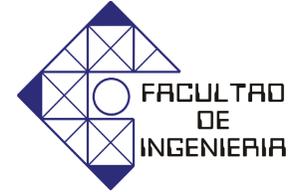




UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS PARA REALIZAR SOLDADURA EN ACERO INOXIDABLE AISI 304 A TRAVÉS DEL PROCESO TIG

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Autores:

Gamboa, Daniel

Rosales, Jorge

Naguanagua, 9 de Junio de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS PARA REALIZAR SOLDADURA EN ACERO INOXIDABLE AISI 304 A TRAVÉS DEL PROCESO TIG

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Tutor académico:
Franklin Camejo. *Ing.*

Autores:
Gamboa, Daniel.
Rosales, Jorge.

Naguanagua, 9 de Junio de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS PARA REALIZAR SOLDADURA EN ACERO INOXIDABLE AISI 304 A TRAVÉS DEL PROCESO TIG

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Gamboa, Daniel.

Rosales, Jorge.

Naguanagua, 9 de Junio de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada ***“Determinación de los parámetros óptimos para realizar soldadura en acero inoxidable AISI 304 a través del proceso TIG”***, presentada por los bachilleres: **Daniel Gamboa** y **Jorge Rosales**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **18004985** y **15661636**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Franklin Camejo, *Ing.*
Presidente del jurado

Prof. Carmelo Torres, *Ing.*
Miembro del jurado

Prof. Oswaldo Urbano, *Ing.*
Miembro del jurado

En Naguanagua a los 9 días del mes de Junio de 2009

Agradecimientos

A Dios Todopoderoso, por estar siempre presente, por ayudarme en todo momento y por darme las fuerzas para seguir adelante.

A mi madre y padre, a quienes les debo el ser hoy en día un profesional y su apoyo incondicional en todo momento, especialmente a mi madre quien durante toda mi vida me ha apoyado en todos los pasos de mi desarrollo. Y a mi novia por contribuir en todo momento.

Y quiero expresar, sin tomar en consideración un orden específico, mi más sincero agradecimiento a mi tutor, el Profesor Franklin Camejo, por sus consejos, guía y sugerencias durante el desarrollo de éste trabajo de investigación, de igual manera agradezco al Profesor David Ojeda, quien en todo momento durante el desarrollo de la investigación, estuvo atento y prestó toda su colaboración, orientación y dirección académica, y al Profesor Juan Carlos Pereira quien nos prestó su colaboración en los momentos críticos del proyecto de grado.

Daniel Gamboa

Agradecimientos

A Dios primero que nada, por estar conmigo en cada paso que doy, por iluminar mi mente y haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante el periodo de estudio.

A mi madre, a quien le debo el ser que soy hoy en día, por ser mi fortaleza y brindarme cada día su apoyo incondicional en cada uno de mis pasos. De igual forma a mi padre y toda mi familia, quienes me apoyaron en todo momento y creyeron en mí sin dudar quien soy. A mis amigos y compañeros, quienes de cada uno he aprendido algo para bien.

También quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a quienes estuvieron vinculados de alguna manera con este trabajo de investigación: al profesor Franklin Camejo, por su guía y sugerencias durante el desarrollo de éste trabajo de investigación, al profesor Juan Carlos Pereira por prestarnos su colaboración en momentos de apremio, y a todas esas personas que de alguna manera nos apoyaron en la realización de ésta tesis.

Forge Rosales

Resumen

El presente trabajo titulado: **“Determinación de los parámetros óptimos para realizar soldadura en acero inoxidable AISI 304 a través del proceso TIG”**, esta dirigido al estudio de juntas de acero inoxidable AISI 304 mediante el proceso de soldadura TIG. Donde se evalúa la intensidad de corriente eléctrica y el flujo de gas inerte como parámetros de soldadura, y se analiza la influencia de dichas variables en las propiedades del material a soldar, a través de ensayos de tracción, dureza y microscopía óptica, con la finalidad de determinar los parámetros más adecuados para realizar éste tipo de soldadura en láminas de acero inoxidable AISI 304 de 3mm de espesor. Se determina el número de probetas a utilizar según la norma AWS, tomando en cuenta el número de ensayos a realizar para obtener los parámetros de trabajo. Se desarrolla una metodología donde se describen los pasos a seguir para alcanzar los objetivos planteados. Posteriormente se realiza la preparación de las probetas para los ensayos de tracción, dureza y microscopía, y los resultados obtenidos de cada uno de ellos, siendo éstos mostrados en tablas y gráficos, obteniéndose así las propiedades mecánicas para éste tipo de material, para posteriormente realizar los respectivos análisis, demostrando que la intensidad de corriente adecuada para realizar la unión de éste material a través del proceso de soldadura TIG es de 140 A, con 10 L/min de flujo de gas inerte, debido a que con éstos parámetros se obtienen las mejores propiedades mecánicas y microestructurales de las juntas soldadas.

Índice de figuras

1.1	Máquina de soldadura múltiple	4
2.1	Partes del cordón de soldadura	18
2.2	Tipos de soldadura a tope	20
2.3	Tipos de soldadura en ángulo	21
2.4	Esquema de soldadura TIG	24
2.5	Flujo de electrones en polaridad directa	27
2.6	Flujo de electrones en polaridad inversa	28
2.7	Flujo de electrones en corriente alterna	29
2.8	Preparación del tungsteno para corriente directa	32
2.9	Preparación del tungsteno para corriente alterna	32
2.10	Efectos logrados por la purga raíz	35
2.11	Pedal	36
2.12	Antorcha y sus componentes	37
2.13	Equipos de la bombona de gas	37
2.14	Bombona de gas	37
2.16	Forma correcta de comenzar el arco en soldadura TIG	39
2.16	Ubicación de la varilla de aporte	40
2.17	Ángulo de la varilla de aporte y soplete	40
2.18	Defectos de soldadura	44
3.1	Difusores	50
3.2	Mantenimiento y limpieza de la máquina de soldadura múltiple	51
3.3	Bombona de argón	51
3.4	Varilla de tungsteno	52
3.5	Dimensiones de la probeta a utilizar en soldadura	56
3.6	Dimensiones de la lámina de materia prima	57
3.7	Fresadora marca INDUMA	58
3.8	Dimensiones de la probeta para la caracterización	59
3.9	Cordón de soldadura	59

3.10	Proceso de unión	60
3.11	Cortadora de cinta	60
3.12	Máquina de ensayo de tracción	64
3.13	Microscopio óptico	66
3.14	Equipos de preparación metalográfica	67
3.15	Máquina de ensayo de dureza	68
4.1	Ensayo de tracción para caracterización del material	73
4.2	Probetas de tracción para los ensayos de soldadura	75
4.3	Esfuerzo de fluencia vs. número de ensayos	78
4.4	Esfuerzo máximo vs. número de ensayos	79
4.5	Esfuerzo de ruptura vs. número de ensayos	79
4.6	Ensayo 1 Tracción. 140A y 7 L/min.	80
4.7	Ensayo 2 Tracción. 140A y 10 L/min.	80
4.8	Ensayo 3 Tracción. 140A y 14 L/min.	81
4.9	Ensayo 4 Tracción. 130A y 7 L/min.	81
4.10	Ensayo 5 Tracción. 130A y 10 L/min.	82
4.11	Ensayo 6 Tracción. 130A y 14 L/min.	82
4.12	Ensayo 7 Tracción. 120A y 7 L/min.	83
4.13	Ensayo 8 Tracción. 120A y 10 L/min.	83
4.14	Ensayo 9 Tracción. 120A y 14 L/min.	84
4.15	Ensayo 10 Tracción. 70A y 2.5 L/min.	84
4.16	Microestructura del material, condición original	85
4.17	Ensayo 1 Microscopía. 140A y 7 L/min.	86
4.18	Ensayo 2 Microscopía. 140A y 10 L/min.	87
4.19	Ensayo 3 Microscopía. 140A y 14 L/min.	88
4.20	Ensayo 4 Microscopía. 130A y 7 L/min.	89
4.21	Ensayo 5 Microscopía. 130A y 10 L/min.	90
4.22	Ensayo 6 Microscopía. 130A y 14 L/min.	91
4.23	Ensayo 7 Microscopía. 120A y 7 L/min.	92
4.24	Ensayo 8 Microscopía. 120A y 10 L/min.	93
4.25	Ensayo 9 Microscopía. 120A y 14 L/min.	94
4.26	Ensayo 10 Microscopía. 70A y 2.5 L/min.	95
4.27	Penetración del cordón de soldadura	96
4.28	Zonas de penetración	97
4.29	Dureza en el cordón de soldadura vs. número de ensayos	98
4.30	Dureza en la zona afectada por el calor vs. número de ensayos	99

Índice general

Índice general	i
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Introducción	1
CAPÍTULO 1 Planteamiento del Problema	3
1.1 Situación problemática, 3	
1.3 Objetivos, 5	
1.3.1 <i>Objetivo general</i> , 5	
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> , 5	
1.4 Justificación, 6	
1.5 Alcance, 6	
1.6 Limitaciones, 7	
1.7 Antecedentes, 7	
CAPÍTULO 2 Marco Teórico	11
2.1 Acero inoxidable, 11	
2.2.1 <i>Aceros inoxidables austeníticos</i> , 12	
2.2 Procesos de fabricación, 15	
2.3 Soldadura, 16	
2.3.1 <i>El cordón de soldadura</i> , 17	
2.3.2 <i>Tipos de uniones</i> , 19	
2.3.3 <i>Clasificación de los procesos de unión por soldadura</i> , 21	
2.3.4 <i>Soldadura TIG</i> , 23	

2.3.5 Defectos de la soldadura, 42		
2.4 Preparación de los ensayos de materiales, 43		
2.4.1 Los ensayos destructivos, 44		
2.4.2 Los ensayos no destructivos, 48		
CAPÍTULO 3	Marco Metodológico	49
3.1 Nivel de la investigación, 49		
3.2 Diseño de la investigación, 49		
3.3 Metodología a emplear para los ensayos, 53		
3.3.1 Revisión bibliográfica, 53		
3.3.2 Definición de parámetros operativos, 54		
3.3.3 Puesta a punto de la máquina, 55		
3.3.4 Definición del número de probetas, 56		
3.3.5 Definición de la cantidad de materia prima, 57		
3.3.6 Realización de probetas para la caracterización, 58		
3.3.7 Realización de probetas para la soldadura, 59		
3.4 Determinación de las propiedades mecánicas y microestructurales, 62		
3.5 Presentación de los resultados obtenidos, 68		
3.6 Selección de la mejor junta, 69		
CAPÍTULO 4	Resultados Obtenidos	71
4.1 Ensayo de tracción, 71		
4.1.1 Caracterización del material, 71		
4.1.2 Ensayos de probetas de soldadura, 73		
4.2 Ensayo de microscopía óptica, 85		
4.2.1 Caracterización del material, 85		
4.2.2 Ensayos de probetas de soldadura, 85		
4.3 Ensayo de dureza, 96		
4.3.1 Caracterización del material, 96		
4.3.2 Ensayos de probetas de soldadura, 97		
CAPÍTULO 5	Análisis de Resultados	101
5.1 Caracterización del material, 101		
5.2 Ensayos de probetas de soldadura, 102		
Conclusiones y Recomendaciones		107
Bibliografía		
Anexos		

Índice de tablas

2.1	Clasificación AISI de los aceros inoxidable	12
2.2	Influencia de las propiedades en la soldadura de aceros inoxidable austeníticos comparados con el acero al carbono	13
2.3	Composición química	14
2.4	Tipos de corriente para diversos materiales	29
2.5	Listado de electrodos de tungsteno	31
2.6	Corriente admisible por diámetro de electrodo	33
2.7	Gases de protección para diversos materiales	35
3.1	Pruebas piloto	53
3.2	Combinaciones a utilizar para los ensayos de soldadura	54
3.3	Parámetros para realizar soldadura TIG en acero inoxidable AISI 304	55
3.4	Elementos faltantes y defectuosos del equipo	56
3.5	Nomenclatura de ensayos y probetas	61
4.1	Dimensiones de la probeta de tracción para caracterización	71
4.2	Fuerzas, % de elongación y % de reducción del área del acero inoxidable AISI 304 para la caracterización del material	72
4.3	Esfuerzos mecánicos del acero inoxidable AISI 304 para la caracterización del material	72
4.4	Propiedades mecánicas teóricas del acero inoxidable AISI 304	72
4.5	Dimensiones de la probeta de tracción para soldadura	73
4.6	Fuerzas, % de elongación y % de reducción del área del acero inoxidable AISI 304 para soldadura	75
4.7	Esfuerzos mecánicos del acero inoxidable AISI 304 para la soldadura	76
4.8	Esfuerzos mecánicos promedio por ensayo del acero inoxidable AISI 304 para los ensayos de soldadura	78
4.9	Dureza del acero inoxidable AISI 304 en caracterización	96

4.10	Dureza del acero inoxidable AISI 304 en el cordón de soldadura	97
4.11	Dureza del acero inoxidable AISI 304 en la zona afectada por el calor	97

Introducción

La estructura del presente trabajo de investigación, abarca V capítulos destinados al estudio de los procesos de conformado de materiales metálicos. En el capítulo I se plantea y formula el problema y los objetivos de la investigación, los cuales están enfocados a la determinación de los parámetros óptimos de soldadura en acero inoxidable AISI 304 a través del proceso TIG, en láminas de 3mm de espesor; para posteriormente realizar ensayos de tracción, dureza y metalografía con el fin de evaluar la influencia de la intensidad de corriente y el flujo de gas inerte sobre las propiedades mecánicas y microestructurales del material a soldar.

Seguidamente se desarrolla el capítulo II, en el mismo se exponen los fundamentos teóricos y prácticos del proceso de soldadura TIG. En el capítulo III se describe la metodología utilizada para alcanzar los objetivos planteados. En el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las juntas soldadas, en forma de tablas y gráficas para así documentar el análisis de dichos resultados en el capítulo V, y por último se procede a concluir con base en el análisis anterior, demostrando que la intensidad de corriente adecuada para realizar la unión de éste material a través del proceso de soldadura TIG es de 140 A, con 10 L/min de flujo de gas

2 *Determinación de los parámetros óptimos para realizar soldadura en acero inoxidable AISI 304 a través del proceso TIG.*

inerte, debido a que con éstos parámetros se obtienen las mejores propiedades mecánicas y microestructurales de las juntas soldadas.

CAPÍTULO 1

Planteamiento del Problema

1.1 Situación problemática

La Universidad de Carabobo es una de las instituciones de educación superior más importantes establecidas en Venezuela en la región central del país. Cumpliendo con la misión de crear, desarrollar e impartir conocimientos innovadores, competitivos y socialmente pertinentes para la formación ética e integral de profesionales altamente calificados, con sentido ciudadano, promotores de cambios sociales, políticos y económicos.

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo es responsable de formar profesionales capaces y útiles para el país, en los niveles de estudios de pregrado y postgrado de las diferentes ramas de la Ingeniería (Mecánica, Civil, Eléctrica, Química e Industrial) para ello cuenta con una estructura física dotada de tecnología, con miras a modernizarse y adecuarse para cumplir las funciones de docencia, investigación y extensión.

Para cumplir dichas actividades se requiere que las maquinarias y equipos de los laboratorios y talleres de dicha facultad se encuentren en su correcto estado operativo, hecho que no se aprecia en la máquina de soldadura TIG del taller metalmecánico perteneciente a la escuela de

ingeniería mecánica. Éste taller es el lugar principal para el desarrollo de prácticas que vinculan al estudiante de ingeniería mecánica e industrial con los diferentes procesos de fabricación, entre ellos los procesos de unión por soldadura. En la actualidad en éste taller sólo se están realizando prácticas referidas a la soldadura



Figura 1.1 Máquina de Soldadura Múltiple

por arco eléctrico con electrodo revestido y a la soldadura por resistencia eléctrica de electropunto, siendo esto de gran preocupación ya que los equipos utilizados para las demás prácticas se han ido deteriorando progresivamente debido a la falta de uso y abandono de los mismos. Entre éstos tenemos al equipo de soldadura TIG o GTAW (gas tungsten arc welding), éste equipo además de encontrarse en estado de abandono no cuenta con los estudios necesarios para la realización de prácticas que fomenten el crecimiento intelectual del estudiante de ingeniería mecánica, entonces, ¿La determinación de los parámetros óptimos para realizar soldadura TIG en la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo podrá beneficiar de alguna manera a los estudiantes de ingeniería mecánica de dicha facultad?. La respuesta a ésta pregunta es SI, ya que dicha información puede ser utilizada como punto de partida para la creación de un banco de datos teóricos que en tiempos futuros no muy lejanos, permitan la realización de prácticas e investigaciones en el área de soldadura TIG, acercando más al estudiante con los procesos de fabricación que día tras día y de forma tan cotidiana se encuentra en el desarrollo de su ámbito profesional.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar los parámetros óptimos para realizar soldadura en acero inoxidable AISI 304 a través del proceso TIG.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar los elementos necesarios para la puesta a punto de la máquina de soldadura múltiple del taller metalmecánico de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad de Carabobo para la realización de soldadura TIG.
- Determinar las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 a utilizar en estado de entrega
- Determinar las propiedades mecánicas de las juntas soldadas a través de ensayos mecánicos y microestructurales.
- Determinar la intensidad de corriente adecuada para soldar acero inoxidable AISI 304 a través del proceso TIG.
- Determinar el flujo de gas adecuado para soldar acero inoxidable AISI 304 a través del proceso TIG.

1.3 Justificación

En la actualidad el proceso de soldadura TIG (Gas Inerte con electrodo de Tungsteno) se ha venido implementando con mayor frecuencia en la industria metalmecánica debido a la posibilidad de soldar materiales que anteriormente no se podían soldar mediante otros métodos o que eran de espesores muy finos, aparte éste proceso genera mejores uniones gracias a la atmósfera protectora que brinda la utilización del gas inerte.

Por ello surge la inspiración de crear un banco de datos teórico que contenga información sobre los parámetros óptimos para realizar soldadura TIG en la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo, ya que dicha información puede ser utilizada para desarrollar nuevos métodos de enseñanza en el laboratorio en el área de procesos de fabricación, mediante los cuales el estudiante participe activamente y profundice sus conocimientos garantizando la integridad de su formación ética y profesional.

Aparte se espera lograr el rescate del equipo de soldadura múltiple que no esta siendo utilizado en el taller metalmecánico de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad de Carabobo.

1.4 Alcance

Para la determinación de los parámetros óptimos para realizar soldadura a través del proceso TIG, se utilizó la máquina de soldadura múltiple del taller metalmecánico de la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo, con láminas de acero inoxidable AISI 304 de un solo espesor en uniones soldadas a tope, con corriente continua directa utilizando Argón como gas de protección y tomando como variables de estudio a la intensidad de corriente y

la cantidad de flujo, utilizando tres variaciones para cada variable, realizando ensayos de tracción, dureza superficial y metalografía.

1.5 Limitaciones

Los ensayos de Soldadura TIG se realizaron en la máquina de soldadura múltiple de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, la cual no se encontraba en óptimas condiciones, involucrando esto inversión de tiempo y dinero, así como también el adiestramiento en la manipulación de la misma.

Escasez de recursos financieros para la utilización de diferentes materiales.

1.6 Antecedentes

El proceso de soldadura TIG (Gas Inerte con electrodo de Tungsteno) es adecuado para materiales de espesor fino por permitir control preciso de las variables del proceso y también de la forma final del cordón, resultando en una soldadura de calidad y sin defectos (Modenesi, et al, 2000).

La soldadura requiere un largo tiempo de aprendizaje para dominar una buena parte de sus variantes, por lo que es difícil conseguir un buen punto de partida para comenzar a estudiar este amplio campo. Sin embargo, variables tales como la energía representada por el amperaje de soldadura, el modo de corriente, la velocidad de aplicación, el diámetro del electrodo y el caudal de gas utilizado son unas de las causas principales que pueden ocasionar diferentes estructuras y propiedades a las aleaciones de soldaduras superficiales (Quaas, 1970).

Cuando los metales se calientan hasta ponerse al rojo vivo se producen 2 efectos perjudiciales: 1) Tendencia a combinarse con O₂ (oxidación); 2) Absorción de gases, O₂, N₂, H₂, que al ser absorbido por el metal lo fragilizan, estos gases pueden ser tolerados en pequeñas cantidades, de aquí la importancia de éste tipo de soldadura ya que en ésta se produce un arco eléctrico por el paso de corriente a través de un gas protector ionizado, el cual aísla la zona de trabajo permitiendo que la misma quede libre de oxígeno, generándose así una soldadura de muy buena calidad, libre de defectos y sin salpicaduras (Bazán, 1998).

Maeques y Modenesi, (1999) estudiaron las propiedades físicas de los gases como densidad, conductividades térmicas y eléctricas, potencial de ionización, entre otras, ya que éstas variables determinan en gran parte las características operacionales de los arcos de soldadura; estas propiedades pueden variar bastante para diferentes gases, así parámetros como la tensión de la operación, el calor generado, el radio medio, el perfil térmico y el rendimiento del arco, que a su vez afectan la geometría (forma, anchura y penetración) del cordón de soldadura, están muy influidos por la composición química del gas de protección utilizado, empíricamente, la influencia de la atmósfera del arco de soldadura y sus efectos sobre la geometría del cordón pueden ser fácilmente predecibles. ACERIND S.C, (2006) en sus estudios realizados sobre “La Soldadura de Aceros Inoxidables” recomienda utilizar el argón como gas inerte ya que es más barato en comparación con el helio aparte de que producen arcos más suaves y de gran estabilidad.

Estudios como los anteriormente citados recomiendan ciertas variables para la determinación de los parámetros óptimos en los procesos de unión por soldadura a través del proceso TIG, de éste modo también existen estudios y recomendaciones para la realización del proceso como tal, por ejemplo en los aceros inoxidables se recomienda trabajar para placas con espesor de hasta

3.2mm, diámetros de electrodos de tungsteno de 2.4mm, corriente de soldadura de 70 a 95 A, y un flujo de gas (argón) de 4 a 5 L/min. (AWS, 1996), corriente continua directa o corriente alterna (Rodríguez, 2001), entre otros. Cordero y Cordero, (2005) basaron su estudio en el comportamiento e influencia de variables como: la intensidad de corriente, velocidad de pasada y distancia de separación entre el electrodo y el metal base en la fuerza de arco, y obtuvieron que ésta aumenta a medida que se incrementa la intensidad de corriente y se disminuye la distancia entre el electrodo y el material base, al igual que el ancho del cordón de soldadura bajo estas mismas condiciones aumenta y muestra un comportamiento lineal creciente, y la profundidad del cordón de soldadura aumenta a medida que se incrementa, tanto la intensidad de corriente como la distancia entre el electrodo y el metal base.

Acosta y Monsalve, (2006) determinaron los parámetros óptimos para realizar soldadura a través del proceso por fricción, utilizando ensayos de tracción, dureza y microscopía. Pozo, et al, (2006) estudiaron la soldadura TIG automática en cintas extrafinas de cobre y usaron ensayos de tracción, macrografía y metalografía para determinar las propiedades de la junta soldada. Monsalve, et al (2004) realizaron estudios sobre el efecto del amperaje en las propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abrasión aplicados a la soldadura, para esto realizaron ensayos de dureza, metalografía, análisis químico y dilución. Nascimento, et al, (2000) estudiaron el efecto del proceso de soldadura TIG en la resistencia a ensayos por fatiga del acero aeronáutico ABNT 4130, para lo cual se basaron en los ensayos de tracción, metalografía, micro dureza Vickers, análisis de la superficie de la fractura, propagación de fisuras y tensiones residuales. Ramírez, et al, (2006) basaron sus estudios en la soldadura del acero inoxidable Duplex 2205 a través del proceso TIG, con el fin de determinar los parámetros de soldadura tales como: la corriente, longitud de arco, velocidad de avance y separación de raíz, a láminas de 6 mm de espesor y dejando el flujo de gas protector

constante; para ello realizaron ensayos de dureza, impacto y metalografía, empleando material de aporte y verificando además el efecto de la velocidad post-soldadura.

Desde el punto de vista de la ingeniería es muy importante, y a veces imprescindible, conocer cual sería el comportamiento mecánico de los materiales, cuando se encuentran expuestos a condiciones extremas de servicio. Con base a todos estos estudios se concluye que para determinar las propiedades de las juntas soldadas es necesario realizar como mínimo los ensayos de: Tracción, Metalografía y Dureza. (Acosta y Monsalve, 2004; Pozo, et al, 2006; Monsalve, et al, 2004; Nacimiento, et al, 2000; Ramírez, et al, 2006)

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

2.1 ACERO INOXIDABLE

El acero inoxidable es un tipo de acero resistente a la corrosión, dado que el cromo u otros metales que contiene, poseen gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro

La resistencia a la corrosión es debida a la formación de una capa superficial de oxido de cromo u oxido de níquel, la cual se encuentra fuertemente adherida al metal y a pesar de ser sumamente delgada, lo protege contra distintos tipos de corrosión, renovándose inmediatamente cuando es dañada por corte, abrasión, maquinado, entre otros. Para formular un acero inoxidable se debe asegurar la presencia de un 12% de cromo. Sus aplicaciones son muy diversas pudiéndose citar entre ellas: partes y piezas de la industria alimenticia, química, petrolera, naval, de plásticos, equipos hospitalarios, entre otros. (Huamanchumo y Ricci, 2006). La norma comúnmente utilizada para la identificación de estos aceros es la AISI (Instituto Americano del Hierro y el Acero), la cual asigna tres (3) dígitos, En tabla 2.1 se muestran ejemplos de ésta clasificación:

Tabla 2.1 Clasificación AISI de aceros inoxidables (Cordero, 2005).

Acero Inoxidable	AISI
Austenítico	304 – 316
Martensítico	410 – 416 – 420 (Barras)
Ferrítico	430

En la actualidad los aceros inoxidables se pueden clasificar en cinco (5) grandes grupos: Austeníticos, Ferríticos, Martensíticos, Duplex y Endurecidos por Precipitación. (Huamanchumo y Ricci, 2006)

2.1.1 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Los aceros inoxidables austeníticos no son magnéticos y no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, son muy dúctiles y presentan excelente soldabilidad.

En la tabla 2.2 se muestra una comparación entre los aceros inoxidables austeníticos con el acero al carbono, con respecto a la influencia de las propiedades físicas de ambos materiales en procesos de soldadura.

SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

La soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos es casi única en el campo de los aceros inoxidables, en la mayoría de sus numerosas aplicaciones es muy fácil realizar soldaduras sanas y sin precalentamiento. Las juntas resultan con alto grado de tenacidad y con propiedades comparables a las del metal base, pudiendo ser puestas en servicio muchas veces sin necesidad de tratamientos térmicos post soldadura. Estos resultados podrían ser obtenidos siempre que se realice una correcta elección del proceso de soldadura.

Tabla 2.2 Influencia de las propiedades físicas en la soldadura de aceros inoxidable austeníticos comparados con el acero al carbono. (ACERIND, 2006)

	Aceros inoxidables austeníticos	Aceros al carbono	Observaciones
Punto de fusión	1400 - 1450 °C	1540 °C	El Tipo 304 requiere menos calor para producir la fusión, lo cual significa una soldadura más rápida para el mismo calor, o menos calor para la misma velocidad
Velocidad de conductividad térmica A 100 °C A 650 °C	28% 66%	100 % 100%	El Tipo 304 conduce el calor mucho más lentamente que los aceros al carbono, lo cual produce gradientes de temperatura más pronunciados. Esto acelera la deformación. Una difusión más lenta del calor a través del metal base significa que la zona soldada permanece caliente por más tiempo, resultado de lo cual puede ser una mayor precipitación de carburos, a menos que se usen medios artificiales para extraer el calor, tales como barras enfriadoras, entre otros.
Expansión térmica en el rango indicado (mm/mm)/°C *10 ⁻⁶	17.6 (20 - 500°C)	11.7 (20 – 628°C)	El tipo 304 se expande y contrae a una velocidad más alta que el acero al carbono, lo cual significa que se debe permitir expansión y contracción a fin de controlar la deformación y el desarrollo de tensiones térmicas después del enfriamiento.

ACERO INOXIDABLE AISI 304

El acero inoxidable AISI 304 pertenece a la rama de los aceros inoxidables austeníticos aleado al Cromo – Níquel, resiste altas

temperaturas, posee alta resistencia a la corrosión. Es no magnético en estado de recocido, aunque es ligeramente magnético cuando está trabajando en frío. Tiene alta ductilidad y baja dureza en estado de recocido, sin embargo puede endurecerse al aplicársele deformación en frío a través del proceso de fabricación por conformado. Se utiliza como acero estructural y para la construcción de piezas poco exigidas mecánicamente. (Cordero, 2005).

