx. de 515MPa, y un porcentaje de elongación de 40.

3.1.5.- Ensayo de Dureza en el Metal Base

Se determinó la dureza del material base de acuerdo a la norma ASTM E18. El promedio de los valores reportados fue de 80 HRB con una desviación estándar de 0.0836. La conversión de este valor a la escala de Dureza Brinell dio como resultado 146 HB y el de dureza Vickers 184HV10,

observándose que éste ultimo valor se aproxima al valor dado por el fabricante (167 HV10). Por otra parte, este resultado cumple con lo reportado en la norma ASTM A240, ya que es menor a 212HV10 que es establecido como valor máximo.

3.2.- Proceso de Soldadura

3.2.1.- Determinación de los Parámetros del Proceso de Soldadura

Uno de los aspectos fundamentales del presente trabajo fue la determinación y el control de las variables en el proceso de soldadura (GTAW). Para aplicar este proceso de soldadura fue necesario establecer ciertos parámetros como constantes, véase tabla 13. El gas seleccionado y recomendado para este proceso de soldadura por ser inerte y de fácil ionización fue Argón estándar, el cual se uso para la protección del cordón y también como gas de respaldo. La investigación se inició tomando como referencia los parámetros de soldadura establecidos en distintas fuentes: manual número 0-2005 PWH/M-2A de Thermal Dynamics, Handbook ASM Volumen 6, manual de la empresa EWM Higtech Welding, personal del laboratorio de soldadura LABSOLDA, foros de soldadura (CESOL).

El criterio de selección de las referencias se realizó en función del proceso de soldadura, el tipo de material y su espesor. Posteriormente se determinaron el voltaje, flujo de gas protector, la corriente y la velocidad de avance, observándose que la principal diferencia en la información de las referencias se reflejaba en los valores de los dos últimos parámetros mencionados. Precisamente, tanto la corriente como la velocidad de avance son dos de los parámetros que ejercen mayor influencia sobre el proceso GTAW, por lo que se estableció un esquema de ensayos experimentales para tres valores diferentes de velocidad de soldadura e intensidad de corriente, tal como se indica a continuación:

- Velocidad de Soldadura: 30, 35 y 40 cm/min

- Intensidad de Corriente: 25, 40 y 50 A

3.2.2.- Fabricación y Selección de los cupones

Las soldaduras se realizaron con el proceso GTAW manual en cupones de prueba de láminas de acero inoxidable austenítico AISI/SAE 304 de 0,8 mm de espesor, con un diseño de junta a tope de ranura cuadrada sin apertura de raíz en posición plana (1G), aplicando un pase único sin material de aporte, con corriente continua y electrodo negativo (polaridad directa). Se elaboraron seis (6) cupones de prueba con los valores seleccionados de corriente y velocidad de soldadura a objeto de realizar los diferentes ensayos requeridos para la caracterización de las juntas. Una vez elaborados los cupones de ensayo, se determinaron mediante inspección visual las tres (3) mejores soldaduras en función del aspecto superficial, ancho del cordón y penetración. La selección final para la escogencia del mejor cupón se realizó posteriormente a la inspección visual, tomando como criterio la junta soldada que presentó alteraciones o cambios mínimos a nivel microestructural, específicamente en la ZF, con lo cual se garantizaría un balance de fases adecuado (austenita, ferrita) y cambios relevantes mínimos en las propiedades mecánicas de la junta. La velocidad de soldadura influye de forma significativa en la calidad de la soldadura ya que está directamente relacionada con la cantidad de calor suministrada a la pieza de trabajo por unidad de tiempo. Por otra parte, la intensidad de corriente seleccionada depende directamente del espesor de la pieza de trabajo. Si la corriente es insuficiente no es posible lograr un arco estable, se produce un depósito fundido reducido y por consiguiente una soldadura de calidad deficiente por la falta de penetración y un acabado superficial irregular.

A continuación se relacionan los resultados de la inspección visual de todos cupones soldados con la intensidad de corriente y velocidad de soldadura

utilizadas para su obtención a fin de mostrar el criterio de selección de los tres mejores cordones.

Cupón 1:

La velocidad de soldadura mínima utilizada (30 cm/min) junto con el menor valor de intensidad de corriente (25 A) produjo un cordón de soldadura de buen aspecto, adecuada penetración y ancho de cordón reducido.

Cupón 2:

La velocidad de 30 cm/min junto con una mayor intensidad de corriente 30A generó una excesiva penetración que incluso llego a cortar la pieza y un ancho de cordón excesivo.

Cupón 3:

La velocidad de 35 cm/min con una corriente de 40 A produjo un cordón con una deficiente penetración, un aspecto regular y un ancho de cordón mayor que el cordón 1 pero menor que el cordón 2.

