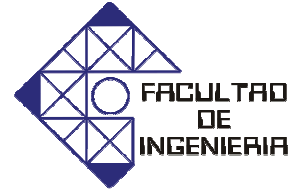




UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación de las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW para tuberías de acero inoxidable AISI 304

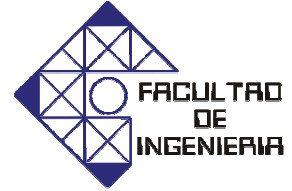
Medina González, Luis Alberto

Román Medina, Pedro José

Naguanagua, 26 de Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación de las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW para tuberías de acero inoxidable AISI 304

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

Tutor académico:

Nombre del Tutor. *Ing. Oswaldo Urbano*

Autores:

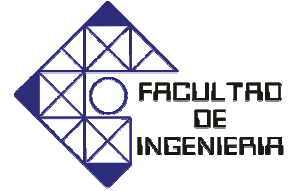
Medina González, Luis Alberto

Román Medina, Pedro José

Naguanagua, 26 de Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Determinación de las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW para tuberías de acero inoxidable AISI 304

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

Medina González, Luis Alberto

Román Medina, Pedro José

Naguanagua, 26 de Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada **“DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES INFLUYENTES EN EL PROCESO DE SOLDADURA ORBITAL GTAW PARA TUBERIAS DE ACERO INOXIDABLE AISI 304”**, presentada por los bachilleres: **Luis A. Medina G.** y **Pedro J. Román M.**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **17.954.895** y **18.360.539**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Oswaldo Urbano, *Ing.*
Presidente del Jurado

Prof. Gennifer Aparicio, *Ing.*
Miembro del Jurado

Prof. Sandra Cabello, *Ing.*
Miembro del Jurado

En Naganagua a los 26 días del mes de Mayo de 2011

Agradecimientos

Primeramente a **Dios**, por ser el dador de vida y proveedor de sabiduría en todas las actividades que pone delante de mí para cumplir su propósito en mi vida. Por hacerme entender, que delante de él nada es imposible, que su amor es infinito, siempre me valdré de sus palabras: porque Dios da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia. (Proverbios 2:6)

A mis padres **Luis Medina** y **Meri González**, por ser la base de las grandes obras que día a día construyo en la vida, y por que lo serán en las que han de venir. A ellos agradezco, su lealtad, el apoyo, el amor, paciencia y todos los valores inculcados en mi formación como persona.

A mi familia: mi abuela **María Cuevas**, pilar de bonitos sentimientos y gran sabiduría. Mis tíos: **Ana** y **Valdonio**, por el apoyo incondicional brindado, por hacerme sentir un hijo más y abrirme las puertas de su hogar durante mi formación para la vida profesional. Mis tíos **Dora** y **Jesús**, por su gran sabiduría espiritual y el apoyo en mi entrenamiento profesional. Al resto de mis tíos, mi hermana y a mis primas.

A mi novia **Nataly Araujo**, por ser más que eso, por ser mi amiga, mi hermana, mi futura odontólogo, por todas las bonitas palabras que me regala día a día y me muestran el lado sutil de la vida, ese amor infinito que Dios puso en nuestros corazones no tiene límites. A la familia **Araujo Risquez**, aparte de suegros se han comportado como padres y grandes amigos, y a **Cristofer** por la inocencia, dulzura y carisma que lo caracterizan.

A mi colega y amigo, **Pedro Román**, juntos alcanzamos el éxito y vencimos los obstáculos durante nuestra formación, dura pero traerá grandes frutos. A todos mis compañeros de estudio, amigos y a todas las personas que me incentivaron llegar a la meta.

Luis Medina

Agradecimientos

Antes que nada agradezco a mi madre **Francia Medina**, por ser el pilar de mi formación personal enseñándome la diferencia entre lo bueno y lo malo, por brindarme su apoyo incondicional durante todos los días de mi carrera y de mi vida, y sobre todo por creer en mí en cada momento y convencerme de que si soy capaz de alcanzar cualquier meta que me proponga.

A mi padre **Héctor Alfredo Román**, por quererme y estar a mi lado desde el principio de mi vida a pesar de las circunstancias, por servir de fuente de inspiración estos últimos meses y hacerme saber apreciar el regalo que la vida nos da y por demostrarme su cariño y darme sus bendiciones cada día que lo veo.

A mi hermana **Grecia Turmero** quien ha estado ahí cuando la he necesitado y por sus consejos que aunque no lo parezca son bien recibidos y aprovechados. A mi cuñado **Randolph Sánchez** por ser como un padre para mí y haberme enseñado tanto en lo que llevo de vida.

A mis **tíos y tías** por la ayuda brindada a lo largo de mi carrera. A mis **amigos, amigas y compañeros** de clase quienes me demostraron lo importante que es tener a alguien que te escuche y te apoye en los momentos más difíciles y de quienes cada día sigo aprendiendo.

A mi tutor, **Ing. Oswaldo Urbano** por su colaboración en la realización de este trabajo de grado y poner a la orden su experiencia y conocimientos técnicos, al igual que a la profesora **Sandra Cabello** por su ayuda y orientación desde el principio hasta el final de este trabajo y por su amabilidad sin importar la situación.

A mi compañero de tesis y amigo **Luis Medina** con quien logre alcanzar todas las metas propuestas durante la carrera y la realización del presente trabajo a pesar de las dificultades y los retos y a quien le deseo el mayor éxito.

Pedro Román

Dedicatoria

A **Dios**, este es el fruto de lo que sembraste en mí fuerzas, valentía, bendiciones, grandes oportunidades, sabiduría y ciencia, a él sea la gloria.

A mis padres **Luis Medina** y **Meri González**, este es el trofeo por el cual han luchado durante años, los dos han constituido un gran equipo de trabajo.

A mi familia, para que sigamos siendo ejemplo para otros y día a día se den grandes pasos. Dios siga bendiciendo y ponga oportunidades para nuestra unión y superación.

A mi novia **Nataly Araujo**, este logro es de los dos, sé que vienen cosas mejores y te serviré de ejemplo para que alcances tus sueños.

A todo aquel que quiere, a todo aquel que quiere lograr grandes cosas: La lucha jamás termina, todo se logra por nuestros propios esfuerzos, la piedra no debe estar en el camino para que tropieces, porque el camino lo construyes tú.

Luis Medina

Dedicatoria

A mi madre **Francia Medina** a quien debo todo el éxito que he tenido y que algún día tendré.

A mi padre **Héctor Alfredo Román** a quien acompañaré y escucharé hasta que Dios me lo permita y honraré por el resto de mi vida.

A mis sobrinos **María José** y **Ricardo Andrés** quienes tienen un camino abierto para lograr lo que se propongan y a los que ayudaré en todo lo que pueda a alcanzar sus sueños.

A toda mi familia que tanto ha esperado este triunfo y a quienes no decepcionare en lo que promete ser una carrera prospera y exitosa.

A cualquier persona capaz de tomarse la molestia de preguntarse el porqué de las cosas y de transformar la duda en un deseo por alcanzar el conocimiento, y con éste y trabajo duro dar su aporte positivo al mundo.

Pedro Román

Resumen

El proceso de soldadura orbital, produce cordones de alta calidad, uniones de alta resistencia, excelente acabado superficial y elevada pureza metalúrgica, por lo que idealiza los procesos industriales de la actualidad. La presente investigación caracteriza el comportamiento de las propiedades mecánicas de las juntas en tuberías de diámetro 1-1/2” de acero inoxidable AISI 304, soldadas bajo el proceso orbital GTAW, se tomaron como variables de estudio el amperaje y la velocidad de pasada. Para 9 combinaciones de estos parámetros, se analizó la resistencia a la tracción, la microdureza y la microestructura según las normas ASTM. Además, con las condiciones (34,5 A; 196,29 mm/min) y (39 A; 196,29 mm/min) se logra la mayor resistencia a la tracción y la mayor dureza. Al aumentar la intensidad de corriente tanto la dureza como los esfuerzos de fluencia, máximo y de ruptura disminuyen mientras que con el incremento de la velocidad de pasada se consiguen los valores más altos, dejando en evidencia, a través de las gráficas y tablas comparativas, a la combinación de parámetros G (34,5 A; 196,29 mm/min), como la más resistente tanto a la tracción como a la deformación local. A su vez el calor aportado, afecta la microestructura en la zona fundida y en la ZAC, aumentando el tamaño de grano en ambas y posteriormente originando una contracción en la zona fundida a causa del enfriamiento rápido. También tuvo lugar la formación de carburos de cromo tanto en la ZAC como en la zona fundida, presentándose más pronunciada en la ZF a causa de las altas temperaturas alcanzadas.

Indice general

Introducción	1
CAPÍTULO I Introducción	3
1.1 Situación problemática	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Justificación	5
1.4 Delimitaciones	6
1.5 Limitaciones	6
CAPÍTULO II Marco teórico	7
2.1 Antecedentes	7
2.2 Bases teóricas	12
2.2.1 Fundamentos de la soldadura	12
2.2.2 Conceptos de la tecnología de soldadura.	14
2.2.3 Consideraciones generales: Soldadura con arco eléctrico.	16
2.2.4 Soldadura GTAW	19
2.2.5 Aceros Inoxidables: Clasificación y propiedades	34
2.2.6 Automatización en los procesos de soldadura	42
2.2.7 Calidad de la soldadura	43
2.2.8 Propiedades mecánicas.	44
CAPÍTULO III Marco metodológico	47
3.1 Nivel de la investigación	47
3.2 Diseño de la investigación.	47
3.2.1 Investigación bibliográfica.	47
3.2.2. Procedencia y condiciones del material	47
3.2.3. Selección de variables.	48
3.2.4. Corte del material para el soldeo.	50
3.2.5. Selección de parámetros de soldadura y ensayo piloto.	51
3.2.6. Análisis metalográfico.	54
3.2.7. Realización de ensayos destructivos	56
3.2.8. Población y muestra	62
3.2.9. Tipo de muestreo	62

3.2.10. Técnicas de recolección de datos.	63
3.2.11. Análisis estadístico.	63
3.2.12. Flujograma de actividades.	64
CAPÍTULO IV Resultados y Discusión	66
4.1 Análisis Metalográfico.	66
4.2 Ensayo de tracción.	77
4.3 Ensayo de microdureza.	90
CAPÍTULO V Conclusiones y Recomendaciones	103
5.1 Conclusiones	103
5.2 Recomendaciones	104
Referencias Bibliográficas	106

Índice de figuras

Figura 2.1.	Fundamentos de la soldadura con arco eléctrico. (Wordpress,2010)	15
Figura 2.2.	Configuración básica y Circuito eléctrico de un Proceso de soldadura con arco eléctrico. (Wordpress, 2010)	16
Figura 2.3.	Soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas. (Argenta, 2010)	20
Figura 2.4.	Equipo base para soldadura GTAW. (Domotica, 2010)	25
Figura 2.5.	Componentes del proceso GTAW. (Lybianchallenge, 2010)	26
Figura 2.6.	Sección transversal de la junta soldada por proceso GTAW. (Photomobiware, 2010)	29
Figura 2.7.	Formación de la zona afectada por el calor. (Novacero, 2010)	31
Figura 2.8.	Zona fundida y zona de influencia térmica. (Novacero, 2010)	32
Figura 2.9.	Clasificación de los aceros según su aleación. (Fuente propia)	35
Figura 2.10.	Tipo de unión según el espesor de tubería. (Duerosoldadura, 2010)	41
Figura 2.11.	Geometría del cordón de soldadura (Duerosoldadura, 2009)	41
Figura 2.12.	Algunas soldaduras con bisel.	41
Figura 3.1.	Secciones de tubería de 100 mm (Fuente propia)	51
Figura 3.2.	Máquina corta tubos orbital. (Fuente propia)	51
Figura 3.3.	CobraTig 150.	51
Figura 3.4.	Cabezal Copperhead	51
Figura 3.5.	Panel de control CobraTig 150.	52
Figura 3.6.	Máquina de soldadura GTAW Miller 150	52
Figura 3.7.	Tubos soldadas, diámetro 1-1/2" y longitud 200 mm.	53
Figura 3.8.	Equipos de preparación metalográfica.	54
Figura 3.9.	Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción según norma ASTM E8M-04.	56
Figura 3.10.	Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción de sección tubular.	56
Figura 3.11.	Disposición de las probetas sobre la Sección transversal del tubo soldado.	57
Figura 3.12.	Probetas para el ensayo de tracción	57
Figura 3.13.	Probetas de tracción al alcanzar la ruptura.	58
Figura 3.14.	Sección transversal del segmento de tubería. (Fuente propia).	61
Figura 3.15.	Distribución para las mediciones de dureza a lo largo de la sección transversal de las juntas soldadas.	62
Figura 3.16.	Flujograma de actividades para el desarrollo de la investigación.	64
Figura 4.1.	Microestructura de la muestra PM1.	65
Figura 4.2.	Microestructura de la muestra PM2	66

Figura 4.3.	Microestructura de la muestra PM3	67
Figura 4.4.	Microestructura de la muestra PM4	69
Figura 4.5.	Microestructura de la muestra PM5	70
Figura 4.6.	Microestructura de la muestra PM6	71
Figura 4.7.	Microestructura de la muestra PM7	72
Figura 4.8.	Microestructura de la muestra PM8	74
Figura. 4.9.	Microestructura de la muestra PM9	75
Figura 4.10.	Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Probetas Grupo A.	77
Figura 4.11.	Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Probetas Grupo B.	78
Figura 4.12.	Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Probetas Grupo C.	78
Figura 4.13.	Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Probetas Grupo D.	79
Figura 4.14.	Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Grupo Probetas E.	79
Figura 4.15.	Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Grupo Probetas F.	80
Figura 4.16.	Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Grupo Probetas G	80
Figura 4.17.	Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Grupo Probetas H.	81
Figura 4.18.	Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Grupo Probetas I.	81
Figura 4.19.	Esfuerzo de fluencia vs. Intensidad de corriente para las distintas velocidades de pasada estudiadas.	87
Figura 4.20.	Esfuerzo máximo vs. Intensidad de corriente para las distintas velocidades de pasada estudiadas.	88
Figura 4.21.	Esfuerzo de ruptura vs. Intensidad de corriente para las distintas velocidades de pasada estudiadas.	88
Figura 4.22.	Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD1.	91
Figura 4.23.	Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD2.	92
Figura 4.24.	Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD3.	93
Figura 4.25.	Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD4.	94
Figura 4.26.	Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD5.	95
Figura 4.27.	Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD6.	96
Figura 4.28.	Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD7.	97
Figura 4.29.	Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD8.	98
Figura 4.30.	Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD9.	99
Figura 4.31.	Dureza Vickerz en la ZAC vs. Intensidad de corriente para las distintas velocidades de pasada estudiadas.	100
Figura 4.32.	Dureza Vickerz en el cordón vs. Intensidad de corriente para las distintas velocidades de pasada estudiadas.	101

Indice de tablas

Tabla 2.1.	Clasificación de los aceros inoxidables. (fuente propia)	36
Tabla 3.1.	Composición del acero inoxidable AISI 304. (Fuente Grupoogman)	48
Tabla 3.2.	Variación de parámetros.	48
Tabla 3.3.	Probetas para la PRIMERA combinación de parámetros.	49
Tabla 3.4.	Parámetros de entrada correspondientes a utilizar con a la máquina de soldar.	49
Tabla 3.5.	Designación de probetas de microestructura.	
Tabla 3.6.	Designación de las probetas de tracción.	59
Tabla 3.6.	Designación de las probetas de tracción.	
Tabla 4.1.	Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo A.	66
Tabla 4.2.	Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo B.	67
Tabla 4.3.	Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo C.	68
Tabla 4.4.	Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo D.	70
Tabla 4.5.	Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo E.	71
Tabla 4.6.	Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo F.	72
Tabla 4.7.	Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo G.	73
Tabla 4.8.	Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo H.	75
Tabla 4.9.	Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo I.	76
Tabla 4.10.	Valores de esfuerzo de fluencia (S_y), esfuerzo máximo ($S_{m\acute{a}x}$) y esfuerzo de ruptura (S_r) para todas las condiciones de ensayo.	82
Tabla 4.11.	Valores máximos recomendados de los indicadores estadísticos.	87
Tabla 4.12.	Valores de esfuerzos del acero AISI 304.	89
Tabla 4.13.	Comparación entre los esfuerzos admitidos por las juntas soldadas y el material de entrega	89
Tabla 4.14.	Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD1.	91
Tabla 4.15.	Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD2.	92
Tabla 4.16.	Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD3.	93
Tabla 4.17.	Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD4.	94
Tabla 4.18.	Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD5.	95
Tabla 4.19.	Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD6.	96
Tabla 4.20.	Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD7.	97
Tabla 4.21.	Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD8.	98

Tabla 4.22.	Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD9.	99
Tabla 4.23.	Comparación entre los esfuerzos admitidos por las juntas soldadas y el material de entrega.	102

Introducción

La soldadura orbital es un método de soldadura GTAW automática, que produce cordones de soldadura de alta calidad, con muy bajo porcentaje de rechazo. Las uniones se logran con alta resistencia y elevada pureza metalúrgica, y como además presentan un buen acabado superficial, son ideales para aplicaciones de tecnología como las empleadas en las industrias energética, nuclear, química, aeronáuticas, alimenticia, petrolera, biotecnológica, entre otras. En este tipo de industrias tan exigentes no se pueden permitir paradas en la producción y además se exige la disposición de los mejores materiales y las tecnologías más recientes para conseguir acabados de primera calidad.

La investigación presentada es de tipo descriptiva, tiene como principal propósito determinar las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW para tuberías de acero inoxidable AISI 304, donde se describirá de manera detallada el comportamiento mecánico del material en las juntas soldadas bajo distintas condiciones de operación.

Para el desarrollo del mismo se concibieron varias etapas: el Capítulo 1, donde se describe la situación problemática, el objetivo general y objetivos específicos, justificación, delimitaciones y limitaciones. En el capítulo 2, se desarrollan los antecedentes y las bases teóricas que avalan esta investigación. El capítulo 3, donde se establece el marco metodológico, correspondiente al nivel de investigación y al diseño de la misma, y se describe el desarrollo de ésta todas sus etapas, que va desde la selección de los materiales y el proceso de soldeo hasta los ensayos mecánicos y el análisis metalográfico. Los estudios se realizan siguiendo las normas ASTM, para determinar así la influencia de los parámetros intensidad de corriente y velocidad de pasada en el proceso de soldadura orbital para las uniones en tuberías de 1-1/2" de diámetro de acero inoxidable AISI 304. Así mismo, en el capítulo 4, se analizan y discuten los resultados obtenidos. El capítulo 5, corresponde a las conclusiones obtenidas luego de la investigación y las recomendaciones para investigaciones futuras.

Determinación de las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW para tuberías de acero AISI 304

CAPÍTULO I

Introducción

1.1 Situación problemática

El proceso de soldadura orbital permite agilizar los procesos productivos haciéndolos en menor tiempo debido a la automatización de los mismos, manteniendo la eficiencia; también permite mejorar el control de calidad, aumentar la resistencia a la corrosión, además de obtener mejores acabados superficiales y uniformidad en las juntas, y especialmente conseguir un costo de producción menor a la vez que se logra la estabilización de las propiedades del producto, en este caso, las propiedades mecánicas del cordón, dentro de requerimientos de los clientes.

Dentro de este orden de ideas, es necesario un estudio de las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW, en especial para tuberías de acero inoxidable 304, ampliamente utilizado en la actualidad en las instalaciones de las industrias antes mencionadas. Debido a la innovación de este método de soldeo, en nuestro país se desconocen sus principios, es por ello que su desarrollo maximizará sus beneficios a nivel industrial y ampliamente el área de proyectos. También se busca orientar la información existente respecto a este método y corregir las fallas al aplicar la técnica, pues en la actualidad se efectúa este proceso sin evaluaciones previas de los parámetros fundamentales que intervienen en él, así, se persigue obtener soldaduras aceptables que cumplan con los parámetros establecidos por las normas internacionales (API, AWS,

ASME, ASTM), además de la falta de conocimientos respecto a la técnica y ausencia de personal capacitado y especializado, por lo que los métodos y máquinas de soldadura orbital se limitan frente al operador humano.

El conocimiento de la influencia de las variables amperaje y velocidad de pasada es necesario para determinar los niveles de calidad en los productos terminados. El desarrollo de este estudio es fundamental para la mejora y optimización del proceso de soldadura de tubos sanitarios, labor de suma importancia principalmente para las industrias petroleras, alimenticias y farmacéuticas; pilares del progreso y la calidad de vida en nuestra nación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW para tuberías de acero inoxidable AISI 304

1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir los niveles de experimentación para cada una de las variables a considerar en el estudio.
- Caracterizar las juntas, a partir de las propiedades mecánicas (dureza y resistencia a la tracción) del cordón luego del proceso de soldadura orbital GTAW.
- Evaluar la influencia del amperaje, voltaje y velocidad de pasada en el cordón de soldadura.
- Estudiar la microestructura del material en la zona del cordón y ZAC.

1.3 Justificación

El mundo moderno se caracteriza por la globalización de la economía lo que se traduce en una elevada competencia y la necesidad de encontrar no sólo nuevos mercados sino también la aplicación de códigos, especificaciones y procedimientos de soldadura adaptadas a las nuevas tecnologías, a fin de garantizar confiabilidad y aseguramiento en un producto terminado con óptima calidad.

En la actualidad, uno de los métodos más importantes para la unión de piezas y conjuntos metálicos en general en las industrias que aportan el producto interno bruto y adelanto en infraestructura de países desarrollados y en vías de desarrollo es la soldadura y sus tecnologías, Venezuela y sus futuros ingenieros requieren dominar estas técnicas a fin de estar a la par o en sintonía con estos códigos y especificaciones.

La industria moderna por lo tanto, requiere agilizar los procesos productivos haciéndolos en el menor tiempo y costo posible, la soldadura es la forma más económica de unir componentes, en términos de uso de materiales y costos de fabricación.

La soldadura orbital debido a la automatización que la caracteriza, permite mejorar el control de calidad, aumentar la resistencia a la corrosión, además de obtener mejores acabados superficiales y uniformidad en las juntas, y especialmente conseguir un costo de producción menor a la vez que se logra la estabilización de las propiedades del producto, en este caso, las propiedades mecánicas del cordón, dentro de requerimientos de los clientes.

1.4 Delimitaciones

La investigación permite evaluar la influencia de los parámetros amperaje y velocidad de pasada, en 3 niveles, sobre el cordón en el proceso de soldadura orbital, para tubos de acero AISI 304 de 1 ½ pulgadas de diámetro y 1,25 mm de espesor, mediante el uso de la maquina “CobraTig 150 XM” de soldadura orbital sin aporte. Se evaluarán dos parámetros

en tres niveles cada uno, para un total de nueve condiciones. Por cada condición se realizará: tres réplicas para los ensayos de tracción y una probeta tanto para dureza como para las observaciones al microscopio (análisis metalográfico). Lo anterior se traduce en 27 probetas para tracción, 9 muestras para dureza y 9 para observación al microscopio.

1.5 Limitaciones

- Disponibilidad de los equipos de ensayo de la Universidad de Carabobo y/o cualquier otra institución.
- Disponibilidad del acero inoxidable AISI 304 para la realización de probetas.
- Disponibilidad de la máquina de soldadura orbital para la realización de probetas.
- Disponibilidad de operarios de la máquina.

CAPÍTULO II

Marco teórico

2.1 Antecedentes

Al hablar de soldadura orbital, es importante mencionar los siguientes trabajos de investigación:

En 2001, Lothongkum et al., estudiaron los parámetros de soldadura TIG para placas de acero inoxidable AISI 316L de 3mm de espesor en la posición de soldadura de 6-12h. Los perfiles de cordón de soldadura corresponden a la norma DIN 8563 clase BS. Los parámetros estudiados fueron velocidad de soldadura, corrientes pulso/base, frecuencia de pulso y porcentaje a tiempo. Se utilizó como gas de protección un contenido de argón puro y argón con nitrógeno de 1-4% vol con un caudal de 8 l/min en ambos lados de la soldadura (el tope y la parte de atrás). Los resultados preliminares de soldadura en la posición 6h mostraron que los parámetros apropiados fueron: corriente base 61 A, frecuencia de pulso 5Hz, y 65 % a tiempo. Con estos parámetros constantes fueron examinados los efectos de las velocidades de soldadura de 2 ± 8 mm/s y contenido de nitrógeno de 0 ± 4 vol.% en la protección de argón sobre corrientes de pulso para obtener perfiles de cordón de soldadura aceptables por la norma DIN 8563 clase B6 con penetración completa. Los resultados demostraron que las corrientes de pulso más bajas se observaron en la posición de soldadura 9h. El incrementar el contenido de nitrógeno en el gas argón disminuye la corriente de pulso. En las posiciones de soldadura 6h y 12h, la velocidad máxima de

soldadura se limita a 6 mm/s, y con una velocidad de 7 mm/s se observe la formación de inclusiones de escoria en el tope del material soldado. El valor máximo de velocidad de soldadura fue de 5 mm/s para las posiciones de soldadura de 8, 9, 10 h, pero la velocidad de 6 mm/s no es aplicable debido al llenado incompleto de la ranura. Las relaciones de profundidad/ancho (W/D) están entre 0.34 y 0.4. Al aumentar la velocidad de soldadura el ancho de soldadura disminuye aumentando la razón D/W. El contenido de ferrita delta del metal soldado está entre 6 ± 10 vol.%, y es mínimo en la posición de soldadura de 9h, esto se debe al alto contenido de nitrógeno en el gas protector y el más bajo pulso de corriente comparado con las otras posiciones de soldadura. Las radiografías mostraron cordones de soldadura aceptables libres de porosidades. [8]

Así mismo, en 2002, Henon, realizó un estudio donde se presenta la automatización y la inspección con rayos X en las tuberías dúplex para aplicaciones subacuáticas. La técnica proporcionó un alto y consistente nivel de calidad de soldadura además de mantener las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión del tubo. Los requerimientos para la aplicación incluyeron ensayos no destructivos como las radiografías y ensayos destructivos que incluyeron pruebas de tracción y de doblado. [11]

Ya empezaba a hablarse entonces de la soldadura orbital como un proceso de calidad, posteriormente ese mismo año, Henon, y Brond, A, realizan una investigación donde es presentado el uso de soldadura orbital en el desarrollo de tecnología como “limpia en su lugar”, y usado diariamente en la industria. La soldadura orbital produce superficies soldadas internas lo suficientemente suaves para evitar la acumulación del producto o residuos de limpieza. También es discutido el uso de la soldadura de arco con electrodo de tungsteno y protección de gas inerte (GTAW). [13]

Afianzando la utilización de los procesos de soldadura orbital, en el año 2003, Haschen, W. expone que la técnica de soldadura orbital TIG es aplicada en todas las áreas de soldadura de tuberías. El proceso es principalmente usado para materiales austeníticos y ferríticos, pero también son comúnmente soldados de acuerdo a esta técnica materiales

como aluminio, titanio y aleaciones. Tanto tuberías de pared gruesa como delgada se sueldan económicamente. La aplicación de la soldadura orbital es de particular interés para el área de mantenimiento de tuberías de pared gruesa descrito en este artículo. [10]

Luego, en el año 2004, Purnell discute en su investigación varios aspectos de la soldadura orbital. La soldadura orbital usada mediante el proceso TIG, con DCEN (corriente directa electrodo negativo) o AC (corriente alterna). Los dos componentes que constituyeron el sistema de soldadura orbital fueron la fuente de poder y el cabezal de soldadura orbital. Los equipos de soldadura orbital fueron ajustables para la soldadura de un componente redondo y tuvieron ventaja donde elementos voluminosos necesitaron tubos y acoplamientos soldados a ellos, además del trabajo de instalación de tuberías de servicio. Los equipos de soldadura orbital fueron usados en las industrias aeroespaciales, farmacéuticas, semiconductores y de alimentos. [18]

Dentro de este orden de ideas, la soldadura orbital se encamina a los procesos de soldeo de tuberías, es por ello que en el año 2005, Aichele y Bar presentan su investigación sobre soldadura orbital como solución para tareas de soldadura exigentes (Parte 1), allí se pone en manifiesto que la soldadura orbital es la ejecución de completo mecanizado en soldaduras circunferenciales con componentes estacionarios en cualquier posición. Hay tareas de soldadura en las cuales incluso las cosas se ponen apretadas para la soldadura orbital. En el caso de tareas de soldadura con haces de tubos que fueron hechos de acero al carbón, se tuvo un diámetro exterior de 31,8 mm y un espesor de pared de 2,8 mm con sólo 38 mm de separación. Otra tarea confinada consistió en la soldadura de bridas con tubos de conexión cortos sobre piezas conectadas cuello-afuera. [2]

Luego, en ese mismo año, se complementa la investigación de Aichele y Bar con su trabajo soldadura orbital como solución para tareas de soldadura exigentes (Parte 2) donde discutieron los procesos de soldadura orbital de tubos con soldadura de filete de acuerdo a los métodos TIG (Gas-Inerte-Tungsteno) y GMAW (Soldadura de arco con electrodo consumible y protección de gas inerte). La soldadura orbital incluye el mecanizado

completo de soldadura de tubos dentro de placas tubulares. La soldadura de materiales de titanio requiere de una protección particularmente buena de la atmósfera sobre el baño de soldadura debido a su gran afinidad por el oxígeno. Los procesos de soldadura orbital TIG poseen alta confiabilidad en cuanto a la calidad, entre otras cosas porque la corriente y el hilo de relleno pueden ser controlados independientemente. [3]

Por otra parte, en 2005, Poloskov et al., desarrollaron métodos de determinación de número de pasadas, velocidad de hilo de relleno, corriente y voltaje de arco en la soldadura orbital con electrodo de tungsteno. Todo esto basado en simulación computarizada de los procesos físicos determinando las condiciones de formación de baño, las cuales dependen de su posición espacial. En la simulación computarizada la corriente del arco cambia iterativamente hasta la obtención del ancho de cordón de relleno y la velocidad de suministro de hilo de relleno requerido, hasta obtener la altura de capa superficial requerida. La resolución de la tarea en el proceso de simulación de soldadura en diferentes posiciones espaciales permite producir además, la óptima programación para los parámetros en el proceso de soldadura orbital al movimiento de la antorcha a lo largo de la culata. Reduce la influencia del ángulo de giro de la antorcha en las dimensiones del cordón. [20]

En el año 2006, Henon publica otro trabajo, donde expone que la soldadura de arco con electrodo de tungsteno (GTAW) puede producir uniones soldadas de alta calidad y alta integridad y genera una alta productividad con requerimientos libres de fuga. La de arco fue usada para desarrollar una estación de trabajo en la cual las operaciones de soldadura pudieran ser llevadas a cabo con una intervención mínima por parte del operario. El suministro de poder vino de equipos estándar, pero el cabezal de soldadura fue modificada para aceptar el ajuste del mecanismo de carga. Las estaciones de trabajo GTAW producen entre 3500 y 4000 soldaduras orbitales por día y cerca de 75000 por mes. *Iracroft Ltd.* (empresa inglesa de montajes y ensamblajes de tuberías) ha usado la soldadura orbital por años pero considerándola sólo cuando se requerían uniones soldadas libres de fuga durante

un periodo suficiente de tiempo. La automatización del proceso de soldadura orbital GTAW es inusual, pero se espera que crezca al ritmo de la automatización de la calidad, así como las cantidades en manufactura. [11]

Así mismo, en abril de 2008, Sattari-Far y Javadi, investigan la Influencia de la secuencia de soldadura sobre las distorsiones de las soldaduras en tuberías, presentan un análisis termodinámico tridimensional para investigar el efecto de la secuencia de soldadura sobre las deformaciones en las juntas tubería – tubería de acero inoxidable AISI. Se utiliza soldadura TIG a una sola pasada con junta en V para tuberías con diámetro de 274 mm y un espesor de 6,2 mm. Son analizadas nueve diferentes secuencias de soldadura, los resultados de los elementos finitos son comparados con los valores experimentales. Se demostró que la selección de una secuencia de soldadura adecuada puede disminuir de forma sustancial la cantidad de distorsiones de soldadura en la geometría de la tubería. [12]

Luego ese mismo año, Akbari Mousavi y Miresmaeil, realizan una investigación donde se expone que los esfuerzos residuales en soldadura son producidos debido a la incompatibilidad, a distribuciones de esfuerzos plásticos y a cargas térmicas no uniformes. En este trabajo se intentó analizar los esfuerzos residuales producidos en el proceso de soldadura TIG en 2D y 3D utilizando análisis de elementos finitos para encontrar la forma óptima de los surcos para minimizar las tensiones residuales de tracción en las soldaduras. El efecto de las configuraciones de la geométrica sobre la distribución de los esfuerzos residuales se hizo por medio de un análisis computacional en 3D utilizando una ecuación constitutiva termoplástica y su comparación con el método de difracción de los rayos X. En este estudio se consideran los efectos de la conducción, radicación, convección y tasa de flujo de aire. Se supone que la capacidad calorífica, conductividad térmica, módulo elástico, límite de elasticidad y las propiedades de los materiales dependen de la temperatura. También son considerados los efectos del flujo de fluidos, la plasticidad y la restricción externa sobre la distribución de tensiones residuales. Los resultados de la simulación muestran que el valor de esfuerzo residual máximo obtenido para la junta “U”

acanalada es menor que el predicho para las juntas ranuradas en “V”, el esfuerzo residual asumido concuerda con los obtenidos por el estudio de difracción de rayos X. También se muestra que la magnitud de los esfuerzos residuales transversales aumenta aproximadamente tres veces si se aplican restricciones mecánicas. La estructura esforzada también produce menor distorsión que la estructura no esforzada con restricciones. La mejor correspondencia entre las distribuciones de tensiones residuales y los experimentos de rayos X se obtiene mediante el empleo de las ecuaciones constitutivas de endurecimiento cinemática e isótropo. [14]

Posteriormente, en agosto de 2009, Naumann y Michler, presentan su estudio referente a la absorción de hidrógeno del medio ambiente en acero inoxidable austeníticos en procesos orbitales de soldadura a 50 °C, donde se expone que diferentes aceros inoxidables sometidos a procesos de soldadura TIG orbital contienen hasta un 5% de ferrita delta en el cordón de soldadura. Las muestras sometidas a prueba de tracción a temperatura ambiente se fracturan en la línea de fusión / zona afectada por el calor (FL / HAZ), que es el modo de falla típico de estructuras soldadas. Por el contrario, todas las muestras probadas en hidrógeno no fracturan en el FL / HAZ, pero si en el material base. Estos resultados demuestran claramente que para las pruebas realizadas aquí, los contenidos de ferrita delta de hasta un 5% no mejoran la sensibilidad a HEE en comparación con el material de base. [15]

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Fundamentos de la soldadura

La soldadura es un proceso de unión permanente de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos o más partes mediante la aplicación conveniente de calor, presión o ambas a la vez. La integración de las partes que se unen mediante soldadura se

denomina un ensamble soldado. En algunos casos se agrega un material de aporte o relleno para facilitar la fusión.

Todos los metales son soldables siempre que se aplique el procedimiento y la técnica adecuada, en ocasiones fracasa el intento de soldarlos porque se ha pasado por alto una de estos dos factores, si se comprenden: la composición, la estructura y las propiedades de un metal, se estará en la posibilidad de diseñar y hacer mejores soldaduras. Esto pone de relieve la estrecha relación que existe entre la metalurgia de un metal y su soldabilidad o habilidad para dejarse soldar.

Importancia comercial y tecnológica de la soldadura:

- La soldadura proporciona una unión permanente. Las partes soldadas se vuelven una sola unidad.
- La unión soldada puede ser más fuerte que los materiales originales si se usa un metal de relleno que tenga propiedades de resistencia superiores a la de los materiales originales y se emplean las técnicas de soldadura adecuadas.
- En general, la soldadura es la forma más económica de unir componentes, en términos de uso de materiales y costos de fabricación, los métodos mecánicos alternativos de ensamble requieren alteraciones más complejas de las formas (por ejemplo, taladrado de orificios) y adición de sujetadores (remaches o tuercas). El ensamble mecánico resultante por lo general es más pesado que la soldadura correspondiente.
- La soldadura no se limita al ambiente de fábrica. Puede realizarse en el campo.

Limitaciones y desventajas de la soldadura:

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

2.2.2 Conceptos de la tecnología de soldadura.

La soldadura implica la fusión o unión de dos partes metálicas en sus superficies empalmantes. Por lo general, la soldadura se realiza en partes del mismo metal, pero es posible usar algunas operaciones para unir metales diferentes.

Procesos de Soldadura:

La American Welding Society (Sociedad Norteamericana de Soldadura) ha Catalogado más de 50 tipos de operaciones distintas que utilizan diversos tipos o combinaciones de energía para proporcionar la energía requerida. Sin embargo, podemos dividir los procesos de soldadura en dos grupos principales: soldadura por fusión, en la cual se obtiene una fusión derritiendo las dos superficies que se van a unir, y en algunos casos añadiendo un metal de aporte a la unión y soldadura en estado sólido, en la cual se usa calor

o presión o ambas para obtener la fusión, pero en los metales base no se funden ni se agrega un metal de aporte. En esta investigación se hará referencia al primer grupo mencionado.