Este tipo de acero tiene gran aplicación en la industria química, farmacéutica, naval, alimenticia, entre otros. Es también utilizado en vajillas, cubiertos, revestimientos de ascensores, entre otros.

En determinados medios especialmente en aquellos que contienen iones cloruro, el acero inoxidable 304 es propenso a una forma de corrosión, llamada corrosión por picadura, en la cual en determinados puntos de la superficie del material el medio agresivo consigue quebrar la película pasiva para después progresar en profundidad. En la tabla 2.3 se muestra la composición química de éste acero.

Tabla 2.3 Composición Química. (AWS, 1996)

Carbono	Azufre	Fósforo	Silicio	Manganeso	Cromo	Níquel
C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni
< 0.08%	0.03% (máx.)	0.05% (máx.)	≤ 1.00%	≤ 2.00%	18-20%	8-10.5%

El cromo es el elemento característico de los aceros inoxidables, ya que permiten la formación de una capa protectora de óxido de cromo en la superficie del material que le da la característica de inoxidabilidad.

El níquel mejora la ductilidad de éste acero inoxidable y también da buena resistencia a la corrosión bajo tensión. Ligeras reducciones en el contenido de níquel disminuyen la estabilidad de la austenita, permitiendo la aparición de martensita inducida por deformación en frío.

El azufre como elemento de aleación le proporciona mayor maleabilidad a este tipo de acero inoxidable, pero al aumentarse el contenido de este elemento en la aleación la ductilidad y la resistencia a la corrosión quedan comprometidas.

Éste tipo de acero debido a su gran aplicación en el campo industrial puede ser conformado mediante varios procesos de fabricación.

2.2 PROCESOS DE FABRICACIÓN

Un proceso de fabricación, también denominado proceso industrial, manufactura o producción, es el conjunto de operaciones necesarias para modificar las características de las materias primas. Dichas características pueden ser de naturaleza muy variada tales como la forma, la densidad, la resistencia, el tamaño o la estética. (INFRA, 2000).

Los procesos de fabricación se pueden agrupar convencionalmente en la siguientes dos grandes familias:

Tecnología mecánica:

Moldeo

Conformado o deformación plástica.

Procesos con arranque de material

Procesos con o sin aporte de material (Soldadura)

Tratamiento térmico o superficial

Tecnología química:

Procesos físicos

Procesos químicos

Dentro de los procesos de fabricación con o sin aporte de material se encuentran los procesos de soldadura y sus numerosas ramas de aplicación.

2.3 SOLDADURA

La soldadura es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos materiales (generalmente metales o termoplásticos), usualmente logrado a través de la fusión, en la cual las piezas son soldadas fundiendo ambas y agregando un material de relleno fundido (metal o plástico), el cual tiene un punto de fusión menor al de la pieza a soldar, para conseguir un baño de material fundido (*baño de soldadura*) que, al enfriarse, se convierte en una unión fuerte (ACERNID, 2006).

A veces la presión es usada conjuntamente con el calor, o por sí misma, para producir la soldadura. Esto está en contraste con la soldadura blanda (en inglés *soldering*) y la soldadura fuerte (en inglés *brazing*), que implican el derretimiento de un material de bajo punto de fusión entre piezas de trabajo para formar un enlace entre ellos, sin fundir las piezas de trabajo (ACERNID, 2006).

Muchas fuentes diferentes de energía pueden ser usadas para la soldadura, incluyendo una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un rayo de electrones, procesos de fricción o ultrasonido. La energía necesaria para formar la unión entre dos piezas de metal generalmente proviene de un arco eléctrico. La energía para soldaduras de fusión o termoplásticos generalmente proviene del contacto directo con una herramienta o un gas caliente (ACERNID, 2006).

Las aplicaciones de temperatura y calor originadas por las diferentes fuentes de energías mencionadas anteriormente, propician la formación del cordón de la soldadura sobre las piezas de trabajo. A continuación se detallan las zonas producidas en el cordón de soldadura.

2.3.1 EL CORDÓN DE LA SOLDADURA

El cordón de soldadura tiene tres partes bien diferenciadas, como se aprecia en la figura 2.1

- a) **Zona de soldadura:** Es la zona central, que está formada fundamentalmente por el metal de aportación y/o por el baño de fusión, dependiendo de si existe o no material de aporte.
- b) **Zona de penetración.** Es la parte de las piezas que ha sido fundida por los electrodos. La mayor o menor profundidad de esta zona define la penetración de la soldadura. Una soldadura de poca penetración es una soldadura generalmente defectuosa.
- c) **Zona de transición.** Es la más próxima a la zona de penetración. Esta zona, aunque no ha sufrido la fusión, sí ha soportado altas

temperaturas, que le han proporcionado un tratamiento térmico con posibles consecuencias desfavorables, provocando tensiones internas.

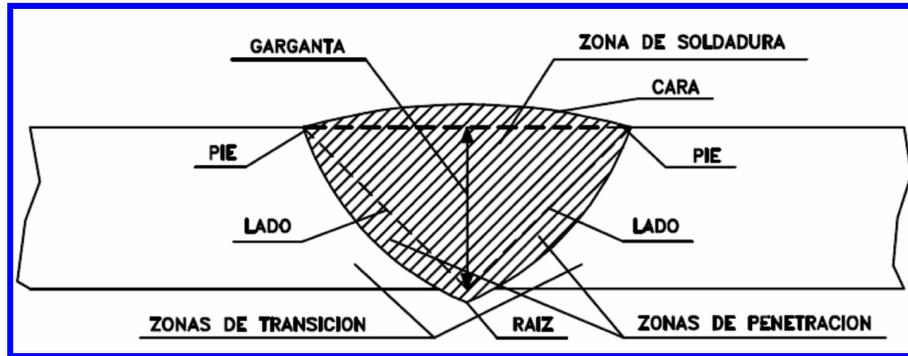


Figura 2.1 Partes del cordón de soldadura. (LINCOLN, 2008)

Las dimensiones fundamentales que sirven para realizar un cordón de soldadura son la garganta y la longitud.

La **garganta (a)** es la altura del máximo triángulo isósceles cuyos lados iguales están contenidos en las caras de las dos piezas a unir y puede ser inscrito en la sección transversal de la soldadura.

La **longitud eficaz (Leficaz)** es la longitud real de la soldadura menos los cráteres extremos. Se admite que la longitud de cada cráter es igual a la garganta.

$$L_{\text{eficaz}} = L_{\text{geométrica}} - 2 * a \quad (2.1)$$

Donde:

Leficaz: Longitud eficaz del cordón de soldadura

Lgeométrica: Longitud geométrica del cordón de soldadura (distancia recorrida por el electrodo)

a: Longitud de la garganta.

Nota: La ecuación 2.1 fue extraída de la AWS, Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society), la cual rige las normas y parámetros para la realización de los procesos de unión por soldadura.

Existen varias formas de realizar el cordón de soldadura dependiendo del tipo de unión que se requiera.

2.3.2 TIPOS DE UNIONES

Existen diferentes formas de disponer las uniones por soldaduras, las más usuales son:

- **Soldadura a tope:** La soldadura debe ser continua a todo lo largo de la unión y con completa penetración. En caso de unir dos piezas de distinta sección dispuestas en prolongación, la que posee mayor sección se adelgaza con una pendiente no superior al 25% hasta conseguir el espesor de la pieza más delgada en la zona de contacto. En uniones de fuerza (uniones que requieren de alta resistencia mecánica), debe realizarse por ambas caras el cordón de soldadura. En caso de no ser posible el acceso por la cara posterior, la soldadura se realiza por medio de chapa dorsal. El cordón de soldadura a tope no necesita dimensionarse (AWS, 1996). Obsérvese la figura 2.2, donde se aprecian los tipos de unión a tope.
- **Soldadura en Ángulo:** La soldadura en ángulo puede ser de esquina o en solape como se muestra en la figura 2.3. Se realiza con cordón continuo de espesor de garganta G , siendo G la altura del máximo triángulo isósceles inscrito en la sección transversal de la soldadura. Si la longitud del cordón no supera los 500 mm, para su ejecución se comienza por un extremo siguiendo hasta el otro, cuando la longitud se encuentra entre 500 mm y 1000 mm, la soldadura se ejecuta en dos

tramos, iniciándola en el centro, cuando la longitud supera los 1000 mm, la soldadura se ejecuta por cordones parciales, terminando el tramo donde comienza el anterior. Nunca se ejecuta una soldadura a lo largo de otra ya realizada. Los planos de taller deben indicar la preparación de bordes (INFRA, 2000)

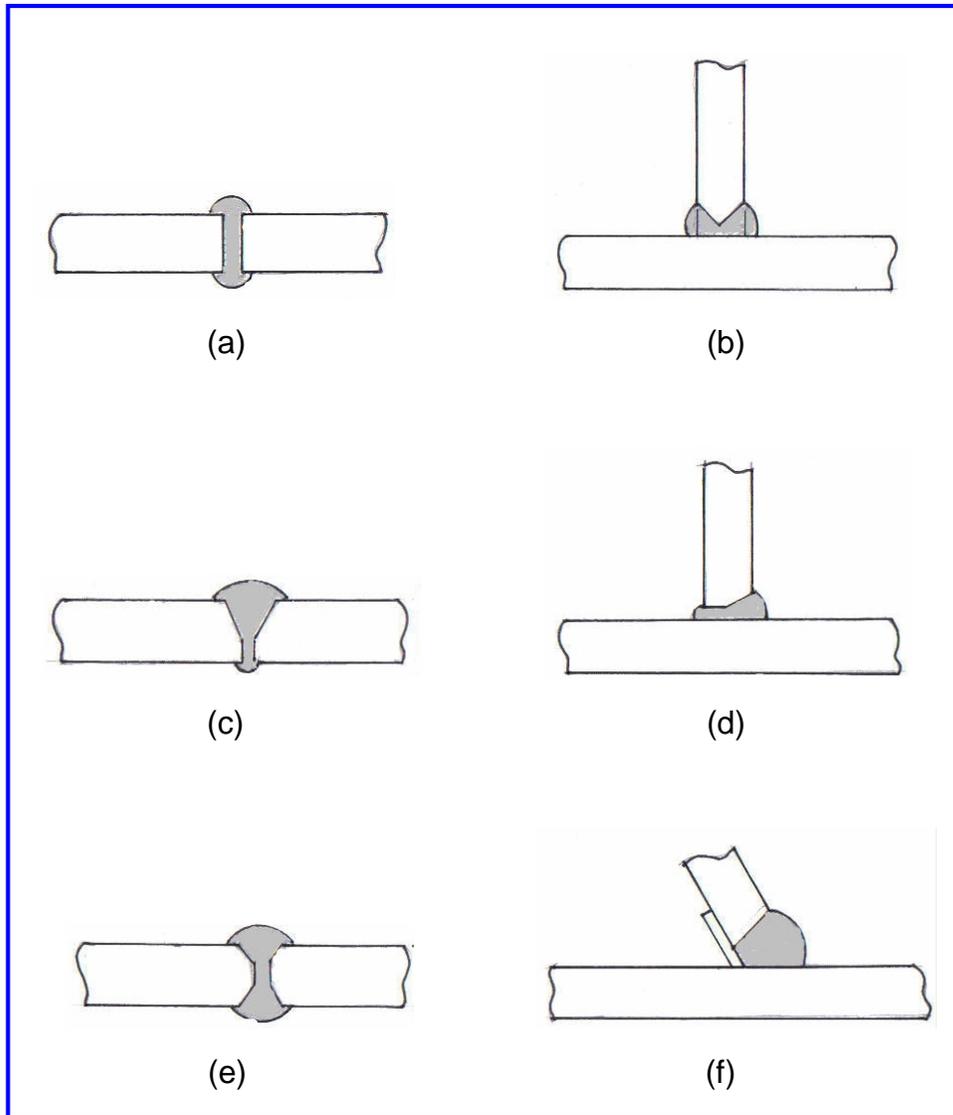


Figura 2.2 Tipos de soldadura a Tope. a: sin preparación, b: preparación "v" bilateral, c: preparación en "v", d: preparación en "v" unilateral, e: preparación en "x", f: con chapa dorsal. (INFRA, 2000)

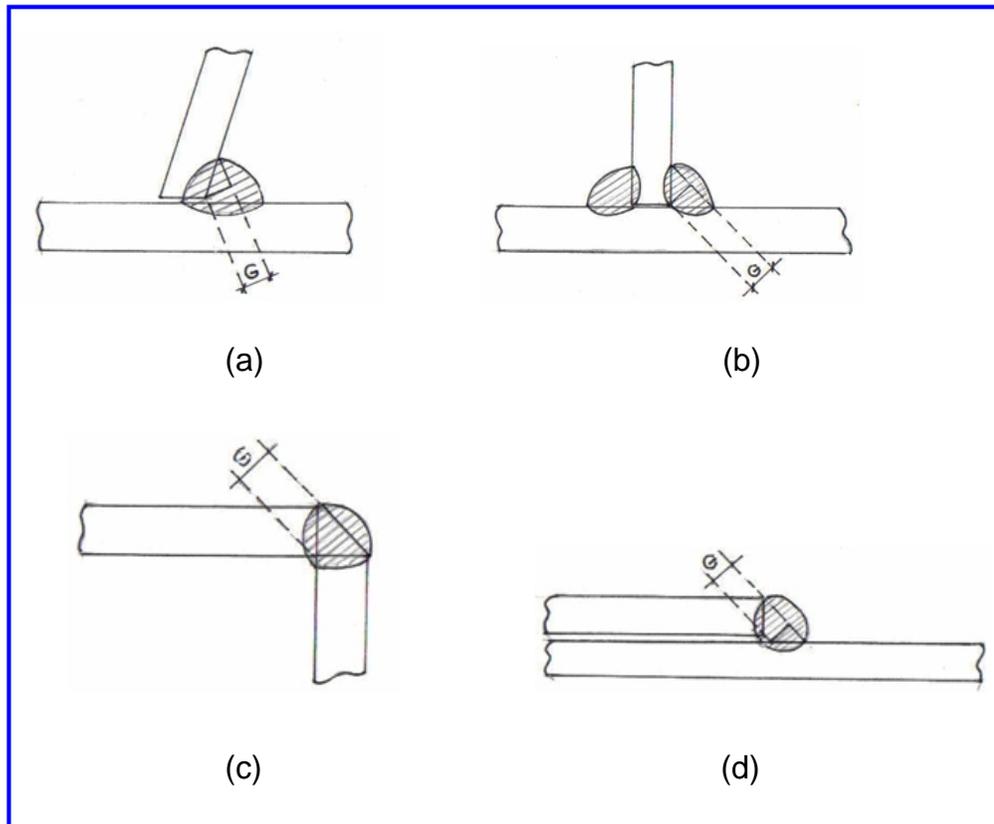


Figura 2.3 Tipos de Soldadura en Ángulo. a: en ángulo unilateral, b: en ángulo bilateral, c: en esquina, d: en solape. (INFRA, 2000)

2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESO DE UNIÓN POR SOLDADURA

Los procesos de soldadura se pueden clasificar según la fuente de energía de la siguiente forma:

SOLDADURA A GAS

La soldadura por gas o con soplete utiliza el calor de la combustión de un gas o una mezcla gaseosa, que se aplica a las superficies de las piezas y a la varilla de metal de aportación. Este sistema tiene la ventaja de ser portátil ya que no necesita conectarse a la corriente eléctrica.

SOLDADURA POR RESISTENCIA

Este tipo de soldadura se realiza por el calentamiento que experimentan los metales debido a su resistencia al flujo de una corriente eléctrica. Los electrodos se aplican a los extremos de las piezas, se colocan unidas a presión y se hace pasar por ellas una corriente eléctrica intensa durante un instante. La zona de unión de las dos piezas, como es la que mayor resistencia eléctrica ofrece, se calienta y funde los metales. Este procedimiento se utiliza mucho en la industria para la fabricación de láminas y alambres de metal, y se adapta muy bien a la automatización.

SOLDADURA POR RAYO DE ENERGÍA

Los métodos de soldadura por rayo de energía, llamados soldadura por rayo láser y soldadura con rayo de electrones. Los dos procesos son muy similares, diferenciándose más notablemente en su fuente de energía. La soldadura de rayo láser emplea un rayo láser altamente enfocado, mientras que la soldadura de rayo de electrones es hecha en un vacío y usa un haz de electrones. Ambas tienen una muy alta densidad de energía, haciendo posible la penetración de soldadura profunda y minimizando el tamaño del área de la soldadura.

SOLDADURA DE ESTADO SÓLIDO

Este tipo de soldadura se refiere a los procesos de unión en los cuales la fusión proviene de la aplicación de presión solamente, o una combinación de calor y presión. Si se usa calor, la temperatura del proceso está por debajo del punto de fusión de los metales que se van a soldar. No se utiliza un metal de aporte en los procesos de estado sólido.

SOLDADURA POR ARCO

Estos procesos usan una fuente de alimentación para soldadura, para crear y mantener un arco eléctrico entre un electrodo y el material base para fundir los metales en el punto de la soldadura. Pueden usar tanto corriente continua (DC) como alterna (AC), y electrodos consumibles o no consumibles. A veces, la región de la soldadura es protegida por un cierto tipo de gas inerte o semi – inerte, conocido como gas de protección, y el material de relleno a veces es usado también (ACERNID, 2006).

Dentro de la soldadura por arco se encuentra el proceso de soldadura TIG (tungsten inert gas) o GTAW (gas tungsten arc welding).

2.3.4 SOLDADURA TIG

La soldadura de arco de gas de tungsteno (GTAW), o la soldadura de gas inerte de tungsteno (TIG), es un proceso que puede ser de forma manual o automática (controlada mediante software de computación en el que se ingresan los parámetros de la soldadura, tales como: intensidad de corriente, flujo de gas, entre otros, de manera que la máquina realiza el cordón de soldadura) en donde se usa un electrodo de tungsteno no consumible, una mezcla de gas inerte o semi – inerte, y un material de relleno separado. Especialmente útil para soldar materiales delgados, este método es caracterizado por un arco estable y una soldadura de alta calidad, pero requiere una significativa habilidad del operador y solamente puede ser lograda en velocidades relativamente bajas (AWS, 1996). Debido a la complejidad del proceso es necesario entender los principios de funcionamiento del proceso.

PRINCIPIOS DEL PROCESO

Para comprender el proceso de la soldadura TIG es necesario el estudio de: descripción del proceso de soldadura, tipo de corriente, Cebado de Arco, tensión de cebado de arco, gases de protección, electrodos.

✓ **DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA TIG**

El procedimiento de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible también llamado TIG (Gas Inerte y Electrodo de Tungsteno), utiliza como fuente de energía el arco eléctrico que salta entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión. De ser necesario realizar aportes metálicos se harán desde una varilla o alambre a la zona de soldadura (Rodríguez, 2001). En la figura 2.4 se muestran los elementos más importantes que intervienen en el proceso.

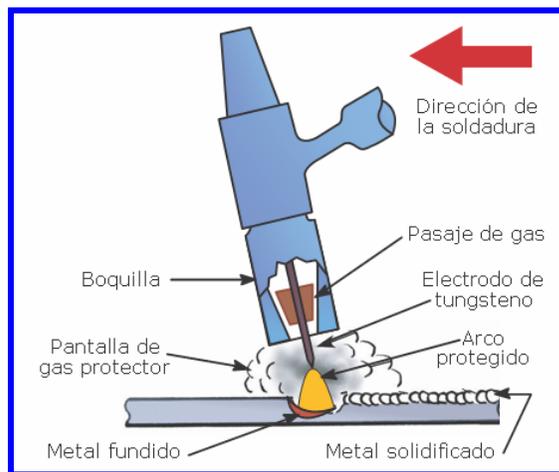


Figura 2.4 Esquema de Soldadura TIG. (Rodríguez, 2001)

Algunas de sus principales características son:

- Se puede automatizar el proceso para algunas fabricaciones en serie.

- Su aplicación manual exige una gran habilidad por parte del soldador.
- Puede emplearse en todo tipo de uniones y en diversos materiales, tales como: aceros al carbono, inoxidable, metales no féreos, entre otros.

Todo el proceso se realiza sin chispas, escoria o humos. Puede emplearse para soldar prácticamente todos los metales que se utilizan en la industria.

✓ **CEBADO DE ARCO**

EL cebado de arco consiste básicamente en la formación del arco de soldadura para el inicio del proceso como tal, en los equipos con los cuales se puede soldar mediante el proceso TIG, el cebado del arco se puede realizar de 3 formas distintas:

- Cebado por roce: El arco se establece rozando con el electrodo de tungsteno sobre la pieza a soldar.
- Cebado por levantamiento de arco: El arco se establece cuando tocamos la pieza a soldar con el electrodo de tungsteno y lo separamos. No hay necesidad de roce sobre la pieza lo que evita la posible contaminación del electrodo de tungsteno.
- Cebado por Alta Frecuencia: Este dispositivo establece el arco automáticamente sin necesidad que el electrodo de tungsteno entre en contacto con la pieza. Evita por completo los efectos de la contaminación del electrodo.

Para lograr un correcto cebado de arco es necesario establecer la correcta tensión de arco.

✓ **TENSIÓN DE CEBADO Y DE ARCO.**

La tensión de cebado en soldadura TIG se sitúa alrededor de 80 - 90 V. Los factores que definen la tensión de arco son: la longitud de arco, la naturaleza del gas y la intensidad de corriente (SUNARC, 2003). Para la soldadura TIG, la norma internacional ISO 700 define la tensión por la siguiente fórmula:

$$V = 10 + 0,04 I \quad (2.2)$$

Donde:

V: Voltaje de Cebado (V)

I: Intensidad de Corriente (A)

Válido hasta intensidades del orden de 600 A y tensión de 34 V.

✓ **TIPO DE CORRIENTE**

Existen dos tipos de corriente que pueden utilizarse en la soldadura TIG: Corriente Continua o Corriente Alterna. La corriente continua a su vez puede tener dos polaridades: directa o inversa. Dependiendo del tipo de material a utilizar se define el tipo y/o polaridad a utilizar.

➤ **Corriente Continua. polaridad directa.**

Cuando el electrodo de tungsteno tiene polaridad negativa y la pieza positiva (polaridad directa), los electrones dejan el electrodo y chocan contra el metal base, tal como se muestra en la figura 2.5, proporcionando con ello dos terceras partes de la energía total en forma de calor en el metal base. El arco formado bajo el gas protector tiene forma de campana,

proporcionando una penetración estrecha y profunda. En soldadura TIG manual, normalmente se amuela la punta del electrodo un ángulo de aproximadamente 40° ; sin embargo, en soldadura automática es recomendable un ángulo de 90° (SUNARC, 2003). Aquí el 70% del calor se concentra en la pieza y el otro 30% en el electrodo (LINCOLN, 2008).

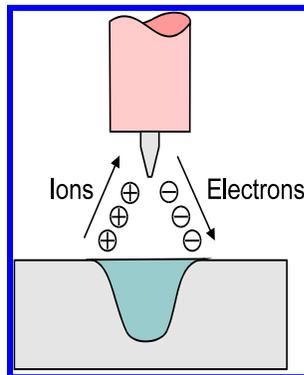


Figura 2.5 Flujo de los electrones en polaridad directa. (LINCOLN, 2008).

➤ **Corriente Continúa. polaridad inversa.**

En la polaridad inversa, el electrodo se encuentra a potencial positivo respecto a la pieza de trabajo, conectada ésta última al polo negativo, de manera que los electrones dejan la pieza de trabajo y chocan con el electrodo, tal como se muestra en la figura 2.6. En este caso, y puesto que la energía en forma de calor se distribuye en $2/3$ en el polo positivo y $1/3$ en el negativo, se necesita un electrodo mucho mayor que el electrodo utilizado en la soldadura con polaridad directa para una misma intensidad de corriente. (SUNARC, 2003). Aquí el 30% del calor se concentra en la pieza y el otro 70% lo absorbe el electrodo (LINCOLN, 2008).

En este método, deben destacarse dos consecuencias importantes:

- La penetración es poca y ancha
- Se produce un efecto de descontaminación, ya que los electrones que salen de la pieza rompen la película de óxidos y direccionan las impurezas hacia los lados de la pieza.

En la práctica, el método de la polaridad inversa no tiene apenas aplicación; solo en casos excepcionales como chapas muy finas de magnesio, es donde el proceso adquiere una cierta utilización.

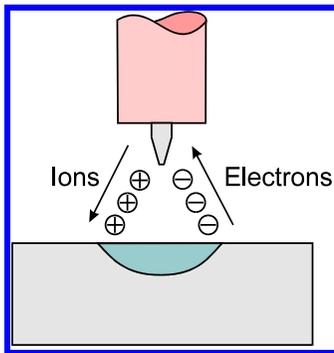


Figura 2.6 Flujo de los electrones en polaridad inversa. (LINCOLN, 2008).

➤ **Corriente Alterna.**

En la corriente alterna el calor se concentra en partes iguales 50% en la pieza y el otro 50% en el electrodo, tal como se muestra en la figura 2.7, se produce penetración media y se logra la limpieza de óxidos cada medio ciclo de la misma. El sistema de corriente alterna se utiliza principalmente para la soldadura de metales no ferrosos (LINCOLN, 2008). Como principales inconvenientes, presenta dificultades de cebado y estabilidad del arco (paso permanente de electrones entre la pieza de trabajo y el electrodo), que obliga a incorporar al equipo un generador de alta frecuencia.

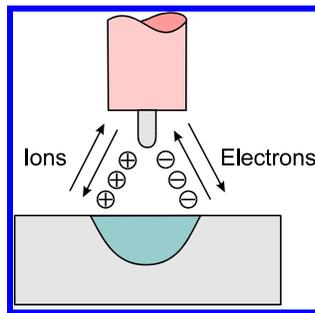


Figura 2.7 Flujo de electrones en corriente alterna. (LINCOLN, 2008).

En la tabla 2.4 se detallan las características de corriente necesarias para la soldadura TIG de diversos metales.

Tabla 2.4 Tipo de Corriente para diversos materiales. (Rodríguez, 2001)

<i>Metal a soldar</i>	<i>Fuente de potencia</i>	
	<i>Preferida</i>	<i>Opcional</i>
<i>Aluminio</i>	Alterna (alta frecuencia)	Continúa (inversa)
<i>Cobre y aleaciones</i>	Continúa (directa)	-
<i>Acero al carbono</i>	Continúa (directa)	Alterna (alta frecuencia)
<i>Acero inoxidable</i>	Continúa (directa)	Alterna (alta frecuencia)

La Intensidad de corriente es un factor determinante para la escogencia del tipo de electrodo a utilizar durante la soldadura, ya que entre muchos factores que se toman en cuenta durante dicha escogencia la intensidad de corriente permite aproximar la temperatura de operación del electrodo.

ELECTRODOS DE TUNGSTENO.

Por definición, los electrodos utilizados en soldadura TIG son infusibles. Se impone, pues, la utilización de un metal con un punto de fusión muy elevado, capaz de soportar temperaturas del orden de los 4000°C que aparecen en el arco. Por otra parte, la naturaleza, el diámetro, la

limpieza del electrodo y la naturaleza de la corriente utilizada, tienen una gran influencia sobre la calidad del trabajo y la estabilidad del arco.

El tungsteno responde perfectamente a la exigencia de soportar temperaturas elevadas, por este motivo, todos los electrodos que se utilizan son de tungsteno. Se puede incluso reforzar la emisión electrónica de los electrodos añadiendo al tungsteno óxidos de torio, de circonio, de lantano o de cerio en cantidades que van del 0,15 al 4,2% según los electrodos y el elemento a adicionar. Estos activantes de emisión facilitan el cebado del arco, mejoran la estabilidad, aumentan la duración de vida de los electrodos y reducen los riesgos de contaminación de la soldadura por inclusiones de tungsteno. Por otra parte, electrodos de igual diámetro con contenidos de óxidos permiten soportar una intensidad de corriente más elevada que los de tungsteno puro (Bazán, 1998). Las varillas de tungsteno puro funden a 3400° C, y es necesario que el extremo del electrodo sea redondeado (para evitar que el arco tienda a cambiar de dirección). Se utilizan fundamentalmente con corriente alterna en la soldadura del aluminio y sus aleaciones (esto es por que la punta se funde y tiende a formar una bola, de manera que ésta permite aumentar la estabilidad del Arco), (Bazán, 1998).

El tungsteno aleado con torio tiene un punto de fusión de 4000 °C, y es necesario que el extremo de la varilla esté afilado (Ya que como la corriente es débil, mientras más agudo es el ángulo mayor es la penetración). Se utiliza en la soldadura con corriente continua de aceros al carbono, baja aleación, inoxidables, cobre, titanio, entre otros y su precio es un 15% superior a los de tungsteno puro (SUNARC, 2003).

