



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DPTO. DE MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNIONES
SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO 316L MEDIANTE
PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO MANUAL CON ELECTRODOS
REVESTIDOS (SMAW) A DIFERENTES INTENSIDADES**

GARRIDO LUIS
NAVARRO LEONARDO

VALENCIA, NOVIEMBRE 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNIONES
SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO 316L MEDIANTE
PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO MANUAL CON ELECTRODOS
REVESTIDOS (SMAW) A DIFERENTES INTENSIDADES**

Trabajo especial de Grado presentado Ante la ilustre
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
Para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Tutor:
Ing. Argel Porrello

Autores:
Garrido C. Luis Armando.
Navarro R. Leonardo A.

VALENCIA, NOVIEMBRE 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado asignado para estudiar el trabajo de grado titulado: **“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNIONES SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO 316L MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO MANUAL CON ELECTRODOS REVESTIDOS (SMAW) A DIFERENTES INTENSIDADES”**, realizado por los bachilleres: **Garrido Chavero Luis Armando, C.I.: 16.405.439** y **Navarro Rosal Leonardo A., C.I.- 14.297.535**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Ing. Argel Porrello

Tutor

Ing. Carmelo Torres
Jurado

Ing. Oswaldo Urbano
Jurado

VALENCIA, NOVIEMBRE 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNIONES
SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO 316L MEDIANTE
PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO MANUAL CON ELECTRODOS
REVESTIDOS (SMAW) A DIFERENTES INTENSIDADES**

Trabajo especial de Grado presentado Ante la ilustre
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
Para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Garrido C. Luis Armando.
Navarro R. Leonardo A.

VALENCIA, NOVIEMBRE 2009



DEDICATORIA

A Dios con humildad le dedico la finalización de este trabajo de grado que representa para mí el logro de mi más anhelado sueño: la culminación exitosa de mis estudios.

A mis Padres Mery Noel Navarro quienes son un verdadero ejemplo de superación, por todo el amor y cariño que me han ofrecido desde mi nacimiento, por permanecer juntos durante todos estos años de mi vida, por apoyarme incondicionalmente y por brindarme con sus sacrificios las facilidades para la culminación de mis estudios universitarios.

A estos dos autores del libro de mi vida les dedico éste y todos mis triunfos... Ustedes son y serán la razón de mi éxito... los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos Jessika Merely y Jorge Luis, a mis sobrinas Danhiely Mercedes y Andrea Valentina, a mi tía Juana Veliz, quienes con su presencia, ayuda y estímulo contribuyeron en gran medida al cumplimiento de mi gran meta.

A Víctor Manuel Peraza por permanecer pacientemente a mi lado durante el desarrollo de mi carrera universitaria como compañero, amigo y novio. por su confianza en mí que me permitió superar obstáculos, por alentarme en mis tristezas, celebrar mis alegrías y hacer más dulce esta hermosa travesía.

A mi compañera de tesis y grandiosa amiga Deiglin Henríquez, por su valiosa amistad durante todos estos años de estudios, por su gran empeño y esfuerzo que hizo posible la realización de este, nuestro gran proyecto.

Leonardo Navarro



DEDICATORIA

A la mujer que representa la guía en mi caminar, sus principios y valores me ha sabido enseñar para que creciera sin poderme descarrilar... Esa mujer es mi Sra. Madre Graciela de Garrido perfecta a mis ojos pues en mis penas y fracasos sus palabras y compañía transforman el horizonte sombrío de mi vida.

A mi padre José Garrido y mis hermanas Deissy Henríquez y Desiree Henríquez por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, influyentes para el éxito de esta meta.

A una persona muy especial que llegó a nuestras vidas para iluminar con su alegría a quienes habitan en mi hogar, ella es mi sobrina Kris Damaris Henríquez.

Por mi familia he logrado gran parte de mis metas propuestas, son ellos la fortaleza para seguir adelante, sé que en ellos puedo descansar. Gracias...

A una gran amiga y compañera Jannisbeth Vera por su dedicación en la elaboración de este proyecto. Un amigo fiel es aquel capaz de llorar y reír contigo, iluminan la vida de quienes los rodean y hacen reír al mundo con su presencia. Gracias Janni.

Luis Garrido



AGRADECIMIENTO

Queremos dar constancia de nuestra eterna gratitud a Dios, por ser el responsable de cada acción a lo largo de nuestra vida.

Agradecemos a la Escuela de Ingeniería Mecánica a través de la cual recibimos la adecuada formación por parte del invaluable aporte de los profesores de esta escuela, que nos permitió obtener el título de Ingeniero Mecánico.

Agradecemos especialmente a nuestro tutor profesor Argel Porrello por habernos orientado hacia la realización de este trabajo especial de grado, así como también a todos los profesores, quienes con sus gentiles comentarios y útiles sugerencias colaboraron para obtener satisfactorios resultados.

Damos gracias a la empresa TRIME C.A, en especial al Ingeniero Alcantara y al Sr. Moisés Hernández por su valiosa colaboración y esmero en el desarrollo de este trabajo.

Especial mención a la Ingeniera Melva Ramirez por tendernos su mano amiga cuando más la necesitamos, igualmente al paciente y desinteresado trabajo de la Sra. Cira empleada del la biblioteca rental de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Por último, no podemos agradecer lo suficiente a nuestras familias, por tener fe en este proyecto, por su amor, estímulo, paciencia y apoyo incondicional y a quienes nos han brindado su ayuda para la ejecución de tan exitoso trabajo.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
Trabajo Especial de Grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNIONES SOLDADAS
DE ACERO INOXIDABLE ASTENÍTICO 316L MEDIANTE PROCESO DE
SOLDADURA POR ARCO MANUAL CON ELECTRODOS REVESTIDOS (SMAW) A
DIFERENTES INTENSIDADES

Autores: Garrido Luis Armando.
Navarro Leonardo A.
Tutor: Ing. Porrello Argel.
Fecha: Noviembre 2009

RESUMEN

En la actualidad el proceso de soldadura de piezas de acero inoxidable es el más usado en las industrias petroleras, en la industria de los alimentos, en la fabricación de tanques a presión u otros equipos que ameriten uniones soldadas que vayan a estar en contacto permanente con fluidos químicos que no pueden ser contaminados. En el presente trabajo se ha realizado un estudio investigativo de tipo experimental para evaluar el comportamiento mecánico de uniones soldadas de acero inoxidable austenítico 316L mediante proceso de soldadura por arco manual con electrodos revestidos (SMAW) a diferentes intensidades y evaluar también la microestructura de las probetas unidas por soldeo. El material de aporte utilizado son electrodos de acero inoxidable austenítico 316L de rutilo. Durante el desarrollo de este trabajo se evaluaron 45 probetas. Para la evaluación de las propiedades mecánicas se llevó a cabo ensayos de tracción de acuerdo a la norma ASTM A-370, ensayos de dobles de acuerdo a la norma ASTM E-190 y microdureza Vickers. Para la evaluación de la metalurgia se realizó un estudio metalográfico de la unión soldada en: la zona de fusión, zona afectada por el calor y metal base no afectado. Para la soldadura se adoptó los lineamientos de la norma de soldadura que dicta la American Welding Society / Manual de Soldadura. Sección IX. Las soldaduras de metales son objeto de estudio de este trabajo, y nos enfocamos en la alteración del comportamiento mecánico de las piezas unidas por soldadura a diferentes intensidades. También se estudió los defectos en el cordón de soldadura o imperfecciones como lo son microcavidades y grietas y también la humedad que pueda estar presente en el proceso de soldadura. De este estudio se concluyó que efectivamente las variaciones de intensidades en el proceso de soldadura alteran el comportamiento mecánico de las probetas de manera positiva si se trabaja con intensidades altas, ya que presenta una mejora en las propiedades mecánicas y microestructurales de las piezas unidas por soldeo, debido a que la formación de precipitados de carburo es mayor y estructura dendrítica del cordón de soldadura queda bien definida y mejor distribuida sobre toda la superficie del cordón de soldadura, lo que mejora considerablemente las condiciones de resistencia y dureza del mismo.



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Ratio de corrosión en función del porcentaje de Cr.....	15
Figura 2.2. Temperaturas alcanzadas durante la soldadura.....	19
Figura 2.3. Precipitación de carburos en aceros inoxidable.....	20
Figura 2.4. Corrosión en aceros inoxidable debido a la sensibilización.....	21
Figura 2.5. Curvas de sensibilización a la corrosión intergranular para distintos contenidos en C.....	22
Figura 2.6. (A) Vista transversal de las zonas afectadas en el proceso de soldadura y (B) cambios en la microestructura en las distintas zonas de una junta soldada.....	28
Figura 2.7. Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW).....	33
Figura 2.8. Proceso de soldadura con arco protegido.....	33
Figura 2.9. Diagrama de la zona afectada por el calor (ZA) del acero.....	45
Figura 3.1. Esquema del procedimiento experimental.....	55
Figura 3.2. Lámina completa.....	56
Figura 3.3. Lámina cortada.....	56
Figura 3.4. Láminas preparadas para realizar las pruebas pilotos.....	57
Figura 3.5. Bisel aplicado a láminas para realizar pruebas pilotos.....	57
Figura 3.6. A: Electrodo utilizados durante el proceso de soldadura. B: Horno térmico para electrodos portátil.....	58
Figura 3.7. Láminas de acero inoxidable de 5 mm de espesor.....	59
Figura 3.8. A: Lámina cortada a 800 x 200 mm. B: Lámina cortada a 600 x 200 mm. C: Lámina cortada a 400 x 200 mm.....	60
Figura 3.9. A: Cizallamiento de láminas en TRIME C.A. B: Máquina cizalladora.....	60
Figura 3.10. Lámina soldada utilizada en el proceso.....	63



Figura 3.11. Corte de láminas para la realización de probetas, según la norma ASME sección IX QW- 462.1 (a).....	64
Figura 3.12. Probetas para ensayo de tracción y probetas para ensayo de dobléz.....	65
Figura 3.13. Dimensiones de la probeta de tracción según norma ASTM A-370. Todas las medidas de la probeta para tracción en mm.....	65
Figura 3.14. Máquina Universal Tinius Olsen.....	67
Figura 3.15. Dimensiones de la probeta de doblado según norma ASTM E-190. Todas las medidas de la probeta de dobléz en mm.....	67
Figura 3.16. Equipo utilizado para pulir las muestras metalográficas.....	69
Figura 3.17. Microscopio Óptico captador de imágenes.....	69
Figura 3.18. Representación de las impresiones realizadas por barrido.	70
Figura 3.19. Numeración de las impresiones realizadas sobre cada zona de las probetas.....	70
Figura 3.20. Representación de las impresiones realizadas sobre las probetas...	70
Figura 3.21. Máquina Buehler de ensayo de microdureza Vickers.....	71
Figura 4.1. Imágenes microscópicas del metal base. A: 200X y B: 400X.....	72
Figura 4.2. Imágenes microscópicas de las tres zonas características de la soldadura a 200X. A: Condición a 60 Amp, B: Condición a 68 Amp, C: Condición a 76 Amp.....	73
Figura 4.3. Imágenes microscópicas del Cordón de Soldadura a 400X. A: Condición a 60 Amp, B: Condición a 68 Amp, C: Condición a 76 Amp.....	74
Figura 4.4. Imágenes microscópicas de la Zona Afectada por ekl calor de la soldadura a 400X. A: Condición a 60 Amp, B: Condición a 68 Amp, C: Condición a 76 Amp.....	76
Figura 4.5. Impresiones realizadas sobre las probetas.....	84



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Denominación de los aceros de acuerdo a su composición química (norma AISI).....	23
Tabla 2.2. Denominación de los aceros de acuerdo a su resistencia mecánica..	24
Tabla 2.3. Soldadura por arco.....	30
Tabla 2.4. Soldadura de estado sólido.....	31
Tabla 2.5. Soldadura fuerte.....	31
Tabla 2.6. Soldadura blanda.....	31
Tabla 2.7. Otras soldaduras.....	32
Tabla 2.8. Denominación de los electrodos realizada por la AWS y la ASTM..	39
Tabla 2.9. Cifras indicativas de la posición de soldeo según la AWS/ASTM...	40
Tabla 2.10. Características especiales del electrodo según el valor adoptado entre 0 y 8.....	41
Tabla 3.1. Población y muestra en estudio.....	52
Tabla 3.2. Composición química nominal del material base utilizado.....	52
Tabla 3.3. Composición química de los metales de aporte.....	53
Tabla 3.4. Obtención del metal base y metal de aporte.....	56
Tabla 3.5. Ubicación de las maquinarias y equipos utilizados en el Trabajo Especial de Grado.....	59
Tabla 3.6. Características de las láminas iniciales utilizadas.....	59
Tabla 3.7. Características de la máquina de soldadura con electrodo manual...	61
Tabla 3.8. Intensidades de corriente utilizadas para soldar.....	62
Tabla 3.9. Resumen de ensayos programados para muestras de acero ASTM 316L soldado por el método SMAW.....	71



Tabla 4.1. Resumen de los resultados del ensayo de tracción.....	77
Tabla 4.2. Resultados del ensayo de dobléz.....	82
Tabla 4.3. Resultados del ensayo de Microdureza promedio para el Materia Base.....	83
Tabla 4.4. Resultados del ensayo de Microdureza promedio para la condición de 60 Amperios.....	84
Tabla 4.6. Resultados del ensayo de Microdureza promedio para la condición de 76 Amperios.....	84
Tabla 4.7. Resumen de resultados del ensayo de Microdureza Vickers.....	84



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Agradecimiento.....	iv
Resumen.....	v
Símbolos y abreviaturas.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA.....	3
1.1 Título del problema.....	3
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Formulación del problema.....	4
1.4 Objetivos de la Investigación.....	4
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
1.5 Justificación.....	5
1.6 Limitaciones.....	6
1.7 Delimitaciones.....	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	8
Antecedentes de la investigación.....	8
Fundamentos teóricos.....	11
2.1 Concepto de acero.....	11
2.1.1 Clasificación del acero.....	11
2.1.1.1 Aceros al Carbono.....	11
2.1.1.2 Aceros Aleados.....	12
2.1.1.3 Aceros de Baja Aleación Ultrarresistentes.....	12
2.1.1.4 Aceros Inoxidables.....	12
2.2 Características de los aceros inoxidables austeníticos.....	13
2.3 Metalurgia básica.....	13



2.3.1 Serie 300 AISI.....	14
2.3.2 Serie 200 AISI.....	15
2.4 Componentes de los aceros inoxidables austeníticos.....	15
2.5 Formación de precipitados y fases intermetálicas.....	18
2.6 Precipitación de carburos en bordes de granos.....	19
2.6 Denominación de los aceros.....	23
2.8 Soldadura.....	24
2.8.1 Concepto de soldadura.....	25
2.8.2 Importancia de la soldadura a nivel industrial.....	25
2.8.3 Algunas desventajas del proceso de soldadura.....	26
2.8.4 Algunas aplicaciones de la soldadura.....	26
2.8.5 La fusión de la soldadura.....	26
2.8.6 Características de una junta soldada por fusión.....	27
2.9 Clasificación de los procesos de soldadura.....	30
2.9.1 Soldadura de arco (AW).....	30
2.9.2 Soldadura de estado sólido (SSW).....	31
2.9.3 Soldadura fuerte (B).....	31
2.9.4 Soldadura blanda (S).....	31
2.9.5 Otras soldaduras.....	32
2.10 Soldadura por arco con electrodo revestido.....	32
2.11 Electrodos.....	35
2.11.1 El alma.....	36
2.11.2 Revestimiento.....	36
2.11.3 Absorción de humedad por los electrodos.....	37
2.11.4 Pre calentamiento.....	38
2.11.5 Denominación de los electrodos.....	39
2.11.6 Soldabilidad de los aceros.....	40
2.11.6.1 Concepto de soldabilidad.....	40



2.11.6.2	Calidad de la soldadura.....	42
2.11.6.3	Metalurgia de la soldadura.....	44
2.11.6.4	Absorción de gases por la soldadura.....	46
2.12	Ensayos mecánicos.....	47
2.12.1	Ensayo de tracción.....	47
2.12.2	Ensayo de dobléz.....	47
2.12.3	Ensayo de microdureza Vickers.....	48
2.13	Metalografía.....	49
2.13.1	Macroscopía.....	49
2.13.2	Microscopía óptica.....	49
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....		50
3.1	Nivel de la investigación.....	50
3.2	Diseño de la investigación.....	51
3.3	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	51
3.4	Población y muestra.....	51
3.5	Materiales, equipos y herramientas a utilizados.....	52
3.5.1	Materiales utilizados.....	52
3.5.1.1	Metal Base.....	52
3.5.1.2	Metal de Aporte.....	53
3.5.2	Equipos y herramientas.....	53
3.5.2.1	Equipos usados en la realización de las pruebas piloto de Soldadura.....	53
3.5.2.2	Equipos y herramientas utilizadas para realizar las probetas...	53
3.6	Procedimientos experimentales.....	54
3.7	Obtención del material Base y Material de aporte.....	56
3.8	Realización de pruebas pilotos para establecer parámetros de amperajes de trabajo.....	56
3.9	Máquinas y equipos a utilizados para la realización de las probetas....	58
3.9.1	Corte de láminas	59



3.9.2. Proceso de Soldadura SMAW.....	61
3.9.2.1 Condiciones de Trabajo Fijadas.....	61
3.9.2.2 Realización del Cordón de Soldadura.....	63
3.10 Corte de probetas.....	64
3.11 Mecanizado de probetas.....	64
3.12 Realización de ensayos.....	65
3.12.1 Ensayo de tracción.....	65
3.12.2 Ensayos de dobléz.....	67
3.12.3 Estudio metalográfico.....	68
3.12.4 Ensayos de microdureza Vickers.....	69
3.13 Resumen de ensayos programados.....	71
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS....	72
4.1 Resultados del ensayo de microscopía.....	72
4.1.1 Muestra del Material Base.....	72
4.1.2 Muestras soldadas a condición de trabajo de 60, 68 y 76 Amperios.....	73
4.2 Resultados del ensayo de tracción.....	77
4.2.1 Presentación grafica comparativa de los valores promedio del Esfuerzo de fluencia, Esfuerzo máximo y Esfuerzo de ruptura de los ensayos de tracción de probetas soldadas a diferentes intensidades.....	78
4.2.2 Análisis del punto de fluencia en piezas soldadas a diferentes intensidades en los ensayos de tracción.....	78
4.3 Resultados del ensayo de dobléz.....	81
4.4 Resultados del Ensayo de Microdureza Vickers.....	83
4.4.1 Muestra del Material Base (MB). Carga = 50gr.....	83
4.4.2 Muestras soldadas a condición de 60, 68 y 76 Amperios. Carga = 50gr.....	84
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
5.1 Conclusiones.....	87
5.2 Recomendaciones.....	88



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÉNDICES.....	91



INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia que tiene el estudio de la soldadura como proceso ampliamente utilizado por el hombre, esta investigación está dirigida a la evaluación del comportamiento mecánico de uniones soldadas de acero inoxidable austenítico 316L mediante proceso de soldadura por arco manual con electrodos revestidos (SMAW) a diferentes intensidades.

En la actualidad el proceso de soldadura por arco eléctrico de aceros inoxidables es uno de los más usados en las industrias petroleras, industria de fluidos químicos, en la industria de los alimentos, en la fabricación de tanques a presión u otros equipos que ameriten uniones soldadas. De allí su importancia y su efectiva aplicación industrial facilitando cada vez más el trabajo y aumentando la productividad y la calidad de los productos fabricados

La soldadura por arco eléctrico es el proceso de obtención de una unión indivisible, que se consigue por el calentamiento local de los bordes de las piezas que han de ser unidas y se funden en este caso por el calor del arco eléctrico producido entre el electrodo y el material base.

Para la evaluación de las propiedades mecánicas se realizarán ensayos destructivos como: tracción, doblaje y microdureza. El estudio metalográfico comprende inspecciones visuales a nivel microscópico, para poder analizar su microestructura en sus partes principales como: cordón de soldadura o zona fundida, zona afectada por el calor y el metal base.



El presente trabajo esta estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1: El Problema: en este capítulo se trata en sí, la formulación del problema, así como también los objetivos planteados, justificación, limitaciones y delimitaciones establecidas para el desarrollo de esta investigación.

Capítulo 2: Marco Teórico: en este capítulo principalmente se definen y desarrollan puntos claves para el entendimiento de esta investigación como son: definición de soldadura, acero, propiedades mecánicas, microdureza, etc.

Capítulo 3: Marco Metodológico: aquí se explica la metodología a seguir para cumplir con los objetivos planteados, es decir, como se cumplen con los mismos. Además de explicar de manera detallada los pasos a seguir para cada ensayo a realizar.

Capítulo 4: Análisis y Discusión de Resultados: este capítulo se conocen los resultados obtenidos luego de aplicar la metodología, mostrados a través de fotos, tablas, gráficos. Además de presenta un análisis de cada situación estudiada.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones: en este capítulo se concluye sobre los resultados obtenidos en el capítulo anterior y en el resto de la investigación, posteriormente se dan recomendaciones para mejorar y continuar el estudio.



CAPÍTULO I. EL PROBLEMA

1.1 Título del Problema.

“Evaluación del comportamiento mecánico de uniones soldadas de acero inoxidable austenítico 316L mediante proceso de soldadura por arco manual con electrodos revestidos (SMAW) a diferentes intensidades.”

1.2 Planteamiento del Problema.

Entre los estudios de Ingeniería Mecánica y Metalurgia más comunes en el mundo está la evaluación y aplicación de tecnologías para la producción de bienes y servicios; en muchas de estas labores se ve involucrado el proceso de soldadura por arco manual con electrodos revestidos (SMAW) en mayor o menor grado, aplicado a aceros inoxidables. Tanto los procesos de soldadura como los aceros inoxidables tienen un gran campo de aplicación tanto a nivel industrial como comercial ya que la rapidez, sencillez del proceso manual de soldadura y bajo costo que se genera aunado a la importancia y ventajas que ofrece trabajar con un acero inoxidable 316L austenítico en este mencionado proceso crean una cohesión ventajosa para fabricantes y clientes.

