

REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de diploma en opción al título de ingeniero mecánico

**Título: Caracterización del proceso de soldadura TIG con y sin material
de aporte en planchas de acero estructural A 36**

Autor: Yodel Correa Machado

**Tutores: Dr. C. Tomás Hernaldo Fernández Columbié
M Sc. Rodney Enrique Correa Suárez**

**Moa, 2012
“Año 54 de la Revolución”**



Declaración de Autoridad

Yo: *Yodel Correa Machado*

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Yodel Correa Machado

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié

M Sc. Rodney Enrique Correa Suárez



Agradecimientos

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.

A mi tutor por confiar en mí en la realización de este trabajo, Dr. Tomás Fernández Columbie.

A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis amigos que siempre creyeron en mí.

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.

A la revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .

A todos

Muchas Gracias.



Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.

***A mi hijos: Lauren Correa Reyes, Daniel Correa
Reyes.***

***A mí querida y estimada esposa: Orialis Reyes
Fuentes.***

A mis padres: Ciro Correa y Rafaela Machado.

A mis amigos.

***A nuestra Revolución, por las posibilidades que
me ofrece.***



Resumen

El objetivo del trabajo es establecer el comportamiento del proceso de soldadura GTAW con y sin material de aporte del acero AISI A 36, para lo cual se realizaron probetas para ensayo de doblado, para ensayo de tracción, demostrándose la soldabilidad que presentaron las mismas. Se prepararon muestras de 150 mm de largo x 50 de ancho, las que se sometieron a ensayos mecánicos. Se determinó que en probetas soldadas sin material de aporte se obtiene una estructura de ferrita equiaxial deformada y con material de aporte se obtienen estructuras del tipo Perlita fina esferoidal y carburo globular, lo que demuestra que se puede realizar el proceso se puede realizar sin material de aporte para minimizar gastos innecesarios. Se determinó la ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles que se utiliza como norma empresarial el costo total empleado en el desarrollo del experimento. Finalmente se consideró el impacto medio ambiental en el proceso.



Abstract

It is paper has objective to establish the behaviour of the welding process GTAW with and without material of contribution of the steel AISI AT 36, for that which you/they were carried out test tubes for rehearsal of doubled, for traction rehearsal, being demonstrated the welding that presented the same ones. They got ready samples 150 mm of long x 50 of wide, those that underwent mechanical rehearsals. It was determined that in test tubes welded without contribution material a structure of ferrite deformed equiaxial it is obtained and with contribution material structures of the type Pearl fine spheroid and globular carbide are obtained, what demonstrates that it can be carried out the process it can be carried out without contribution material to minimize unnecessary expenses. The record was determined for costs, prices and its component in convertible pesos that it is used as managerial norm the cost total employee in the development of the experiment. Finally it was considered the half environmental impact in the process.



Índice

Contenido:	Pág
Introducción	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1 Introducción.	4
1.2. Fundamentos teóricos relacionados con la soldadura TIG	4
1.2.1. Particularidades del proceso de soldadura TIG o GTAW	4
1.2.2. Soldadura de aleaciones por el método GTAW	5
1.2.3. Generadores de soldadura	6
1.2.3.1. Pistola o porta electrodos	6
1.2.3.2 Características de los electrodos en el proceso GTAW	7
1.3. Aleaciones de aceros	8
1.3.1. Propiedades mecánicas de los aceros	8
1.4. Tratamientos térmicos de los aceros de bajo carbono	9
1.4.1. Los aceros estructurales. Características del acero A36	9
1.5. Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura	10
1.6. Agrietamiento en uniones soldadas	22
1.7. Tensiones residuales y distorsión	13
1.8. Modificaciones estructurales y físico- química en el metal base(MB)	16
1.9. Conclusiones capítulo 1	21
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.1. Introducción	22
2.2. Preparación de las probetas	22
2.3. Máquinas de soldadura GTAW	23
2.3.1. Datos técnicos de la máquina Millar Syncrowave 350 LX	23
2.3.2. Material de aporte	24
2.4. Elaboración de juntas	25
2.4.1. Tipo de junta	25
2.4.2. Procedimiento de soldeo	25
2.4.3. Técnicas de caracterización de las uniones	27



2.5. Caracterización mecánica	27
2.5.1. Equipos y materiales utilizados	27
2.5.2. Metodología de ensayo	30
2.5.2.1 Ensayo de microdureza Vickers	31
2.5.2.2. Metodología de ensayo	32
2.5.3. Caracterización microestructural	33
2.5.4. Pulidora metalográfica	33
2.6. Conclusiones del capítulo	34
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	35
3.1. Introducción	35
3.2. Análisis de las uniones soldadas	35
3.2.1. Ensayo de tracción	35
3.2.2. Uniones sin material de aporte- 1 pasada	36
3.2.3. Uniones sin material de aporte- 2 pasadas	37
3.2.4. Uniones con material de aporte- 1 pasada	37
3.2.5. Uniones con material de aporte- 2 pasadas	38
3.3. Discusión de los ensayos de tracción de las uniones soldadas	39
3.4. Ensayo de microdureza Vickers	40
3.4.1. Uniones sin material de aporte- 1 pasada (probeta 1)	41
3.4.2. Uniones sin material de aporte- 2 pasadas (probeta 2)	42
3.4.3. Uniones con material de aporte- 1 pasada (probeta 3)	43
3.4.4. Uniones con material de aporte- 2 pasada (probeta 4)	45
3.5. Ensayo de doblado	46
3.6. Análisis metalográfico	48
3.6.1. Probeta sin material de aporte- 1 pasada	49
3.6.2. Probeta sin material de aporte- 2 pasadas	51
3.6.3. Probeta con material de aporte- 1 pasada	53
3.6.4. Probeta con material de aporte- 2 pasada	55
3.7. Valoración económica	57
3.8. Análisis de las afectaciones en la soldadura	57



3.8.1. Generación de humo durante el proceso de soldadura	57
3.9. Conclusiones del capítulo 3	59
Conclusiones Generales.	60
Recomendaciones.	61
Bibliografía.	62



Introducción

Desde tiempos inmemoriales la unión de piezas siempre ha sido una preocupación del hombre. Esta unión que inicialmente se convirtió en un asunto de supervivencia para el hombre de la antigüedad, al unir mediante fibras vegetales la piedra y el palo, se convertirá a partir de ese momento en una cuestión fundamental.