Cupón 4:

La velocidad de 45 cm/min con una corriente de 35 A produjo un cordón con buen aspecto, una penetración adecuada y un ancho del cordón muy semejante al cupón 3.

Cupón 5:

La velocidad de 45 cm/min con una corriente de 40A produjo un cordón con buen aspecto, una penetración adecuada pero un ancho de cordón reducido.

Cupón 6:

La velocidad de 40 cm/min junto con la mayor intensidad de corriente utilizada (50A) generó un arco inestable produciéndose falta de penetración y un cordón muy ancho.

La tasa de flujo de gas protector tiene un efecto significativo en la formación y estabilidad del arco para la formación del charco metálico y la obtención de un cordón de soldadura de buena calidad. En líneas generales, un aumento en el flujo de gas resulta en un incremento de la velocidad de

emisión del arco desde la cámara constrictora, aumentando la presión sobre el charco metálico, con lo cual se logra desplazar mayor cantidad de metal fundido. Es decir, a medida que se aumentan los niveles de flujo de gas, aumenta la relación profundidad/ancho del cordón, consiguiéndose los niveles de penetración adecuados. Para nuestro estudio, se fijó un nivel de flujo de gas Argón estándar a 7 l/min, debido a que los diferentes autores concuerdan con este valor.

3.2.3.- Energía Neta Aportada y Área transversal del cordón de soldadura

La tabla 17 muestra los valores de la energía neta aportada (ENA) y de el área transversal del cordón de soldadura estas se calcularon a partir del parámetro corriente del proceso, voltaje del proceso y velocidad de soldadura, que se reportan en la tabla 16. Como era de esperarse el valor de calor neto aportado obtenido resulto ser bajo y cumple con lo recomendado para este tipo de proceso en las 3 condiciones de soldadura (Condición 1 = 81,25 J/mm, Condición 2 = 125,35J/mm, Condición 3 = 109,68J/mm). Con respecto al área transversal de los cordones de soldadura esta depende proporcionalmente de la energía neta aportada, por lo que es de esperarse que para el cupón de soldadura que obtenga un mayor valor de energía neta aportada obtendrá una mayor área transversal en el cordón de soldadura y por ende una mayor ZF, esto se corroboro siendo el cupón con menos área transversal y por lo tanto el menos afectado térmicamente el cupón 1con un area de 2,32mm², luego el chupón 3 con 3,14 y el 2 con 3,58 mm².

3.3.- Caracterización de la soldadura

3.3.1.- Ensayos no destructivos

Durante la inspección visual de las soldaduras, no se encontró evidencia de discontinuidades superficiales tales como poros, grietas, socavaduras y falta

de penetración. Esto indica fundamentalmente que se eligieron de manera correcta las variables del proceso.

Foto 24.- Imagen superficial de los 3 cordones de soldadura seleccionados.

Los ensayos de Líquidos Penetrantes y Radiografía Industrial, confirmaron el buen acabado superficial, así como la inexistencia de grietas o defectos superficiales e internos tanto en el metal base como a lo largo del cordón. De esta forma, ratifica la calidad adecuada de la soldadura

3.3.2.- Ensayos Destructivos en el Cordón de Soldadura

Los ensayos destructivos realizados a los cupones de prueba para su caracterización tales como. Análisis Químico, Metalografía, Dureza, y Tracción, permitieron determinar las propiedades mecánicas de la junta soldada con los parámetros determinados a los largo de la investigación.

3.3.2.1.- Análisis Químico del Cordón de Soldadura

En la tabla 6 y 20, se representan los valores reportados por los análisis químicos del metal base y del cordón de soldadura, comparando ambos tenemos que la composición porcentual de los elementos químicos es prácticamente igual. Este hecho era de esperarse ya que en este proceso de soldadura no hubo material de aporte que influyera en la composición

química final del cordón, además de que la protección del charco metálico se realizó mediante un gas inerte que no permitió que el mismo se contaminara y que no influyó en las reacciones químicas que allí se producen durante el proceso. Por ejemplo, el azufre, como elemento altamente perjudicial por su formación de fisuras en caliente, se encuentra en un nivel bajo (0,06%) en el metal base y (0,03 %) en el cordón, lo que se traduce, en escasas posibilidades de formación de fases de bajo punto de fusión en el cordón de soldadura.

3.3.2.2.- Evaluación Metalográfica

Las evaluaciones metalográficas a nivel macro se realizaron con el objeto de analizar en los 3 cupones de soldadura: los perfiles geométricos, penetración, zona afectada por el calor y posibles discontinuidades (inclusiones, poros y grietas). En la foto 16 se evidencia que el cordón 1 es el más angosto y aparte es comprobado por el resultado del área transversal calculada para esta condición.