La soldadura por fusión es la categoría más importante e incluye: la soldadura con arco eléctrico, la soldadura por resistencia, la soldadura con oxígeno y gas combustible, y otros procesos de soldadura por fusión (los que no pueden clasificarse en alguno de los primeros tres tipos). La categoría de soldadura por fusión de uso más amplio, es la soldadura con arco eléctrico, la cual se describe a continuación:

Soldadura con arco eléctrico

La soldadura con arco eléctrico SAE (en inglés AW) hace referencia a un grupo de procesos de soldadura en los cuales el calentamiento de los metales se obtiene mediante un arco eléctrico, como se muestra en la figura 2.1. Algunas de las operaciones de soldadura con arco eléctrico también aplican presión durante el proceso, y la mayoría utiliza un metal de aporte.

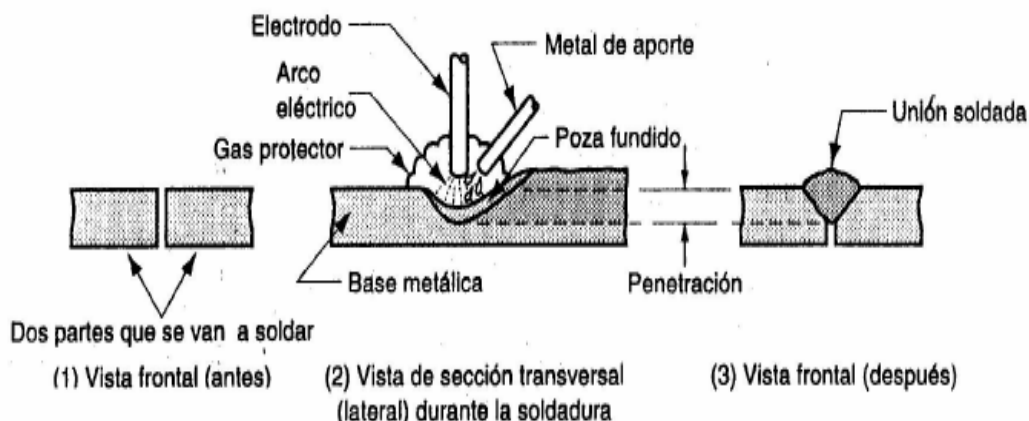


Figura 2.1 Fundamentos de la soldadura con arco eléctrico. (1) Antes de la soldadura, (2) Durante la soldadura se funde la base metálica y se agrega el metal de aporte al conjunto fundido y (3) La soldadura terminada. (Wordpress, 2010)

2.2.3 Consideraciones generales: Soldadura con arco eléctrico.

La soldadura con arco eléctrico, SAC (arc welding en inglés, AW), es un proceso de soldadura en el cual la unión de las partes se obtiene por fusión mediante el calor de un arco eléctrico entre un electrodo y el material de trabajo.

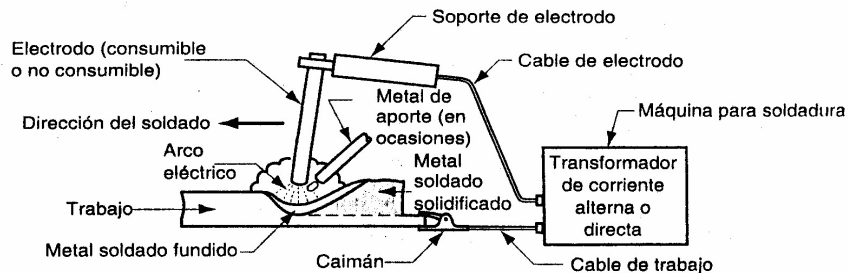


Figura 2.2. Configuración básica y Circuito eléctrico de un Proceso de soldadura con arco eléctrico. (Wordpress, 2010)

Un proceso de AW general se muestra en la figura 2.2, un arco eléctrico es una descarga de corriente eléctrica a través de una separación en un circuito. Se sostiene por la presencia de una columna de gas térmicamente ionizada (denominada plasma) a través de la cual fluye la corriente. El arco eléctrico se inicia al acercar el electrodo a la pieza de trabajo, después del contacto el electrodo se separa rápidamente de la pieza a una distancia corta. La energía eléctrica del arco así formado produce temperaturas de 5500 °C o mayores, que son lo suficientemente calientes para fundir cualquier metal. Se forma un pozo de metal fundido, que consiste en metal(es) base y metal de aporte (si se usa uno), cerca de la punta del electrodo. En la mayoría de los procesos de soldadura con arco eléctrico, se agrega un metal de aporte durante la operación para aumentar el volumen y fortalecer la unión soldada. Conforme el electrodo se mueve a lo largo de la unión, el pozo de metal fundido se solidifica de inmediato.

El movimiento del electrodo se consigue ya sea mediante una persona que solda (soldadura manual) o por medios mecánicos (soldadura con máquina, soldadura automática).

o soldadura robótica). Un aspecto problemático de la soldadura manual con arco eléctrico es que la calidad de la unión fundida depende de la habilidad y ética de trabajo del soldador.

Tecnología general de la soldadura con arco eléctrico

Algunos de los aspectos técnicos que se aplican a estos procesos de soldadura con arco eléctrico son:

a) **Electrodos:** Los electrodos que se usan en los procesos de AW se clasifican como consumibles y no consumibles.

- Los electrodos consumibles contienen el metal de aporte en la soldadura con arco eléctrico; están disponibles en dos formas principales: varillas (también llamados bastones) y alambres. Las varillas para soldadura normalmente tienen una longitud de 225 a 450 mm y un diámetro de 9.5 mm ó menos. El problema con las varillas de soldadura consumibles, al menos en las operaciones de producción, es que deben cambiarse en forma periódica, reduciendo el tiempo de arco eléctrico del soldador. El alambre para soldadura consumible tiene la ventaja de que puede alimentarse en forma continua al pozo de soldadura desde bobinas que contienen alambres en grandes cantidades, con esto se evitan las interrupciones frecuentes que ocurren cuando se usan las varillas para soldadura. Tanto en forma de varilla como de alambre, el arco eléctrico consume el electrodo durante el proceso de soldadura y éste se añade a la unión fundida como metal de relleno.

Los electrodos de varilla se clasifican en base a las propiedades mecánicas del metal depositado, tipo de recubrimiento, posiciones en las que se puede emplear el electrodo y

tipo de corriente y polaridad a emplear. El sistema de clasificación empleado para electrodos recubiertos sigue el modelo empleado por la AWS.

- Los electrodos no consumibles están hechos de tungsteno (o algunas veces de carbono), los cuales resisten la fusión mediante el arco eléctrico. A pesar de su nombre, un electrodo no consumible se desgasta gradualmente durante el proceso de soldadura (la vaporización es el mecanismo principal) y ocurre en forma similar al desgaste gradual de una herramienta de corte en una operación de maquinado.

Para los procesos de AW que utilizan electrodos no consumibles, cualquier metal de relleno usado en la operación debe proporcionarse mediante un alambre separado que se alimenta dentro del pozo de soldadura.

b) **Protección del arco eléctrico:** Las altas temperaturas provocan que los metales que se unen reaccionen con el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno presentes en el aire del lugar de soldeo. Las propiedades mecánicas de la unión soldada pueden degradarse seriamente por estas reacciones. Para proteger la operación de soldadura de este resultado no deseado, casi todos los procesos de soldadura con arco eléctrico proporcionan algún medio para proteger el arco del aire en el ambiente. Esto se logra cubriendo la punta del electrodo, el arco eléctrico y el pozo soldadura fundida con un manto de gas o fundente o ambos, lo que inhibe la exposición del metal soldado al aire.

c) **Gases de protección:** Los gases de protección comunes incluyen el argón y el helio, pues ambos son inertes. En la soldadura de metales ferrosos con ciertos procesos de AW se usan oxígeno y dióxido de carbono, por lo general en combinación con argón o helio, para producir una atmósfera oxidante o para controlar la forma de la soldadura.

d) **Fundente:** Un fundente es una sustancia usada para evitar la formación de óxidos y otros contaminantes no deseados o para disolverlos y facilitar su remoción. Durante la soldadura, el fundente se convierte en una escoria líquida, que cubre la operación y protege el metal de soldadura fundido. La escoria se endurece después del enfriamiento y debe removerse con cincel o cepillo. Por lo general un fundente está formado para cumplir con varias funciones adicional que incluyen: proporcionar una atmósfera protectora para la soldadura, estabilizar el arco eléctrico y reducir las salpicaduras.

e) **Fuente de energía:** Fuente de energía en la soldadura con arco eléctrico En la soldadura con arco eléctrico se usan tanto la corriente directa (DC) como la corriente alterna (AC).

Dentro de este orden de ideas, existen procesos en los cuales se puede considerar electrodos no consumibles: la soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas, la soldadura de plasma de arco eléctrico y varios procesos más. A continuación se hace referencia al proceso de soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas.

2.2.4 Soldadura GTAW

Soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas

La soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas, *STAEG* (en inglés gas tungsten arc welding, GTAW), es un proceso que usa un electrodo de tungsteno no consumible y un gas inerte para proteger el arco eléctrico. Con frecuencia, este proceso se denomina soldadura de tungsteno con gas inerte (en inglés tungsten inert gas welding, TIG welding);

en Europa se le denomina wolframio con gas inerte (WIG welding). El proceso de GTAW puede realizarse con o sin un metal de relleno. La figura 2.3 ilustra este último caso.

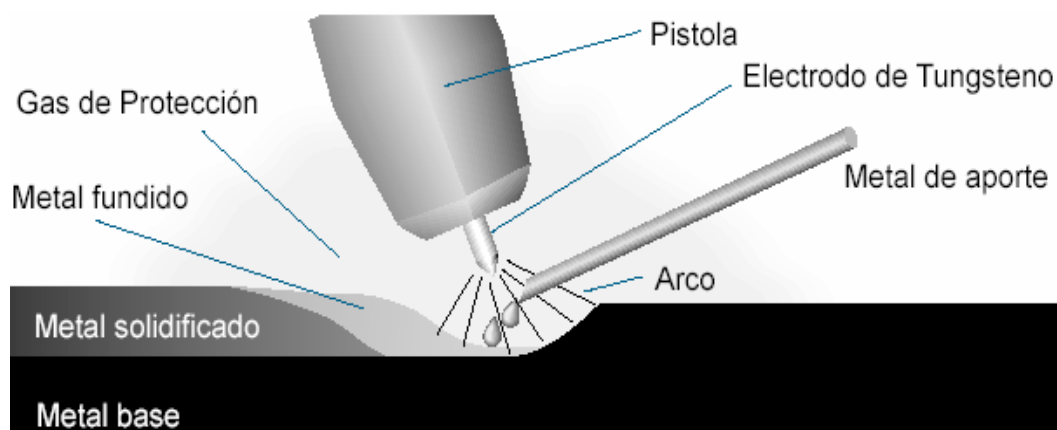


Figura 2.3 Soldadura de tungsteno con arco eléctrico y gas. (Argenta, 2010)

Cuando se usa un metal de aporte, éste se agrega al pozo de soldadura desde una varilla separada, la cual se funde mediante el calor del arco eléctrico. El tungsteno es un buen material para electrodo debido a su alto punto de fusión de 3410 °C. Los gases protectores que se usan normalmente incluyen argón, helio o una mezcla de ellos.

El sistema GTAW es aplicable a casi todos los metales en un intervalo amplio de espesores. También se usa para unir diferentes combinaciones de metales distintos. Sus aplicaciones más comunes incluyen el aluminio y el acero inoxidable. El hierro colado, el hierro fundido, el plomo y el tungsteno son difíciles de soldar mediante este proceso. En las aplicaciones de soldadura de acero, la soldadura GTAW generalmente es más lenta y más costosa que los procesos de soldadura con arco de electrodo consumible, excepto cuando se incluyen secciones delgadas y cuando se requieren soldaduras de muy alta calidad. El proceso se ejecuta en forma manual o mediante métodos de máquina y automatizados para todos los tipos de uniones. Las ventajas del sistema TIG son: su alta calidad, no hay

salpicaduras de soldadura debido a que no se transfiere un metal de aporte a través del arco eléctrico y no se requiere limpieza o ésta es muy reducida porque no se usa fundente.

En el proceso GTAW ó TIG, se forma un arco continuo de bajo voltaje y alto amperaje entre el electrodo de tungsteno de la pistola de soldar y la pieza de trabajo a través de una atmósfera de gas inerte (argón o helio). El intenso calor que produce este arco, aproximadamente 10.000°F (5.500°C) funde la superficie del metal base, formando un charco de soldadura. En piezas delgadas o en las uniones por el borde de la pieza no se agrega metal de aporte y se le denomina soldadura autógena. En piezas más gruesas se agrega metal de aporte, en forma de alambre o varilla, directamente al arco. El gas inerte suministrado a través de la pistola de soldar no sólo optimiza el arco, sino que también desplaza el aire, protegiendo el charco de soldadura y el electrodo de los contaminantes atmosféricos. No ocurre transferencia alguna del metal a través del arco, así que no hay salpicaduras y se produce poco o nada de humo. Puesto que el soldador puede dosificar la corriente con el gatillo o con un pedal, se obtiene un excelente control del charco, lo que resulta en una soldadura de alta calidad.

Por otra parte, en cualquier tipo de proceso de soldadura la mejor soldadura, que se puede obtener, es aquella donde la soldadura y el metal base comparten las mismas propiedades químicas, metalúrgicas y físicas, para lograr esas condiciones la soldadura fundida debe estar protegida de la atmósfera durante la operación de la soldadura, de otra forma, el oxígeno y nitrógeno de la atmósfera se combinarían, literalmente, con el metal fundido resultando en una soldadura débil y con porosidad. En la soldadura GTAW la zona de soldadura es resguardada de la atmósfera por un gas inerte que es alimentado a través de la antorcha, argón y helio pueden ser usados con éxito en este proceso, el argón es principalmente utilizado por su gran versatilidad en la aplicación exitosa de una gran variedad de metales, además de su alto rendimiento permitiendo soldaduras con un bajo flujo para ejecutar al proceso. El Helio genera un arco más caliente, permitiendo una elevación del voltaje en el arco del 50-60%. Este calor extra es útil especialmente cuando la

soldadura es aplicada en secciones muy pesadas. La mezcla de estos dos gases es posible, y se usa para aprovechar los beneficios de ambos, pero la selección del gas o mezcla de gases dependerá de los materiales a soldar.

El propósito del gas es proteger la soldadura y el electrodo contra la contaminación por la atmósfera ambiente. Se recomienda el argón para la soldadura GTAW manual porque se necesita 2.5 veces más de helio para producir los mismos efectos que el argón. Sin embargo se prefiere el helio para la soldadura GTAW automática y semiautomática porque produce un arco más caliente y de mayor penetración.

El helio dará mejor protección para soldadura en posiciones incómodas (en especial sobre la cabeza por que no es tan denso. Aunque con el helio se puede formar un arco más caliente y mejor penetración, es probable que se produzca deformación del metal base si se utilizan secciones delgadas.

Dado que la atmósfera está aislada 100% del área de soldadura y un control muy fino y preciso de la aplicación de calor, las soldaduras TIG, son más fuertes, más dúctiles y más resistentes a la corrosión que las soldaduras hechas con el proceso ordinario de arco manual (electrodo cubierto). Además del hecho de que no se necesita ningún fundente, hace este tipo de soldaduras aplicable a una amplia gama de diferentes procedimientos de unión de metales.

Es imposible que ocurra una corrosión debido a restos de fundente atrapados en la soldadura y los procedimientos de limpieza en la post-soldadura son eliminados, el proceso entero se ejecuta sin salpicaduras o chispas, la soldadura de fusión puede ser ejecutada en casi todos los metales usados industrialmente, incluyendo las aleaciones de Aluminio, Acero Inoxidable, aleaciones de Magnesio, Níquel y las aleaciones con base de Níquel, Cobre, Cobre-Silicón, Cobre-Níquel, Plata, Bronce fosfórico, las aleaciones de acero de alto carbón y bajo carbón, Hierro Colado y otros. El proceso también es ampliamente conocido por su versatilidad para soldar materiales no similares y aplicar capas de endurecimiento de diferentes materiales al acero.

La fuente de poder para TIG puede ser AC o DC, sin embargo, algunas características sobresalientes obtenidas con cada tipo, hacen a cada tipo de corriente mejor adaptable para ciertas aplicaciones específicas.

Por otra parte, el resultado de reducir la turbulencia es tener un escudo más efectivo y que las moléculas de aire que entren en la zona de soldadura sean muy pocas. Trabajando a mayor distancia del área, permite la extensión del electrodo mas allá de la boquilla incrementando el campo visual y la eliminación del "Punto Ciego" en el cordón de soldadura sin la necesidad de las boquillas de cristal transparentes que se manchan y rompen con mucha facilidad, el electrodo extendido también hace más fácil el acceso a las esquinas y otras áreas de difícil acceso. La capacidad de amperaje de las antorchas también es incrementada con el uso de los lentes del gas.

Con la introducción del "Lente del Gas" (Gas Lens) la forma con la que las boquillas elaboran el escudo de gas cambio, el lente es una malla de acero inoxidable con diminutos agujeros concéntricos que enfocan el gas produciendo un chorro considerablemente estable, reduciendo la turbulencia y enfocando el gas en un chorro coherente y un patrón más efectivo que puede ser proyectado a mayor distancia haciendo que la soldadura sea posible con la boquilla más elevada, en muchos casos hasta 25 mm.

Ventajas y desventajas del proceso de soldadura GTAW:

Las ventajas del proceso GTAW, son:

- Produce una soldadura de alta calidad, soldaduras lisas adecuadas para recipientes de alimentos o medicamentos, en donde los residuos de material orgánico en descomposición que se guardan en las irregularidades podrían tener serias consecuencias.

Determinación de las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW para tuberías de acero inoxidable AISI 304

- Puede soldar casi todos los metales y aleaciones, incluso materiales disímiles con máxima protección contra la contaminación por la atmósfera circundante. Permite soldar en todas las posiciones y controlar de manera precisa las variables de soldadura.
- No utiliza fundente, por lo tanto no genera escoria y no existe riesgo de inclusiones
- No produce salpicaduras, esto ayuda a reducir el tiempo de limpieza. Excelente control de la penetración de la soldadura en la pasada de raíz Se puede trabajar a velocidades más altas y con menos deformación en comparación con la soldadura de oxiacetileno.
- Puede usarse o no metal de aporte, permite controlar las adiciones de metal de aporte cuando se necesite.

Las desventajas del proceso GTAW, son:

- Requiere mayor destreza que los otros métodos de soldadura ya que a un principio la soldadura generara porosidad y agrietamiento.
- Tiene una tasa de deposición y una productividad menores que los otros métodos de soldadura.
- El equipo es más complejo y costoso.
- El metal de base y el metal de aporte tienen menos tolerancia a los contaminantes.
- Puede haber problema si se suelda en un lugar con corrientes de aire.

Características del equipo para soldadura GTAW

Los componentes que conforman el equipo para la soldadura GTAW, de acuerdo a la figura 2.4 y figura 2.5 son:

- Fuente de poder de amperaje constante, ya sea de corriente continua o alterna/continua.
- Soplete o pistola para soldar.
- Mordaza para conectar a la pieza de trabajo.
- Electrodo de tungsteno.
- Cables de alimentación eléctrica de la máquina, además del cable para la pinza y del cable de alimentación a tierra.
- Cilindro de gas de protección, regulador de presión y mangueras.
- Fuente de agua de enfriamiento y drenaje.

Por otra parte, como componentes opcionales se puede tener:

- Metal de aporte.
- Sistema de recirculación de agua de enfriamiento.
- Control de corriente o pedal o de gatillo.

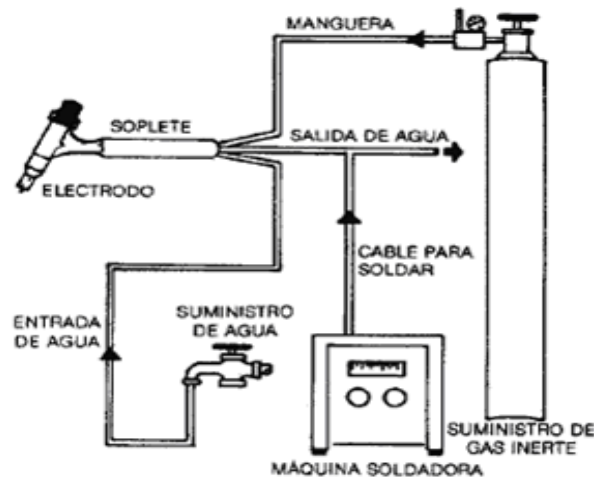


Figura 2.4 Equipo base para soldadura GTAW. (Domotica, 2010)

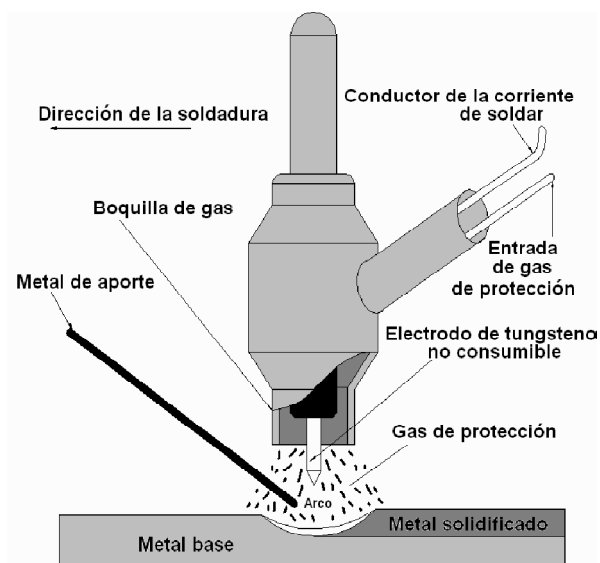


Figura 2. 5. Componentes del proceso GTAW. (Lybianchallenge, 2010)

Definición de las variables de soldadura GTAW

El análisis del comportamiento térmico del fenómeno físico es muy importante en el proceso y es crucial entenderlo por la formación de la geometría de la soldadura, cambios microestructurales en el metal base afectado térmicamente y la distribución de esfuerzos residuales en la unión. Conocer la intensidad de calor de entrada y la temperatura en gradientes en la pieza de trabajo es extremadamente importante en el estudio de procesos de soldadura. Además, la proporción entre el calor efectivo entregado al poder eléctrico consumido es un indicativo de la ejecución de proceso.

El calor de la soldadura provoca varios efectos perjudiciales en la unión soldada tales como:

- Esfuerzos residuales provenientes de esfuerzos diferenciales debido a la contracción del material al enfriarse, las cuales pueden conducir a una fractura.

- Reducción de la ductilidad y endurecimiento en la zona afectada.
- Deterioro de las propiedades de dureza de la unión.
- Pérdida de resistencia mecánica en la unión.

Por lo anterior es necesario controlar el calor aplicado a la unión soldada antes de efectuar el proceso. El ciclo térmico de una soldadura no puede determinarse con precisión porque depende de muchas variables. Sin embargo, se pueden hacer estimaciones, bastante aceptables, para predecir o explicar los efectos del calor, provenientes de un proceso específico de soldadura, sobre determinado metal bajo condiciones prácticas.

Los factores o principales variables que determinan la penetración en la soldadura GTAW son:

a) **La polaridad de arco.** El proceso puede usar corriente continua o corriente alterna. La elección depende en buena parte del metal, que se va a soldar. La corriente continua con electrodo negativo ofrece las ventajas de penetración profunda y de velocidades de soldadura altas, sobre todo, cuando se usa un escudo de helio. La corriente alterna tiene una acción de limpieza catódica (chisporroteo), que elimina óxidos refractarios de las superficies de unión de aluminio y magnesio lo que permite usar soldaduras de muy buena calidad. En este caso, es preciso, usar argón como gas protector porque sin este no puede lograrse el efecto de chisporroteo a diferencia con el helio. Existe una tercera opción, en cuanto a la potencia, usar corriente continúa con electrodo positivo. Esta polaridad casi nunca se usa, por que provoca el sobrecalentamiento del electrodo.

b) **La corriente del arco.** En términos generales, la corriente de arco controla la penetración de la soldadura; su efecto es directamente proporcional. Además, la corriente de arco afecta el voltaje; si se mantiene constante la longitud de arco, su voltaje aumentará en proporción con la corriente. Por esta razón si se desea mantener la longitud de arco fija, es necesario ajustar, también, el voltaje cuando se ajusta la corriente.

c) **El gas de protección.** El propósito del gas es proteger la soldadura y el electrodo contra la contaminación por la atmósfera ambiente, así como, ofrece las posibilidades de lograr un perfil uniforme de la franja de raíz y ausencia de socavamiento.

d) **La temperatura de precalentamiento.** Consiste en aplicar determinada cantidad de calor a la pieza, previa o durante el desarrollo de los procesos de soldadura, tiene una importancia vital en la disminución de la cantidad de grietas en la unión soldada (un factor fundamental en el agrietamiento es la velocidad de enfriamiento en la unión soldada, el punto más crítico se presenta entre las temperaturas de 150° a 200°C). Disminuye la velocidad de enfriamiento y la tendencia a la formación de estructuras de gran volumen específico que poseen gran dureza. Favorece la salida del hidrógeno de la zona fundida y de la zona de influencia térmica, sobre todo cuando la temperatura de precalentamiento es superior a los 105°C. El precalentamiento elimina la humedad, la cual es causante de la presencia de poros en las uniones soldadas.

e) **El tamaño de la pieza que está siendo soldada.** La velocidad de enfriamiento aumenta a medida que crece el espesor de la plancha, debido a que la masa adyacente al cordón de soldadura en estado fundido es mayor y, por lo tanto, la conducción del calor aumenta.

f) **La conductividad térmica de la pieza.** La experiencia demuestra que cuando existe un gradiente de temperatura, $\Delta T/\Delta x$ en un cuerpo, hay una transferencia de energía de la región de alta temperatura a la de baja temperatura. Se dice que la energía se transfiere por conducción y que la rapidez de transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente de temperatura en la dirección normal al área A.

g) **El punto de fusión del metal de la pieza.** El punto de fusión es la temperatura a la que el elemento cambia de la fase sólida a la líquida, a la presión de 1atmósfera.

h) **La velocidad de avance de la soldadura.** Ayuda a hacer un cordón uniforme sea con aporte de material ayuda depositar la misma cantidad y si material de aporte da el mismo tiempo de fundición del material en mm/mm.

Cordón de soldadura GTAW

La mayoría de las uniones de soldadura consideradas anteriormente son fusiones soldadas como se ilustra en la sección transversal de la figura 2.6 (a), una junta soldada por fusión común a la cual se ha agregado un metal de aporte, consta de varias zonas:

- 1) Zona de fusión.
- 2) Interfase de soldadura
- 3) Zona afectada por el calor.
- 4) Zona de metal base no afectada.

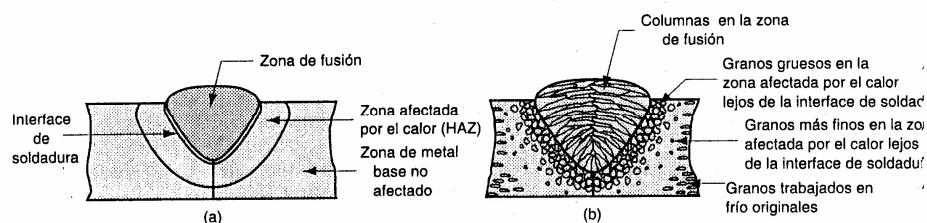


Figura 2.6. Sección transversal de la junta. (Photomobiware, 2010)

La zona de fusión consiste en una mezcla de metal de aporte y de metal base que se ha fundido por completo. Esta zona se caracteriza por un alto grado de homogeneidad entre los metales componentes que se han fundido durante la soldadura. El motivo principal por el que se mezclan estos componentes es la convección que se suscita en el pozo de soldadura fundida. La solidificación en la zona de fusión se asemeja a un proceso de fundición. En la soldadura el molde se forma por medio de los bordes o superficies no fundidos de los componentes que se están soldando. La diferencia significativa entre la solidificación en fundición y la soldadura es que en esta última ocurre un crecimiento de grano epitaxial. El lector debe recordar que durante la fundición se forman granos metálicos a partir de la fusión, mediante la nucleación de partículas sólidas en la pared de fusión, seguida por el crecimiento del grano. En contraste, en el proceso de soldadura se evita la etapa de nucleación a través del mecanismo de crecimiento de grano epitaxial, en el cual los átomos del pozo fundido se solidifican sobre los sitios reticulares preexistentes de la base metálica sólida adyacente. En consecuencia, la estructura del grano en el área de fusión cerca de la zona afectada por calor tiende a imitar la orientación cristalográfica de la zona afectada por calor circundante. Más hacia el centro de la zona de fusión se desarrolla una orientación preferencial, en la cual los granos están aproximadamente perpendiculares a los límites de interfase de la soldadura.

La estructura resultante en la zona de fusión solidificada tiende a presentar granos columnares burdos, como lo muestra la figura 2.6 (b). La estructura del grano depende de varios factores que incluyen el proceso de soldadura, los metales que se sueldan (por ejemplo, metales idénticos contra metales diferentes), si se utiliza un metal de aporte y la velocidad de alimentación a la que se obtiene la soldadura. Un análisis detallado de la metalurgia de soldadura está más allá del alcance de este texto, pero los lectores interesados pueden consultar varias de las referencias.

La segunda zona en la unión soldada es la interfase de soldadura, un estrecho límite que separa la zona de fusión de la zona afectada por el calor (Ver figura 2.7 y figura 2.8).

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

La tercera zona en la soldadura por fusión común es la zona afectada por el calor (en inglés *HAZ*). En esta zona, el metal ha experimentado temperaturas menores a su punto de fusión aunque lo suficientemente altas para producir cambios microestructurales en el metal sólido. La composición química en la zona afectada por el calor es igual a la del metal base, pero esta zona ha sido tratada con calor debido a las temperaturas de soldadura, por lo que se han alterado sus propiedades y estructura. La cantidad de daño metalúrgico en la HAZ depende de factores tales como la cantidad de calor que ha ingresado y la máxima temperatura alcanzada, la distancia de la zona de fusión, el intervalo de tiempo al que ha estado sujeto el metal a altas temperaturas, la velocidad de enfriamiento y las propiedades térmicas del metal. El efecto sobre las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor por lo general es negativo y en esta región con frecuencia ocurren fallas en la junta soldada.

Conforme aumenta la distancia de la zona de fusión, se alcanza por fin la zona de metal base no afectada, en la cual no ha ocurrido un cambio metalúrgico. No obstante, es probable que el metal base que rodea la HAZ presente un estado de altos esfuerzos residuales, producido por la contracción en la zona de fusión.

La longitud del charco de soldadura, mostrara el radio efectivo de la distribución de calor y de su influencia en la zona afectada por el calor. Con esto se puede calcular donde se realizan otras zonas importantes a estudio.

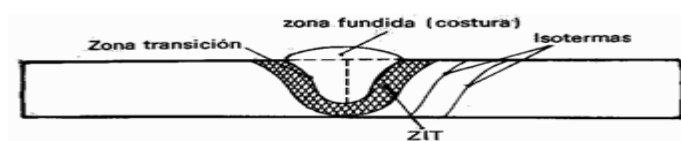


Figura 2.7. Zona fundida y zona de influencia térmica. (Novacero, 2010)

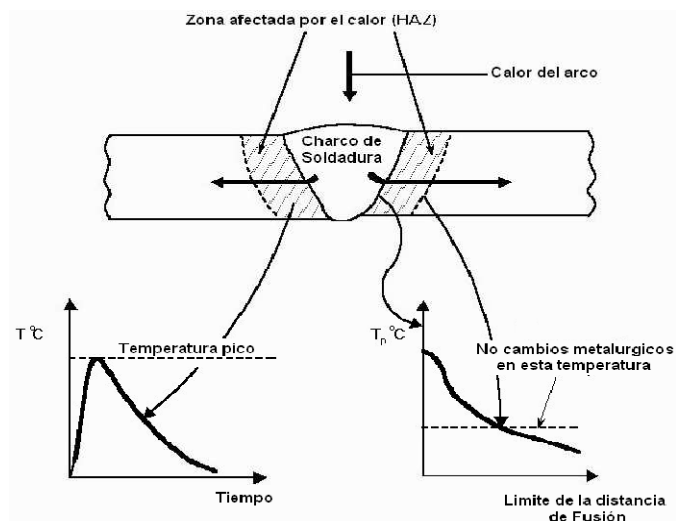


Figura 2.8. Formación de la zona afectada por el calor. (Novacero, 2010)

Algunos de los conceptos importantes aquí son:

- **Zona de influencia térmica (ZIT).** Es la zona del metal base que no ha sido fundida, pero que producto del calentamiento o aplicación de soldadura, se producen cambios en la microestructura que pueden variar las propiedades mecánicas.
- **Zona de transición.** Es una zona muy delgada que se encuentra en el metal base y que separa la zona fundida de la zona de influencia térmica.
- **Isotermas.** Es el lugar geométrico obtenido por la unión de puntos de igual temperatura en el metal base o en la zona de influencia térmica.

Materiales

- Metales base. La soldadura de fusión puede ser ejecutada en casi todos los metales usados industrialmente, incluyendo las aleaciones de Aluminio, Acero Inoxidable, aleaciones de Magnesio, Níquel y las aleaciones con base de Níquel, Cobre, Cobre-

Silicón, Cobre-Níquel, Plata, Bronce fosfórico, las aleaciones de acero de alto carbón y bajo carbón, Hierro Colado y otros.

- Metales de aporte. La composición del metal de aporte se ajusta tratando de igualar las propiedades del metal base en su condición soldada. Estos metales de aporte se producen con un mayor control sobre su química, pureza y calidad que los metales base. Es frecuente que se les añadan desoxidantes para garantizar la integridad de la soldadura.

Algunas composiciones de metales de aporte se ajustan para mejorar la respuesta al tratamiento térmico posterior. El metal de aporte debe emplearse de acuerdo a la aleación que se va a soldar y al servicio al que se le piensa destinar a la pieza soldada. Los metales de aporte para GTAW están disponibles en forma de varillas, por lo regular de 1 m (36") de largo y diámetros desde 0.5 mm (0.020") para trabajo fino y delicado hasta 5 mm (3/16") para soldadura o recubrimiento manual con corriente elevada

Los materiales metálicos se caracterizan por tener un tipo de enlace (metálico), al cual se atribuye en parte la buena conductividad eléctrica que los distingue. La mayoría de los metales poseen estructuras cristalinas de simetría "simple", lo cual en parte contribuye a una moderada combinación de tenacidad y resistencia mecánica que es característica en ellos. Existen dos tipos de materiales metálicos:

a) Metales ferrosos: Los metales ferrosos como su nombre lo indica su principal componente es el fierro, sus principales características son su gran resistencia a la tracción y dureza. Las principales aleaciones se logran con el estaño, plata, platino, manganeso, vanadio y titanio. Los principales productos representantes de los materiales metálicos son:

Fundición de hierro gris, hierro maleable, aceros y fundición de hierro blanco. Su temperatura de fusión va desde los 1360 °C hasta los 1425 °C y uno de sus principales problemas es la corrosión.

b) Metales no ferrosos: Por lo regular tienen menor resistencia a la tensión y dureza que los metales ferrosos, sin embargo su resistencia a la corrosión es superior. Su costo es alto en comparación a los materiales ferrosos, pero con el aumento de su demanda y las nuevas técnicas de extracción y refinamiento se han logrado abatir considerablemente los costos, con lo que su competitividad ha crecido notablemente en los últimos años. Los principales metales no ferrosos utilizados en la manufactura son: Aluminio, Cobre, Magnesio, Níquel, Plomo, Titanio y Zinc.

Así mismo, los metales no ferrosos son utilizados en la manufactura como elementos complementarios de los metales ferrosos, también son muy útiles como materiales puros o aleados los que por sus propiedades físicas y de ingeniería cubren determinadas exigencias o condiciones de trabajo, por ejemplo el bronce (cobre, plomo, estaño) y el latón (cobre zinc).

2.2.5 Aceros Inoxidables: Clasificación y propiedades

Tal como se mencionaba anteriormente, en el campo de la ingeniería se emplean una gran variedad de metales, ya sean solos o formando aleaciones, las cuales tienen propiedades que los hacen más convenientes para determinadas aplicaciones. Para efectos de esta investigación se trabaja con el acero inoxidable AISI 304, es por ello que es conveniente hacer mención a las generalidades de este tipo de aceros, así como su clasificación (ver figura 2.9).