Con el desarrollo de nuevos materiales los procesos de unión han ido variando con el de cursar del tiempo, desde las primeras armas soldadas en el Egipto de la edad del bronce hace más de 3000 años, hasta las últimas soldaduras realizadas en los paneles solares de la estación espacial internacional.

La Soldadura implica la aplicación de calor altamente localizado en metales que responden a la ley física de expansión contracción, capaces de afectar su estructura y en condiciones de movimiento restringido, de esta manera se puede afirmar que durante el calentamiento que la soldadura impone a una pequeña parte de las piezas, el aumento de volumen de esta resulta impedido por el calentamiento desigual del metal base y por el grado de embridamiento que tenga la misma, por lo que el crecimiento de volumen libre será función directa del gradiente de temperatura y del coeficiente de dilatación del material calentado.

En el proceso de soldadura ocurren diferentes fenómenos físicos como consecuencia del campo de temperatura, campo de esfuerzos y deformaciones y campo de estado microestructural. Los esfuerzos residuales en las soldaduras tienen un efecto muy significativo en la integridad de las estructuras, componentes y piezas metálicas, debido a que disminuyen la resistencia a la fatiga y resistencia mecánica de los materiales. En ocasiones los cordones de soldadura son mecanizados por condiciones de diseño induciendo posiblemente aun más esfuerzos residuales al material.

En los procesos de producción de objetos mediante construcciones soldadas en la industria, la aplicación o ejecución de los procesos de soldadura están sujetos y se desarrollan de acuerdo con códigos, especificaciones y normas que regulan el proyecto y fabricación de las construcciones soldadas en dichos objetos. Estos códigos y especificaciones se han elaborado basado en años de experiencia de industrias específicas, o en la experiencia acumulada durante la fabricación de



determinados tipos de productos, por ello sufren cambios y se actualizan continuamente a la par con los cambios tecnológicos y los cambios en las demandas para los productos cubiertos por estos.

La **situación problemática** de la investigación la constituye:

La Empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche” presenta en su infraestructura talleres que se dedican a diferentes actividades, dentro de los cuales está la UEB de construcciones metálicas, esta unidad se dedica a la construcción de partes y piezas que se emplean en otras industrias como es el MINBAS, el MICONS, las FAR. Dentro de los procesos de soldadura que emplea se encuentra el método de GTAW, sin embargo el costo del consumible de soldadura (electrodo o varilla) incurre en gastos adicionales en unión de acero que pueden ser unidos sin emplear el mismo.

El **Problema** a investigar:

Desconocimiento de las propiedades mecánicas del acero estructural A 36 empleado en la fabricación de tanque de recipiente, fabricación de viga y que se suelda con y sin material de aporte por el proceso de soldadura GTAW.

Se define como **objetivo de la investigación**

Determinar las propiedades mecánicas del acero estructural A 36 soldado por el método GTAW con y sin material de aporte para disminuir el empleo de electrodos.

A partir del objetivo se plantea como **hipótesis del trabajo**:

Si se determinan las propiedades mecánicas del acero estructural A 36 soldado por el método GTAW con y sin material de aporte, es posible caracterizar su resistencia mecánica y disminuir el empleo de metal de aporte.

El **campo de acción**: unión de soldadura del acero estructural A 36 empleando el proceso de soldadura GTAW con y sin material de aporte.

Como **objeto de estudio**: propiedades mecánicas del acero estructural A 36 soldado con y sin metal de aporte por el proceso GTAW.



Los **objetivos específicos**

1. Establecer los regímenes de soldadura a emplear en el proceso de soldadura GTAW con y sin material de aporte del acero estructural A 36.
2. Realizar diferentes ensayos mecánicos que permitan garantizar la calidad de la unión soldada, así como las propiedades mecánicas de la soldadura.
3. Analizar las fases presentes en las uniones soldadas luego de ejecutar el proceso de soldadura GTAW con y sin material de aporte del acero estructural A 36.

Para dar cumplimiento al objetivo propuesto se establecen las **tareas del trabajo** siguiente:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Planificación, diseño y realización de experimentos.
3. Análisis de resultados y obtención de la microestructura resultante del proceso de soldadura GTAW con y sin material de aporte.
4. Fundamentación de las inestabilidades metalúrgicas que surgen en el proceso de soldadura GTAW con y sin material de aporte.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso de soldadura.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción

En la actualidad los procesos de soldadura son imprescindibles para el desarrollo tecnológico de cualquier nación, estos intervienen en muchas de las construcciones que exigen alta resistencia y economía en su diseño.

Es habitual, cuando se hace referencia a la soldadura relacionarla con el empleo de material de aporte; sin embargo es conocido que hay procesos en los que bajo determinadas condiciones, no se emplea material de aporte, básicamente debido a que los materiales base presentan espesores delgados facilitando el proceso de soldabilidad de las piezas a unir.

1.2. Fundamentos teóricos relacionados con la soldadura TIG

Existen diferentes tipos de soldaduras que son utilizadas en dependencia de la composición del material que se desea unir, así como las exigencias tecnológicas del proyecto. Entre los tipos de soldadura que se han extendido en la industria de construcción de maquinaria se encuentra la soldadura por Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) (Burgos, 1987).

Plantea Hernández (2007) que el proceso de soldadura GTAW, también conocido como TIG, dentro de su utilización se destaca que es muy utilizado para uniones de planchas delgadas. Este proceso puede realizarse de dos formas, la primera utilizando material de aporte, y la otra sin utilizar material de aporte. Se reconoce que en la actualidad el proceso GTAW más utilizado es el que emplea material de aporte; sin embargo se sabe que cuando el material que se desea soldar cumple con las propiedades mecánicas requeridas resulta de gran utilidad aquella que no necesita material de aporte, debido a las ventajas económicas que reporta la misma.

1.2.1. Particularidades del proceso de soldadura TIG o GTAW

Este proceso se caracteriza por el empleo de un electrodo permanente de tungsteno, aleado a veces con torio o zirconio en porcentajes no superiores a un 2 %. Dada la elevada resistencia a la temperatura del tungsteno (funde a 3 410 °C), acompañada de la protección del gas, la punta del electrodo apenas se desgasta tras un uso prolongado. Los gases más utilizados para la protección del arco en esta soldadura son el argón y el helio, o mezclas de ambos (Cary *et al.*, 2005).