Las evaluaciones a nivel micro se realizaron a objeto de analizar los cambios microestructurales (fases y zona afectada por el calor). En la foto 16 se presenta la evaluación macro y desde la 12 hasta la 22 las evaluaciones micrográficas obtenidas para las tres cupones de soldaduras. Las fotomicrografías se realizaron con el objeto de evaluar el efecto del aporte de calor del arco eléctrico; en ellas se observan las modificaciones de la microestructura típica del material base, Ferrita (fase oscura) y Austenita (fase clara) orientadas en la dirección de laminación. Estas modificaciones se debieron a una serie de procesos de transformación de fases que ocurren en el acero durante la soldadura tanto en la etapa de calentamiento como en la etapa del enfriamiento (recristalización de granos libres de deformación, crecimiento de grano y transformación de la ferrita primaria en austenita con diferentes morfologías). Por otra parte, pueden analizarse las variaciones del contenido de ferrita sobre la distribución, orientación, cantidad y la forma o

morfología de las fases (austenita y ferrita) presentes en el cordón de soldadura. Se pudo verificar, en todos los casos, que los cordones de soldadura presentan una ferrita con morfología "vermicular", esto concuerda con lo reportado por varios investigadores como Brooks [11], Kotecki [10] y Castner [21], para los aceros inoxidables austeníticos que han sido sometidos a un proceso de soldadura.

3.3.2.3.- Ensayo de Dureza

Las mediciones de Dureza fueron realizadas en cada una de las probetas soldadas y seleccionadas usando la norma ASTM E18. Los resultados del ensayo de Dureza Rockwell B son reportados en las tablas 17, 18 y 19 y en ellas se puede observar que el valor de dureza promedio, obtenida en el material base fue de (79,83) HRB en el cordón de soldadura fue de (80,02) HRB. Estos resultados indican que los mayores valores de dureza tienen lugar en la zona de fusión (ZF). Este hecho era de esperarse en virtud de los efectos metalúrgicos derivados del proceso de soldadura. También se atribuye este hecho al refinamiento del grano por la presencia del Silicio y a las pérdidas de elementos aleantes que se producen durante la soldadura por el aire circundante. Según lo indicado por Liu y Ravi, estos valores de dureza son normales para estos aceros soldados por el proceso GTAW. El efecto de los parámetros de soldadura para los tres cupones estudiados, no es significativo desde el punto de vista de la dureza, ya que los valores obtenidos son muy similares. Este hecho se le puede atribuir a la condición de no existir material de aporte en los cordones.

3.3.2.4.- Ensayo de Tracción

Los ensayos de Tracción se realizaron con el objeto de determinar el esfuerzo real de fluencia (σ_y), el esfuerzo real a carga máxima ($\sigma_{máx.}$) y el % de elongación. En las tabla 22, se presentan los resultados de los tres

ensayos realizados a los 3 cupones de soldadura caracterizados. El esfuerzo de fluencia en las juntas soldadas, muestra un valor mínimo de 340 MPa y un máximo de 380 MPa, lo cual representa una diferencia entre el 0% y 11% con respecto al valor obtenido para el material base que fue 340 MPa, siendo la condición más favorable la número 1 y la más desfavorable la número 2, la condición 3 representa una diferencia del 6 % con respecto al material base.

El esfuerzo real a carga máxima obtenido en las juntas soldadas, presentó un valor mínimo de 587 MPa para la condición 1 y un máximo de 625 MPa para la condición 3, lo que representa una diferencia entre el 5 y 11% con respecto al valor promedio obtenido para el material base el cual es de 561,5 MPa, siendo la condición más favorable la 1 y la menos favorable la 3, la condición 2 representa una diferencia 10% con respecto al metal base.

El % de elongación en las juntas soldadas arrojó un valor mínimo de 44% para la condición 1, un valor máximo de 49% para la condición 3 y para la condición 2 un valor de 47%. Para el material base se obtuvo un valor de 42%, lo que representa una diferencia del 5% con respecto a las condición 1, del 11% con respecto a la condición 2 y del 16% con respecto a la condición 3. La condición más favorable es la 1 y la menos favorable es la 3.Estos valores de %de elongación en las juntas soldadas son evidencia de que la estructura austenítica no se fragiliza y presenta un comportamiento dúctil con un porcentaje de elongación mayor al 40%.