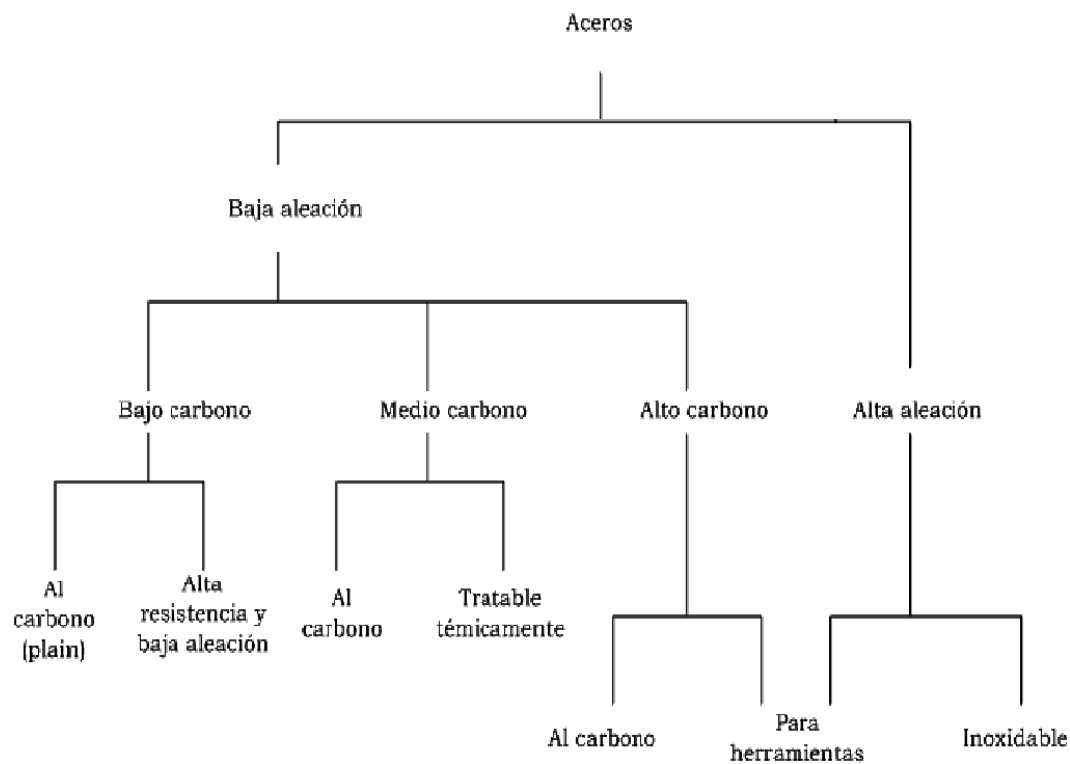


Figura 2.9 Clasificación de los aceros según su aleación. (Fuente propia)

Los aceros inoxidables son resistentes a un gran número de medios corrosivos. El elemento de aleación absolutamente indispensable para que un acero sea inoxidable es el cromo en cantidades superiores al 12%. Los aceros inoxidables son; básicamente, aleaciones Fe-Cr o Fe-Cr-Ni, con cantidades de carbono entre 0.02 y 1% y algunos elementos que se encuentran en menores cantidades, como molibdeno, cobre, silicio y titanio. La presencia del cromo permite la formación superficial de una película pasiva o inerte que confiere a la aleación su carácter de inoxidable. Los aceros inoxidables son designados por el sistema de clasificación de 3 números dígitos, establecidos por la American Iron and Steel Institute (AISI). La clasificación de ellos se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación de los aceros inoxidables. (Fuente propia).

SERIES	MAYORES ELEMENTOS ALEADOS	CARACTERISTICAS
2XX	Cr, Ni, Mn	Austenítico. No se endurece
3XX	Cr, Ni	Austenítico. No se endurece
4XX	Cr	Martensítico. Si se endurece Ferrítico. No se endurece
5XX	Cr (4 a 6%)	Martensítico. Se endurece al aire

Aceros inoxidables austeníticos

El acero AISI 304, de acuerdo a la clasificación anterior corresponde a los aceros inoxidables austeníticos, estos corresponden al más amplio tipo de aceros inoxidables. Presentan la estructura cúbica centrada en las caras de la austenita, por lo que no son tratables térmicamente; además estos aceros no son magnéticos. Además posee excelentes propiedades de ductilidad, resistencia al golpe y buena resistencia a la corrosión.

Soldabilidad del acero inoxidable austenítico

La soldadura por TIG (Tungsten Inert Gas) es un proceso ideal para soldar los aceros inoxidables. No hay salpicadura, las juntas son brillantes y suaves lo que es esencial para un revestimiento de soldadura eficiente. El acero inoxidable muestra una conductividad térmica relativa y alta resistencia eléctrica. Sobre calentamiento debido a amperaje excesivo puede evitarse utilizando panel reóstato como dispositivo de limitación. La mayoría de la fabricación de soldadura para acero inoxidable se hace con tipos de Ni-Cr auténticos como 304, 308 y 316. El material de relleno mantiene las mismas designaciones numéricas y pueden utilizarse sin necesidad de un tratamiento térmico previo o posterior, y dejan depósitos muy similares al material original.

El argón es generalmente la mejor elección para acero inoxidable en diferentes espesores. Cuando se suelda utilizando tungstenos e inyectoros de diámetro pequeño, el flujo de argón debe ser más lento que 10 CFH para evitar la turbulencia sobre el área soldada. Usualmente se utiliza el 2% de Tungsteno Torio. En aplicaciones más críticas, se utilizan electrodos de Zirconio.

La técnica para soldar acero inoxidable es similar a la del acero de carbono, pero con pequeñas modificaciones. Para evitar adherir el tungsteno y hacer marcas de arco accidentales sobre superficies altamente pulidas, inicializar el arco al descansar la boquilla sobre el trabajo en un ángulo que permita una longitud de arco adecuada. Iniciar la secuencia de soldado y conforme se encienda el arco, levante la boquilla y ponga la flama en una posición más vertical. Como fue mencionado, el acero inoxidable tiene una alta resistencia eléctrica. Esto ocasiona que la junta soldada se ponga muy caliente, tanto que el cráter y la última pulgada de 1/4 a 1/2 cuenta se despiden un reflejo rojo. Para prevenir la contaminación, sostener la flama en la posición sobre el cráter antes de que el arco se rompa y permitan el flujo posterior de gas para proteger la soldadura hasta que se enfríe. En general, el uso de cordones múltiples es preferible a ondas holgadas para evitar que se forme calor en la parte soldada. El final del rellenar la barra debería mantenerse sin el flujo del gas inerte conforme el proceso de soldadura.

2.2.6 Automatización en los procesos de soldadura

La automatización en la soldadura se debe por una parte a los riesgos de la soldadura manual y los requerimientos de aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos, se han desarrollado diversas formas de automatización. Las categorías incluyen la soldadura con máquina, la soldadura automática y la soldadura robótica.

La soldadura con máquina se define como una soldadura mecanizada con equipo que realiza la operación bajo la supervisión continua de un operador. Normalmente se obtiene

mediante una cabeza para soldadura que se mueve por medios mecánicos. El trabajador humano debe observar continuamente e interactuar con el equipo para controlar la operación.

Si el equipo es capaz de ejecutar la operación sin el ajuste de los controles por parte de un operador humano, se denomina una soldadura automática. Una persona siempre está presente para vigilar el proceso y detectar variaciones de las condiciones normales. Lo que distingue la soldadura automática de la soldadura con máquina es un controlador del ciclo de soldadura, que regula el movimiento del arco eléctrico y la posición de la pieza de trabajo sin atención humana continua. La soldadura automática requiere una instalación o un posicionador de soldadura para colocar el material de trabajo en relación con la cabeza de soldador. También requiere en mayor grado de consistencia y precisión en las partes componentes usadas en el proceso. Por estas razones, la soldadura automática sólo se justifica para producción de cantidades grandes. Por otra parte, en la soldadura robótica, se usa un robot industrial o un manipulador programable que controla en forma automática el movimiento de la cabeza para soldar con respecto al trabajo.

Soldadura Orbital

Se conoce como soldadura orbital el proceso de soldar circularmente una pieza cilíndrica fija o fijada en un soporte (conductos, tuberías, etc.). Para este propósito, la antorcha se desplaza sobre una guía y recorre la pieza de manera circular. Esta es la razón por la cual el proceso recibe su nombre, pues la palabra “*Orbit*” viene del latín y se refiere al movimiento de la luna alrededor de la tierra. Con esta técnica se esperan resultados reproducibles y de alta calidad, por esta razón normalmente se emplea el método de soldadura GTAW.

La soldadura orbital es un método de soldadura automática de tuberías, que produce cordones de soldadura de alta calidad, con un porcentaje nulo o muy bajo de rechazo. Las

uniones se logran con alta resistencia y elevada pureza metalúrgica, y como además presentan un buen acabado superficial, son ideales para soldaduras de responsabilidad como las empleadas en la industria energética, nuclear, química, aeronáutica, alimenticia y biotecnológica entre otras.

Factores principales que influyen en el cordón durante la soldadura orbital:

- Preparación de las superficies a soldar.
- Gas de protección y depurador.
- Distancia entre el electrodo de tungsteno y la pieza.
- Centrado del dispositivo de depurado.
- Condiciones ambientales (temperatura, lugar de trabajo).
- Electrodo de tungsteno (Wólfrao).

Ventajas:

- Alta calidad en el cordón, Las ventajas en cuanto a calidad y buen acabado superficial se traducen en menos posibilidad de contaminación de los procesos
- Alta seguridad del método.
- Resultados totalmente reproducibles.
- No hay necesidad de un soldador calificado.
- Rentabilidad gracias al método automatizado.
- Tiempos de producción cortos.
- Posible en espacios de difícil acceso, que probablemente serian imposibles para una soldadora manual.
- Mínima contaminación debido a las condiciones del medio ambiente.
- Mínima aparición de óxido.

Determinación de las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW para tuberías de acero inoxidable AISI 304

- Documentación del proceso.
- Adecuado para construcciones exteriores.

Las uniones se logran con alta resistencia y elevada pureza metalúrgica, y como además presentan un buen acabado superficial, son ideales para soldaduras de responsabilidad, como las empleadas en la industria energética, nuclear, aeronáutica, alimenticia y biotecnológica entre otras. Las ventajas en cuanto a calidad y tersura se traducen en menos posibilidad de contaminación de los procesos. La limpieza y pasividad de las tuberías se realiza de manera más eficiente, dando por resultado una mejora económica en estas labores. Este método de soldadura ha encontrado aplicaciones en diversos sectores industriales, no sólo debido a una mejora de la confiabilidad y la calidad de las uniones, sino también, por razones de incremento de productividad debido a la automatización del proceso y que mejora la uniformidad de las costuras y la resistencia a la corrosión.

Factores a tomar en cuenta en la soldadura orbital.

Preparación y adecuación de los materiales

- El pulimento exacto del electrodo de tungsteno es una condición básica para un resultado óptimo y de calidad del cordón. Mediante una alta calidad en el área de la punta del electrodo de tungsteno será garantizada la exacta reproducción de los parámetros de la soldadura.
- Preparación del borde de acuerdo al espesor de las paredes del tubo, según figura 2.10 y figura 2.11.

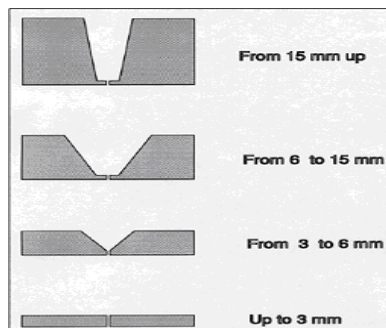


Figura 2.10 Tipo de unión según el espesor de tubería. (Duerosoldadura, 2010)

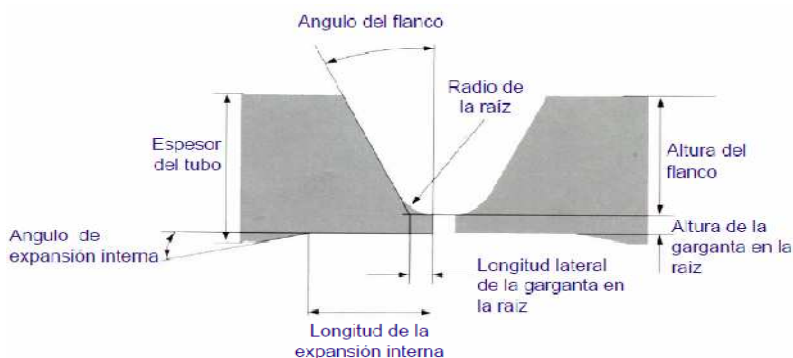


Figura 2.11 Geometría del cordón de soldadura (Duerosoldadura, 2009)

Las soldaduras con bisel o ranura generalmente requieren que se moldeen las orillas de las partes con un bisel para facilitar la penetración de la soldadura. Las formas de bisel incluyen un cuadrado en un lado, bisel en “V”, en U y en J, en lados sencillos o dobles, como se muestra en la figura 2.12.

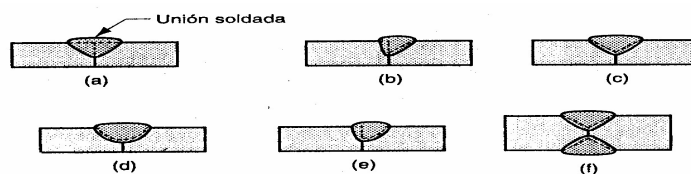


Figura 2.12 Algunas soldaduras con bisel: a) Con bisel cuadrado en un lado; b) Con bisel único; c) Con bisel en V único; d) Con bisel en U único; e) Con bisel en J único; f) Con surco en X para secciones más gruesas. (Wordpress, 2010)

- Proteger el cordón de soldadura: una gran ventaja es proteger el cordón desde la parte interior de la tubería a través del proceso de “depuración o purga”, para evitar la formación de capas de óxido y el color de revenido. Esto se logra evitando la presencia del oxígeno en el interior.
- Alineación correcta del tubo dentro de las mordazas para que el cordón sea uniforme alrededor de la periferia del tubo.

2.2.7 Calidad de la soldadura

El propósito de cualquier proceso de soldadura es unir dos o más componentes en una sola estructura. Por tanto, la integridad física de la estructura formada depende de la calidad de la soldadura. Este estudio se enfoca principalmente en la soldadura con arco eléctrico, el proceso más difundido y para el cual el aspecto de la calidad es el más importante y complejo.

Tensiones residuales y distorsión

El calentamiento y enfriamiento rápidos en regiones localizadas del trabajo durante la soldadura por fusión, especialmente la soldadura con arco eléctrico, producen expansiones y contracciones térmicas, que a su vez provocan tensiones residuales en la soldadura y distorsión del ensamble soldado.

La situación en la soldadura se complica porque: el calentamiento está muy localizado, la fusión de los metales base ocurre en estas regiones locales y la ubicación del calentamiento y la fusión está en movimiento (al menos en la soldadura con arco eléctrico). La operación empieza en un extremo y viaja al lado opuesto. Conforme avanza, se forma un pozo fundido del metal base (y de metal de aporte, si se usa uno), el cual se solidifica con rapidez detrás del arco en movimiento. Las partes del trabajo inmediatamente adyacentes a la gota de soldadura se vuelven extremadamente calientes y se expanden, en

tanto que las porciones removidas de la soldadura permanecen relativamente frías. El pozo de soldadura se solidifica rápidamente en la cavidad entre las dos partes y, conforme el pozo y el metal circundante se enfrían y contraen, ocurre un encogimiento a través de lo ancho de la soldadura.

El engargolado de la soldadura queda en tensión residual y se acumulan tensiones compresivas de reacción en las regiones de las partes lejanas a la soldadura. También ocurren tensiones residuales y encogimiento a lo largo de la gota de soldadura. Dado que las regiones exteriores de las partes base han permanecido relativamente frías y sin cambios de dimensión, mientras que la gota de soldadura se ha solidificado a temperaturas muy altas y después se ha contraído, las tensiones residuales permanecen en forma longitudinal en la gota de soldadura. Estos patrones de tensión transversal y longitudinal. Es probable que el resultado neto de estas tensiones residuales, en forma transversal y longitudinal, produzca una deformación en el ensamble soldado

2.2.8 Estudio matemático del proceso de soldadura.

Las ecuaciones que se utilizan para analizar el flujo de calor en una soldadura fueron obtenidas por Rosenthal en 1935. Rosenthal considera a la soldadura como el movimiento de un punto de una fuente de calor que avanza a velocidad constante en una dirección dada en un sistema de coordenadas rectangulares fijas, la ecuación del calor se presenta a continuación:

$$CE = \frac{n \cdot V \cdot I}{v} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

CE : Calor de entrada al proceso de soldadura (Watts).

V : Voltaje de arco (Voltios).

I : Intensidad de corriente de la soldadura (Ampers)

v : Velocidad de avance del electrodo de soldadura (mm/s)

El área donde se aporta calor es relativamente pequeña respecto de las dimensiones de la pieza. Tres variables gobiernan el aporte de calor a la pieza en la soldadura por arco eléctrico. Estas variables son: la magnitud de la velocidad de ingreso de energía (el producto de la eficiencia y de la energía por unidad de tiempo producida por la fuente de poder, usualmente expresada en watts), la distribución del calor aportado y la velocidad de soldadura.

La expresión calor aportado es utilizada porque no todo el calor generado entra en la pieza. El calor aportado es usualmente caracterizado por una variable simple, que denota la relación entre la potencia del arco que ingresa en la pieza, respecto de la velocidad de soldadura.

2.2.9 Propiedades mecánicas.

El ensayo a tracción es la forma básica de obtener información sobre el comportamiento mecánico de los materiales. Mediante una máquina de ensayos se deforma una muestra o probeta del material a estudiar, aplicando la fuerza un axialmente en el sentido del eje de la muestra. A medida que se va deformando la muestra, se va registrando la fuerza (carga), llegando generalmente hasta la fractura de la pieza. Así pues, el resultado inmediato es una curva de carga frente a alargamiento, que transformados en esfuerzo y deformación, en función de la geometría de la probeta ensayada, aportan una información más general. En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos. Entre ellas está la ductilidad, la cual se define como la capacidad para fluir, es decir, la capacidad para alcanzar grandes deformaciones sin romperse. La

fragilidad se define como la negación de la ductilidad. Un material poco dúctil es frágil. Se puede determinar por:

- **Porcentaje de alargamiento:** Variación de la longitud de la pieza, respecto a la longitud inicial de la misma.
- **Porcentaje de reducción de área:** Reducción del área de la zona calibrada de la probeta por efecto de la tracción, respecto al área de la sección transversal inicial
- **Tenacidad:** es la energía que absorbe el material hasta la ruptura. El área bajo la curva fuerza - desplazamiento representa la energía disipada durante el ensayo, es decir la cantidad de energía que la probeta alcanzó a resistir.
- **Rigidez (Modulo de Young):** es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.
- **Resiliencia:** se refiere a la cantidad de energía que puede absorber un material, antes de que comience la deformación plástica. Se corresponde con el área bajo la curva de un ensayo de tracción entre la deformación nula y la deformación correspondiente al esfuerzo de fluencia.
- **Carga de rotura o resistencia a la tracción:** carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.

La metalografía es esencialmente, el estudio de las características estructurales o de constitución de un metal o una aleación para relacionar ésta con las propiedades físicas y mecánicas. El objetivo de la preparación de muestras metalográficas es revelar la estructura verdadera de la muestra, ya sea metálica, cerámica, carburos sinterizados o cualquier otro material sólido. La forma de lograr estos objetivos es a través de un método sistemático de preparación de la probeta. En otras palabras, encontrar resultados comparables gracias a un procedimiento rutinario, realizado bajo las mismas condiciones.

Determinación de las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW para tuberías de acero inoxidable AISI 304

CAPÍTULO III

Marco metodológico

3.1 Nivel de la investigación

La investigación es de tipo descriptiva debido a que caracteriza el comportamiento de las propiedades mecánicas de las juntas en tuberías de acero inoxidable AISI 304 soldadas bajo el proceso orbital GTAW variando el amperaje y la velocidad de pasada.

3.2 Diseño de la investigación.

3.2.1 Investigación bibliográfica.

La investigación bibliográfica se inicia con la recolección de datos la cual incluye revisión de antecedentes, tipos de ensayos mecánicos a desarrollar, equipos a utilizar para las juntas de tuberías, normas internacionales que rigen el proceso de soldadura orbital GTAW y otras normas relacionadas con los ensayos mecánicos.

3.2.2. Procedencia y condiciones del material.

Se utilizará para la evaluación del proceso de soldadura GTAW tubos de acero inoxidables AISI 304, de diámetro nominal 1-1/2", espesor de pared 1,25 mm. El tubo es procedente de VENCRAFT VENEZUELA C. A y cumple la norma ASTM A270, el mismo presenta la siguiente composición, según tabla 3.1:

Tabla 3.1. Composición del acero inoxidable AISI 304. (Fuente Grupoogman)

Composición química (en %)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
≤0,07	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,015	17,00 19,50	-	8,00 10,50

3.2.3. Selección de variables.

Las variables de soldeo son el amperaje y la velocidad de pasada. Se van a utilizar 3 valores para cada parámetro, generando un modelo 3². La tabla 3.2 muestra las 9 combinaciones de parámetros posibles para el proceso de soldeo, generando así un total de 9 condiciones.

Tabla 3.2. Variación de parámetros

Velocidad de pasada	Intensidad de Corriente
Vp1	I1
	I2
	I3
Vp2	I1
	I2
	I3
Vp3	I1
	I2
	I3

Donde: Vp: Velocidad de pasada

I: Amperaje (Intensidad de corriente)

.La tabla 3.3 muestra lo explicado para los primeros valores de corriente y de velocidad de pasada a estudiar.

Tabla 3.3. Probetas para la PRIMERA combinación de parámetros.

MUESTRAS	VARIABLES		ENSAYOS		
	I (A)	VP (m/min)	TRACCIÓN	MICRODUREZA	MICROESTRUCTURA
GRUPO A	I1	VP1	PT 1	PD 1	PM 1
			PT 2		
			PT 3		

Donde:

PT: Probeta de tracción

PD: Probeta de microdureza

PM: Probeta de microestructura

Por ejemplo la PD1 es la primera muestra de microdureza para el primer valor de corriente y el primer valor de velocidad de pasada. La variación de los parámetros fundamentales dicha máquina ofrece los siguientes rangos de operación (ver tabla 3.4), la magnitud de la intensidad de corriente y la velocidad de pasada para cada combinación será asignada al programa de soldeo de la máquina.

Tabla 3.4. Parámetros de entrada correspondientes a utilizar con a la máquina de soldar

Variable	Rango
Voltaje	120VAC 50/60 Hz Una fase
Corriente (pulso de arco)	34,5 a 43 A
Velocidad de giro	1 a 1,64 RPM

Los valores a fijar para los para los parámetros involucrados en el proceso de soldeo orbital son los siguientes:

Intensidad de corriente:

$$I1 = 34.5 A$$

$$I2 = 39 A$$

$$I3 = 43 A$$

Revoluciones por minuto (cabezal):

$$N1 = 1 RPM \rightarrow Vp1 = 119,6 mm/min$$

$$N2 = 1,32 RPM \rightarrow Vp2 = 157,99 mm/min$$

$$N3 = 1,64 RPM \rightarrow Vp3 = 196,29 mm/min$$

Para determinar la velocidad de pasada (V_p) es necesario realizar el cálculo tomando en cuenta las RPM del cabezal y el diámetro del tubo por medio de la siguiente ecuación.

$$V_p \left(\frac{mm}{min} \right) = \pi \times N(RPM) \times D(mm) \quad \text{Ecuación. (3.1)}$$

Sustituyendo en la Ecuación. 3.1:

$$Vp1 = \pi \times 1,32(RPM) \times 1,5 (in) \times 25,4 \left(\frac{mm}{in} \right)$$

$$Vp1 = 119,6 mm/min$$

Es importante mencionar que las siguientes variables de soldeo se mantienen constantes: distancia del electrodo de tungsteno al metal de 1 mm en dirección perpendicular a los segmentos de tubería, el tiempo de prepurga en 30 segundo y el tiempo de postpurga en 15 segundos.

3.2.4. Corte del material para el soldeo.

La fase de corte del material prosigue de esta manera: la longitud del tubo original es de 6000 mm, y en base a la norma para ensayo de tracción ASTM E8M la longitud de las probetas es de 200 mm con el cordón de soldadura ubicado justo en la mitad, por ello del tubo original se obtienen secciones de 100 mm (Figura 3.1) y posteriormente se unirán dos

de estos segmentos para constituir una probeta de 200 mm. Para el corte de las secciones tubulares se utiliza la máquina corta tubos orbital (Véase Fig. 3.2), Se preparará un total de 18 piezas de 100 mm cada una, para un total de 9 muestras soldadas.



Figura 3.1. Secciones de tubería de 100 mm. (Fuente propia)



Figura 3.2. Máquina corta tubos orbital. (Fuente propia)

3.2.5. Selección de parámetros de soldadura y ensayo piloto.

Se empleará la fuente de poder de la máquina de soldadura orbital GTAW con una alimentación de 110 V (Ver figura 3.3), la misma además posee un cabezal de soldeo CopperHead© (Ver Anexo 7) en donde se encuentra la boquilla de direccionamiento del gas inerte empleado (argón) y el electrodo de tungsteno de diámetro 1/16" con un contenido de 2% de torio (Ver figura 3.4)



Figura. 3.3. CobraTig 150. (Fuente propia)



Figura. 3.4. Cabezal Copperhead (Fuente propia)

En el sistema de control numérico programable de la máquina se fijan las variables que intervienen en el proceso de soldeo como lo son el amperaje, número de punteos, prepurga, postpurga y velocidad de pasada, para efectos de este estudio solo se variará la velocidad de pasada y la intensidad de corriente . La selección y modificación de estos parámetros se realiza en el proceso *WELD ORBITAL* (Ver Anexo 6), el mismo es interactivo y permite introducir las dimensiones del tubo (ver figura 3.5).



Figura 3.5. Panel de control CobraTig 150. (Fuente propia)

Una vez seleccionadas las variables de soldeo: Amperaje (A) y Velocidad de giro del motor (RPM), se coloca el cabezal en un mesón rígido y se amordaza el segmento de tubo a soldar previamente punteado con soldadura GTAW manual sin aporte con una corriente de 30 A, para efectos de este trabajo de investigación se empleará una máquina de soldar *Miller 150* (Véase figura 3.3) y se realizarán 3 puntos equidistantes aproximadamente en el perímetro del tubo.



Figura 3.6. Máquina de soldadura GTAW *Miller 150*

Una vez que se ubica la tubería en la posición correcta, se tranca el cabezal con sus mordazas se inicia el proceso de soldadura, en él se aprecia el sonido del flujo de argón en la prepurga, los destellos luminosos del electrodo de tungsteno al fundir el material durante el punteo y el soldeo, y posteriormente el periodo de postpurga. Además de ello, se añade una purga extra al segmento de tubo por medio de una manguera neumática que se alimenta de la bombona de argón, se sella la tubería por ambos extremos con tirro y se deja solo salir una porción del argón por el extremo opuesto a la alimentación para garantizar que la presión de gas dentro del tubo soldado sea constante y permita que el cordón se mantenga a nivel con el perfil de la sección del tubo, ya que la presión de argón contiene al material fundido durante la unión para evitar que se abulte (excesiva purga) y para evitar que se rechupe (baja purga).

Posteriormente, debe realizarse inspección visual del cordón para verificar la calidad del mismo, tomando en cuenta el abultamiento del mismo por exceso o déficit de flujo de argón. Luego, retirar el ticket de soldadura impreso por la máquina. (Ver Anexo 5) y repetir los pasos anteriores con el resto de las uniones a realizar

. Ejemplos de los segmentos de tuberías soldados se muestran en la figura 3.7.



Figura 3.7. Tubos soldados, diámetro 1-1/2" y longitud 200 mm. (Fuente propia)

3.2.6 Análisis metalográfico.

Análisis metalográfico:

Se evaluará la microestructura de las juntas soldadas por medio de análisis metalográfico siguiendo la norma ASTM E384, se seleccionará un total de 9 muestras preparadas para este ensayo. (Ver Anexo 2 y Anexo 4).

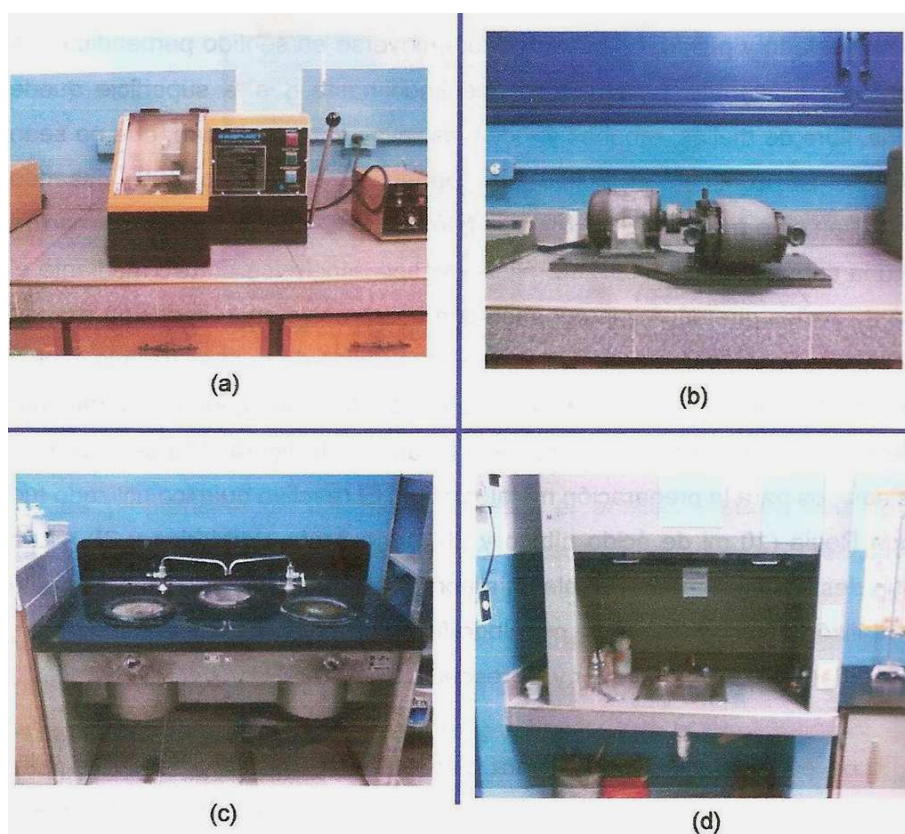


Figura 3.8. Equipos de preparación metalográfica. (a) Cortadora de disco, (b) Desbastadora, (c) Banco de pulido y (d) Campana de ataque. (Fuente propia)

Inicialmente se cortará la sección de cordón de soldadura, para ello se utilizará una cortadora de disco (ver figura 3.8 a). Seguidamente se separa de la superficie de la sección

transversal del cordón de soldadura; según norma ASTM E301, el proceso de desbaste con papel de lija de diferentes numeraciones de partículas comprendidas desde 180 hasta 400, el proceso de pulido grueso y finalmente de pulido fino (ver figura 3.8 c). Luego se realiza el ataque químico con una solución de agua regia tres partes de ácido clorhídrico a una parte de ácido nítrico (15 ml de HCL y 5 ml de HNO₃) en la campana de ataque (figura 3.8 d) y se coloca cada muestra en el microscopio en donde la imagen de la revelación de la microestructura es transferida a un programa computarizado que permite almacenar dichas imágenes en formato JPEG y visualizarlas en el monitor del computador. Se observan las microestructuras a resoluciones de 100X, 200X, 400X y 1000X de aumento donde se seleccionan las de 100X para definir el tamaño de grano y las de 200X para mostrar los resultados y definir las estructuras presentes.

En la tabla 3.5 se muestra la designación de las probetas de microestructura.

Tabla 3.5. Designación de probetas de microestructura

Grupo	N° de la probeta	Velocidad de pasada (mm/min)	Intensidad de corriente (A)
Grupo A	PM1	119,69	34,5
Grupo B	PM2		39
Grupo C	PM3		43
Grupo D	PM4	157,99	34,5
Grupo E	PM5		39
Grupo F	PM6		43
Grupo G	PM7	196,29	34,5
Grupo H	PM8		39
Grupo I	PM9		43

3.2.7 Realización de ensayos destructivos

Ensayo de Tracción

Se analizará la resistencia mecánica por medio del ensayo a tracción regido por la norma ASTM E-8M para las 27 probetas preparadas (Ver anexo 1). Para la realización del ensayo se debe cortar y mecanizar las probetas de acuerdo a lo propuesto en la norma ASTM 8M-04 las cuales se muestran en el plano de la figura 3.9 y figura 3.10. Los ensayos se desarrollaron en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. En total se ensayarán 27 probetas con el uso de la máquina de ensayos universales GALDABINI.

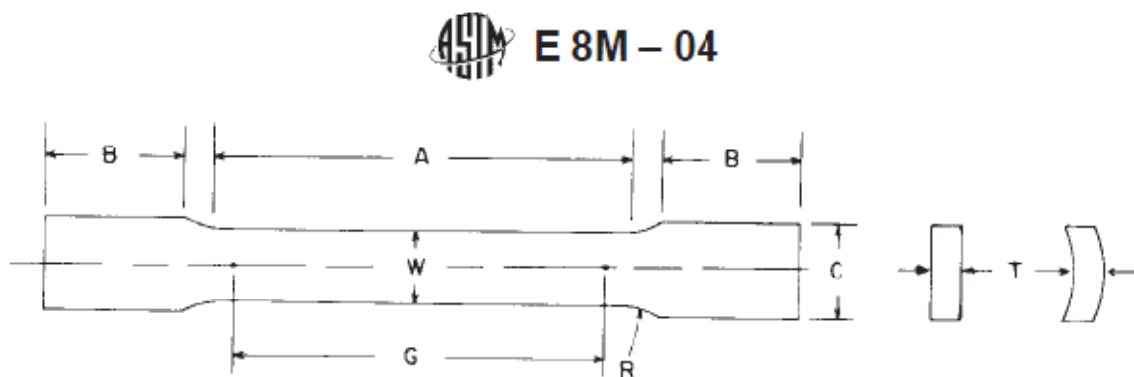


Figura 3.9. Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción según norma ASTM E8M-04.

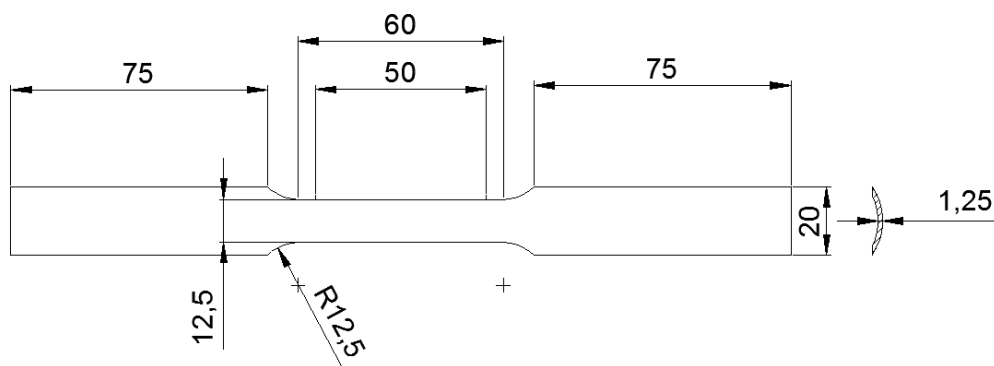


Figura 3.10. Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción de sección tubular.

Para obtener las probetas de las tuberías soldadas se realiza un corte con esmeril con disco de 4 -1/2" se corta a lo largo del tubo y perpendicular a la sección transversal obteniendo cuatro (4) en fracciones, posteriormente se mecaniza en una fresadora vertical con una herramienta de corte de una pulgada de diámetro y 4 cortes para rectificar la pieza a un ancho de 20 mm y el cuello de la misma de radio 1 pulgada (25,4 mm).

La disposición de las probetas en el tubo se muestra en la figura 3.11:

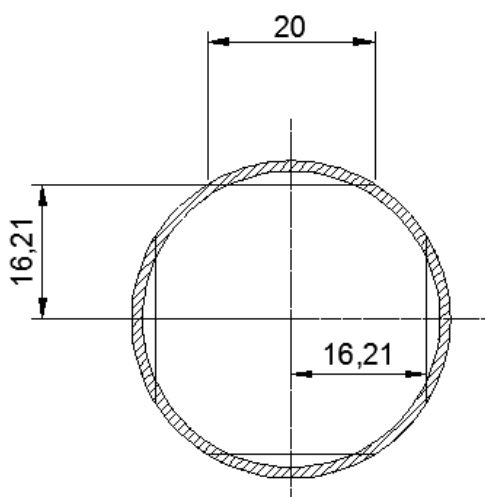


Figura 3.14. Disposición de las probetas sobre la Sección transversal del tubo soldado. (Fuente propia)

Las probetas fueron preparadas según lo indicado en la norma ASTM E-M8 como se muestra en la figura 3.12.