1.2.2. Soldadura de aleaciones por el método GTAW

Según Boyko y Garber (1991); Bingul y Cook (1999); Aguirre (2006), la soldadura por arco de tungsteno y gas (gas tungsten arc welding, GTAW) es un proceso de soldadura por arco eléctrico, que produce la coalescencia de metales calentándolos con un arco entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y la pieza de trabajo (**figura 1**). La protección al charco de soldadura se obtiene a partir de un gas o de una mezcla de gases. A este proceso se le denomina algunas veces soldadura TIG, "soldadura de Tungsteno con gas inerte"

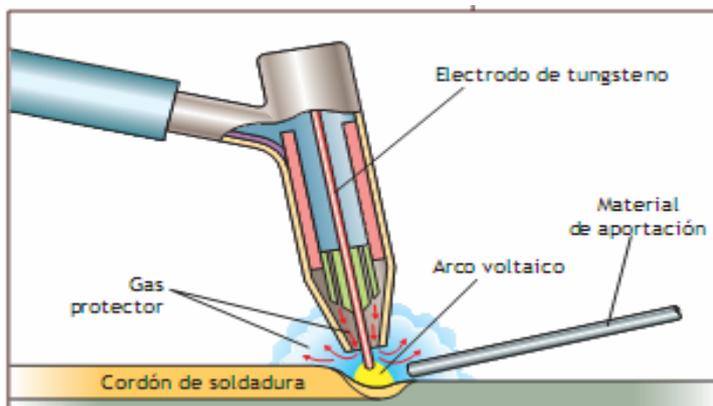


Figura 1. Proceso de soldadura GTAW. Fuente: Méndez y Eagar (2001).

Los procesos de soldadura por arco utilizando un gas inerte para impedir la posible contaminación exterior han demostrado sobradamente su eficacia para el logro de uniones fiables de diferentes aleaciones. Así tanto los procesos de soldadura por arco bajo gas de protección con electrodo no consumible GTAW (Eizaguirre *et al.*, 1990; Plaza *et al.*, 1992), como con electrodo consumible GMAW (Abbot, 1982) se han utilizado con éxito para la unión de aceros estructurales.

Consideran Murray y Dunand (2003); Li *et al.* (2005); que las propiedades mecánicas de las uniones soldadas dependen en gran medida de la estructura obtenida en el proceso de solidificación. Por un lado, parece interesante el empleo de bajos aportes térmicos que permita la consecución de un tamaño de grano más fino pero no se debe olvidar que este aporte debe ser suficiente para conseguir una penetración total. Resulta evidente, por tanto, que el aporte térmico óptimo será aquel que garantizando una penetración total sea capaz de producir la microestructura más fina.

1.2.3. Generadores de soldadura

Según Hicks, John (1999) para el soldeo por el procedimiento TIG puede utilizarse cualquier grupo convencional, de corriente continua o de corriente alterna, de los que se emplean en la soldadura por arco, con electrodos revestidos. Sin embargo, es importante que permita un buen control de la corriente en el campo de las pequeñas intensidades. Esto es necesario con vistas a conseguir una buena estabilidad del arco incluso a bajas intensidades, lo que resulta especialmente interesante en la soldadura de espesores finos.

Cuando se utilice un grupo de corriente continua que no cumpla esta condición, es recomendable conectar una resistencia en el cable de masa, entre el generador y la pieza. Esta solución permite conseguir arco estable, incluso a muy bajas intensidades. Para las máquinas de corriente alterna (transformadores), es necesario equiparlas con un generador de alta frecuencia.

También se encuentran generadores especialmente diseñados para soldadura TIG, equipados con todos los accesorios necesarios para este tipo de soldadura. La mayor parte de estas máquinas pueden suministrar corriente continua, así como alterna. La elección del tipo de generador más adecuado depende de las características del metal a soldar. Algunos metales se sueldan más fácilmente, con corriente alterna, mientras que otros, para conseguir buenos resultados, exigen el soldeo con corriente continua (Hernández, 2007).

1.2.3.1. Pistola o porta electrodos

Plantea Kalpakjian (2002) que esta pistola o portaelectrodo tienen la misión de conducir la corriente y el gas de protección hasta la zona de soldeo. Puede ser de refrigeración natural (por aire) o de refrigeración forzada (mediante circulación de agua). Los primeros se emplean en la soldadura de espesores finos, que no requieren grandes intensidades, y los de refrigeración forzada se recomiendan para trabajos que exijan intensidades superiores a los 200 amperios. En estos casos, la circulación del agua por el interior del portaelectrodos evita el sobrecalentamiento del mismo.

El electrodo de tungsteno, que transporta la corriente hasta la zona de soldeo, se sujeta rígidamente mediante una pinza alojada en el cuerpo del porta-

electrodos (Cary y Helzer, 2005). Cada portaelectrodos dispone de un juego de pinzas, de distintos tamaños, que permiten la sujeción de electrodos de diferentes diámetros.

El gas de protección llega hasta la zona de soldadura a través de la boquilla de material cerámico, sujeta en la cabeza del porta-electrodos. La boquilla tiene la misión de dirigir y distribuir el gas protector sobre la zona de soldadura. A fin de acomodarse a distintas exigencias de consumo cada porta-electrodos va equipado con un juego de boquillas de diferentes diámetros (Weman y Klas 2003).

Con vistas a eliminar turbulencias en el chorro de gas, que podrían absorber aire y contaminar la soldadura, algunos porta-electrodos van provistos de un dispositivo consistente en una serie de mallas de acero inoxidable, que se introduce en la boquilla, rodeando al electrodo.

1.2.3.2. Características de los electrodos en el proceso GTAW

Los electrodos para sistema TIG están fabricados con tungsteno o aleaciones de tungsteno, lo que lo hace prácticamente no consumible, ya que su punto de fusión es de 3 800 °C.