Las propiedades mecánicas de las juntas soldadas, evaluadas mediante los Ensayos de Tracción, no se ven afectadas significativamente y sus valores son muy similares a los obtenidos en el metal base (MB); siendo la condición dos (1) la más favorable, debido a que en promedio su diferencia con respecto al material base oscila entre el 0 y 5%. La similitud de estas propiedades, puede ser producto de que las zonas de fusión (ZF) y las zonas

afectadas por el calor (ZAC) son prácticamente la misma con este proceso de soldadura, y por consiguiente la microestructura del acero no es afectada masivamente por las temperaturas alcanzadas durante las operaciones de soldeo. Cabe señalar además, que todas las propiedades reportadas en estos ensayos, son superiores en magnitud a los valores mínimos permisibles registrados para este tipo de acero según la ASTM A240 y también que los ensayos realizados al material base, lo que es un indicador de que la soldadura que se realizo es de buena calidad. Se puede apreciar que las condiciones que presentaron los mayores valores de esfuerzo máximo, son aquellas que fueron sometidas a los niveles de corriente y velocidad más altos (condición 2 y 3).

Si bien las propiedades mecánicas resultantes variaron entre si se debe tomar en cuenta que las mismas se mantuvieron dentro de los límites especificados por las normas. Sin embargo, el cupón 1 cumplió con el criterio final de selección el cual consideraba que la mejor soldadura sería aquella cuyas propiedades variaran lo menos posible con respecto al material base.

3.3.2.5.- Ensayo de Doblez

Los resultados del ensayo doblando la cara de la soldadura en los tres cupones a 180º se muestran en la foto 23 y en ella se evidencia que la superficie del cordón presento un comportamiento dúctil y no presenta ninguna discontinuidad superficial es decir se encuentran libres de grietas, con lo que se puede afirmar que los cupones soldados son de buena calidad

A continuación se muestra el registro de calificación de procedimiento correspondiente con el proceso llevado a cabo y en el mismo se describe que ensayos se realizaron y sus resultados:

CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA
METALURGIA - U.C.V.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA

REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO

RCP

RCP Nº:	**FECHA:**
EPS Nº:	**CÓDIGO REF:**

NOMBRE SOLDADOR: jose yazawa	**C.I.:15.663.620**	**IDENTIFICACIÓN:**	**HOJA:**

PROCESO

OFW ( ) GMAW ( ) SAW ( )
SMAW ( ) GTAW (X) Otro ( )
Procesos Especiales:

TIPO

(X) Manual ( ) Semiautomático ( ) Automático

DISEÑO DE JUNTA

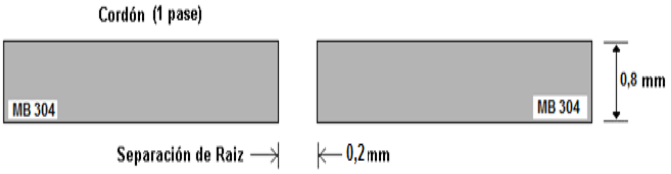
Tipo de Junta: a tope Ranura ( )
Filete ( )
Otra:

Respaldo: Si (X)
No ( )

Material del Respaldo: Gas Argon Estandar

Espesor de Recargue:

DETALLE : LA JUNTA SE REALIZO A TOPE SIN VISELADO



METAL BASE

Especificación, Grado o Tipo:
Nº P: 8 Nº Grupo: 1
Plancha (X) Espesor: 0,8mm

a Especificación, Grado o Tipo:
a Nº P: 8 Nº Grupo: 1
Tubería ( ) Espesor: Diámetro:

METAL DE APORTE

	Aporte (A)	Aporte (B)	Aporte (C)	Aporte (D)
Especificación Fabricante				
AWS (Clase)				
Nº F				
Nº A				
Diámetro				
Espesor Material Depositado				

No Aplica

POSICION Y ALINEACIÓN DE LA JUNTA

Posición: Plana 1G
Progresión:
Nº de puntos: 4
Distancia entre puntos: 5 cm

TÉCNICA

Cordón: Recto ( ) Ondulado ( )
Oscilación:
Electrodo: Múltiple ( ) Sencillo (X)
Pases por lado: Múltiples ( ) Sencillo (X)

PRECALENTAMIENTO

Temperatura mín. precalentamiento:
Temperatura máx. entre pases:
Tiempo de permanencia:
Otros:

No Aplica

POST-CALENTAMIENTO

Intervalo de temperatura:
Tiempo de permanencia:
Enfriamiento:
Otros:

No Aplica

GAS

	Tipo	Composición	Flujo (Lts/min)
Protección	Inerte	Argón	7
Arrastre			
Respaldo		Argón	10
Otros			

LIMPIEZA

Inicial:

Entre pases:

PARAMETROS ELÉCTRICOS

Pase	Proceso	MAT. DE APORTE	CORRIENTE (A)	Voltaje (V)	Velocidad de Avance	Velocidad de Alimentación

		Clase AWS	ϕ [mm]	Tipo	Polaridad	Ip	Ib	Tp	Tb	Im		(cm/min)	(m/min)
1	*GTAW*			*CCEN*	*Directa*					*25*	*25*	*30*	

Modo de Transferencia ():

OBSERVACIONES: No se realizo limpieza después de la soldadura por no circular metal de aporte a través del arco eléctrico.