Pero no deja de preocupar la calidad final del producto ya que se conoce que en los procesos de soldadura manual actúan diversos elementos como lo son el amperaje y voltaje a utilizar, las características del electrodo, velocidad de recorrido del electrodo, separación entre el electrodo y el metal, espesor del material, que la alteran dicha calidad.



Entre los factores que ocasionan una mala calidad del producto final destacan una cantidad elevada de amperaje, lo que hace que el electrodo se funda demasiado rápido creando una mezcla de metales grande e irregular, además de que podría generar una ranura en el metal a lo largo de los bordes de la soldadura, también si la corriente es baja no se tendrá suficiente calor para fundir el metal por soldar y la mezcla será demasiado pequeña, a si como también se causa la formación de capas superpuestas donde el metal fundido del electrodo cae en el metal por soldar sin suficientemente fundir o penetrar el metal por soldar trayendo por ende una alteración de las propiedades mecánicas del material utilizado.

Todos estos factores que modifican el comportamiento mecánico del material de acero inoxidable 316L austenítico unido mediante soldadura por arco (SMAW) generan la necesidad de conocer con exactitud cuanto cambian las propiedades mecánicas a raíz de la intensidad de corriente utilizada para hacer la unión.

Proponemos para esta investigación indagar acerca de cómo se modifica la resistencia a la tracción y la micro dureza luego de soldar acero inoxidable AISI 316L austenítico a diferentes intensidades de corriente.

1.3 Formulación del Problema.

Evaluar el comportamiento mecánico de uniones soldadas de acero inoxidable austenítico 316L mediante proceso de soldadura por arco manual con electrodos revestidos (SMAW) a diferentes intensidades.

1.4 Objetivos de la Investigación.



1.4.1 Objetivo General.

“Evaluar el comportamiento mecánico de uniones soldadas de acero inoxidable Austenítico 316L mediante proceso de soldadura por arco manual con electrodos revestidos (SMAW) a diferentes intensidades”

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Determinar las propiedades mecánicas de uniones soldadas a intensidades de corriente de 60 Amp, 68 Amp y 76 Amp. mediante ensayos de tracción, doblado y microdureza vickers.
- Estudiar la microestructura de las zonas soldadas para cada condición de estudio.
- Establecer relación entre la microestructura estudiada y el comportamiento mecánico del material.

1.5 Justificación.

La siguiente investigación pretende desarrollar un método alternativo para obtener un mejor rendimiento de las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316L unido por soldadura de arco manual (SMAW), así como también, construir un criterio de comparación entre los materiales soldados a diferentes intensidades con la finalidad de facilitar la selección de los parámetros de soldadura mas adecuados para el proceso de unión con soldadura de arco eléctrico.



Esperamos que los resultados obtenidos en estos ensayos de soldadura por arco manual (SMAW) demuestren cambios significativos en el comportamiento mecánico del acero AISI 316L, con el objeto de que este trabajo investigativo sirva a futuros investigadores como una base documental hacia nuevas ideas para optimizar el proceso de unión de piezas, mediante proceso de soldadura por arco manual con aceros austeníticos.

1.6 Limitaciones.

- Poca disponibilidad de láminas de acero inoxidable austenítico AISI 316L para espesores mayores a $\frac{1}{4}$ de pulg.
- El soldador a realizar la soldadura debe ser calificado por la AWS
- Costos de adquisición del material.
- Limitado apoyo logístico de los equipos del laboratorio
- Costos del mecanizado del material.
- Disponibilidad de acceso al laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo para realizar los ensayos en la máquina de tracción uniaxial.

1.7 Delimitaciones.

- Todos los estudios se realizarán al acero inoxidable AISI 316L.
- El proceso de soldadura a utilizar será el de arco eléctrico con electrodo con revestido (SMAW).
- Las propiedades mecánicas de las láminas de acero inoxidable se evaluarán mediante el ensayo destructivo de tracción.



- El número mínimo de probetas a utilizar para el ensayo de tracción, doblado, microscopía y microdureza vickers serán de 48, de los cuales se distribuirán 21 para el ensayo destructivo de tracción y 21 para ensayo, de doblez, las cuales se distribuirán de la siguiente forma, 7 probetas soldadas a una Intensidad 60 Amp, 7 probetas soldadas a una Intensidad 68 Amp. y 7 probetas soldadas a una Intensidad 76 Amp. Por otra parte se realizaran 3 probetas para microscopía y 3 para microdureza vickers con los amperajes antes señalados.



CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Los antecedentes fueron trabajos anteriores a este trabajo especial de grado, los cuales contienen bases teóricas relacionadas con el objetivo del presente trabajo y ayudan a definir el contexto de la investigación.

Salas y Sucre (2006) estudiaron comparativamente las propiedades mecánicas de uniones de soldadura mediante los procesos SMAW y SAW en los aceros ASTM A-36 y ASTM A-516-70, profundizaron en la construcción de criterios de comparación de las propiedades mecánicas de aceros al carbono cuando son empleados como uniones soldables por el método SMAW y SAW, también en predijeron el futuro comportamiento en algunas aplicaciones industriales y así facilitar la selección de la soldadura a utilizar.

Para llevar a cabo el desarrollo de esta investigación se realizaron ensayos mecánicos de tracción, doblez y microdureza vickers a uniones de acero ASTM A-36 y uniones de acero ASTM A-516-70 soldadas por los dos métodos antes expuestos, en conjunto con análisis de microscopía óptica, obtuvieron una serie de resultados donde se fijó como mejor método de soldadura a la SMAW ya que presentó un mejor desempeño con respecto a la penetración del cordón en el material base.

Por otro lado, cuando fueron sometidas estas uniones a los ensayos destructivos concluyen que las uniones soldadas por el método SAW al aumentar las intensidades de trabajo la resistencia a la fluencia y la resistencia máxima



aumentaban a diferencia del otro método SMAW donde estas características disminuían, también notaron que las uniones soldadas por el método SMAW sometidas a doblez y tracción fallan en el material base no así las uniones soldadas por el método SAW que fallan en el cordón de soldadura.

Bello (2006) evaluó metalúrgicamente juntas de acero inoxidable 316L soldadas empleando proceso GMAW, la investigación se enfocó en estudiar las propiedades mecánicas de un material de acero inoxidable 316L al ser unido mediante el proceso de soldadura GMAW, para ello fue necesario haber evaluado las propiedades mecánicas del metal de aporte utilizando el proceso GMAW con el método de transferencia spray y corto circuito, posteriormente se evaluó la penetración en los procesos de transferencia en (spray y cortocircuito) del metal aporte en uniones soldadas a tope con el proceso antes mencionado, estudió así la microestructura de la zona fundida y afectada por el calor en la unión soldada para luego evaluar la dureza en la zona de una soldadura por el proceso GMAW. Según los resultados que obtuvo en estas pruebas se pudo denotar que a medida que aumenta la intensidad de corriente se incrementa el esfuerzo máximo, este hecho sucede similarmente con el esfuerzo de ruptura. El límite elástico tiene mayor comportamiento a amperajes de trabajo menores, es decir a 60 Amp el esfuerzo de límite elástico posee mejor comportamiento que a amperajes mayores de 80 a 100 Amp donde este se vuelve inestable. Se nota también que para ambos modos de transferencia, se observan una estructura dúplex formada con austenita y ferrita, esta última se presenta en menor cantidad. De igual forma se aprecia en esta zona una continuidad del cordón y el metal base, ya que a partir de los granos parcialmente fundidos crecen los granos del cordón.



Hernández y Vera (2007) realizaron una evaluación de las propiedades mecánicas y metalurgia en uniones soldadas de un acero al carbono 1010 sometidas a diferentes condiciones de hidrógeno inducido en donde se evidenció el efecto perjudicial de la presencia del hidrógeno en las uniones soldadas con el propósito de obtener productos metálicos económicos, confiables y seguros para los usuarios. Para el desarrollo de esta investigación se investigó las diferentes condiciones de hidrógeno inducido para la preparación de electrodos celulósicos, de rutilo y bajo hidrogeno y determinar las propiedades mecánicas y metalurgia en la uniones soldadas del acero 1010, utilizando los electrodos antes mencionados variando las condiciones de humedad forzada en función del tiempo. En los resultados obtenidos en esta investigación se observó que las uniones soldadas de acero al carbono 1010 presentan una disminución de las propiedades mecánicas a medida que aumenta el contenido de humedad en el revestimiento de los electrodos, esta humedad aumenta la cantidad de hidrogeno difusible en el cordón de soldadura, originando el defecto comúnmente observado que es la formación de porosidades.

También se comprobó que por medio del estudio metalográfico se pueden identificar tres zonas diferentes en la soldadura con los tres tipos de electrodo los cuales son: la zona de fusión afectada por el calor que se caracteriza por la formación de ferrita acicular o ferrita Widmanstaetten el cual es una estructura usual en el proceso de SMAW. Finalmente el metal base no afectado presentó una estructura homogénea de perlita y ferrita. La zona de fusión de las soldaduras realizadas con electrodos celulósicos, de rutilo y bajo hidrogeno existe una disminución de la microdureza superior al del metal base afecto y no afectado, debido a la elevada velocidad de enfriamiento que sufre en esas condiciones.



FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Concepto de acero.

El Acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono en alrededor de 0,05% hasta menos de un 2%, sin embargo la mayoría de los aceros contienen menos de un 0,5 % de carbono. El acero es hierro altamente refinado, su fabricación comienza con la reducción de hierro (producción de arrabio) el cual se convierte más tarde en acero. Algunas veces otros elementos de aleación específicos tales como el Cr o Ni se agregan con propósitos determinados.

2.1.1 Clasificación del acero.

Los diferentes tipos de acero se clasifican de acuerdo a los elementos de aleación que producen distintos efectos en el Acero :

2.1.1.1 Aceros al Carbono

Más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, somieres y horquillas.

2.1.1.2 Aceros Aleados

Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros de aleación se pueden subclasificar en:



Estructurales: Su contenido de aleación varía desde 0,25% a un 6%. Estos aceros se emplean para diversas partes de máquinas, tales como engranajes, ejes y palancas, construcción de chasis de automóviles, puentes, barcos y semejantes.

Para Herramientas: Se emplean en herramientas para cortar y modelar metales y no-metales. Por lo tanto, son materiales empleados para cortar y construir herramientas tales como taladros, escariadores, fresas, terrajas y machos de roscar.

Especiales: Son aquellos con un contenido de cromo generalmente superior al 12% y aceros inoxidable. Estos aceros de gran dureza y alta resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión, se emplean en turbinas de vapor, engranajes, ejes y rodamientos.

2.1.1.3 Aceros de Baja Aleación Ultrarresistentes.

Los aceros de baja aleación son los más recientes y menos costosos que los aceros aleados convencionales ya que contienen menos cantidad de elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios.

2.1.1.4 Aceros Inoxidables.

Los aceros inoxidable contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías, tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas, para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, para fijar o sustituir huesos rotos, se utilizan en cocinas y zonas de preparación de alimentos los utensilios son a menudo de acero



inoxidable, ya que no oscurece los alimentos y pueden limpiarse con facilidad y se emplean con fines decorativos.

2.2 Características de los aceros inoxidable austeníticos.

- A temperatura ambiente tienen una estructura básica de austenita.
- Son esencialmente no magnéticos. Pueden ser magnéticos después de que son tratados en frío. El grado de magnetismo que desarrollan después del trabajo en frío depende del tipo de aleación de que se trate.
- Tienen buena tenacidad, ductilidad, resistencia a la corrosión y soldabilidad.
- No endurecen por tratamiento térmico, ya que no es posible la transformación de Fe γ a Fe α , solo endurecen con trabajo en frío.
- Pueden endurecerse por conformado y tienen una gran estabilidad estructural.
- Elementos de aleación principales: C, Cr, Ni y Mo.
- Tipos más usuales: AISI 304, AISI 316, AISI 321 y AISI 347
- Excelente factor de higiene y limpieza.
- Formado sencillo y de fácil transformación.
- Tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas, bajas temperaturas (criogénicas) previniendo la fragilización, y altas temperaturas (hasta 925°C).

2.3 Metalurgia básica.

Como su nombre lo indica, tienen configuración metalográfica austenítica. Esta estructura cristalina es cúbica centrada en las caras (fcc). Esta familia de aceros



se obtiene adicionando elementos formadores de austenita, tales como níquel, manganeso y nitrógeno.

El contenido de cromo generalmente varía del 16 al 26% y su contenido de carbono se mantiene siempre muy bajo, en el rango de 0.03 a 0.08%. El cromo proporciona una resistencia a la oxidación y a la corrosión hasta temperaturas aproximadas de 650°C en una variedad de ambientes. El níquel, y en menor extensión el manganeso, se adiciona a estos aceros para estabilizar la fase austenítica en un amplio rango de temperaturas y evitar así su transformación en martensita cuando son enfriados rápidamente a temperatura ambiente. (Avner, 1964).

Los aceros austeníticos se dividen en dos categorías:

- Serie 300 AISI. Aleaciones cromo-níquel.
- Serie 200 AISI. Aleaciones cromo-manganesonitrógeno.

2.3.1 Serie 300 AISI.

Es la más extensa y son aleaciones Cr-Ni. El níquel es un elemento estabilizador o formador sustitucional de austenita, y se emplea con este propósito en un porcentaje de 4 a 37%. La serie 300 AISI mantiene alto contenido de níquel y hasta 2% de manganeso. También pueden contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que son utilizados para conferir ciertas características, como podría ser el prevenir en las estructuras soldadas la corrosión en la región cercana a la soldadura. En ciertos tipos se usa azufre o selenio para mejorar su habilidad de ser maquinados.



2.3.2 Serie 200 AISI.

Son aleaciones **Cr-Mn-N** y representan la más reciente adición a la familia austenítica. Contienen menor cantidad de níquel —hasta 7%— y mantienen la estructura austenítica con altos niveles de nitrógeno. El manganeso de 5 a 20% es necesario en estas aleaciones bajas en níquel para aumentar la solubilidad del nitrógeno en la configuración austenítica, además de prevenir la transformación a martensita. La adición de nitrógeno también incrementa la resistencia mecánica.

2.4 Componentes de los aceros inoxidable austeníticos.

Cromo: Es el elemento básico de aleación de los aceros inoxidable. A partir de un porcentaje del 10,5-13% le confiere a este tipo de aceros la propiedad de “inoxidables” (Figura 1). El Cr es un elemento alfégeno, promueve la estructura ferrítica.

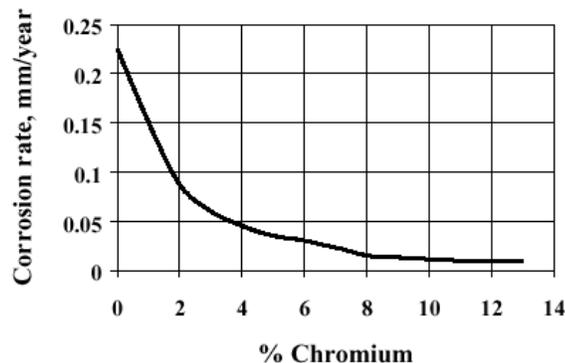


Figura 2.1. Ratio de corrosión en función del porcentaje de Cr. (Jiménez, 2007).

Níquel: En general aumenta la ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión en ambiente ácido. Sin embargo, la razón principal de su adición en los aceros inoxidable es que es un elemento gammágeno, es decir, que promueve la



estructura austenítica. En los inoxidables endurecibles por precipitación, forma compuestos intermetálicos que aumentan la resistencia mecánica.

Molibdeno: Incrementa la resistencia a la corrosión general y localizada, incrementa la resistencia mecánica y es fuertemente alfégeno. En los inoxidables no endurecibles forma fases secundarias, mientras que en los martensíticos aumenta la dureza a elevadas temperaturas por precipitación de carburos.

Cobre: Aumenta la resistencia a la corrosión en ambientes ácidos y es un elemento gammágeno. En los inoxidables endurecibles por precipitación forma fases intermetálicas que aumentan la resistencia mecánica.

Manganeso: Aumenta la ductilidad en caliente. Su carácter alfégeno/gammágeno varía con la temperatura. Es formador de ferrita a alta temperatura, especialmente en porcentajes altos, y a baja temperatura es un gran estabilizante de la austenita. Además incrementa la solubilidad del N, por lo que se usa para obtener inoxidables austeníticos con altos contenidos en N.

Silicio: Incrementa la resistencia a la corrosión, a altas y bajas temperaturas, en ambientes fuertemente oxidantes. Es un elemento alfégeno.

Carbono: En los inoxidables ferríticos disminuye la tenacidad y la resistencia a la corrosión. En los austeno-martensítico y martensíticos aumenta la resistencia mecánica y la dureza, disminuyendo la tenacidad. Es un elemento enérgicamente gammágeno.

Nitrógeno: De forma similar al C, en los inoxidables ferríticos disminuye la tenacidad y la resistencia a la corrosión. En los austeno-martensíticos y martensíticos aumenta la resistencia mecánica y la dureza, disminuyendo la tenacidad. En



combinación con el Mo aumenta la resistencia a la corrosión localizada. Es un elemento fuertemente gammágeno.

Titanio: Es un elemento fuertemente alfégeno. Tiene una gran tendencia a formar carburos, con lo que disminuye el C efectivo presente, facilitando la estructura ferrítica. En los austeníticos estabiliza y aumenta la resistencia a la corrosión intergranular y las propiedades mecánicas a altas temperaturas. En los ferríticos mejora la tenacidad y la resistencia a la corrosión. En los martensíticos disminuye la dureza de la martensita e incrementa la resistencia al temple. Y en los endurecibles por precipitación forma compuestos intermetálicos que aumentan la resistencia mecánica.

Niobio: Como el Ti, es un elemento fuertemente alfégeno y tiene gran tendencia a formar carburos. También se añade para prevenir la corrosión intergranular y aumentar la resistencia mecánica a elevadas temperaturas, y en los martensíticos disminuye la dureza y aumenta la resistencia al temple.

Aluminio: En una cantidad sustancial mejora la resistencia a la oxidación. En los endurecibles por precipitación forma compuestos intermetálicos que aumentan la resistencia.

Cobalto: En los inoxidables martensíticos aumenta la dureza y mejora la templabilidad, especialmente a elevadas temperaturas.

Vanadio: Es un elemento alfégeno, pero sólo suele emplearse en los inoxidables endurecibles. En los martensíticos, el carburo de Vanadio incrementa la resistencia al temple.



Azufre: En algunos aceros inoxidable se añade para mejorar la maquinabilidad en pequeños porcentajes, aunque disminuye la resistencia a la corrosión, la ductilidad, soldabilidad y conformabilidad.

Cerio: Es uno de los metales de la serie de las tierras raras, que se añade en pequeñas cantidades para mejorar la resistencia a la temperatura, ya que aumenta la resistencia a la oxidación y a la corrosión a alta temperatura.

Podemos ver que, además del Ni, existen una serie de elementos presentes en estas aleaciones que nos ocupan que tienden a mantener la estructura gamma o austenítica hasta temperatura ambiente, son los elementos que llamamos GAMAÓGENOS: Carbono, Nitrógeno, Manganeso, Cobalto, Cobre (y Níquel).

En cambio, al igual que el Cr, otro grupo de elementos tienden a facilitar la transformación hacia alfa o ferrítica, elementos que llamamos ALFAÓGENOS y en resumen son: Hierro, Silicio, Titanio, Niobio, Molibdeno, Manganeso (y Cromo).

Para una correcta soldadura es importante predeterminar el porcentaje de los elementos de aleación para conseguir la estructura deseada en el metal de soldadura. Existen numerosos trabajos para determinar esta relación, llegándose a la obtención de unos diagramas que relacionan los diferentes elementos de aleación con la formación de estructuras y fases. (Jiménez, 2007).

2.5 Formación de precipitados y fases intermetálicas.

Si un acero inoxidable, que ha sido desarrollado y obtenido por metalurgia artificial (ya que no existe como tal en la Naturaleza) hasta conseguir una estructura en cierto modo metaestable, es sometido durante un tiempo a altas temperaturas, puede sufrir dos tipos de modificaciones:



- Precipitación de compuestos intersticiales.
- Formación de fases intermetálicas.

Veamos en que consisten estos fenómenos que pueden considerarse como fenómenos de degradación de los aceros inoxidables.

2.6 Precipitación de carburos en bordes de granos.

Los elementos aleantes como el Cr, el Ti y el Nb, tienen una alta reactividad con el C y el N, componentes habituales del acero. Esta reactividad se incrementa con la temperatura y la posibilidad de una cierta motilidad atómica. De esta forma, la mayor precipitación de carburos y nitruros tiene lugar cuando se alcanzan temperaturas en el rango de 500-800 °C, temperaturas que están presentes en las operaciones de soldadura. (Jiménez, 2007).

Ya vimos como determinar la temperatura alcanzada a ambos lados del cordón, con lo que es posible conocer la zona expuesta a este rango de temperaturas (Figura 2).

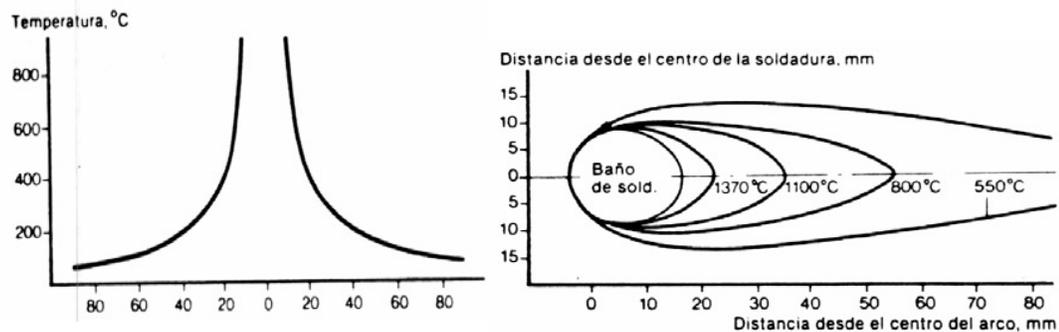


Figura 2.2. Temperaturas alcanzadas durante la soldadura. (Jiménez, 2007).