El tungsteno aleado con circonio funde a 3800°C, y es válido para la soldadura tanto en corriente continua como alterna (ya que puede trabajar a varios rangos de temperaturas producidas en ambos tipos de

corriente). Se utiliza para soldar metales ligeros como aluminio y magnesio, en donde es necesario evitar la contaminación del metal de aporte (SUNARC, 2003).

Clasificación de los electrodos según la AWS

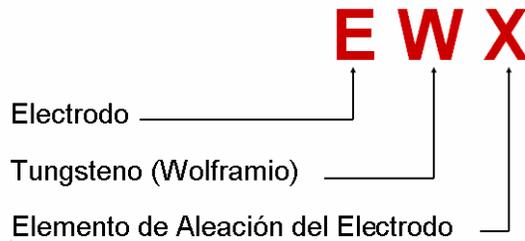


Tabla 2.5 Listado de electrodos de Tungsteno. (AWS, 1996)

TIPO	Clasificación AWS	COLOR	POLARIDAD
Puro	EWP	Verde	Corriente Alterna
1% Torio	EW Th – 1	Amarillo	Corriente Directa (-)
2% Torio	EW Th – 2	Rojo	Corriente Directa (-)
Circonio	EWZr	Marrón	Corriente Alterna
Cerio	EW Ce – 2	Anaranjado	Alterna y Directa (-)
Lantano	EW La – 1	Negro	Alterna y Directa (-)
Lantano	EW La – 1.5	Dorado	Alterna y Directa (-)
Lantano	EW La – 2	Azul	Alterna y Directa (-)

Dependiendo del tipo de corriente a utilizar se prepara la punta de la varilla del electrodo de tungsteno de la siguiente manera:

Preparación de la varilla de tungsteno

PARA CORRIENTE DIRECTA.

- Amolar la punta del electrodo en forma de punta de lápiz. Ver figura 2.8
- La longitud del cono debe ser de 2 - 3 veces el diámetro del electrodo.
- No dejar la punta afilada (Cono truncado).
- Amolar por esmerilado en forma longitudinal.

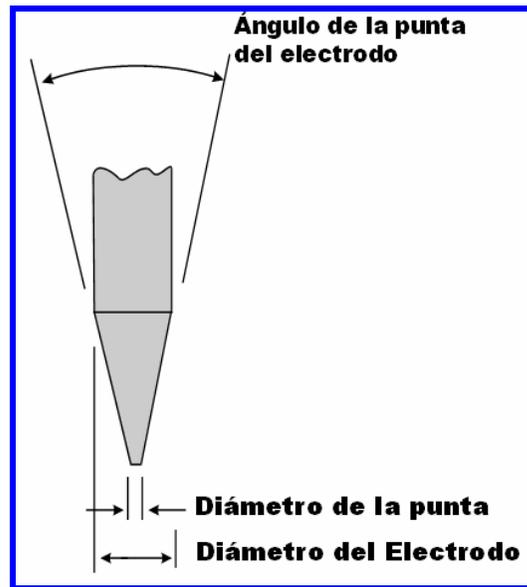


Figura 2.8 Preparación del Tungsteno para corriente directa. (LINCOLN, 2008).

PARA CORRIENTE ALTERNA

- La forma de la punta del electrodo para soldadura TIG con corriente alterna es semiesférica (forma de bola). Ver figura 2.9
- Esta bola debe tener un diámetro = 1 - 1 ½ veces el diámetro del electrodo.
- Esta forma redondeada puede obtenerse con sobrecarga de corriente.

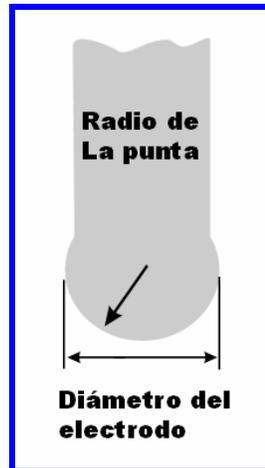


Figura 2.9 Preparación del Tungsteno para corriente alterna. (LINCOLN, 2008).

En la tabla 2.6 se dan los rangos de corriente admisibles para cada diámetro de electrodo.

Tabla 2.6 Corriente admisible por diámetro de electrodo. (Rodríguez, 2001)

Corriente [Ampere]	Diámetro del electrodo	
	Ø Pulgadas	Ø Milímetros
Hasta 15	0,010	0,25
5 a 20	0,020	0,51
15 a 80	0,040	1,02
70 a 150	1/16	1,59
150 a 250	3/32	2,38
250 a 400	1/8	3,17
350 a 500	5/32	3,97
500 a 750	3/16	4,76
750 a 1.000	1/4	6,35

Para la estabilización del arco de soldadura es necesaria la protección ofrecida por el flujo de gas inerte. Éste último puede ser de varios tipos dependiendo del tipo de material a soldar.

GAS O MEZCLA DE GASES DE PROTECCIÓN

Los gases protectores en soldadura TIG son inertes y cumplen con la función de generar una atmósfera protectora que aisle el oxígeno de la zona de soldadura, protegiendo al cordón y evitando la formación de óxidos.

En un principio se empleó helio como único y exclusivo gas de protección, sin embargo pronto se observó que el argón ofrece mayores beneficios. En efecto, la densidad del helio es diez veces inferior que la del argón, por lo que asegurará una protección inferior, ya que el argón tendrá tendencia a descender sobre el baño de fusión.

El poder ionizante del helio es menor que el del argón, por lo que la tensión de arco es cerca del 75% más grande con helio que con argón. Por consiguiente, el helio proporciona un mejor rendimiento calorífico, y éste aporte de calor más intenso aporta una penetración muy fuerte, lo que es idóneo para procesos de fabricación en automático (Ramírez, 2006). Además, la utilización del helio se hace interesante en particular para la soldadura de metales que son buenos conductores del calor, como el cobre o el aluminio. Pero por el contrario, éste está caracterizado por un arco menos estable y un cebado más difícil, debido precisamente a su bajo poder ionizante (SUNARC, 2003). Mezclas de argón y helio aseguran un compromiso entre las ventajas e inconvenientes.

El nitrógeno no puede emplearse como gas inerte, ya que, aunque lo es a temperatura normal a la del arco eléctrico, se disocia por ser un gas diatómico, y se combina con el metal de soldadura produciendo nitruros. Excepto en el cobre, donde el nitrógeno no forma nitruros. En este tipo de soldadura, se utiliza nitrógeno solo o combinado con argón al 50% (SUNARC, 2003).

Sobre aceros inoxidables, aceros aleados y metales nobles como por ejemplo el titanio, es muy aconsejable asegurar una protección por debajo de la zona de soldadura a través de un gas generalmente de la misma naturaleza que el de protección. Su caudal será función del recinto que deba protegerse (SUNARC, 2003).

El aluminio no necesita protección por debajo de la zona de soldadura. Para los aceros no aleados tampoco es necesario, pero su presencia mejora el estado de la superficie y alrededores de la penetración (SUNARC, 2003).

En la tabla 2.7 se describen los gases apropiados para cada tipo de material a soldar.

Tabla 2.7 Gases de protección para diversos materiales. (AWS, 1996)

Metal a soldar	Gas
Aluminio y sus aleaciones	Argón
Latón y sus aleaciones	Helio o Argón
Cobre y sus aleaciones (menor de 3 mm)	Argón
Cobre y sus aleaciones (mayor de 3 mm)	Helio
Acero al carbono	Argón
Acero Inoxidable	Argón

Cuanto más denso sea el gas, mejor será su resultado en las aplicaciones de soldadura con arco protegido por gas.

Precauciones:

- Cuando sea necesario proteger la realización del cordón de raíz, se requiere confinar un volumen de protección.
- Lo flujos de protección para la raíz deben ser menores que los de protección del arco para realizar la soldadura. En la figura 2.10 se muestra los efectos logrados con la purga raíz para diferentes contenidos de oxígeno.

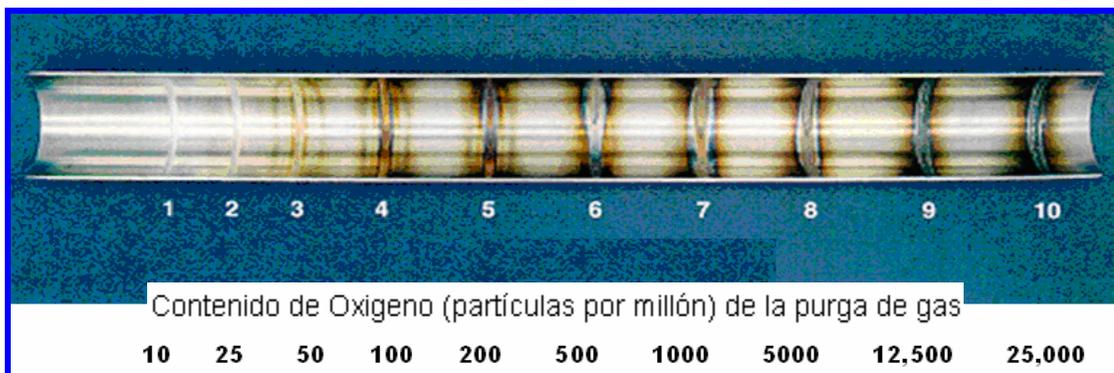


Figura 2.10 Efectos logrados con la purga raíz. (AWS D18.1, 1996)

EQUIPOS Y ACCESORIOS UTILIZADOS PARA SOLDADURA TIG

- **Control Remoto (Pedal):** Son controles que se conectan en la máquina de soldadura, y cumplen con la función de dar inicio y/o continuación del proceso de soldadura. Dependiendo de la configuración de la máquina el pedal puede controlar la intensidad de corriente durante la soldadura, pero existen casos donde la configuración de la máquina solo permite que el pedal de inicio y fin al arco de soldadura, mientras que la corriente se mantiene constante durante todo el proceso. Ver figura 2.11



Figura 2.11 Pedal (LINCOLN, 2008)

- **Antorcha TIG:** Tiene la misión de conducir la corriente y el gas de protección hasta la zona de soldeo. El electrodo de tungsteno que transporta y mantiene la corriente hasta la zona de soldeo se sujeta rígidamente mediante una pinza alojada en el cuerpo porta-electrodos. El gas de aportación llega hasta la zona de soldeo a través de una tobera de material cerámico, sujeta en la cabeza del porta-electrodos. La tobera tiene la misión de dirigir y distribuir el gas protector sobre la zona de soldeo. Ver figura 2.12 (LINCOLN, 2008)
- **Equipos de Bombona de Gas:** Cumplen con la función de transportar, regular y medir el flujo de gas que se envía desde la bombona hasta la antorcha TIG, a través de las mangueras y reguladores. Ver figura 2.13

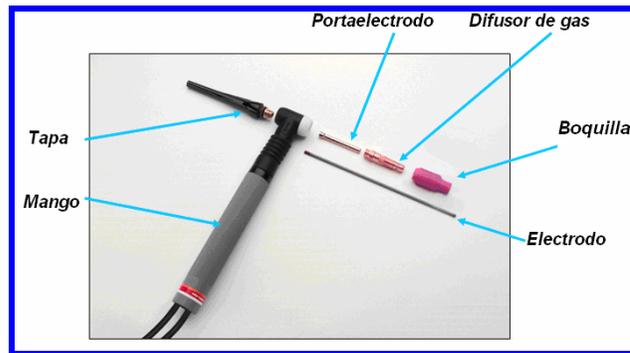


Figura 2.12 Antorcha y sus componentes

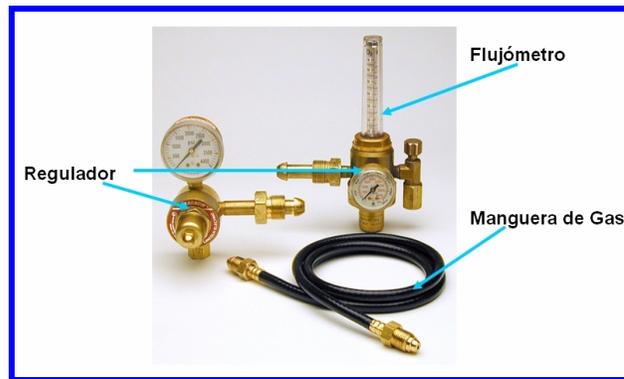


Figura 2.13 Equipos de la bombona de gas

- **Bombona de Gas:** Provee el gas Inerte necesario para la protección del arco de la soldadura. Ver figura 2.14



Figura 2.14 Bombona de Gas

Debe existir una armonía o secuencia lógica que permita la realización de la soldadura, dicha secuencia puede ser encontrada en los métodos operatorios de soldadura TIG.

MÉTODO OPERATIVO PARA REALIZAR SOLDADURA TIG

Descripción de los puntos principales a tener en cuenta para realizar soldadura TIG:

- Previo a la realización de cualquier operación de soldadura con TIG, la superficie deberá estar perfectamente limpia. Esto es muy importante ya que en este sistema no se utilizan fundentes que realicen dicho trabajo y separen las impurezas como escoria.
- Cortar la varilla de aporte en tramos de no más de 450 mm. Para mejor maniobrabilidad. Previamente se deberá limpiar frotando con algún solvente volátil. Aún el polvillo contamina la soldadura (SUNARC, 2003).
- Tratar de adoptar una posición cómoda para soldar, sentado, con los brazos apoyados de manera firme sobre el banco o mesa de trabajo. Utilizar los elementos de protección necesarios (casco, lentes, guantes, entre otros). A pesar de que la luz producida por la soldadura TIG no parezca peligrosa.
- Se deberá estimar el diámetro del electrodo de tungsteno a utilizar en aproximadamente la mitad del espesor del metal a soldar (LINCOLN, 2008).
- El diámetro de la tobera deberá ser lo mayor posible para evitar que restrinja el pasaje de gas inerte a la zona de soldadura.
- Deben evitarse corrientes de aire en el lugar de soldadura. La más mínima brisa hará que la soldadura realizada con TIG se quiebre.
- Para comenzar la soldadura, el soplete deberá estar a un ángulo de 45°

respecto al plano de soldadura. Se acercará el electrodo de tungsteno a la pieza mediante un giro de muñeca (ver figura 2.15). *Nunca se debe tocar el electrodo de tungsteno con la pieza a soldar.* El arco se generará sin necesidad de ello (SUNARC, 2003).

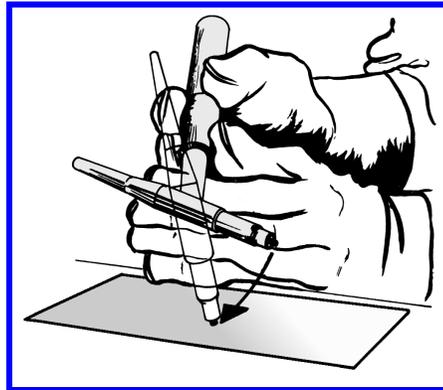


Figura 2.15 Forma correcta de comenzar el arco en soldadura TIG. (SUNARC, 2003)

- Calentar con el soplete hasta generar un punto incandescente. Mantener alejada la varilla de aporte hasta tanto no se haya alcanzado la temperatura de trabajo correcta. Una vez logrado el punto incandescente sobre el material a soldar, adicionar aporte con la varilla metálica (ver figura 2.16), realizando movimientos hacia adentro y hacia fuera de la zona de soldadura (llamado *picado*). No se debe tratar de fundir el metal de aporte con el arco. Se debe dejar que el metal fundido de la pieza lo absorba (SUNARC, 2003).
- El material de aporte deberá ser alimentado en forma anticipada al arco (fig. 2.17), respetando un ángulo de 10° a 25° respecto al plano de soldadura, mientras el soplete deberá tener un ángulo de 90° respecto al eje perpendicular al sentido de la soldadura y ligeramente caído en el eje vertical (aproximadamente 10°). Es muy importante que el ángulo de

alimentación del aporte sea lo menor posible. Esto asegura una buena protección del gas inerte sobre el metal fundido y reduce el riesgo de tocar la varilla con el electrodo de tungsteno (LINCOLN, 2008).

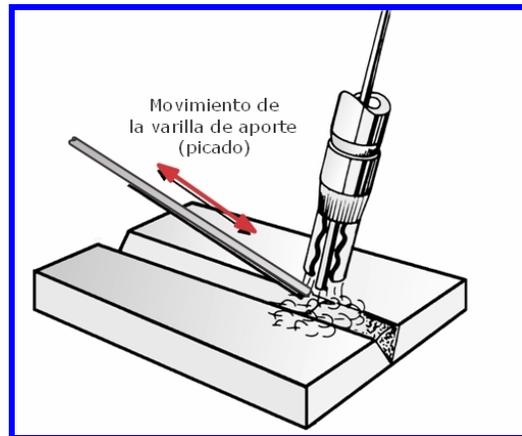


Figura 2.16 Ubicación de la varilla de aporte. (SUNARC, 2003)

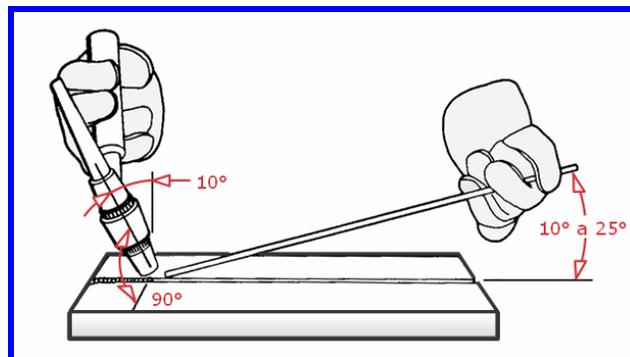


Figura 2.17 Ángulo de la varilla de aporte y del soplete (SUNARC, 2003)

Antes de comenzar el proceso de soldadura se debe tomar en consideración aparte del método de operación de la máquina descrito, la secuencia de arranque para llevar a cabo el proceso de soldadura.

SECUENCIA DE UN EQUIPO DE SOLDADURA TIG.

La secuencia de un equipo de soldadura TIG es controlada por un circuito electrónico que activa secuencialmente los elementos de la máquina tales como: la salida de gas, corriente de soldadura, velocidad de hilo, entre otros. (INFRA, 2000).

En todo diagrama de secuencia se pueden distinguir los siguientes tiempos:

- a) TIEMPO DE PRE-GAS: es el tiempo que transcurre desde que se da la orden de inicio de soldadura y comienza propiamente ésta. Durante estos instantes, fluye gas hacia la zona a soldar, con el fin de crear la atmósfera protectora necesaria para el inicio del arco (INFRA, 2000).
- b) TIEMPO RAMPA DE SUBIDA DE INTENSIDAD: una vez iniciado el arco, durante este tiempo la intensidad crece paulatinamente hasta el nivel final de soldadura predefinido (INFRA, 2000).
- c) TIEMPO RAMPA DE DESCENSO DE INTENSIDAD: para evitar la formación de un cráter al final del cordón de soldadura, cráter que puede ser el origen de fisuras en el caso de materiales de baja ductilidad, se hace necesario evitar la ruptura brutal del arco y reducir progresivamente la intensidad durante un tiempo determinado (INFRA, 2000).
- d) TIEMPO DE POST-GAS: es el tiempo que transcurre desde que se ha extinguido el arco hasta que deja de fluir gas, muy recomendable para proteger la zona de soldadura hasta que su temperatura descienda por debajo de valores menos peligrosos (INFRA, 2000).

La utilización incorrecta del método y/o secuencia para realizar soldadura TIG pueden traer como consecuencia defectos en la soldadura. A continuación se presentan a nivel general los defectos probables que pueden ocurrir durante un proceso de soldadura.

2.3.5 DEFECTOS DE LA SOLDADURA

En los diferentes tipos de soldadura se pueden generar múltiples defectos en las juntas soldadas, entre ellos tenemos:

- A. Porosidad:** Son producidas principalmente por: un flujo de gas demasiado bajo o alto, boquillas obstruidas, corrientes de aire en el lugar de trabajo, humedad en la pieza o en el metal de aporte, pintura o grasa sobre la superficie del metal (todas las soldaduras).

- B. Falta de Penetración:** Son producidas principalmente por: voltaje demasiado bajo, separación de raíz muy pequeña, sección de raíz demasiado gruesa, desalineamiento en la unión, unión sin biselar (todas las soldaduras).

- C. Falta de Fusión:** Son producidas principalmente por: longitud de arco demasiado corta, corriente demasiado baja, velocidad de avance baja (MIG – MAG), selección incorrecta de la inductancia.

- D. Socavado:** Son producidas principalmente por: velocidad de avance demasiado alta, voltaje demasiado alto. (todas las soldaduras).

- E. Salpicaduras:** Son producidas principalmente por: inductancia insuficiente (MIG – MAG), longitud de arco corta, voltaje demasiado

bajo o muy elevado, material base con oxido, alta velocidad de alimentación del alambre, gas de protección con alto contenido de CO₂.

F. Grieta en el centro del cordón: Son producidas principalmente por: bajo voltaje y alta intensidad, acero con alto contenido en azufre, metal de aporte incorrecto, empleo incorrecto del precalentamiento, alta restricción de la libre deformación. (todas las soldaduras).

G. Inclusiones de Tungsteno (TIG): Son producidas principalmente por: la punta del electrodo toca la punta del baño de fusión, intensidad demasiado elevada para el diámetro electrodo, empleo de electrodo aleado con torio para corriente alterna.

En la figura 2.18 se pueden apreciar los defectos anteriormente mencionados

2.4 PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS DE MATERIALES

En general, los procedimientos para realizar ensayos de manufactura se clasifican como destructivos y no destructivos. Esta clasificación se basa en las condiciones de la muestra (probeta) después de los ensayos. En los ensayos destructivos como su nombre lo indica se destruye la muestra, el propósito es determinar las propiedades mecánicas de los materiales sometidos a cargas y esfuerzos. Los ensayos no destructivos se utilizan para determinar si hay o no defectos en el material o partes determinadas (Acosta y Monsalve, 2006).

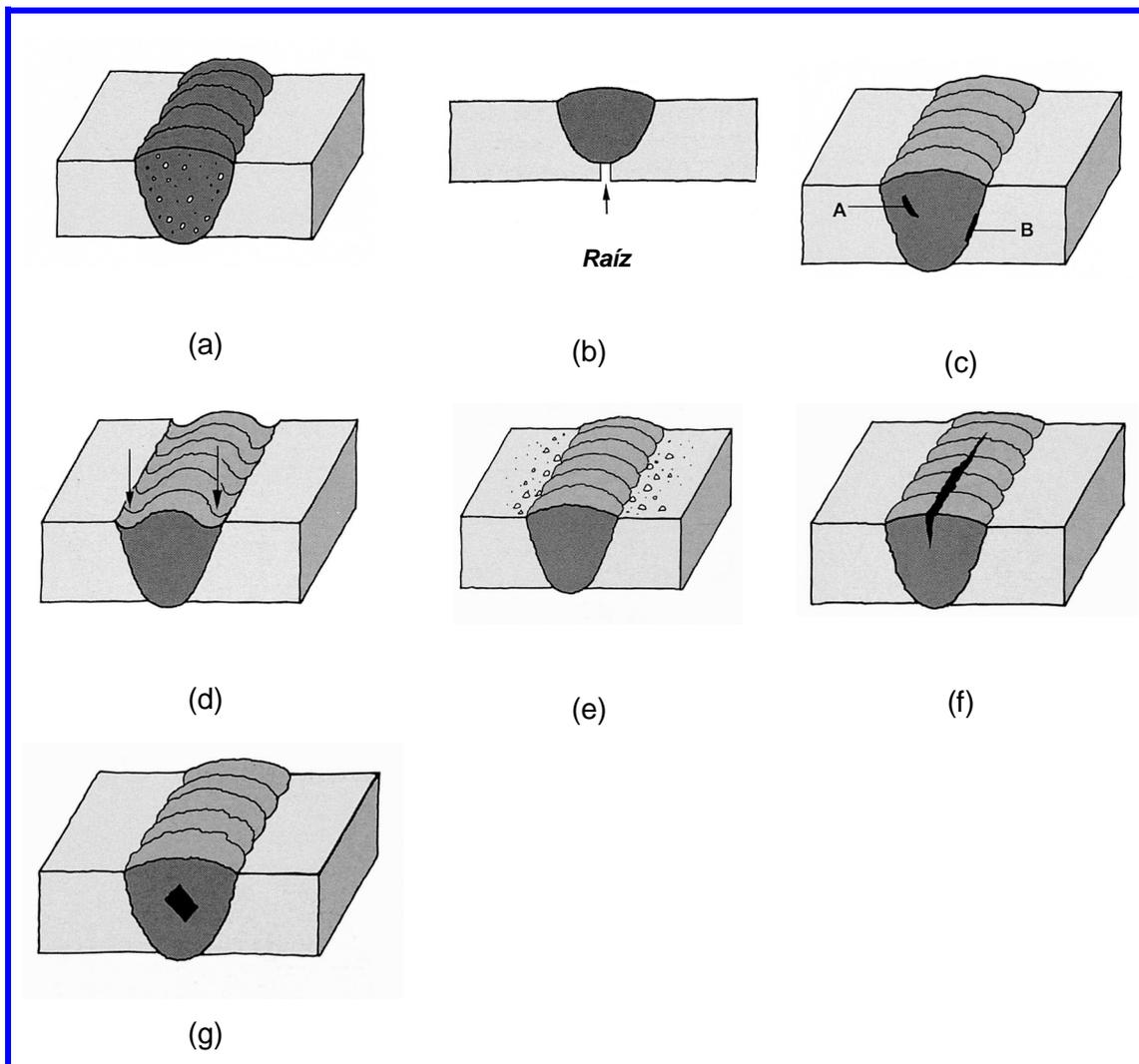


Figura 2.18 Defectos de soldadura. a: Porosidad, b: falta de penetración, c: falta de fusión, d: socavado, e: salpicadura, f: grietas en el centro del cordón, g: inclusiones de tungsteno. (INFRA, 2000)

En los ensayos de materiales se debe tener en consideración la normalización de las probetas con respecto a tamaño, forma, método de preparación y procedimientos.

2.4.1 LOS ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Los ensayos destructivos de materiales son los de uso más común.

El propósito principal es obtener una serie de datos relacionados con el comportamiento mecánico de los materiales en condiciones específicas. Entre los ensayos más usuales se encuentran los siguientes:

➤ **Ensayo de tracción.**

Para conocer las cargas que pueden soportar los materiales, se efectúan ensayos para medir su comportamiento en distintas situaciones. El ensayo destructivo más importante es el ensayo de tracción, en donde se coloca una probeta en una máquina especial para este ensayo, que consiste en dos (2) mordazas, una fija y otra móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil. El ensayo de tracción es el apropiado para uso general en el caso de la mayoría de los metales y aleaciones no ferrosas, fundido, laminados o forjados.

La curva esfuerzo vs. deformación a la tracción se obtiene por la acción de la carga fija sobre una probeta estándar. Otro método para obtener la curva es especificar la rapidez de deformación como variable independiente, en cuyo caso la rapidez de carga se ajusta en forma continua para mantener la deformación requerida.

En la mayoría de los materiales de ingeniería, la curva tendrá una región elástica lineal, en la cual la deformación es reversible e independiente del tiempo.

La máquina para realizar el ensayo de tracción impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionada. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, algunas máquinas poseen una impresora que grafica en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída.

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

$$\sigma_i = \frac{P}{A_o} \quad (3.1)$$

$$e = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad (3.2)$$

$$\sigma_r = \sigma_i(1 + e) = \frac{P_i}{A_i} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (3.4)$$

Donde:

= Deformación Real (mm)	P = Carga (N)
i = Esfuerzo de Ingeniería (Mpa)	Ao = Área Inicial (mm ²)
r = Esfuerzo Real (Mpa)	Lo = Longitud Inicial (mm)
e = Deformación de Ingeniería (mm/mm)	Lf = Longitud Final (mm)
	Ai = Área Instantánea (mm ²)
	Pi = Carga Instantánea (N)

➤ **Ensayos de dureza**

El ensayo de dureza es, conjuntamente con el de tracción uno de los más empleados en la selección y control de calidad de los metales. Intrínsecamente la dureza es una condición de la superficie del material y no representa ninguna propiedad fundamental de la materia. Se evalúa convencionalmente por tres (3) procedimientos. El más usado en metales es la resistencia a la penetración de una herramienta de determinada geometría.

Los métodos existentes para la medición de la dureza se distinguen básicamente por la forma de la herramienta empleada (identador), por las condiciones de aplicación de la carga y por la propia forma de calcular

(definir) la dureza. La elección del método para determinar la dureza depende de factores tales como: tipo, dimensiones de la muestra y espesor de la misma.