Plantea Kalpakjian (2002) que los diámetros más utilizados son los de 1.5 - 2.5 y 3 mm. Pueden ser de tungsteno puro, o de tungsteno aleado. Además de los mencionados, existen los electrodos con sector de torio, los cuales combinan las ventajas de los de tungsteno puro y llevan, en toda su longitud, un sector altamente aleado en torio.

La selección del diámetro del electrodo se realiza en la función de la intensidad necesaria y del tipo de corriente a utilizar. Cuando se trabaja en polaridad inversa, se necesitan diámetros mayores en la polaridad directa. Para obtener buenos resultados en la soldadura deben utilizarse un electrodo afilado correctamente. En general, suelen afilarse en punta, para el soldeo de la corriente continua; y en forma semiesférica, para soldar con corriente alterna.

1.3. Generalidades de los aceros al carbono para la soldadura

Según (Lajtin, 1973, Guliaev, 1983, Pero-Sanz, 2000), los aceros al carbono representan el grupo más importante de materiales metálicos para ingeniería, (empleados con mucha frecuencia en las industrias cubanas como: MINBAS,

MINAZ, SIME, MICONS). Los aceros al carbono son aleaciones Fe-C donde el contenido de carbono no supera el 1,00 %, el manganeso no supera el 1,65%, el cobre y el silicio no superan el 0,60 % y en los que el fósforo y el azufre aparecen solo como impurezas.

La característica más sobresaliente del acero es su versatilidad, ya que sus propiedades pueden ser controladas y modificadas con el fin de satisfacer los requerimientos de servicio. En estos aceros, los principales factores que afectan a sus propiedades mecánicas son el contenido en carbono y la microestructura.

Básicamente, la resistencia a la tensión, a la cadencia y la dureza, se incrementan al aumentar el contenido de carbono; por el contrario, la elongación, la reducción de área y la tenacidad disminuyen notablemente con dicho incremento. Otro atributo del acero, el cual es seguramente de mayor importancia, es su capacidad para endurecer, cualidad que comúnmente se denomina templabilidad. Esta característica también se ve afectada con el aumento en el contenido de carbono.

1.3. Aleaciones de aceros

Según Lean,Paul (2008) el acero es una aleación de hierro y carbono. El aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. Dependiendo de la temperatura y del porcentaje de carbono en el acero, este presentará diferentes fases y con ello diferentes propiedades.

En los aceros al carbono se pueden presentar, dependiendo de la temperatura y su composición química, microconstituyentes como ferrita, austenita, cementita, perlita y martensita. A continuación se presentarán algunas características y propiedades de los constituyentes antes mencionados.

1.3.1. Propiedades mecánicas de los aceros

Plantea Gulieav, (1983) las propiedades mecánicas del acero indican su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga. Algunas de las propiedades importantes del acero son las siguientes:

Resistencia: Es la capacidad de un material de soportar una carga aplicada sin fallar. Dependiendo del tipo de carga aplicada encontramos:

a) Resistencia a la tracción: Para la resistencia a la tracción, se someten probetas a tracción axial de incremento constante. Con este ensayo se determina el límite elástico, la resistencia máxima a la tensión y la ductilidad.

b) Resistencia a la fatiga: Las probetas se someten a cargas cíclicas de esfuerzo. Con el número de ciclos antes de la falla podemos determinar el esfuerzo máximo al que el acero puede ser sometido antes de que falle por las cargas cíclicas.

c) Resistencia al impacto: Con esta prueba se mide cuánta energía puede absorber durante la rotura, a una carga aplicada súbitamente.

Ductilidad: Es la capacidad del material para deformarse plásticamente bajo carga sin romperse.

Dureza: Es la capacidad del material para resistir la penetración por otro elemento más duro. La dureza aumenta con la resistencia y viceversa, por consiguiente si se conoce la dureza es posible conocer su resistencia a la tracción aproximada sin tener que hacer un ensayo de tracción.

1.4. Tratamientos térmicos de los aceros de bajo carbono

Los tratamientos térmicos en los aceros se realizan para modificar sus propiedades mecánicas, Databook (1988) esta modificación se debe a los cambios microestructurales que los aceros pueden alcanzar en condiciones fuera de equilibrio. Para realizar un tratamiento térmico se tiene que seguir la secuencia de calentamiento, permanencia del material a la temperatura del tratamiento y un enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

En la mayoría de tratamientos térmicos aplicados en los aceros, se calienta el material hasta la región austenítica, luego, dependiendo de las características deseadas se enfriará lentamente, en aire quieto, en agua.

1.4.1. Los aceros estructurales. Características del acero A 36

Según Databook (1988) el acero estructural A36 se produce bajo la especificación ASTM A 36. Recoge los perfiles moldeados en acero al carbono, placas y barras de calidad estructural para clavados, atornillados, o soldados de la construcción de puentes, edificios, y estructuras de diferente propósitos.

También este tipo de acero, es hasta hace poco tiempo, era utilizado más comúnmente en construcciones de edificios y puentes.

El acero estructural ($0,1 < \% C < 0,3$) para la fabricación de piezas, elementos de máquinas y de construcción de instalaciones, son importantes ciertas propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia a la fatiga y alargamiento.

Los aceros de hasta 0,1 % de carbono se utilizan para láminas, tubos, mallas, alambres, tornillos, clavos, cadenas, remaches. Los aceros que tienen más de 0,1 % y menos de 0,3 % de carbono se utilizan para fabricar planchas, barras corrugadas, perfiles en "I", "C", "L", calderas, tanques, tornillos.

El acero A 36, tiene una densidad de 78 500 MPa. El acero A 36 en barras, planchas y perfiles estructurales con espesores menores de 203,2 mm tiene un límite de fluencia mínimo de 250 MPa y un límite de rotura mínimo de 410 MPa. Las planchas con espesores mayores de 203,2 mm tienen un límite de fluencia mínimo de 220 MPa y el mismo límite de rotura pero de todos modos se rompe.

El acero A 36 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen:

- Planchas
- Perfiles estructurales
- Tubo
- Barras
- Láminas

Se considera que el acero es una aleación fácil de soldar, deben tenerse en cuenta sus características y considerarlas a favor de las exigencias tecnológicas de la pieza que se desea obtener una vez terminado el proceso de soldadura.

El acero estructural, tiene un contenido máximo de carbono que varía entre 0,25 % y 0,29 %, dependiendo del espesor.