La formación de carburos precipitados en borde de grano (Figura 3), tiene dos consecuencias negativas:



- Por una parte se produce un empobrecimiento local de carbono, generándose unos cristales frágiles intergranulares, lo que significa facilidad de rotura o de caminos de rotura.
- Por otra parte se empobrece la zona en Cr, lo que significa que la capa de óxido de Cr característica de los inoxidable no podrá regenerarse, dando lugar a problemas de corrosión en la zona descromada.

Cuando se produce la formación de estos carburos de Cr (Cr_{23}C_6), decimos que el material está sensibilizado.

Las consecuencias generales de la sensibilización son (Figura 4):

- Disminución de la resistencia a la corrosión en general, por picaduras y por aireación diferencial.
- Aparición de corrosión intergranular.
- Disminución de la ductilidad.
- Disminución de la tenacidad y asociado incremento de la fragilidad.

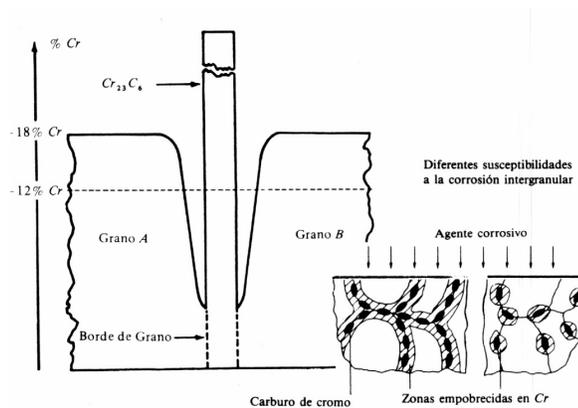


Figura 2.3. Precipitación de carburos en aceros inoxidable. (Jiménez, 2007).

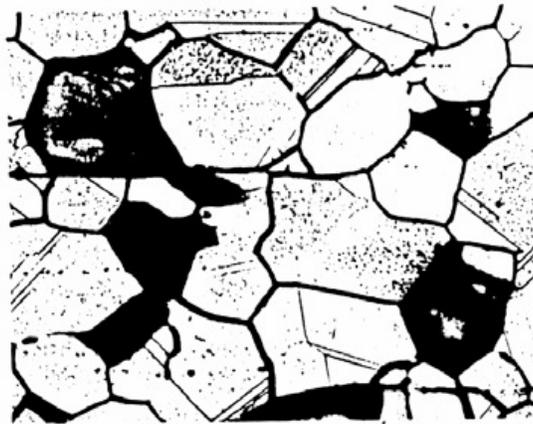


Figura 2.4. Corrosión en aceros inoxidable debido a la sensibilización. (Jiménez, 2007).

El tiempo en que el fenómeno de sensibilización puede presentarse depende, como hemos indicado de la temperatura de exposición y también del contenido en carbono, siendo más corto cuando mayor cantidad de carbono exista.

Hay tres métodos generales para evitar o corregir la sensibilización:

- **Tratamiento Térmico de Solubilización:** Consiste en calentar el acero ya sensibilizado hasta temperaturas por encima de 1000 °C. En este rango la austenita actúa como disolvente enérgico de los carburos precipitados, recomponiéndose la estructura. Al enfriar hay que pasar rápidamente por el rango de 800 a 500 °C para que no se repita de nuevo el fenómeno de sensibilización.

- **Seleccionar aceros con poco contenido en Carbono:** Cuanto menor sea el contenido en carbono del acero, menores serán las posibilidades de combinación de los elementos reactivos con el carbono. Los aceros inoxidables con contenidos en carbono superiores al 0,05% sufren en pocos minutos la sensibilización. En la Figura 2.5 puede observarse que, a medida que disminuye el contenido en C por debajo de



0,03% el tiempo de sensibilización y el rango de temperatura disminuyen considerablemente.

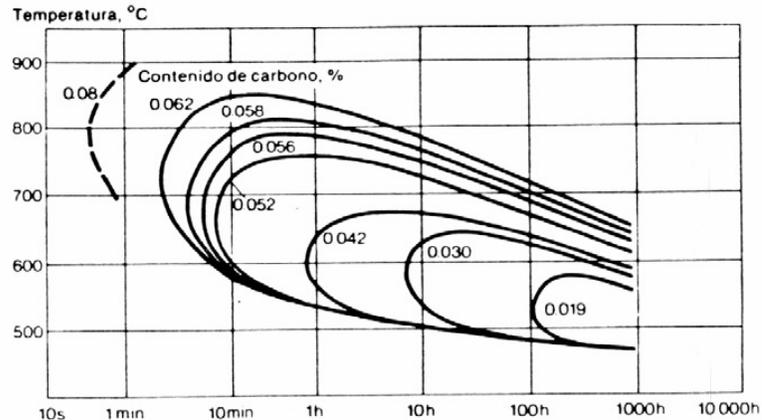


Figura 2.5. Curvas de sensibilización a la corrosión intergranular para distintos contenidos en C. (Jiménez, 2007).

Este tipo de aceros de muy bajo contenido en carbono se denominan con la letra L de Low Carbon o ELC de extra low carbon, los típicos son el AISI 304L (UNS S30403) y el AISI 316L (UNS S31603). Hay que decir que muy bajos contenidos en carbono dan lugar a una disminución de propiedades mecánicas.

- **Estabilizar los aceros inoxidables frente a la sensibilización:** Esta estabilización se consigue la aportación a la aleación de elementos con mayor afección por C que el propio Cr, elementos tales como el Ti y el Nb. Éstos son más reactivos que el Cr, y además generan unos carburos muy finos que quedan dentro de la estructura cristalina, no produciendo precipitados en borde de grano. Los aceros inoxidables estabilizados más comunes son el AISI 321 (UNS S32100) con un contenido de Ti 5 veces superior al contenido en C y el AISI 347 (UNS S34700) con un contenido en Niobio de 10 veces el contenido en Carbono.



Estos elementos reaccionan con el C y el N dando lugar a carburos, nitruros y carbonitruros de pequeño tamaño, aumentando al mismo tiempo la resistencia a la fluencia a alta temperatura o Creep.

No siempre esta solución es la óptima porque en algún medio ácido (como el ácido nítrico) los carburos de Titanio dan lugar a una corrosión muy localizada, en ZA, denominada en Hoja de Cuchillo, afectando también a la ductilidad y a la tenacidad de la unión soldada.

Debido a la volatilidad del Ti se suelen emplear como materiales de aporte para la soldadura de estos aceros inoxidable estabilizados electrodos de AISI 347, tanto para los aceros AISI 321 como para el AISI 347. (Jiménez, 2007).

2.7 Denominación de los aceros.

Existen dos formas de identificar los aceros:

- A través de su composición química, utilizando la norma AISI:

Tabla 2.1. Denominación de los aceros de acuerdo a su composición química (norma AISI).

Nº AISI	Descripción	Ejemplo
10XX	Son aceros sin aleación con 0,XX % de C	(1010; 1020; 1045)
41XX	Son aceros aleados con Mn, Si, Mo y Cr	(4140)
51XX	Son aceros aleados con Mn, Si y C	(5160)

- A través de su resistencia mecánica en tracción, en el caso de los aceros:



Tabla 2.2. Denominación de los aceros de acuerdo a su resistencia mecánica.

A	XX	-	XX	ES o H
Acero	Resistencia a la tracción		Resistencia a la fluencia	Otra característica

- El prefijo A significa Acero
- La primera cifra indica la resistencia a la tracción en kg/mm²
- La segunda cifra indica la resistencia a la fluencia en kg/mm².
- Por último se utiliza las letras ES si es una Estructura Soldable y se usa la letra H para indicar si es Hormigón.

2.8 Soldadura.

Etimológicamente, *soldar* significa consolidar; idealmente un proceso de soldadura sería aquel que originará una continuidad absoluta entre las partes unidas, de forma tal que fuera imperceptible la frontera entre ellas. Lo más simple sería aproximar en vacío dos superficies pulidas con precisión atómica, de forma que los electrones de ambas caras se intercambiaran generando nuevos enlaces. (Reed - Hill, 1971).

A escala macroscópica, la continuidad implica la ausencia de toda materia no metálica interpuesta entre los elementos unidos. Esto no implica la homogeneidad en la composición ya que, en ocasiones, el material de aporte es diferente del material base. Es a escala microscópica donde se aprecia mejor lo que define la continuidad,



ya que los átomos de las partes se agrupan, mediante la soldadura, en una estructura cristalina continua.

Todos los metales son soldable mientras se aplique los procedimientos y técnicas adecuadas, para ello se debe comprender las propiedades y estructura del metal y su soldabilidad; es decir la habilidad para dejarse soldar.

2.8.1 Concepto de soldadura.

Se puede definir la soldadura como la operación que permite unir partes en una sola pieza, asegurando la continuidad entre ellas mediante calentamiento y/o presión con o sin el empleo de un material de aportación que disponga de características físicas comparables con el procedimiento específico utilizado. La soldadura se considera realizada cuando se verifica la interpenetración granular entre partes, directamente o mediante el material de aportación.

2.8.2 Importancia de la soldadura a nivel industrial.

- La soldadura proporciona una unión permanente. Las partes soldadas se vuelven una sola unidad.
- La unión soldada puede ser más fuerte que los materiales originales si se usa un metal de relleno que tenga propiedades de resistencia superiores a la de los materiales originales y se emplean las técnicas de soldadura adecuadas.
- En general, la soldadura es la forma más económica de unir componentes, en términos de uso de materiales y costos de fabricación, los métodos mecánicos alternativos de ensamble requieren alteraciones más complejas de las formas (por ejemplo, taladrado de orificios) y adición de sujetadores (remaches o



tuercas). El ensamble mecánico resultante por lo general es más pesado que la soldadura correspondiente.

- La soldadura no se limita al ambiente de fábrica. Puede realizarse en el campo.

2.8.3 Algunas desventajas del proceso de soldadura.

- La mayoría de las operaciones de soldadura se realizan en forma manual y los costos de mano de obra son elevados ya que se consideran cuestiones especializadas y no son muchas las personas que las realizan.
- Casi todos los procesos de soldadura implican el uso de mucha energía, y por consiguiente son peligrosos.
- Dado que la soldadura obtiene una unión permanente entre los componentes, no permite un desensamble adecuado. Si se requiere un desensamble ocasional de producto (para reparación o mantenimiento), no debe usarse la soldadura como método de ensamble.
- La unión soldada puede padecer ciertos defectos de calidad que son difíciles de detectar. Los defectos pueden reducir la resistencia de la unión.

2.8.4 Algunas aplicaciones de la soldadura.

- La construcción por ejemplo. Edificios, puentes, estructuras metálicas, etc.
- La producción de tuberías con costura, recipientes para presión, calderas, tanques de almacenamiento, etc.
- La construcción naval.
- La industria de la aeronáutica y espacial.
- Los automóviles y los ferrocarriles.



2.8.5 La fusión de la soldadura.

Aunque hay varios mecanismos para fundir la soldadura, la fusión es por mucho el medio más común. Para conseguir la fusión, se aplica una fuente de energía calorífica de alta densidad a las superficies que se van a empalmar y las temperaturas resultantes son suficientes para producir la fusión localizada de los metales base. Si se agrega un metal de aporte, la densidad calorífica debe ser suficientemente alta para fundirlo también. La densidad calorífica se define como la energía transferida al trabajo por unidad de área de superficie, esto es, W/mm^2 . El tiempo para fundir el metal es inversamente proporcional a la densidad de la potencia. A bajas densidades de potencia, se requiere una gran cantidad de tiempo para producir la fusión. Si la densidad de energía es demasiado baja, el calor se conduce a las partes de trabajo tan rápidamente como se transmite a la superficie y nunca ocurre la fusión. Se ha encontrado que la mínima densidad de energía requerida para fundir la mayoría de los metales en la soldadura es de aproximadamente $10 W/mm^2$. Conforme aumenta la densidad calorífica, se reduce el tiempo de fusión. Si la densidad de energía es demasiado alta, un poco arriba de $105 W/mm^2$, las temperaturas localizadas vaporizan el metal en la región afectada. Por tanto, hay un rango de valores prácticos para la densidad de energía, dentro del cual puede ejecutarse la soldadura.

Las diferencias entre los procesos de soldadura en este rango son:

- 1) La velocidad a la que se ejecuta la soldadura.
- 2) El tamaño de la región que puede soldarse.

2.8.6 Características de una junta soldada por fusión.

La mayoría de la uniones de soldadura consideradas anteriormente son fusiones soldadas como se ilustra en la sección transversal de la figura 2.1, una junta



soldada por fusión común a la cual se ha agregado un metal de aporte, consta de varias zonas: 1) zona de fusión, 2) interfase de soldadura, 3) zona afectada por el calor y 4) zona de metal base no afectada.

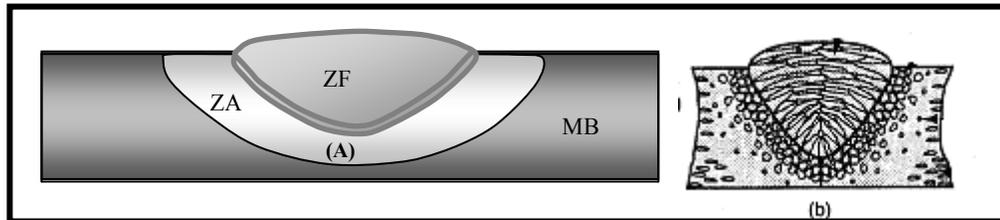


Figura 2.6. (A) Vista transversal de las zonas afectadas en el proceso de soldadura y (B) cambios en la microestructura en las distintas zonas de una junta soldada. (Horwitz, 1988).

ZF= Zona Fundida.

ZA= Zona Afectada por el calor.

MB= Metal Base.

1. La *zona de fusión* consiste en una mezcla de metal de aporte y de metal base que se ha fundido por completo. Esta zona se caracteriza por un alto grado de homogeneidad entre los metales componentes que se han fundido durante la soldadura. El motivo principal por el que se mezclan estos componentes es la convección que se suscita en el pozo de soldadura fundida. La solidificación en la zona de fusión se asemeja a un proceso de fundición. En la soldadura el molde se forma por medio de los bordes o superficies no fundidos de los componentes que se están soldando. La diferencia significativa entre la solidificación en fundición y la soldadura es que en esta última ocurre un crecimiento de grano epitaxial. Se debe recordar que durante la fundición se forman granos metálicos a partir de la fusión, mediante la enucleación de partículas sólidas en la pared de fusión, seguida por el crecimiento del grano. En contraste, en el proceso de soldadura se evita la etapa de nucleación a través del mecanismo de *crecimiento de grano epitaxial*, en el cual los



átomos del pozo fundido se solidifican sobre los sitios reticulares preexistentes de la base metálica sólida adyacente.

En consecuencia, la estructura del grano en el área de fusión cerca de la zona afectada por calor tiende a imitar la orientación cristalográfica de la zona afectada por calor circundante. Más hacia el centro de la zona de fusión se desarrolla una orientación preferencial, en la cual los granos están aproximadamente perpendiculares a los límites de interfase de la soldadura. La estructura resultante en la zona de fusión solidificada tiende a presentar granos columnares burdos, como lo muestra la figura 2.4 (b). La estructura del grano depende de varios factores que incluyen el proceso de soldadura, los metales que se sueldan (por ejemplo, metales idénticos contra metales diferentes), si se utiliza un metal de aporte y la velocidad de alimentación a la que se obtiene la soldadura.

2. La *interfase de soldadura*, un estrecho límite que separa la zona de fusión de la zona afectada por el calor. La interfase consta de una banda completa y delgada de metal base fundido o parcialmente fundido durante el proceso de fusión (el fundido se localiza dentro de los granos), el cual se ha solidificado inmediatamente después, antes de mezclarse con el metal en la zona de fusión. Por tanto, su composición química es idéntica a la del metal base.

3. La *zona afectada por el calor*. En esta zona, el metal ha experimentado temperaturas menores a su punto de fusión aunque lo suficientemente altas para producir cambios micro estructurales en el metal sólido.

La composición química en la zona afectada por el calor es igual a la del metal base, pero esta zona ha sido tratada con calor debido a las temperaturas de soldadura, por lo que se han alterado sus propiedades y estructura. La cantidad de daño metalúrgico en la ZA depende de factores tales como la cantidad de calor que ha



ingresado y la máxima temperatura alcanzada, la distancia de la zona de fusión, el intervalo de tiempo al que ha estado sujeto el metal a altas temperaturas, la velocidad de enfriamiento y las propiedades térmicas del metal. El efecto sobre las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor por lo general es negativo y en esta región con frecuencia ocurren fallas en la junta soldada.

Conforme aumenta la distancia de la zona de fusión, se alcanza por fin la *zona de metal base no afectada*, en la cual no ha ocurrido un cambio metalúrgico. No obstante, es probable que el metal base que rodea la ZA presente un estado de alta tensión residual, producido por la contracción en la zona de fusión.

2.9 Clasificación de los procesos de soldadura.

Clasificación de la soldadura según la AWS American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadores).

2.9.1 Soldadura de arco (AW).

Tabla 2.3. Soldadura por arco.

Soldadura con hidrógeno atómico	AHW
Soldadura de arco metálico con electrodo desnudo	BMAW
Soldadura con arco de carbón	CAW
Con gas	CAW-S
Con arco protegido	CAW-S
Con arcos gemelos	CAW-T
Soldadura de arco con núcleo de fundente	FCAW
Electrogras	FCAW-EG
Soldadura con arco metálico y gas	GMAW
Electrogas	GMAW-EG
Arco pulsado	GMAW-P
Arco de corto circuito	GMAW-S
Soldadura de arco de tungsteno y gas	GTAW
Soldadura de arco con plasma	PAW
Soldadura de arco con electrodo revestido	SMAW
Soldadura de arco de espárragos	SW
Soldadura de arco sumergido	SAW

Fuente: American Welding Society, 1996.



2.9.2 Soldadura de estado sólido (SSW).

Tabla 2.4. Soldadura de estado sólido.

Soldadura en frío	CW
Soldadura por difusión	DEW
Soldadura por explosión	EXW
Soldadura por forjado	FOW
Soldadura por fricción	FRW
Soldadura por presión en caliente	HPW
Soldadura con rodillos	ROW
Soldadura ultrasónica	USW

Fuente: American Welding Society, 1996

2.9.3 Soldadura fuerte (B).

Tabla 2.5. Soldadura fuerte.

Soldadura fuerte de arco	AB
Soldadura fuerte de bloque	BB
Soldadura fuerte por difusión	DFB
Soldadura fuerte inmersión	DB
Soldadura fuerte de flujo	FLB
Soldadura fuerte en horno	FB
Soldadura fuerte por inducción	IB
Soldadura fuerte infrarroja	IRB
Soldadura fuerte por resistencia	RB
Soldadura fuerte a soplete	TB

Fuente: American Welding Society, 1996

2.9.4 Soldadura blanda (S).

Tabla 2.6. Soldadura blanda.

Soldadura blanda por inmersión	DS
Soldadura blanda en horno	FS
Soldadura blanda por inducción	IS
Soldadura blanda Infrarrojo	IRS
Soldadura blanda con cantín (soldador)	INS
Soldadura blanda por resistencia	RS
Soldadura blanda con Soplete	TS
Soldadura blanda por ondas	WS

Fuente: American Welding Society, 1996



2.9.5 Otras soldaduras.

Tabla 2.7. Otras soldaduras.

Soldadura por haz de Electrones	EBW
Soldadura de electroescoria	ESW
Soldadura de flujo	FLOW
Soldadura por inducción	IW
Soldadura por haz de rayos láser	LBW
Soldadura por termita	TW

Fuente: American Welding Society, 1996

2.10 Soldadura por arco con electrodo revestido.

La soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) es un proceso manual en el que la fuente térmica está constituida por el arco eléctrico producido entre el electrodo revestido (soportado por la pinza porta electrodo) y la pieza a soldar (material base), que desarrolla el calor que provoca una rápida fusión tanto del material base como del electrodo (material de aporte).

Tal como se ilustra en la figura 2.7, con el calor producido por el arco se funde el extremo del electrodo y se quema el revestimiento, produciéndose la atmósfera adecuada (protección gaseosa) para que se produzca la transferencia de las gotas del metal fundido desde el alma del electrodo hasta el baño de fusión en el material de base.

En el arco, las gotas del metal fundido se proyectan recubiertas de escoria fundida procedente del recubrimiento que por efecto de la tensión superficial y de la viscosidad flota en la superficie, solidificando y formando una capa de escoria protectora del baño fundido.

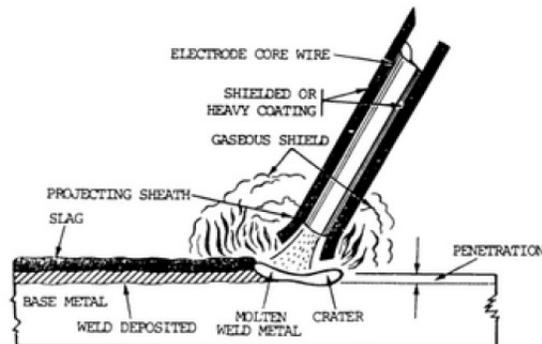


Figura 2.7. Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW). (Domínguez, 1991).



Figura 2.8. Proceso de soldadura con arco protegido. (Domínguez, 1991).