Figura 3.12. Probetas para el ensayo de tracción. (Fuente propia)

El procedimiento para este ensayo será el siguiente:

- Dimensionamiento inicial de la probeta.
 - a) Medir y marcar la longitud calibrada (L_0) en cada probeta.
 - b) Medir el ancho inicial (W_0) y el espesor inicial (T_0) de la sección reducida de la probeta
 - c) Calcular el área transversal inicial (A_0).
- Preparación de la máquina.
 - a) Indicar los parámetros del ensayo en el software del equipo.
 - b) Seleccionar la velocidad de ensayo.
 - c) Colocar la probeta entre las mordazas del equipo
- Operación de la máquina.
 - a) Aplicar la carga sobre la probeta hasta la rotura de la misma.(ver figura 3.13)



Figura 3.13. Probetas de tracción al alcanzar la ruptura. (Fuente propia)

- b) Guardar los datos de la gráfica Fuerza vs Alargamiento para cada probeta.
- Determinación de la curva esfuerzo vs deformación:

a) Determinar el porcentaje de elongación de la muestra ($\% \Delta L$) por medio de la ecuación 3.2:

$$\% \Delta L = \left(\frac{L_f - L_o}{L_o} \right) \times 100\% \quad \text{Ecuación. (3.2)}$$

b) Calcular el esfuerzo ingenieril para cada valor de fuerza con la ecuación 3.3:

$$S = \frac{F}{A_o} \quad \text{Ecuación. (3.3)}$$

c) Calcular la deformación unitaria usando la ecuación 3.4:

$$e = \frac{\Delta L}{L_o} \quad \text{Ecuación (3.4)}$$

d) Realizar la curva esfuerzo ingenieril vs deformación (S vs e) con los valores calculados en el paso anterior.

En la tabla 3.6 se muestra la nomenclatura con la cual se designan las probetas ensayadas.

Tabla 3.6. Designación de las probetas de tracción.

Grupo	Nombre	I (A)	Vp1 (mm/min)
A	PT1	34,5	119,6
	PT2		
	PT3		
B	PT5	39	119,6
	PT6		
	PT1		
C	PT7	43	119,6
	PT8		
	PT9		
D	PT10	34,5	157,99
	PT11		
	PT12		

Tabla 3.6 (Continuación). Designación de las probetas de tracción

Grupo	Nombre	I (A)	Vp1 (mm/min)
E	PT13	39	157,99
	PT14		
	PT15		
F	PT16	43	157,99
	PT17		
	PT18		
G	PT19	34,5	196,29
	PT20		
	PT21		
H	PT22	39	196,29
	PT23		
	PT24		
I	PT25	43	196,29
	PT26		
	PT27		

Para el cálculo de la deformación en cada caso se utilizo la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{L_F - L_0}{L_0} \quad \text{Ecuación. (3.5)}$$

Donde:

δ =Deformación unitaria (mm/mm)

L_0 =Longitud calibrada inicial de la probeta (mm)

L_F = Longitud final de la probeta (mm)

A = Área de sección transversal de la probeta (mm²)

Para calcular el área de sección transversal se utilizó la ecuación 3.6 indicada por la norma ASTM E 8M-04, como referencia a la sección transversal se toma como ejemplo la figura 3.14.

$$A_0 = \left\{ \left(\frac{W}{4} \right) \times \sqrt{(D^2 - W^2)} \right\} + \left\{ \frac{D^2}{4} \times \text{Arcsen} \left(\frac{W}{D} \right) \right\} - \left\{ \left(\frac{W}{4} \right) \times \sqrt{((D - 2T)^2 - W^2)} \right\} - \left\{ \left(\frac{D - 2T}{2} \right)^2 \times \text{Arcsen} \left(\frac{W}{D - 2T} \right) \right\} \quad \text{Ecuación. (3.6)}$$

Donde:

W= Ancho de la longitud calibrada (mm)

D= Diámetro externo del tubo (mm)

T= Espesor de pared del tubo (mm)

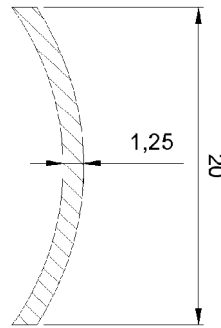


Figura 3.14. Sección transversal del segmento de tubería. (Fuente propia).

Para: W=12,5mm y D=38,1mm, sustituyendo en la Ec. 4.4.

$$A_0 = 15,94 \text{ mm}^2$$

Ensayo de Microdureza

Se analizará la dureza de la junta a través de este ensayo siguiendo la norma ASTM E 384 para las 9 probetas preparadas para este ensayo (Ver anexo 3). Se empleará el procedimiento (Manual de uso y operación microdurómetro digital; Jenny Zambrano – Eleazar Diaz, Laboratorio de Materiales Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo). En este caso se emplea como cuerpo de penetración una pirámide cuadrangular de diamante y la huella vista desde arriba es un cuadrado.

La microdureza Vickerz (HV) se calcula partiendo de la fuerza en Newton y de la diagonal en milímetros cuadrados de la huella de la pirámide. Para el AISI 304 la precarga es de 100 N.

Por tratarse de un durómetro digital, el valor de dureza Vickers se toma directamente del display, ya que el equipo da directamente el valor de las diagonales de la huella que deja el indentador. Se tomarán 3 mediciones por región y luego se obtendrá un promedio de estos valores para definir la dureza de manera eficaz, en la figura 3.15 se da un ejemplo de las zonas donde se medirá la dureza.



Figura 3.15. Distribución para las mediciones de dureza a lo largo de la sección transversal de las juntas soldadas. (Fuente propia)

3.2.8 Población y muestra

Para la caracterización se analizará la resistencia a la tracción, la dureza y la microestructura, lo que junto con las 9 posibles combinaciones de valores de los parámetros genera un total de 45 probetas, 27 para tracción, 9 para dureza y 9 para análisis metalográfico.

3.2.9 Tipo de muestreo

Se utilizará muestreo probabilístico pues se conoce la probabilidad de cada elemento de integrar la muestra.

3.2.10 Técnicas de recolección de datos.

Como instrumento de recolección directa de las variables de soldeo se emplea el software de la máquina soldadura orbital GTAW CobraTig© 150 MX (Ver Anexo 6). Así mismo, las propiedades mecánicas de la junta se calcularán a partir de los datos de los equipos utilizados y el procedimiento sugerido por las diferentes normas, mientras que la microestructura se obtendrá por técnica de observación directa en el microscopio electrónico para cada una de las muestras.

3.2.11 Análisis estadístico.

Para la validación de los resultados experimentales es necesario el estudio de los datos de manera muestral y poblacional, utilizando una serie de indicadores los cuales estudian la dispersión de las medidas y la veracidad del muestreo. A través de las ecuaciones 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 se obtienen la desviación estándar (σ), el coeficiente de variación (Cv), el porcentaje de error relativo promedio (%Er) y el error estándar (Es).

- Desviación estándar (σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3.7) [19]$$

- Coeficiente de variación (Cv) [19]

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100 \% \quad (3.8) [19]$$

- % Error relativo promedio (%Er)

$$\%Er = \frac{\sum \frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}} \times 100\%}{n} \quad (3.9) [6]$$

- Error estándar (Es)

=

(3.10) [1]

Donde:

Desviación estándar : Promedio de las medidas de la muestra

: Medida de la muestra : Numero de muestras

3.2.12 Flujograma de actividades.

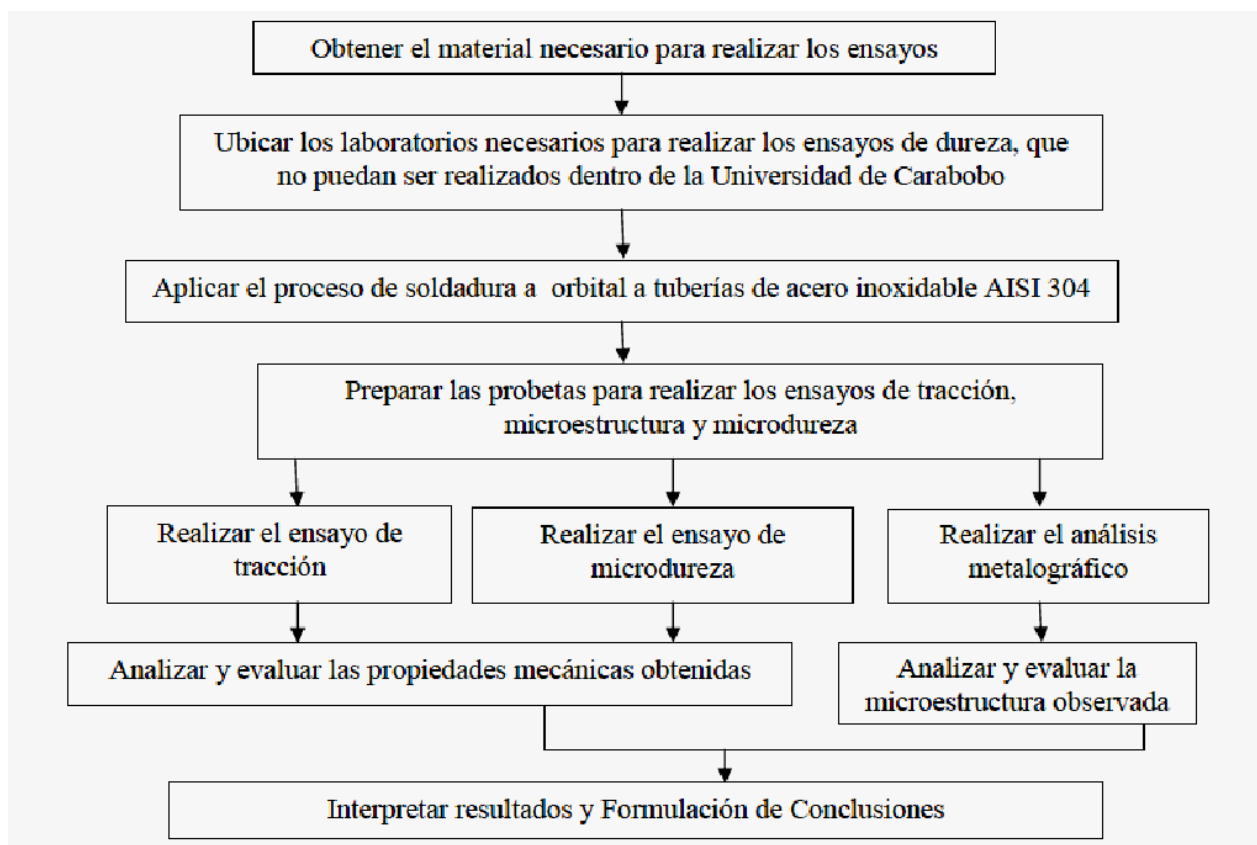


Figura. 3.15. Flujograma de trabajo para el desarrollo de la investigación. (Fuente Propia).

CAPÍTULO IV

Resultados y Discusión

4.1 Análisis Metalográfico.

PM1 (Grupo A):

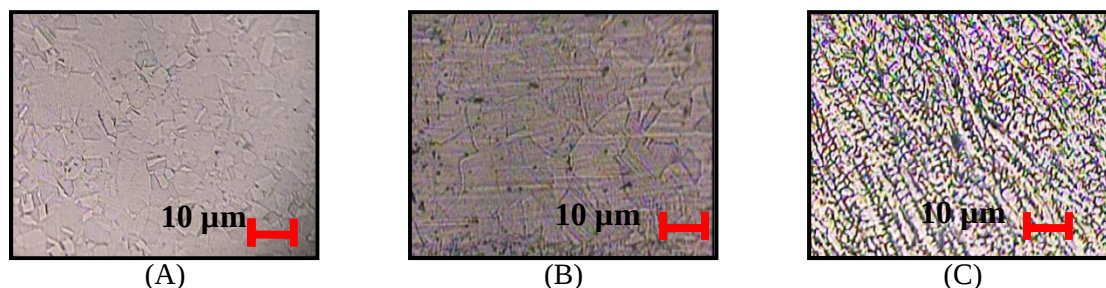


Figura 4.1. Microestructura del metal base (A), la zona afectada por el calor (B) y zona fundida a 200X (C) de la probeta PM1.

En la figura 4.1 (A), correspondiente al metal base, se observan granos equiaxiales y homogéneos de austenita debido al contenido de cromo y níquel del acero inoxidable 304. En la figura 4.1 (B), zona afectada por el calor, se presenta un aumento progresivo en el tamaño de granos austeníticos, los cuales se van alargando a medida que se alejan del metal base hacia la ZAC, además se observa la precipitación de carburos de cromo (en la parte más cercana a la zona fundida) producto del calor generado por la soldadura. En la figura 4.1 (C), correspondiente a la zona fundida, se observan granos de ferrita columnar, producto de la solidificación, en la que los carburos de cromo particionan los límites de grano y originan la formación de ferrita en las fronteras de los granos austeníticos, como

producto final, la ferrita que se forma se ubica en los límites de grano de la austenita. Para este caso los granos austeníticos son más pequeños, producto de la contracción del material al solidificarse rápidamente, además el enfriamiento rápido del material en la zona fundida causa la aparición de los carburos de cromo.

Comparando el tamaño de grano según los patrones de la norma ASTM E112 a 100X (Ver anexo 8), se obtiene lo siguiente (ver tabla 4.1):

Tabla 4.1. Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo A.

Zona Estudiada	Número ASTM	Número de granos promedio por pulgada cuadrada
MB	6	32
ZAC	4	8
ZF	8	128

PM2 (Grupo B):

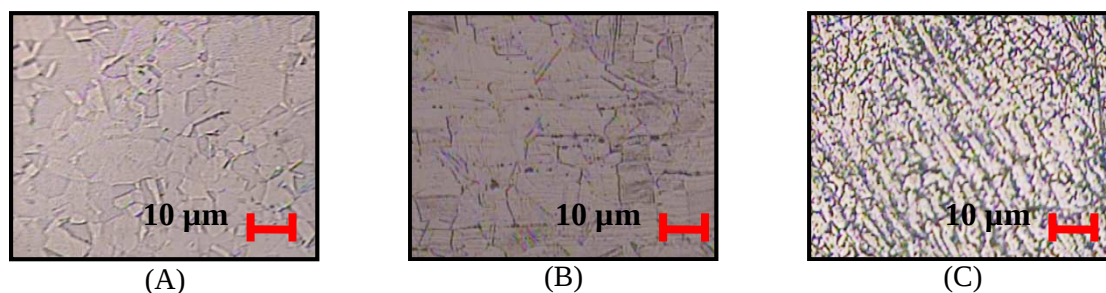


Figura 4.2. Microestructura del metal base (A), la zona afectada por el calor (B) y zona fundida (C) de la probeta PM2 a 200X.

En la figura 4.2 (A), correspondiente al metal base, se observan granos equiaxiales y homogéneos de austenita, igual a lo observado en la figura 4.1 (A). En la figura 4.2 (B), zona afectada por el calor, aumenta progresivamente en el tamaño de granos austeníticos y se van alargados en dirección del metal base hacia la ZAC, se presentan precipitaciones de

carburos de cromo y además el tamaño de grano es mayor al observado en la figura 4.1 (B), debido a que hubo mayor calor aportado por el arco eléctrico durante el soldeo. Al igual que en la figura 4.1 (C), en la figura 4.2 (C), correspondientes a la zona fundida, se observan granos de ferrita columnar, pero para el último caso los granos austeníticos son aún más pequeños, pues hubo mayor calor aportado al arco (mayor intensidad de corriente) por lo que el material solidificó más rápido, se observa también la aparición de los carburos de cromo.

Comparando el tamaño de grano según los patrones de la norma ASTM E112 a 100X (Ver anexo 8), se obtiene lo siguiente (ver tabla 4.2):

Tabla 4.2. Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo B.

Zona Estudiada	Número ASTM	Número de granos promedio por pulgada cuadrada
MB	6	32
ZAC	4	8
ZF	8	128

PM3 (Grupo C):

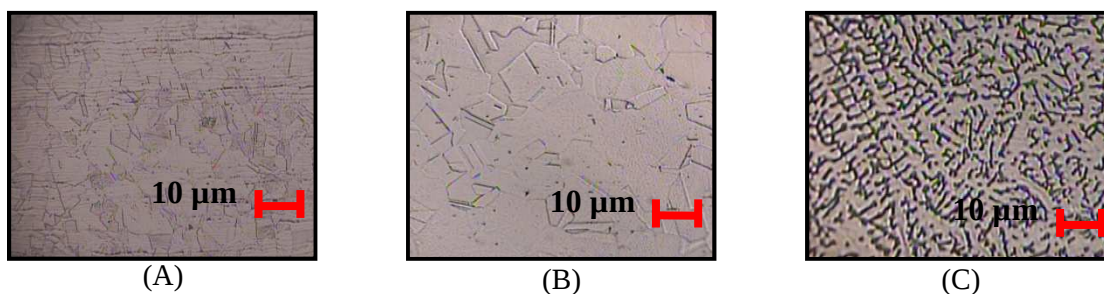


Figura 4.3. Microestructura del metal base (A), la zona afectada por el calor (B) y zona fundida (C) de la probeta PM3 vista a 200X.

En la figura 4.3 (A), metal base, se observan granos equiaxiales y homogéneos de austenita. En la figura 4.3 (B), zona afectada por el calor, se presenta un aumento progresivo en el tamaño de los granos austeníticos en comparación con el metal base y

granos más grandes en comparación a los observados en la figura 4.1 (B), también se observa la precipitación de carburos de cromo. En la figura 4.3 (C), imagen de la zona fundida, se aprecian granos de ferrita columnar, producto de la solidificación rápida, en la que los carburos de cromo particionan los límites de grano y originan la formación de ferrita en las fronteras de los granos austeníticos. Para este caso, los granos austeníticos son más pequeños que los observado en la figura 4.2 (C), producto de la contracción del material al solidificarse rápidamente luego del soldeo, además el enfriamiento rápido del material en la zona fundida promueve la aparición de los carburos de cromo.

En la tabla 4.3 se compara el tamaño de grano por cada zona del cordón de soldadura según los patrones de la norma ASTM:

Tabla 4.3. Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo C.

Zona Estudiada	Número ASTM	Número de granos promedio por pulgada cuadrada
MB	6	32
ZAC	4	8
ZF	8	128

Dentro de este orden de ideas, para las probetas del grupo A, grupo B y grupo C, en el tamaño de grano se hace más grande a medida que se aumenta la intensidad de corriente del arco y se mantiene fija la velocidad de pasada en 119,6 mm/min, esto se debe a que con el aumento de la intensidad de corriente hay un incremento en el calor aportado al arco eléctrico.

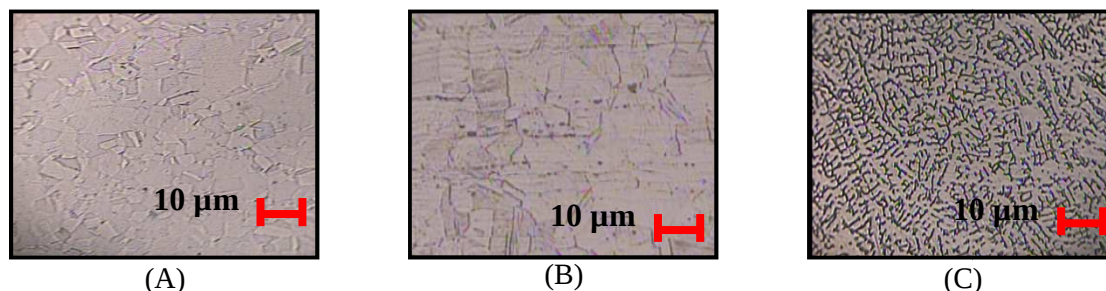
PM4 (Grupo D):

Figura 4.4. Microestructura del metal base (A), la zona afectada por el calor (B) y zona fundida (C) la probeta PM4 a 200X.

La figura 4.4 (A), correspondiente al metal base, se aprecian granos equiaxiales y homogéneos austeníticos debido al contenido de cromo y níquel aleados en el acero. En la figura 4.4 (B), zona afectada por el calor, se presenta un aumento progresivo en el tamaño de grano austenítico, los cuales se ven alargados en comparación con lo mostrado para el metal base, además se observa la precipitación de carburos de cromo (en la parte más cercana a la zona fundida) producto del calor generado por la soldadura. En la figura 4.4 (C) se muestra la zona fundida del cordón y se observa granos de ferrita columnar, producto de la solidificación en la que los carburos de cromo particionan los límites de grano y promueven la formación de ferrita en las fronteras de los granos austeníticos. Según lo observado, en la ZF, los granos austeníticos son más pequeños en comparación con la ZAC y el MB, producto de la contracción del material al solidificarse rápidamente, además de ello en la zona fundida también se promueve la aparición de los carburos de cromo.

En comparación con la figura 4.1 (B), soldadas a la misma intensidad de corriente, los granos de esta última son más grandes en la zona afectada por el calor debido a que fue soldada con una velocidad de pasada menor, por lo tanto hubo mayor calor aportado por el arco eléctrico permitiendo el crecimiento de los granos.

Comparando el tamaño de grano según los patrones de la norma ASTM E112 a 100X (Ver anexo 8), se obtiene lo siguiente (ver tabla 4.4):

Tabla 4.4. Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo D.

Zona Estudiada	Número ASTM	Número de granos promedio por pulgada cuadrada
MB	6	32
ZAC	3	4
ZF	8	128

PM5 (Grupo E):

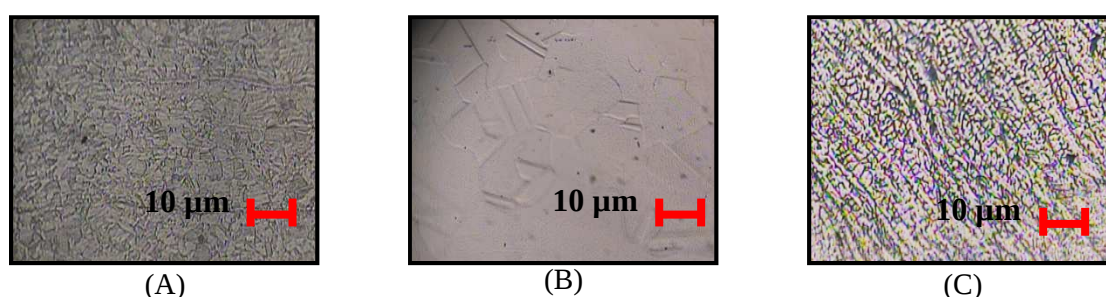


Figura. 4.5. Microestructura del metal base (A), la zona afectada por el calor (B) y zona fundida (C) la probeta PM5 a 200X.

La figura 4.5 (A), corresponde al metal base, existen granos equiaxiales y homogéneos austeníticos. En la figura 4.5 (B), ZAC, hay un aumento progresivo en el tamaño de granos austeníticos provenientes en la dirección del metal base, además se observa la precipitación de carburos de cromo (en la parte más cercana a la zona fundida) producto del calor generado por la soldadura. En la figura 4.4 (C), se observa la presencia de granos de ferrita columnar en la zona fundida. Para este caso los granos austeníticos son más pequeños, en comparación con los de la ZAC y el MB, producto del enfriamiento rápido del material, además de ello promueve la aparición de los carburos de cromo.

Comparando la figura 4.5 (B) con la figura 4.2 (B), ambas soldadas a la misma intensidad de corriente, los granos de esta última figura son más grandes en la zona afectada por el calor debido a que fue soldada con una velocidad de pasada menor, por lo tanto hubo mayor calor aportado por el arco eléctrico permitiendo el crecimiento de los

granos. La misma situación se presenta al comparar el tamaño de grano con lo observado en la 4.4 (B).

Comparando el tamaño de grano según los patrones de la norma ASTM E112 a 100X (Ver anexo 8), se obtiene lo siguiente (ver tabla 4.4):

Tabla 4.5. Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo E.

Zona Estudiada	Número ASTM	Número de granos promedio por pulgada cuadrada
MB	6	32
ZAC	4	8
ZF	8	128

PM6 (Grupo F):

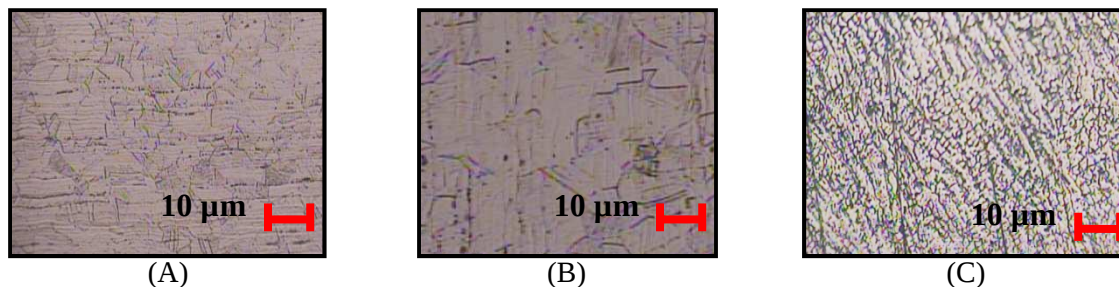


Figura 4.6. Microestructura del metal base (A), la zona afectada por el calor (B) y cordón de soldadura (C) la probeta PM6 a 200X.

La figura 4.6 (A), representa la microestructura existente en el metal base, existen granos equiaxiales y homogéneos austeníticos. En la figura 4.6 (B), ZAC, hay un aumento progresivo en el tamaño de granos austeníticos y se observa la precipitación de carburos de cromo (en la parte más cercana a la zona fundida). En la figura 4.6 (C), zona fundida, hay presencia de granos de ferrita columnar. Los granos austeníticos en la ZF son más pequeños

en comparación con los de la ZAC y el MB, producto del enfriamiento rápido del material, además de ello promueve la aparición de los carburos de cromo.

Si se compara la figura 4.6 (B) con la figura 4.3 (B), soldadas a la misma intensidad de corriente, los granos de esta última son más grandes en la zona afectada por el calor debido a que fue soldada con una velocidad de pasada menor, por lo tanto hubo mayor calor aportado por el arco eléctrico permitiendo el crecimiento de los granos. En comparación con la figura 4.5 (B), los granos de esta última en la ZAC son más pequeños al haber sido soldada a una intensidad de calor menor.

Comparando el tamaño de grano según los patrones de la norma ASTM E112 a 100X (Ver anexo 8), se obtiene lo siguiente (ver tabla 4.6):

Tabla 4.6. Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo F.

Zona Estudiada	Número ASTM	Número de granos promedio por pulgada cuadrada
MB	6	32
ZAC	5	16
ZF	8	128

PM7 (Grupo G):

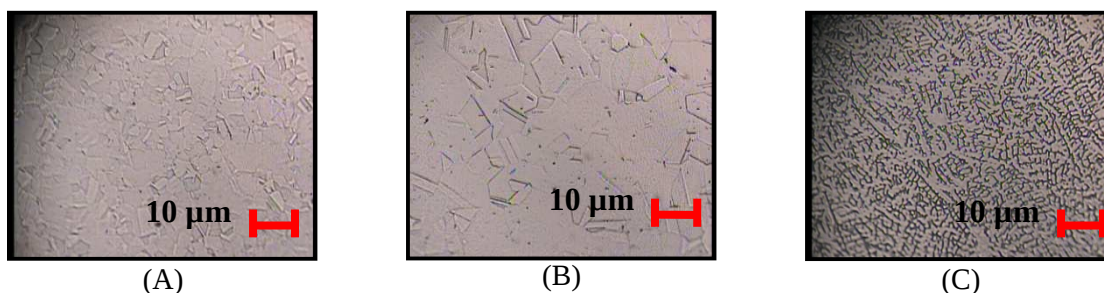


Figura 4.7. Microestructura del metal base (A), la zona afectada por el calor (B) y cordón de soldadura (C) la probeta PM7 a 200X.

La figura 4.7 (A) corresponde al metal base, se observan granos de austenita equiaxiales y homogéneos. En la figura 4.7 (B), zona afectada por el calor, se presenta un

aumento progresivo en el tamaño de los granos austeníticos los cuales se van alargando a medida que se alejan del metal base, además se observa la precipitación de carburos de cromo (en la parte más cercana a la zona fundida) producto del calor generado por la soldadura. En la figura 4.7 (C), zona fundida, se observa granos de ferrita columnar, producto de la solidificación, en la que los carburos de cromo particionan los límites de grano y promueven la formación de ferrita en las fronteras de los granos austeníticos, la ferrita que se forma se ubica en los límites de grano de la austenita. Para este caso, en la zona fundida, los granos austeníticos son más pequeños, producto de la contracción del material al solidificarse rápidamente luego del soldeo, además el enfriamiento rápido del material en la zona fundida promueve la aparición de los carburos de cromo.

En comparación con la figura 4.1 (B) y figura 4.4 (B), soldadas a la misma intensidad de corriente, los granos de ambas son más grandes en la zona afectada por el calor debido a que fueron soldadas con velocidades de pasada menores, por lo tanto hubo mayor calor aportado por el arco eléctrico permitiendo el crecimiento de los granos en la ZAC.

Comparando el tamaño de grano según los patrones de la norma ASTM E112 a 100X (Ver anexo 8), se obtiene lo siguiente (ver tabla 4.7):

Tabla 4.7. Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo G.

Zona Estudiada	Número ASTM	Número de granos promedio por pulgada cuadrada
MB	6	32
ZAC	4	8
ZF	8	128

PM8 (Grupo H):

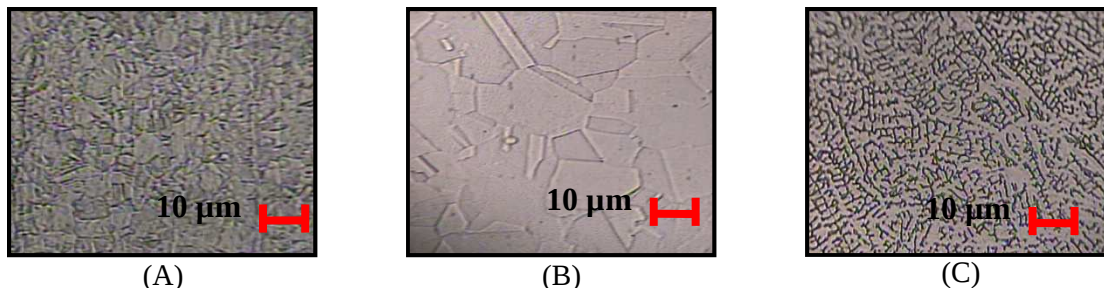


Figura 4.8. Microestructura del metal base (A), la zona afectada por el calor (B) y cordón de soldadura (C) la probeta PM8 a 200X.

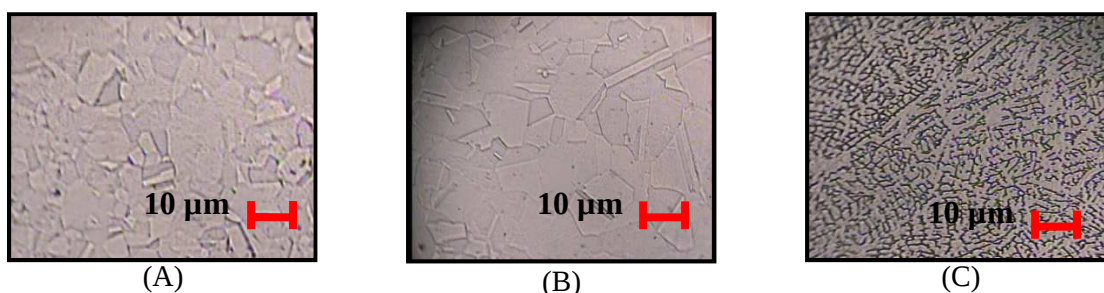
En la figura 4.8 (A), metal base, hay presencia de granos equiaxiales y homogéneos austeníticos. En la figura 4.8 (B), ZAC, hay un aumento progresivo en el tamaño de grano austenítico provenientes de la dirección del metal base, además se observa la precipitación de carburos de cromo (en la parte más cercana a la zona fundida) producto del calor generado por la soldadura. En la figura 4.4 (C), zona fundida, hay presentes granos de ferrita columnar a parte de los granos austeníticos. Para este caso, los granos austeníticos son más pequeños, en comparación con los de la ZAC, producto del enfriamiento rápido del material, además de ello promueve la aparición de los carburos de cromo.

En comparación con la figura 4.2 (B) y figura 4.5 (B), soldadas a la misma intensidad de corriente, los granos austeníticos de éstas figura son más grandes en la zona afectada por el calor debido a que fueron soldadas con velocidades de pasada menores, por lo tanto hubo mayor calor aportado por el arco eléctrico permitiendo el crecimiento de los granos. En comparación con la figura 4.4 (B), los granos de esta última en la ZAC son más pequeños al haber sido soldada a una intensidad de calor menor.

Comparando el tamaño de grano según los patrones de la norma ASTM E112 a 100X (Ver anexo 8), se obtiene lo siguiente (ver tabla 4.8):

Tabla 4.8. Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo H.

Zona Estudiada	Número ASTM	Número de granos promedio por pulgada cuadrada
MB	6	32
ZAC	4	8
ZF	8	128

PM9 (Grupo I):**Figura 4.9.** Microestructura del metal base (A), la zona afectada por el calor (B) y cordón de soldadura (C) la probeta PM9 a 200X.

La figura 4.9 (A), correspondiente al metal base, hay presencia de granos equiaxiales y homogéneos austeníticos. En la figura 4.9 (B), ZAC, hay un aumento progresivo en el tamaño de granos austeníticos provenientes de la dirección del metal base, además se observa la precipitación de carburos de cromo (en la parte más cercana a la zona fundida) producto del calor generado por la soldadura. En la figura 4.4 (C), correspondiente a la zona fundida, hay presencia de granos de ferrita columnar y granos austeníticos más pequeños, en comparación con los de la ZAC, producto del enfriamiento rápido del material, además de ello promueve la aparición de los carburos de cromo.

Comparando la figura 4.9 (C) con las figuras 4.2 (B) y 4.5 (B), soldadas a la misma intensidad de corriente, los granos de son más grandes en la zona afectada por el calor debido a que fueron soldada con velocidades de pasada menores, por lo tanto hubo mayor calor aportado por el arco eléctrico permitiendo el crecimiento de los granos. En

comparación con la figura 4.8 (B), los granos de esta última en la ZAC son más pequeños al haber sido soldada a una intensidad de calor menor.

Comparando el tamaño de grano según los patrones de la norma ASTM E112 a 100X (Ver anexo 8), se obtiene lo siguiente (ver tabla 4.9):

Tabla 4.9. Tamaño de granos ASTM en las zonas estudiadas, Probetas Grupo I.

Zona Estudiada	Número ASTM	Número de granos promedio por pulgada cuadrada
MB	6	32
ZAC	4	8
ZF	8	128

Por medio del análisis metalográfico se observa entonces la microestructura existente en el metal base, zona afectada por el calor y la zona fundida, estas se muestran desde la figura 4.1 hasta la figura 4.9. Para todas las condiciones ensayadas se observa granos características del acero inoxidable AISI 304: en el metal base, granos austeníticos equiaxiales, debido al contenido de cromo y níquel del mismo, sin presentar variación debido a que no es afectada esta zona por el calor del proceso de soldadura. En la ZAC, se observa un aumento en el tamaño de grano, esto debido a la influencia del calor generado por el arco eléctrico y al enfriamiento lento. Por el contrario, en la zona fundida, los granos se contraen debido al enfriamiento rápido y la aparición de los carburos de carbono, que participan los granos austeníticos para promover la formación de ferrita columnar. En la medida que se aumenta la intensidad de corriente o se disminuye la velocidad de pasada los granos se hacen más grandes, porque hay mayor calor generado en la soldadura.

4.2 Ensayo de tracción.

El ensayo demuestra el mayor esfuerzo y la deformación máxima que soporta la soldadura antes que ocurra la fractura, se ensayaron nueve (9) condiciones, 3 réplicas por cada una, obteniendo 27 probetas ensayadas para tracción.

A continuación se muestran los gráficos Esfuerzos vs. Deformación Ingenieril por grupo ensayado:

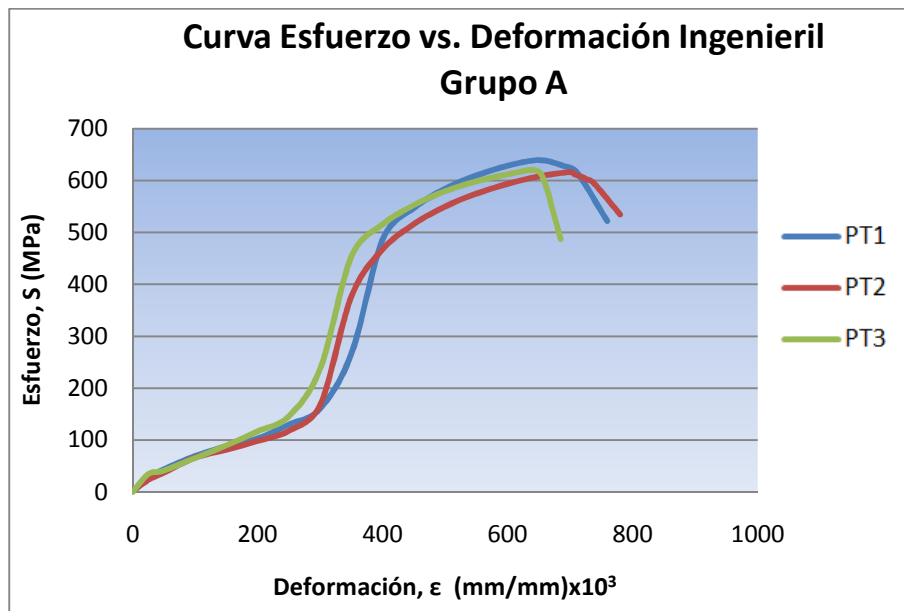


Figura 4.10. Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Probetas Grupo A.