1.5. Influencia de los elementos de aleación en el proceso de soldadura

Según Rodríguez (1983); González (1978); García (1983); Callister (1999), la soldabilidad de un material está dada por tres factores, de ellos el factor material es el que se refiere a la influencia de la composición química, método de fusión, existencia de impurezas, grado de desoxidación y las operaciones

precedentes (laminado, forja y tratamiento térmico), también depende de la relación de las impurezas, elementos de aleación y el carbono. El grado de soldabilidad representa una característica cualitativa o cuantitativa, la cual muestra cuanto varían las propiedades del metal al soldar bajo determinadas condiciones. Por ejemplo es posible establecer cuanto varían la resistencia, plasticidad, resiliencia y otras debido a la soldadura. Una de las características más sustanciales de la soldabilidad en aceros es la ausencia de grietas.

Carbono: Este elemento, como en los aceros al carbono, sigue siendo el fundamental para la determinación de las propiedades mecánicas tecnológicas. La temperatura de fusión y el peso específico, disminuyen con el aumento de este. Con su aumento, disminuye la soldabilidad, debido a que crece la templabilidad, por lo tanto la tendencia a la aparición de estructuras de mayor volumen específico en las uniones soldadas que ocasionan el surgimiento de tensiones internas y la disminución de las propiedades mecánicas.

Silicio: Es un elemento reductor (desoxidante), al igual que el manganeso. Para desoxidar determinados aceros para piezas fundidas se añade hasta 0,8 %. En las uniones soldadas, la cantidad de este elemento debe limitarse por el aumento de la fragilidad (debido a que los cristales mixtos de hierro y siliciuro de hierro FeSi son de poca plasticidad); no influyendo negativamente si no sobrepasa el 0,3 %.

Manganeso: Es un elemento que actúa como desulfurante y desoxidante en la obtención del acero. Este no empeora la soldabilidad si su contenido no sobrepasa el rango de 0,3 a 0,8 %). En los aceros de mediano contenido de manganeso (1,8 a 2,5 %), aumenta la templabilidad y la tendencia a la formación de grietas.

Cromo: Dificulta la soldadura porque acelera la oxidación del metal, forma uniones químicas con el carbono, aumenta la dureza del metal en las zonas de transición. Cuando existe una correcta selección del régimen de soldadura, de los materiales de aporte y también con la observación del proceso tecnológico, no influye en la soldabilidad.

Molibdeno: Este elemento aumenta la templabilidad del acero durante los procesos de soldadura, generalmente su contenido está limitado a pequeños

valores. En caso de los aceros de mediana aleación, la adición de una pequeña cantidad eleva la temperatura de recristalización de la ferrita por lo cual aumenta la resistencia a elevadas temperaturas.

Níquel: En contenidos de 3 a 5 %, aumenta la resistencia sin aumentar la fragilidad de la unión soldada, sin embargo al superar estos valores, tiene tendencia al aumento de la templabilidad de la misma. Afina el grano, aumenta la plasticidad y no empeora la soldabilidad.

1.6. Agrietamiento en uniones soldadas

La tendencia al agrietamiento es un factor que determina grandemente la soldabilidad de los aceros al carbono y de baja aleación. Durante la soldadura se producen fundamentalmente dos tipos de agrietamiento: agrietamiento en frío y agrietamiento en caliente. Las grietas constituyen los defectos más peligrosos en las uniones soldadas y se pueden presentar tanto como defectos externos o internos.

Algunos autores (Masubuchi, 1980; Susuki *et al.*, 1984; EL - Hebeary *et al.*, 2004; Satoh *et al.*, 1975), plantean que el fenómeno del agrietamiento en frío se conoce como agrietamiento retardado o agrietamiento por hidrógeno. Constituye un agrietamiento que se produce generalmente a temperaturas inferiores a los 930 °C inmediatamente después de culminada la soldadura, o luego de varias horas.

Constituyen por su morfología roturas frágiles de poca abertura y poco ramificadas que se producen en la Zona Afectada por el Calor o en el metal de la costura y se orientan transversal o paralelamente al eje de la misma. En general las grietas en frío pueden ser externas o internas por su ubicación. La grieta en frío más frecuente se produce en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) en la zona de sobrecalentamiento o de grano grueso.

Este tipo de agrietamiento en general es característico de la soldadura de los aceros de medio y alto carbono y algunos aceros de baja aleación.

La fractura inducida por hidrógeno (FIH) es atribuible a tres factores principales: microestructura, hidrógeno y esfuerzo (Oystein, 1994; Lancaster, 1999). Los factores causales que gobiernan la ocurrencia de la FIH, en las juntas de soldadura de aceros ferríticos son:

- Microestructura endurecida sensible a la fisuración, conteniendo productos de transformación martensíticos y bainíticos.
- Concentración localizada suficientemente alta de hidrógeno en términos del contenido de hidrógeno difusible de la soldadura (Maroef et al., 2002; Gedeon y Eagar, 1990).
- Esfuerzo elevado causado por la alta restricción estructural que es determinado por la rigidez del ensamble, es decir, espesores y altura del refuerzo del cordón de la soldadura.

La sensibilidad o susceptibilidad a la fractura inducida por hidrógeno de soldaduras se da por una combinación de estos tres factores primarios (Pekka, 2003; Gangloff, 2003; Pitrun, 2004). El mecanismo de nucleación y crecimiento de este tipo de grietas se explica por el efecto fragilizante que tiene el hidrógeno en el acero, por su alta tasa de difusión y por la existencia de zonas con esfuerzos triaxiales máximos en el frente de una entalla concentrador de esfuerzos.

La ubicación de estas grietas, es decir si se presentan en el metal de soldadura o en la zona afectada por el calor (ZAC), se explica a través de las diferencias que presenta el acero en estado austenítico (estructura cúbica cara centrada) y en estado ferrítico (cúbico de cuerpo centrado) en cuanto a la solubilidad y difusividad de hidrógeno atómico, para lo cual la templeabilidad relativa entre el metal base y el metal fundido se convierten en los factores fundamentales para poder predecir su localización en uniones soldadas, (Giraldo y Chaves, 2004).

1.7. Tensiones residuales y distorsión

Las tensiones residuales en los aceros son causadas por la deformación de partes de la estructura cristalina interna del propio material. Para restaurar esta red interna, es necesaria la introducción de energía a la pieza.