En ocasiones, el proceso se denomina soldadura de varilla. La varilla de soldadura normalmente tiene una longitud entre de 230 a 460 mm y un diámetro de 2.5 a 9.5 mm. El metal de aporte usado en la varilla debe ser compatible con el metal que se va a soldar y, por tanto, la composición debe ser muy parecida a la del metal base. El recubrimiento consiste en celulosa pulverizada (polvos de algodón y madera) mezclados con óxidos, carbonatos y otros ingredientes integrados mediante un aglutinante de silicato. En ocasiones se incluyen en el recubrimiento polvos metálicos para aumentar la cantidad de metal de aporte y agregar elementos de aleación. El calor del proceso de soldadura funde el recubrimiento y proporciona una atmósfera protectora y escoria para la operación de soldadura. También ayuda a estabilizar el arco eléctrico y regula la velocidad a la que se funde el electrodo.



Durante la operación, el extremo de metal descubierto de la varilla de soldadura (que está en la otra punta de la soldadura) se sujeta en un soporte de electrodos conectado a la fuente de energía. El soporte tiene una manija aislada para que lo tome y manipule el soldador. Las corrientes que se usan regularmente en la SMAW varían entre 30 y 300 A y 15 a 45 V. La selección de los parámetros de energía adecuados depende de los metales que se van a soldar, del tipo y longitud del electrodo, así como de la profundidad de penetración de la soldadura requerida. El transformador de corriente, los cables de conexión y el soporte del electrodo pueden adquirirse en algunos miles de dólares.

Por lo general, la soldadura metálica con arco protegido se ejecuta en forma manual y sus aplicaciones comunes incluyen la construcción, instalación de tuberías, estructuras de maquinaria, construcción de embarcaciones, tiendas de manufactura y trabajos de reparación. Se prefiere sobre la soldadura con oxígeno y gas combustible para secciones más gruesas que 4.8 mm debido a su mayor densidad de energía. El equipo es portátil y de bajo costo, lo que convierte a la SMAW en el proceso más versátil y de mayor uso entre los procesos de AW. Los metales base incluyen los aceros, los aceros inoxidable, los hierros fundidos y ciertas aleaciones no ferrosas. No se usa o se emplea rara vez en aluminio y sus aleaciones, al igual que en las aleaciones de cobre y titanio.

La desventaja de la soldadura metálica con arco protegido como operación de producción proviene del uso de varillas de electrodos consumibles, porque éstos deben cambiarse en forma periódica a causa del desgaste. Esto reduce el tiempo de arco eléctrico en este proceso de soldadura. Otra limitación es el nivel de corriente que puede usarse, porque la longitud del electrodo varía durante la operación y ésta afecta el calentamiento de la resistencia del electrodo, los niveles de corriente deben mantenerse dentro de un rango seguro o el recubrimiento se sobrecalentará y fundirá prematuramente cuando se empiece a usar una nueva varilla de soldadura. Algunos de



los otros procesos de soldadura con arco eléctrico superan las limitaciones de la longitud de la varilla de soldadura en este proceso, usando un electrodo de alambre que se alimenta en forma continua.

Desde su aparición en el mundo de la soldadura, todas las agencias de regulación y clasificación de los metales de aporte tomaron muy en serio este proceso y la creación de su propio código de clasificación fue indispensable, en el caso de la Sociedad Americana de Soldadura AWS, se crearon dos códigos por separado, uno para las aleaciones de bajo contenido de Carbón o también conocido como acero dulce y uno para las aleaciones de alto contenido de Carbón o donde la composición química final del material aportado fuera cambiada de forma dramática.

Un buen procedimiento de soldada está caracterizado por la poca presencia de porosidad, buena fusión, y una terminación libre de grietas o quebraduras La Porosidad, es una de las causas más frecuentemente citadas de una soldadura pobremente ejecutada, es causada por el exceso de oxígeno de la atmósfera, creada por el gas usado en el proceso y cualquier contaminación en el metal base, que, combinado con el carbón en el metal soldado forma diminutas burbujas de monóxido de carbono (CO). Algunas de estas burbujas de CO pueden quedar atrapadas en la soldadura fundida después que se enfría y se convierten en poros mejor conocidos como porosidad.

2.11 Electrodo.

El material de aporte usado en el proceso de SMAW se conoce como electrodo, que consiste en un alma o varilla metálica, recubierta de un revestimiento concéntrico, los cuales tienen tareas diferentes pero complementarias:



2.11.1 El alma.

El alma está formada por un núcleo metálico conductor que tiene como la principal función de aportar material a la pieza. El material con el que está formada depende del material base a soldar: puede tener cualquier composición, por ejemplo la de un acero de bajo carbono, un acero altamente aleado, un acero inoxidable austenítico o por materiales no ferrosos. Durante la soldadura el alma funde un poco antes que el revestimiento.

2.11.2 Revestimiento.

Es la parte más importante del electrodo ya que protege la varilla metálica y tiene numerosas funciones, tales como:

- Proveer una atmósfera protectora.
- Proporcionar escoria de características adecuadas para proteger al metal fundido.
- Estabilizar el arco.
- Añadir elementos de aleación al metal de la soldadura.
- Desarrollar operaciones de enfriamiento metalúrgico.
- Reducir las salpicaduras del metal.
- Aumentar la eficiencia de deposición.
- Eliminar impurezas y óxidos.
- Influir en la profundidad del arco.
- Disminuir la velocidad de enfriamiento de la soldadura.

La pasta para el revestimiento se compone de una serie de sustancias orgánicas y minerales, en las que suelen intervenir:



- Óxidos naturales: óxidos de hierro, hematita (50% óxido férrico y 50% óxido de titanio), rutilo (óxido de titanio), sílice (óxido de silicio).
- Silicatos naturales: caolín, talco, mica, feldepaño
- Productos volátiles: celulosa, serrín
- Fundentes
- Productos químicos: carbonatos, óxidos
- Ferroaleaciones: de Mn, Si, Ti
- Aglomerantes: silicato sódico, silicato potásico.

Existen a la venta diferentes tipos de electrodos revestidos a diferentes campos de aplicación. Entre ellos se pueden nombrar: electrodos celulósicos, electrodos de rutilo y electrodos de bajo hidrógeno.

2.11.3 Absorción de humedad por los electrodos.

Los electrodos revestidos presentan un problema y es que su recubrimiento puede contener grandes cantidades de humedad absorbida del ambiente que los rodea, este efecto se conoce como higroscopia. Esta humedad absorbida por los poros puede crear desfavorables efectos sobre la soldadura, especialmente para la formación de hidrógeno.

El revestimiento del electrodo, contiene siempre mayor o menor proporción de materias higroscópicas. Sin embargo, existe un gran número de factores que influyen en el grado de higroscopicidad de un electrodo, entre los más importantes están:

- Temperatura y humedad del aire.



- Composición del revestimiento (incluido los aglomerantes) y espesor del mismo.
- Tamaño de las partículas de los componentes del revestimiento.
- Compacidad de las partículas del revestimiento (porosidad).
- Temperatura y duración del secado durante la fabricación.
- Humedad residual después del secado.
- Material, tipo de embalaje y almacenamiento.

El revestimiento del electrodo absorbe físicamente la humedad que contiene el aire y la cual comienza tan pronto como éstos salen del horno de secado y se equilibran con la temperatura que los rodea, puesto que en el ambiente existe una humedad relativa crítica. Es necesario destacar que el ambiente que rodea la humedad se encuentra como vapor de agua y naturalmente el contenido de humedad del aire depende del lugar, ambientes con abundante agua (cerca de ríos, lagos, costas, regiones de alta lluviosidad etc.) o ambientes secos (zonas desérticas).

Por ello es de gran importancia el evitar la absorción de la humedad, o sea la eliminación del agua absorbida durante el embalaje, el almacenamiento en la fábrica, el transporte al consumidor o en lugares de trabajo que se hallen a la intemperie.

2.11.4 Pre calentamiento.

Es la aplicación de calor que se hace antes de soldar, con la finalidad de eliminar en lo posible la humedad contenida en los materiales y disminuir la tasa de enfriamiento. Con esto se previene la fragilidad, fisuras y formación de poros.

La tasa de enfriamiento, es la velocidad con que se enfría el metal y se expresa en °C/hr. Haciendo posible una tasa de enfriamiento lenta, se pueden obtener



beneficios tales como: La reducción de esfuerzos de contracción de la soldadura y sus adyacencias, aumento de la ductilidad y disminución de la fragilidad, facilidad para el hidrógeno a escaparse al solidificar el cordón.

Para hacer un precalentamiento hay que tomar en cuenta los siguientes factores:

- Composición química y espesor del material.
- Tipo de revestimiento del electrodo.
- Proceso de soldadura aplicado.
- Resistencia mecánica del material.

2.11.5 Denominación de los electrodos.

Existe una normativa realizada por la **AWS (AMERICAN WELDING SOCIETY)** y la **ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS)** la cual establece una serie de códigos de identificación y a su vez de clasificación para los diferentes productos que las grandes y medianas fabricas de electrodos producen para abastecer el mercado, estos códigos se han convertido en la referencia más usada en Latino-América por su fácil reconocimiento y manejo, de forma tal que independientemente de la marca de los electrodos, los mismos tendrán características similares. La forma de denominación es la siguiente:

Tabla 2.8. Denominación de los electrodos realizada por la AWS y la ASTM.

E	-	XX	X	X
Soldeo Arco		Resistencia Tracción	Posición de soldadura	Otras características

- El prefijo E significa electrodo para la soldadura con arco.



- Las dos primeras cifras significan la resistencia a la tracción mínima del metal de soldadura en Ksi.
- La cifra siguiente indica las posiciones de soldeo:

Tabla 2.9. Cifras indicativas de la posición de soldeo según la AWS/ASTM.

Cifras	Posición
1 =	Todas las posiciones
2 =	Soldaduras en horizontal y en cornisa
3 =	Soldadura horizontal

- Por último la cuarta cifra determina una serie de características especiales del propio electrodo. Puede adoptar el valor desde 0 hasta 8.

2.11.6 Soldabilidad de los aceros.

2.11.6.1 Concepto de soldabilidad.

Un acero se considera soldable en un grado prefijado, por un procedimiento determinado y para una aplicación específica, cuando mediante una técnica adecuada se pueda conseguir la continuidad metálica de la unión, de tal manera que ésta cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y a su influencia en la construcción de que forma parte integrante.

De esta manera se puede decir que la soldabilidad de un acero es la respuesta que presenta el mismo a los ciclos térmicos en un ambiente determinado y durante la operación de soldadura.



Tabla 2.10. Características especiales del electrodo según el valor adoptado entre 0 y 8.

Cifras	Revestimiento	Corriente	Características
0 =	Celulosa y silicato sódico	C.C +	Penetración profunda, cordones planos, fusión rápida.
1 =	Celulosa con silicato potásico	C.A , C.C +	Penetración profunda, cordones planos y fusión rápida.
2 =	Rutilo con sales de sodio.	C.A, C.C -	Penetración media, cordón convexo.
3 =	Rutilo con sales de Potasio.	C.A, C.C - C.C +	Penetración media.
4 =	Rutilo con polvo de hierro	C.A, C.C - C.C +	Penetración media, gran velocidad de aportación.
5 =	Básico con sales de sodio.	C.C +	Penetración moderada.
6 =	Básico con sales de potasio.	C.C +, C.A	Penetración moderada.
7 =	Con polvo de hierro y óxido	C.A, C.C - C.C +	Penetración media.
8 =	Básico con polvo de hierro	C.C +, C.A	Penetración ligera, media.

Fuente: American Welding Society, 1996



2.11.6.2 Calidad de la soldadura.

Una unión soldada de calidad es aquella que cumple con los requisitos correspondientes al equipo o estructura al cual pertenece, a un mínimo costo; es decir, debe tener las cualidades necesarias para desempeñar su función esperada en servicio, deben ser económicos y seguros para los usuarios. Para ello, la unión ha de poseer las propiedades físicas y mecánicas requeridas, el tamaño y la forma, así como la integridad de la unión. Por esta razón el procedimiento a llevar a cabo debe ser el correcto:

1. En primer lugar, llevar a cabo todas las reglas de seguridad y limpieza del metal a soldar.
2. Seleccionar el electrodo a utilizar. Para la soldadura por arco depende de:
 - La posición de la soldadura.
 - El diseño de la junta.
 - La velocidad de soldeo.
 - La composición del metal por soldar.
3. Se debe tener en cuenta para una soldadura de calidad los siguientes parámetros:
 - ***Corriente de soldadura.***

La soldadura por arco de metal protegido puede efectuarse con corriente tanto alterna como continua, siempre que se use el electrodo adecuado. El tipo de corriente



de soldadura, la polaridad y los constituyentes de la cobertura del electrodo afectan la rapidez de fusión de todos los electrodos cubiertos.

Para un electrodo determinado, la rapidez de fusión se relaciona directamente con la energía eléctrica suministrada al arco. Parte de esta energía se destina a fundir una porción del metal base, y otra parte sirve para fundir el electrodo.

- ***Corriente continúa.***

La corriente continua siempre produce un arco más estable y una transferencia de metal más uniforme que la corriente alterna. Esto se debe a que la polaridad de la corriente no está cambiando todo el tiempo como sucede con la corriente alterna. La mayor parte de los electrodos cubiertos trabajan mejor con polaridad inversa (electrodo positivo). La polaridad inversa logra mayor penetración, pero la directa aumenta la rapidez de fusión del electrodo.

El arco de corriente continua hace que el charco de soldadura moje mejor las superficies de unión y produce una franja de soldadura de dimensiones más uniformes incluso con amperajes bajos. Por esta razón, la corriente continua es ideal para soldar secciones delgadas. La corriente continua es preferida para soldar en posición vertical y también para soldar con arco corto.

- ***Amperaje.***

Los electrodos recubiertos con tamaño y especificación específicos pueden operar de manera satisfactoria a diversos amperajes dentro de cierto intervalo. Este intervalo varía dependiendo del espesor y la formulación de la cobertura para un tipo y tamaño de electrodo, el amperaje óptimo depende de varios factores como la



posición de la soldadura y el tipo de unión. El amperaje debe ser suficiente para obtener una buena fusión y penetración sin perder el control del charco de soldadura.

4. La soldadura por arco de metal protegido es un proceso manual, y por lo tanto la calidad de la unión depende de la habilidad del soldador que la produce.

2.11.6.3 Metalurgia de la soldadura.

Cuando a partes estructurales se le aplicas el ciclo térmico de la soldadura se forman zonas perfectamente diferenciadas: metal base, metal de soldadura y material afectada térmicamente.

El **metal base** es el material de la construcción solo afectado en la zona de unión.

El **metal de soldadura** se refiere al metal fundido por la operación de soldeo y cuya composición química y estructura corresponden a las proporcionadas por la fusión del material de aportación (electrodo revestido, alambre, varilla, alambre...) y del metal base.

La estructura metalúrgica del material y sus propiedades son modificadas en una región cercana a la soldadura. El volumen de **material afectado térmicamente** se lo denomina usualmente como *zona afecta por el calor (ZA)*. Esta es la zona del metal base que ha permanecido durante cierto tiempo en una gama de temperaturas en la que pueden producirse transformaciones o modificaciones estructurales, es convenientemente dividida en sub-zonas, las cuales se ilustran en forma de diagrama en la figura 2.9 para el caso de un acero con bajo contenido de carbono. Igualmente, representa la curva de enfriamiento con expresiones de las diferentes estructuras:

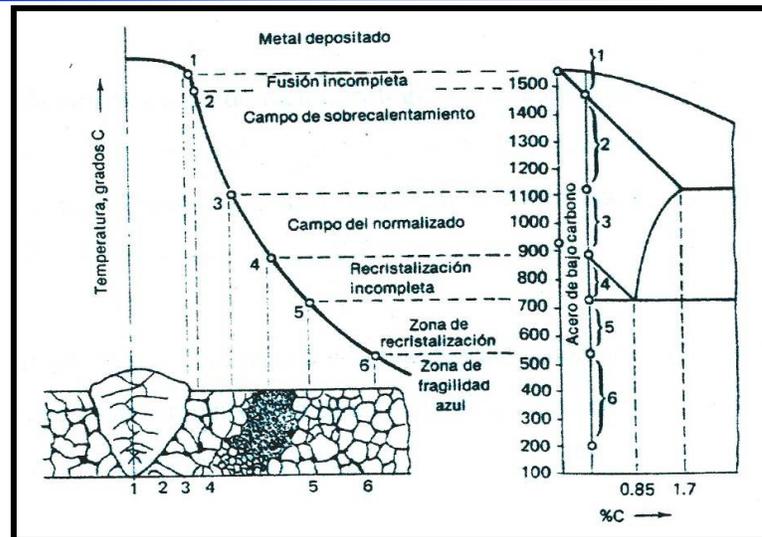


Figura 2.9. Diagrama de la zona afectada por el calor (ZA) del acero. (Horwitz, 1988).

- (1) Zona de fusión incompleta. El metal se calienta hasta una temperatura elevada y forma granos gruesos.
- (2) Zona de campo de sobrecalentamiento. En esta zona disminuye la temperatura, la magnitud del sobrecalentamiento y por consiguiente el tamaño del grano.
- (3) Zona de campo del normalizado. En esta zona el grano es fino, debido a que el tiempo de calentamiento no es suficientemente largo para que se produzca entrecrecimiento entre los granos austeníticos y el enfriamiento subsecuente expulsa los granos finos de perlita y ferrita.
- (4) Zona de recristalización incompleta. En esta zona los granos de perlita se descomponen en granos aun más finos.
- (5) Zona de recristalización. Se caracteriza por la recuperación de los granos deformados por rodado.



Las alteraciones estructurales que ocurren en el área afectada por el calor varían con el contenido de carbono y de elementos de aleación del acero.

2.11.6.4 Absorción de gases por la soldadura.

Uno de los problemas principales a tener en cuenta cuando se estudian los efectos indeseables del proceso de soldadura es la absorción de gases por el metal fundido. Cualquiera que sea el procedimiento de Fusión, en el acero líquido se fijan cantidades más o menos importantes de los gases del aire (Oxígeno y Nitrógeno) y de los productos de descomposición del revestimiento, principalmente hidrógeno procedente de la humedad o del agua de cristalización de ciertas sustancias químicas.

El **oxígeno** puede presentarse disuelto o formando óxido de hierro o combinado con otros óxidos. En estado disuelto puede influir sobre las propiedades mecánicas de la solución sólida Ferrita; en estado de óxido influye por la presencia de inclusiones en la tenacidad y estricción del metal de soldadura.

El **nitrógeno** origina al Fe_4N (nitruro de hierro) en forma de agujas que también influye en la tenacidad. Cuando el nitrógeno se encuentra disuelto produce el envejecimiento del acero con la correspondiente falta de plasticidad.

Pero el verdadero problema y mucho más grave es que durante la soldadura el acero también absorbe **hidrógeno**, lo mismo que absorbe oxígeno y nitrógeno; La concentración de hidrógeno en las soldaduras por arco puede llegar a alcanzar el límite de solubilidad de este gas en el metal líquido (28 cm^3 por 100g de metal) según sea la naturaleza del revestimiento. El hidrógeno es la causa de la formación de agrietamientos, porosidades y es el formador de los ojos de pez, en el cordón de soldadura.



2.12 Ensayos mecánicos.

2.12.1 Ensayo de tracción.

Es uno de los ensayos de resistencia comúnmente usado, se emplea con el propósito de clasificar el material base y el material de aporte en uniones soldadas, también se emplea con el propósito de evaluar la resistencia de dichas uniones y, evaluar de la habilidad de la persona que ejecuta la soldadura.

Consiste en aplicar esfuerzos de tensión a un material hasta su ruptura. Las cargas en la probeta y en el alargamiento de ésta, se miden continuamente a medida que aumenta la carga.

El esfuerzo al cual se somete la probeta se determina dividiendo la fuerza aplicada por el área transversal nominal de la misma, y la deformación se obtiene dividiendo el alargamiento total por una longitud inicial de referencia. Como resultado de este ensayo se obtiene un diagrama esfuerzo-deformación.

2.12.2 Ensayo de dobléz.

El ensayo de dobléz se utiliza para medir la capacidad de deformación de la soldadura en una probeta al ser flexionada alrededor de un punzón. Se toma el alargamiento de la fibra exterior para evaluar la capacidad de deformación.

Donde el ángulo de dobléz dependerá de los siguientes factores:

- La forma y la fabricación de la probeta: Se refiere a la forma y dimensiones de la probeta y estado de la superficie, el ángulo del chaflán en V o x.



- Realización del ensayo: La distancia entre apoyos, diámetro del punzón, velocidad de deformación en el ensayo.

Con los conocimientos obtenidos hasta ahora se pueden deducir los siguientes parámetros:

- La forma de la probeta tiene que ser lo más sencilla posible.
- Los ángulos de achaflanado de 60° parecen ser más favorables que los de 90° .
- Si se aumenta la distancia entre los apoyos en el dispositivo de doblado, se puede lograr que toda la probeta soporte un ángulo de doblez de 180° .
- Considerando un diámetro de punzón menor, se puede estirar más la zona del lado que se encuentra sometido a tracción en la probeta, y por consiguiente puede aparecer una grieta a menores ángulos de doblez.

2.12.3 Ensayo de microdureza Vickers.

En esta prueba, el instrumento utiliza un marcador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo incluido de 136° entre las cargas opuestas. El intervalo de carga está generalmente entre 1 y 1000 gr, los números de microdureza vickers se expresan en términos de carga y área de la impresión.

Como resultado de la forma del marcador, la impresión sobre la superficie de la muestra será un cuadrado. La longitud de la diagonal del cuadrado es medida por medio de un microscopio equipado con un micrómetro ocular que contiene filamentos móviles. La distancia entre los filamentos se indica en un contador calibrado en milésimas



de milímetros. Por lo general, hay tablas para convertir la diagonal medida al número de dureza piramidal Vickers (HV).

2.13 Metalografía.

2.13.1 Macroscopía.

La finalidad de este estudio es detectar defectos superficiales a simple vista la cual permite tener una idea de las características mecánicas y de la calidad del proceso de soldadura utilizando la unión soldada.