CENTRO VENEZOLANO DE SOLDADURA
METALURGIA - U.C.V.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA

REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO

RCP

CP Nº: **FECHA:**
EPS Nº: **CÓDIGO REF:**

NOMBRE SOLDADOR: José Yazawa | **C.I.:** 15.663.620 | **IDENTIFICACIÓN:** | **HOJA: 2**

ENSAYO DE TRACCION

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm^2)	Resistencia a la tracción		Tipo y Ubicación de Fractura	Observaciones
				Ksi	MPa		
1	*1,29*	*0,8*	*1,032*	*85,13*	*587*	*No hubo fractura*	
2	*1,20*	*0,8*	*0,96*	*90,72*	*616*	*No hubo fractura*	
3	*1,22*	*0,8*	*0,976*	*90,65*	*625*	*No hubo fractura*	

ENSAYOS DE DOBLEZ

Tipo de Doblez	Resultado
Doblez de cara	*No presento grietas el cordón de soldadura*

RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO Al DEPOSITO

Elementos	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Mn	%Si	%S
Cordón	0,0298	18,032	8,481	0,471	1,442	0,497	0,030

OBSERVACIONES:

OTROS ENSAYOS

Tipo de ensayo: Dureza Rockwell
Observaciones: Los resultados obtenidos se ajustan a los valores estandarizados a la norma ASTM A 370
Otros:

SE CERTIFICA QUE TODO LO INDICADO EN ESTE REGISTRO, ES CORRECTO Y QUE LAS PROBETAS FUERON SOLDADAS Y ENSAYADAS DE ACUERDO CON LOS REGISTROS DEL CODIGO ANSI/AWS D9.1

Ing. Isis E. Plaza R. Inspectora Certificada American Welding Society C.W.I. A.W.S. N° 99071311	Ing. Vicente Ignoto Coordinador – C.V.S.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.- CONCLUSIONES

- Los parámetros obtenidos para realizar una soldadura a tope, del acero inoxidable austenítico AISI/SAE 304, en posición plana (1G), con espesor de 0,8 mm, empleando el proceso de soldadura GTAW manual con el equipo ESAB 350 Helliwelder Plus son: Intensidad de corriente: (I = 25 A), Velocidad de soldadura: (Vs = 30 cm/min), Flujo de gas protector: (Q = 7 l/min), Tipo de corriente y polaridad: DCEN y Voltaje: (V = 25 V).

- La ausencia de discontinuidades evidenciada a través de los resultados de los ensayos no destructivos END, tales como inspección visual y líquidos penetrantes, indican que la soldadura es de calidad.

- Los resultados obtenidos en los ensayos destructivos, tales como metalografía, dureza y tracción, fueron satisfactorios y cumplen con lo establecido en las normas, tales como ANSI/AWS D9.1, aplicables para la caracterización de la soldadura del acero AISI/SAE 304.

- El modo primario de solidificación del acero AISI/SAE 304 fue ferrítico con morfología vermicular, El valor de ferrita obtenido en el cordón de soldadura es de 9%.

- Los resultados de los Ensayos Destructivos (Tracción y Dureza) realizados a los cupones de soldadura fueron muy similares a los del material base, siendo el “cupón 3” el que obtuvo y presenta los mayores valores de Resistencia a la Tracción = 625 MPa y Dureza = 80,2 HRB).

- El Registro de Calificación de Procedimiento de Soldadura (RCP), efectuado según el Código (ANSI/AWS D9.1), para la calificación de soldadura de láminas metálicas a tope de acero inoxidable austenítico

304, empleando el proceso de soldadura GTAW de forma manual, indica que la junta cumple con todos los requerimientos, por lo tanto, los parámetros obtenidos califican la junta.

4.2.- RECOMENDACIONES

- Hacer un estudio de soldabilidad de láminas delgadas de acero inoxidable austenítico AISI/SAE 304, empleando los procesos de soldadura microplasma y láser.

- Realizar ensayos mecánicos adicionales tales como Fatiga y Charpy para evaluar el comportamiento de dicho acero en condiciones de cargas cíclicas y criogénicas.

- Desarrollar y calificar el procedimiento de soldadura para chapas de otros materiales de bajo espesor, empleando el proceso GTAW-P, con transferencia metálica pulsada.