Se denominan esfuerzos residuales o internos, al estado de esfuerzos existente en el volumen de un material en ausencia de una carga externa (incluyendo la gravedad) u otra fuente de esfuerzos, tal como un gradiente térmico (James, 1996; Masubuchi, 1980). En general, se distinguen tres clases de esfuerzos residuales de acuerdo con la distancia o rango sobre el cual pueden ser observados (James y Buck, 1980 y Alfonso, 2002).

La primera clase de esfuerzos residuales, denominados macroscópicos, son de naturaleza de largo alcance y se extienden sobre varios granos del material. La segunda clase de esfuerzos residuales son denominados micro esfuerzos estructurales, abarcan la distancia de un grano o parte de uno, y pueden presentarse entre fases diferentes y tener características físicas distintas.

La tercera clase de esfuerzos residuales se presenta sobre varias distancias interatómicas dentro de un grano. Los esfuerzos residuales son siempre consecuencias de deformaciones elásticas y/o plásticas no-homogéneas sobre una escala macroscópica o microscópica (Macherauch y Kloos, 1986).

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 (Mikliaev, 1986).

En la soldadura por arco de metal protegido (Shielded Metal Arc Welding, SMAW) es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando.

Durante el proceso la situación se complica porque: 1) el calentamiento está muy localizado, 2) la fusión de los metales base ocurre en estas regiones locales y 3) la ubicación del calentamiento y la fusión está en movimiento (al menos en la soldadura con arco eléctrico), (Meriño, 1999). Durante este proceso (figura 1.2), la operación empieza en un extremo y viaja al lado opuesto.

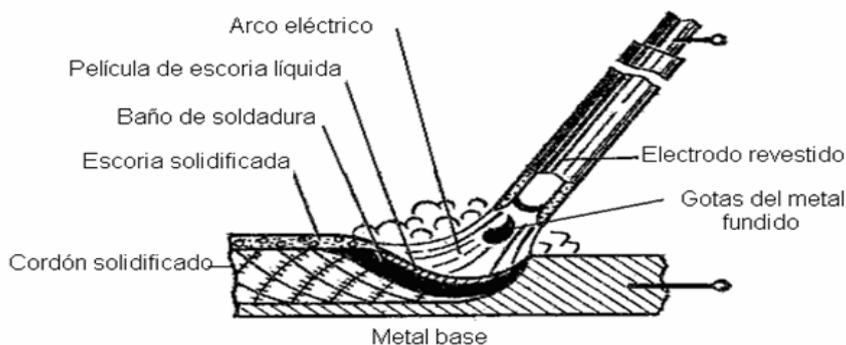


Figura 1.1. Esquema del proceso de soldeo SMAW

Como se puede observar en la figura 1.2, según avanza (Easterling, 1992) se forma un pozo fundido del metal base (y de metal de aporte), 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. La unión 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. Es probable que el resultado neto de estas tensiones residuales, en forma transversal y longitudinal, produzca una deformación en el ensamble soldado.

La unión soldada con arco eléctrico mostrada anteriormente es solo uno de los diversos tipos de uniones y operaciones de soldadura. Las tensiones residuales inducidas en forma térmica y la distorsión implícita son un problema potencial en casi todos los procesos de soldadura por fusión y en ciertas operaciones de soldadura de estado sólido, en las cuales ocurre un calentamiento significativo.

A consecuencia de los procesos de fabricación de los materiales, de la mecanización de componentes, de las condiciones de servicio de estos últimos y el suministro de en uniones soldada (James, 1996) se generan en los agregados policristalinos campos de tensiones residuales.

Las tensiones residuales pueden llegar a condicionar negativamente la vida en servicio de los dispositivos y estructuras. Microscópicamente, las tensiones residuales actúan alterando las distancias entre los planos atómicos de los cristales.

En el caso específico de procesos de soldadura, los esfuerzos residuales son consecuencia de la interacción de procesos separados (Zinn y Scholtes, 2002; Schajer, 2001, Zinn y Scholtes, 2002 a) por la expansión impedida y contracción resultante de una distribución de temperatura no homogénea, b) efectos de enfriamiento rápido (temple) y, c) transformaciones de fase.

Consecuentemente, el tipo y cantidad de esfuerzos residuales en la pila de soldadura y zona afectada térmicamente dependen de la temperatura de transformación determinada por el diagrama tiempo - temperatura - transformación del material (TTT) y la velocidad de enfriamiento. Obviamente, la composición química local tiene un papel importante. En adición, la resistencia a la cedencia dependiente de la temperatura local y el grado de rigidez del elemento estructural son decisivos.

1.8. Modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (MB)

El crecimiento de los granos en el metal base, está ligado invariablemente al ciclo térmico de la soldadura, temperatura y velocidad de enfriamiento. En la soldadura por arco, la zona de crecimiento de los granos está más localizada y sus dimensiones pasan por un máximo, en una zona muy próxima a los bordes, disminuyendo bruscamente en las capas próximas al bisel.

Según sea la potencia térmica aplicada en la zona fundida, así variará la zona influencia térmica (ZIT) en el metal base (figura 1.3), el cual será sometido a modificaciones alotrópicas dando origen a toda una serie de estructuras que pueden ir desde el semi - temple del tipo bainítico, hasta el hipertemple totalmente austenítico.