2.13.2 Microscopía óptica.

El objetivo de este estudio, es el de observar la microestructura resultante que conforma el material en la unión, lo cual permite dar conclusiones de las fases que se forman durante el proceso de soldadura utilizado. Este estudio se realizó con la ayuda de un microscopio óptico.



CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Las técnicas que se emplearon para la recolección de datos son: La observación directa en la ejecución de la soldadura, la aplicación de ensayos destructivos de tracción y dobléz, estudios de microscopía óptica, ensayo de microdureza Vickers y el análisis documental proveniente de la bibliografía recopilada.

Los instrumentos que se emplearon para la recolección de datos fueron: Fichas para anotar los parámetros de soldadura utilizados, un control computarizado acoplado al equipo universal de ensayos de materiales (Tinius Olsen de 20 Ton), el cual permitió registrar los datos obtenidos del ensayo a tracción, tabla de observaciones del ensayo de dobléz, fotografías donde se recolectó información de los estudios microscópicos y un computador donde se almacena la información bibliográfica.

3.1. Nivel de la investigación

El trabajo especial de grado desarrollado se definió como de tipo experimental y descriptivo.

- *Experimental* ya que el análisis comparativo que se realizó se fundamentó en ensayos mecánicos normalizados y el estudio de muestras de manera experimental.
- *Descriptivo* porque en esta investigación se analizó comparativamente el comportamiento de las propiedades mecánicas de uniones soldadas por el método SMAW de acero inoxidable austenítico 316L”.



3.2 Diseño de la investigación.

A fin de cumplir los objetivos propuestos en el trabajo especial de grado, se diseñó la investigación como *documental* y *experimental*.

- *Documental*: porque se realizó una revisión amplia de todas las variables a tener en cuenta para la realización de uniones soldadas por el método SMAW, en el acero AISI 316L y de los ensayos mecánicos a realizar para obtener las propiedades más importantes que posteriormente serán comparadas entre sí.
- *Experimental* ya que se realizaron ensayos mecánicos normalizados y los resultados analizados son los obtenidos experimentalmente.

3.3 Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

Una vez organizados los datos obtenidos de cada ensayo, se procedió a aplicar técnicas de procesamiento de datos tales como tablas y gráficos, donde se obtuvieron las tendencias de la información registrada, se realizaron comparaciones y de esta manera se establecieron causales entre las variables estudiadas.

3.4 Población y muestra.

Este acero AISI 316L representó la población estudiada en este trabajo especial de grado. Estas muestras se encontraban constituidas por 21 probetas que se sometieron a tracción, 21 probetas para el ensayo de doblado, 3 probetas para el estudio de microdureza, y 3 probetas para la microscopía.



Tabla 3.1. Población y muestra en estudio.

Población	Acero AISI 316L
Muestra 1	21 Probetas de Tracción
Muestra 2	21 Probetas doblado
Muestra 3	3 Probetas de Dureza
Muestra 4	3 Probetas para metalografía

3.5 Materiales, equipos y herramientas a utilizados.

A continuación se hace una descripción detallada de los materiales, equipos y herramientas, utilizados en la realización tanto de las probetas como en la realización de los ensayos.

3.5.1 Materiales utilizados.

Los materiales utilizados en la realización de las probetas se dividieron básicamente en dos grupos: materiales base y materiales de aporte.

3.5.1.1 Metal Base.

Este grupo lo conformaron las 48 láminas de acero AISI 316L de 5 mm de espesor. En la tabla 3.2 se muestra la composición química del material denominado como base para realizar las soldaduras estudiadas.

Tabla 3.2. Composición química nominal del material base utilizado.

MATERIAL	C (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
AISI-316L	0,03	12	16	≤ 2	≤ 1	≤ 2	≤ 0,045	≤ 0,015

Fuente: ThyssenKrupp Aceros y Servicios S.A. (2007).



3.5.1.2 Metal de Aporte.

Esta conformado por electrodos especiales de acero inoxidable, utilizados para soldadura de arco manual (SMAW). En la tabla 3.3 se muestran las especificaciones del material mencionado.

Tabla 3.3. Composición química de los metales de aporte.

MATERIAL	PROCESO	C(%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr(%)	Ni(%)	Mo(%)	Cu(%)
Electrodo AM R-63	SMAW	0.04	0.9	0.5 - 2.5	0.04	0.03	17 - 20	11 - 14	2 - 3	0.75

Fuente: Arco Metal C.A. (2006)

3.5.2 Equipos y herramientas.

3.5.2.1 Equipos usados en la realización de las pruebas piloto de Soldadura.

- Equipo de Soldadura por arco eléctrico manual marca Miller, Rango de intensidad fuente de poder: (0 - 420 Amp).
- Mandarria.
- Bases o soportes para colocar las láminas soldadas.
- Lámina de acero inoxidable austenítico 316L de 5 mm de espesor.
- Eléctrodos (AGA R-63 E316L) 3/16” de diámetro

3.5.2.2 Equipos y herramientas utilizadas para realizar las probetas.

- Cizalla industrial.
- Fresadora.



- Esmeril.
- Limadora.
- Cepillo de alambre.
- Etanol.
- Lijas.
- Agua regia (Composición química: 10mL HNO₃, 20 mL HCl y 30 mL Agua destilada).
- Alúmina en polvo fina y gruesa.
- Vernier, lentes protectores, guantes, bata.
- Máquina para ensayos de Tracción y Doblado TINIUS OLSEN Carga máx.: 60000lb
- Microdurómetro BUEHLER
- Microscopio óptico, aumento a 200x y 400x
- Pulidora metalográfica.

3.6 Procedimientos experimentales.

En esta sección se muestran de manera esquemática la logística que se siguió para llevar a cabo el objetivo fundamental de la investigación, así como también los procedimientos para la obtención de las probetas y ensayos necesarios para su posterior análisis.

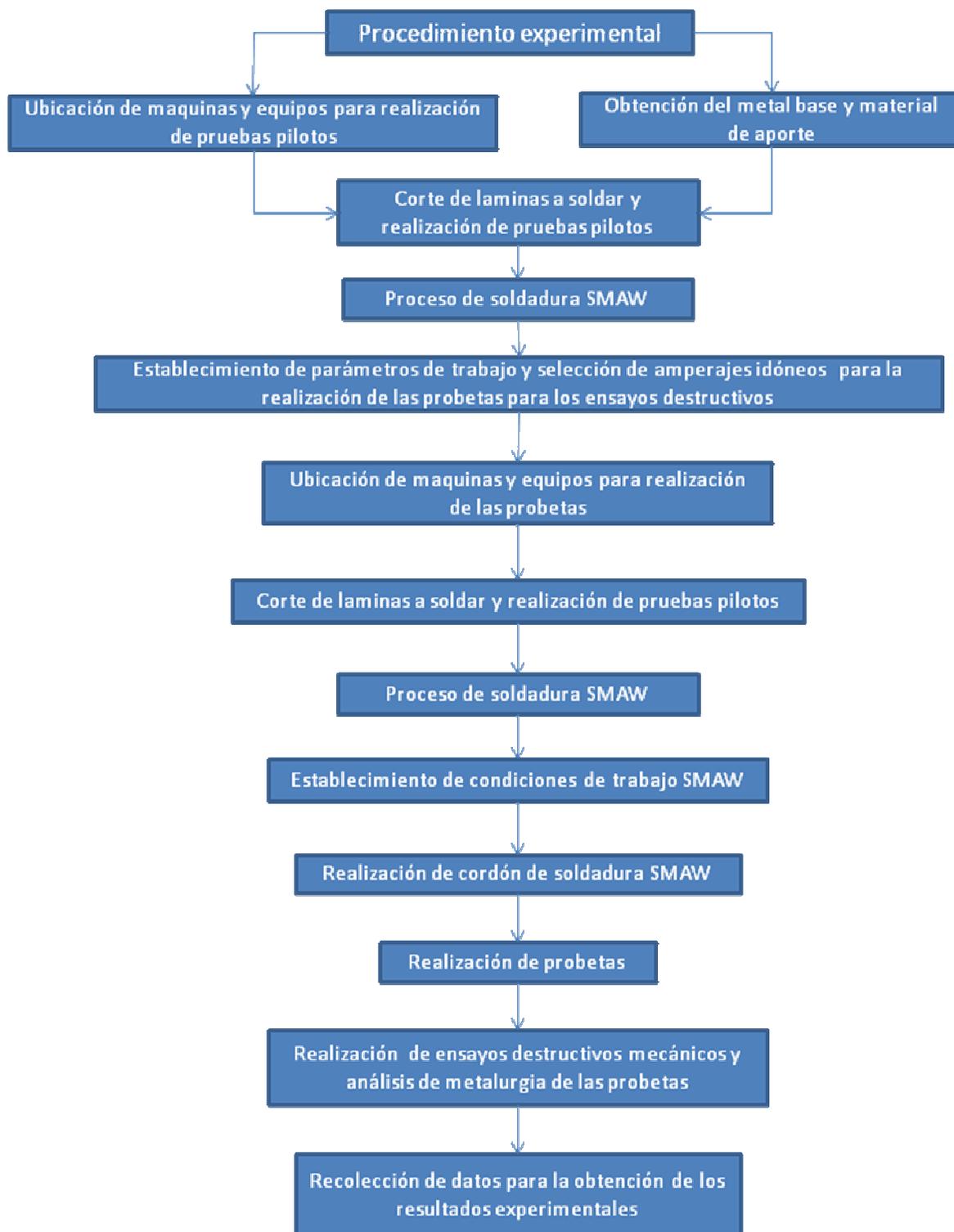


Figura 3.1. Esquema del procedimiento experimental.



3.7 Obtención del material Base y Material de aporte.

El metal base y metal de aporte fueron obtenidos a través de la empresa SOLMIND C.A.

Tabla 3.4. Obtención del metal base y metal de aporte.

MATERIALES USADOS PARA JUNTAS SOLDADAS	OBTENCIÓN
Acero AISI 316L	Compra a SOLMIND C.A.
Electrodos para SMAW	Compra a SOLMIND C.A.

3.8 Realización de pruebas pilotos para establecer parámetros de amperajes de trabajo.

Estas pruebas se realizaron en la empresa Soldaduras TRIME C.A. ubicada en la zona industrial de valencia, frente al centro comercial San Miguel, paralelo a la Av. Michelena, Estado Carabobo, empresa con muchos años de ejercicio que trabajan en la fabricación y reparación de estructura de cualquier tipo de acero inoxidable.

Se procedió a utilizar una lámina de dimensiones 100 mm x 140 mm. Esta lámina fue cortada por la mitad generando dos piezas de 50 mm x 140 mm. Se cortaron 6 pares de láminas de 50 mm x 140 mm para realizar estas pruebas pilotos considerando que el cordón resultase perpendicular al sentido de laminación de la lamina.

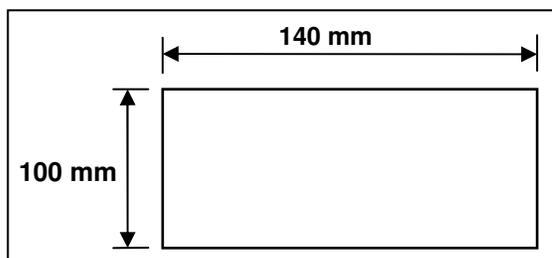


Figura 3.2. Lámina completa.

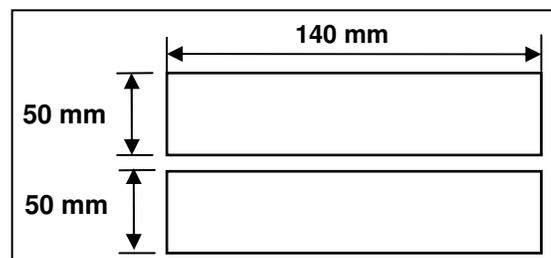


Figura 3.3. Lámina cortada.

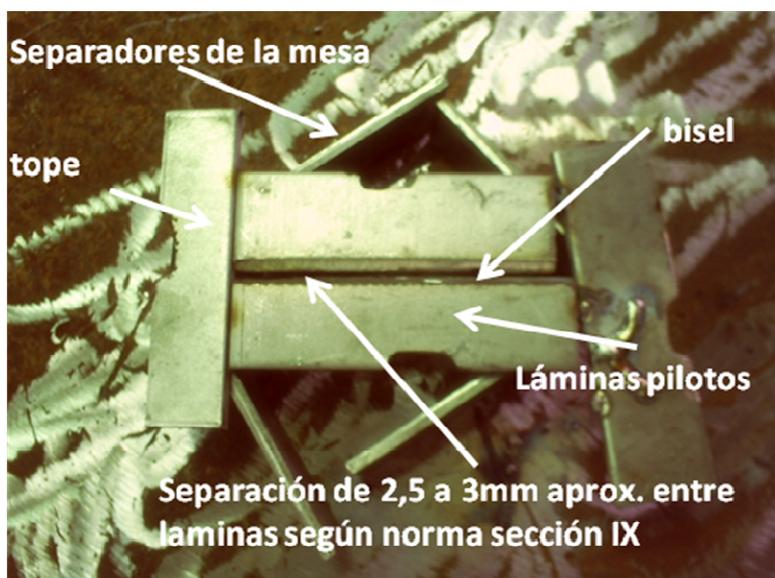


Figura 3.4. Láminas preparadas para realizar las pruebas pilotos.

Luego estas láminas pilotos fueron soldadas a diferentes amperajes, previamente se les aplicó un bisel según la normativa de la AWS registrada en la sección IX.

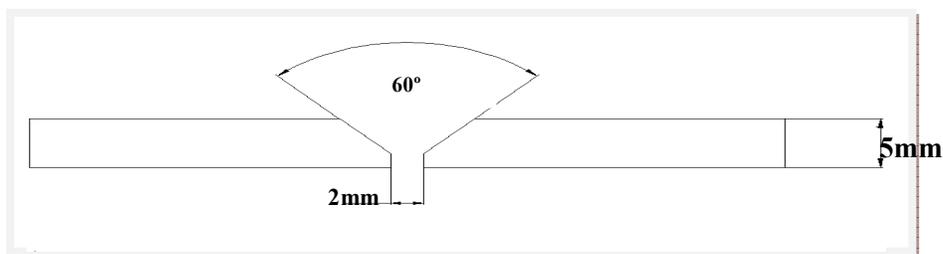


Figura 3.5. Bisel aplicado a láminas para realizar pruebas pilotos.

Estas pruebas se realizaron con electrodos de diámetro 3/32 pulg. De acero inoxidable 316L, los cuales fueron precalentados antes de ser utilizados en un horno térmico portátil a una temperatura de 100 C° aproximadamente según norma AWS 5.4.



Figura 3.6. A: Electrodos utilizados durante el proceso de soldadura. B: Horno térmico para electrodos portátil.

Luego de preparado todo para la realización de las pruebas pilotos se procedió a seleccionar un amperaje base el cual fue 60 Amp y se fueron aumentando los amperajes hasta llegar a 80 Amp que fue el amperaje con el que se detecto que el electrodo perforaba la lámina. Así que se determino luego de este que el amperaje limite máximo era 76 Amp. Luego se tomo un amperaje intermedio que resulto en 68 Amp. Finalmente las intensidades de corriente que se establecieron luego de realizar estas prueba piloto fueron 60, 68, y 76 Amp.

La soldadura realizada en esta prueba piloto en resumen fue una soldadura a tope con bisel de 30° por lámina, que al unir las dos laminas a soldar hacen 60°, lo que exige la sección IX de la AWS, con separación de 2,5 a 3 mm aproximadamente, y los cordones se aplicaron en dos pasadas.

3.9 Máquinas y equipos a utilizados para la realización de las probetas.

En la tabla 3.6 se muestra de manera resumida las instalaciones en donde se ubicaron los equipos y maquinarias a utilizados, tanto de empresas como de institutos de educación, las cuales se utilizaron en cada una de las fases del proyecto.



Tabla 3.5. Ubicación de las maquinarias y equipos utilizados en el Trabajo Especial de Grado.

MAQUINAS O EQUIPOS UTILIZADOS	UBICACIÓN DE MÁQUINAS O EQUIPOS
Soldadora SMAW	Empresa TRIME C.A.
Cizalla Para Corte en tiras De Láminas	Empresa TRIME C.A.
Equipos Para Realización de Probetas de Tracción	Empresa TRIME C.A.
Equipos Para Realización de Probetas de doblado	Empresa TRIME C.A.
Equipos Para Realización de Probetas para micro dureza y metalografía	Empresa TRIME C.A.
Máquina para ensayos de Tracción.	Empresa Inversiones Arco Metal C.A
Máquina para ensayos de Doblez.	Empresa Inversiones Arco Metal C.A
Equipo para ensayos de microdureza	Laboratorio de Materiales*
Equipo para análisis de la metalurgia de muestras	Laboratorio de Materiales*

* Ubicados en la Escuela de Ingeniería mecánica de la Universidad de Carabobo.

3.9.1. Corte de láminas.

Inicialmente se necesitaban láminas con las siguientes dimensiones mínimas:

Tabla 3.6. Características de las láminas iniciales utilizadas.

Tipo de Acero	Cantidad de Láminas	Dimensiones Mínimas (mm)
ASTM-316-L	1	200x800
ASTM-316-L	1	200x600
ASTM-316-L	1	200x400
Total láminas	3	-



Figura 3.7. Láminas de acero inoxidable de 5 mm de espesor.



Se cortaron con cizalla 2 planchas de 10 x 5 mm de espesor de longitud y se obtuvieron tres planchas como se muestra en la figura 3.8:

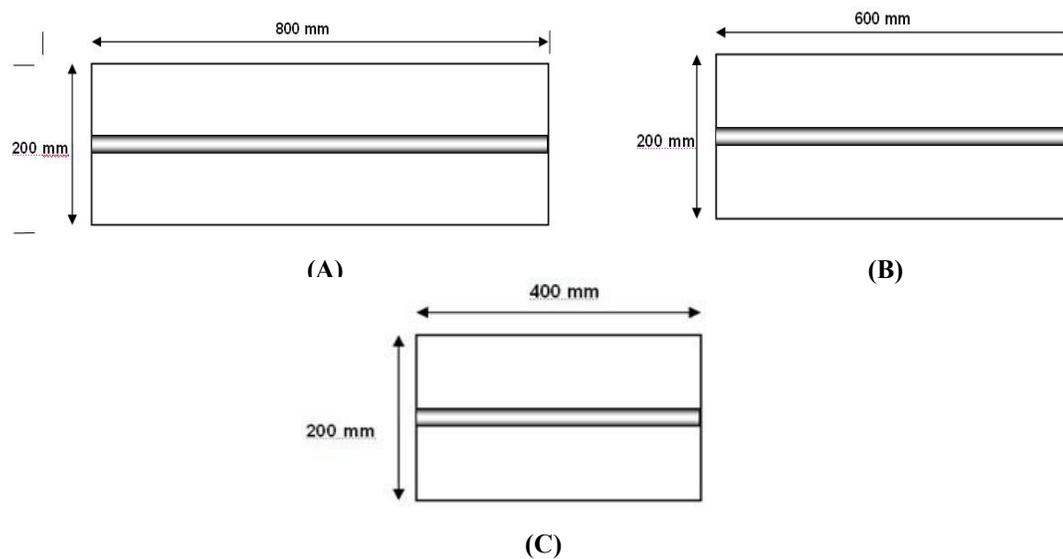


Figura 3.8. A: Lámina cortada a 800 x 200 mm. B: Lámina cortada a 600 x 200 mm. C: Lámina cortada a 400 x 200 mm.

Estas láminas fueron cortadas en la empresa TRIMECA C.A, por operadores especializados a partir de las láminas adquiridas a través de la empresa SOLMIND C.A.



(A)



(B)

Figura 3.9. A: Cizallamiento de láminas en TRIME C.A. B: Máquina cizalladora.



3.9.2. Proceso de Soldadura SMAW.

3.9.2.1 Condiciones de Trabajo Fijadas.

La soldadura a través del proceso de electrodo manual fue realizada en láminas de acero ASTM 316L, para lo cual las láminas fueron soldadas de la siguiente manera:

- ✓ **Unión de las láminas:** las láminas fueron cortadas con un bisel de 30° cada una, y unidas a una luz de 1/8" como el que se muestra en la figura 3.8 mostradas en paginas previas.
- ✓ **Sujeción de las láminas a la mesa de trabajo:** a fin de que las láminas sufrieran la menor deformación posible, se soldaron soportes a ellas con pequeños puntos de soldadura los cuales evitan su pandeo o combadura, además se soldaron en los extremos pequeñas láminas de acero para que el operador inicie el cordón en éstas y no se dañe la soldadura realizada a lo largo de las láminas que se utilizarán para realizar las probetas.
- ✓ **Máquina utilizada:** en cuanto a la máquina utilizada en este proceso, como se mencionó anteriormente, esta fue facilitada por la empresa TRIME C.A. al igual que el soldador calificado. En la siguiente tabla se muestran algunas características de la máquina de soldadura.

Tabla 3.7. Características de la máquina de soldadura con electrodo manual.

Características Máquina Smaw	
Marca	Miller
Voltaje	(20 - 30 V)
Rango de intensidad fuente de poder.	(0 - 800 A)



- ✓ **Intensidades de trabajo:** La intensidad de corriente fue el parámetro principal de trabajo para este proyecto de grado, debido a que se necesitaban láminas soldadas de manera tal que luego de estudiado el comportamiento de las muestras a medida que varía el amperaje se presentaran diferencias en los resultados obtenidos. Según indicaciones del operador calificado, luego de ejecutar algunas pruebas y de la revisión del Catalogo de Soldadura AGA, sugirió como intensidad máxima de trabajo a la cual se podía realizar la soldadura con la máquina disponible, características del electrodo y espesor de lamina: 80 Amp, y como intensidad mínima: 60 Amp, por lo tanto se escogió como la primera intensidad de trabajo la mínima disponible: 60 Amp, la tercera intensidad de trabajo, la máxima de 76 Amp para evitar trabajar con el extremo ya que en algunas pruebas con esta intensidad se noto que la lámina se fundía por exceso de amperaje y la segunda intensidad de trabajo, que es una media entre estos dos valores de: 68 Amp. A continuación en la tabla 3.8 se muestra de forma resumida las intensidades de trabajo para todo el proceso de electrodo manual.