Entre los tipos de dureza se encuentran:

- **Dureza Brinell:** Es la medición de la dureza de un material mediante el método de indentación, midiendo la penetración de un objeto en el material a estudiar. Este ensayo se utiliza en materiales blandos (de baja dureza) y muestras delgadas. El indentador usado es una bola de acero templado de diferentes diámetros. Para los materiales más duros se usan bolas de carburo de tungsteno.
- **Dureza Vickers:** Es un método para medir la dureza de los materiales. Sus cargas van de 5 a 125 kilopondios. Su penetrador es una pirámide de diamante con un ángulo base de 136° . Se emplea para láminas tan delgadas como 0.1524 mm de espesor y no se lee directamente en la máquina sino que se calcula empíricamente.
- **Dureza Rockwell:** Es un método para determinar la dureza, es decir, la resistencia de un material a ser penetrado. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar prácticamente cualquier metal o aleación. Hay dos tipos de penetradores: unas bolas esféricas de acero endurecido (templado y pulido) y un penetrador cónico de diamante con un ángulo de $120^\circ \pm 30'$ y vértice redondeado, el cual se utiliza para los materiales más duros.

2.4.2 LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

➤ Ensayos de Microscopía Óptica

La microscopía óptica tiene por objeto revelar los microconstituyentes estructurales para ser observados en un microscopio metalográfico, y así tomar la micrografía. Éste análisis permitirá determinar características estructurales importantes, tales como: forma y tamaño del grano, distribución de las fases, presencia de inclusiones, segregaciones y otras heterogeneidades que pueden modificar el comportamiento mecánico de los materiales.

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

3.1 NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación fue de carácter experimental, dado que se realizaron estudios dependientes y todos conjugaron en resultados similares. Fue también exploratoria debido a que se establecieron condiciones recomendadas de soldadura que pueden proporcionar rangos favorables para la determinación de los parámetros óptimos para realizar la soldadura en el acero inoxidable utilizado.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para la determinación de los parámetros óptimos para realizar la soldadura en el acero inoxidable AISI 304, se realizó inicialmente un mantenimiento a la máquina de soldadura, para solventar las posibles fallas y elementos faltantes y/o defectuosos. A continuación se detalla por elemento las correcciones realizadas:

✓ DIFUSORES Y PORTA ELECTRODOS

Debido al largo período de inactividad en el que se encontraba la máquina y todos sus elementos, los difusores y porta electrodos se encontraban con una capa de óxido y restos de goma espuma del protector de almacenamiento. A éstos se les realizó mantenimiento mediante la aplicación de lijado y formula mecánica para dejar la superficie libre de cualquier suciedad. Ver figura 3.1



Figura 3.1 Difusores. a: Antes, b: Después.

✓ MÁQUINA DE SOLDAURA MULTIPLE TIG Y MIG

A la máquina se le realizó mantenimiento y se traslado hasta el lugar adecuado para realizar las pruebas de soldadura, también se limpió y se le practicaron las respectivas conexiones eléctricas y mecánicas pertinentes para realizar soldadura TIG. Ver figura 3.2



Figura 3.2 Mantenimiento y limpieza de la máquina de soldadura múltiple. a: Antes, b: Después

✓ BOMBONA DE GAS

Debido a la inexistencia del gas apropiado para realizar soldadura en acero inoxidable AISI 304, hubo la necesidad de adquirir una bombona de ARGÓN, la cual fue suministrada por la empresa AGA GAS, mediante un intercambio de una bombona del taller metalmecánico de la Universidad de Carabobo de la Facultad de Ingeniería. Aparte se le realizaron las conexiones mecánicas necesarias para instalar los reguladores de caudal (Flujómetros) en la bombona. Ver figura 3.3



Figura 3.3 Bombona de Argón.

✓ ELECTRODOS DE TUNGSTENO

Se realizó la preparación de la varilla de tungsteno, según las recomendaciones técnicas del equipo de soldadores de la empresa Lincoln Arc. Realizando al electrodo un mecanizado para obtener una punta de cono truncado, utilizada para este tipo de corriente y acorde al diámetro de la varilla. Ver figura 3.4



Figura 3.4 Varilla de Tungsteno. a: Antes, b: Después

Luego se realizó un ensayo piloto, con el que se logró evaluar las condiciones de operación de maquinaria y uniformidad del arco eléctrico generado, al cabo de haberse realizado la puesta a punto de la máquina. Se realizaron tres (3) ensayos piloto para los cuales se utilizó un acero inoxidable AISI 316, realizando tres (3) cordones de soldadura con un caudal de gas constante de cuatro (4) L/min y probando tres (3) diferentes intensidades de corriente 50, 65, y 75 A. Obsérvese los resultados en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Pruebas Piloto.

Cordón	Intensidad de Corriente (A)	Flujo de Gas (Argón) (L/min)	Voltaje (V)	Resultados del arco y cordón
1	50	4	220	Ok
2	65	4	220	Ok
3	75	4	220	Ok

3.3 METODOLOGÍA A EMPLEAR PARA LOS ENSAYOS

En base a los objetivos planteados, la investigación se encuentra entre los trabajos de determinación de los parámetros óptimos para realizar soldadura en acero inoxidable AISI 304.

Para el logro de los objetivos propuestos, se presenta a continuación una serie evolutiva de pasos que describen la metodología a emplear:

3.3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó la revisión bibliográfica a través de la búsqueda de información en los trabajos de investigación de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad de Carabobo en las diferentes bibliotecas, en journals de las revistas científicas y catálogos de trabajos de la Universidad de Carabobo y de otras Universidades nacionales e internacionales adscritas a la red de búsqueda FUNDACID (Fundación Centro de Información y Documentación de la Biblioteca Central de la Universidad de Carabobo), y trabajos e investigaciones publicados por diferentes autores en Internet.

3.3.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS

Luego de haberse realizado la revisión bibliográfica, se extrajo la información referente a los parámetros de trabajo de investigaciones anteriormente realizadas en el área de estudio (120A para la intensidad de corriente y 5 L/min para el flujo de gas inerte) , de tal manera que se tiene un punto de referencia para la definición de la intensidad de corriente y la cantidad de flujo de gas inerte adecuados para realizar soldadura TIG en aceros inoxidables, luego se verificó que dichos parámetros preliminares podían ser adaptados en las características operativas del equipo de soldadura múltiple a utilizar tomando en cuenta además el medio ambiente de trabajo, para quedar de ésta forma definidos los parámetros de operación. Se obtuvieron los siguientes rangos de operación, (120 – 140) A para la Intensidad de Corriente (AWS, 1996) y (7 – 14) L/min para el flujo de gas inerte (Argón). De lo que se escogieron tres (3) niveles para la intensidad de corriente 120, 130 y 140 A y tres (3) caudales para el flujo de gas inerte 7, 10 y 14 L/min. En la tabla 3.2 se muestra las combinaciones que se utilizaron y en la tabla 3.3 se ven los valores recomendados para realizar soldadura TIG en acero inoxidable AISI 304 según la AWS.

Tabla 3.2 Combinaciones a utilizar para realizar los ensayos de soldadura

Ensayos	Número de probetas	Intensidad de Corriente (A)	Flujo de Gas (L/min.)
1	4	140	7
2	4	140	10
3	4	140	14
4	4	130	7
5	4	130	10
6	4	130	14
7	4	120	7
8	4	120	10
9	4	120	14

Nota: Se utilizan cuatro (4) probetas para la determinación de las propiedades mecánicas y microestructurales, tres (3) para los ensayos de tracción y una (1) probeta para el ensayo de dureza y metalografía.

Tabla 3.3 Parámetros para realizar soldadura TIG en acero inoxidable AISI 304. (AWS, 1996)

Espesor del material (mm)	Tipo de Soldadura	Tipo de Corriente	Intensidad (A)	Flujo de Gas (L/min)
3	A Tope	CC directa. Polaridad Inversa	120 – 140	4,5,6

3.3.3 PUESTA A PUNTO DE LA MÁQUINA DE SOLDADURA MÚLTIPLE

Se realizó visita al taller metalmecánico de la facultad de ingeniería mecánica, se observaron las condiciones iniciales de la máquina de soldadura múltiple que se utilizó, haciéndole una revisión detallada de todos los componentes del banco e identificando los elementos faltantes para poder realizar la soldadura, luego se elaboró una lista de los mismos (ver tabla 3.4) y se pidieron cotizaciones de éstos repuestos en las empresas: LINCOLN SOLDADURA DE VENEZUELA C.A., AGA – GAS C.A, FERRISOLDER CARABOBO C.A., SOLDAINDUSTRIAL C.A. Se compararon dichas cotizaciones y se seleccionó como lugar de compra a la empresa que ofreció menor costo y mayor disponibilidad (AGA –GAS). Luego se realizó mantenimiento al equipo y a los elementos defectuosos del mismo, por último se llevaron los repuestos comprados al taller metalmecánico y con la asistencia del técnico de laboratorio se procedió a la instalación de los mismos.

3.3.5 DEFINICIÓN DE LA CANTIDAD DE MATERIA PRIMA A UTILIZAR

Para determinar la cantidad de materia prima que se utilizó se calcularon las dimensiones requeridas de la lámina de acero inoxidable tomando en cuenta las probetas de los ensayos de soldadura, la cantidad de materia prima que se pierde por el espacio entre cortes del material (5 mm por corte aproximadamente) y un excedente de material como margen de seguridad por: estabilización del arco de soldadura y ensayos adicionales en caso de cometer algún error en el mecanizado o en la realización de la soldadura. Para el cálculo de ésta cantidad de material se colocaron los nueve (9) ensayos en forma horizontal, de tal manera que la longitud L (largo) de la probeta de soldadura se repita nueve veces en el eje horizontal, con esto y considerando un espacio entre cortes (ocho espacios) se obtiene un total de 2326 mm en la dimensión horizontal de la lámina de materia prima, y para la dimensión vertical se dispusieron cuatro probetas cuya longitud W (ancho) se multiplicó por cuatro (4) y se le sumó el espacio entre cortes (tres cortes) obteniendo un total de 269 mm. Ver figura 3.6

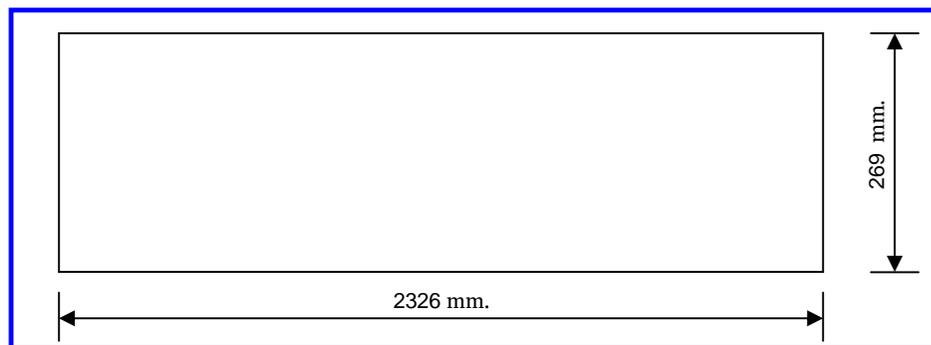


Figura 3.6 Dimensiones de la lámina de materia prima.

Luego de haberse realizado el cálculo de las dimensiones finales de la lámina que se utilizó, se pidió la cotización del material en las siguientes empresas de corte y distribuidoras de materiales: OXICORTE DE

VENEZUELA C.A., SUMINDU S.A., y FERRUM C.A. Comparando dichas cotizaciones se seleccionó la empresa de menor costo que proporcionó el material (OXICORTE DE VENEZUELA C.A), adquiriéndose dieciocho (18) láminas de 269 x 127 x 3 mm para la realización de los ensayos de soldadura y cuatro (4) láminas de 200 x 20 x 3 mm para la caracterización del material respetando el sentido de laminación.

3.3.6 REALIZACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Las cuatro (4) láminas de 200 x 20 mm se mecanizaron en la fresadora marca INDUMA, ver figura 3.7, modelo 41085 (máquina ubicada en el taller metalmecánico de la Universidad de Carabobo de la facultad de ingeniería mecánica) en donde se les realizó el cambio de sección desde el ancho total de la probeta hasta el ancho de la longitud calibrada (cuello de la probeta) del ensayo de tracción para caracterización (ver figura 3.8). Para la preparación de las probetas, se utilizó la norma ASTM – E8M - 04, y se debió tratar en lo posible de obtener una superficie libre de rayas transversales que pudieran alterar los resultados de los ensayos.



Figura 3.7 Fresadora marca INDUMA.

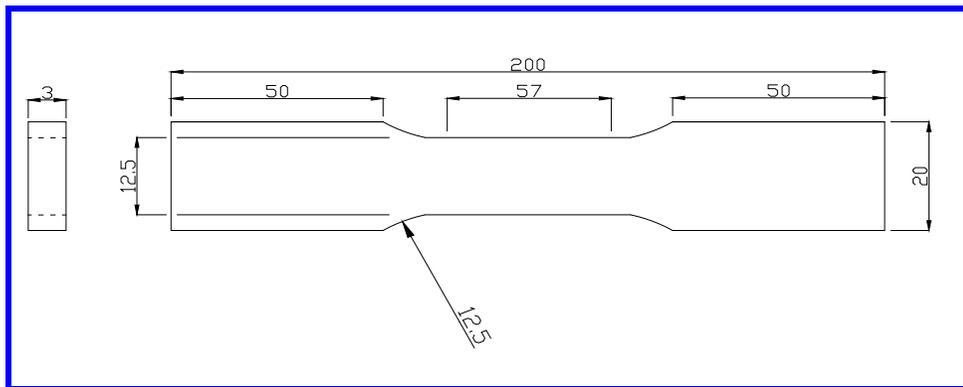


Figura 3.8 Dimensiones de la probeta para la caracterización (mm).
(ASTM – E8M – 04)

3.3.7 REALIZACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS DE SOLDADURA

Se escogieron al azar dos de las tiras de 269 x 127 mm, para aplicarles el cordón de soldadura, el cual se realizó sobre los bordes de las tiras de longitud de 269 mm (Ver figura 3.9), usando la combinación 1 de los parámetros de trabajo mostrada en la tabla 3.2. Para la realización del cordón de soldadura se debe tener especial cuidado de que no se produzca oxidación en el material de trabajo. En la figura 3.10 se muestra el proceso de unión de los ensayos de soldadura.

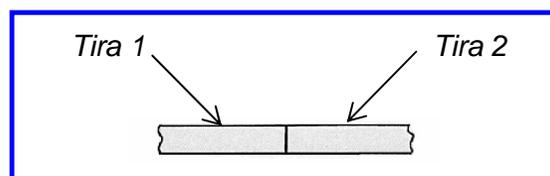


Figura 3.9 Cordón de Soldadura.

Por último se cortaron cuatro (4) tiras de 254 x 50.8 mm de la lámina soldada (despreciando un espacio de 25.4 mm al inicio y al final de la soldadura por efectos de estabilización del arco), en la cortadora de cinta del taller metalmecánico de la facultad de ingeniería de la Universidad de Carabobo (Ver figura 3.11), luego se mecanizaron las tiras soldadas de igual

manera que las probetas de caracterización del material, nuevamente en la fresadora del taller metalmecánico, obteniéndose así un total de cuatro (4) probetas para dicha combinación. Éste procedimiento se realizó hasta haber completado todas las combinaciones de los parámetros de trabajo. Cabe destacar que se realizó un ensayo complementario número diez (10) para verificar los resultados obtenidos, éste ensayo se realizó con una intensidad de corriente de 70 A y un flujo de 2.5 L/min. En la tabla 3.5 se observa la nomenclatura a utilizar para los ensayos de soldadura.

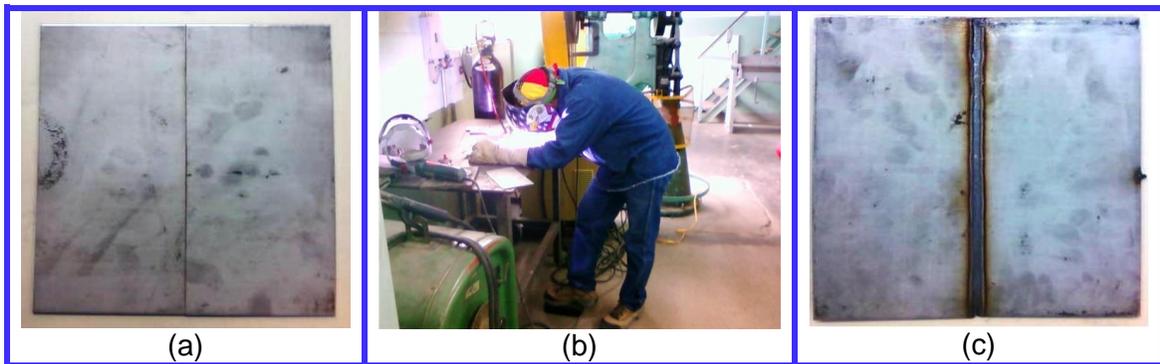


Figura 3.10 Proceso de Unión. a: Antes, b: Durante, c: Después



Figura 3.11 Cortadora de Cinta.

Tabla 3.5 Nomenclatura de ensayos y probetas.

Intensidad (A)	Flujo (L/Min)	Ensayo	Probetas
140	7	1	1.1
			1.2
			1.3
	10	2	2.1
			2.2
			2.3
	14	3	3.1
			3.2
			3.3
130	7	4	4.1
			4.2
			4.3
	10	5	5.1
			5.2
			5.3
	14	6	6.1
			6.2
			6.3
120	7	7	7.1
			7.2
			7.3
	10	8	8.1
			8.2
			8.3
	14	9	9.1
			9.2
			9.3
70	2.5	10	10.1
			10.2
			10.3

PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR SOLDADURA EN EL TALLER METALMECÁNICO

1. Realizar las conexiones y montajes necesarios para la realización de la soldadura, tales como: instalaciones de mangueras, montaje de electrodos, entre otros.
2. Encender el equipo de soldadura múltiple.
3. Calibrar la máquina para el tipo de soldadura a realizar.
4. Ajustar los parámetros de Trabajo:
 - * Intensidad de Corriente.
 - * Flujo de Gas (Regulado desde la bombona).
5. Colocarse los equipos de seguridad personal (guantes, careta, bata, entre otros).
6. Colocar la pieza en la mesa de trabajo, verificando la estabilidad de la misma.
7. Realizar la soldadura de la pieza.
8. Retirar la pieza de la zona de trabajo.
9. Repetir los pasos del 4 al 7 con el resto de las combinaciones de trabajo.
10. Apagar el equipo.

Cabe destacar que todo el proceso de soldadura fue realizado por un soldador certificado AWS perteneciente a la empresa Elizaul C.A.

3.4 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES

Luego de haberse obtenidos todas las probetas necesarias, tanto de la caracterización del material como las de pruebas de soldadura, se procedió a la determinación de las propiedades mecánicas y microestructurales de las mismas, a través de los siguientes ensayos y mediciones:

➤ **Ensayos de Tracción:**

Éste se realizó en la máquina para ensayos de tracción marca Galdabini, modelo CTM 20, dicha máquina se encuentra ubicada en el laboratorio de materiales y procesos de fabricación de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad de Carabobo, controlando todas las variables involucradas mediante un software diseñado para tal fin, este programa inclusive construye la gráfica fuerza vs. alargamiento. Se determinaron las siguientes propiedades:

- Ductilidad (% RA y %elongación)
- Esfuerzo máximo o resistencia a la tracción
- Esfuerzo de ruptura
- Esfuerzo de fluencia

Para los ensayos de tracción, se ensayó el acero inoxidable en sus dos diferentes condiciones (original y soldado por cada combinación utilizada), se utilizaron tres (3) probetas para cada condición, un total de treinta (30) probetas, tres (3) para la caracterización del material y veintisiete (27) para los ensayos de soldadura (tres por cada combinación realizada), tomando como valores de tracción por cada condición, al promedio de los esfuerzos obtenidos de cada probeta ensayada de dicha condición. En la figura 3.12 se presenta la máquina de ensayo a tracción.

Luego de realizado los ensayos de tracción a las probetas de acero inoxidable AISI 304 en la máquina universal de tracción, se tabularon los resultados donde aparecen los valores de las principales propiedades mecánicas del material, tales como: esfuerzo de fluencia correspondiente a una deformación del 0,2%, ductilidad, esfuerzos máximos, esfuerzos de ruptura, así como también la deformación ingenieril y la deformación real;

determinadas a partir de este ensayo en las muestras del material en estudio, tanto en las distintas condiciones de trabajo como en las condiciones originales de dicho material.



Figura 3.12 Máquina de ensayo a tracción

➤ ***Análisis Microscópico (microscopía óptica):***

La preparación de las muestras para el análisis metalográfico esta conformado por una secuencia de pasos que deben efectuarse cuidadosamente, según la norma ASTM E 3 – 95. Se prepararon dos muestras del acero tanto en su condición original, como para los ensayos de soldadura realizados, en total diez (10) muestras, nueve (9) para los ensayos de soldadura (una por cada combinación) y una (1) para la caracterización del material. Con el análisis microscópico y la toma de fotografías, se determinaron las características estructurales, se identificaron las diferentes fases que pueden modificar el comportamiento mecánico del material y además se verificaron las posibles imperfecciones de tres (3) zonas en particular: sobre el cordón de soldadura, en la región afectada por el calor y en el material base. Para este análisis la preparación de la muestra fue la siguiente:

Como se trata de un material duro, se debe obtener una sección cuadrada de un tamaño cómodamente manipulable, utilizando un disco cortador abrasivo que giraba a alta velocidad manteniendo la muestra fría durante la operación de corte, luego la muestra fue esmerilada burdamente sobre una lija de banda rotatoria, manteniéndola fría, refrigerándola frecuentemente con agua durante esta operación. En todas las operaciones de esmerilado y pulido, la muestra debió moverse en sentido perpendicular a las rayas existentes. El esmerilado continuó hasta que la superficie quede plana, libre de mellas, rebabas y todas las rayas debido al corte, que no sean visibles. Se continuó el pulido con papel de lija 320 o 400, pasando sucesivamente a un papel de lija mas fino hasta 1200; la última aproximación de una superficie plana libre de ralladuras tipo espejo, se obtuvo mediante el uso de paños giratorios impregnados con un abrasivo en suspensión acuosa (Alúmina). Seguidamente, se sometió la cara pulida de la muestra a la acción de un reactivo químico con el propósito de que queden claramente diferenciadas las partes de la microestructura, en la figura 3.13 se muestran los equipos para la preparación metalográfica. El reactivo químico utilizado fue Agua Regia (10 ml de ácido nítrico y 20 ml de ácido clorhídrico y 30 ml de agua destilada), como lo establece la norma ASTM E 407 – 93. Éste estudio se realizó con un microscopio metalográfico (ver figura 3.14) y la toma de las fotografías con un computador y su respectivo software.

Los equipos relacionados para el análisis de microscopía óptica son: microscopio metalográfico marca Unión, modelo MC – 86267, Desbastadora, Cortadora Metalográfica, Banco de Pulido, Campana para ataque químico. Ver figura 3.13

Se seleccionaron muestras de la zona calibrada de las probetas ensayadas a tracción tanto para las condiciones originales del material como para los ensayos de soldadura. Después de ser preparadas

metalográficamente se atacaron con agua regia, lo que permitió revelar a nivel microscópico las fases presentes y sus porcentajes a través del microscopio óptico. Las observaciones se realizaron con aumentos de 200X, 400X y 1000X respectivamente.

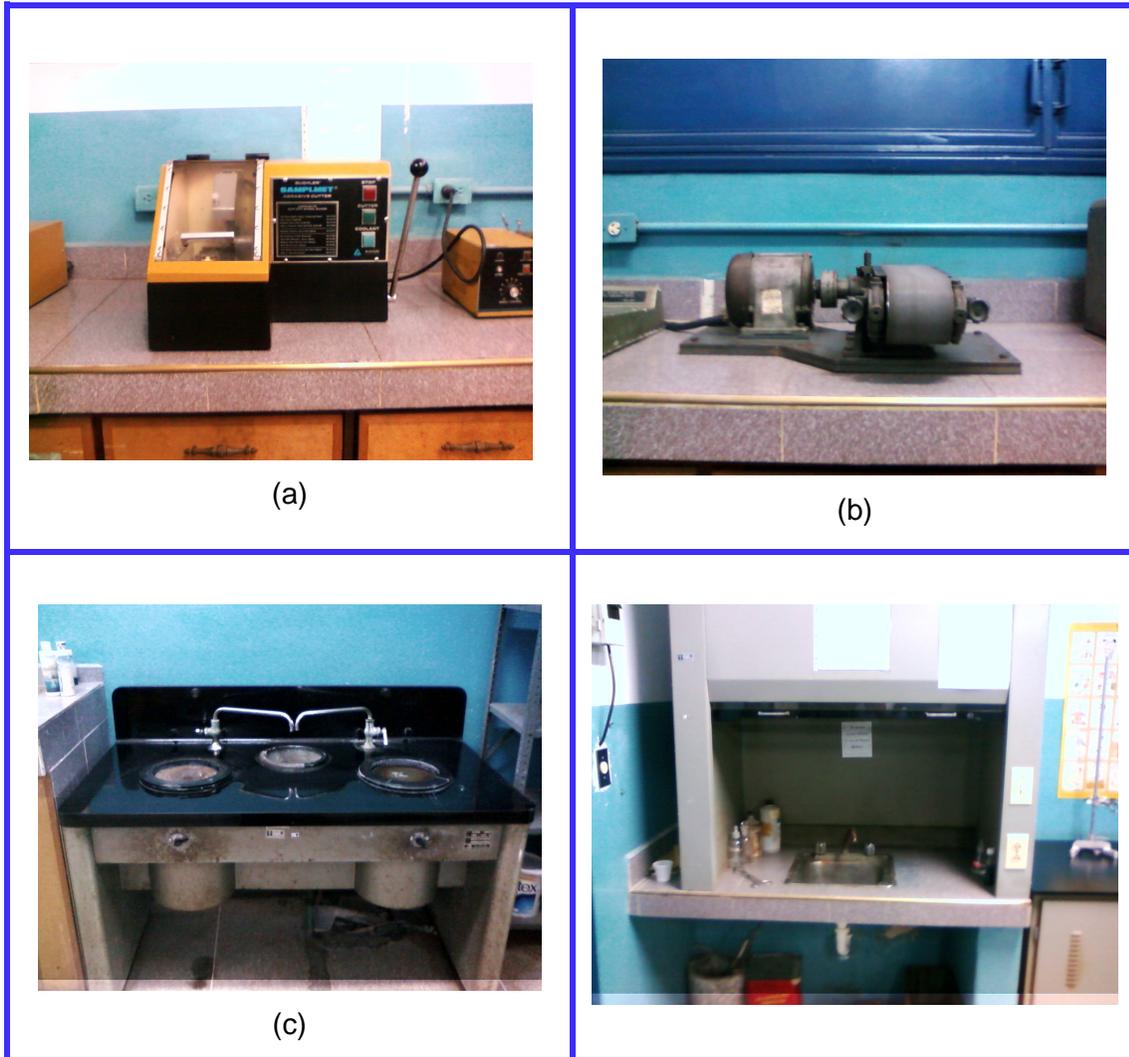


Figura 3.13 Equipos de Preparación Metalográfica. a: Cortadora de Disco, b: Desbastadora, c: Banco de Pulido, d: Campana de Ataque



Figura 3.14 Microscopio Óptico.

➤ **Ensayos de Dureza:**

Para este ensayo se prepararon dos muestras del acero tanto en su condición original, como para los ensayos de soldadura realizados, en total diez (10) muestras, nueve (9) para los ensayos de soldadura (una por cada combinación) y una (1) para la caracterización del material. Se debió lijar ambas caras de las probetas de manera que las mismas quedarán paralelas para evitar imperfecciones de medición durante la indentación del material.

Se realizaron ensayos en varias escalas de dureza, empezando por Rockwell C (mayor escala de dureza) con indentador punta de diamante, observándose en el durómetro que la escala no era la apropiada para el tipo de material empleado (la máquina indica un mensaje de error en la utilización de la escala), por lo cual se paso a la escala Rockwell B (escala próxima menor a Rockwell C) con indentador de bola, y en la cual se obtuvieron valores dureza que si corresponden con la dureza del material (en ésta escala el durómetro indicaba un mensaje de "OK" al realizar las penetraciones).

Posterior a la determinación de la escala y la carga que se utilizó, se colocaron las muestras una por una en el durómetro (ver figura 3.15) para determinar la dureza del acero en sus diferentes condiciones, se realizaron un

total de cinco (5) penetraciones por cada zona de estudio: el cordón de soldadura, la región afectada por el calor y sobre el material base; por cada condición de trabajo, y se tomó como valor de dureza al promedio de las cinco (5) mediciones por cada condición. Las muestras fueron preparadas en forma similar a lo expuesto en el punto de análisis microscópico. La superficie de ensayo debe estar completamente horizontal.