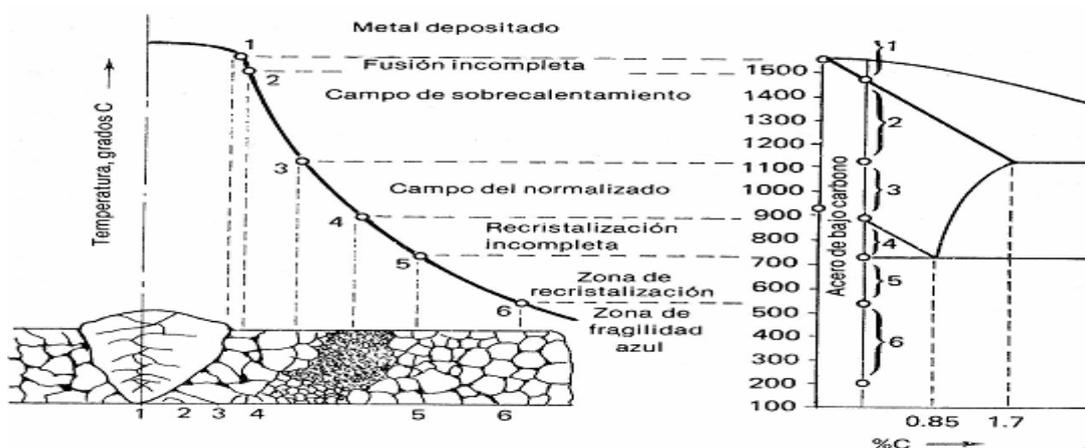


Figura 1.2. Zonas que se presentan en la ZIT durante la soldadura de los aceros al carbono y de baja aleación, según el diagrama Fe – C. (Fuente Zuñiga, 1983).

Estas modificaciones variaran en dependencia de las diferentes regiones de la zona térmicamente afectada donde se encuentre (Barreiro, 1966 y Bakker, 1968).

Estos cambios de estructura generalmente están ligados a cambios en las propiedades del metal en esta zona debido al tratamiento térmico a que está sometida esta zona.

- a) En la **zona fusión incompleta**, la temperatura alcanzada es la de fusión con velocidades de enfriamiento del orden de 350 a 400 °C/min, es la región de máximo temple; se caracteriza porque en ella ocurren la mayoría de los procesos difusivos de la soldadura, sin embargo el problema se complica por la superposición de una transformación química, en particular por la pérdida de elementos útiles: carbono, manganeso y silicio. Por esta razón, esta zona, a veces, se templea menos que otras zonas próximas del metal de base.
- b) En la **zona de recalentamiento** del metal base, que se produce a algunos milímetros del borde de la soldadura, se alcanza una temperatura muy elevada (entre 1100 y 1500 °C) y la velocidad de enfriamiento también es relativamente grande: 240 a 300 °C/min.

Necesariamente tiene que haber crecimiento de los granos y una transformación estructural de importancia con un temple cuya naturaleza depende del tipo de acero. En esta región no existen transformaciones de tipo químico y por tanto, únicamente interviene el ciclo térmico de soldadura sobre la constitución de la estructura final.

- c) En la **zona de recocido** es calentada ligeramente por debajo de los 900 °C, la aleación tiende hacia una estructura normalizada con afinamiento del grano, pero esta transformación no puede ser total a causa de la velocidad de enfriamiento que aún es grande 170 a 200 °C/ min.
- d) En la zona de **primera transformación** que se extiende entre los puntos de transformación Ac_1 , y Ac_2 , (720 a 900 °C), las modificaciones pueden adoptar distintos aspectos; en particular puede haber globulación del agregado laminar con tendencia a la coalescencia sin modificación sensible del grano de ferrita. Esta última zona de transformación puede extenderse en dependencia del espesor del acero soldado.

e) Zona de metal base no afectado: en esta zona el ciclo térmico que genera el proceso, no afecta la estructura del metal originalmente empleada.

Si el metal base hubiese sido modificado preliminarmente por algún tratamiento térmico (temple, revenido) o mecánico (laminado en frío), las transformaciones de la zona de recalentamiento o de la zona de recocido, prácticamente quedan como se ha dicho anteriormente, pero la zona de la primera transformación y una parte del metal de base no afectado, son asiento de nuevas transformaciones difíciles de prever.

A partir de las modificaciones estructurales y físico – química en el metal base (Glizmanenko, 1965, Bakker, Y Horestreydt, 1968, Rodríguez, 1983, ANSI/AWS D1.1-96, 1996, realizan una clasificación de las diferentes zonas del cordón de soldadura, para poder determinar los cambios en la estructura en la zona de Influencia Térmica (ZIT).

1. **Zona de fusión incompleta:** Constituye la zona de transición entre el metal de la costura o zona fundida y el metal base no fundido. Es una zona estrecha del metal base que se calienta a temperaturas por debajo de la línea de líquidos y por encima de la línea de sólidos, o sea, a temperaturas que solo sobrepasan un poco la temperatura de fusión por lo que el metal se encuentra en estado bifásico sólido-líquido.

El estado bifásico que se alcanza permite que ocurran procesos difusivos de algunos elementos entre las fases líquidas y sólidas de la zona de fusión incompleta, lo que provoca que esta zona se diferencie en cuanto a composición química tanto de la zona de la costura, como del metal base. El ancho de esta zona depende del carácter de la fuente de calor y de la composición química del metal y varía desde 0.1-0.4mm. Las propiedades de esta zona en ocasiones ejercen una influencia decisiva en la resistencia de la unión.

2. **Zona de sobrecalentamiento:** Zona limitada a los puntos cuyas temperaturas máximas se limitan entre aproximadamente los 1100 °C (temperatura de crecimiento intensivo el grano austenítico) y la línea de sólidos. En esta zona el metal durante el calentamiento de soldadura sufre la transformación alotrópica de hierro- δ a γ y producto de que el metal se calienta

a temperaturas bastante por encima de A_{c3} ocurre un sobrecalentamiento y crecimiento del grano austenítico.

Luego del enfriamiento la estructura final de esta zona depende de la composición del metal y el ciclo térmico de soldadura, de forma que en algunos casos durante la soldadura SMAW con un sobrecalentamiento significativo del acero y un contenido de carbono elevado se forma una estructura de grano grueso, que no influye significativamente en la resistencia del metal, pero que si disminuye significativamente su plasticidad.

En estos casos la resistencia al impacto puede caer en un 25 % y más. El ancho de esta zona oscila entre 1 y 3 mm. Por lo anterior se considera una de las zonas que más afectación pueden sufrir en la ZAC y donde ocurren la mayoría de las fallas en servicio.

3. **Zona de normalizado:** Está constituida por el metal calentado algo por encima de A_{c3} hasta la temperatura de aproximadamente 1100°C . En esta zona se obtiene una estructura de grano fino muy favorable desde el punto de vista de propiedades mecánicas, siendo en algunos casos incluso superiores a las del metal base no afectado. El ancho de la zona varía de 1,2 a 4mm.