Tabla 3.8. Intensidades de corriente utilizadas para soldar.

	Láminas a soldar: ASTM -316L de 5 mm de espesor
Intensidad 1	60 Amp
Intensidad 2	68 Amp
Intensidad 3	76 Amp

- ✓ **El voltaje de Trabajo:** se trabajó con un voltaje entre (20 -30 V).
- ✓ **Electrodos utilizados:** Se utilizó electrodos AM R-63 para la base raíz y para rellenar, según recomendación de soldadura calificadas por la empresa TRIME C.A.



3.9.2.2 Realización del Cordón de Soldadura.

Luego de que se fijo la lámina a la base y de preparo con los apoyos correspondientes, se realizó la penetración de cada junta en sentido perpendicular al de laminación con un electrodo AM R-63 para la base raíz, y el resto del espacio entre cada lámina.

Cada lámina fue soldada manteniendo a través de toda su longitud la intensidad de trabajo fijada anteriormente, de manera que por cada intensidad se soldó una lámina para obtener un total de 9 láminas: tres a 60, tres a 68 y tres 76 Amp respectivamente para el metal base A-316L.

A medida que fue realizado el cordón en cada una de las láminas, el operador eliminaba la escoria que se forma, con el esmeril, además existió una pequeña fluctuación de corriente debido a que el proceso es manual, también es de destacar que el proceso de soldadura se realizó con dos pasadas.



Figura 3.10. Lámina soldada utilizada en el proceso.

ERROR: stackunderflow
OFFENDING COMMAND: ~

STACK:



CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En este capítulo contiene todos los datos y resultados obtenidos de los ensayos realizados, así como las observaciones más destacadas que arrojaron cada uno de ellos.

4.1 Resultados del ensayo de microscopía.

Las muestras fueron preparadas metalográficamente y atacadas con el reactivo denominado “agua regia” (compuesto por ácido nítrico y ácido clorhídrico) según norma ASTM E 407 - 99, dicho ataque químico permitió revelar a nivel microscópico la microestructura presente en el material. Se obtuvieron imágenes fotográficas de la zona fundida o cordón de soldadura, la zona afectada por el calor y el material base, en algunas muestras se aprecian las 3 zonas presentes en el material, mientras que en otras se evidencia la zona afectada y el metal base.

4.1.1 Muestra del Material Base.

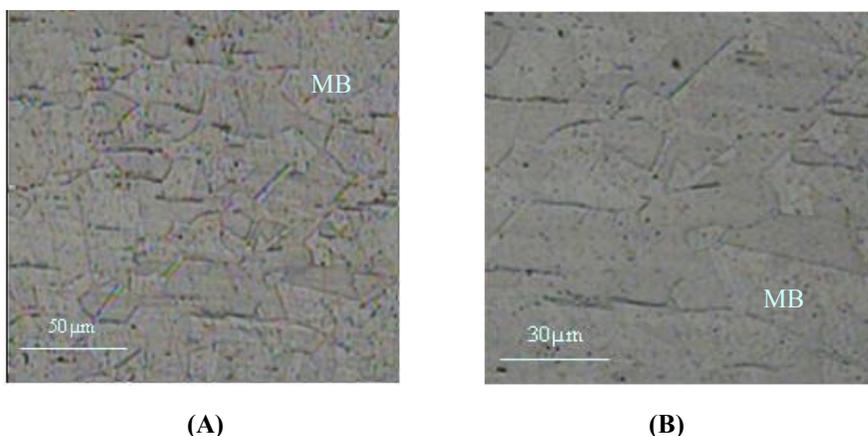


Figura 4.1 Imágenes microscópicas del metal base. A: 200X y B: 400X.

Con la finalidad de comparar la microestructura de las uniones soldadas según cada condición de trabajo con la del material en condición original se preparo



metalográficamente una muestra del metal base (figura 4.1 A y B) donde se observó una matriz austenítica de granos poligonales cuya orientación es aleatoria, estos granos contienen pequeñas inclusiones no metálicas que generalmente son partículas de cromo dispersas. (Lyman, 1972).

4.1.2 Muestras soldadas a condición de trabajo de 60, 68 y 76 Amperios.

Las muestras soldadas a las condiciones de trabajo planteadas revelaron la existencia de las tres zonas características de la soldadura: metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura, ver figura 4.2

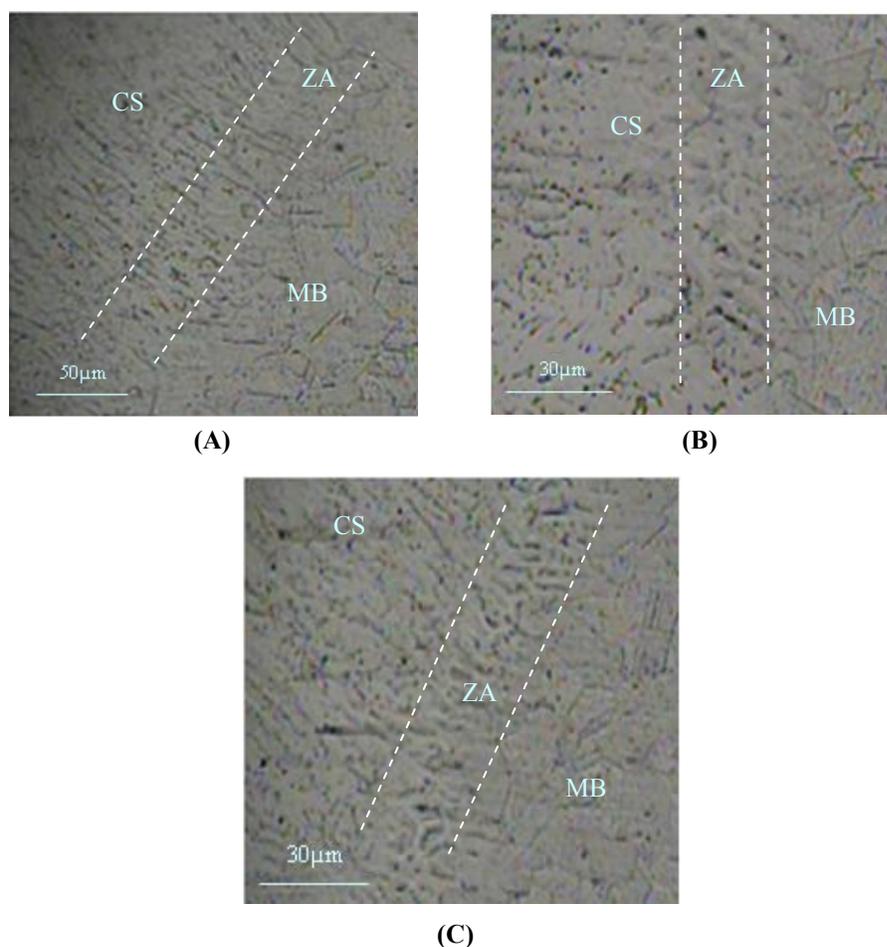


Figura 4.2 Imágenes microscópicas de las tres zonas características de la soldadura a 200X.
A: Condición a 60 Amp, B: Condición a 68 Amp, C: Condición a 76 Amp.

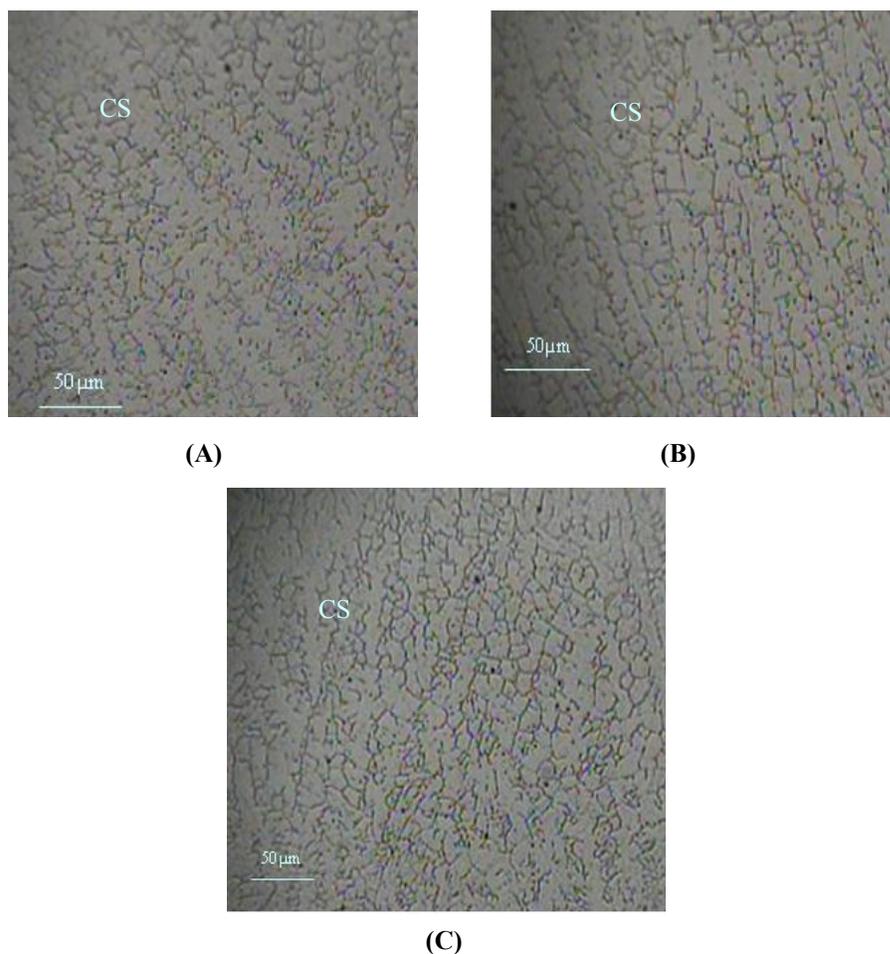


Figura 4.3 Imágenes microscópicas del Cordón de Soldadura a 400X. **A:** Condición a 60 Amp, **B:** Condición a 68 Amp, **C:** Condición a 76 Amp.

En la figura 4.3 A, B y C se pudo observar la formación de la estructura dendrítica debido a la fundición y posterior solidificación rápida del material en la zona del cordón, esta estructura posee granos irregulares que siguen el sentido de solidificación del cordón de soldadura con posibles precipitados de carburo. Esto como consecuencia del proceso de sensibilización que sufre el material ya que durante su tiempo de enfriamiento pasa por el rango comprendido entre 425 °C y 815 °C en donde se produce la precipitación de carburos hacia los límites de grano de la zona fundida ya que el carbono presente en estas fronteras se combina con las partículas de cromo y molibdeno disueltas generando los precipitados. Esta



precipitación de carburos causa a su vez una reducción del cromo en los límites de grano, y si existe una excesiva reducción local de dicho contenido que puede originar la corrosión intercrystalina o intergranular. La temperatura crítica está alrededor de los 650 °C, donde la permanencia por pocos segundos es suficiente para permitir el deterioro del metal (Smith, 1998).

Figueroa, Camero, Prin y Réquiz (2008) hicieron una evaluación de la corrosión inducida por bacteria sulfato reductora en un acero inoxidable 316L soldado mediante un proceso de soldadura de arco con electrodo de tungsteno y atmósfera de gas inerte (TIG), utilizando como material de aporte un electrodo de acero inoxidable 316L bajo una atmósfera inerte de Argón, en dicho estudio se detectó una importante precipitación de carburos del tipo $M_{23}C_6$ y M_6C en el CS y la ZA, como consecuencia de la presencia simultánea de Mo y Cr en la aleación y su especial afinidad con el carbono. De acuerdo con Avner (1964) los carburos ricos en Mo y en Cr, al igual que el Ni, aumentan la dureza y la resistencia al desgaste.

También se pudo observar (figura 4.3) como mientras aumenta la intensidad de corriente de trabajo va aumentando la formación de la estructura dendrítica con precipitados de carburos en los límites de los granos de la matriz austenítica, esto debido a que para la condición de 60 Amp (figura 4.3 A) la fusión alcanzada no permitió una buena unión homogénea entre el metal base y el material de aporte y tampoco se obtuvo un tiempo de enfriamiento que permitiera una más prolongada interrelación atómica entre los elementos químicos de los granos que conforman la matriz. En la figura 4.3 B, se refleja como para la condición de 68 Amp existió una temperatura de fusión y un tiempo enfriamiento más acorde ya que se formó una estructura dendrítica más definida con mayor formación de límites de grano con presencia de carburos. Sin embargo, en la muestra soldada a 76 Amp, representada en la figura 4.3 C, se pudo ver como se produjo una mayor homogenización y un



enfriamiento más lento en la junta que permitió una estructuración dendrítica más compacta con formación de precipitados en los límites de grano.

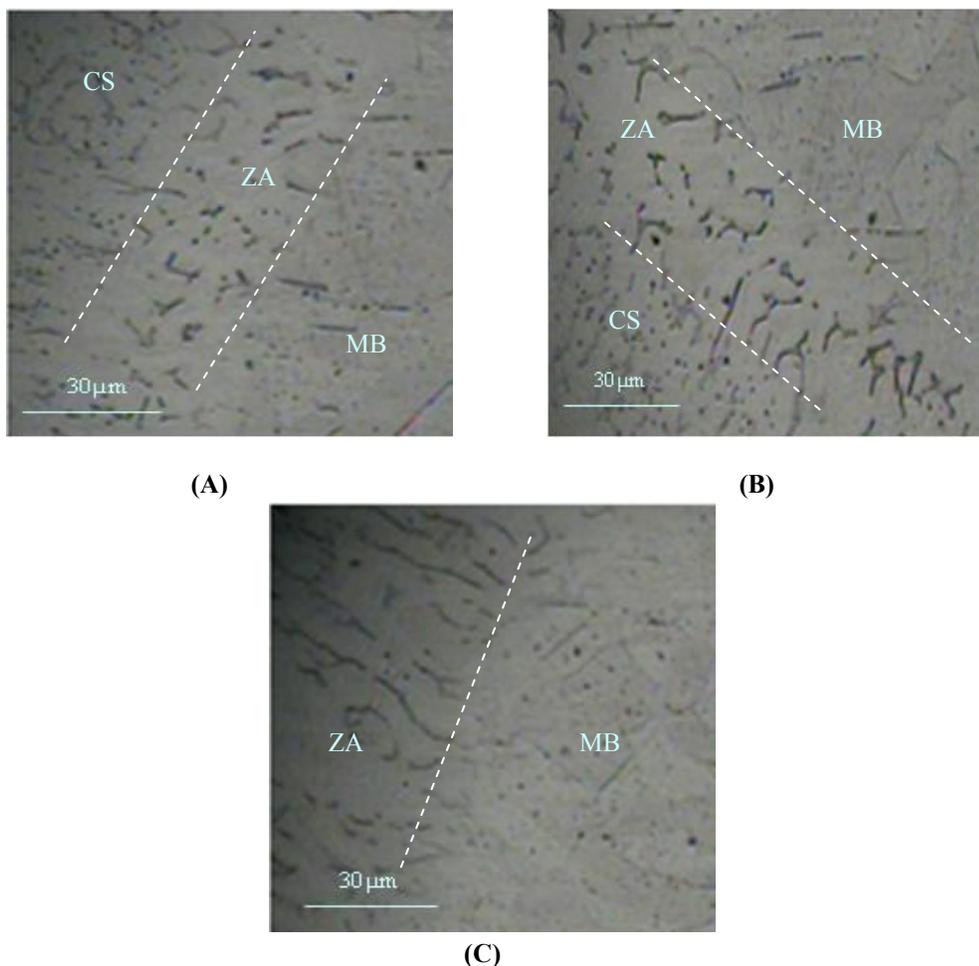


Figura 4.4 Imágenes microscópicas de la Zona Afectada por el calor de la soldadura a 400X.
A: Condición a 60 Amp, **B:** Condición a 68 Amp, **C:** Condición a 76 Amp.

Esta misma tendencia ocurre en la zona afectada por el calor ya que en la figura 4.4 A se aprecia como existe poca formación de granos con estructura dendrítica y de precipitados en los límites de los mismos como consecuencia de que en esta región el material se encuentra en una etapa de transición, y por efectos de la temperatura alcanzada a 60 Amp en la zona de fusión, el calor se propaga generando un reajuste atómico intergranular que no es capaz de vencer todas las uniones



existentes en la matriz; mientras que para la condición de 68 Amp y 76 Amp, figura 4.4 B y figura 4.4 C respectivamente, se observó como estas zonas poseen mayor formación de estructura dendrítica con precipitados en los bordes de los granos mientras mayor es la temperatura de fusión alcanzada para su condición de estudio.

4.2 Resultados del ensayo de tracción.

Tabla 4.1 Resumen de los resultados del ensayo de tracción.

Probeta	% de Alargue	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Esfuerzo de Ruptura (Mpa)	Media (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
1-60	20	435,75	442,64	17,07	601,91	610,01	21,04	558,30	551,50	21,72
2-60	23	431,61			600,53			538,31		
3-60	21	462,64			594,33			559,40		
4-60	31	478,50			638,45			575,27		
5-60	32	437,13			626,73			579,19		
6-60	16	439,89			569,51			534,49		
7-60	39	427,48			623,29			558,26		
8-60	18	428,16			625,35			508,76		
1-68	30	421,27	419,63	8,77	617,77	617,60	14,01	556,46	555,82	22,97
2-68	28	426,10			615,70			583,32		
3-68	46	428,16			634,32			567,50		
4-68	20	428,16			591,57			508,25		
5-68	27	411,62			615,01			576,87		
6-68	39	426,79			633,63			562,86		
7-68	37	410,24			629,49			559,22		
8-68	24	404,72			603,29			532,11		
1-76	23	425,41	434,63	11,05	603,98	611,13	23,52	536,53	555,86	17,42
2-76	24	449,54			614,32			573,58		
3-76	26	427,48			617,77			568,16		
4-76	19	429,54			609,50			561,54		
5-76	37	447,47			634,32			536,48		
6-76	13	447,47			599,84			529,07		
7-76	36	431,61			630,87			573,91		
8-76	37	418,51			623,98			567,64		



Gráficas de Esfuerzo de los ensayos de tracción donde se observó los puntos promedio de los esfuerzos de fluencia, esfuerzo máximo y esfuerzos de ruptura de cada una de las piezas ensayadas.

4.2.1 Presentación grafica comparativa de los valores promedio del Esfuerzo de fluencia, Esfuerzo máximo y Esfuerzo de ruptura de los ensayos de tracción de probetas soldadas a diferentes intensidades.

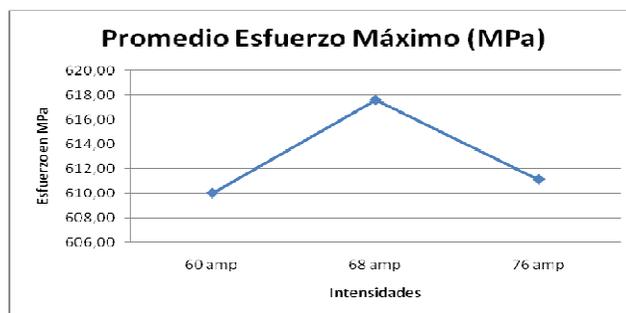


Gráfico 4.1 Promedio de Esfuerzo Máximo a 60, 68 y 76 Amp.

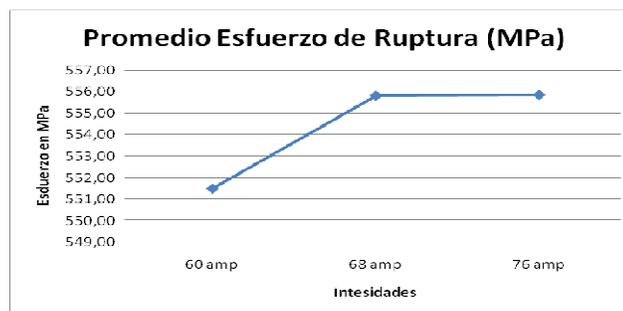


Gráfico 4.2 Promedio de Esfuerzo de Ruptura a 60, 68 y 76 Amp.

4.2.2 Análisis del punto de fluencia en piezas soldadas a diferentes intensidades en los ensayos de tracción.

Inicialmente se estudia la zona de fluencia y el punto máximo de esfuerzo de fluencia o punto donde el material comienza a deformarse de forma elástica.



Se observó que el comportamiento del acero soldado a intensidades de 68 y 76 Amp muestra una ligera tendencia a deformarse elásticamente con menos esfuerzo aplicado que cuando se le aplica esfuerzos de tracción a las piezas soldadas a 60 Amp. Lo que pudo haber ocasionado este comportamiento en el material unido mediante soldadura de arco eléctrico es que según lo observado en la microestructura hay una formación dendrítica bien definida para valores altos de intensidad de corriente y un buen reajuste en la formación intergranular al enfriarse la pieza posterior al proceso de unión por soldeo. Esto permitió que esta unión de metal base y cordón de soldadura quedase mezclada de forma más uniforme, a diferencia de las piezas unidas con 60 Amp que por ser la intensidad de menor rango no es capaz de formar la estructura dendrítica en la matriz austenítica que le dan esa dureza a la unión soldada, (Avner, 1966), lo que hizo que dicha unión tenga un comportamiento dúctil y esto ocasiono que el material retardara su ingreso a la zona de deformación permanente por esfuerzo de tracción aplicado.