Figura 3.15 Máquina de Ensayo de Dureza.

3.5 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Al cabo de obtener los resultados de los ensayos realizados y por consiguiente las propiedades mecánicas y microestructurales de todas las condiciones ensayadas, se procedió a la recopilación de estos datos experimentales en tablas, gráficas y figuras, de tal manera de facilitar su comprensión para los análisis de resultados.

3.6 SELECCIÓN DE LA MEJOR JUNTA

La mejor junta quedó definida como el ensayo cuyas propiedades mecánicas luego de haberse realizado los ensayos de soldadura fueron las más parecidas o mejores a las condiciones originales del material o condiciones de entrega. Las propiedades que se tomaron en cuenta fueron:

- Resistencia a la Fluencia
- Resistencia Máxima
- Resistencia Ruptura

Todo esto soportado por los ensayos metalográficos y de dureza. Cabe destacar que se escogieron tales propiedades mecánicas, debido a que al evaluar la resistencia del material se puede predecir su comportamiento bajo fuerzas de tensión, las cuales son muy frecuentes en las aplicaciones de las juntas soldadas.

Por último se redactaron los análisis de resultados y conclusiones obtenidas.

CAPÍTULO 4

Resultados Obtenidos

4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

4.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

En la tabla 4.1 se presentan las dimensiones de las probetas de acero inoxidable AISI 304 en la zona calibrada, para la realización de la caracterización del material, antes y después de cada ensayo de tracción

Tabla 4.1 Dimensiones de la probeta de tracción de acero inoxidable 304 para caracterización.

Probeta	Longitud	Longitud	Espesor	Espesor	Ancho	Ancho	Área	Área
	Inicial (mm)	Final (mm)	Inicial (mm)	Final (mm)	Inicial (mm)	Final (mm)	Inicial (mm ²)	Final (mm ²)
C1	50	79	3,00	2,10	12,50	8,24	37,50	17,304
C2	50	79	3,10	2,20	12,10	7,60	37,51	16,72
C3	50	91	3,30	2,20	12,70	8,02	41,91	17,64

Las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304, obtenidas de los ensayos de tracción para la caracterización, se presentan en las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2 Fuerzas, % de Elongación y % de Reducción del Área del acero inoxidable AISI 304 para la caracterización del material.

Probeta	Fuerza de Fluencia (N)	Fuerza Máxima (N)	Fuerza de Ruptura (N)	Elongación (mm)	% de Elongación	% de Reducción de Área
C1	12736	25104	21070	29	58	54
C2	11802	23533	19597	29	58	55
C3	12501	24660	20703	41	82	58

Tabla 4.3 Esfuerzos mecánicos del acero inoxidable AISI 304 para la caracterización del material

Probeta	Esfuerzo de Fluencia (N/mm ²)	Esfuerzo Máximo (N/mm ²)	Esfuerzo de Ruptura (N/mm ²)	% de Reducción de Área
C1	339	669	561	54
C2	314	627	522	55
C3	298	588	494	58
Promedio	317	628	526	55

En la figura 4.1 se observa la gráfica esfuerzo vs. deformación de los ensayos de tracción para la caracterización del material y los valores teóricos de las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 se presentan en la tabla 4.4, con lo cual se pudo comparar dichos valores con los del ensayo de tracción para la caracterización del material.

Tabla 4.4 Propiedades mecánicas teóricas del acero inoxidable AISI 304 (Handbook, 1972)

Esfuerzo Fluencia (N/mm ²)	Esfuerzo Máximo (N/mm ²)	Esfuerzo de Ruptura (N/mm ²)	Dureza Rockwell (HRB)	% de Elongación	% de Reducción de Área
295	550	520	80	50	50

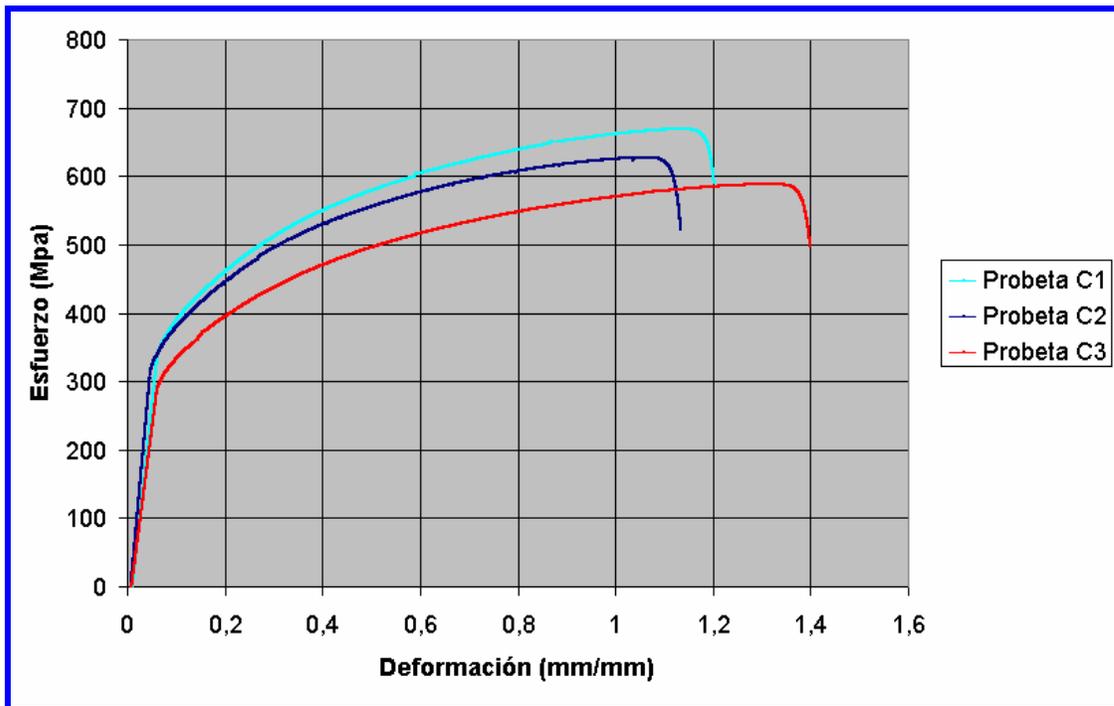


Figura 4.1 Ensayo de Tracción para Caracterización del Material

4.1.2 ENSAYOS DE PROBETAS DE SOLDADURA

En la tabla 4.5 se presentan las dimensiones de las probetas de acero inoxidable AISI 304 para los ensayos de soldadura del material, antes y después de cada ensayo de tracción.

Tabla 4.5 Dimensiones de la probeta de tracción de acero inoxidable 304 para los ensayos de soldadura.

Probeta	Longitud Inicial (mm)	Longitud Final (mm)	Espesor Inicial (mm)	Espesor Final (mm)	Ancho Inicial (mm)	Ancho Final (mm)	Área Inicial (mm ²)	Área Final (mm ²)
1.1	57.15	76	3	2.9	38.3	32.9	114.9	95.41
1.2	57.15	91	3	2.3	38.3	27.7	114.9	63.71
1.3	57.15	72	3	2.9	38.3	33.9	114.9	98.31
2.1	57.15	92	3.1	2.5	38.3	28.6	118.73	71.5
2.2	57.15	98	3	2.3	38.3	28.2	114.9	64.86

Tabla 4.5 Dimensiones de la probeta de tracción de acero inoxidable 304 para los ensayos de soldadura. (Continuación)

2.3	57.15	100	3	2.6	38.3	30.4	114.9	79.04
3.1	57.15	76	3.1	2.9	38.3	33.4	118.73	96.86
3.2	57.15	77.3	3	2.8	38.3	33.6	114.9	94.08
3.3	57.15	81	3	2.8	38.3	33	114.9	92.4
4.1	57.15	69	3	2.8	38.3	33.8	114.9	94.64
4.2	57.15	92	3	2.1	38.3	28.4	114.9	59.64
4.3	57.15	86	3	2.5	38.3	30.9	114.9	77.25
5.1	57.15	80	3	2.6	38.3	33.3	114.9	86.58
5.2	57.15	81	3.3	2.1	38.3	28.2	126.39	59.22
5.3	57.15	85	3	2.6	38.3	31.3	114.9	81.38
6.1	57.15	79	3.1	2.8	38.2	32.6	118.42	91.28
6.2	57.15	84	3	2.5	38.3	31.3	114.9	77.5
6.3	57.15	85	3	2.7	38.3	31.3	114.9	84.51
7.1	57.15	93	3.1	2.2	38.2	28.1	118.42	61.82
7.2	57.15	78	3	2.8	38.3	33	114.9	92.4
7.3	57.15	72	3	2.7	38.3	33.4	114.9	90.18
8.1	57.15	72	3.2	2.9	38.3	34.1	122.56	98.89
8.2	57.15	74	3	2.98	38.2	34.3	114.6	102.214
8.3	57.15	80	3.1	2.9	38.2	32.7	118.42	94.83
9.1	57.15	88	3	2	38.2	27.9	114.6	55.8
9.2	57.15	94	3.1	2.8	38.2	31	118.42	86.8
9.3	57.15	93	3	2.1	38.2	28.5	114.6	59.85
10.1	57.15	59	3	3	38.3	37.8	114.9	113.4
10.2	57.15	57.15	3	3	38.3	38.3	114.9	114.9
10.3	57.15	57.15	3	3	38.3	38.2	114.9	114.6

En la figura 4.2 se muestra las probetas soldadas del ensayo 9 después de haberse realizado el ensayo de tracción.



Figura 4.2 Probetas de tracción de acero inoxidable 304 para el ensayo de soldadura a 120A y 14 L/min.

Las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304, obtenidas de los ensayos de tracción para los ensayos de soldadura, se presentan en las tablas 4.6, 4.7 y 4.8

Tabla 4.6 Fuerzas, % de Elongación y %de Reducción de Área del acero inoxidable AISI 304 para los ensayos de soldadura.

Probeta	Fuerza de Fluencia (N)	Fuerza Máxima (N)	Fuerza de Ruptura (N)	Elongación (mm)	% de Elongación	% de Reducción de Área
1.1	36156.73	71061.05	68466.61	18.85	33	17
1.2	36304.95	71385.07	67485.37	33.85	59	45
1.3	34731.97	72398.49	66354.75	14.85	26	14
2.1	37034.26	71948.01	66227.59	34.85	61	40
2.2	37023.08	73241.86	67411.83	40.85	71	44
2.3	34612.48	72812.13	71042.67	42.85	75	31
3.1	30424.56	67147.75	65388.17	18.85	33	18
3.2	33658.81	69237.59	66847.67	20.15	35	18
3.3	38744.28	71406.90	64414.09	23.85	42	20
4.1	31206.84	59819.24	56541.14	11.85	21	18
4.2	34598.69	70951.90	64057.90	34.85	61	48
4.3	32275.41	68968.73	66075.54	28.85	50	33
5.1	34013.85	66876.40	65013.87	22.85	40	25

Tabla 4.6 Fuerzas, % de Elongación y %de Reducción de Área del acero inoxidables AISI 304 para los ensayos de soldadura. (Continuación)

Probeta	Fuerza de Fluencia (N)	Fuerza Máxima (N)	Fuerza de Ruptura (N)	Elongación (mm)	% de Elongación	% de Reducción de Área
5.2	32868.98	69391.90	68237.96	23.85	42	53
5.3	34594.09	70255.61	61927.65	27.85	49	29
6.1	34342.98	68670.57	63733.64	21.85	38	23
6.2	32757.99	66054.86	61640.40	26.85	47	33
6.3	32194.98	66439.78	62413.68	27.85	49	26
7.1	35949.94	68105.71	58912.77	35.85	63	48
7.2	30407.14	69201.97	66818.95	20.85	36	20
7.3	31453.88	63137.55	59171.20	14.85	26	22
8.1	34032.46	67007.23	61777.59	14.85	26	19
8.2	34410.94	68073.55	65781.55	16.85	29	11
8.3	32551.29	69792.01	65967.05	22.85	40	20
9.1	32104.04	63303.89	60828.53	30.85	54	51
9.2	33191.94	68714.39	60439.20	36.85	64	27
9.3	30740.30	65154.68	63162.94	35.85	63	48
10.1	30497.91	45200.51	45200.51	1.85	3	1
10.2	29606.28	35857.99	35857.99	0	0	0
10.3	29506.32	40576.94	40576.94	0	0	0

Tabla 4.7 Esfuerzos mecánicos del acero inoxidables AISI 304 para los ensayos de soldadura.

Probeta	Esfuerzo de Fluencia (N/mm ²)	Esfuerzo Máximo (N/mm ²)	Esfuerzo de Ruptura (N/mm ²)
1.1	314	618	595
1.2	315	621	587
1.3	302	630	577
2.1	311	605	557

Tabla 4.7 Esfuerzos mecánicos del acero inoxidable AISI 304 para los ensayos de soldadura. (Continuación)

Probeta	Esfuerzo de Fluencia (N/mm²)	Esfuerzo Máximo (N/mm²)	Esfuerzo de Ruptura (N/mm²)
2.2	322	637	586
2.3	301	633	618
3.1	256	565	550
3.2	292	602	581
3.3	337	621	560
4.1	271	520	492
4.2	301	617	557
4.3	280	600	575
5.1	296	582	565
5.2	260	549	539
5.3	301	611	538
6.1	290	579	538
6.2	285	574	536
6.3	280	578	543
7.1	303	575	497
7.2	264	602	581
7.3	273	549	514
8.1	277	546	504
8.2	300	594	574
8.3	274	589	557
9.1	280	552	530
9.2	280	580	510
9.3	268	568	551
10.1	265	393	393
10.2	257	312	312
10.3	256	353	353

Tabla 4.8 Esfuerzos mecánicos promedio para los ensayos de soldadura.

Intensidad (A)	Flujo (L/min.)	Ensayo	Esfuerzo de Fluencia (N/mm ²)	Esfuerzo Máximo (N/mm ²)	Esfuerzo de Ruptura (N/mm ²)
140	7	1	310	623	586
	10	2	311	625	587
	14	3	295	596	564
130	7	4	284	579	541
	10	5	285	580	548
	14	6	285	577	539
120	7	7	280	575	531
	10	8	284	576	545
	14	9	276	567	530
70	2.5	10	259	352	352

En las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se muestran las gráficas esfuerzo vs. número de ensayos resultantes de los ensayos de tracción en las probetas soldadas.

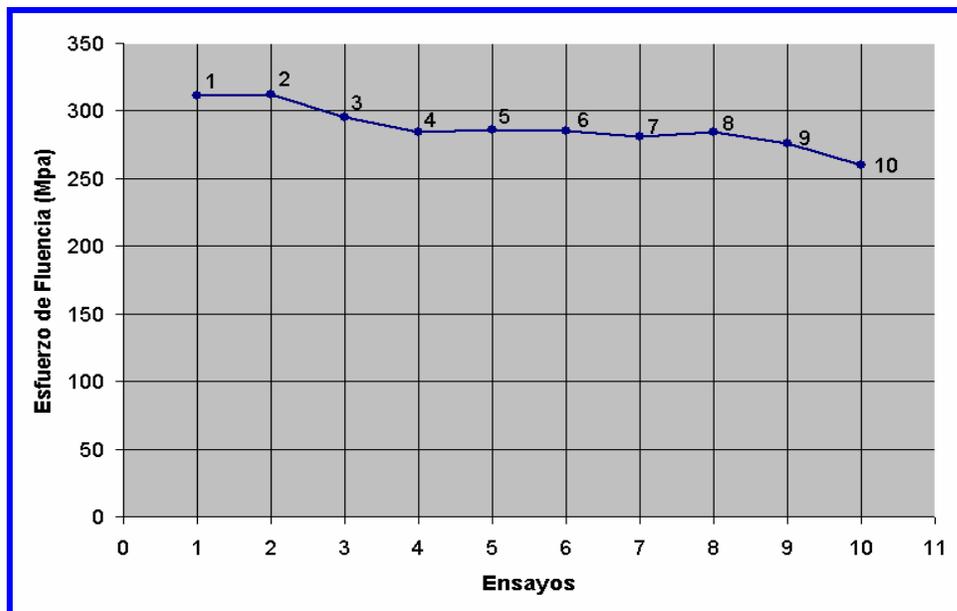
**Figura 4.3** Esfuerzo de Fluencia vs. Número de Ensayos



Figura 4.4 Esfuerzo Máximo vs. Número de Ensayos

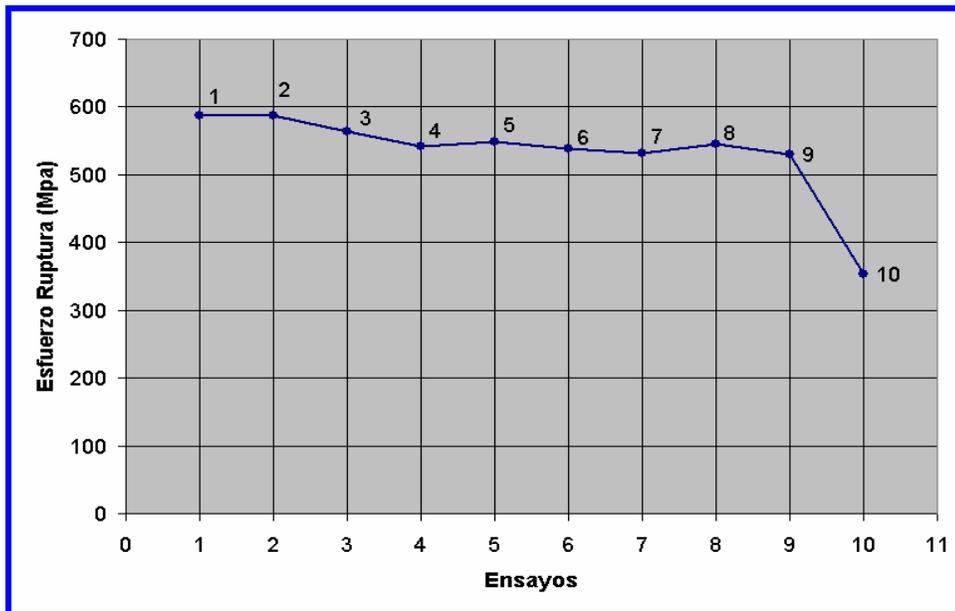


Figura 4.5 Esfuerzo de Ruptura vs. Número de Ensayos

En las figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15 se muestran las gráficas esfuerzo vs. deformación de los ensayos de tracción para los ensayos de soldadura en cada una de las condiciones ensayadas.

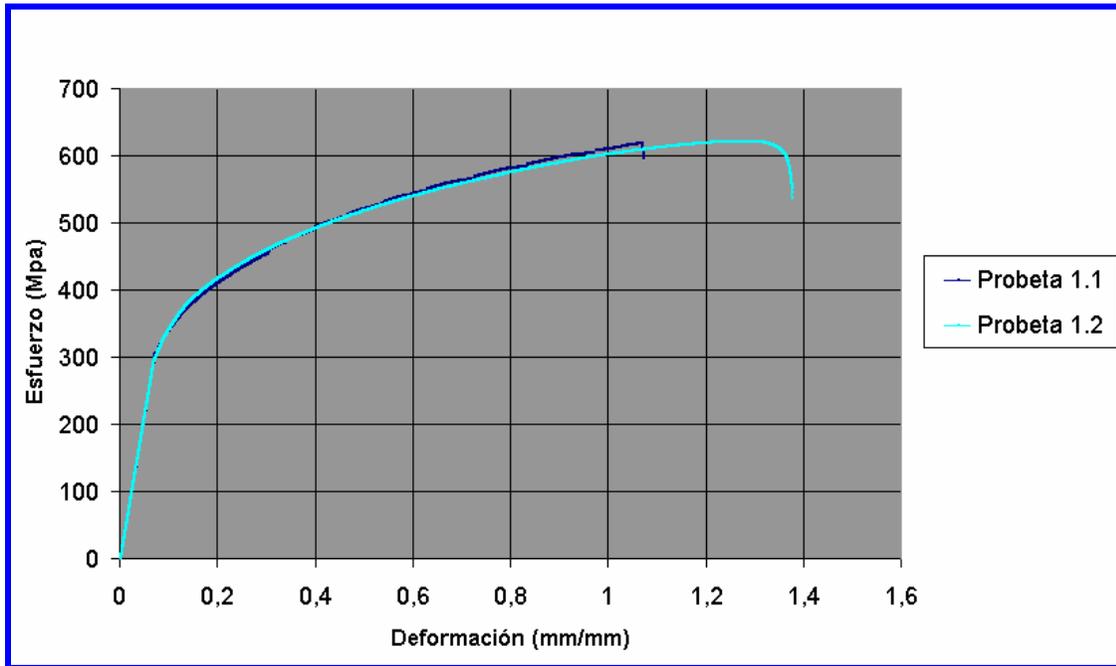


Figura 4.6 Ensayo 1 Tracción (140A con 7 L/min.)

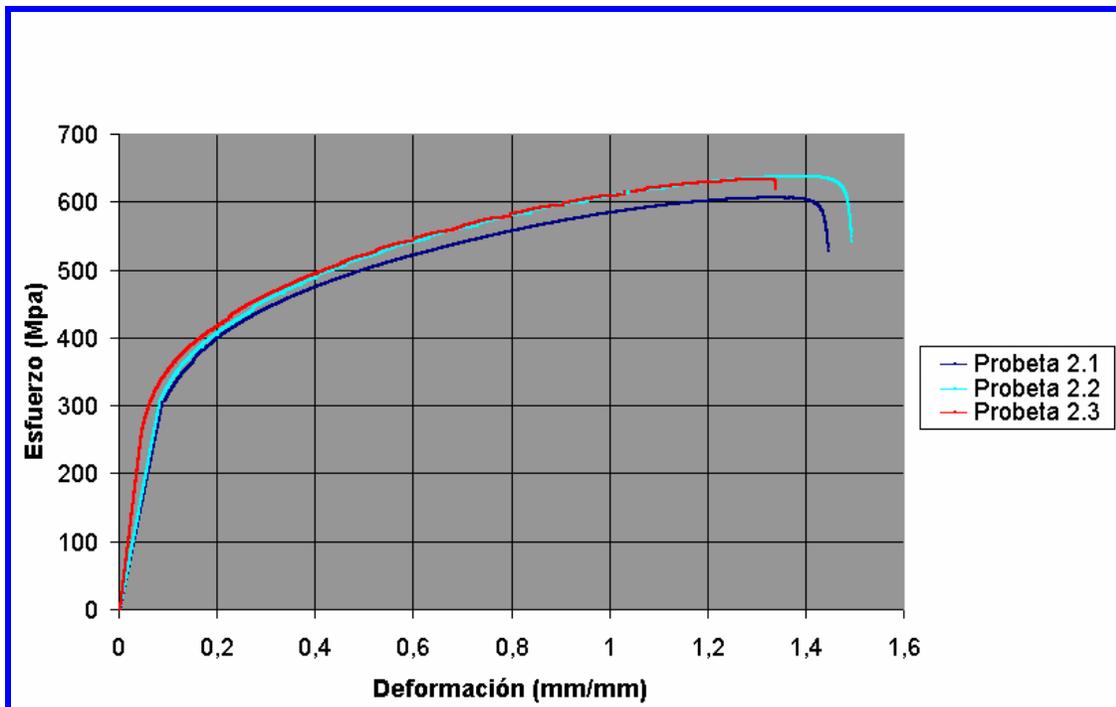


Figura 4.7 Ensayo 2 Tracción (140A con 10 L/min.)

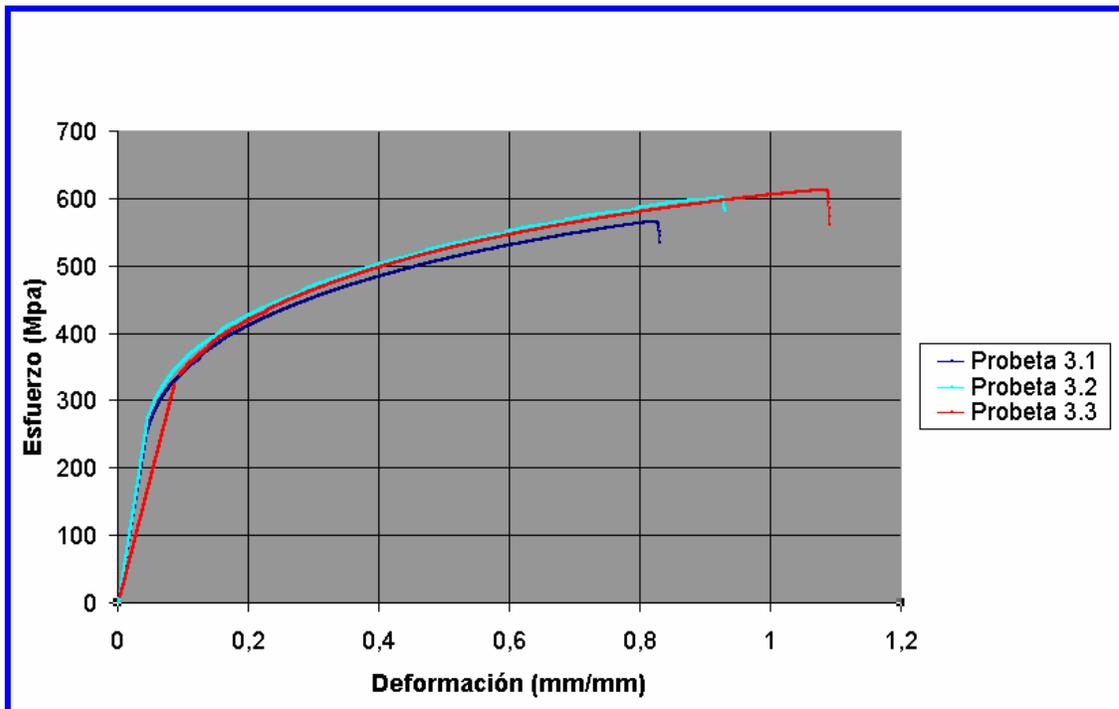


Figura 4.8 Ensayo 3 Tracción (140A con 14 L/Min.)

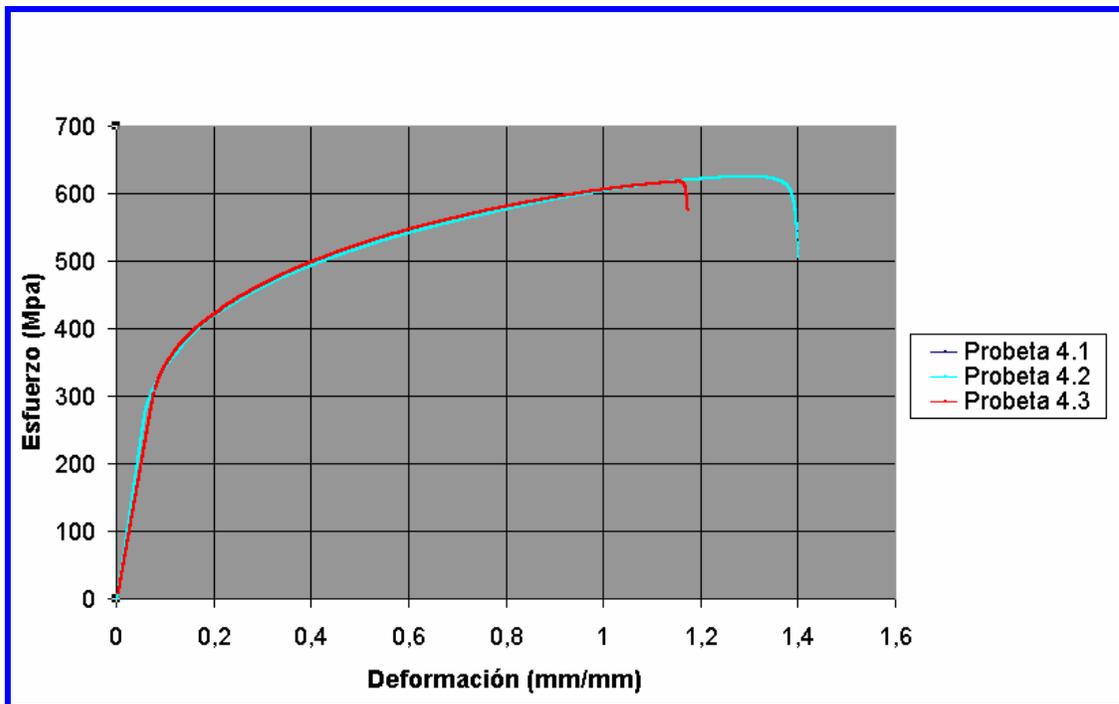


Figura 4.9 Ensayo 4 Tracción (130A con 7 L/Min.)