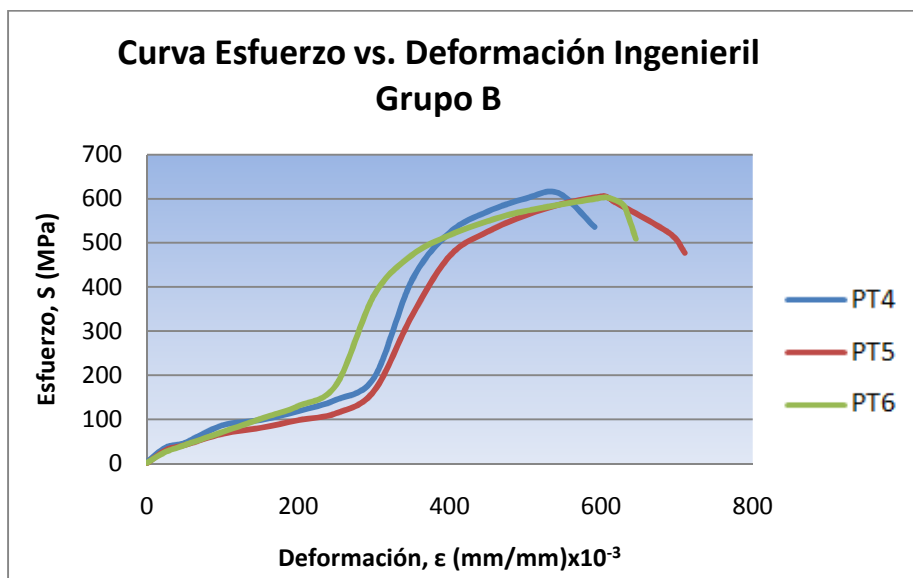


Figura 4.11. Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Probetas Grupo B.

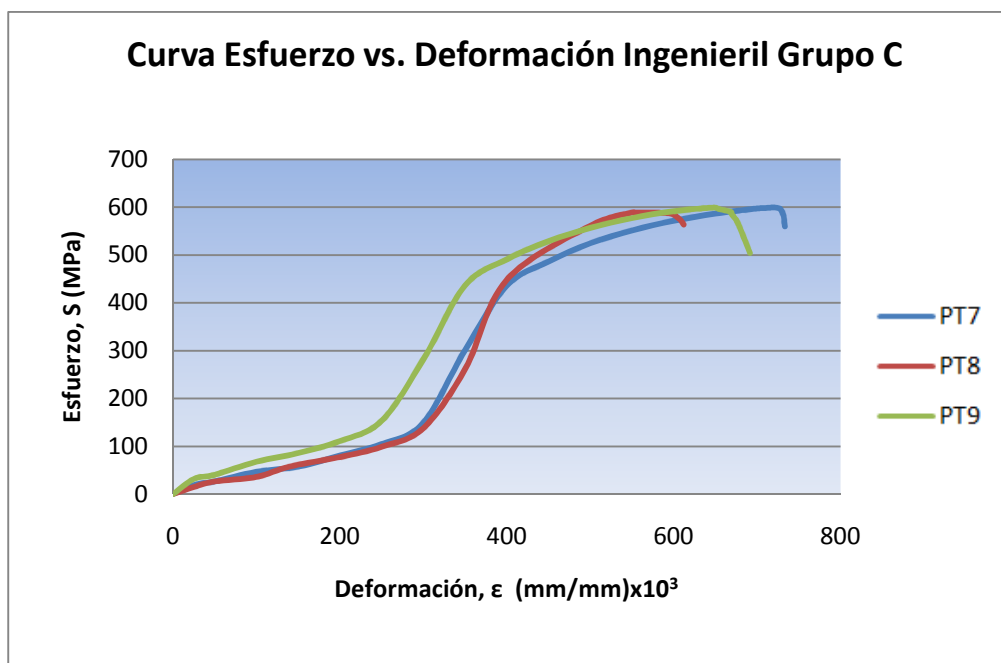


Figura 4.12. Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Probetas Grupo C.

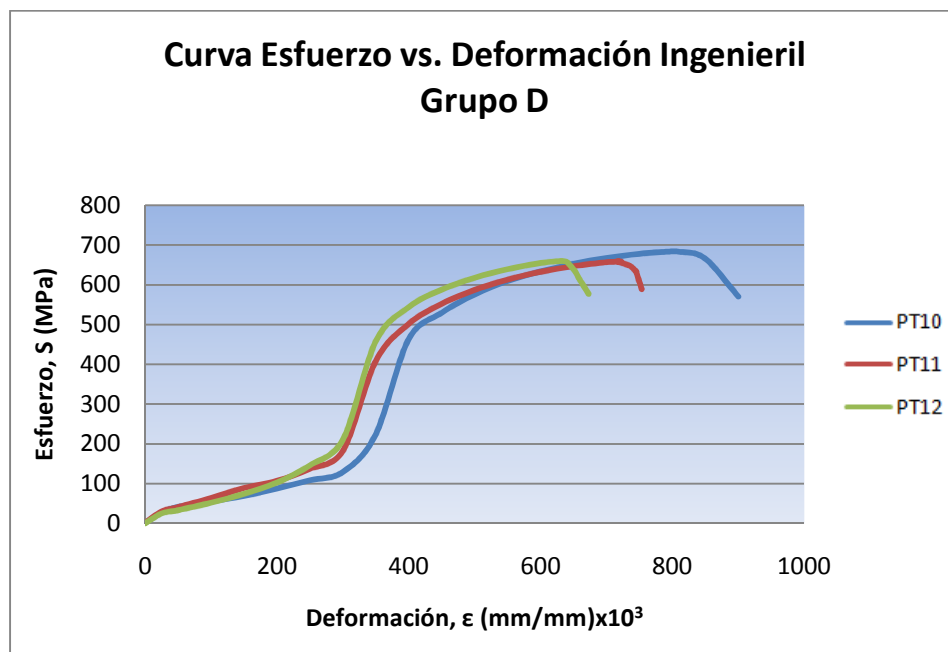


Figura 4.13. Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Probetas Grupo D.

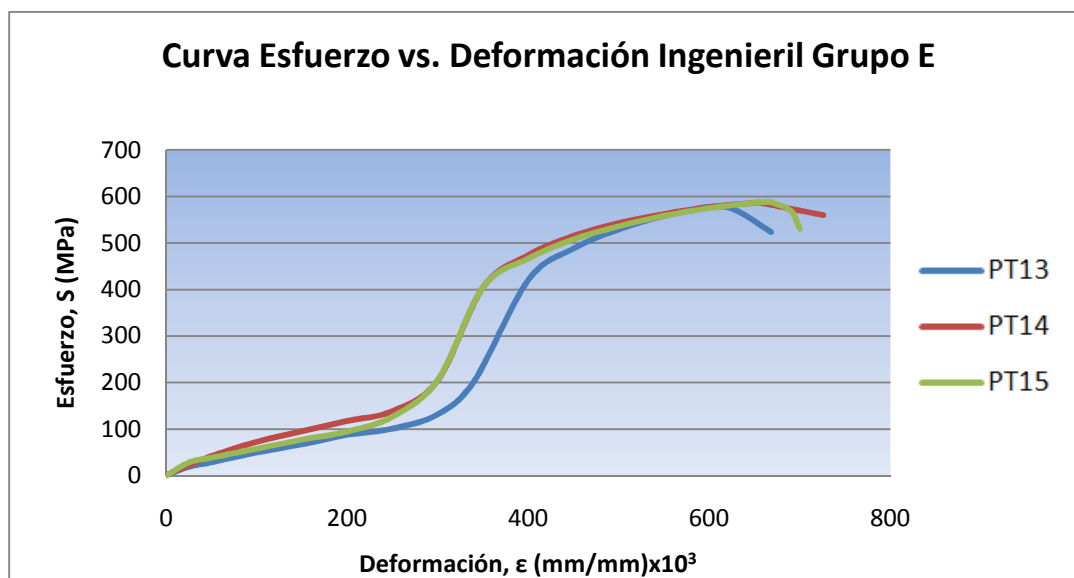


Figura 4.14. Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Grupo Probetas E.

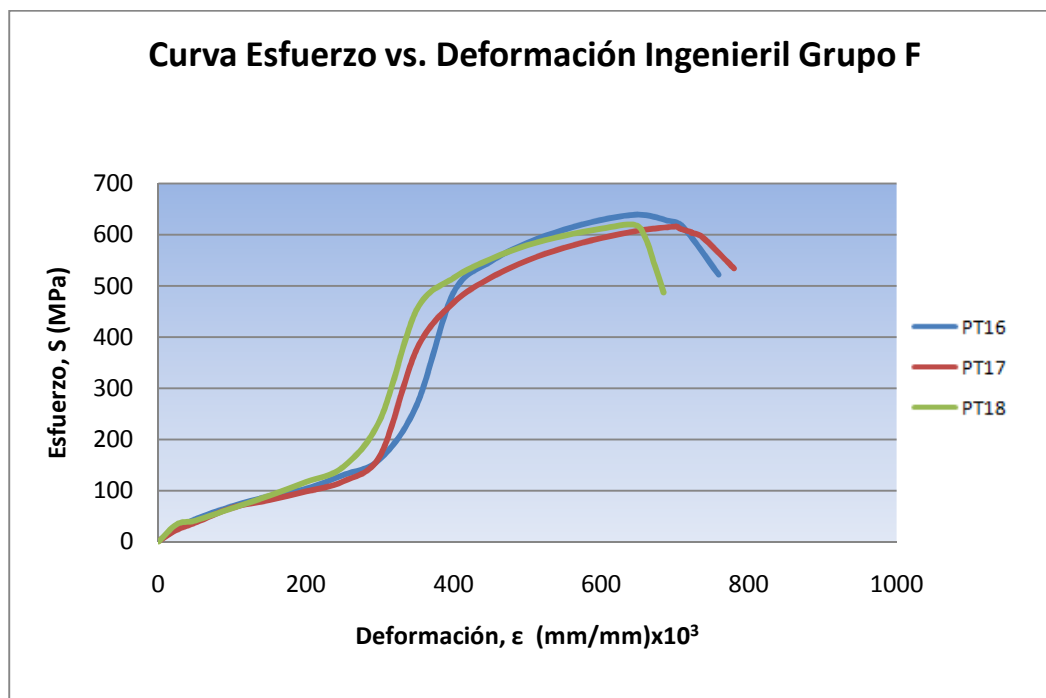


Figura 4.15. Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Grupo Probetas F

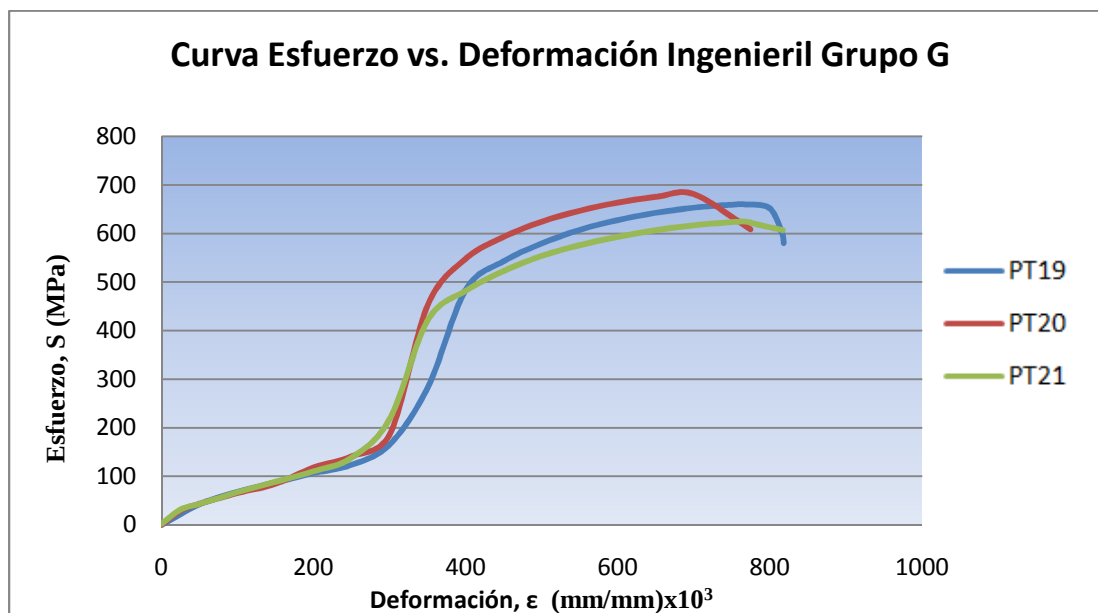


Figura 4.16. Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Grupo Probetas G.

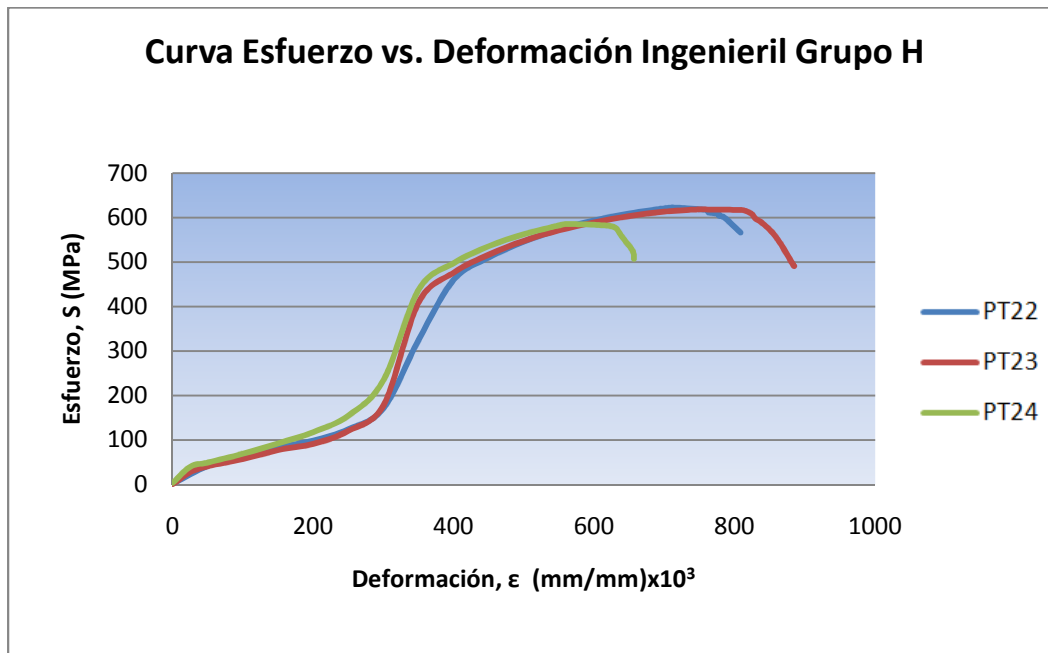


Figura 4.17. Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Grupo Probetas H.

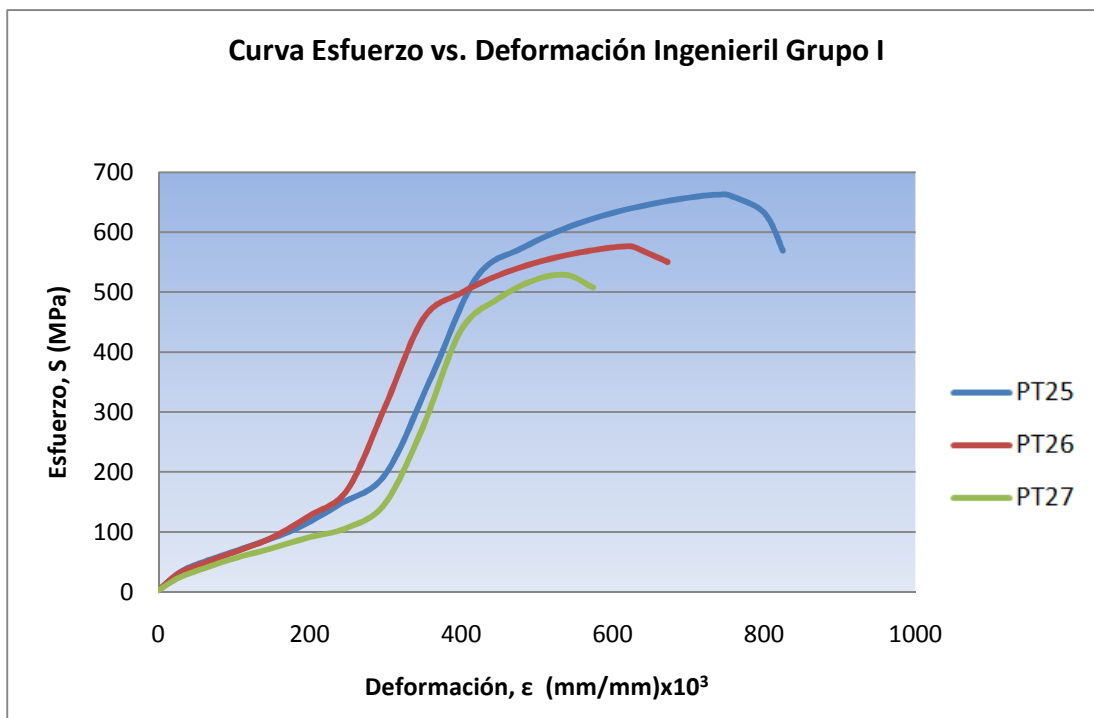


Figura 4.18. Gráfico Esfuerzo vs Deformación. Grupo Probetas I.

Tabla 4.10. Valores de esfuerzo de fluencia (S_y), esfuerzo máximo ($S_{m\acute{a}x}$) y esfuerzo de ruptura (S_r) para todas las condiciones de ensayo.

Grupo	Probeta/Análisis muestral	S_y (N/mm²)	$S_{m\acute{a}x}$ (N/mm²)	S_r (N/mm²)
A	PT1	140,20	622,27	566,12
	PT 2	138,10	618,82	491,22
	PT 3	132,50	585,76	507,4
	Promedio	136,93	608,95	521,58
	Desviación estándar	3,25	16,46	32,18
	Coeficiente de variación	2,37	2,70	6,17
	% Error relativo promedio	2,16	2,54	5,69
	Error estándar	1,88	9,50	18,58
B	PT 4	149,50	612,61	535,82
	PT 5	130,70	605,71	477,16
	PT 6	148,40	602,7	509,35
	Promedio	142,87	607,01	507,44
	Desviación estándar	8,61	4,15	23,99
	Coeficiente de variación	6,03	0,68	4,73
	% Error relativo promedio	5,68	0,62	3,98
	Error estándar	4,97	2,40	13,85
C	PT 7	120,60	599,5	559,79
	PT 8	119,70	588,9	542,69
	PT 9	115,60	599,18	504,27
	Promedio	118,63	595,86	535,58
	Desviación estándar	2,18	4,92	23,22
	Coeficiente de variación	1,83	0,83	4,33
	% Error relativo promedio	1,70	0,78	3,90
	Error estándar	1,26	2,84	13,40

Tabla 4.10 (Continuación) Valores de esfuerzo de fluencia (S_y), esfuerzo máximo ($S_{m\acute{a}x}$) y esfuerzo de ruptura (S_r) para todas las condiciones de ensayo.

Grupo	Probeta/Análisis muestral	S_y (N/mm²)	$S_{m\acute{a}x}$ (N/mm²)	S_r (N/mm²)
D	PT 10	145,40	683,94	570,33
	PT 11	156,45	658,66	589,21
	PT 12	175,93	659,6	576,98
	Promedio	159,26	667,40	578,84
	Desviación estándar	12,62	11,70	7,82
	Coefficiente de variación	7,92	1,75	1,35
	% Error relativo promedio	6,98	1,65	1,19
	Error estándar	7,29	6,76	4,51
E	PT 13	140,50	625,87	523,46
	PT 14	156,80	611,9	560,1
	PT 15	154,30	608,75	529,8
	Promedio	150,53	615,51	537,79
	Desviación estándar	7,17	7,44	15,99
	Coefficiente de variación	4,76	1,21	2,97
	% Error relativo promedio	4,44	1,12	2,77
	Error estándar	4,14	4,30	9,23
F	PT 16	168,60	639,4	521,89
	PT 17	159,50	616,06	534,13
	PT 18	152,50	619,2	539,96
	Promedio	160,20	624,89	531,99
	Desviación estándar	6,59	10,34	7,53
	Coefficiente de variación	4,11	1,66	1,42
	% Error relativo promedio	3,50	1,55	1,27
	Error estándar	3,81	5,97	4,35

Tabla 4.10 (Continuación) Valores de esfuerzo de fluencia (S_y), esfuerzo máximo ($S_{m\acute{a}x}$) y esfuerzo de ruptura (S_r) para todas las condiciones de ensayo.

Grupo	Probeta/Análisis muestral	S_y (N/mm²)	$S_{m\acute{a}x}$ (N/mm²)	S_r (N/mm²)
G	PT 19	182,60	659,22	580,11
	PT 20	192,70	680,93	608,66
	PT 21	179,50	623,96	606,84
	Promedio	184,93	654,70	598,54
	Desviación estándar	5,64	23,48	13,05
	Coefficiente de variación	3,05	3,59	2,18
	% Error relativo promedio	2,80	3,13	2,05
	Error estándar	3,25	13,55	7,53
H	PT 22	177,50	646,86	619,01
	PT 23	180,60	646,8	612,48
	PT 24	187,10	643,1	559,28
	Promedio	181,73	645,59	596,92
	Desviación estándar	4,00	1,76	26,75
	Coefficiente de variación	2,20	0,27	4,48
	% Error relativo promedio	1,97	0,26	4,20
	Error estándar	2,31	1,02	15,44
I	PT 25	125,60	663,09	569,16
	PT 26	129,40	576,6	550,25
	PT 27	116,50	528,11	507,28
	Promedio	123,83	589,27	542,23
	Desviación estándar	5,41	55,83	25,89
	Coefficiente de variación	4,37	9,47	4,77
	% Error relativo promedio	3,95	8,35	4,30
	Error estándar	3,12	32,23	14,95

Para ilustrar el cálculo de los indicadores se muestra el procedimiento usado para el grupo A en cuanto al esfuerzo de fluencia:

Desviación estándar (σ).

Utilizando la ecuación 3.7 para el Grupo A:

$$\sigma_{Grupo A} = \sqrt{\frac{(S_{y1} - \overline{S_y})^2 + (S_{y2} - \overline{S_y})^2 + (S_{y3} - \overline{S_y})^2}{n - 1}}$$

Donde:

$$S_{y1} = 170,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\overline{S_y} = 163,6 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{y2} = 168,1 \text{ N/mm}^2$$

$$n = 3$$

$$S_{y3} = 152,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Grupo A} = 7,9 \text{ N/mm}^2$$

Coeficiente de variación (Cv).

$$Cv = \frac{\sigma}{\overline{X}} \times 100 \%$$

Utilizando la ecuación 3.8 para el Grupo A:

$$Cv = \frac{\sigma_{Grupo A}}{\overline{S_y}} \times 100$$

Donde:

$$\overline{S_y} = 163,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Grupo A} = 7,9 \text{ N/mm}^2$$

$$Cv = 4,83$$

% Error relativo promedio (%Er).

$$\%Er = \frac{\sum \frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}} \times 100\%}{n}$$

Utilizando la ecuación 3.9 para el Grupo A:

$$\%Er_{Grupo A} = \frac{\frac{(S_{y1} - \bar{S}_y)}{\bar{S}_y} \times 100 + \frac{(S_{y2} - \bar{S}_y)}{\bar{S}_y} \times 100 + \frac{(S_{y3} - \bar{S}_y)}{\bar{S}_y} \times 100}{n}$$

Donde:

$$S_{y1} = 170,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{S}_y = 163,6 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{y2} = 168,1 \text{ N/mm}^2$$

$$n = 3$$

$$S_{y3} = 152,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\%Er_{Grupo A} = 5,33 \%$$

Error estándar (Es).

$$Es = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Utilizando la ecuación 3.10 para el Grupo A:

$$\sigma_{Grupo A} = 7,9 \text{ N/mm}^2$$

$$n = 3$$

$$Es = 5,46$$

Los valores aceptados para este tipo de muestreo son los señalados en la tabla 4.11:

Tabla 4.11. Valores máximos recomendados de los indicadores estadísticos.

Indicador	Valor máximo aceptado
Coefficiente de variación (Cv)	10
% Error relativo promedio (%Er)	13
Error estándar (Es)	20

Todas las muestras presentaron variaciones por debajo de las indicadas en la tabla 4.11, lo que revela una variabilidad baja en la toma de datos y poca desviación respecto al valor promedio, lo que permite establecerlo, en cada caso, como el valor de esfuerzo de la junta soldada.

Para las condiciones del grupo G, se obtuvo los valores de esfuerzo más altos de todas las juntas soldadas, los cuales fueron: $S_y=184,83$; $S_{max}=654,7$ MPa y $S_u=598,53$ MPa.

Las figuras 4.19, 4.20 y 4.21 muestran los gráficos comparativos en cuanto a los parámetros y los esfuerzos.

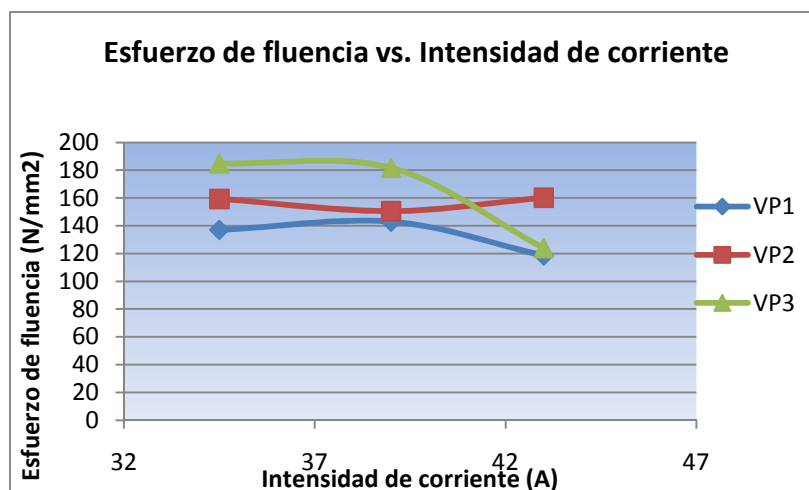


Figura 4.19. Esfuerzo de fluencia vs. Intensidad de corriente para las distintas velocidades de pasada estudiadas.

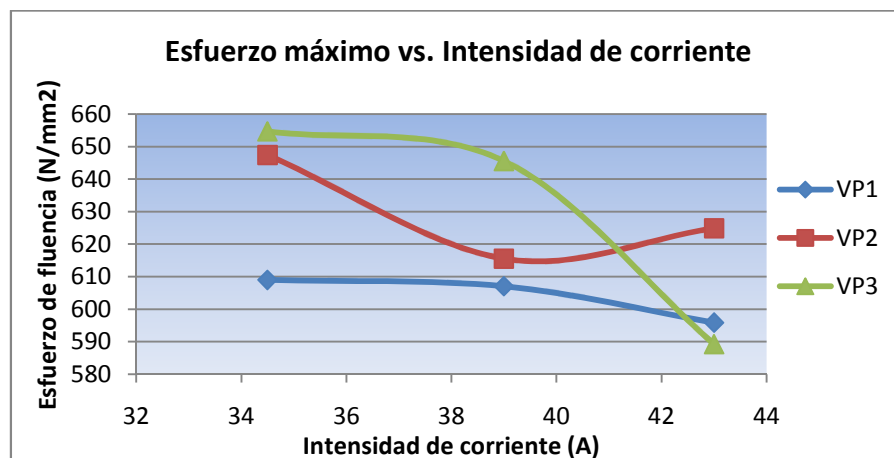


Figura 4.20. Esfuerzo máximo vs. Intensidad de corriente para las distintas velocidades de pasada estudiadas.

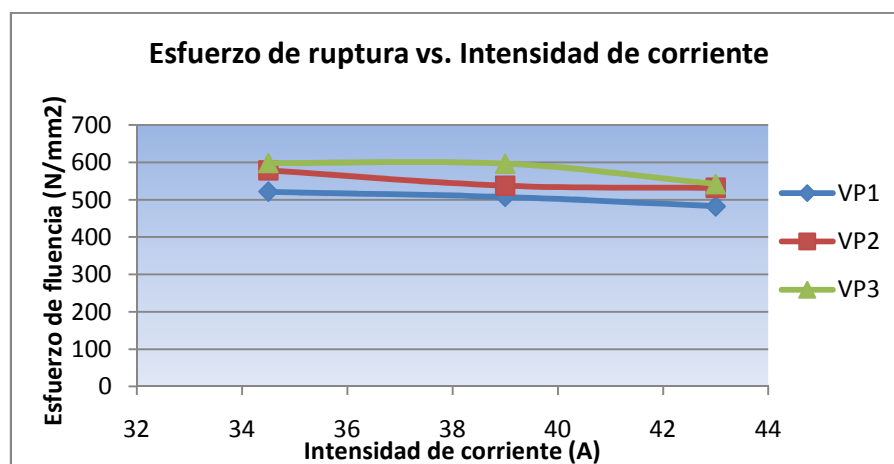


Figura 4.21. Esfuerzo de ruptura vs. Intensidad de corriente para las distintas velocidades de pasada estudiadas.

Se observa que a medida que aumentan los valores de la intensidad de corriente, los valores de los esfuerzos de fluencia, máximos y de ruptura para cada condición tienden a disminuir, contrario pasa con el aumento de las velocidades de pasada ya que al aumentar los valores de esta variable los esfuerzos aumentan para cada condición estudiada.

Para tener una mayor idea de los esfuerzos alcanzados por las juntas soldadas en relación a los del material de entrega se construyó la tabla 4.13 la cual compara los valores con los de la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Valores de esfuerzos del acero AISI 304.

Material de entrega (Acero inoxidable AISI 304)		
Sy (N/mm²)	Smáx (N/mm²)	Sr (N/mm²)
295	550	520

Tabla 4.13. Comparación entre los esfuerzos admitidos por las juntas soldadas y el material de entrega.

Grupo	Sy (N/mm²)	% Diferencia	Smax (N/mm²)	% Diferencia	Sr (N/mm²)	% Diferencia
A	163,6	-44,54	608,95	10,72	521,58	0,30
B	166,20	-43,66	607,01	10,36	507,44	-2,41
C	145,30	-50,75	595,86	8,34	482,25	-7,26
D	129,26	-56,18	667,40	21,35	578,84	11,32
E	123,87	-58,01	615,51	11,91	537,79	3,42
F	140,20	-52,47	624,89	13,62	531,99	2,31
G	184,93	-37,31	654,70	19,04	598,54	15,10
H	181,73	-38,40	645,59	17,38	596,92	14,79
I	123,83	-58,02	589,27	7,14	542,23	4,27

Los esfuerzos de fluencia de las juntas soldadas se encuentran por debajo de los esfuerzos del material de entrega en proporciones que van entre 37,31% y 58,02 % lo que indica una disminución en la resistencia a la deformación elástica.

Por otro lado los esfuerzos máximos de las juntas soldadas se ubican todos por encima del valor del material de entrega en una magnitud que varía desde el 7,14 % hasta 21,35 %.

Los esfuerzos últimos alcanzados son mayores que los del material de entrega en la mayoría de los casos, los cuales van de un 0,3% a un 15,10 %. La excepción se hace con los grupos B y C presentando una reducción en los esfuerzos últimos de 2,41% y 7,26% respectivamente.

Las curvas esfuerzo - deformación muestran altos esfuerzos pero con una baja deformación, debido al endurecimiento del material, de lo que se infiere una alta absorción de energía antes de la ruptura pero una baja deformación plástica.

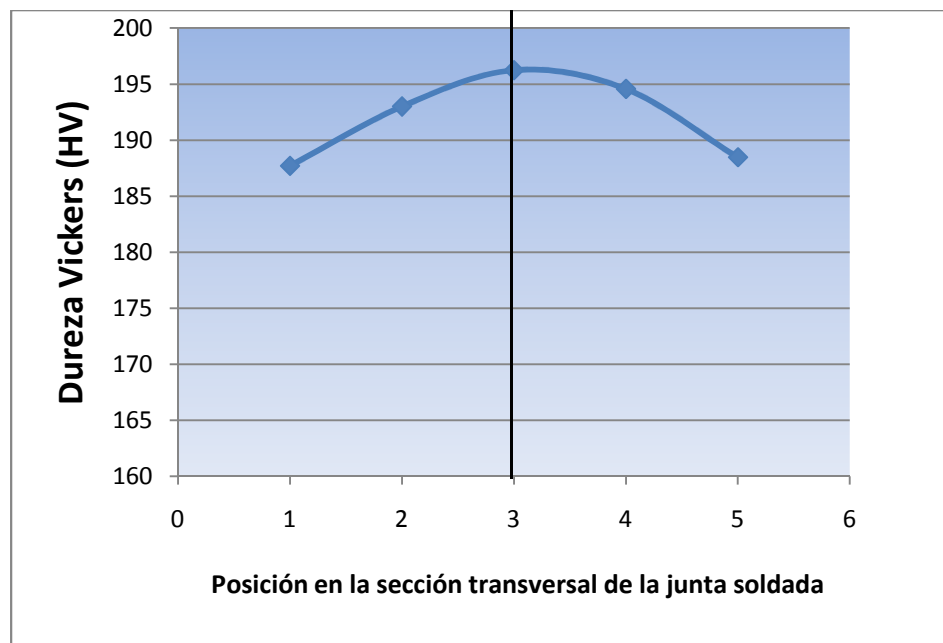
4.3 Ensayo de microdureza.

Se tomaron tres (3) medidas de dureza por cada zona de la junta soldada (ver figura 3.15) y se tomó un promedio para cada una. Luego, se analizó la sección transversal de la muestra en el metal base, la zona afectada por el calor y en la zona fundida, todas ellas medidas de derecha a izquierda tomando como centro de referencia el cordón de soldadura, y con una separación de 0,1 mm de entre ellas.