- Calcular el costo y automatización del proceso

CAPÍTULO V
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

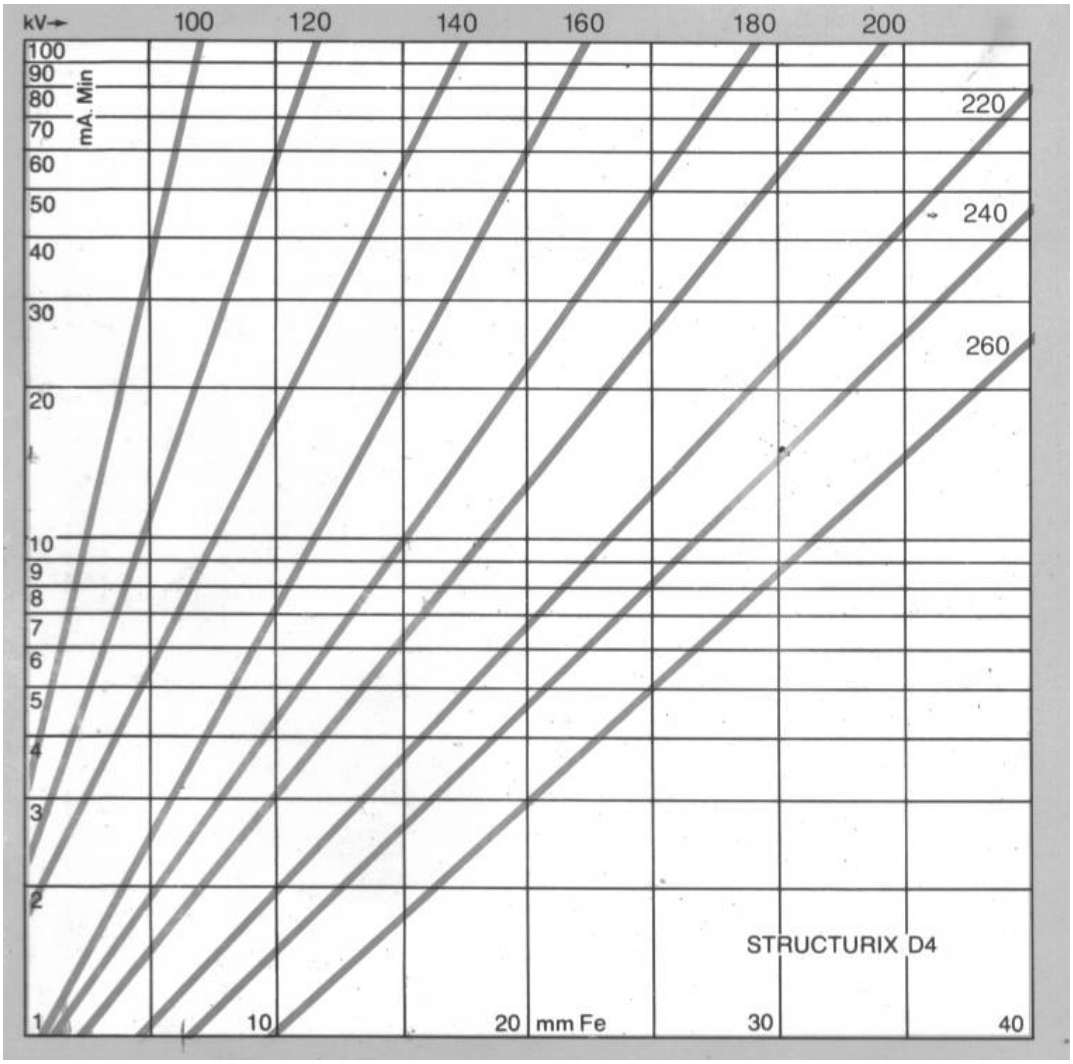
1. Apraiz, J. (1978) Tomo1 “Fabricación de Hierro, Aceros y fundiciones”
2. Ignoto, V. (2000) “Soldadura para Ingenieros” Venezuela, Caracas
3. Lancaster, J.F. (1993) Metallurgy of Welding. Chapman & Hall. (5ª Edición) UK London
4. Pickering, F.B. (1978) Physical Metallurgy and the Design of Steels. Applied Science, UK London pp. 165 – 171.
5. ASM Metals Handbook. (1995) Vol. 6 Welding and Brazing, 9ª Edición USA pp. 456 – 469.
6. Jamaes A. Pender. (1989) Soldadura. McGraw-Hill, 3ra Edición, pp. 175-190
7. Peckner and Berstein. (1977) “handbook of stainless steel” MacGraw-Hill, Book company, USA New York
8. Herbert Uhlig. (1970) Corrosion y Control de Corrosion. Urmo, Bilbao pp. 290-320
9. David, S.A. (1981) Welding Journal Vol.60 Iron-Nickel-chromium ternary diagram. pp. 63-71
10. Kotecki, D. J. (1978) Welding Journal Vol. 57, Welding parameter affects on open-arc stainless steel weld metal ferrite. pp. 109 – 117.
11. Brooks, J.A., y otros (1984) Welding Journal Vol. 63(3), Fundamental study of the beneficial effects of delta ferrite in reducing weld cracking., pp. 71 – 83.
12. Suutala, N. and Moisio T. (1980) 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. UK London
13. Lippold, J.C. and Savage, W.F. (1980) Welding Journal Vol. 61(12), Solidification of austenitic stainless steel weldments. pp. 388 – 396.