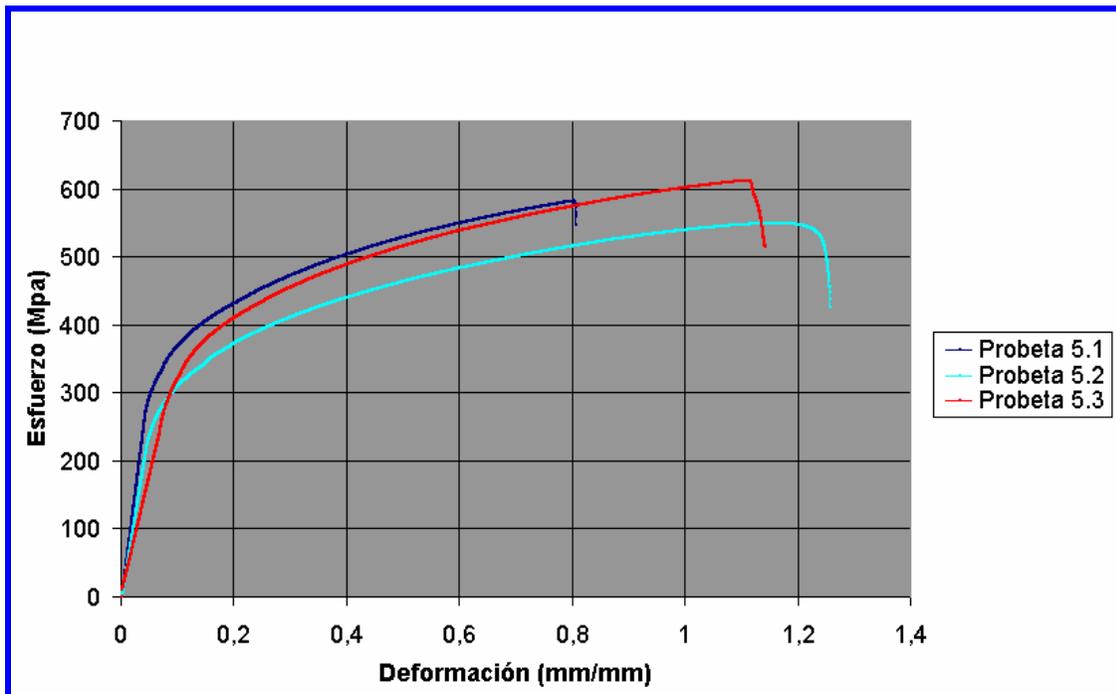


Figura 4.10 Ensayo 5 Tracción (130A con 10 L/Min.)

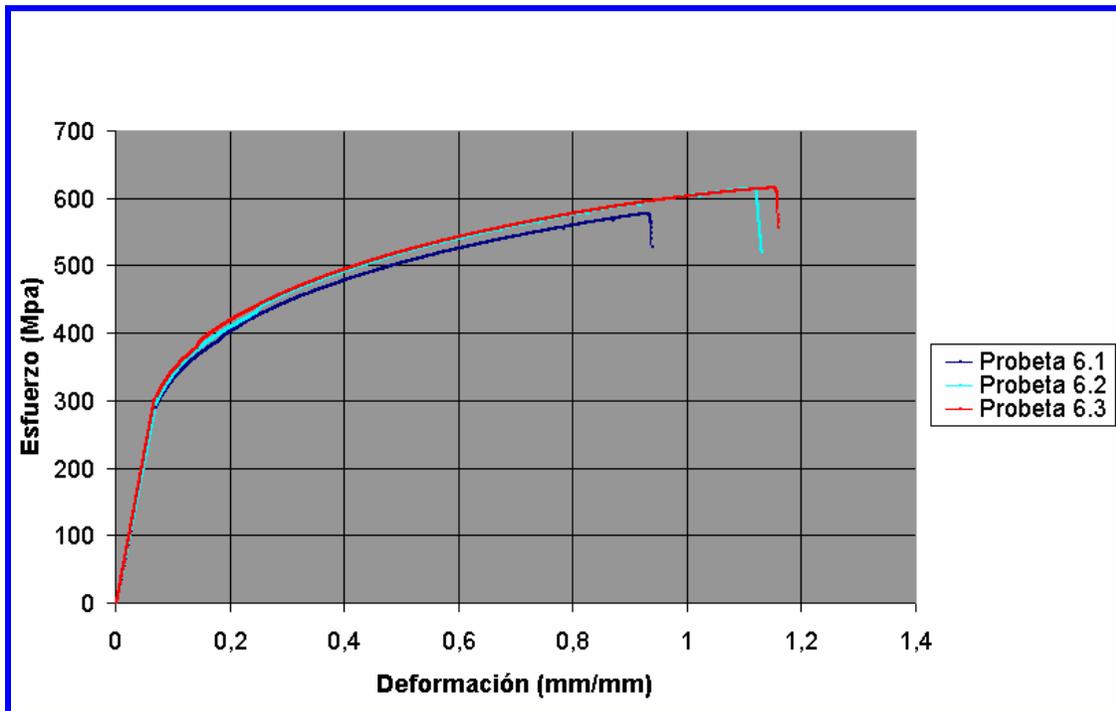


Figura 4.11 Ensayo 6 Tracción (130A con 14 L/Min.)

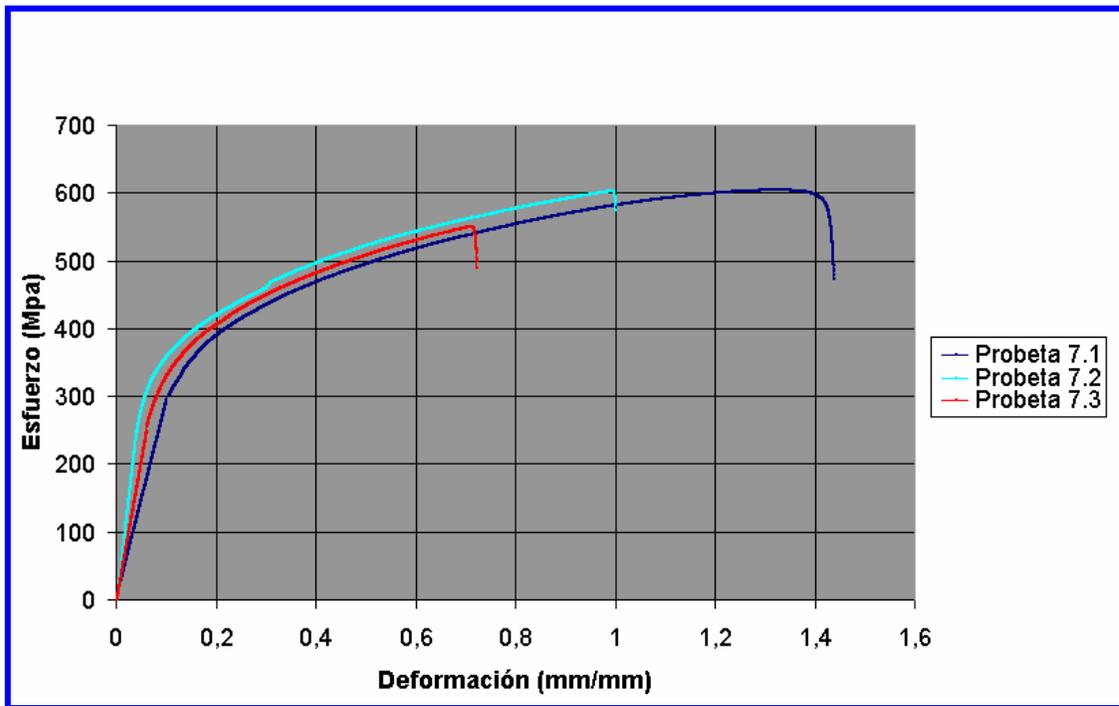


Figura 4.12 Ensayo 7 Tracción (120A con 7 L/Min.)

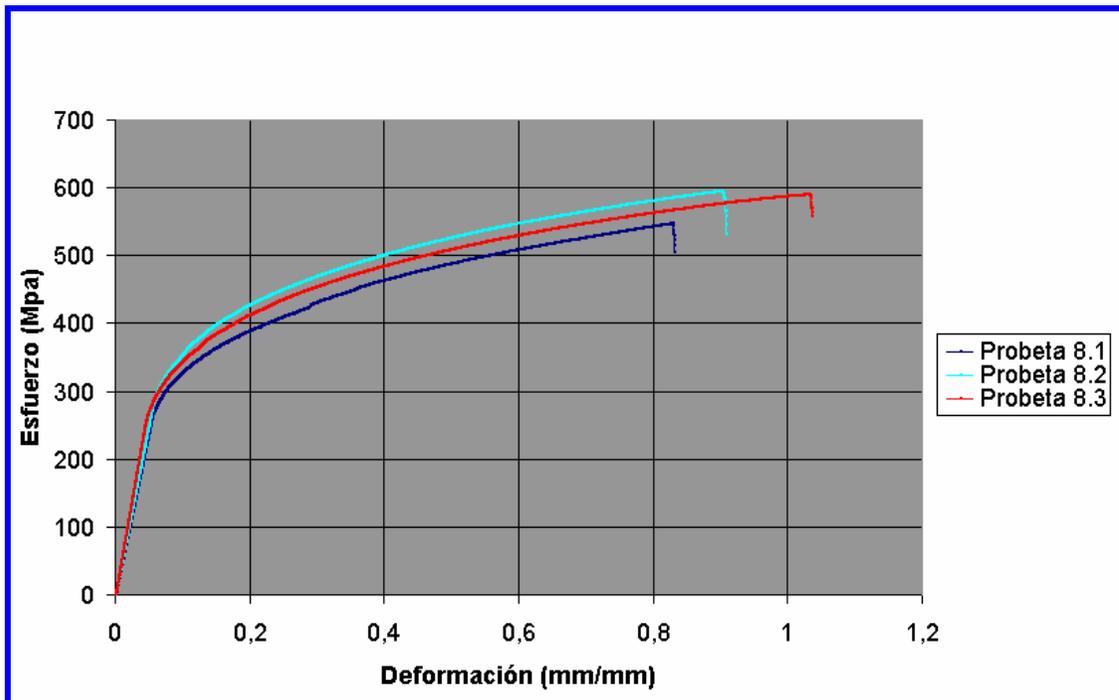


Figura 4.13 Ensayo 8 Tracción (120A con 10 L/Min.)

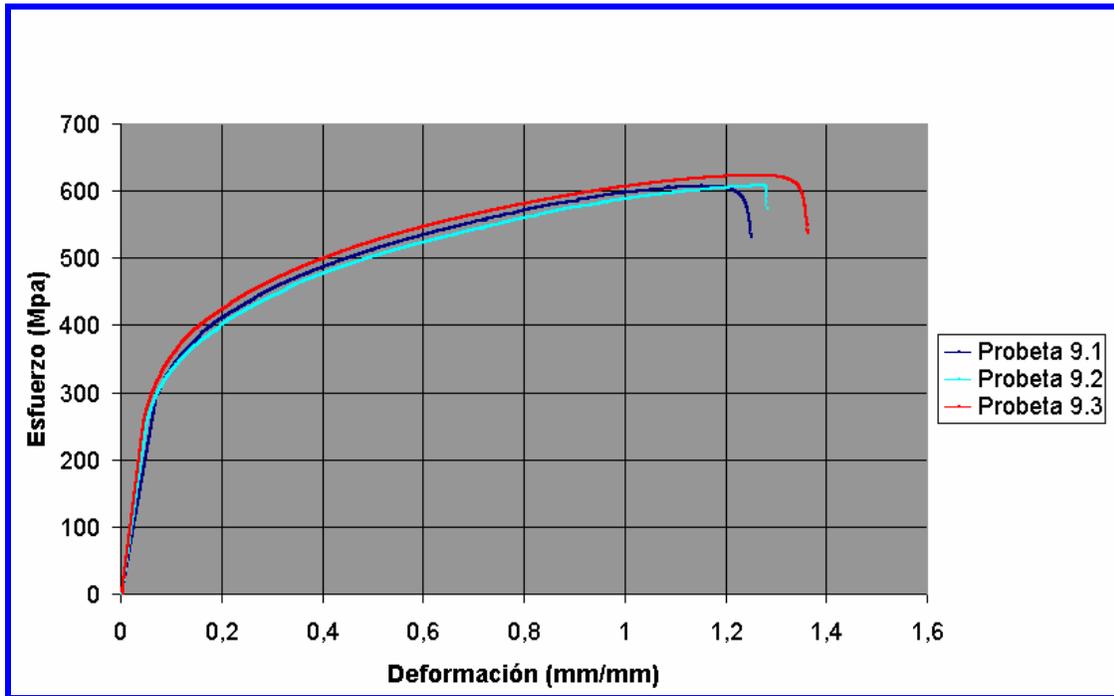


Figura 4.14 Ensayo 9 Tracción (120A con 14 L/Min.)

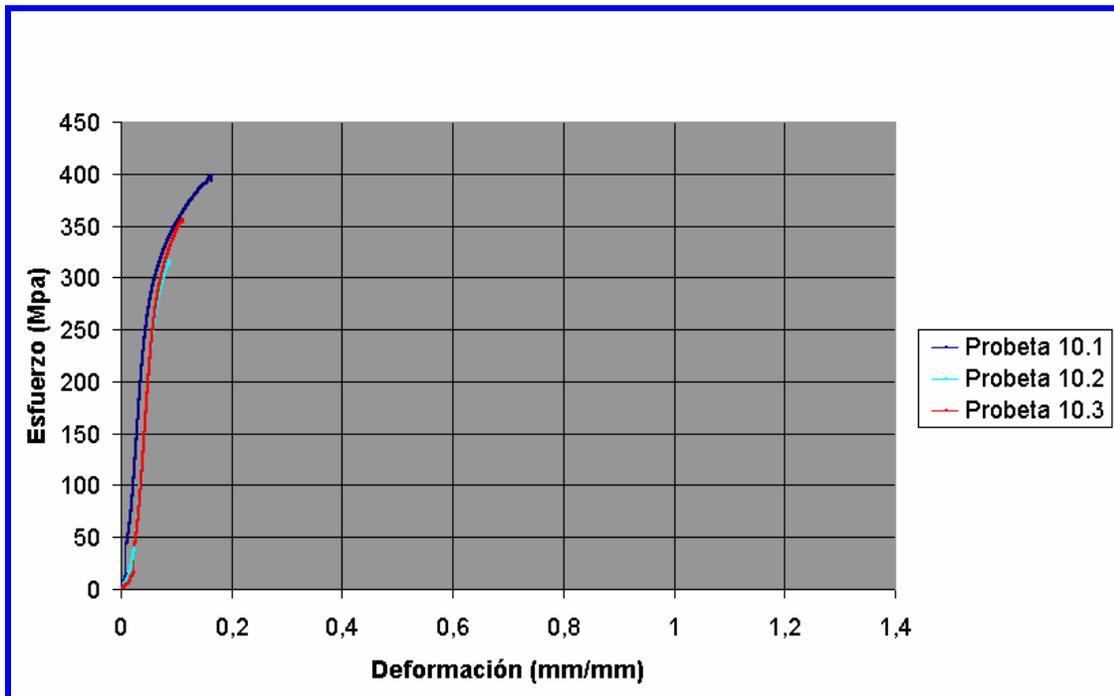
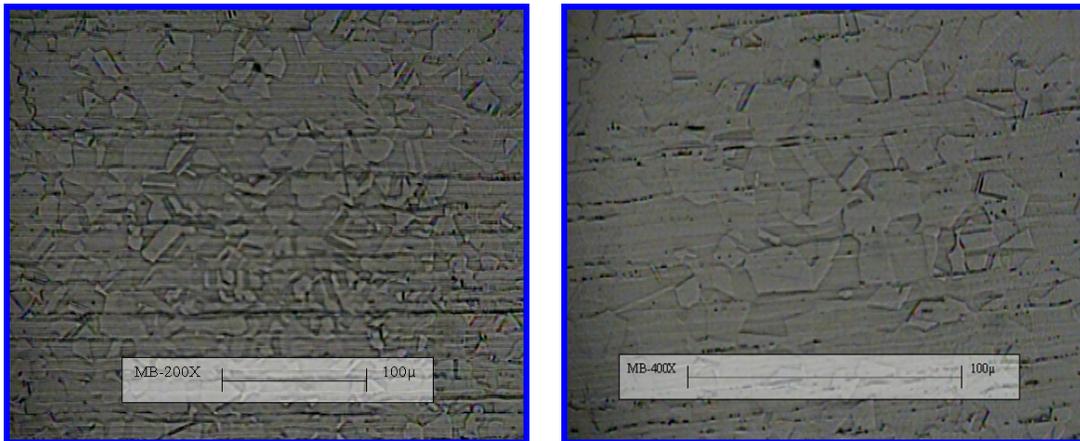


Figura 4.15 Ensayo Tracción 10 (70A con 2.5 L/Min.)

4.2 ENSAYO DE MICROSCOPIA ÓPTICA

A continuación se presentan los resultados de la microscopía óptica

4.2.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL



(A)

(B)

Figura 4.16 Microestructura del material, condición original. A: 200X y B: 400X.

En las figura 4.16A y 4.16B se observa una estructura que consiste en granos equiaxiales de austenita y las líneas de fluencia del material. Los puntos más oscuros son partículas dispersas de carburo.

4.2.2 ENSAYOS DE PROBETAS DE SOLDADURA

Se presentan los resultados de la microscopía óptica para los ensayos de soldadura en cada una de las condiciones realizadas.

- **Ensayo 1**

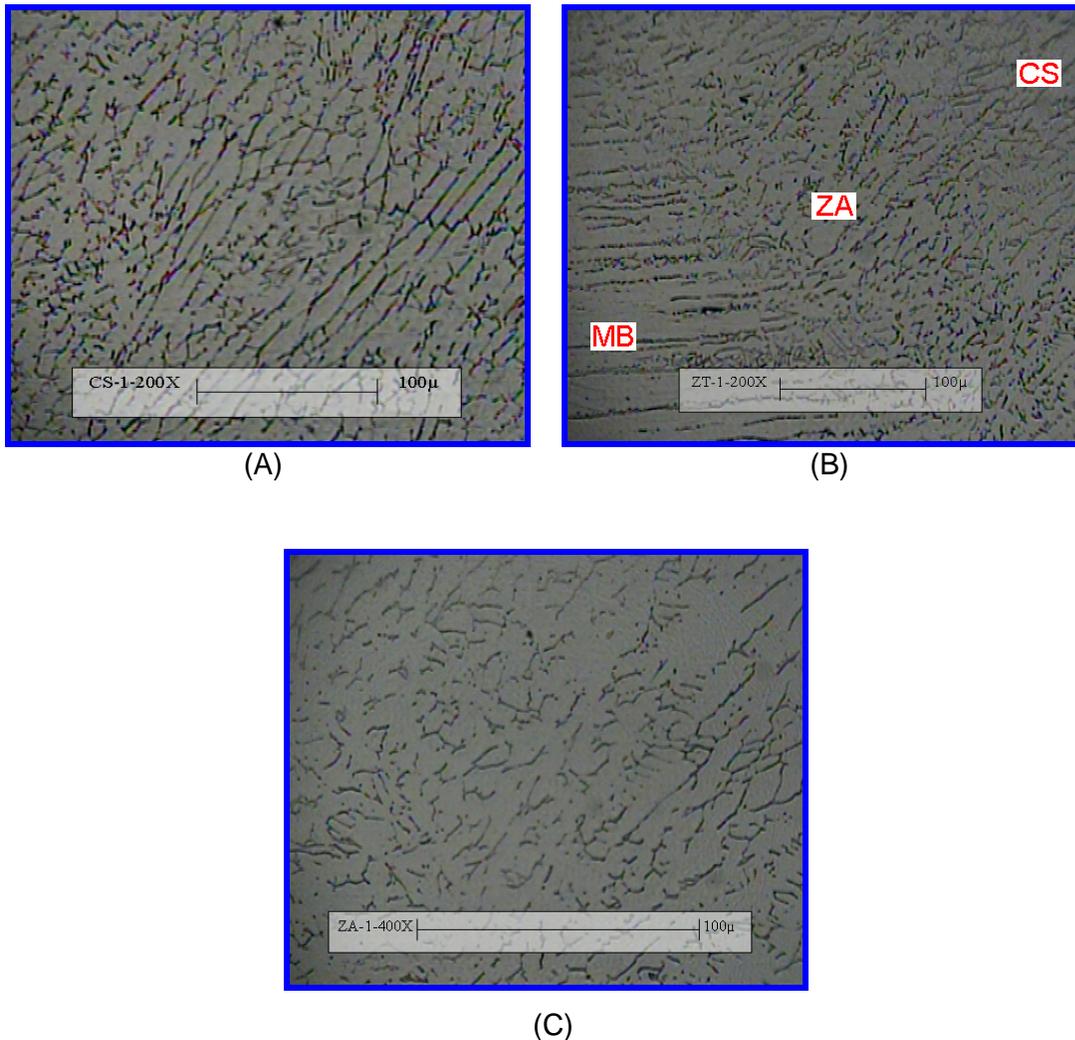


Figura 4.17 Ensayo 1, 140A con 7 L/min. A: Cordón de Soldadura a 200X, B: Zona de Transición a 200X, C: Zona Afecta por el calor a 400X.

En la figura 4.17A se muestra el metal soldado, en la 4.17B se muestran las tres zonas características de la soldadura (metal base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura) y en la 4.17C se muestra la zona afectada por el calor. De forma general se aprecia una formación de una estructura dendrítica que contiene ferrita delta y precipitaciones de carburo (pequeñas partículas negras) en una matriz austenítica.

- **Ensayo 2**

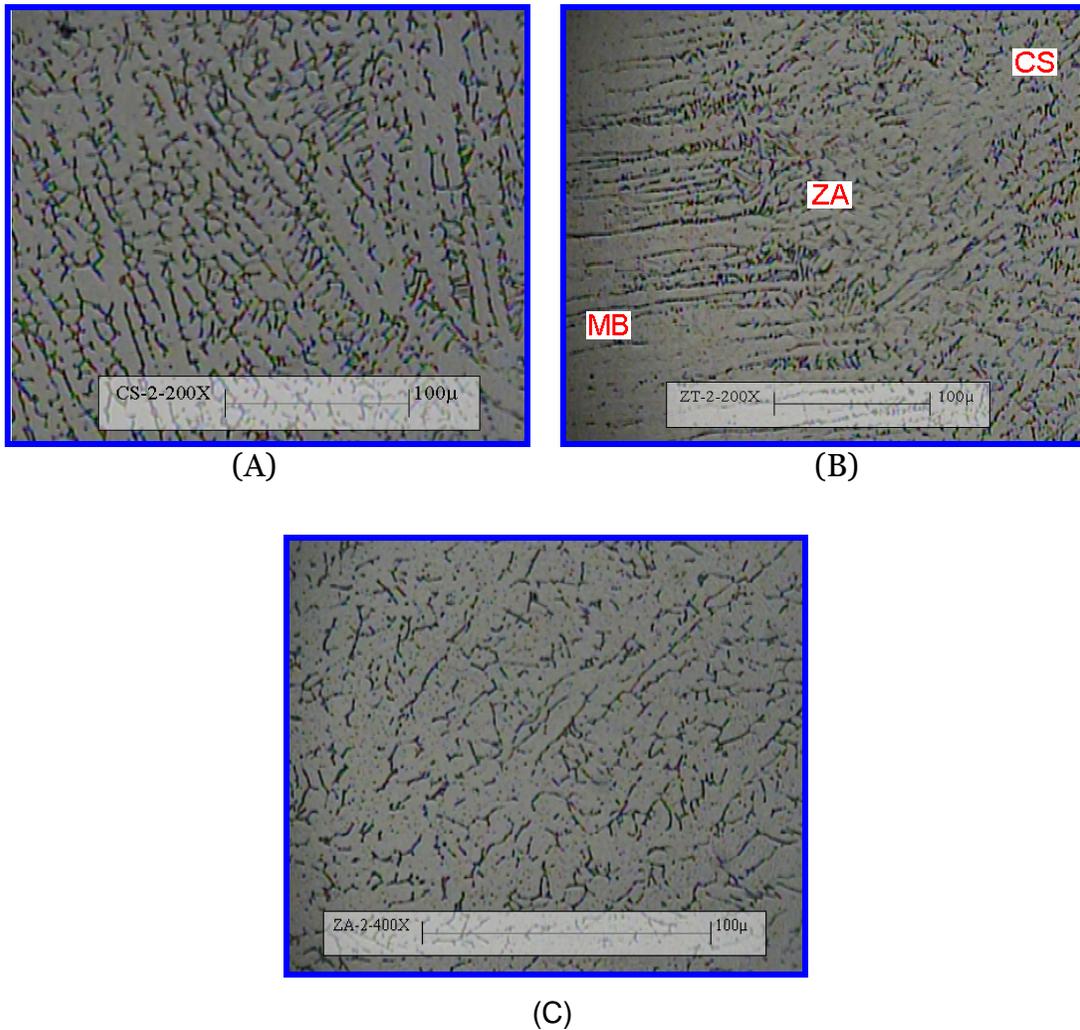


Figura 4.18 Ensayo 2, 140A con 10 L/min. A: Cordón de Soldadura a 200X, B: Zona de Transición a 200X, C: Zona Afecta por el calor a 400X.

En la figura 4.18A se muestra el metal soldado, en la 4.18B se muestran las tres zonas características de la soldadura (metal base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura) y en la 4.18C se muestra la zona afectada por el calor. De forma general se aprecia una formación de una estructura dendrítica que contiene ferrita delta y precipitaciones de carburo (pequeñas partículas negras) en una matriz austenítica.

• **Ensayo 3**

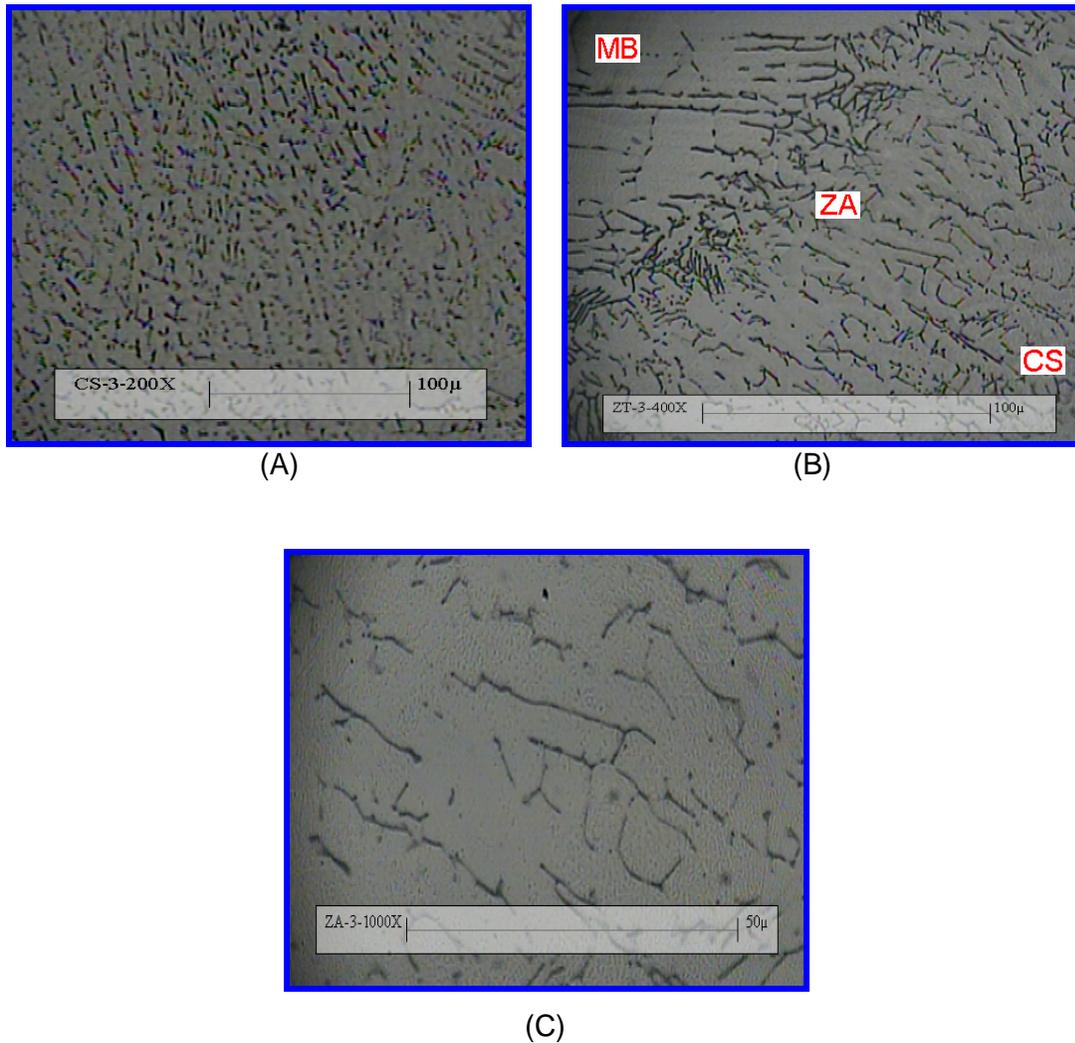


Figura 4.19 Ensayo 3, 140A con 14 L/min. A: Cordón de Soldadura a 200X, B: Zona de Transición a 400X, C: Zona Afecta por el calor a 1000X.