Los resultados se muestran en las siguientes tablas y graficas:

PD1 (Grupo A):**Tabla 4.14.** Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD1

	MBi (1)	ZACi (2)	Zona fundida (3)	ZACd (4)	MBd (5)
Lectura 1 HV	187,5	194,3	194,2	191,2	192,3
Lectura 2 HV	190	193,2	198,2	194,3	188,5
Lectura 3 HV	185,6	191,5	196,3	198,2	184,6
Promedio	187,7	193	196,23	194,57	188,47
Desviación estándar	1,80	1,15	1,63	2,86	3,14
Coefficiente de variación	0,96	0,60	0,83	1,47	1,67
% Error relativo promedio	0,82	0,52	0,69	1,25	1,37
Error estándar	1,04	0,66	0,94	1,65	1,81

**Figura 4.22.** Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD1

PD2 (Grupo B):

Tabla 4.15. Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD2

	MBi (1)	ZACi (2)	Zona fundida (3)	ZACd (4)	MBd (5)
Lectura 1 HV	180	189	194,3	187	180
Lectura 2 HV	189,3	190	195	185	182,5
Lectura 3 HV	187,3	186	193,7	190	179,3
Promedio	180	188,33	194,33	187,33	180,6
Desviación estándar	4,86	1,70	0,53	2,05	1,37
Coefficiente de variación	2,70	0,90	0,27	1,10	0,76
% Error relativo promedio	3,07	0,83	0,23	0,95	0,70
Error estándar	2,81	0,98	0,31	1,19	0,79

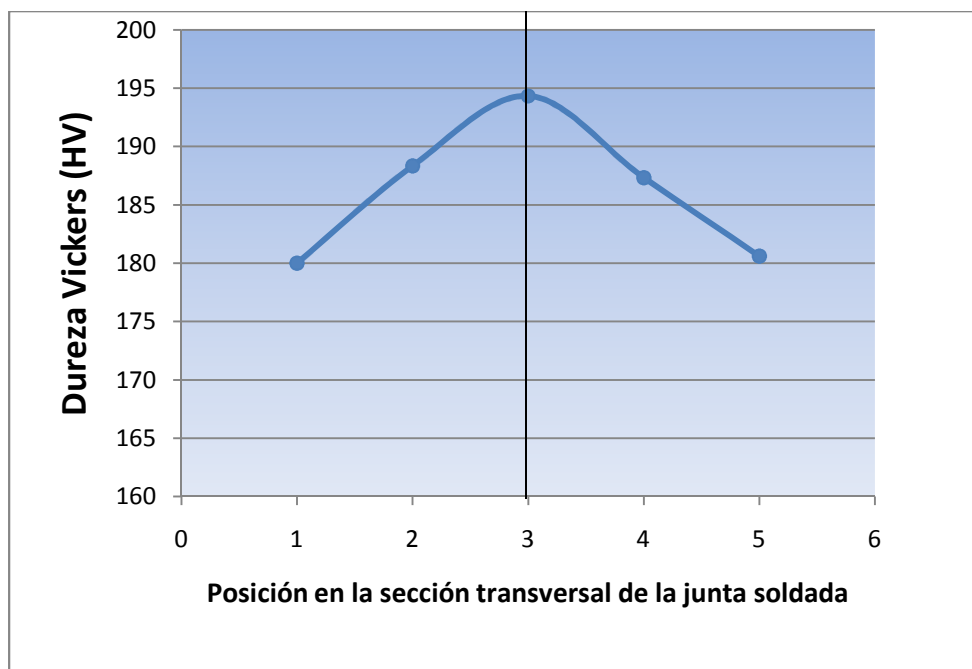
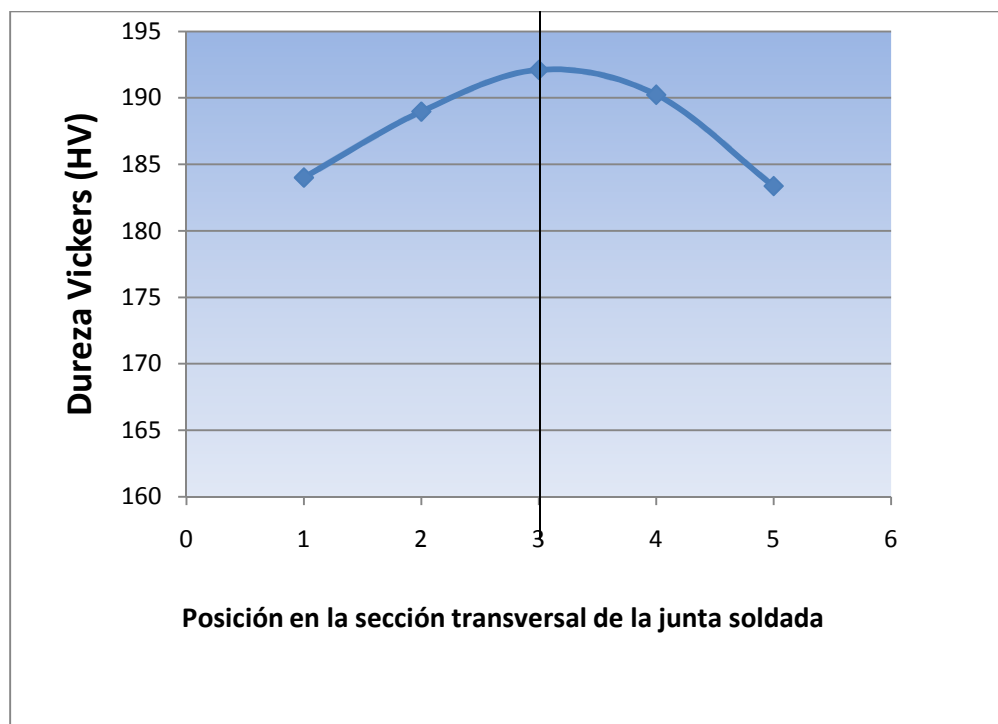


Figura 4.23. Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD2

PD3 (Grupo C)**Tabla 4.16.** Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD3

	MBi (1)	ZACi (2)	Zona fundida (3)	ZACd (4)	MBd (5)
Lectura 1 HV	178,3	188,2	190,5	187	186,6
Lectura 2 HV	188,5	192,3	191,6	190,5	184,2
Lectura 3 HV	185,2	186,4	194,2	193,2	179,3
Promedio	184	188,97	192,1	190,23	183,37
Desviación estándar	4,25	2,47	1,55	2,54	3,04
Coefficiente de variación	2,31	1,31	0,81	1,33	1,66
% Error relativo promedio	2,07	1,18	0,73	1,13	1,48
Error estándar	2,45	1,43	0,90	1,47	1,75

**Figura 4.24.** Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD3

PD4 (Grupo D)

Tabla 4.17. Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD4

	MBi (1)	ZACi (2)	Zona fundida (3)	ZACd (4)	MBd (5)
Lectura 1 HV	180	193	222	210	177,7
Lectura 2 HV	189,3	198	219	193	175,7
Lectura 3 HV	187,3	188,1	233,2	194,2	163,3
Promedio	180	195,5	220,5	201,5	172,23
Desviación estándar	4,86	4,23	6,47	7,84	6,37
Coefficiente de variación	2,70	2,16	2,93	3,89	3,70
% Error relativo promedio	3,07	2,11	2,37	4,02	3,46
Error estándar	2,81	2,44	3,73	4,53	3,68

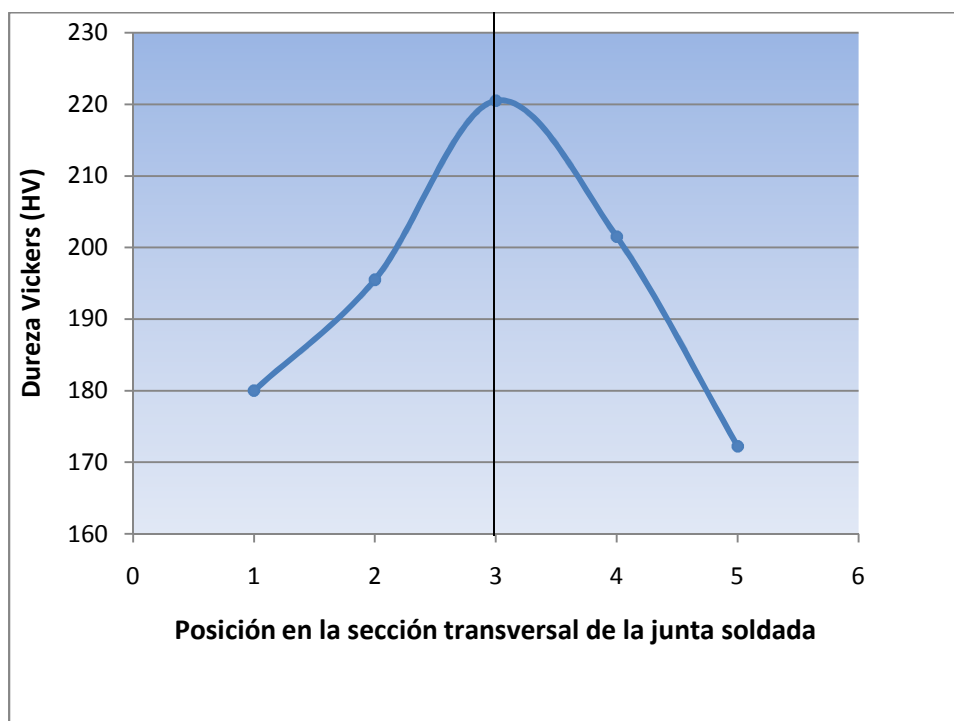
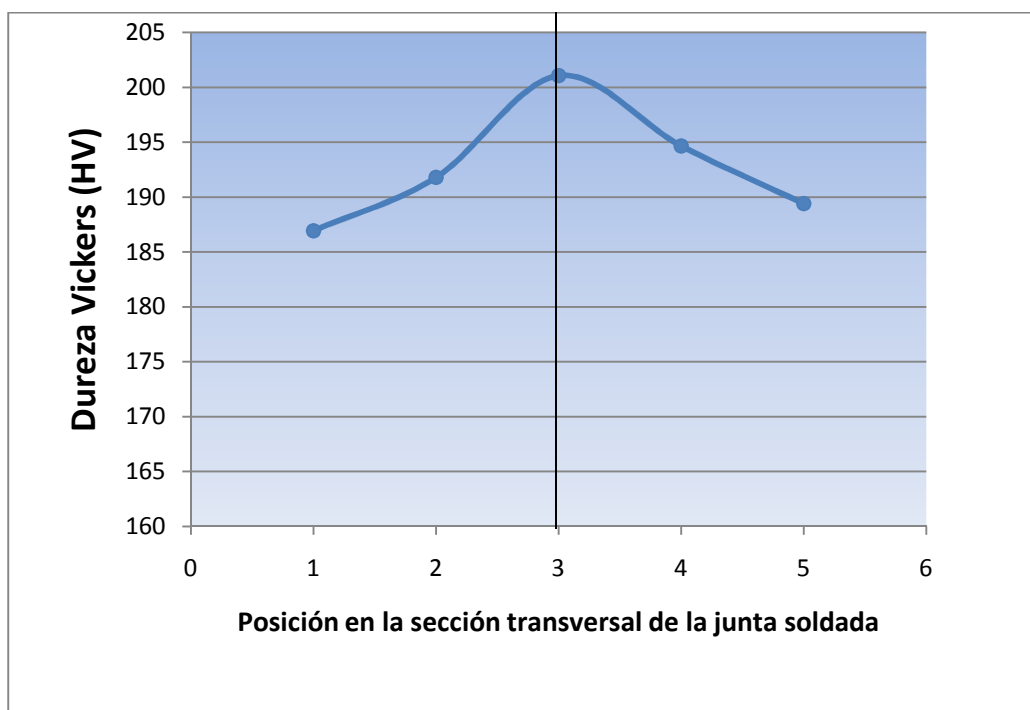


Figura 4.25. Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD4

PD5 (Grupo E)**Tabla 4.18.** Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD5

	MBi (1)	ZACi (2)	Zona fundida (3)	ZACd (4)	MBd (5)
Lectura 1 HV	185	190	205,3	196	189,8
Lectura 2 HV	188,2	196	197	195	187,95
Lectura 3 HV	187,6	189,4	200,9	193	190,5
Promedio	186,93	191,8	201,07	194,67	189,42
Desviación estándar	1,39	2,98	3,39	1,25	1,08
Coefficiente de variación	0,74	1,55	1,69	0,64	0,57
% Error relativo promedio	0,69	1,46	1,40	0,57	0,52
Error estándar	0,80	1,72	1,96	0,72	0,62

**Figura 4.26.** Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD5

PD6 (Grupo F)

Tabla 4.19. Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD6

	MBi (1)	ZACi (2)	Zona fundida (3)	ZACd (4)	MBd (5)
Lectura 1 HV	177,9	188,1	200,6	196,6	180,6
Lectura 2 HV	180,3	190,8	202,5	191,6	190,6
Lectura 3 HV	185,6	187	198,3	192,6	176,4
Promedio	181,27	190,8	200,47	193,6	182,53
Desviación estándar	3,22	1,93	1,72	2,16	5,96
Coefficiente de variación	1,77	1,01	0,86	1,12	3,26
% Error relativo promedio	1,59	1,14	0,72	1,03	2,95
Error estándar	1,86	1,11	0,99	1,25	3,44

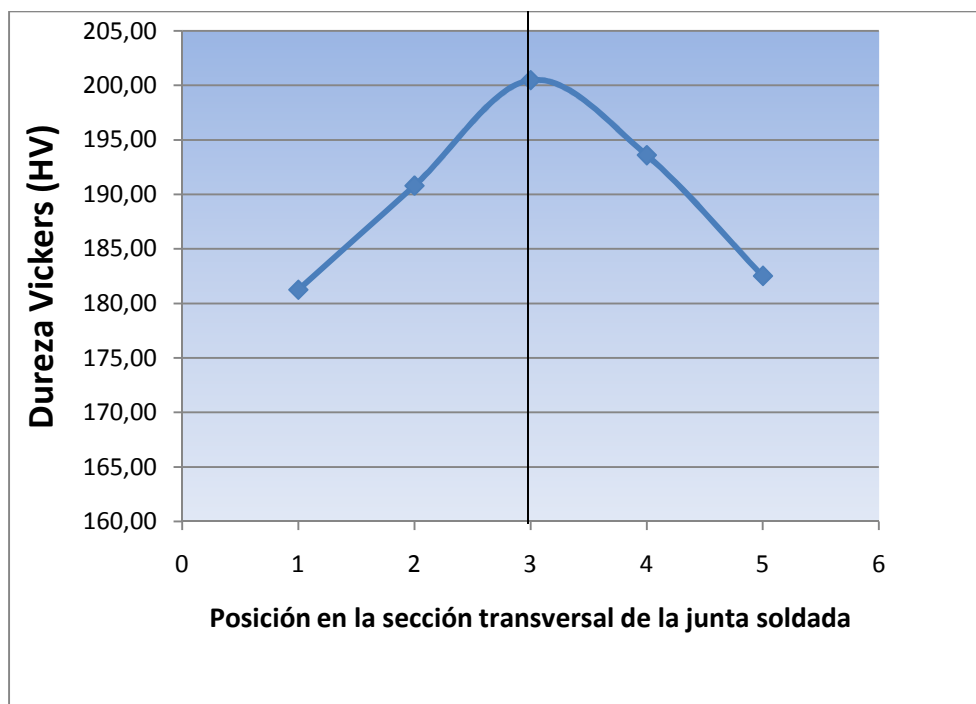
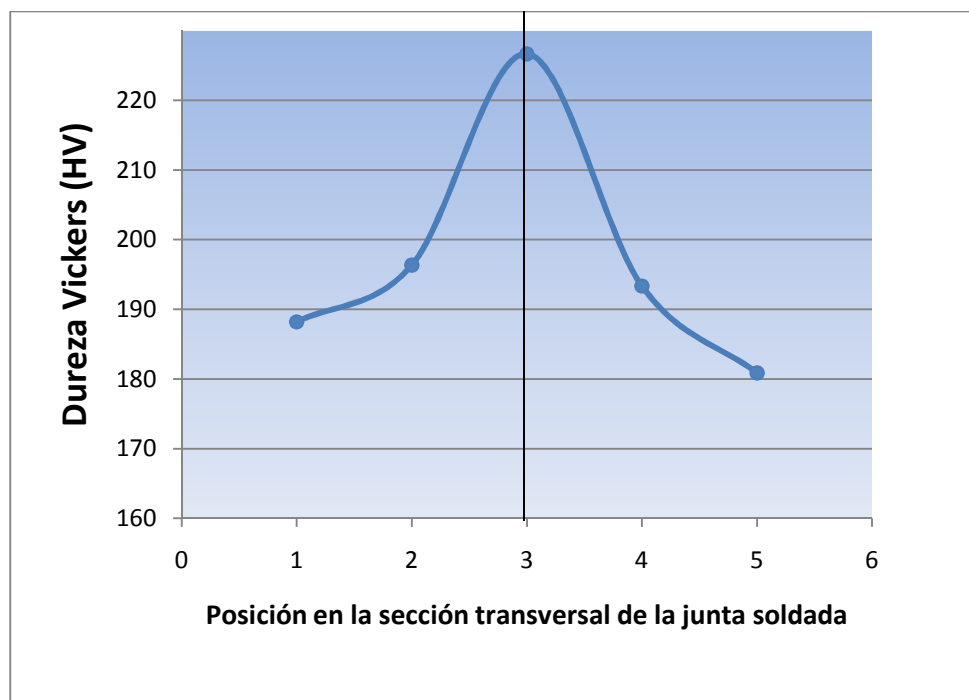


Figura 4.27. Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD6

PD7 (Grupo G)**Tabla 4.20.** Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD7

	MBi (1)	ZACi (2)	Zona fundida (3)	ZACd (4)	MBd (5)
Lectura 1 HV	185	196	225	198	180
Lectura 2 HV	192	203	221	192	179,6
Lectura 3 HV	187,6	190	234	190	183
Promedio	188,2	196,33	226,67	193,33	180,87
Desviación estándar	2,89	5,31	5,44	3,40	1,52
Coefficiente de variación	1,54	2,71	2,40	1,76	0,84
% Error relativo promedio	1,35	2,26	2,16	1,61	0,79
Error estándar	1,67	3,07	3,14	1,96	0,88

**Figura 4.28.** Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD7

PD8 (Grupo H)

Tabla 4.21. Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD8

	MBi (1)	ZACi (2)	Zona fundida (3)	ZACd (4)	MBd (5)
Lectura 1 HV	175	190	219	193	180,8
Lectura 2 HV	177,5	195	221	195	189,6
Lectura 3 HV	181,2	188,1	227	190,5	190,4
Promedio	178	192,5	222,33	192,83	186,93
Desviación estándar	2,55	3,00	3,40	1,84	4,35
Coefficiente de variación	1,43	1,56	1,53	0,95	2,33
% Error relativo promedio	1,25	1,63	1,40	0,81	2,19
Error estándar	1,47	1,73	1,96	1,06	2,51

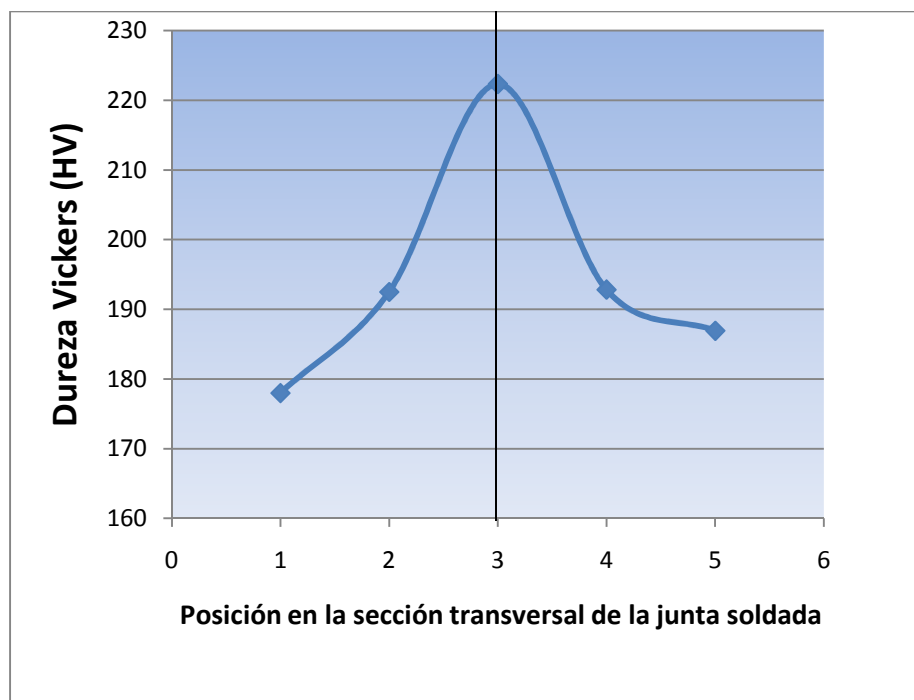
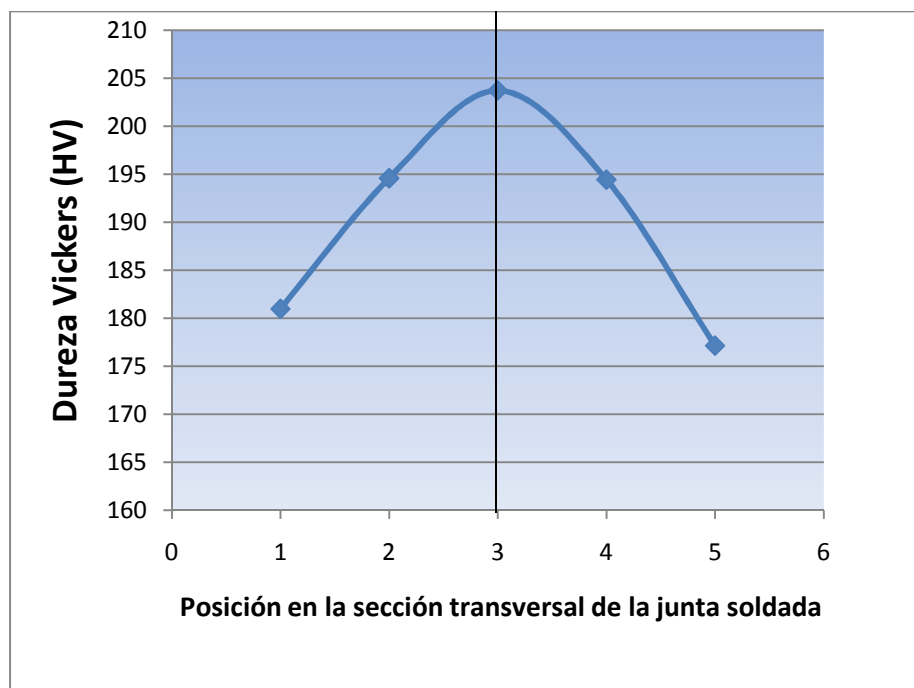


Figura 4.29. Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD8

PD9 (Grupo I)**Tabla 4.22.** Valores de Dureza Vickers para las distintas zonas estudiadas PD9

	MBi (1)	ZACi (2)	Zona fundida (3)	ZACd (4)	MBd (5)
Lectura 1 HV	178	188,1	199,3	198,2	180,6
Lectura 2 HV	179,8	194,6	207,6	190,7	178,4
Lectura 3 HV	185,2	190,8	204,3	194,2	172,5
Promedio	181	194,6	203,73	194,45	177,17
Desviación estándar	3,06	3,17	3,41	3,06	3,42
Coefficiente de variación	1,69	1,63	1,67	1,58	1,93
% Error relativo promedio	1,55	1,76	1,45	1,33	1,76
Error estándar	1,77	1,83	1,97	1,77	1,97

**Figura 4.30.** Gráfico Dureza Vickers vs Posición PD9

El análisis muestral utilizado para validar los datos fue el mismo que para el ensayo de tracción, y como se muestra de las tablas 4.14 a la 4.22, los valores de los indicadores se encuentran por debajo de los límites máximos aceptados para este tipo de estudio, (ver tabla 4.11). Por lo cual es aceptable seleccionar el promedio de los valores tomados como el valor de la dureza en cada una de las zonas estudiadas.

Las figuras 4.31 y 4.32 muestran los gráficos comparativos en cuanto a los parámetros y las durezas en las distintas zonas estudiadas.

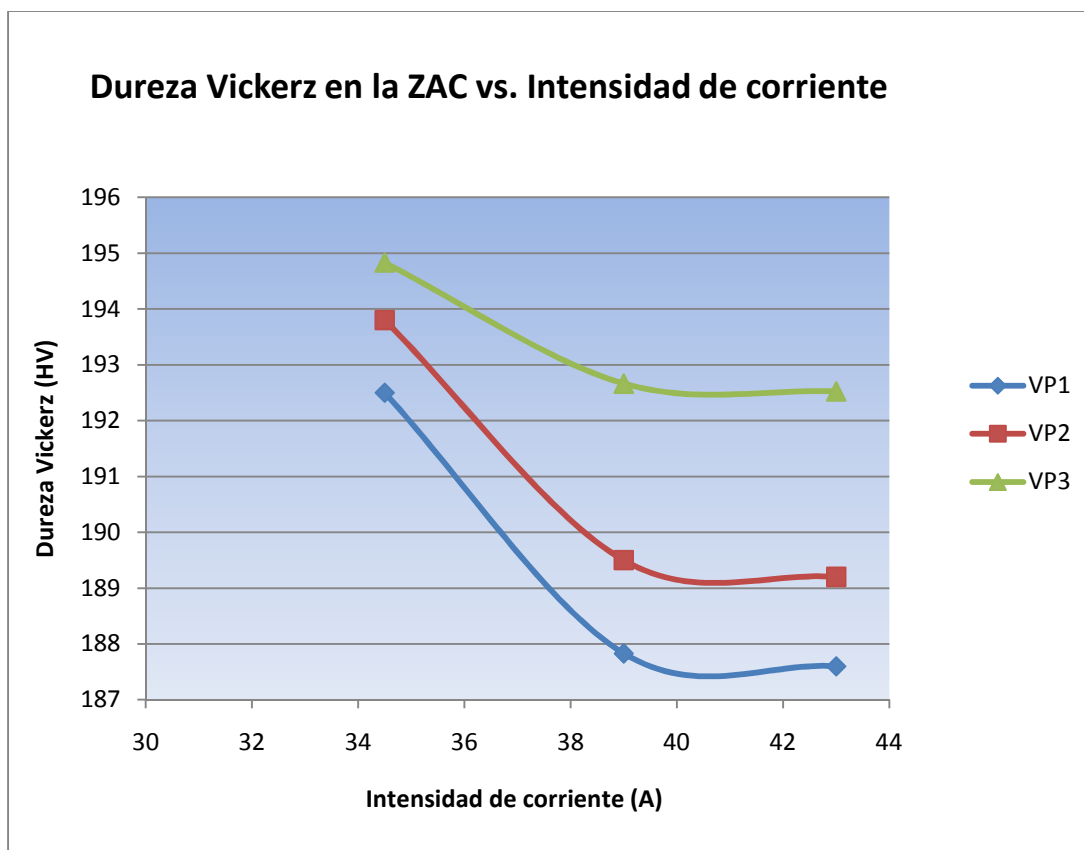


Figura 4.31. Dureza Vickers en la ZAC vs. Intensidad de corriente para las distintas velocidades de pasada estudiadas.

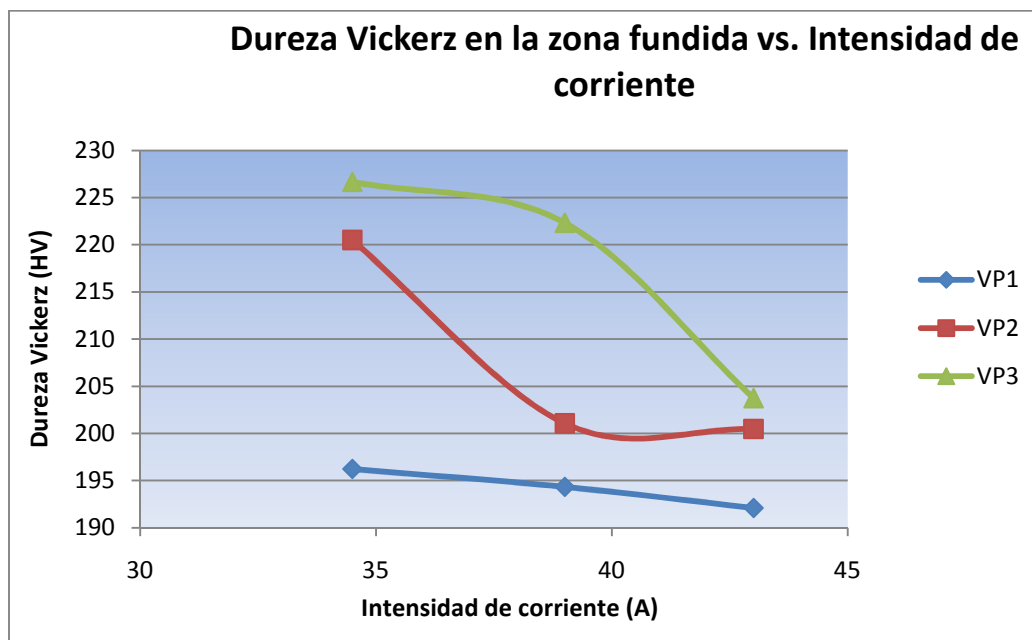


Figura 4.32. Dureza Vickers en la zona fundida vs. Intensidad de corriente para las distintas velocidades de pasada estudiadas.

En las curvas comparativas se observa que para los valores más bajos de corriente tanto para la ZAC como para la zona fundida, las medidas de durezas son mayores y disminuyen junto con la velocidad de pasada.

Para tener una mayor idea de las durezas alcanzadas por las juntas soldadas en la ZAC y la zona fundida en relación a los del material en el metal base se construyó la tabla 4.23.

Tabla 4.23. Comparación entre los esfuerzos admitidos por las juntas soldadas y el material de entrega

Grupo	HV Metal Base	HV ZAC	% de diferencia	HV Cordón	% de diferencia
A	188,09	192,50	2,35	196,23	4,33
B	180,30	187,83	4,18	194,33	7,78
C	183,69	189,60	3,22	192,10	4,58
D	180,12	193,80	7,60	220,50	22,42
E	188,18	189,50	0,70	201,07	6,85
F	181,90	192,20	5,66	200,47	10,21
G	184,54	194,83	5,58	226,67	22,83
H	182,47	192,67	5,59	222,33	21,85
I	179,09	194,53	8,62	203,73	13,76

Para todas las combinaciones de los parámetros estudiados, las medidas de dureza alcanzaron su máximo valor en la zona fundida con un decrecimiento progresivo al alejarse del cordón hasta llegar al metal base. Las diferencias entre las medidas de microdureza del cordón y el metal base se ubicaron entre 4,33% y 22,83%, mientras que las de la ZAC fueron de 0,7% y 8,63%, rango de valores considerablemente menor al de la zona fundida lo que respalda lo visto en las gráficas (4.14 a la 4.22).

CAPÍTULO V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones.

- El intervalo de valores de intensidad de corriente para el soldeo de tuberías de 1-1/2" de acero inoxidable AISI 304 bajo el proceso GTAW se encuentra entre [34,5 A – 43A] y para la velocidad de pasada del electrodo puede definirse el intervalo de valores entre [119,69 mm/min – 196,29 mm/min]. Dentro de estos intervalos, puede seleccionarse la combinación de parámetros que satisfaga las condiciones de operación a los cuales se someten las juntas soldadas de acuerdo a sus propiedades mecánicas.
- Los esfuerzos de fluencia de las juntas soldadas se encuentran por debajo de los esfuerzos del material de entrega en proporciones que van entre 37,31% y 58,02 % lo que indica una disminución en la resistencia a la deformación elástica. Sin embargo, los esfuerzos máximos y últimos se encuentran por encima de los del material de entrega, variando desde 7,14 % hasta 21,35 %. y 2,41% hasta 7,26% respectivamente, llegando a los valores más altos para la combinación de parámetros G (34,5 A; 196,29 mm/min) con $S_y = 184,93$ MPa, $S_{max} = 654,70$ MPa y $S_r = 598,54$ MPa.
- Las medidas de dureza Vickerz de las juntas soldadas en la zona fundida superaron en todos los casos a los del metal base alcanzando los valores más altos en el cordón de soldadura llegando hasta 226,67 HV lo que representa un incremento de 22,83% respecto al valor de dureza del metal base.

- Al aumentar la intensidad de corriente tanto la dureza como los esfuerzos de fluencia, máximo y de ruptura disminuyen, mientras que con el incremento de la velocidad de pasada se consiguen los valores más altos, dejando en evidencia, a través de las gráficas y tablas comparativas, a la combinación de parámetros G (34,5 A; 196,29 mm/min), como la más resistente tanto a la tracción como a la deformación local. Esto se debe a la influencia del calor sobre el cordón de soldadura y la ZAC.
- En la microestructura de la ZAC se notó un aumento en el tamaño de grano, además de una limitada pero existente formación de carburo de cromo, en ambos casos causado por el calor aportado en el proceso de soldeo disminuyendo la dureza del material y por ende aumentando la ductilidad. Lo que explica la disminución del punto de fluencia.
- Los granos en la zona fundida tienen un tamaño mucho menor al de los del metal base, esto se debe a la contracción granular inducida por el enfriamiento rápido a causa de las altas temperaturas alcanzadas en la soldadura. Al igual que en la ZAC, hay presencia de carburos de cromo en los límites de grano y en algunos casos de ferrita columnar, esto se traduce en un aumento de la dureza del material, lo que respalda los resultados obtenidos en los ensayos de microcureza.

5.2 Recomendaciones

- Garantizar el afilado correcto del electrodo de tungsteno para un inicio de arco eléctrico estable y buen manejo de las corrientes bajas durante las pasadas.
- Familiarizar al estudiante con los procesos de soldeo automatizados en la práctica. Es recomendable la consolidación de los lazos universidad – industria que permitan al estudiante estar a tono con la realidad de la actualidad laboral.

Determinación de las variables influyentes en el proceso de soldadura orbital GTAW para tuberías de acero inoxidable AISI 304

- La utilización de equipos de ultrasonido para futuros trabajos y actividades de extensión.
- Contar con personal calificado para soldeo orbital GTAW, pues se dispone de equipos costosos y de complejo funcionamiento.
- Para efectos de otras tesis de grado o estudios de soldadura orbital puede determinarse la influencia de la separación de caras entre los segmentos tubulares sobre las propiedades mecánicas, la influencia de la variación del flujo de gas inerte, influencia de la variación de la composición química de los electrodos de tungsteno y la influencia de la distancia desde el electrodo de tungsteno hasta la pieza a soldar.
- Disponer de equipos de soldadura orbital GTAW, de soldadura GTAW manual, máquina de ensayos universales e instrumentos de medición con calibración actualizada.
- No utilizar otro tipo de equipos electrónicos cerca de las máquinas de soldar, pues son equipos de alta frecuencia y pueden alterar el funcionamiento de otros a su alrededor.

Referencias Bibliográficas

- [1] ANDERSON, David. SWEENEY, Dennis., WILLIAMS, Thomas, Estadística para administración y economía, Octava Edición, Publicado 4, 2005, Página 87-100, México D. F, México.

- [2] AICHELE, G., BAR, M. Orbital welding, Solutions for demanding welding tasks (part 1). Welding and Cutting, Volume 4, Issue 4, 2005, Pages 176-178

- [3] AICHELE, G., BAR, M. Soldadura Orbital welding, Solutions for demanding welding tasks (Part 2). Welding and Cutting, Volume 4, Issue 5, 2005, Pages 252-255

- [4] ARGENTA. Electrodo de tungsteno para proceso TIG. Documento en línea:
http://www.argenta.cl/html/productos/welding/electr_tung%20TH.php?p_categoria=0
3. Consulta: 2010, Mayo 20.

- [5] ARIEL H. Fundamentos de la soldadura. Documento en línea:
<http://hectorariel26.wordpress.com/2009/11/20/fundamentos-de-soldadura/>. Consulta: 2010, Mayo 20.

- [6] COCHRAN, WILLIAM. Técnicas de muestreo, Compañía Editorial Continental S. A, Volumen 1, Publicado 8, 1978, Pag 47-60, Mexico D.F, México

- [7] DUEROSOLDADURA. Fisuración de soldaduras. Documento en línea:
<http://www.duerosoldadura.es/tema4.php>. Consulta: 2010, Junio 3.

- [8] G. LOTHONGKUM, E. VIYANIT, P. BHANDHUBANYONG. Study on the effects of pulsed TIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate. Journal of Materials Processing Technology, Volume 110, Issue 2, 19 March 2001, Pages 233-238

- [9] GRUPOOGMAN. Tubería de acero inoxidable para las industrias alimentaria y farmacéuticas. Documento en línea: http://www.grupoogman.com/og_it_manual.html. Consulta: 2010, Junio 12.
- [10] HÄSCHEN, W. Orbital welding technique. VGB PowerTech, Volume 83, Issue 1-2, 2003, Pages 68-70. Kraftanlagen Nukleartechnik GmbH, Heidelberg, Germany
- [11] HENON, B.K. Orbital GTAW boosts production of leak-free tubing. Welding Journal (Miami, Fla), Volume 85, Issue 6, June 2006, Pages 56-58 Arc Machines, Inc., Pacoima, CA
- [12] HENON, B.K. Orbital welding produces consistent quality. Welding Design and Fabrication, Volume 75, Issue 5, May 2002, Pages 17-20 Arc Machines, Inc., Pacoima, CA, United States
- [13] HENON, B.K., BROND, A. Orbital welds leave smooth weld surfaces. Welding Design and Fabrication, Volume 75, Issue 10, October 2002, Pages 39-41
- [14] I. SATTARI-FAR, Y. JAVADI. Influence of welding sequence on welding distortions in pipes. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 85, Issue 4, April 2008, Pages 265-274
- [15] JÖRG NAUMANN, THORSTEN MICHLER. Hydrogen environment embrittlement of orbital welded austenitic stainless steels at -50 °C. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 34, Issue 15, August 2009, Pages 6478-6483
- [16] LYBIANCHALLENGE. Soldadura GTAW. Documento en línea: <http://www.libyanchallenge.com/news4/gtaw&page=3>. Consulta: 2010, Junio 15.
- [17] NOVACERO. Soldabilidad. Documento en línea: <http://www.novacero.com/ws/novacero/novacero.nsf/paginast/35C156C4B286AA9F8825715E0000FC7A?OpenDocument>. Consulta: 2010, Julio 1.
- [18] PHOTOMOWIWARE. Introducción a los métodos de soldadura. Documento en línea: <http://www.photomobiware.com/tech/technical35.php>. Consulta: 2010, Junio 22.

- [19] PUERTAS, Eddy. URBINA, Jesús. Bioestadística, Herramienta de la investigación, Universidad de Carabobo, Volumen 1, Pág 59, Valencia, Venezuela.

- [20] POLOSKOV, S.I., EROFEEV, V.A., MASLENNIKOV, A.V. The automatic orbital welding parameters determination based on computer modeling. Svarochnoe Proizvodstvo, Issue 10, 2005, Pages 6-13

- [21] PURNELL, S. Orbital welding developments. Welding and Cutting, Volume 56, Issue 3, 2004, Pages 150-152

- [22] S.A.A. AKBARI MOUSAVI, R. MIRE SMAEILI. Experimental and numerical analyses of residual stress distributions in TIG welding process for 304L stainless steel. Journal of Materials Processing Technology, Volume 208, Issues 1-3, 21 November 2008, Pages 383-394

Anexos

ANEXO 1



Designation: E 8M – 04

METRIC

Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]¹

This standard is issued under the fixed designation E 8M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the tension testing of metallic materials in any form at room temperature, specifically, the methods of determination of yield strength, yield point elongation, tensile strength, elongation, and reduction of area.

Note 1—These test methods are the metric companion of Test Methods E 8. Committee E-28 was granted an exception in 1997 by the Committee on Standards to maintain E8 and E8M as separate companion standards rather than combining standards as recommended by the Form and Style manual.