14. ASM Handbook Vol. 6 welding, Brazing and soldering. Gas tungsten arc welding, pp. 190-194.
15. Hicken G.K, Campbell R.D and Madigan R.B, Soldadura por arco de tungsteno y gas, pp. 74-88.
16. Quintero, Miguel. (2002) Estudio y Caracterización de un Acero Inoxidable Duplex SAF 2205 Soldado por Arco de Plasma a través de la Técnica Ojo de cerradura. Trabajo especial de grado, Universidad central de Venezuela, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Caracas.
17. Rabenstiener .G (1995) Periodical "technia", (Influencia del contenido de Cromo y Níquel en los aceros inoxidables austeniticos. pp.16-88.
18. Kotecki, D. J. and Siewert T. A. (1992) Welding Journal. Vol. 71(5). WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metal. A modification of the WRC-1988 diagram .pp. 171 – 178.
19. Fevbre, J. (1993) Vol. 31(6). Guidance on specifications of ferrite in stainless steel welds metals. Welding in the World. pp. 390 – 407.
20. Schaeffler A.L. (1949) Vol. 56(11). Constitution diagram for stainless steel weld metal. Metal Progress, pp. 680 – 681.
21. Gretoft B. y Karlsson L. (1990) Vol. 6, Laboratorio Metalográfico del Grupo ESAB fisuración en caliente durante la soldadura de los aceros Inoxidables Austeníticos. Soldaduras y tecnologías de unión, pp. 68-73.
22. Castner, H. R. (1993) Welding Journal Vol.4 What you should know about austenitic stainless steels. pp 53 – 59.
23. Reyna (1988) "Soldadura de los aceros" aplicaciones.2 edición .España, Madrid. pp. 343-373.
24. Benzorte, M; Capodicasa A. (1995) Calificación de procedimientos de Soldadura Tubo/Tubo Usados en Calderas. Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Caracas. pp. 75–77.
25. AWS Welding handbook Tecnología y procesos (1998) Vol.2, 8th edición USA, Miami, pp. 1-44.
26. American Society of mechanical engienieers (ASME) 2001 section IX,

USANew York, pp. 5, 152, 157.

27. American Society of mechanical engieneers (ASME) 2001 seccion IX, USANew York. pp 4, 6, 135, 136
28. ASTM A370 (1978) “Methods and definitions for mechanical testing of Steel products, pp. 339
29. Welding Handbook AWS. (1991). Vol. 2. Welding Process (8ªEdición.).
30. Machado. I G (2000) Conducción de calor en la soldadura: Fundamentos y Aplicaciones. Impresa libre Brazil, Porto Alegre
31. Ramírez, A (2002) Soldadura del acero Inoxidable Duplex SAF 2205 mediante el proceso de soldadura GTAW y caracterización de la junta.Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela deIngeniería Metalúrgica Caracas
32. Hurtado, A. (2004) Caracterización de juntas soldadas del acero inoxidableAISI/SAE 304 por GMAW-P .Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería Metalúrgica ,Caracas.

ANEXOS



Curvas de Exposición para Aceros, utilizada para determinar los parámetros radiográficos

Temperatura máxima de la junta en un punto situado a X mm desde el borde de la línea de fusión (Tm).

De acuerdo con Adams (30), en soldadura a tope en una pasada con penetración completa tenemos que:

$$\frac{1}{Tm - To} = \frac{4.13(d.c.e.Y)}{ENA} + \frac{1}{Tf - To}$$

Donde:

Tm	=	Temperatura máxima en ºC, ya sea dentro de la zona afectada térmicamente o en el metal de base, en un punto situado a la distancia Y (mm) desde el borde de la línea de fusión.
To	=	Temperatura inicial de la chapa, en ºC.
Tf	=	Temperatura de fusión del metal depositado, en ºC.
ENA	=	Energía Neta Aportada, en J/mm.
D	=	Densidad del metal de base, en g/mm^3.
C	=	Calor específico del metal de base, en J/gºC.
E	=	Espesor de la chapa, en mm.
Y	=	Distancia del punto a la línea de fusión, en mm.