Posteriormente se evalúa esfuerzo máximo que soportan las probetas ensayadas antes del evento llamado *deformación permanente*. Se observó que las piezas soldadas a 68 Amp necesitan más esfuerzo de tracción para llegar al estado inicial de deformación permanente a diferencia de las piezas soldadas a 60 y 76 Amp que tienden a deformarse permanentemente con menos esfuerzo de tracción aplicado.

Este comportamiento obedeció a que a la intensidad de trabajo de 68 Amp se presenta la condición más ideal para que en el proceso de soldeo el electrodo de su mejor rendimiento en cuanto a la corriente que fluye a través del mismo que permitió que este se fundiera con el metal base y que la velocidad durante la pasada del cordón de soldadura fuera la más uniforme, lo que permitió una homogénea distribución del material de aporte disminuyendo la probabilidad de que existieran impurezas como incrustaciones de carbono, grietas y fisuras que afectaran el cordón de soldadura debilitando su resistencia a los esfuerzos de tracción. También esta intensidad



permitió una estructuración dendrítica muy compacta y una formación de precipitados en los límites de grano lo que mejora la resistencia del cordón de soldadura. Caso contrario en las intensidades de 60 y 76 Amp ya que como son intensidades de valores extremos se presentaron imperfecciones al momento de realizar la soldadura.

Si la intensidad es la más baja como es el caso de 60 Amp esto ocasiono que el cordón de soldadura no tenga la resistencia esperada, debido a la falta de temperatura necesaria para una buena fusión, lo que dio cabida a la aparición de imperfecciones como los concentradores de esfuerzos y grietas. También hizo que las formaciones dendríticas de la microestructura del cordón no estén bien definidas aunado a la falta de precipitados de carburos y esto desmejora la propiedad de resistencia del cordón de soldadura.

Si por el contrario la intensidad de trabajo es la más alta 76 Amp, esto pudo ocasionar que el electrodo por haber manejado un mayor flujo de intensidad, tienda a fundirse muy rápido, lo que ocasiono que el soldador se viera obligado a variar la velocidad de la pasada para evitar fundir el metal base. Cuando esto ocurrió pudo existir la posibilidad de que el cordón de soldadura no se distribuyera de forma uniforme dando cabida a la posible aparición impurezas o de microcavidades que luego actúan como concentradores de esfuerzo, debilitando la resistencia del cordón de soldadura independientemente de que esté microestructuralmente se observe con presencia de precipitados de carburo y que su formación dendrítica fuera bien definida que le dan buenas propiedades de resistencia al cordón de soldadura.

Por último se observo los valores de esfuerzo de ruptura de las piezas, y se visualizo que las piezas soldadas a la menor intensidad de 60 Amp se facturaron a menos esfuerzo de tracción aplicado que las probetas soldadas a 68 y 76 Amp las cuales soportaron más esfuerzo de tracción para poder llegar a la fractura de las



mismas.

Es un comportamiento que siguió patrones lógicos ya que al trabajar con altas intensidades intrínsecamente se alcanzan temperaturas más elevadas, esto hizo que existiera una mejor fusión cordón-metal base lo que permitió una presencia de precipitados de carburo y una buena definición de estructura dendrítica en el cordón de soldadura lo que mejoró su resistencia y que el proceso de enfriamiento sea más lento lo que permitió una mejor reagrupación intergranular en la zona afectada por el calor lo que mejoró la condición de resistencia a la tracción de esta zona.

Caso contrario cuando se trabajó con la intensidad más baja de 60 Amp donde por falta de amperaje y temperaturas de fusión más bajas hizo que la resistencia a la ruptura de este cordón fuera menor ya que no hay uniformidad en la estructura dendrítica del cordón, y fue muy alta la posibilidad de apariciones de grietas e impurezas en el proceso de soldeo los que debilitó considerablemente la resistencia a la fractura del cordón, aunado a que por alcanzar una temperatura de fusión menor hizo que su proceso de enfriamiento fuera más violento lo que no le dio oportunidad a que se reagrupen mejor la estructura intergranular de la zona afectada por el calor.

4.3 Resultados del ensayo de dobléz.

Los resultados obtenidos con este ensayo permiten calificar cualitativamente la calidad de los cordones de soldadura e indirectamente se evalúa al soldador y el método que sigue esté para soldar. Esto, teniendo en cuenta las características del espesor de lámina, tipo de electrodo usado, intensidades de corriente con que se realizaron las juntas, entre otras cosas, se puede observar si se tuvieron buenas uniones soldadas de trabajo.



Tabla 4.2 Resultados del ensayo de doblez.

Condición	Tipo de ensayo de doblez		Observación
	Raíz	Cara	
60 Amperios	X	-	OK
	X	-	FALLO
	X	-	FALLO
	X	-	FALLO
	-	X	OK
	-	X	OK
	-	X	OK
68 Amperios	X	-	FALLO
	X	-	OK
	X	-	FALLO
	X	-	OK
	-	X	OK
	-	X	OK
	-	X	OK
76 Amperios	X	-	FALLO
	X	-	OK
	X	-	OK
	X	-	OK
	-	X	OK
	-	X	OK
	-	X	OK

Para algunas muestras de acero inoxidable calidad 316L soldadas a las tres condiciones de intensidad de corriente se pudo observar como la soldadura de penetración presento fisuras mayores a 1/8 de pulgada en tres de cuatro muestras de láminas sometidas a doblez de raíz en el caso de la condición de 60 Amp Mientras que en la de 68 Amp se presentaron dos fallas y para 76 Amp solo uno, estos hechos llevo a considerar un resultado negativo en este tipo de ensayo según norma ASTM E 190 - 92. La existencia de esta tendencia esta relacionada con las temperaturas de fusión que se alcanzaron en la zona inferior de la juntas para cada condición ya que en el pase de raíz, además de que se deposito menos cantidad de material que con el



cordón de relleno por razones de área, no se logro la fusión necesaria entre el material base y el material de aporte, lo que pudo permitir la presencia de grietas, fisuras y concentradores de esfuerzos que ayudan a la fractura del material; es decir, mientras mayor fue el amperaje utilizado el cordón de soldadura y el metal base se unen de forma más homogénea, hecho que se pudo constatar con el estudio de la microestructura ya que se observo como se acentúo la estructura dendrítica y la aparición de los precipitados en los bordes de los granos a razón del alza en la corriente entre el rango comprendido entre 60 Amp y 76 Amp.

Otro factor que pudo influir en los resultados es el referente a la velocidad de deposito del cordón de soldadura, esto debido a que con el cordón de relleno se busca ocupar toda la abertura existente entre los metales a unir lo que genera un avance más lento que hace que se mantenga más uniforme la distribución del material de aporte.

4.4 Resultados del Ensayo de Microdureza Vickers.

A continuación se presentan las tablas que contienen los resultados promedios de los ensayos de microdureza Vickers de las probetas ensayadas soldadas a diferentes intensidades.

4.4.1 Muestra del Material Base (MB). Carga = 50gr.

Tabla 4.3 Resultados del ensayo de Microdureza promedio para el Materia Base.

Nº de penetraciones	Zona Derecha	Zona Izquierda
	HV promedio	HV promedio
(1), (4) y (7)	156,40	153,63
(2), (5) y (8)	153,17	151,80
(3), (6) y (9)	155,93	153,07



4.4.2 Muestras soldadas a condición de 60, 68 y 76 Amperios. Carga = 50gr.

Tabla 4.4 Resultados del ensayo de Microdureza promedio para la condición de 60 Amperios.

Nº de penetraciones	Zona Afectada Derecha	Cordón de soldadura	Zona Afectada Izquierda
	HV promedio	HV promedio	HV promedio
(1), (4) y (7)	162,03	169,10	167,63
(2), (5) y (8)	160,80	169,37	163,20
(3), (6) y (9)	163,07	170,33	163,33

Tabla 4.5 Resultados del ensayo de Microdureza promedio para la condición de 68 Amperios.

Nº de penetraciones	Zona Afectada Derecha	Cordón de soldadura	Zona Afectada Izquierda
	HV promedio	HV promedio	HV promedio
(1), (4) y (7)	177,20	187,00	177,60
(2), (5) y (8)	177,47	186,63	175,07
(3), (6) y (9)	179,43	184,87	176,07

Tabla 4.6 Resultados del ensayo de Microdureza promedio para la condición de 76 Amperios.

Nº de penetraciones	Zona Afectada Derecha	Cordón de soldadura	Zona Afectada Izquierda
	HV promedio	HV promedio	HV promedio
(1), (4) y (7)	179,30	186,73	180,50
(2), (5) y (8)	182,10	187,57	179,17
(3), (6) y (9)	185,83	186,70	179,40

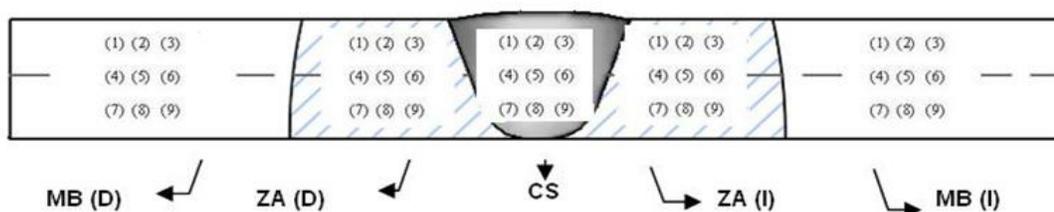


Figura 4.5 Impresiones realizadas sobre las probetas.

Tabla 4.7 Resumen de resultados del ensayo de Microdureza Vickers.

Condición	Zona														
	Metal Base Derecho			Zona Afec. Derecha			Cordón de soldadura			Zona Afec. Izquierda			Metal Base Izquierdo		
	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm	300 μm
60 Amperios	156,40	153,17	155,93	162,03	160,80	163,07	169,10	169,37	170,33	167,63	163,20	163,33	153,63	151,80	153,07
68 Amperios	156,40	153,17	155,93	177,20	177,47	179,43	187,00	186,63	184,87	177,60	175,07	176,07	153,63	151,80	153,07
76 Amperios	156,40	153,17	155,93	179,30	182,10	185,83	186,73	187,57	186,70	180,50	179,17	179,40	153,63	151,80	153,07

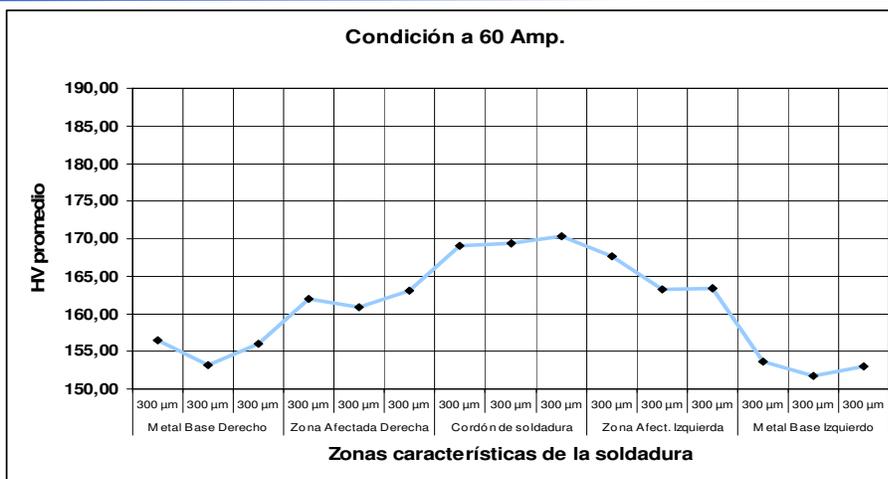


Gráfico 4.3 Resultados del ensayo de microdureza Vickers para la condición de 60 Amp.

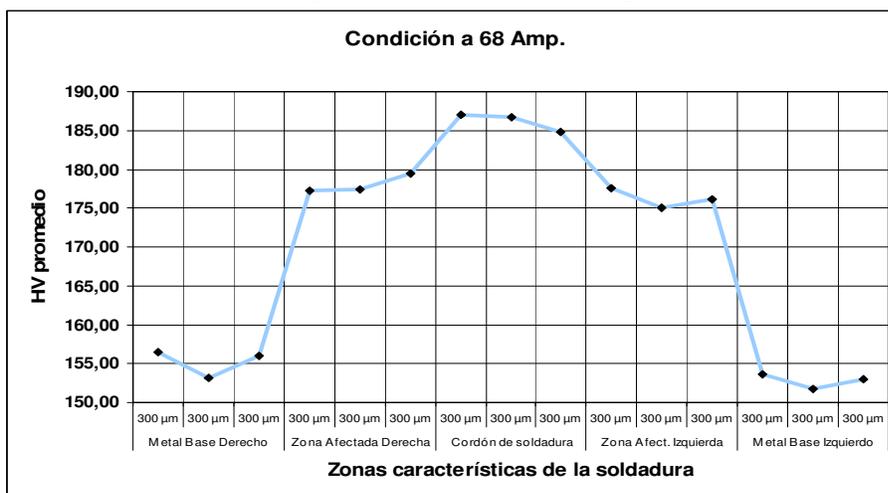


Gráfico 4.4 Resultados del ensayo de microdureza Vickers para la condición de 68 Amp.

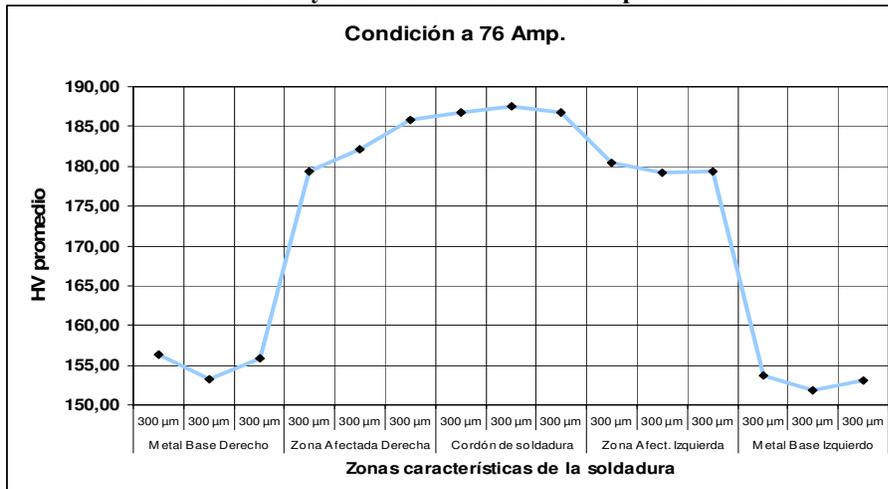


Gráfico 4.5 Resultados del ensayo de microdureza Vickers para la condición de 76 Amp.



En la observación de los gráficos se pudo visualizar como para las tres condiciones de estudio la microdureza en la zona fundida o el cordón de soldadura es mayor que para las otras regiones características, también fue visible como mientras se alejan las huellas de penetración del ensayo de dicha zona hacia el material que no es afectado por el calor, los valores registrados tendieron a disminuir. Estos hechos se debieron a que como se formó la estructura dendrítica y con esta la precipitación de los carburos de mayor a menor grado siguiendo esa trayectoria, como se mostró en las microestructuras estudiadas de cada condición. Estos precipitados tienden a incrementar la microdureza en las fronteras de los granos y la resistencia al desgaste (Avner, 1966), por lo que es lógico haber obtenido un incremento en estos valores.

Como ya se mencionó, esta conducta se vio reflejada para las tres condiciones de estudio, sin embargo, los registros de mayor microdureza se presentaron para las condiciones de 76 Amp y 68 Amp en la zona del cordón de soldadura, las cuales fueron las que mostraron las estructuras dendríticas más formadas y con presencia de precipitados. En las zonas afectadas por el calor de ambas condiciones también se reflejó esta conducta lo que permitió afirmar que para uniones que se solden con amperajes de hasta 76 Amp se obtendrá una mayor microdureza que ocasiona una zona de mayor fragilidad.



CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES

En la unión soldada mientras mayor amperaje, mayor es la cantidad de carburo que precipitó en los bordes de grano de la zona fundida y en menor grado en la zona afectada por el calor, así como también existió una matriz austenítica con estructura dendrítica más homogénea.

Se determinó que el acero inoxidable AISI-316L presenta deficiencias de soldabilidad para bajos amperajes según las condiciones de estudio planteadas debido a no poseer uniformidad en los granos de la matriz austenítica resultante del cordón de soldadura.

Se observó que utilizando altos amperajes existe una mejor reagrupación intergranular de la ZAC, mejor formación detrítica en el cordón de soldadura y mayor presencia de precipitados de carburos que le otorga a la probeta una mayor resistencia a los esfuerzos de tracción.

Los máximos valores de microdureza Vickers se registraron en la zona fundida de la soldadura debido a la velocidad de enfriamiento y los elementos químicos tales como el níquel, cromo, molibdeno entre otros y a la formación de la estructura dendrítica con presencia de carburos en los límites de grano de la matriz austenítica.

Mientras más alta es el amperaje de trabajo, que se alcanza en la condición de 76 Amp y 68 Amp, la unión soldada presenta mayor resistencia debido a que los carburos que se forman en los límites de grano incrementan la dureza de dicha zona.



5.2 RECOMENDACIONES

- Utilizar un ambiente aislado para evitar las posibles corrientes de aire que originen desestabilización en el arco eléctrico durante el proceso de soldadura.
- Estudiar el comportamiento de juntas soldadas por arco manual con electrodos revestidos (SMAW) utilizando amperajes de trabajo mayores y con diferentes espesores de lámina.
- Realizarle estrías a las probetas para el ensayo de tracción en la zona donde la mordaza de la prensa de la máquina hace la sujeción de la pieza, esto para evitar que se deslice mientras se realiza el ensayo.
- Capacitar al personal técnico del Laboratorio de Materiales en el mantenimiento del microscopio óptico utilizado para los estudios y establecer estrictas normas en relación con la obtención de los resultados para evitar que el computador pueda adquirir virus.
- Habilitar mayor disponibilidad de personal técnico, para así contar con supervisión durante la realización de ensayos.
- Reemplazar la lente del microscopio viejo del laboratorio de materiales de la Universidad de Carabobo ya que está dañado y esto dificulta la apreciación de los resultados de los ataques químicos realizados a las probetas.



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Alúmina: Este compuesto por óxido de aluminio anhidro, en combinación con sílice y otros elementos, los feldespatos y arcilla.

Curva esfuerzo-deformación: Es un gráfico experimental de la tensión respecto a la deformación; normalmente se expresa el esfuerzo en el eje de ordenadas y la deformación sobre la abscisa.

Deformación: Es la variación total que experimenta las dimensiones de un cuerpo sometido a la acción de una fuerza uniaxial durante el ensayo de tracción.

Dendrítico: Se le denomina a la estructura que se forma durante la solidificación, son ramificaciones que crecen en diferentes direcciones.

Ductilidad: Es la cantidad de deformación que es capaz de sufrir el material antes de la ruptura.

Escoria: Son residuos no deseados durante el proceso de soldadura.

Esfuerzo de fluencia: La tensión a la cual un material muestra deformación plástica significativa.

Esfuerzo máximo: Es la tensión máxima alcanzada en la curva de esfuerzo vs. deformación.

Ferrita: Es un componente del acero el cual posee un color blancusco, cuya composición es de aproximadamente 99,95% de hierro y el resto de carbono.



Grano: Cristales estructurales que según su tamaño puede representar la zonas de enfriamientos.

Higroscopia: Capacidad del electrodo de absorber humedad.

Indentador: Es un instrumento utilizado para penetrar la superficie del material y obtener la microdureza del mismo.

Martensita: Es una estructura de gran dureza que se le atribuye por ser una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro α (ferrita).

Metalurgia: Estudio de la estructura de distintos materiales y aleaciones.

Metal base: Material que no ha sido afectado por el ciclo térmico.

Microscopía óptica: Es una técnica avanzada que se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar las características estructurales microscópicas (microestructura).

Perlita: Consiste en una serie de cementita (Fe_3C) en una matriz de ferrita y su estructura recuerda a la de una huella digital.

Recristalización: Proceso por el cual un metal trabajado en frío es calentado a una temperatura suficientemente alta y durante un intervalo de tiempo suficiente como para formar una nueva estructura de granos libre de deformaciones.

Salpicadura: Son pequeños puntos de metal que salpican y se depositan durante el proceso de soldadura en las cercanías del cordón.



Socavación: Es un defecto producido cuando no se aplica suficiente material de aporte o cuando éste se aplica incorrectamente.

Soldabilidad: Es la capacidad del acero de ser soldable, es decir si puede unirse sin dificultad excesiva a otra pieza de metal base.

Zona afectada por el calor: Material cercano a la zona de fusión que ha sido afectada térmicamente.



REFERENCIAS

- American Welding Society (1996). *Manual de Soldadura*. Tomo IX. 8va Edición. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
- Avner. S (1964). *Introducción a la Metalurgia Física*. Mexico: Editorial McGraw – Hill.
- Bello, J. F. (2006). *Evaluación metalúrgica de juntas de acero inoxidable 316L empleando proceso GMAW*. Universidad de Carabobo. Trabajo de Grado.
- Domínguez. A (1991). *Soluciones para procesos de soldadura*. Recuperado el 18 de Junio de 2008, de <http://w.w.w.soldanet.com.ar>
- Figueroa. Y, & Camero, S, & Prin. J, & Réquiz, R. (2008, Junio). *Evaluación de la corrosión inducida por bacteria sulfato reductora en un acero inoxidable 316L*. *Revista. Latinoamérica de Metalurgia y Materiales*. [online], vol.28, no.1. Recuperado el 18 Julio 2009, p.60-72, de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522008000100008&lng=es&nrm=iso
- Hernández, D. Vera, J (2007). *Evaluación de las propiedades mecánicas y metalurgia en uniones soldadas de un acero al carbono 1010 sometidas a diferentes condiciones de hidrógeno inducido*. Universidad de Carabobo. Trabajo de Grado.