Note 2—These metric test methods are essentially the same as those in Test Methods E 8, and are compatible in technical content except that gage lengths are required to be 5D for most round specimens rather than 4D as specified in Test Methods E 8. Test specimens made from powder metallurgy (PM) materials are exempt from this requirement by industry-wide agreement to keep the processing of the material to a specific projected area and density.

Note 3—Exceptions to the provisions of these test methods may need to be made in individual specifications or test methods for a particular material. For examples, see Test Methods and Definitions A 370 and Test Methods B 557M.

Note 4—Room temperature shall be considered to be 10 to 38°C unless otherwise specified.

1.2 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.04 on Uniaxial Testing.

Current edition approved April 1, 2004. Published May 2004. Originally approved in 1984. Last previous edition approved in 2003 as E 8M – 03.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

A 156/A356M Specification for Steel Castings, Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel Heavy-Walled for Steam Turbines

A 370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products

B 557M Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products [Metric]

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing

E 8 Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

E 19 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers

E 145 Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading

3. Terminology

3.1 **Definitions**—The definitions of terms relating to tension testing appearing in Terminology E 6 shall be considered as applying to the terms used in these test methods of tension testing. Additional terms being defined are as follows:

3.1.1 **discontinuous yielding**—in a uniaxial test, a hesitation or fluctuation of force observed at the onset of plastic deformation, due to localized yielding. (The stress-strain curve need not appear to be discontinuous.)

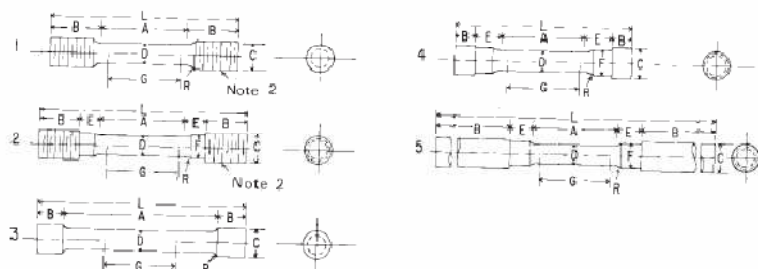
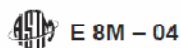
3.1.2 **lower yield strength, LYS [FL^{-2}]**—in a uniaxial test, the minimum stress recorded during discontinuous yielding, ignoring transient effects.

3.1.3 **upper yield strength, UYS [FL^{-2}]**—in a uniaxial test, the first stress maximum (stress at first zero slope) associated with discontinuous yielding.

3.1.4 **yield point elongation, YPE**—in a uniaxial test, the strain (expressed in percent) separating the stress-strain curve's first point of zero slope from the point of transition from

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

ANEXO 1 (CONTINUACIÓN)



Dimensions, mm					
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gage length	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1	62.5 ± 0.1
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2	12.5 ± 0.2
R—Radius of fillet, min	10	10	2	10	10
A—Length of reduced section	75, min	75, min	100, approximately	75, min	75, min
L—Overall length, approximate	145	155	140	255	255
B—Length of end section (Note 3)	35, approximately	25, approximately	20, approximately	15, approximately	75, min
C—Diameter of end section	20	20	20	22	20
E—Length of shoulder and fillet section, approximate	...	15	...	20	15
F—Diameter of shoulder	...	15	...	15	15

NOTE 1—The reduced section may have a gradual taper from the ends toward the center with the ends not more than 1 % larger in diameter than the center.

NOTE 2—On Specimens 1 and 2, any standard thread is permissible that provides for proper alignment and aids in assuring that the specimen will break within the reduced section.

NOTE 3—On Specimen 5 it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

FIG. 9 Various Types of Ends for Standard Round Tension Test Specimens

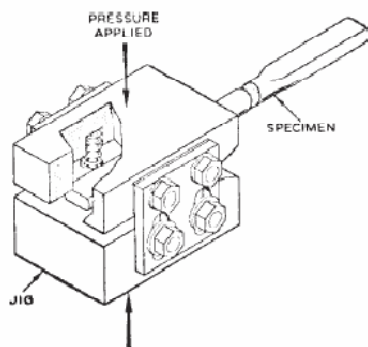


FIG. 10 Squeezing Jig for Flattening Ends of Full-Size Tension Test Specimens

6.7 *Specimens for Rectangular Bar*—In testing rectangular bar one of the following types of specimens shall be used:

6.7.1 *Full Cross Section*—It is permissible to reduce the width of the specimen throughout the test section with abrasive cloth or paper, or by machining sufficiently to facilitate fracture within the gage marks, but in no case shall the reduced width be less than 90 % of the original. The edges of the midlength of the reduced section not less than 20 mm in length shall be parallel to each other and to the longitudinal axis of the specimen within 0.05 mm. Fillets, preferably with a radius of 10 mm but not less than 3 mm, shall be used at the ends of the reduced sections.

6.7.2 Rectangular bars of thickness small enough to fit the grips of the testing machine but of too great width may be reduced in width by cutting to fit the grips, after which the cut surfaces shall be machined or cut and smoothed to ensure failure within the desired section. The reduced width shall be not less than the original bar thickness. Also, one of the types of specimens described in 6.2, 6.3, and 6.4 may be used.

6.8 *Shapes, Structural and Other*—In testing shapes other than those covered by the preceding sections, one of the types of specimens described in 6.2, 6.3, and 6.4 shall be used.

6.9 *Specimens for Pipe and Tube* (Note 11):

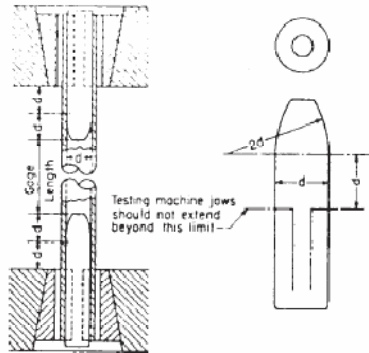
6.9.1 For all small tube (Note 11), particularly sizes 25 mm and under in nominal outside diameter, and frequently for larger sizes, except as limited by the testing equipment, it is standard practice to use tension test specimens of full-size tubular sections. Snug-fitting metal plugs shall be inserted far enough into the ends of such tubular specimens to permit the testing machine jaws to grip the specimens properly. The plugs shall not extend into that part of the specimen on which the elongation is measured. Elongation is measured over a length of 5D unless otherwise stated in the product specification. Fig. 11 shows a suitable form of plug, the location of the plugs in the specimen, and the location of the specimen in the grips of the testing machine.

NOTE 11—The term “tube” is used to indicate tubular products in general, and includes pipe, tube, and tubing.

6.9.2 For large-diameter tube that cannot be tested in full section, longitudinal tension test specimens shall be cut as

ANEXO 1 (CONTINUACIÓN)

 E 8M - 04



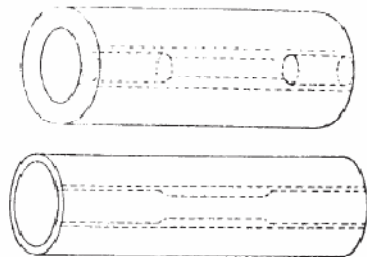
NOTE 1—The diameter of the plug shall have a slight taper from the line limiting the testing machine jaws to the curved section.

FIG. 11 Metal Plugs for Testing Tubular Specimens, Proper Location of Plugs in Specimen and of Specimen in Heads of Testing Machine

indicated in Fig. 12. Specimens from welded tube shall be located approximately 90° from the weld. If the tube-wall thickness is under 20 mm, either a specimen of the form and dimensions shown in Fig. 13 or one of the small-size specimens proportional to the standard 12.5-mm specimen, as mentioned in 6.4.2 and shown in Fig. 8, shall be used. Specimens of the type shown in Fig. 13 may be tested with grips having a surface contour corresponding to the curvature of the tube. When grips with curved faces are not available, the ends of the specimens may be flattened without heating. If the tube-wall thickness is 20 mm or over, the standard specimen shown in Fig. 8 shall be used.

NOTE 12—In clamping of specimens from pipe and tube (as may be done during machining) or in flattening specimen ends (for gripping), care must be taken so as not to subject the reduced section to any deformation or cold work, as this would alter the mechanical properties.

6.9.3 Transverse tension test specimens for tube may be taken from rings cut from the ends of the tube as shown in Fig. 14. Flattening of the specimen may be either after separating as in A, or before separating as in B. Transverse tension test specimens for large tube under 20 mm in wall thickness shall be either of the small-size specimens shown in Fig. 8 or of the



NOTE 1—The edges of the blank for the specimen shall be cut parallel to each other.

FIG. 12 Location from Which Longitudinal Tension Test Specimens Are to Be Cut from Large-Diameter Tube

form and dimensions shown for Specimen 2 in Fig. 13. When using the latter specimen, either or both surfaces of the specimen may be machined to secure a uniform thickness, provided not more than 15 % of the normal wall thickness is removed from each surface. For large tube 20 mm and over in wall thickness, the standard specimen shown in Fig. 8 shall be used for transverse tension tests. Specimens for transverse tension tests on large welded tube to determine the strength of welds shall be located perpendicular to the welded seams, with the welds at about the middle of their lengths.

6.10 *Specimens for Forgings*—For testing forgings, the largest round specimen described in 6.4 shall be used. If round specimens are not feasible, then the largest specimen described in 6.5 shall be used.

6.10.1 For forgings, specimens shall be taken as provided in the applicable product specifications, either from the predominant or thickest part of the forging from which a coupon can be obtained, or from a prolongation of the forging, or from separately forged coupons representative of the forging. When not otherwise specified, the axis of the specimen shall be parallel to the direction of grain flow.

6.11 *Specimens for Castings*—In testing castings either the standard specimen shown in Fig. 8 or the specimen shown in Fig. 15 shall be used unless otherwise provided in the product specifications.

6.11.1 Test coupons for castings shall be made as shown in Fig. 16 and Table 1.

6.12 *Specimen for Malleable Iron*—For testing malleable iron the test specimen shown in Fig. 17 shall be used, unless otherwise provided in the product specifications.

6.13 *Specimen for Die Castings*—For testing die castings the test specimen shown in Fig. 18 shall be used unless otherwise provided in the product specifications.

6.14 *Specimens for Powder Metallurgy (P/M) Materials*—For testing powder metallurgy (P/M) materials the test specimens shown in Fig. 19 and Fig. 20 shall be used, unless otherwise provided in the product specifications. When making test specimens in accordance with Fig. 19, shallow transverse grooves, or ridges, may be pressed in the ends to allow gripping by jaws machined to fit the grooves or ridges. Because of shape and other factors, the flat unmachined tensile test specimen (Fig. 19) in the heat-treated condition will have an ultimate tensile strength of 50 % to 85 % of that determined in a machined round tensile test specimen (Fig. 20) of like composition and processing.

7. Procedures

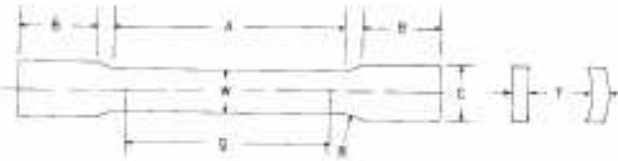
7.1 *Preparation of the Test Machine*—Upon startup or following a prolonged period of machine inactivity, the test machine should be exercised or warmed up to normal operating temperatures to minimize errors that may result from transient conditions.

7.2 *Measurement of Dimensions of Test Specimens:*

7.2.1 To determine the cross-sectional area of a test specimen, measure the dimensions of the cross section at the center of the reduced section. For referee testing of specimens under 5 mm in their least dimension, measure the dimensions where the least cross-sectional area is found. Measure and record the cross-sectional dimensions of tension test specimens 5 mm and

ANEXO 1 (CONTINUACIÓN)

ASME E 8M - 04



Nominal Width	Dimensions, mm						
	Specimen 1 12.5	Specimen 2 40	Specimen 3 40	Specimen 4 20	Specimen 5 20	Specimen 6 25	Specimen 7 25
D—Gage length	50.0 ± 0.1	50.0 ± 0.1	200.0 ± 0.2	50.0 ± 0.1	100.0 ± 0.1	50.0 ± 0.1	100.0 ± 0.1
W—Width (Note 1)	12.5 ± 0.2	40.0 ± 2.0	40.0 ± 2.0	20.0 ± 0.7	20.0 ± 0.7	25.0 ± 1.5	25.0 ± 1.5
T—Thickness	measured thickness of specimen						
R—Radius of fillet, min	12.5	25	25	25	25	25	25
A—Length of reduced section, min	80	60	200	80	120	80	120
B—Length of grip section, min (Note 2)	75	75	75	75	75	75	75
C—Width of grip section, approximate (Note 3)	20	50	50	25	25	40	40

Note 1—The ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.1 mm for specimens 1–7. There may be a gradual taper in width from the ends to the center, but the width at each end shall be not more than 1 % greater than the width at the center.

Note 2—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two third or more of the length of the grips.

Note 3—The ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 1.0 mm for specimens 1, 4, and 5 and 2.5 mm for specimens 2, 3, 6, and 7.

Note 4—For circular segments, the cross-sectional area may be calculated by multiplying W and T. If the ratio of the dimension W to the diameter of the tubular section is larger than about 1/4, the error in using this method to calculate cross-sectional area may be appreciable. In this case, the exact equation (see 7.2.2) must be used to determine the area.

Note 5—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 1.25 mm, and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 2.5 mm.

Note 6—Specimens with sides parallel throughout their length are permissable, except for reference testing and where prohibited by product specification, provided (a) the above tolerances are used, (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation, and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than 2W from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. If the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

FIG. 13 Tension Test Specimens for Large-Diameter Tubular Products

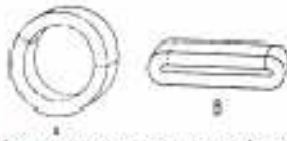


FIG. 14 Location of Transverse Tension Test Specimen in Ring Cut from Tubular Products

over to the nearest 0.02 mm, the cross-sectional dimensions less than 1 mm and not less than 2.5 mm to the nearest 0.01 mm; the cross-sectional dimensions less than 2.5 mm and not less than 0.50 mm to the nearest 0.002 mm; and when practical, the cross-sectional dimensions less than 0.50 mm to at least the nearest 1 % but in all cases to at least the nearest 0.002 mm.

Note 13—Accurate and precise measurement of specimen dimensions can be one of the most critical aspects of tension testing, depending on specimen geometry. See Appendix X2 for additional information.

Note 14—Rough surfaces due to the manufacturing process such as hot rolling, metallic coating, etc., may lead to inaccuracy of the computed area greater than the measured dimensions would indicate. Therefore, cross-sectional dimensions of tension test specimens with rough surfaces due to processing may be measured and recorded to the nearest 0.02 mm.

Note 15—See X2.9 for cautionary information on measurements taken from coated metal products.

7.2.2 Determine the cross-sectional area of a full-size test specimen of uniform but nonsymmetrical cross section by

determining the mass of a length not less than 20 times longer than the largest cross-sectional dimension.

7.2.2.1 Determine the weight to the nearest 0.5 % or less.

7.2.2.2 The cross-sectional area is equal to the mass of the specimen divided by the length and divided by the density of the material.

7.2.3 When using specimen of the type shown in Fig. 13 taken from tubes the cross-sectional area shall be determined as follows:

If $D/W \leq 6$:

$$A = \{ [W/4 \times (D^2 - W^2)^{1/2}] + [(D^2/4) \times \arcsin(W/D)] - [W/4 \times (D - 2T)^2 - W^2)^{1/2}] - [(D - 2T)^2 \times \arcsin(W(D - 2T))] \} \quad (1)$$

where:

A = exact cross-sectional area, mm²,
W = width of the specimen in the reduced section, mm,
D = measured outside diameter of the tube, mm, and
T = measured wall thickness of the specimen, mm.

arcsin values to be in radians

If $D/W > 6$, the exact equation or the following equation may be used:

$$A = W \times T \quad (2)$$

ANEXO 2



Designation: E 407 – 99

Standard Practice for Microetching Metals and Alloys¹

This standard is issued under the fixed designation E 407; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reaffirmation. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reaffirmation.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This practice covers chemical solutions and procedures to be used in etching metals and alloys for microscopic examination. Safety precautions and miscellaneous information are also included.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. For specific cautionary statements, see 6.1 and Table 2.*

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards:*
 - D 1193 Specification for Reagent Water²
 - E 7 Terminology Relating to Metallography³

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definition of terms used in this standard, see Terminology E 7.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *tin etch*—an immersion etchant that produces color contrast, often selective to a particular constituent in the microstructure, due to a thin oxide, sulfide, molybdate, chromate or elemental selenium film on the polished surface that reveals the structure due to variations in light interference effects as a function of the film thickness (also called a “stain etch”).

3.2.2 *vapor-deposition interference layer method*—a technique for producing enhanced contrast between microstructural constituents, usually in color by thin films formed by vacuum deposition of a dielectric compound (such as ZnTe, ZnSe, TiO₂, ZnS or ZnO) with a known index of refraction, generally due to light interference effects (also known as the “Pepperhoff method”).

4. Summary of Practice

4.1 Table 1 is an alphabetical listing of the metals (including rare earths) and their alloys for which etching information is available. For each metal and alloy, one or more etchant numbers and their corresponding use is indicated. Alloys are listed as a group or series when one or more etchants are common to the group or series. Specific alloys are listed only when necessary. When more than one etchant number is given for a particular use, they are usually given in order of preference. The numbers of electrolytic etchants are italicized to differentiate them from nonelectrolytic etchants.

4.2 Table 2 is a numerical listing of all the etchants referenced in Table 1 and includes the composition and general procedure to be followed for each etchant.

4.3 To use the tables, look up the metal or alloy of interest in Table 1 and note the etchant numbers corresponding to the results desired. The etchant composition and procedure is then located in Table 2 corresponding to the etchant number.

4.4 If the common name of an etchant is known (Marble's, Vilella's, etc.), and it is desired to know the composition, Table 3 contains an alphabetical listing of etchant names, each coded with a number corresponding to the etchant composition given in Table 2.

5. Significance and Use

5.1 This practice lists recommended methods and solutions for the etching of specimens for metallographic examination. Solutions are listed to highlight phases present in most major alloy systems.

6. Safety Precautions

6.1 Before using or mixing any chemicals, all product labels and pertinent Material Safety Data Sheets (MSDS) should be read and understood concerning all of the hazards and safety precautions to be observed. Users should be aware of the type of hazards involved in the use of all chemicals used, including those hazards that are immediate, long-term, visible, invisible, and with or without odors.

6.1.1 Consult the product labels and MSDSs for recommendations concerning proper protective clothing.

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee B-4 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee B4.01 on Sampling, Specimen Preparation, and Photography.

Current edition approved October 10, 1999. Published November 1999.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol. 11.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01.

ANEXO 2 (CONTINUACIÓN)



E 407 – 99

TABLE 2 Numerical List of Etchants

Etchant	Composition	Procedure
1	1 mL HF 200 mL water	(a) Swab with cotton for 15 s. (b) Alternately immerse and polish several minutes. (c) Immerse 3–5 s. (d) Immerse 10–120 s.
2	3 mL HF 100 mL water	(a) Swab 10 s to reveal general structure. (b) Immerse 15 min, wash 10 min in water to form film with hatching which varies with grain orientation.
3	2 mL HF 3 mL HCl 5 mL HNO ₃ 190 mL water	(a) Immerse 10–20 s Wash in stream of warm water. Reveals general structure. (b) Dilute with 4 parts water-colors constituents—mix fresh.
4	24 mL H ₃ PO ₄ 50 mL Carbitol (diethylene glycol monoethyl ether) 4 g boric acid 2 g oxalic acid 10 mL HF 32 mL water	Electrolytic: Use carbon cathode raising d-c voltage from 0–30 V in 30 s. Total etching time 3 min with agitation. Wash and cool. Repeat if necessary.
5	5 g HBF ₄ 200 mL water	Electrolytic: Use Al, Pb, or stainless steel cathode. Anodize 1–3 min, 20–45 V d-c. At 30 V, etch for 1 min.
6	25 mL HNO ₃ 75 mL water	Immerse 40 s at 70°C (160°F). Rinse in cold water.
7	10–20 mL H ₂ SO ₄ 80 mL water	Immerse 30 s at 70°C (160°F). Rinse in cold water.
8	10 mL H ₃ PO ₄ 90 mL water	(a) Immerse 1–3 min at 50°C (120°F). (b) Electrolytic at 1–8 V for 5–10 s.
9	3–4 g sulfamic acid 5 drops HF 100 mL water	Use just prior to the last polishing operation. It is not intended as a final etchant. The specimen is examined as polished under polarized light.
10	10 mL HF 90 mL methanol (90 %)	Immerse 10–30 s.
11	2 mL HF 100 mL water	Immerse or swab few seconds to a minute.
12	20 mL HNO ₃ 60 mL HCl	Use hood. Do not store. Immerse or swab 5–60 s.
13	10 g oxalic acid 100 mL water	Electrolytic at 6 V: (a) 10–15 s. (b) 1 min. (c) 2–3 s. Use stainless steel cathode and platinum or Nichrome connection to specimen.
14	10 mL HNO ₃ 90 mL methanol (95 %)	Immerse few seconds to a minute.
15	15 mL HNO ₃ 15 mL acetic acid 60 mL HCl 15 mL water	Age before use. Immerse 5–30 s. May be used electrolytically.
16	5–10 mL HCl 100 mL water	Electrolytic at 3 V for 2–10 s.
17	5 mL HCl 10 g FeCl ₃ 100 mL water	Electrolytic at 6 V for few seconds.
18	2–10 g CrO ₃ 100 mL water	Electrolytic at 3 V for 2–10 s.

ANEXO 3



Designation: E 384 – 05a

Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials¹

This standard is issued under the fixed designation E 384; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of the microindentation hardness of materials, the verification of microindentation hardness testing machines, and the calibration of standardized test blocks.

1.2 This test method covers microindentation tests made with Knoop and Vickers indenters under test forces in the range from 9.8×10^{-3} to 9.8 N (1 to 1000 gf).

1.3 This test method includes an analysis of the possible sources of errors that can occur during microindentation testing and how these factors affect the accuracy, repeatability, and reproducibility of test results.

Note 1—While Committee E04 is primarily concerned with metals, the test procedures described are applicable to other materials.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

C 1326 Test Method for Knoop Indentation Hardness of Advanced Ceramics

C 1327 Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics

E 3 Methods of Preparation of Metallographic Specimens

E 7 Terminology Relating to Metallography

E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate the Average Quality for a Lot or Process

E 140 Test Method for Hardness Conversion Tables for Metals

E 175 Terminology of Microscopy

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

E 766 Practice for Calibrating the Magnification of a Scanning Electron Microscope

3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this test method, see Terminology E 7.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *calibrating, v*—determining the values of the significant parameters by comparison with values indicated by a reference instrument or by a set of reference standards.

3.2.2 *Knoop hardness number, HK, n*—an expression of hardness obtained by dividing the force applied to the Knoop indenter by the projected area of the permanent impression made by the indenter.

3.2.3 *Knoop indenter, n*—a rhombic-based pyramidal-shaped diamond indenter with edge angles of $\angle A = 172^\circ 30'$ and $\angle B = 130^\circ 0'$ (see Fig. 1).

3.2.4 *microindentation hardness test, n*—a hardness test using a calibrated machine to force a diamond indenter of specific geometry into the surface of the material being evaluated, in which the test forces range from 1 to 1000 gf (9.8×10^{-3} to 9.8 N), and the indentation diagonal, or diagonals are measured with a light microscope after load removal; for any microindentation hardness test, it is assumed that the indentation does not undergo elastic recovery after force removal.

Note 2—Use of the term microhardness should be avoided because it implies that the hardness, rather than the force or the indentation size, is very low.

3.2.5 *verifying, v*—checking or testing the instrument to assure conformance with the specification.

3.2.6 *Vickers hardness number, HV, n*—an expression of hardness obtained by dividing the force applied to a Vickers indenter by the surface area of the permanent impression made by the indenter.

3.2.7 *Vickers indenter, n*—a square-based pyramidal-shaped diamond indenter with face angles of 136° (see Fig. 2).

3.3 *Formulae*—The formulae presented in 3.3.1–3.3.4 for calculating microindentation hardness are based upon an ideal tester. The measured value of the microindentation hardness of a material is subjected to several sources of errors. Based on Eq

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E04 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee E04.05 on Microhardness.

Current edition approved August 15, 2005. Published September 2005. Originally approved in 1969. Last previous edition approved in 2005 as E 384 – 05.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

ANEXO 3 (CONTINUACIÓN)

 E 384 - 05a

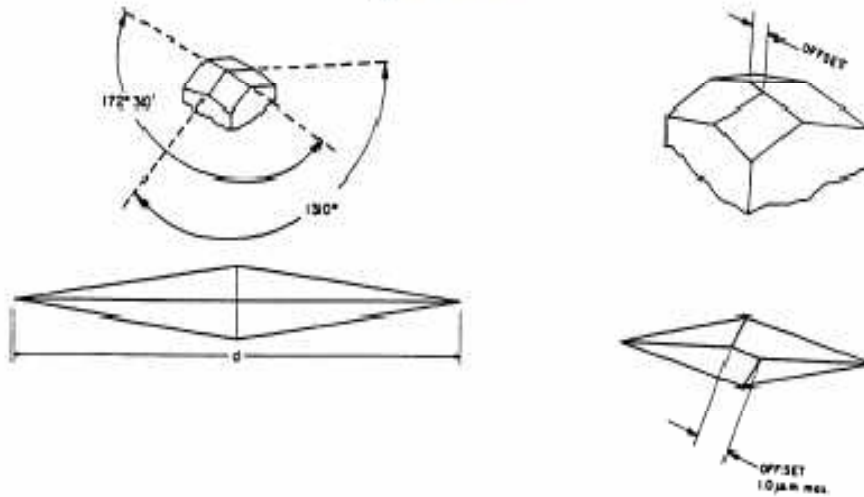


FIG. 1 Knoop Indenter

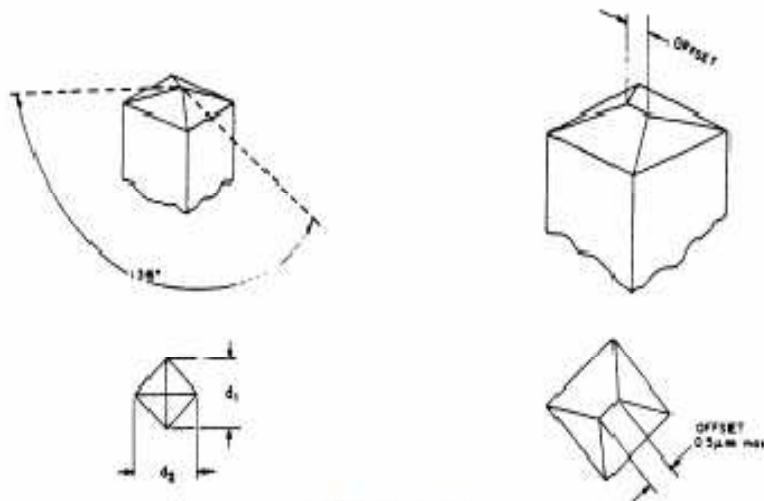


FIG. 2 Vickers Indenter

1.9, variations in the applied force, geometrical variations between diamond indenters, and human errors in measuring indentation lengths can affect the calculated material hardness. The amount of error each of these parameters has on the calculated value of a microindentation measurement is discussed in Section 10.

3.3.1 For Knoop hardness tests, in practice, test loads are in grams-force and indentation diagonals are in micrometers. The Knoop hardness number is calculated using the following:

$$HK = 1.000 \times 10^3 \times (PA_d) = 1.000 \times 10^5 \times PK \epsilon_f \times d^2 \quad (1)$$

or

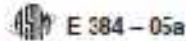
$$HK = 14229 \times Pd^2 \quad (2)$$

$$\epsilon_f = \frac{\ln \left(\frac{\angle B}{2} \right)}{2 \tan \left(\frac{\angle A}{2} \right)} \quad (3)$$

where:

- P = force, gf,
- d = length of long diagonal, μm ,
- A_p = projected area of indentation, μm^2 ,
- $\angle A$ = included longitudinal edge angle, $172^\circ 30'$,

ANEXO 3 (CONTINUACIÓN)



- $\angle B$ = included transverse edge angle, 130° *O'* (see Fig. 1), and
 c_p = indenter constant relating projected area of the indentation to the square of the length of the long diagonal, ideally 0.07128.

Note 3—HK values for a 1-gf (9.8×10^{-3} N) test are contained in **Appendix X6**. To obtain HK values when other test forces are employed, multiply the HK value from **Table X6.1** for the d value by the actual test force, g .

3.3.2 The Knoop hardness, kgf/mm^2 is determined as follows:

$$\text{HK} = 14.229 \times P_1/d_1^2 \quad (4)$$

where:

- P_1 = force, kgf, and
 d_1 = length of long diagonal, mm.

3.3.3 The Knoop hardness reported with units of CPa is determined as follows:

$$\text{HK} = 0.014229 \times P_2/d_2^2 \quad (5)$$

where:

- P_2 = force, N, and
 d_2 = length of the long diagonal of the indentation, mm.

3.3.4 For the Vickers hardness test, in practice, test loads are in grams-force and indentation diagonals are in micrometres. The Vickers hardness number is calculated as follows:

$$\text{HV} = 1.000 \times 10^3 \times P/A_d = 1.000 \times 10^3 \times P \sin(a/2)/d^2 \quad (6)$$

or

$$\text{HV} = 18544 \times P/d^2 \quad (7)$$

where:

- P = force, gf,
 A_d = surface area of the indentation, μm^2 ,
 d = mean diagonal length of the indentation μm , and
 a = face angle of the indenter, 136° *O'* (see Fig. 2).

Note 4—HV numbers for a 1-gf (9.8×10^{-3} N) test load are contained in **Appendix X6**. To obtain HV values when other test forces are employed, multiply the HV value from **Table X6.2** for the d value by the actual test force, g .

3.3.5 The Vickers hardness, kgf/mm^2 is determined as follows:

$$\text{HV} = 1.8544 \times P_1/d_1^2 \quad (8)$$

where:

- P_1 = force, kgf, and
 d_1 = length of long diagonal, mm.

3.3.6 The Vickers hardness reported with units of CPa is determined as follows:

$$\text{HV} = 0.0018544 \times P_2/d_2^2 \quad (9)$$

where:

- P_2 = force, N, and
 d_2 = length of the long diagonal of the indentation, mm.

4. Summary of Test Method

4.1 In this test method, a hardness number is determined based on the formation of a very small indentation by appli-

cation of a relatively low force, in comparison to ordinary indentation hardness tests.

4.2 A Knoop or Vickers indenter, made from diamond of specific geometry is pressed into the test specimen surface under an applied force in the range of 1 to 1000 gf using a test machine specifically designed for such work.

4.3 The size of the indentation is measured using a light microscope equipped with a filar type eyepiece, or other type of measuring device (see Terminology **ii 17.9**).

4.4 The Knoop hardness number is based upon the force divided by the projected area of the indentation. The Vickers hardness number is based upon the force divided by the surface area of the indentation.

4.5 It is assumed that elastic recovery does not occur when the indenter is removed after the loading cycle, that is, it is assumed that the indentation retains the shape of the indenter after the force is removed. In Knoop testing, it is assumed that the ratio of the long diagonal to the short diagonal of the impression is the same (see 7.1.4) as for the indenter.

5. Significance and Use

5.1 Hardness tests have been found to be very useful for materials evaluation, quality control of manufacturing processes and research and development efforts. Hardness, although empirical in nature, can be correlated to tensile strength for many metals, and is an indicator of wear resistance and ductility.

5.2 Microindentation tests extend hardness testing to materials too thin or too small for macroindentation tests. Microindentation tests allow specific phases or constituents and regions or gradients too small for macroindentation testing to be evaluated.

5.3 Because the microindentation hardness will reveal hardness variations that may exist within a material, a single test value may not be representative of the bulk hardness.

6. Apparatus

6.1 Test Machine—The test machine must support the test specimen and control the movement of the indenter into the specimen under a preselected test force, and should have a light optical microscope to select the desired test location and to measure the size of the indentation produced by the test. The plane of the surface of the test specimen must be perpendicular to the axis of the indenter and the direction of the force application. The plane of the test surface of test specimen must be level in order to obtain usable information.

6.1.1 Force Application—The test machine shall be capable of applying the following forces.

6.1.1.1 The time from the initial application of the force until the full test force is reached shall not exceed 10 s.

6.1.1.2 The indenter shall contact the specimen at a velocity between 15 and 70 $\mu\text{m/s}$.

6.1.1.3 The full test force shall be applied for 10 to 15 s unless otherwise specified.

6.1.1.4 For some applications it may be necessary to apply the test force for longer times. In these instances the tolerance for the time of the applied force is ± 2 s.

6.1.2 Vibration Control—During the entire test cycle, the test machine should be protected from shock or vibration. To

ANEXO 3 (CONTINUACIÓN)

E 384 - 05a

minimize vibrations, the operator should avoid contacting the machine in any manner during the entire test cycle.

6.2 Vickers Indenter.—The Vickers indenter usually produces a geometrically similar indentation at all test forces. Except for tests at very low forces that produce indentations with diagonals smaller than about 25 μm , the hardness number will be essentially the same as produced by Vickers machines with test forces greater than 1 kgf, as long as the material being tested is reasonably homogeneous. For isotropic materials, the two diagonals of a Vickers indentation are equal in size.

6.2.1 The ideal Vickers indenter is a highly polished, pointed, square-based pyramidal diamond with face angles of $136^\circ 0'$. The effect that geometrical variations of these angles have on the measured values of Vickers hardness are discussed in Section 10.

6.2.2 The four faces of the Vickers indenter shall be equally inclined to the axis of the indenter (within $\pm 30'$) and shall meet at a sharp point. The line of junction between opposite faces (offset) shall be not more than 0.5 μm in length as shown in Fig. 2.

6.3 Knoop Indenter.—The Knoop indenter does not produce a geometrically similar indentation as a function of test force. Consequently, the Knoop hardness will vary with test force. Due to its rhombic shape, the indentation depth is shallower for a Knoop indentation compared to a Vickers indentation under identical test conditions. The two diagonals of a Knoop indentation are markedly different. Ideally, the long diagonal is 7.114 times longer than the short diagonal, but this ratio is influenced by elastic recovery. Thus, the Knoop indenter is very useful for evaluating hardness gradients or thin coatings.

6.3.1 The Knoop indenter is a highly polished, pointed, rhombic-based, pyramidal diamond. The ideal included longitudinal edge angles are $172^\circ 30'$ and $136^\circ 0'$. The ideal indenter constant, c_K , is 0.07028. The effect that geometrical variations of these angles have on the measured values of Knoop hardness are discussed in Section 10.

6.3.2 The four faces of the Knoop indenter shall be equally inclined to the axis of the indenter (within $\pm 30'$) and shall meet at a sharp point. The line of junction between opposite faces (offset) shall be not more than 1.0 μm in length for indentations greater than 20 μm in length, as shown in Fig. 1. For shorter indentations the offset should be proportionately less.

6.3.3 Indenters should be examined periodically and replaced if they become worn, dulled, chipped, cracked or separated from the mounting material.

6.4 Measuring Equipment.—The test machine's measuring device should report the diagonal lengths in 0.1 μm increments for indentations with diagonals from 1 to 200 μm .

NOTE 2.—This is the reported length and not the resolution of the system used for performing the measurements. As an example, if a length of 200 μm corresponds to 300 filar units or pixels, the corresponding calibration constant would be $200/300 = 0.66666667$. This value would be used to compute diagonal lengths, but the reported length would only be reported to the nearest 0.1 μm .

6.4.1 The optical portion of the measuring device should have Köhler illumination (see Appendix A1).

6.4.2 To obtain maximum resolution, the measuring microscope should have adjustable illumination intensity, adjustable alignment and aperture and field diaphragms.

6.4.3 Magnifications should be provided so that the diagonal can be enlarged to greater than 25 % but less than 75 % of the field width.

7. Test Specimen

7.1 For optimum accuracy of measurement, the test should be performed on a flat specimen with a polished or otherwise suitably prepared surface. The surface must be free of any defects that could affect the indentation or the subsequent measurement of the diagonals. Conducting tests on non-planar surfaces is not recommended. Results will be affected even in the case of the Knoop test where the radius of curvature is in the direction of the short diagonal.

7.1.1 In all tests, the indentation perimeter, and the indentation tips in particular, must be clearly defined in the microscope field of view.

7.1.2 The specimen surface should not be etched before making an indentation. Etched surfaces can obscure the edge of the indentation, making an accurate measurement of the size of the indentation difficult. However, when determining the microindentation hardness of an isolated phase or constituent, a light etch can be used to delineate the object of interest. The quality of the required surface finish can vary with the forces and magnifications used in microindentation hardness testing. The lighter the force and the smaller the indentation size, the more critical is the surface preparation. Some materials are more sensitive to preparation-induced damage than others.

7.1.3 Due to the small size of the indentations, special precautions must be taken during specimen preparation. It is well known that improper polishing can alter test results. Specimen preparation must remove any damage introduced during these steps, either due to excessive heating or cold work, for example.