En la figura 4.19A se muestra el metal soldado, en la 4.19B se muestran las tres zonas características de la soldadura (metal base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura) y en la 4.19C se muestra la zona afectada por el calor. De forma general se aprecia una formación de una estructura dendrítica que contiene ferrita delta y precipitaciones de carburo (pequeñas partículas negras) en una matriz austenítica.

- **Ensayo 4**

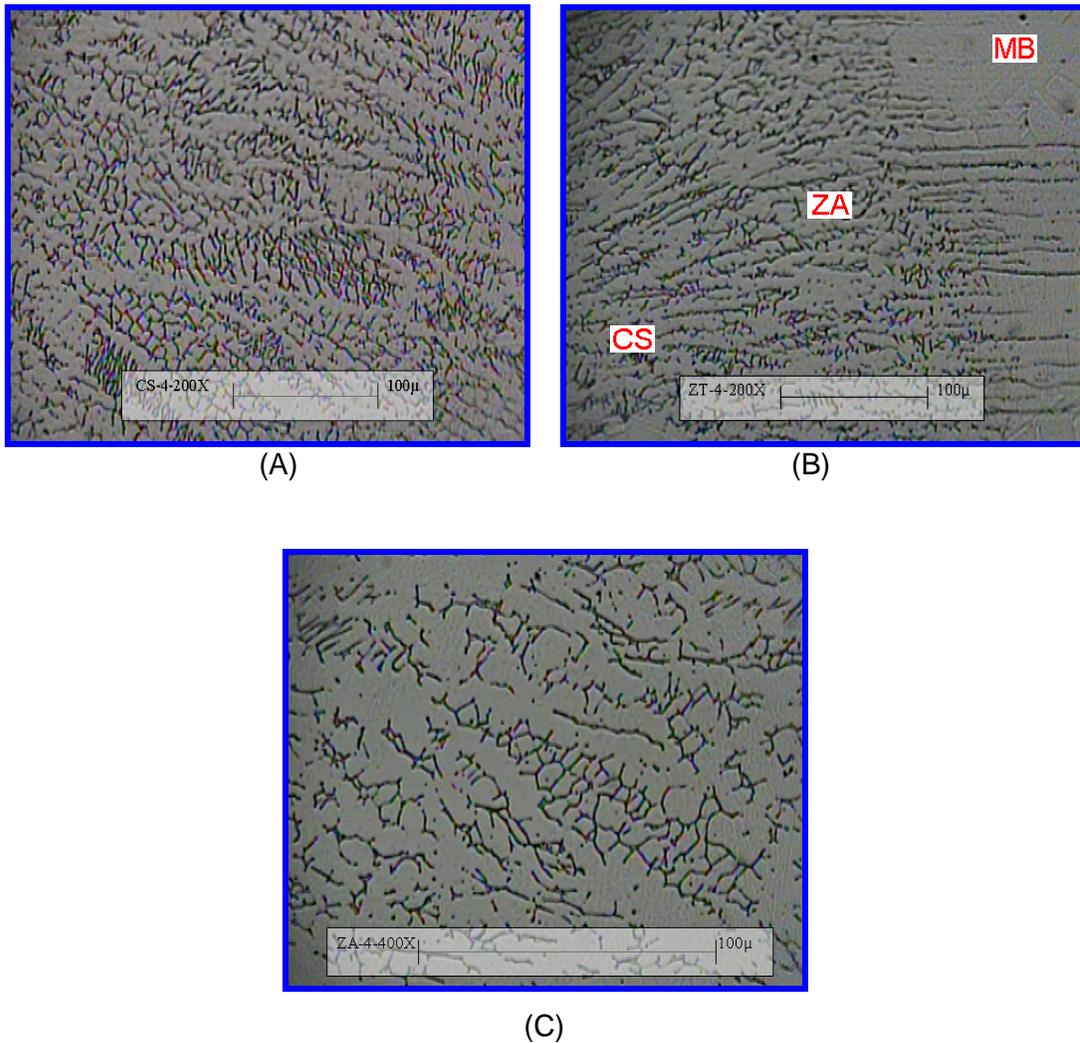


Figura 4.20 Ensayo 4, 130A con 7 L/min. A: Cordón de Soldadura a 200X, B: Zona de Transición a 200X, C: Zona Afecta por el calor a 400X.

En la figura 4.20A se muestra el metal soldado, en la 4.20B se muestran las tres zonas características de la soldadura (metal base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura) y en la 4.20C se muestra la zona afectada por el calor. De forma general se aprecia una formación de una estructura dendrítica que contiene ferrita delta y precipitaciones de carburo (pequeñas partículas negras) en una matriz austenítica.

- **Ensayo 5**

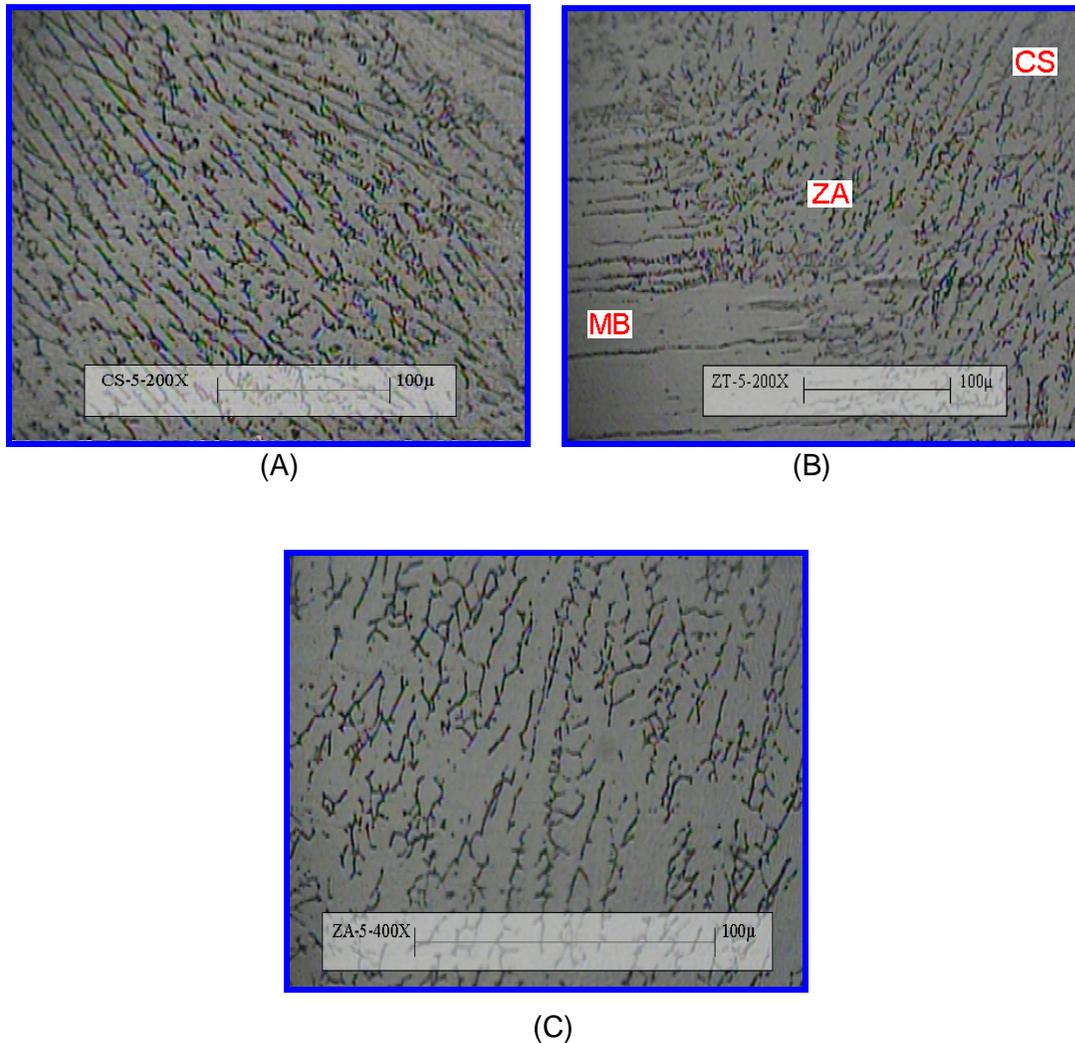


Figura 4.21 Ensayo 5, 130A con 10 L/min. A: Cordón de Soldadura a 200X, B: Zona de Transición a 200X, C: Zona Afecta por el calor a 400X.

En la figura 4.21A se muestra el metal soldado, en la 4.21B se muestran las tres zonas características de la soldadura (metal base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura) y en la 4.21C se muestra la zona afectada por el calor. De forma general se aprecia una formación de una estructura dendrítica que contiene ferrita delta y precipitaciones de carburo (pequeñas partículas negras) en una matriz austenítica.

- **Ensayo 6**

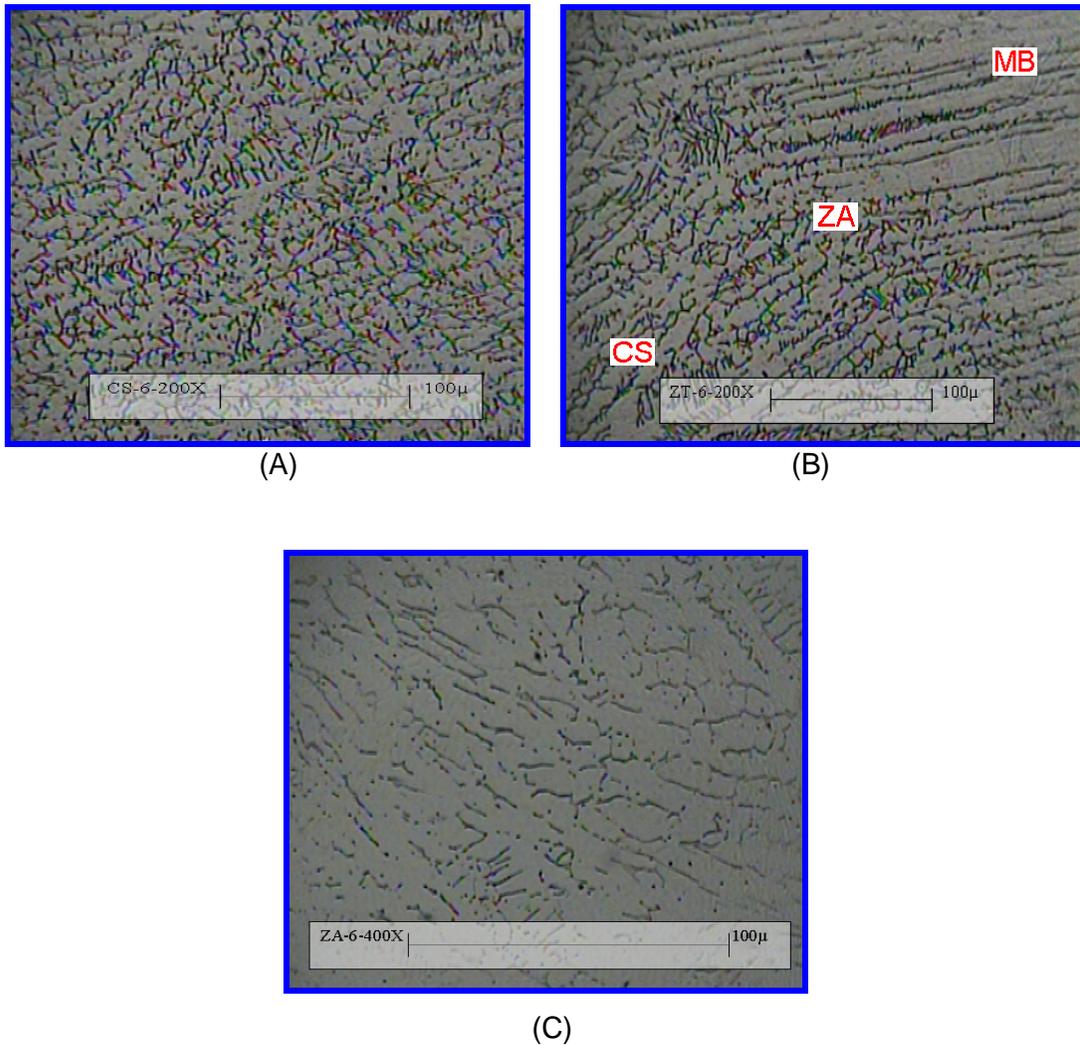


Figura 4.22 Ensayo 6, 130A con 14 L/min. A: Cordón de Soldadura a 200X, B: Zona de Transición a 200X, C: Zona Afecta por el calor a 400X.

En la figura 4.22A se muestra el metal soldado, en la 4.22B se muestran las tres zonas características de la soldadura (metal base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura) y en la 4.22C se muestra la zona afectada por el calor. De forma general se aprecia una formación de una estructura dendrítica que contiene ferrita delta y precipitaciones de carburo (pequeñas partículas negras) en una matriz austenítica.

- **Ensayo 7**

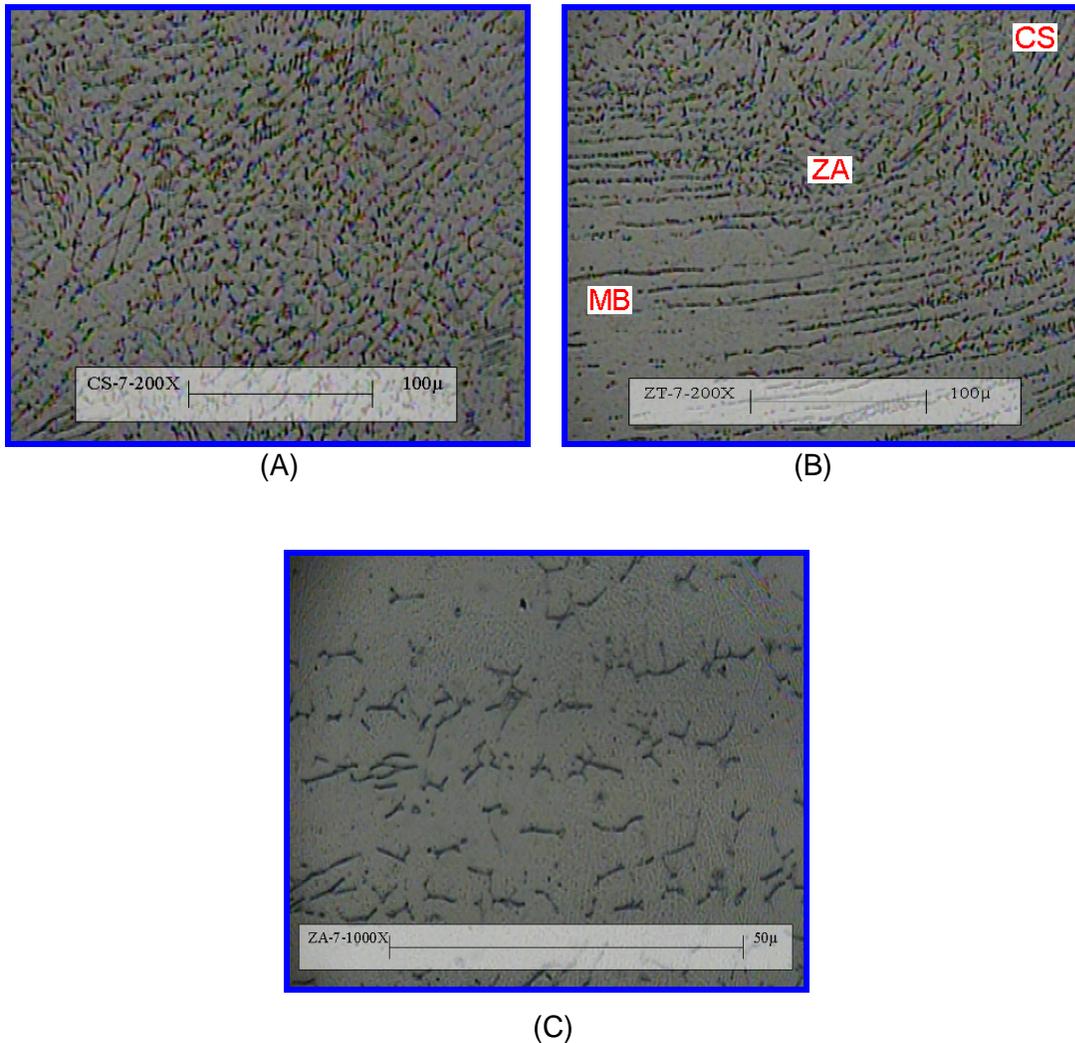


Figura 4.23 Ensayo 7, 120A con 7 L/min. A: Cordón de Soldadura a 200X, B: Zona de Transición a 200X, C: Zona Afecta por el calor a 400X.

En la figura 4.23A se muestra el metal soldado, en la 4.23B se muestran las tres zonas características de la soldadura (metal base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura) y en la 4.23C se muestra la zona afectada por el calor. De forma general se aprecia una formación de una estructura dendrítica que contiene ferrita delta y precipitaciones de carburo (pequeñas partículas negras) en una matriz austenítica.

- **Ensayo 8**

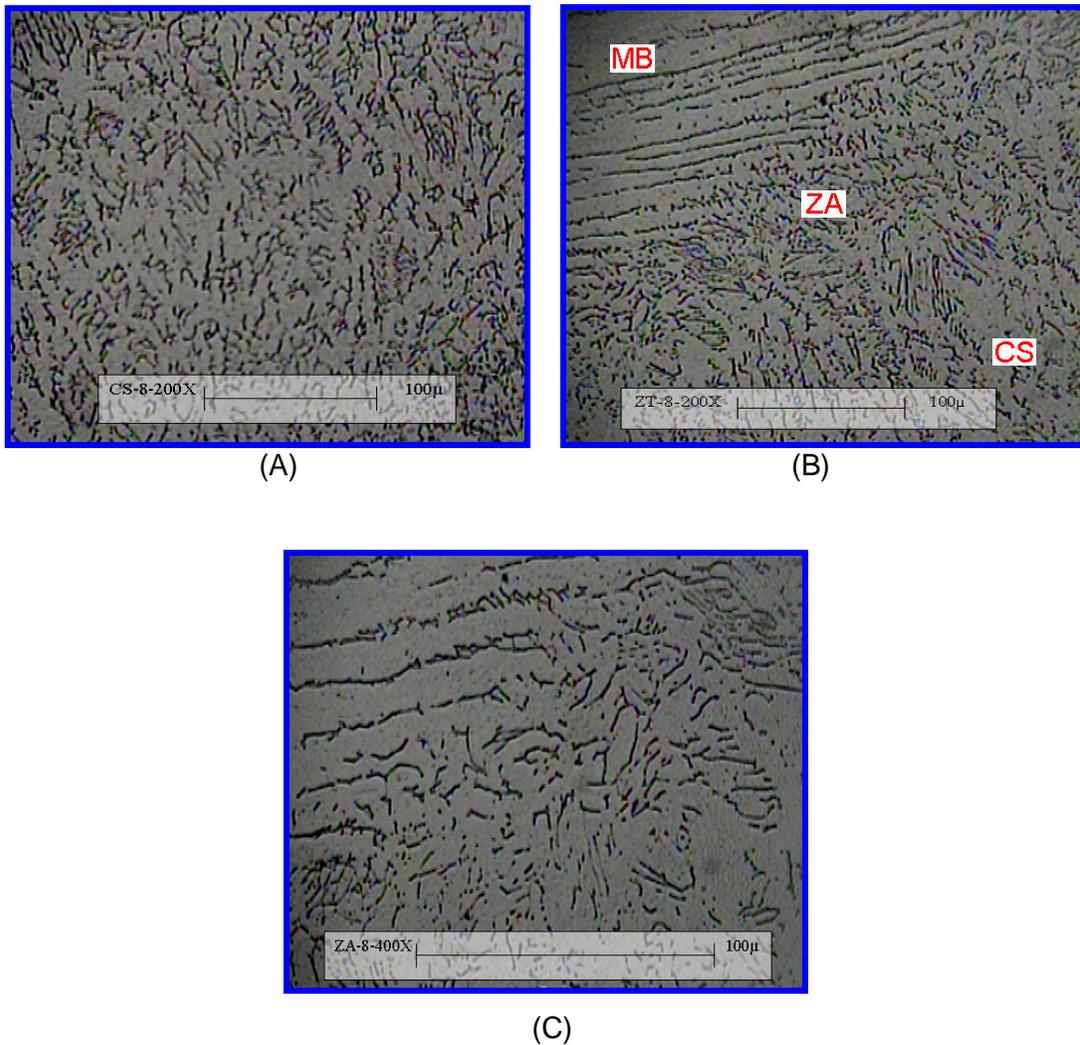


Figura 4.24 Ensayo 8, 120A con 10 L/min. A: Cordón de Soldadura a 200X, B: Zona de Transición a 200X, C: Zona Afecta por el calor a 400X.

En la figura 4.24A se muestra el metal soldado, en la 4.24B se muestran las tres zonas características de la soldadura (metal base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura) y en la 4.24C se muestra la zona afectada por el calor. De forma general se aprecia una formación de una estructura dendrítica que contiene ferrita delta y precipitaciones de carburo (pequeñas partículas negras) en una matriz austenítica.

- **Ensayo 9**

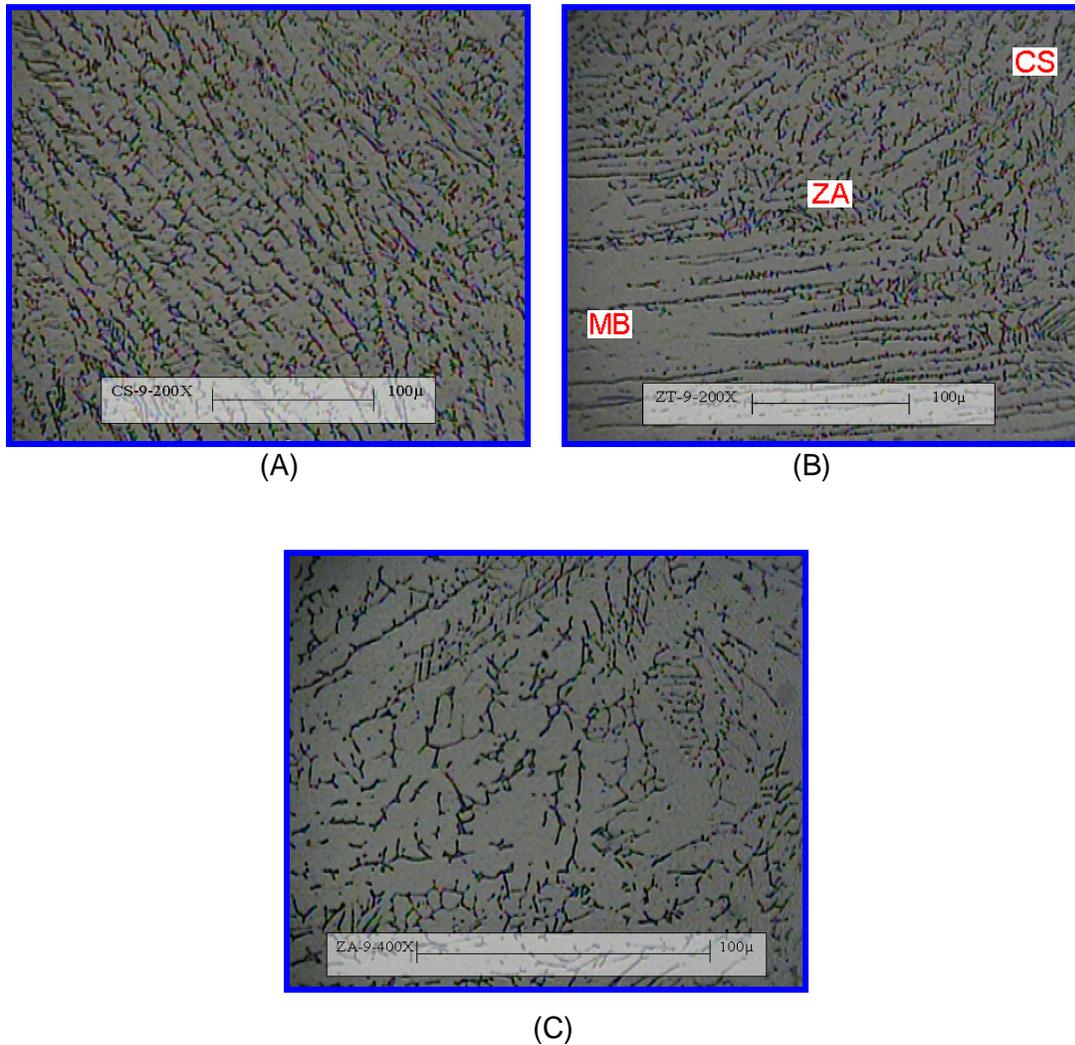


Figura 4.25 Ensayo 9, 120A con 14 L/min. A: Cordón de Soldadura a 200X, B: Zona de Transición a 200X, C: Zona Afecta por el calor a 400X.

En la figura 4.25A se muestra el metal soldado, en la 4.25B se muestran las tres zonas características de la soldadura (metal base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura) y en la 4.25C se muestra la zona afectada por el calor. De forma general se aprecia una formación de una estructura dendrítica que contiene ferrita delta y precipitaciones de carburo (pequeñas partículas negras) en una matriz austenítica.

- **Ensayo 10**

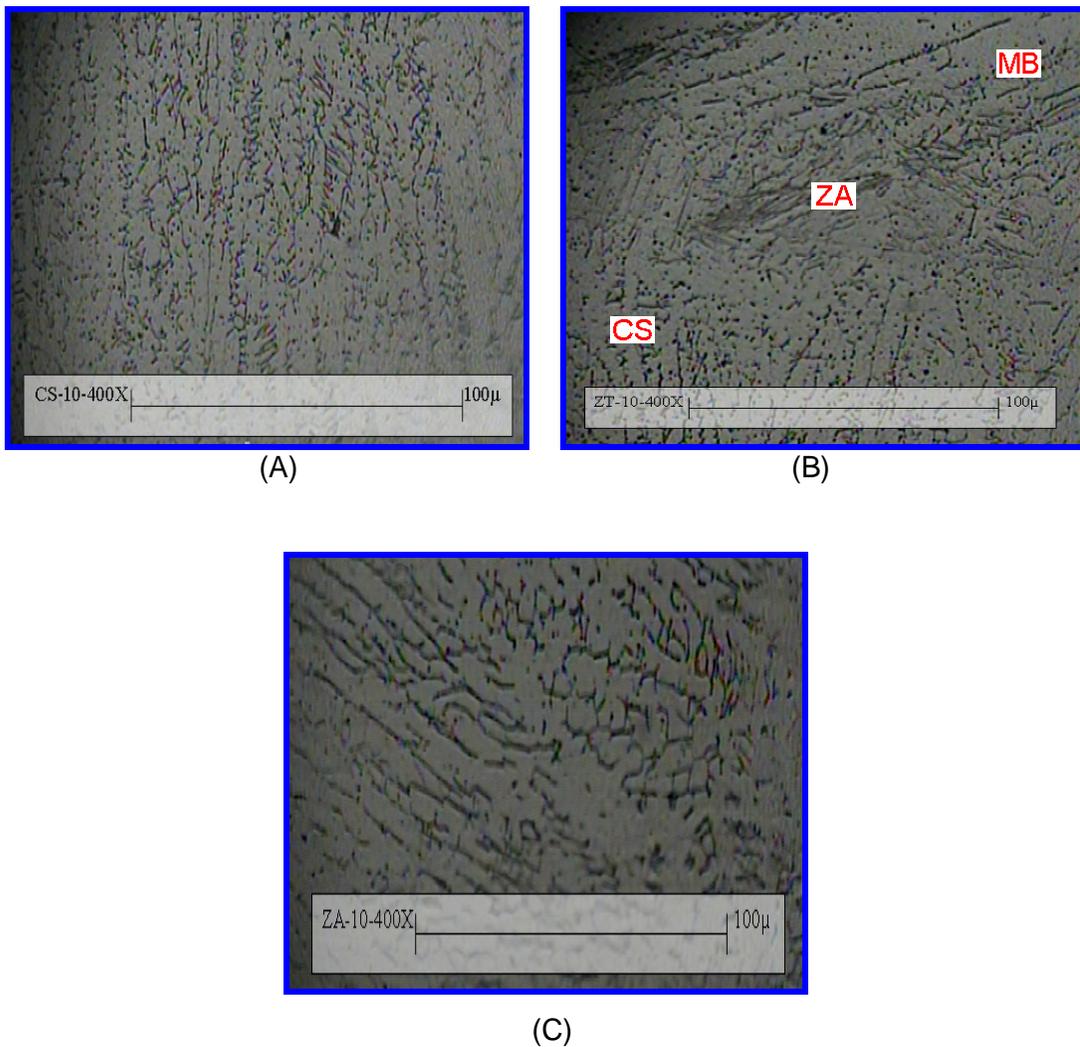


Figura 4.26 Ensayo 10, 70A con 2.5 L/min. A: Cordón de Soldadura a 400X, B: Zona de Transición a 400X, C: Zona Afecta por el calor a 400X.