A continuación se presenta la grafica de cómo varia teóricamente la temperatura Vs. Distancia en la soldadura de una lámina desde el punto o línea de fusión según Adams.

Grafica 3.- Esquema de medición de la temperatura a una distancia de la línea de Fusión de acuerdo a la ecuación de Adams

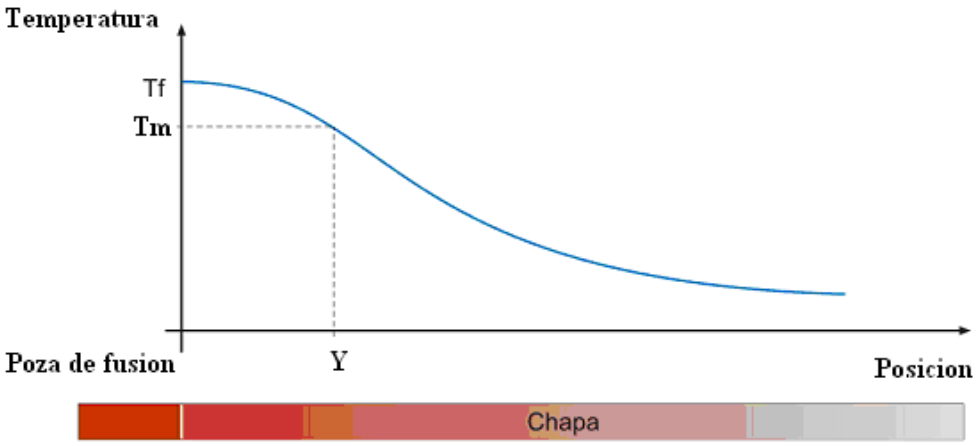
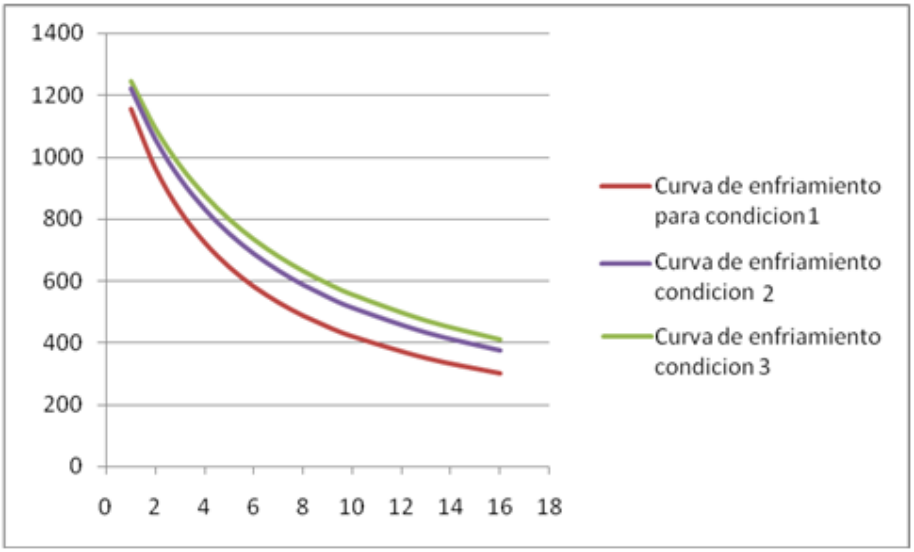


Tabla 24.- Valores de la temperatura a Xmm del punto de fusión.

Distancia desde el punto de fusión (mm)	Cupón 1 Temp. (°C)	Cupón 2 Temp. (°C)	Cupón 3 Temp. (°C)
1	1155,52	1222,54	1244,16
2	961,90	1057,70	1090,29
3	824,91	932,76	970,90
4	722,87	834,78	875,58
5	643,92	755,89	797,71
6	581,01	691,01	732,90
7	529,71	636,71	678,12
8	487,08	590,59	631,21
9	451,09	550,94	590,59
10	420,30	516,49	555,07
13	349,88	435,76	471,04
16	300,75	377,81	410,00

Grafica 4.- Curvas características del enfriamiento de las 3 condiciones de soldadura



Se puede constatar que las 3 condiciones de soldadura se comportan de igual manera la diferencia es que para una misma distancia del punto de fusión la temperatura cambia aumenta o disminuye dependiendo de la condición estudiada.

La condición 1 es la que presenta los menores rangos de temperatura, lo que era de esperarse porque es la que presenta mejor energía neta aportada.

La condición 2 presenta temperaturas entre la condición 1 y la 2, también se esperaba porque el valor de la energía neta aportada está entre los valores da la condición 1 y 3.

Por último la condición 3 presento los mayores rangos de temperatura y fue la condición para la cual se obtuvo el mayor valor de la energía neta aportada.