7.1.4 Specimen preparation should be performed in accordance with Methods B3.

7.2 In some instances, it is necessary to mount the specimen for convenience in preparation. When mounting is required, the specimen must be adequately supported by the mounting medium so that the specimen does not move during force application, that is, avoid the use of polymeric mounting compounds that creep under the indenter force.

8. Procedure

8.1 Turn on the illumination system and power for the tester.

8.2 Select the desired indenter. Refer to the manufacturer's instruction manual if it is necessary to change indenters. Occasionally clean the indenter with a cotton swab and alcohol. Avoid creating static charges during cleaning.

8.3 Place the specimen on the stage or in the stage clamps, so that the specimen surface is perpendicular to the indenter axis.

8.4 Focus the measuring microscope with a low power objective so that the specimen surface can be observed.

8.5 Adjust the light intensity and adjust the apertures for optimum resolution and contrast.

ANEXO 3 (CONTINUACIÓN)

E 384 – 05a

8.6 Select the area desired for hardness determination. Before applying the force, make a final focus using the measuring objective or the highest magnification objective available.

8.7 Adjust the tester so that the indenter is in the proper place for force application. Select the desired force.

8.8 Activate the tester so that the indenter is automatically lowered and makes contact with the specimen for the normally required time period. Then, remove the force either manually or automatically.

8.9 After the force is removed, switch to the measuring mode, and select the proper objective lens. Focus the image, adjust the light intensity if necessary, and adjust the apertures for maximum resolution and contrast.

8.10 Examine the indentation for its position relative to the desired location and for its symmetry.

8.10.1 If the indentation did not occur at the desired spot, the tester is out of alignment. Consult the manufacturer's instruction manual for the proper procedure to produce alignment. Make another indentation and recheck the indentation location. Readjust and repeat as necessary.

8.10.2 For a Knoop indentation, if one half of the long diagonal is greater than 10 % longer than the other, or if both ends of the indentation are not in sharp focus, the test specimen surface may not be perpendicular to the indenter axis. Check the specimen alignment and make another test.

8.10.3 For a Vickers indentation, if one half of either diagonal is more than 5 % longer than the other half of that diagonal, or if the four corners of the indentation are not in sharp focus, the test surface may not be perpendicular to the indenter axis. Check the specimen alignment and make another test.

8.10.4 If the diagonal legs are unequal as described in 8.10.2 or 8.10.3, rotate the specimen 90° and make another indentation in an untested region. If the nonsymmetrical aspect of the indentations has rotated 90°, then the specimen surface is not

perpendicular to the indenter axis. If the nonsymmetrical nature of the indentation remains in the same orientation, check the indenter for misalignment or damage.

8.10.5 Some materials may have nonsymmetrical indentations even if the indenter and the specimen surface are perfectly aligned. Tests on single crystals or on textured materials may produce such results. When this occurs, check the alignment using a test specimen, such as a standard, known to produce uniformly shaped indentations.

8.10.6 Brittle materials such as ceramics may crack as a result of being indented. Specific details for testing ceramics are contained in Test Methods C 1326 and C 1327.

8.11 Measure the long diagonal of a Knoop indentation, or both diagonals of a Vickers indentation, in accordance with the manufacturer's instruction manual.

8.11.1 Determine the length of the long diagonal of a Knoop indentation or both diagonals of a Vickers indentation to within 0.1 μm (see 6.3). For the Vickers indentations, average the two diagonal length measurements.

8.12 Compute the Knoop or Vickers hardness number using the appropriate equation in Section 3 or Table X6.1 or Table X6.2, respectively. Table X6.1 and Table X6.2 show the Knoop or Vickers hardness for indentations with diagonal lengths from 1 to 200.9 μm using 1 gf. If the force was not 1 gf, multiply the value from Table X6.1 or Table X6.2 by the actual gram-force value to obtain the correct hardness number.

8.13 *Spacing of Indentations*—Generally more than one indentation is made on a test specimen. It is necessary to ensure that the spacing between indentations is large enough so that adjacent tests do not interfere with each other.

8.13.1 For most testing purposes, the minimum recommended spacing between separate tests, and minimum distance between an indentation and the surface of the specimen are illustrated in Fig. 3.

8.13.2 For some applications, closer spacing of indentations than those shown in Fig. 3 may be desired. If closer indentation

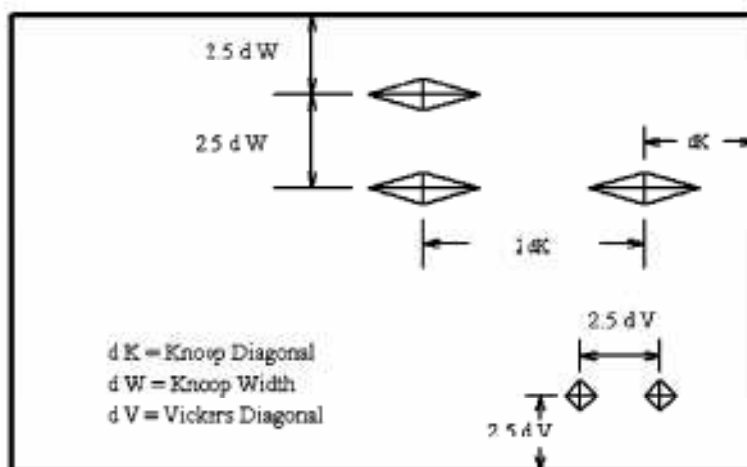


FIG. 3 Minimum Recommended Spacing for Knoop and Vickers Indentations



Designation: E 3 – 01

Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation E 3; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 The primary objective of metallographic examinations is to reveal the constituents and structure of metals and their alloys by means of a light optical or scanning electron microscope. In special cases, the objective of the examination may require the development of less detail than in other cases but, under nearly all conditions, the proper selection and preparation of the specimen is of major importance. Because of the diversity in available equipment and the wide variety of problems encountered, the following text presents for the guidance of the metallographer only those practices which experience has shown are generally satisfactory; it cannot and does not describe the variations in technique required to solve individual specimen preparation problems.

*Note 1—For a more extensive description of various metallographic techniques, refer to Samuels, L. E., *Metallographic Polishing by Mechanical Methods*, American Society for Metals (ASM) Metals Park, OH, 3rd Ed., 1982; Petzow, G., *Metallographic Etching*, ASM, 1978; and Vanderhiser, G., *Metallography: Principles and Practice*, McGraw Hill, NY, 2nd Ed., 1999.*

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- A 90/A 90M Standard Test Method for Weight (Mass) of Coating on Iron and Steel with Zinc or Zinc-Alloy Coatings
- E 7 Terminology Relating to Metallography²
- E 45 Practice for Determining the Inclusion Content of Steel²
- E 340 Test Method for Macroetching Metals and Alloys²
- E 407 Test Methods for Microetching Metals and Alloys²
- E 768 Practice for Preparing and Evaluating Specimens for Automatic Inclusion Assessment of Steel²

- E 1077 Test Method for Estimating the Depth of Decarburization of Steel Specimens²
- E 1122 Practice for Obtaining JK Inclusion Ratings Using Automatic Image Analysis²
- E 1245 Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis²
- E 1268 Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures²
- E 1558 Guide to Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens²
- E 1920 Guide for Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings²

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definitions used in this practice, refer to Terminology E 7.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *castable mount*—a metallographic mount generally made from a two component castable plastic. One component is the resin and the other hardener. Both components can be liquid or one liquid and a powder. Castable mounts generally do not require heat and pressure to cure.

3.2.2 *compression mount*—a metallographic mount made using plastic that requires both heat and pressure for curing.

3.2.3 *planar grinding*—is the first grinding step in a preparation procedure used to bring all specimens into the same plane of polish. It is unique to semi or fully automatic preparation equipment that utilize specimen holders.

3.2.4 *rigid grinding disc*—a non-fabric support surface, such as a composite of metal/ceramic or metal/polymer charged with an abrasive (usually 6 to 15 μ m diamond particles), and used as the fine grinding operation in a metallographic preparation procedure.

4. Significance and Use

4.1 Microstructures have a strong influence on the properties and successful application of metals and alloys. Determination and control of microstructure requires the use of metallographic examination.

4.2 Many specifications contain a requirement regarding microstructure; hence, a major use for metallographic examination is inspection to ensure that the requirement is met. Other

¹ This guide is under the jurisdiction of ASTM Committee E04 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee E04.01 on Sampling, Specimen Preparation, and Photography.

Current edition approved April 10, 2001. Published July 2001. Originally published as E 3 – 21 T. Last previous edition E 3 – 95.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01.

ANEXO 5

MK Products, CobraTig-150 with SmartARC and MicroTIG technology

Program **NOT SAVED**. User defined parameters are:

TUBE O.D.: 1 1/2 inches
THICKNESS: .058 inches
PULSE TYPE: LOW PULSE
START DELAY: 1 Sec.
REVOLUTIONS: 1
TACKS: 2

Weld program parameters are: **(changes not saved)**

PRE-PURGE: 30 Sec. TACK time: 1.0 Sec.
POST-PURGE: 15 Sec. TACK Current: 46.3 Amps
STRIKE current: 39.0 Amps TACK scale: 0%
AMPS/RPM: SLOPING

Level Number	Ends at	Pulse		Current		Motor RPM	Scales		
		High	Low	High	Low		P	C	M
Upslope	10°	0.14	0.14	58.0	19.3	1.06	0%	0%	0%
1	55°	0.14	0.14	58.0	19.3	1.06	0%	0%	0%
2	100°	0.14	0.14	57.8	19.2	1.06	0%	0%	0%
3	145°	0.14	0.14	57.7	19.2	1.06	0%	0%	0%
4	190°	0.14	0.14	57.5	19.2	1.06	0%	0%	0%
5	235°	0.14	0.14	57.3	19.0	1.06	0%	0%	0%
6	280°	0.14	0.14	57.2	19.0	1.06	0%	0%	0%
7	325°	0.14	0.14	57.0	19.0	1.06	0%	0%	0%
8	20°	0.14	0.14	56.8	18.8	1.06	0%	0%	0%
Final	110°	0.07	0.07	0.0	0.0	1.59	0%	0%	0%

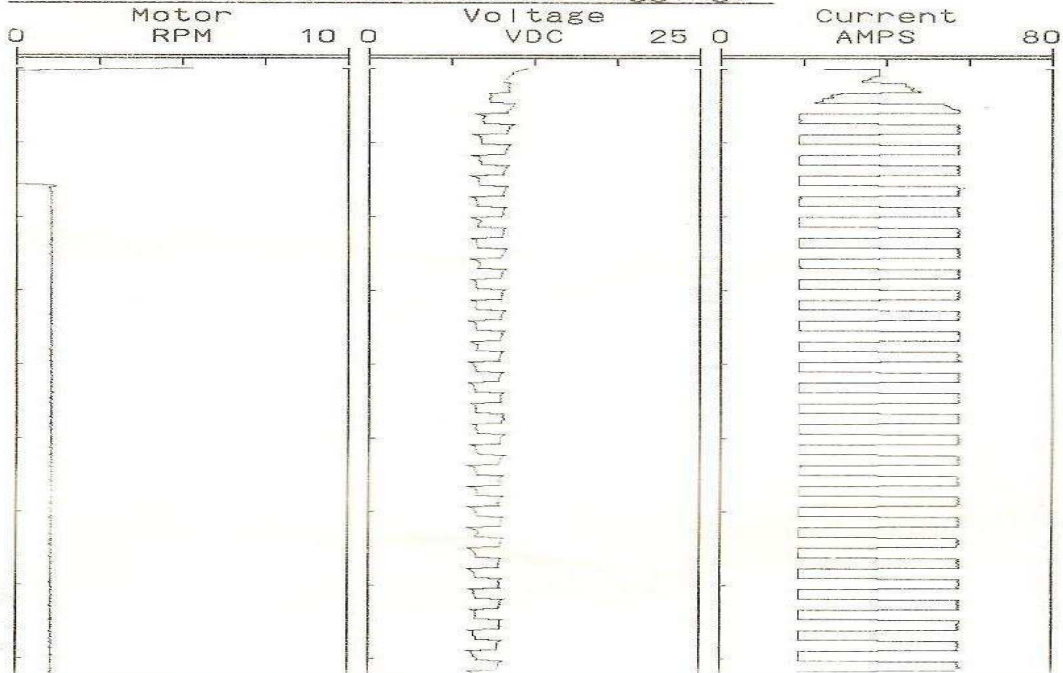
CURRENT Limit: ± 10% Duration: 0.14 Sec.
MOTOR Limit: ± 10% Duration: 0.14 Sec.

Weld Serial Number: 168
Number of weld deviations: 0

Date: _____ Time: _____ Arc Gap: _____

Signature: _____

Real-Time Weld Performance Logging:



ANEXO 5 (CONTINUACIÓN)

MK Products, Cobratig-150
with SmartARC and MicroTIG technology

Program **NOT SAVED** . User defined parameters are:

TUBE 0.D.: 1 1/2 inches
THICKNESS: .049 inches
PULSE TYPE: LOW PULSE
START DELAY: 0.5 Sec.
REVOLUTIONS: 1
TACKS: 3

Weld program parameters are: **(changes not saved)**

PRE-PURGE: 30 Sec. TACK time: 1.0 Sec.
POST-PURGE: 15 Sec. TACK Current: 38.0 Amp
STRIKE current: 34.5 Amps TACK scale: 0%
AMPS/RPM: SLOPING

Level	Ends	Pulse	Current	Motor	Scales
Number	at	High	Low	RPM	P C M
Upslope	10°	0.12	0.12	47.5	15.8 1.06 0% 0% 0
1	55°	0.12	0.12	47.3	15.7 1.06 0% 0% 0
2	100°	0.12	0.12	47.2	15.7 1.06 0% 0% 0
3	145°	0.12	0.12	47.0	15.7 1.06 0% 0% 0
4	190°	0.12	0.12	46.8	15.5 1.06 0% 0% 0
5	235°	0.12	0.12	46.7	15.5 1.06 0% 0% 0
6	280°	0.12	0.12	46.5	15.5 1.06 0% 0% 0
7	325°	0.12	0.12	46.2	15.3 1.06 0% 0% 0
8	20°	0.12	0.12	46.0	15.3 1.06 0% 0% 0
Final	110°	0.06	0.06	0.0	0.0 1.59 0% 0% 0

CURRENT Limit: ± 10% Duration: 0.12 Sec.
MOTOR Limit: ± 10% Duration: 0.12 Sec.

Weld Serial Number: 979
Number of weld deviations: 0

Date: _____ Time: _____ Arc Gap: _____
Signature: _____

MK Products, Cobratig-150
with SmartARC and MicroTIG technology

Program **NOT SAVED** . User defined parameters are:

TUBE 0.D.: 1 1/2 inches
THICKNESS: .049 inches
PULSE TYPE: LOW PULSE
START DELAY: 0.5 Sec.
REVOLUTIONS: 1
TACKS: 3

Weld program parameters are: **(changes not saved)**

PRE-PURGE: 30 Sec. TACK time: 1.0 Sec.
POST-PURGE: 15 Sec. TACK Current: 38.0 Amp
STRIKE current: 34.5 Amps TACK scale: 0%
AMPS/RPM: SLOPING

Level	Ends	Pulse	Current	Motor	Scales
Number	at	High	Low	RPM	P C M
Upslope	10°	0.12	0.12	47.5	15.8 1.06 0% 0% 0
1	55°	0.12	0.12	47.3	15.7 1.06 0% 0% 0
2	100°	0.12	0.12	47.2	15.7 1.06 0% 0% 0
3	145°	0.12	0.12	47.0	15.7 1.06 0% 0% 0
4	190°	0.12	0.12	46.8	15.5 1.06 0% 0% 0
5	235°	0.12	0.12	46.7	15.5 1.06 0% 0% 0
6	280°	0.12	0.12	46.5	15.5 1.06 0% 0% 0
7	325°	0.12	0.12	46.2	15.3 1.06 0% 0% 0
8	20°	0.12	0.12	46.0	15.3 1.06 0% 0% 0
Final	110°	0.06	0.06	0.0	0.0 1.59 0% 0% 0

CURRENT Limit: ± 10% Duration: 0.12 Sec.
MOTOR Limit: ± 10% Duration: 0.12 Sec.

Weld Serial Number: 978
Number of weld deviations: 0

Date: _____ Time: _____ Arc Gap: _____
Signature: _____

ANEXO 5 (CONTINUACIÓN)

MK Products, CobraTig-150
with SmartARC and MicroTIG technology

Program **NOT SAVED**. User defined parameters are

TUBE O.D.: 1 1/2 inches
THICKNESS: .049 inches
PULSE TYPE: LOW PULSE
START DELAY: 0.5 Sec.
REVOLUTIONS: 1
TACKS: 3

Weld program parameters are: **(changes not saved)**

PRE-PURGE: 30 Sec. TACK time: 1.0 Sec
POST-PURGE: 15 Sec. TACK Current: 38.0 Amp
STRIKE current: 34.5 Amps TACK scale: 0%
AMPS/RPM: SLOPING

Level Number	Ends at	Pulse		Current		Motor RPM	Scales		
		High	Low	High	Low		P	C	M
Upslope	10°	0.12	0.12	47.5	15.8	1.06	0%	0%	0
1	55°	0.12	0.12	47.3	15.7	1.06	0%	0%	0
2	100°	0.12	0.12	47.2	15.7	1.06	0%	0%	0
3	145°	0.12	0.12	47.0	15.7	1.06	0%	0%	0
4	190°	0.12	0.12	46.8	15.5	1.06	0%	0%	0
5	235°	0.12	0.12	46.7	15.5	1.06	0%	0%	0
6	280°	0.12	0.12	46.5	15.5	1.06	0%	0%	0
7	325°	0.12	0.12	46.2	15.3	1.06	0%	0%	0
8	20°	0.12	0.12	46.0	15.3	1.06	0%	0%	0
Final	110°	0.06	0.06	0.0	0.0	1.59	0%	0%	0

CURRENT Limit: ± 10% Duration: 0.12 Sec.
MOTOR Limit: ± 10% Duration: 0.12 Sec.

Weld Serial Number: 979
Number of weld deviations: 0

Date: _____ Time: _____ Arc Gap: _____

Signature: _____

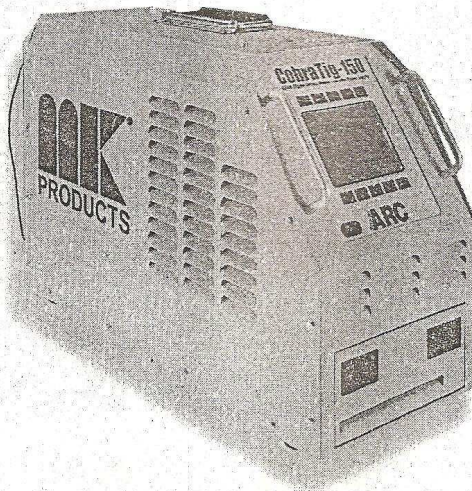
ANEXO 6



Product Description	CobraTig® 150
MK Manual Part Number	091-0417
MK Form Number	CT150/OM
NWSA Form Number	550
Effective with Serial Number	97040001
Voltage Ratings	100VAC 120VAC 208/240VAC
Print/Revision Date	April 2000 B
This manual applies to the following model numbers	254-150

CobraTig® 150

OWNERS MANUAL



16882 ARMSTRONG AVE., IRVINE, CA 92606 TEL (949)863-1234 FAX (949)474-1428

ANEXO 6 (CONTINUACIÓN)

Sección 1

INFORMACIÓN TÉCNICA

Fuente de Poder: 100VAC 50/60 Hz Una Fase, 15A
(+/- 10%) 120VAC 50/60 Hz Una Fase, 15A
208VAC 50/60 Hz Una o Tres Fase, 30A
230VAC 50/60 Hz Una o Tres Fase, 30A

Salida de Corriente: 0.1~150A (+/- 1%), Constante o Pulsante

Comienzo Mínimo de Arco: 0.5 to 25 Amps

Rata de Pulso: 0.01 to 2.25 segundos por pulso

Arco de Voltaje: 65VDC Circuito Abierto, hasta 26 Soldadura VDC

Ciclo de Respuesta: 1.5KHz

Regulador de Frecuencia de Corriente: 30 kHz

Control de Motor: 24VDC, 2A min., DC Feedback de tacómetro.

Capacidad de Memoria: 25 Procedimientos de Soldadura

Sección 2

INFORMACION MECANICA

Peso: 42 lbs / 19.1 lbs
Altura: 14 in / 35.6 cm
Espesor: 8.5 in / 21.6 cm
Longitud: 19 in. / 48.3 cm

Sección 3

CABEZAL DE SOLDADURA

Para soluciones eficientes en aplicaciones de soldadura orbital, el CopperHeads es ideal para reducir costos para sistemas de tubo de alta presión y sanitarios.

La serie CopperHead es nuestro mas efectivo y practico cabezal orbital en sitio ofrecido en tres modelos. Los modelos CopperHead 5001 (1/8-1 inch OD), 5002 (1/4-2inche OD) y 5003 (1/2 - 3 inch OD) cada uno ofrece versatilidad altos niveles de producción.

El enfriador de agua CooperHeads, tiene características como estrecho, liviano y facil de llevar para lugares en donde las soldaduras son de acceso limitado.

El modelo 5000 (1/16-3/4 inch OD) es para soldadura orbital de tubos y accesorios de pequeño diámetro en sitio para sistemas de tubos de alta pureza.

Todos cabezales MK pueden ser utilizados en el sitio en donde es colocado o de manera remota con una unidad de control.

Los modelos y sus capacidades son las siguientes:

MODELO	CAPACIDAD (Max. OD)
5000	1/16"-3/4"
5001	1/8" - 1"
5002	1/4" - 2"
5003	1/2" - 3"
5004	1/2" - 3"

Con un simple conector de corriente PIGTAIL(P/N 005-0619), todos los cabezales previamente mencionados se pueden adaptar al Cobra Tig™ 150. Solo se debe cambiar el electrodo y conectar los cables de tierra de the pust-in type to a twist-lock type.

El numero de orden para el tipo de twist-lock es: P/N 153-0755 Electrodo (conector macho se intercambia para el conector negro) y P/N 153-0813 Tierra(conector hembra se intercambia para el conector verde).

ANEXO 6 (CONTINUACIÓN)

Sección 10

Cuando en el botón se lea "GAS ON", la válvula solenoide de gas es abierta y el gas fluye.

Cuando en el botón se lea "GAS OFF", la válvula solenoide de gas es cerrada y no fluye el gas.

PRINT MENU

HELP	MAIN MENU	PRINT GRAPH	PAPER FEED	PRINTER RESET
------	-----------	-------------	------------	---------------

PRINT OPTIONS:

PRINT HELD GRAPH: YES ☒ NO

PRINT AFTER HELD: ☒ NEVER ALWAYS FAULTS

PRINTER STATUS: OK

ACTIVE PRG	LAST D. HELD	PRG. LIST	CALID. REPORT	PRINT DETION
------------	--------------	-----------	---------------	--------------

En el PRINT MENU, mucho de los aspectos de la CobraTig™ 150 pueden ser imprimidos o modificados. No solo puede imprimir los procedimientos de la soldadura, lista de procedimientos, y reportes de calibración también se puede cambiar la configuración de la impresora para imprimir por medio de comandos o automáticamente.

Help

Presione este botón para leer una descripción de los botones y funciones del menú PRINT MENU.

Main Menu

Presione este botón para regresar al MAIN MENU.

Print Graph

Esta función trabaja después de la soldadura. Presione este botón hacia el comando YES (para imprimir todos los gráficos y parámetros del proceso de soldadura), o hacia NO (imprime solo los parámetros de la soldadura).

Paper Feed

Presione y mantenga este botón de manera de alimentar el papel en la impresora de manera manual. Esto es usado especialmente después de haber cargado un rollo nuevo de papel.

Printer Reset

Muestra cuando la impresora se queda sin papel durante un proceso de soldadura o mientras es alimentada, el estado de impresora mostrara lo siguiente "Error, Printer Error".

Una vez un Nuevo rollo de papel a sido cargado y colocado a través del botón PRINTER FEED, presione el botón PRINTER RESET una vez. Se leerá en el campo de estado de impresión la palabra, "OK".

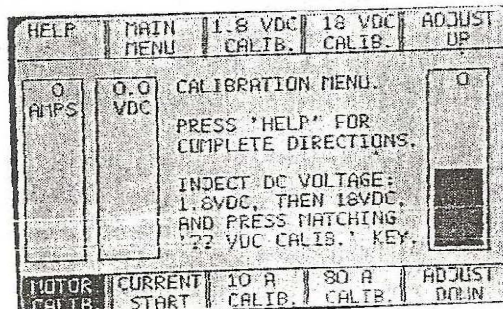
Para cargar un nuevo rodillo del papel, resbale la bandeja de la impresora derecho hacia fuera hasta que para. Desuna el mecanismo de arrastre de la impresora tirando abajo del brazo del cierre de la impulsión en el lado izquierdo de la impresora. Desenrolle aproximadamente 4 a 6 pulgadas de papel del rodillo y el relleno entre el mecanismo de arrastre de la impresora y el cristal de exposición inferior, empuja el papel a través hasta que emerge del panel delantero de la bandeja de la impresora.

ANEXO 6 (CONTINUACIÓN)

Sección 11

los parámetros o ocurra una falla.

CALIBRATION MENU



Antes de usar la CobraTig™ 150, es generalmente una Buena idea las lecturas de las salidas y retroalimentar antes de soldar. Las opciones del CALIBRATION MENU incluye la salidas del motor y la retroalimentación del tacómetro, salida de corriente y retroalimentación, y entrada de arco de voltaje. En orden de calibrar apropiadamente esta unidad, se necesitara lo siguiente: una fuente de alimentación capaz de producir 1.0 VDC a 20.0 VDC, un multímetro digital certificado, and various standard connection leads. Para ayudar en la calibración de esta máquina, comprese el kit P/N005-0251 (las instrucciones incluyen por que el kit es para el modelo ACL Orbital Welder, este no se aplica a esta unidad). Use las instrucciones de la pantalla HELP para una explicación completa de cómo calibrar esta unidad.

Help

Presione este botón para leer una descripción de los botones y funciones del menú CALIBRATION MENU.

Main Menu

Presione este botón para regresar al MAIN MENU.

1.8 VDC Calibration / 18 VDC Calibration

estas dos llaves son usadas en conjuntos para calibrar el arco de voltaje y retroalimentar el circuito. Use la información de la pantalla HELP para realizar este procedimiento de la calibración.

Conecte una fuente externa de voltaje DC a los conectores etiquetados 'ARC VOLTAGE' y ajuste a una entrada de 1.8 VDC. Refiérase al gráfico de barra del VDC en la pantalla LCD, y use el botón ADJUST UP o ADJUST DOWN para llevar el gráfico de barra al valor de entrada. Una vez la barra de gráfico se encuentre en el valor de entrada, presione el botón 1.8 VDC, esta comenzara la calibración.

Cargue la entrada 18.0 VDC y repita el proceso descrito arriba. El procedimiento completará un ciclo dos veces para una lectura y un ajuste medios, después parara cuando es listo.

Adjust Up

Presione este botón para ajustar el gráfico de barra hasta llegar al valor de referencia que ha sido leído de corriente o de voltaje.

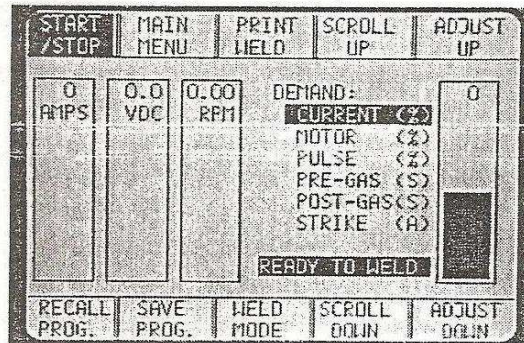
Motor Calibration

Cuando el cabezal ha sido conectado en el panel trasero del CobraTig™ 150, la salida de voltaje del motor, y la retroalimentación del tacómetro de el rotor del cabezal puede calibrarse.

ANEXO 6 (CONTINUACIÓN)

Sección 6

Soldadura Orbital



Desde la pantalla de menú principal presione este botón para seleccionar soldadura orbital. Una vez en la pantalla de soldadura orbital, Use el botón RECALL PROGRAM en la pantalla para seleccionar desde la librería de diseños de procedimientos de soldaduras guardados, o regrese al MAIN MENU y use la función APG (Auto Procedure Generation) para diseñar un nuevo procedimiento de soldadura. Use los botones SCROLL UP, SCROLL DOWN, ADJUST UP, y ADJUST DOWN para seleccionar y modificar los parámetros de la soldadura. Cuando todas las variables estén listas, presione el botón START/STOP para iniciar el proceso de soldadura.

Una vez en la pantalla de WELD ORBITAL, es mostrado el ultimo procedimiento de soldadura guardado en la memoria. Este es el procedimiento por defecto y esta listo para soldar. Si se desea un proceso de soldadura diferente, este puede ser llamado de la memoria o, o ser diseñado usando el Auto Program Generator (APG).

Start/Stop

Presione este botón para iniciar la prepurga de la maquina y el proceso de soldadura.

Main Menu

Presione este botón para regresar al MAIN MENU (MENU PRINCIPAL)

Print Weld

Presione el botón PRINT WELD para obtener la impresión de los últimos parámetros de soldadura y la carta completas de gráficos de la soldadura.

La impresión del proceso de soldadura mostrara, primero la descripción del proceso de soldadura, seguido de todos los parámetros de soldadura, mostrara los limites y parámetros de desviación, los gráficos de la corriente de la soldadura, el voltaje y la velocidad del motor.

Scroll Up

Presione este botón para seleccionar el parámetro que se desea modificar

Adjust Up

Después que los botones SCROLL UP o SCROLL DOWN han sido utilizado para seleccionar el parámetro a modificar, presione el botón ADJUST UP para incrementar el valor numérico de este parámetro.

Cuando se presiona este botón una barra vertical muestra el incremento de el valor, tanto numéricamente como en la altura de la barra.

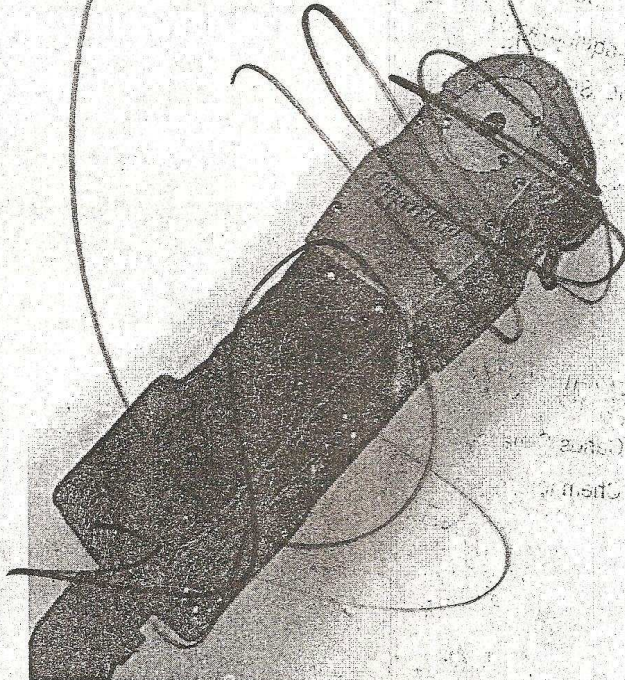
ANEXO 7



Product Description	Weldhead
MK Manual Part Number	091-0448
MK Form Number	Weldhead/OM
NWSA Form Number	550
Effective with Serial Number	98090001
Voltage Rating	N/A
Printing Date & Revision	October 1999 A
This manual applies to the following model numbers	5001 5002 5003

5001, 5002, 5003
CopperHead™ Orbital Weldhead

OWNER'S MANUAL



16882 ARMSTRONG AVE., IRVINE, CA 92606 TEL (949)863-1234 FAX (949)474-1428

ANEXO 7 (CONTINUACIÓN)

Sección 1

INFORMACIÓN TÉCNICA

Información Eléctrica

El CopperHead™ usa un motor de 24VCD con retroalimentación de tacómetro, controlado por el orbital power supply motor control circuit. Para encender el rotor a una velocidad precisa para crear una soldadura sanitaria.

Información Mecánica

Tamaño del cable de poder: # 6, 75 V, 600V.
Conectores de cable Twist-lock.

Tamaño de la conexión de Gas/Agua: Tubo de Nylon, 1/4" Odx 0.17 ID
Acopl de cierre rápido

Especificaciones del cable de control: 20AWG, conductor 12

DIMENSIONES	SEPARACIÓN RADIAL	SEPARACIÓN AXIAL*	TUNGSTENO TO REAR SIDEPLATE	RANGO DE DIÁMETRO DE SOLDADURA
5001	1.50	1.62	0.67	1/8 A 1
5002	2.20	1.62	0.67	... A 2
5003	2.65	1.62	0.67	0/00 A 3

* ASUME QUE EL CUELLO DE SOLDADURA ES USADO

Sección 2

APLICACIONES

Cada cabezal ha sido diseñado para un óptimo desarrollo en aplicaciones específicas acorde a rango específicos de diámetros, mientras cada cabezal tiene un tamaño máximo, es siempre mejor utilizar el cabezal siguiente cuando la aplicación está en la capacidad máxima de ese cabezal, aunque el puede hacer el trabajo satisfactoriamente en esa aplicación, la productividad y la máxima economía se obtiene cuando el cabezal es el adecuado para el trabajo.

Modelo 5001 – CopperHead™ I

Ha sido diseñado para soldaduras de precisión de tuberías y accesorios de diámetros pequeños, el cabezal 5001 es capaz de soldar tubos desde un diámetro externo de 1/8 a 1" y los accesorios asociados.

Modelo 5002 – CopperHead™ II

Ha sido diseñado para soldaduras de precisión de tuberías y accesorios de diámetros pequeños y medianos, el cabezal 5001 es capaz de soldar tubos desde un diámetro externo de 1/4 a 2" y los accesorios asociados.

Modelo 5003 – CopperHead™ III

Ha sido diseñado para soldaduras de precisión de tuberías y accesorios de diámetros medios, el cabezal 5001 es capaz de soldar tubos desde un diámetro externo de 1/2 a 3" y los accesorios asociados.

ANEXO 7 (CONTINUACIÓN)

Sección 5

opuesto de el mismo cuello.

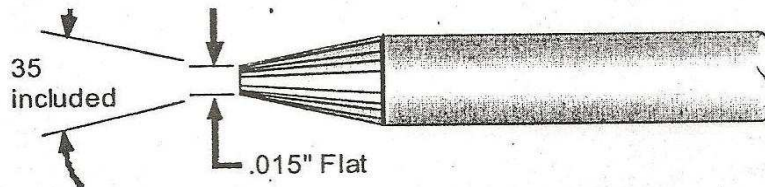
ELECTRODO DE TUNGSTENO

El tipo de tungsteno recomendado para ser usado en el CopperHead™ y el sistema de Soldadura Orbital MK es 2% Thoriated, 1/16" de diámetro.

El apéndice A muestra la longitud requerida del electrodo de tungsteno para cada tamaño de cabezal dado con el diámetro específico del tubo. Esa longitud de tungsteno es suficiente para ser sujeta por el sistema de tornillos manteniendo así una un arco eléctrico cercano, cuidando que el tungsteno no pegue en la parte de atrás del rotor mientras se realiza la soldadura.

GEOMETRÍA DEL ELECTRODO

El ángulo y forma de desbaste recomendado para el tungsteno es 35 grados y 0.015" de diámetro en la punta (figura 3). sin tener en cuenta la geometría de punta de electrodo seleccionada, esto es importante que la geometría de electrodo sea consistente a ser usada con el proceso de soldadura establecido.



Cambios en la geometría del electrodo pueden influir significativamente en el tamaño y la forma del cordón de la soldadura; de cualquier manera, la configuración de la punta del electrodo es una variable de soldadura que debe ser definido en el desarrollo del procedimiento de la soldadura.

PREPARACIÓN DEL TUNGSTENO

Los electrodos de tungsteno deben ser preparados apropiadamente para unos resultados consistentes, si el electrodo va a ser desbastado manualmente, use una rueda de diamante. Las marcas del desbaste deben ser perpendiculares o el arco de soldadura será pobre y vago y pueden ocurrir inclusiones (ver figura 4). Ninguna otra parte del electrodo debe ser desbastada con esa rueda, debido a que estas pueden contaminar el electrodo y crear problemas con el inicio del arco de soldadura, un arco vago durante la soldadura e inclusiones en el cordón de soldadura.



Correcto- a lo largo las marca
Del desbaste no restringen la
Corriente.



Incorrecto- Marcas cruzadas
Restringen la corriente,
Causando arco defectuoso
Y riesgo de inclusiones

ANEXO 8

Tabla II. Cuadro comparativo de tamaños de grano según patrones ASTM.

Número de tamaño ASTM	Número de granos promedio por pulgada cuadrada	Diámetro real calculado de un grano esférico (mm)
1	1	0.283
2	2	0.203
3	4	0.144
4	8	0.101
5	16	0.0718
6	32	0.0507
7	64	0.0359
8	128	-