En la figura 4.26A se muestra el metal soldado, en la 4.26B se muestran las tres zonas características de la soldadura (metal base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura) y en la 4.26C se muestra la zona afectada por el calor. De forma general se aprecia una formación de una estructura dendrítica que contiene ferrita delta y precipitaciones de carburo (pequeñas partículas negras) en una matriz austenítica.

En la figura 4.27 se muestran las características de la penetración (falta de penetración) que se originó en el ensayo diez (10) durante la realización del cordón de soldadura.

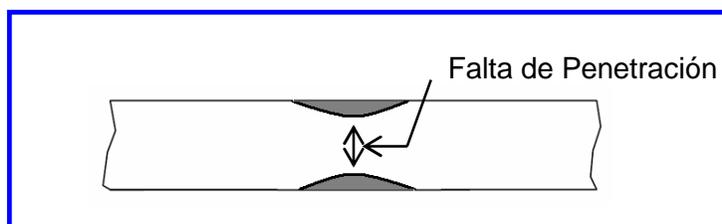


Figura 4.27 Penetración del Cordón de Soldadura. Ensayo 10.

4.3 ENSAYO DE DUREZA

Luego de realizado los ensayos de dureza, se tabularon y graficaron los resultados donde aparecen los valores de las durezas obtenidas y la escala a la cual pertenecen; determinadas a partir de este ensayo en las muestras del material en estudio, tanto en las distintas condiciones de trabajo y en las condiciones originales de dicho material.

4.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

En la tabla 4.9 se presentan los resultados de dureza del metal base. Se tomó una única muestra debido a que es el mismo metal base para todos los ensayos.

Tabla 4.9 Dureza del acero inoxidable AISI 304 en caracterización.

Nº Ensayo	Dureza Rockwell B					Prom.
	1	2	3	4	5	
Metal Base	76	77.9	76.8	76.4	76.2	76.66

4.3.2 ENSAYOS DE PROBETAS DE SOLDADURA

En las tablas 4.10 y 4.11 se presentan los valores de dureza obtenidos para los ensayos de soldadura, realizadas sobre el área del cordón de soldadura y la zona afectada por el calor respectivamente. (Ver figura 4.28)

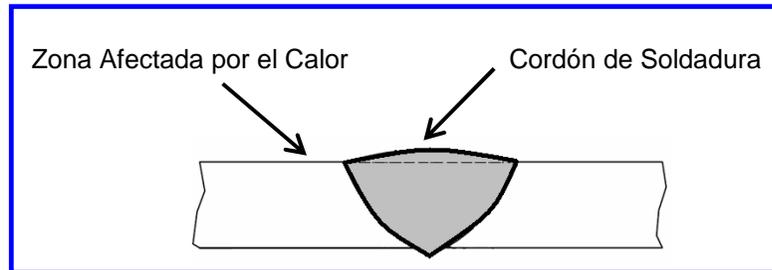


Figura 4.28 Zonas de Penetración.

Tabla 4.10 Dureza del acero inoxidable AISI 304 en el cordón de soldadura.

Nº Ensayo	Dureza Rockwell B					
	1	2	3	4	5	Prom.
1	80.1	81.2	81.2	80.9	79.8	80.6
2	79.8	80.0	80.2	72.3	74.3	77.3
3	82.1	75.5	85.2	78.7	85.1	81.3
4	81.2	85.0	80.1	80.0	80.5	81.4
5	83.4	81.0	83.9	75.0	67.9	78.2
6	82.1	81.9	81.6	82.6	81.2	81.9
7	82.2	86.5	87.2	86.6	72.5	83.0
8	80.3	84.8	80.1	80.6	82.5	81.7
9	81.9	81.2	83.4	78.9	88.1	82.7
10	92.1	82.7	89.9	91.0	90.9	89.3

Tabla 4.11 Dureza en la zona afectada por el calor.

Nº Ensayo	Dureza Rockwell B					
	1	2	3	4	5	Prom.
1	77.1	85.7	81.4	74.7	77.2	79.2
2	76.9	86.2	71.2	65.7	83.1	76.6
3	82.6	85.9	83.5	70.0	87.8	82.0
4	82.6	77.4	69.5	87.5	85.1	80.4
5	74.0	82.2	70.8	83.2	79.5	77.9
6	79.4	82.0	75.8	81.2	74.5	78.6

Tabla 4.11 Dureza en la zona afectada por el calor. (Continuación)

Nº Ensayo	Dureza Rockwell B					
	1	2	3	4	5	Prom.
7	84.6	85.3	80.2	76.8	87.8	82.9
8	82.1	75.3	84.1	71.9	84.3	79.5
9	73.6	78.9	84.7	89.1	72.5	79.8
10	86.6	72.1	84.9	88.9	85.4	83.6

En la figura 4.29 y 4.30 se muestran las gráficas de dureza vs. número de ensayos en las zonas estudiadas.

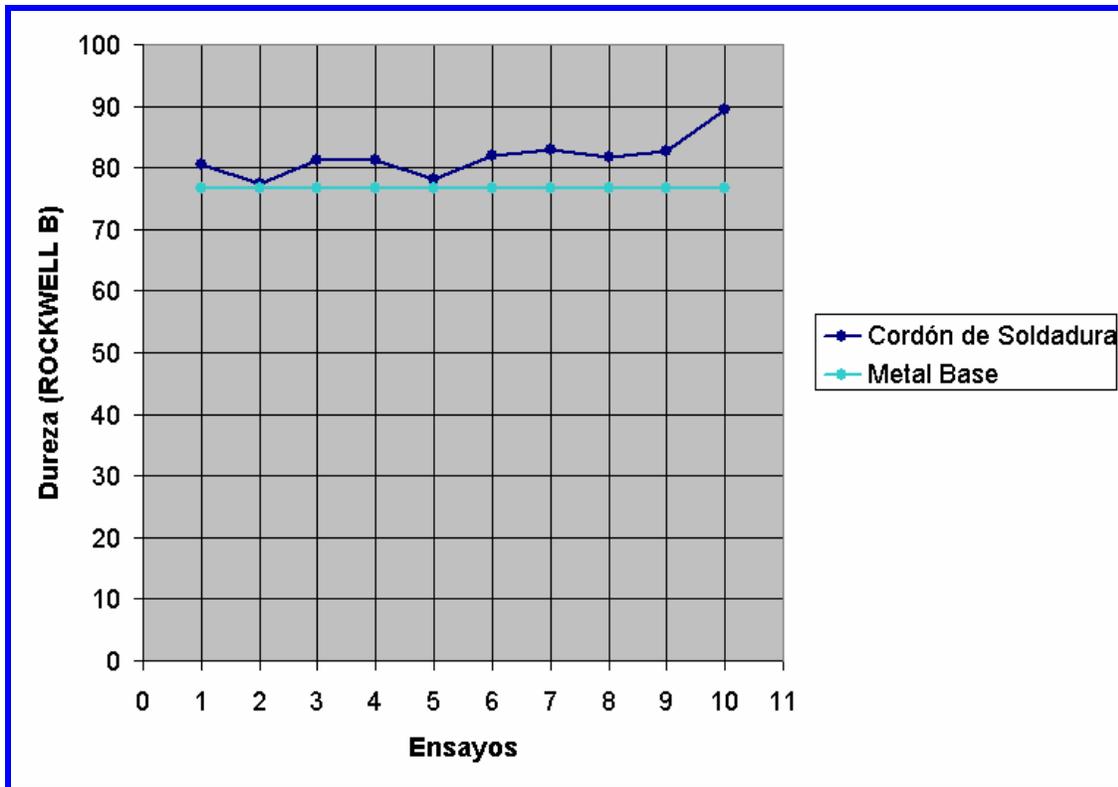


Figura 4.29 Dureza en el cordón de la Soldadura vs. Número de Ensayos.

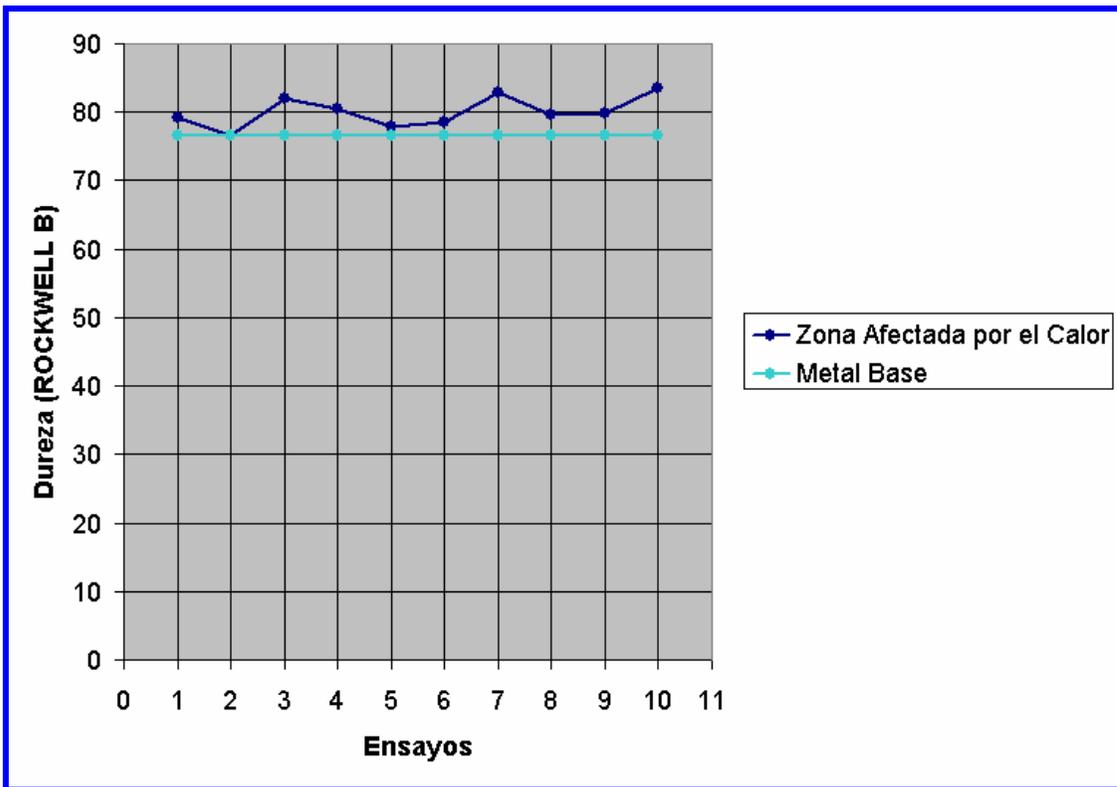


Figura 4.30 Dureza en la Zona Afectada por el Calor vs. Número de Ensayos.

100 *Determinación de los parámetros óptimos para realizar soldadura en acero inoxidable AISI 304 a través del proceso TIG.*

CAPÍTULO 5

Análisis de Resultados

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

1. Se puede apreciar en los ensayos de tracción para la caracterización del material, que las curvas de esfuerzo vs. deformación realizadas para las tres (3) probetas, muestran un comportamiento semejante en cuanto a plasticidad y elasticidad, observándose una gran zona plástica, la cual es característica en éste material debido a la ductilidad que le ofrece el porcentaje de níquel presente en el mismo.
2. El ensayo de tracción arrojó como resultado unos valores de esfuerzo promedio de 318, 628 y 526 Mpa para el esfuerzo de fluencia, máximo y ruptura respectivamente, y al ser comparados con los esfuerzos mecánicos teóricos 295, 550 Y 520 Mpa, se aprecia una similitud entre dichos valores. Aunque existe una diferencia de 23, 78 y 6 Mpa entre éstos esfuerzos respectivamente, tales diferencias son aceptables tomando en cuenta que los valores de caracterización fueron obtenidos de forma experimental y además se puede inferir que pudieron existir pequeños cambios en la composición química del material con respecto a la composición química teórica, de igual manera pudieron existir defectos en el material como: porosidades, microgrietas, entre otros, originados a partir

del proceso de fabricación y manufactura del mismo. En éste mismo sentido, se puede inferir que dichas causas pudieron originar la dispersión encontrada en la deformación de cada probeta ensayada a tracción durante la caracterización del material.

3. Al comparar la microestructura del acero inoxidable AISI 304 en estado de entrega con la microestructura teórica del mismo material (extraída del Metals Handbook) se aprecia una gran similitud entre ambas, apreciándose una estructura que consiste en granos equiaxiales de austenita para ambos casos.
4. Se obtuvo un valor de dureza promedio para caracterización de 77 HRB, el cual se encuentra bastante cercano al valor teórico del material, 80 HRB, lo que indica una similitud en la dureza teórica y en estado de entrega del material.

5.2 ENSAYOS DE PROBETAS DE SOLDADURA

1. Se pudo observar en los valores de esfuerzo obtenidos en los ensayo de tracción que para el flujo de gas inerte (argón) de 10 L/min se muestran los mayores valores de esfuerzo (máximo, ruptura y fluencia) por cada intensidad de corriente en cada una de los ensayos realizados. Esto motivado a que con éste caudal de gas se protege de forma idónea el arco eléctrico generado, lo que a su vez es causa raíz de la disminución en el porcentaje de las estructuras dendríticas encontradas en el material (debido a la homogenización del metal fundido), las cuales deterioran las propiedades mecánicas del mismo. (ver efecto de las estructuras dendríticas en el análisis 7 de los ensayos de soldadura)

2. Se observó una tendencia decreciente en los valores de esfuerzos mecánicos a medida que disminuye la intensidad de corriente en cada ensayo realizado, mostrando los mejores resultados al utilizar una intensidad de corriente de 140 A, obteniéndose un esfuerzo promedio para el flujo de gas de 10 L/min de 312, 626 y 588 Mpa para la fluencia, máximo y ruptura respectivamente, apreciándose una diferencia de 28, 51 y 43 Mpa en comparación con los esfuerzos obtenidos en el ensayo 8 (último ensayo recomendado) a 120 A y 10 L/min de 284, 577 y 545 Mpa respectivamente. Para el ensayo de 140 A se obtuvieron los mayores valores de esfuerzos, debido a que para tal intensidad el material funde completamente lo que disminuye la precipitación de los carburos originadores de las estructuras dendríticas. (ver efecto de las estructuras dendríticas en el análisis 7 de los ensayos de soldadura)

3. Se puede apreciar en los ensayos de tracción para los ensayos de soldadura, que las curvas de esfuerzo vs. deformación realizadas para las tres (3) probetas, muestran un comportamiento semejante en cuanto a plasticidad y elasticidad, sin embargo, existen dispersiones en la zona plástica del material entre cada una de las probetas ensayadas, tal dispersión puede ser originada debido a imperfecciones de pasada del cordón de soldadura, esto motivado a ciertos factores tales como: la velocidad de pasada, corrientes de aire (que desestabilizan el arco eléctrico) y el ángulo de pasada. Estos factores traen como consecuencia la siguiente serie de eventos: mala fusión del material, por lo que se tiende a precipitar mayor cantidad de carburos hacia los bordes de grano, estos carburos generan una mayor formación de estructuras dendríticas y endurecen el material fragilizándolo, y a su vez tales estructuras tienden a originar fisuras bajo fuerzas de tensión, que provocan rupturas irregulares (algunas con mayor porcentaje de reducción de área que otras probetas) dando origen a la dispersión en la zona plástica anteriormente

mencionada, de igual manera se explican las dispersiones encontradas en los esfuerzos de ruptura. Tales características son extrapolables para el resto de los ensayos realizados.

4. En el ensayo número diez (10) se creó un cuello muy delgado en la zona fundida de las probetas, debido a la falta de penetración que se obtuvo al utilizar la intensidad de corriente de 70A. Tal cuello originó una disminución en la resistencia mecánica del material, debido a la disminución del área de la sección transversal de la probeta.
5. En las fotografías de microestructura observadas para todos los ensayos, se aprecia una tendencia a la formación de una estructura dendrítica, originada por la precipitación del carburo $M_{23}C_6$ hacia los bordes de grano, por un defecto característico originado en los acero inoxidables durante los procesos de soldadura denominado sensibilización. La precipitación de éste carburo ocurre como consecuencia del incremento de la temperatura del material durante la soldadura y el enfriamiento rápido, produciendo el fenómeno de corrosión intergranular, lo que da origen a la formación de la estructura dendrítica mencionada anteriormente.
6. Para todos los ensayos realizados de Microestructura, se aprecia que en la zona de metal fundido o zona del cordón de soldadura existe mayor prevalencia de la estructura dendrítica en comparación con la zona afectada por el calor y el metal base, apreciándose una tendencia a la disminución de ésta estructura al pasar desde la zona fundida hasta el metal base, esto es debido a que en la zona afectada por el calor el material recibe menos la influencia del calor generado por el arco eléctrico de la soldadura, ocurriendo menor precipitación de carburos hacia los bordes de grano en tales zonas.

7. A medida que se disminuye la intensidad de corriente (cada tres ensayos) se aprecia un aumento progresivo en la formación de la estructura dendrítica en el cordón de soldadura y en la zona afectada por el calor, esto es debido a que al disminuir la temperatura de fusión del material por efecto de la disminución en la intensidad de corriente, el contenido de carbono supera los límites de solubilidad de la austenita (el carbono se disocia de la austenita) y esto a su vez es debido a la presencia de cromo que tiende a formar carburos estables, produciéndose la separación de los granos de austenita. Esto trae como consecuencia una disminución en la resistencia mecánica del material por efecto de la formación de fisuras en los intersticios de las estructuras dendríticas bajo fuerzas de tensión, lo que corrobora las propiedades obtenidas en los ensayos de tracción.
8. Para todos los ensayos de dureza realizados, se aprecia que el material se vuelve más duro en la zona del cordón de soldadura, debido a que en ésta zona se alcanza una mayor temperatura, por lo que se produce un enfriamiento más rápido lo que conlleva a una mayor dureza del material.
9. Se pudo observar en los ensayos de dureza realizados para el flujo de gas de 10 L/min, que tanto en el cordón de soldadura como en la zona afectada por el calor, se encuentran los valores más parecidos a los de dureza del metal base por cada intensidad de corriente.
10. Se pudo observar una tendencia creciente en los valores de dureza a medida que disminuye la intensidad de corriente en cada ensayo realizado, mostrando los resultados más parecidos al metal base al utilizar una intensidad de corriente de 140 A, obteniéndose una dureza promedio para el flujo de gas de 10 L/min de 77 y 77 HRB para el cordón de soldadura y la zona afectada por el calor respectivamente, apreciándose una diferencia de 4 y 3 HRB en comparación con los valores de dureza obtenidos en el

ensayo 8 (último ensayo recomendado) a 120 A y 10 L/min de 82 y 80 HRB respectivamente.

11. El aumento en la dureza al disminuir la intensidad de corriente (cada tres ensayos) se produce debido a la formación de carburos en las estructuras dendríticas, las cuales dan origen a la fragilización del material. Esto puede traer como consecuencia la formación de fisuras bajo fuerzas de tensión en el material, lo que de igual forma corrobora los resultados obtenidos en el ensayo de tracción.

Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES

1. Se determinó que los elementos necesarios para la puesta a punto de la máquina de soldadura múltiple del taller metalmecánico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo fueron: porta electrodo, difusor de gas y la adquisición de una bombona de argón, con lo que se logró la implementación del equipo.
2. Se determinó por medio de la caracterización que el material en estado de entrega corresponde con las propiedades mecánicas y microestructurales del acero inoxidable AISI 304.
3. Se determinó que el flujo de gas inerte óptimo para realizar soldadura TIG en acero inoxidable AISI 304 en láminas de 3 mm de espesor, a tope y sin material de aporte, en el taller metalmecánico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo es de 10 L/min, debido a que con éste valor se obtienen las mejores propiedades mecánicas (resistencia y dureza) y microestructurales.
4. Se determinó que la intensidad de corriente óptima para realizar soldadura TIG en acero inoxidable AISI 304 en láminas de 3 mm de espesor, a tope y

sin material de aporte, en el taller metalmecánico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo es de 140 A, debido a que con éste valor se obtuvieron los valores máximos de resistencia del material en los ensayos de soldadura de 312, 626 y 588 Mpa para los esfuerzos de fluencia, máximo y ruptura respectivamente, en comparación con los valores obtenidos en 130 A (286, 581 y 548 Mpa) y 120 A (284, 577 y 545 Mpa) respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda completar éste estudio evaluando la velocidad de pasada para la realización del cordón de soldadura, ya que ésta variable también es de gran influencia en las propiedades de las juntas soldadas, para tratar en lo posible de eliminar el error humano o realizar el estudio con soldadura TIG automática.
2. Se recomienda utilizar medios ambientes aislados para evitar las posibles corrientes de aire que originan desestabilización en el arco eléctrico.
3. Se recomienda estudiar el comportamiento de las juntas soldadas, bajo el proceso GTAW utilizando diferentes espesores de láminas de trabajo o utilizando material de aporte.
4. Se recomienda evaluar el comportamiento de las juntas soldadas, bajo el proceso GTAW con distintos materiales.
5. Se recomienda precalentar las láminas del material antes de realizar el proceso de soldadura para evitar el pandeo por la acción del calor.

ANEXOS



GUÍA TÉCNICA PARA EL OPERADOR

Para la utilización de una maquina de soldadura múltiple HOBART TIG WAVE 250 AC/DC Transformer –Rectifier Welding Machine (disponible en el taller metalmecánico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo) en soldadura TIG (GTAW) se deben ajustar los parámetros de máquina según la tabla de parámetros recomendados a continuación:

Parámetros Recomendados de Máquina. (Hobart Brother Company, 1991)

Control	Condición	Descripción de la Función
Control de Balance AC (AC Balance Control)	TIG/STICK (electrodo revestido) DC	Ajusta la forma de onda de salida de corriente para corriente alterna (AC) o Corriente Continua (DC). En este caso ajusta la onda para corriente DC
Control de la Fuerza de Arco (Arc Force Control)	0	Solo se utiliza para soldadura de arco con electrodo revestido (STICK)
Interruptor de Alta Frecuencia (High Frequency Switch)	Empezar (Start)	Permite la iniciación del arco debido a alta frecuencia generada entre el metal base y el electrodo al inicio de la soldadura. Se corta automáticamente cuando se estabiliza el arco.
Interruptor Encendido/ Apagado (Power ON/OFF switch)	Encendido (ON)	Conecta la fuente de Poder
Interruptor Encendido/Apagado Sostenimiento del Pedal (trigger Hold ON/OFF switch)	Apagado (OFF)	Se deja presionado el pedal durante toda la soldadura y se suelta al final de la misma. Al presionar el pedal se da inicio al tiempo de pre-flujo y al soltar el pedal se da inicio al tiempo de post-flujo
Control de Tiempo del Pre-flujo (Preflow Time Control)	2.5 s	Controla el tiempo de flujo de gas antes del inicio de la soldadura.

Parámetros Recomendados de Máquina. (Hobart Brother Company, 1991)

Control	Condición	Descripción de la Función
Control de Balance AC (AC Balance Control)	TIG/STICK (electrodo revestido) DC	Ajusta la forma de onda de salida de corriente para corriente alterna (AC) o Corriente Continua (DC). En este caso ajusta la onda para corriente DC
Control del Amperaje (Amparage Adjustment)	-	Se ajusta la corriente operacional
Interruptor de ajuste de la formación de agujeros (Crater Fill Adjustment Switch)	Encendido (ON) (7 s)	Ajusta el tiempo antes del post-flujo para evitar la formación de cráteres al final de la soldadura
Control de tiempo de pos-flujo (Postflow Time Control)	12 s	Controla el tiempo de de flujo de gas al final de la soldadura.
Selector AC/DC (AC/DC selector Switch)	Electrodo negativo (Negative Electrode)	Ajusta el tipo de corriente y polaridad a utilizar para el electrodo. En este caso la corriente se inicia del electrodo a la pieza.
Interruptor del control de Amperaje (Amparage Control Switch)	Local	Ajusta la máquina a la intensidad de trabajo que se calibro en el control del amperaje

Referencias

- ACERIND S.C., (2006), **Soldadura de los aceros Inoxidables**, Sección I. Argentina, Buenos Aires. pp. 10 – 12.
- Acosta, A., Monsalve, Y. (2006), **Determinación de los valores adecuados de los parámetros de trabajo para una máquina de soldadura por fricción**. Trabajo de grado. Universidad de Carabobo, Valencia. pp. 56 – 60.
- **AMERICAN WELDING SOCIETY / MANUAL DE SOLDADURA**. (1996), Tomo III. 8^{va} edición. Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, S.A.
- Bazán C. E., (1998), **Determinación de electrodos y calculo de costos de soldadura de arco asistido por computadora**, Piura – Perú. pp. 16 – 21.
- Huamanchumo H, Ricci S. (2006), **Estudio del Comportamiento Mecánico del acero Inoxidable Duplex SAF 2507, Ensayado a Tracción a Diferentes Temperaturas**. Trabajo de Grado. Universidad de Carabobo, Valencia.
- **INFRA / MANUAL DE CONCEPTOS BÁSICOS EN SOLDADURA Y CORTE**. (2000). Tomo III. Editorial INFRA, S.A. DE C.V. pp. 38 – 40.
- Maesques, P. V., Modenesi, P. J., (1999), **Características del arco de soldadura TIG en diferentes atmósferas**, Journal de Revista de Metalurgia, V. 37 (5), pp. 292 – 300.

- METALS HANDBOOK (1972). Vol. 7. "Atlas of microestructures of industrial alloys". 8^{va} edición. American society for metals.
- Modenesi, P. J., Apolinário, E. R., Pereira, I. M., (2000), **TIG welding with single-component fluxes**, Journal of Materials Processing Technology, V. 99, pp. 260 – 265.
- Monsalve Gil, Héctor Iván; David Alejandro Mena Herrera, Jorge Enrique Giraldo Barrada. (2004). **Efecto del amperaje en las propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abrasión aplicados por soldadura**. *Dyna*, 71, 144, 151-163.
- Nascimento, M. P., Voorwald, H. J., Gamarra R, V. O., (2003), **Efectos del proceso de soldadura TIG en la resistencia a ensayos por fatiga del acero aeronáutico ABNT 4130**, Revista latinoamericana de metalurgia y materiales, Vol. 23 N° 2, pp. 36 – 44.
- LINCOLN SOLDADURA DE VENEZUELA C.A. (2008), **Material de apoyo del curso de Soldadura TIG**. Venezuela, Valencia.
- Pozo, M. J., Cedre, D. E., Rico, T. M., Gaitán, G. M. (2006), **Soldadura de cintas extrafinas de cobre mediante el proceso TIG automático**. Ponencia COMEC. México, Querétaro.
- Quass J. F. (1970), **Hardfacing International**, Welding Journal, pp.175 – 182.
- Ramírez, A., Cerpa, S., Mejias, G., León, J. B., Quintero, A., (2006), **Soldadura de un acero inoxidable Duplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW**. Revista latinoamericana de metalurgia y materiales, pp. 44 – 49.
- Rodríguez, Pedro C. (2001), **Manual de Soldadura**. Primera edición. Editorial Alsina. Argentina, Buenos Aires, pp. 16 – 18.
- SUNARC. (2003), **Soldadura TIG**. Argentina, Buenos Aires. pp. 3 – 23.
- Cordero, F. Cordero, J. (2005). **Determinación de los efectos de la fuerza de arco eléctrico en la sección transversal de la soldadura GTAW con argón en acero inoxidable austenítico 304**. Universidad de Carabobo. Trabajo de Grado.