- Inversiones Arco Metal, C.A. (2006). *Catalogo de productos*. Recuperado el 15 de Mayo de 2008, de <http://www.arcometal.com.ve/productos.asp>
- Lyman, T (1972). *Metals handbook: Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*. Vol. 7. 8^{va} edición. American Society for Metals, Ohio.
- Horwitz, H. (1990). *Soldadura, aplicaciones y práctica*. 3^{era} edición. Mexico: Editorial Alfaomega.
- Reed - Hill, R. (1971). *Principios de metalurgia física*. 2^{da} edición. Princenton, New jersey: D. Van Nostrand Company, Inc.
- Salas, J. Sucre, J. (2006). *Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de uniones de soldadura mediante los procesos SMAW y SAW en los aceros ASTM A-36 y ASTM A-516-70*. Universidad de Carabobo. Trabajo de Grado.
- Smith, W. (1998). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 3^{era} edición. Madrid: Mc Graw Hill.
- Jimenez, A. (2007). *Soldabilidad de los aceros inoxidable*. Recuperado el 18 de julio de 2009, de http://www.dimf.upct.es/personal/JB_A/Tema_8.pdf
- ThyssenKrupp Aceros y Servicios S.A. (2007). *Catalogo Comercial*. Recuperado el 18 de julio de 2009, de <http://www.thyssenkrupp.cl/Documentos/fichasT/Aceros%20Inoxidables/AIS1%20316-316L.pdf>



SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

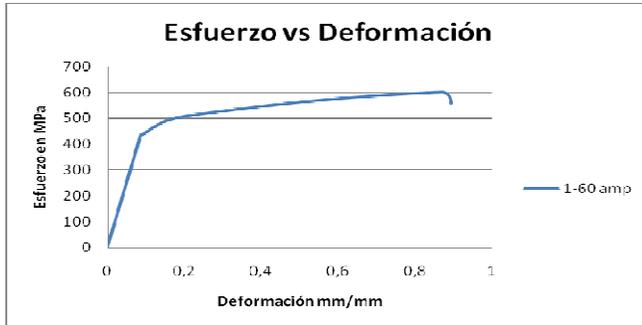
Variables	Descripción
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de hierro y acero)
Amp	Amperio
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de ensayos y materiales)
AWS	American Welding Society (Sociedad Americana de soldadores)
C	Carbono
C.A.	Corriente alterna
C.C.	Corriente continua
C.C +	Polaridad directa (electrodo +)
C.C -	Polaridad inversa (electrodo -)
cm	Centímetros
Cr	Cromo
CS	Zona fundida o cordón de soldadura
Cu	Cobre
d_c	Longitud del cordón de soldadura
d	Diagonal de la huella piramidal de base cuadrada
dob	Doblez
HV	Microdureza Vickers
gr	Gramos
I	Intensidad de corriente
J	Joule, unidad de trabajo
KJ	Kilo joule, unidad de trabajo
MB	Metal base



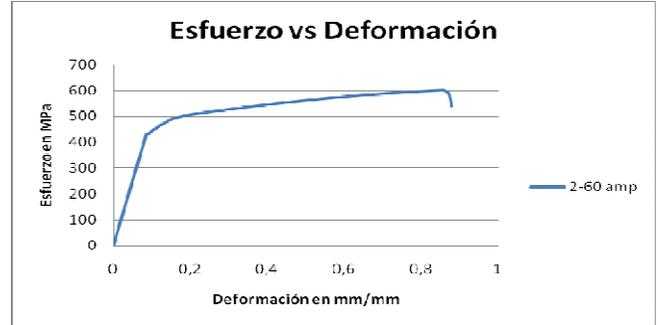
mic	Microscopía óptica
mm	Milímetros
min	Minutos
MPa	Mega pascal = pascal x 10 ⁶
Mo	Molibdeno
Mn	Manganeso
Ni	Níquel
P	Fósforo
<i>P_e</i>	Penetración
S	Azufre
s	Segundos
Si	Silicio
SMAW	Shielded Metal Arc Welding (Soldadura por arco con electrodo revestido)
<i>t</i>	Tiempo que tarda en recorrer la longitud del cordón de soldadura
trac	Tracción
<i>v_p</i>	Velocidad de pasada
v	Ancho de pieza para realizar probetas de doblado
Volt	Voltios
ZAC	Zona afectada por el calor
σ_F	Esfuerzo de fluencia
$\sigma_{Máx}$	Esfuerzo máximo
σ_R	Esfuerzo de ruptura



Curvas de Esfuerzo vs Deformación de cada probeta a condición de 60 Amp.



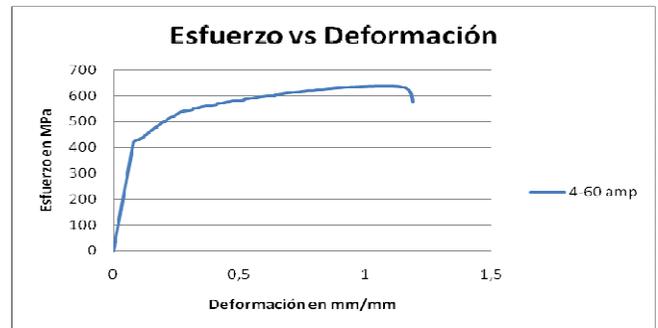
1era pza a 60 amp



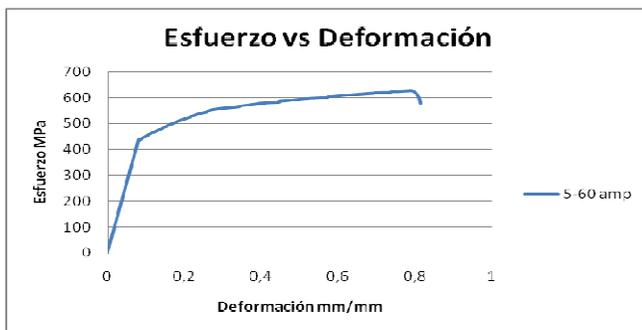
2da pza a 60 amp



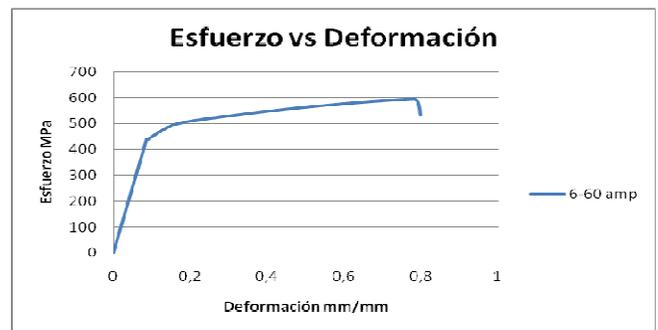
3era pza a 60 amp



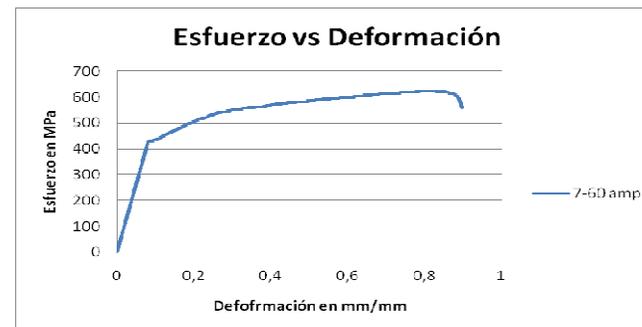
4ta pza a 60 amp



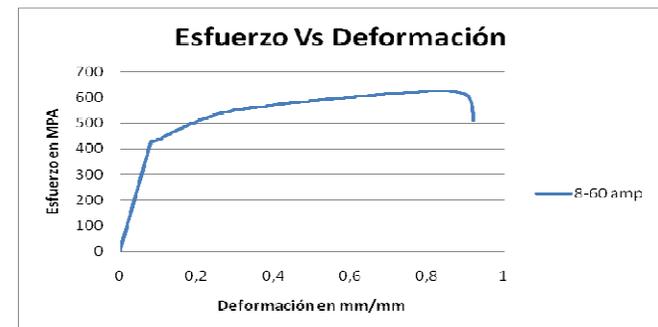
5ta pza a 60 amp



6ta pza a 60 amp



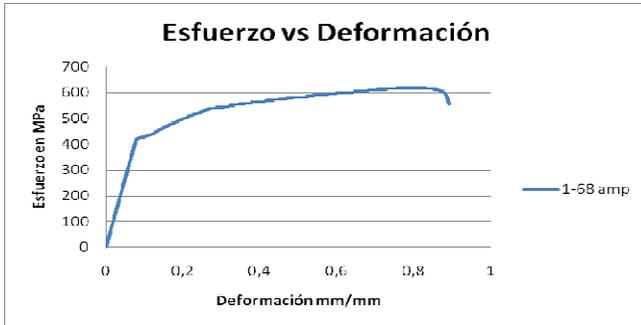
7ma pza a 60 amp



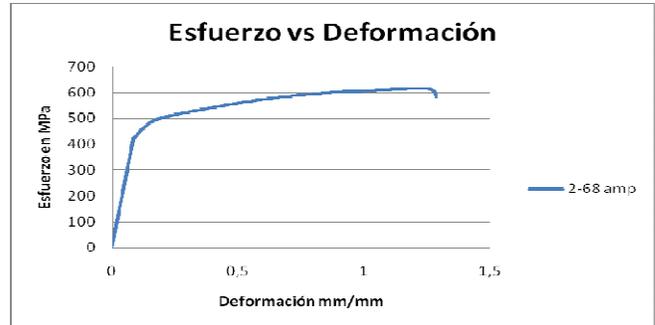
8va pza a 60 amp



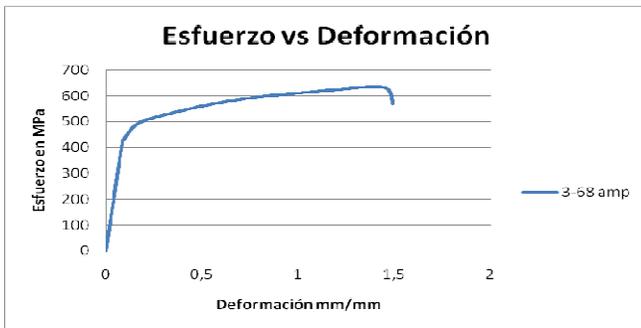
Curvas de Esfuerzo vs Deformación de cada probeta a condición de 68 Amp.



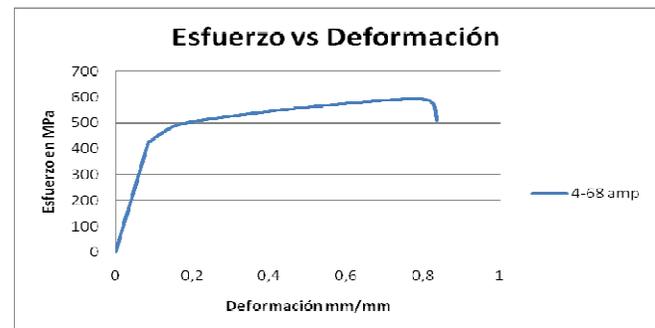
1era pza a 68 amp



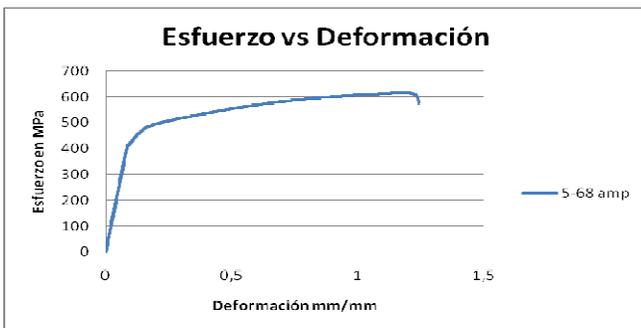
2da pza a 68 amp



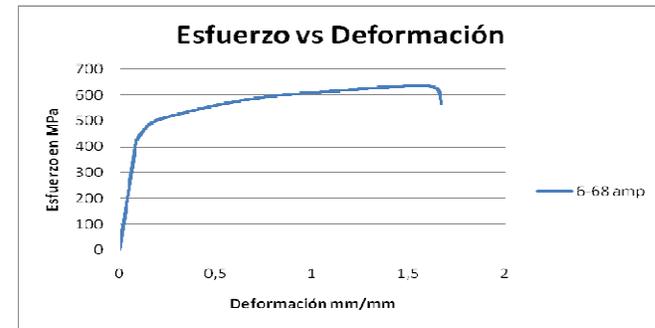
3era pza a 68 amp



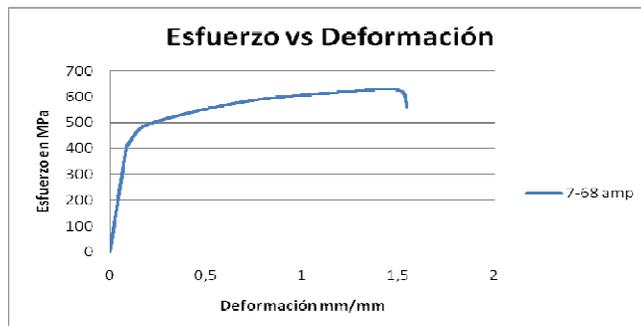
4ta pza a 68 amp



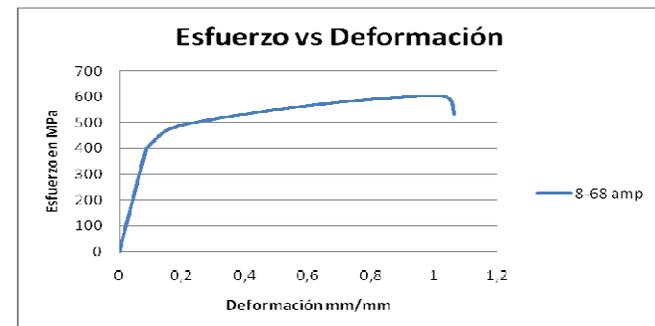
5ta pza a 68 amp



6ta pza a 68 amp



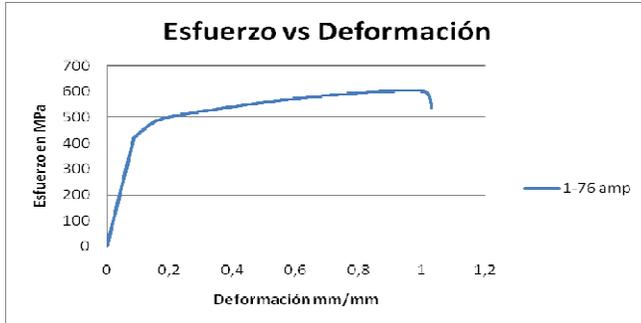
7ma pza a 68 amp



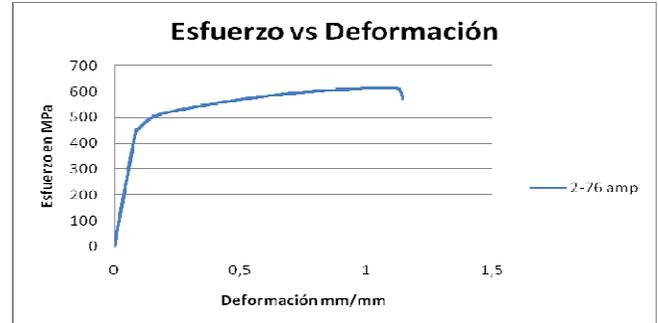
8va pza a 68 amp



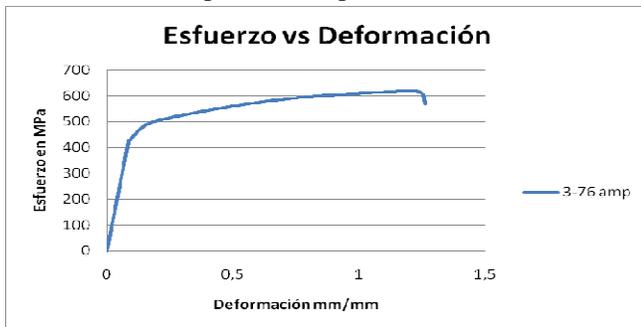
Curvas de Esfuerzo vs Deformación de cada probeta a condición de 76 Amp.



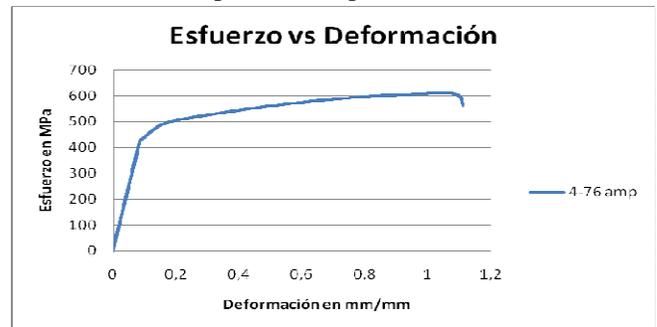
1era pza a 76 amp



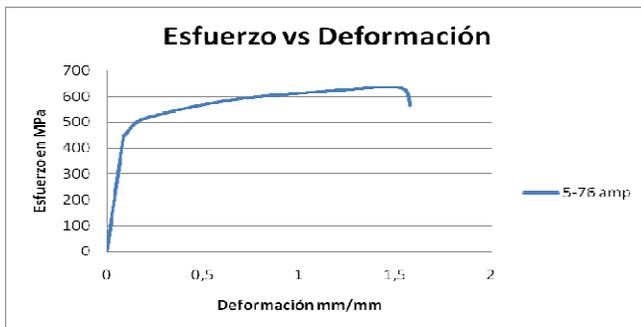
2da pza a 76 amp



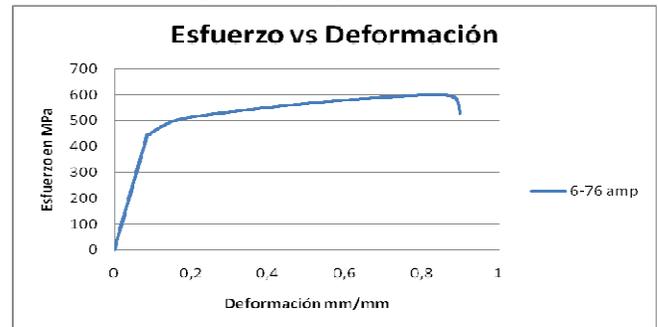
3era pza a 76 amp



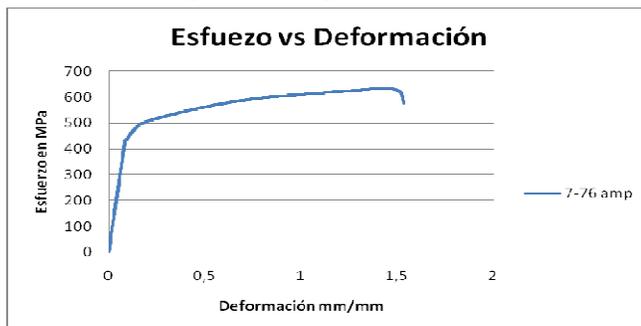
4ta pza a 76 amp



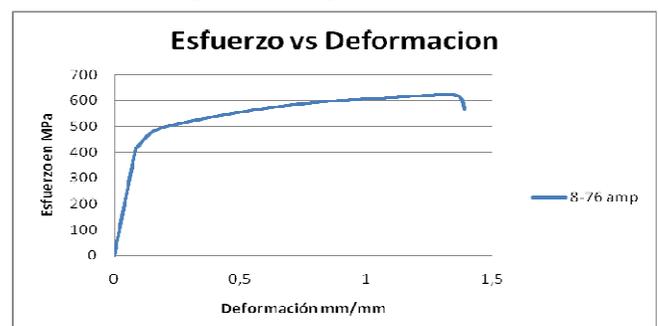
5ta pza a 76 amp



6ta pza a 76 amp



7ma pza a 76 amp



8va pza a 76 amp

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
COORDINACIÓN DE PROYECTOS DE GRADO**

SINOPSIS DEL PROYECTO

TÍTULO DEL TRABAJO:

“Evaluación del comportamiento mecánico de uniones soldadas de acero inoxidable austeníticos 316L mediante proceso de soldadura por arco manual con electrodos revestidos (SMAW) a diferentes intensidades.”

FECHA DE INICIO DE TRABAJO: 02-2008

FECHA DE EX. FINAL: 08-2009

FECHA DE ENTREGA DE EJEMPLARES DEFINITIVOS A DIRECCIÓN DE ESCUELA: _____

SINOPSIS: El objetivo principal de este trabajo fue evaluar las propiedades mecánicas y metalurgia en uniones soldadas de un acero inoxidable austenítico 316L sometidas a unión por medio de soldadura de arco eléctrico (SMAW) a diferentes intensidades. Para la realización de este estudio se emplearon láminas de 5 mm de espesor sobre las cuales se depositaron cordones de soldadura utilizando electrodos de acero inoxidable 316L y posteriormente se le aplicaron ensayos destructivos como tracción, doblez y microdureza Vickers, igualmente se evaluó la microestructura mediante un estudio de microscopía óptica. A medida que se incrementa la intensidad en el proceso de soldadura existió una mejora en las propiedades mecánicas (esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, máxima deformación y microdureza) debido a que existe mayor formación de precipitados de carburos y una buena distribución de estructura dendrítica en el cordón de soldadura. Además se comprobó que en la zona afectada por el calor cuando se trabajó con intensidades altas, las temperaturas de fusión cordón-metal base fueron las más altas también, lo que hizo que el tiempo de enfriamiento de la probeta fuese más lento lo que permitió un mejor reagrupamiento de la estructura intergranular de esta zona presentando mejores propiedades mecánicas.

CÉDULA DE IDENTIDAD

16.405.439

14.297.535

ESTUDIANTES

GARRIDO LUIS A.

NAVARRO LEONARDO.

FIRMA

FIRMA

PROFESOR GUÍA: PORRELLO ARGEL

JURADO: OSWALDO URBANO

JURADO: CARMELO TORRES