4. **Zona de recristalización incompleta:** Se presenta en la zona calentado a temperaturas entre A_{c1} y A_{c3} , que en losa ceros de bajo carbono va de 725 a 850°C . El metal en esta zona alcanza solo una recristalización parcial.

5. **Zona de Recristalización:** Durante la soldadura de los aceros que han sufrido deformaciones plásticas previas, en la zona que se calienta en el intervalo de 450 a 700°C , de partes de granos surgen y crecen nuevos granos equiaxiales. Si el metal no ha sido previamente deformado plásticamente la recristalización no ocurre.

6. **Zona Frágil Azul:** En esta zona se presenta una coloración azul de la superficie del metal, luego del enfriamiento. Se caracteriza porque durante la soldadura de aceros de bajo carbono con contenidos de más de 0.005% de O_2 , 0,005 % de N_2 y 0,0005 % de H_2 ocurre una brusca caída de la resistencia al impacto.

Esta es causada probablemente por el envejecimiento del metal, durante el cual la solución sólida sobresaturada segrega los componentes en exceso, en

este caso nitrógeno u carbono, los que en forma de nitruros y carburos muy dispersos se agrupan alrededor de las zonas defectuosas de la red cristalina aumentando la resistencia del metal, pero disminuyendo su plasticidad.

Estas dos últimas zonas hay autores que las denominan **zonas de revenido**.

Metal base no afectado: En los aceros al carbono por debajo de la temperatura Ac_1 no ocurren transformaciones importantes que afecten de forma importante las propiedades mecánicas, por lo que por debajo de esta temperatura se considera metal base no afectado térmicamente. Algunos autores extienden la ZAC por debajo de esta temperatura porque determinados aceros son susceptibles a sufrir modificaciones.

El ancho obtenido en la ZIT y sus diferentes subzonas, dentro de la soldadura por fusión, se diferencia grandemente en el proceso de soldadura a llama (OFW) respecto a los diferentes procesos de soldadura por arco eléctrico (SMAW, GMAW y SAW) ya que el primero es un proceso que utiliza una fuente de calor (llama) menos potente y concentrada que el arco, que avanza mucho más lentamente, con un baño más voluminoso, por lo que el calor introducido en la pieza por metro lineal es mucho mayor, obteniéndose una ZIT muy ancha.

1.9. Conclusiones capítulo 1

- ✓ Para la soldadura de planchas de acero estructural de bajo espesor, se puede emplear satisfactoriamente el proceso de soldadura GTAW, el cual ofrece ventajas y calidad en los depósitos de cordones.
- ✓ Con el proceso de soldadura GTAW se consiguen cordones de soldaduras resistentes, dúctiles y poco sensibles a la corrosión, y además poco sensibles a la presencia de fisuras, porosidades y salpicaduras, es decir obtenemos una muy buena soldadura.
- ✓ En la soldadura GTAW se tiene la opción de soldar sin material de aporte, teniendo la ventaja de poder disminuir costos al no tener que usar el material de aporte y al acelerar el proceso.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

En la actualidad, el desarrollo de la tecnología a un ritmo acelerado, ha alcanzando desarrollo en la productividad a niveles cada vez mayores. Las técnicas, niveles y procedimientos adecuados para soldar los aceros al carbono están mejorando, ya que el proceso de soldadura (GTAW), se está desarrollando, ya sea con o sin material de aporte, lo que permite depósitos de cordones excelentes, reduciendo el tiempo necesario para soldar, con un rendimiento mejor y uniforme, ofreciendo a la vez mayor seguridad y ergonomía.

El objetivo del capítulo es establecer los métodos y procedimientos en que se realizarán los experimentos relacionados con la soldadura (GTAW) en uniones de planchas delgadas de acero estructural A 36.

2.2. Preparación de las probetas

Para el presente trabajo, se utilizaron planchas de acero ASTM A 36 de 2 milímetros de espesor. Las características físicas y mecánicas, y la composición química del acero A 36 se muestran en las tablas 3.1 y 3.2 respectivamente. Al acero ASTM A 36 empleado se le hizo un análisis químico, cuyos valores obtenidos se aprecian en la tabla 3.3.

Tabla 2.1. Propiedades físicas y mecánicas del acero estructural ASTM A36

Densidad	7850 kg/m ³
Propiedades Mecánicas	
Esfuerzo máximo a la tracción	400 - 550 MPa
Esfuerzo de fluencia, min	250 MPa
Alargamiento en 200 mm, mín	20 %
Alargamiento en 50 mm, min	23 %
Módulo elástico	200 GPa
Coeficiente de Poisson	0,26

Tabla 2.2. Composición química nominal del acero ASTM A 36

C	P	S	Si	Cu
0,26 %	Máx 0,04 %	Máx 0,05 %	0,4 %	0,2 %

Tabla 2.3. Composición química del acero ASTM A 36 empleado

C	Mn	Si	P
0,19 %	0,28	0,06	0,014
S	Ni	Cr	Cu
0,002	0,01	0,03	0,05

2.3. Máquina de soldadura GTAW

Para el proceso de soldadura GTAW utilizado en el presente trabajo, para soldar las probetas del acero ASTM A 36, se utilizó la máquina Miller Syncrowave 350 LX que se muestra en la figura 2.1.



Figura 2.1. Máquina Miller Syncrowave 350 LX.

2.3.1. Datos técnicos de la máquina Miller Syncrowave 350 LX

Enfriador de agua Coolmate (opcional) - de 11,36 lts (3 galones) de capacidad. Un indicador de flujo ofrece una ayuda visual de que el sistema está trabajando. El Coolmate 3X está equipado con un filtro externo que previene que cualquier partícula extraña se introduzca al cable de la antorcha mejorando el flujo del refrigerante, prolongando su vida útil.

Tecnología Syncro Start - permite personalizar los encendidos de arco, para una mayor precisión en el arranque y ajuste fino del arco dependiendo del diámetro en el arranque y ajuste fino del arco dependiendo del diámetro del electrodo y espesor del metal base.

Superior desempeño de arco - excepcional comportamiento a bajos niveles de corriente, el pulsador integrado permite un mayor control del calor aplicado.

Interfase del operador inclinada - realza la visibilidad del panel de control.



Salida de onda cuadrada y control de balance de onda en corriente alterna

Para un ajuste óptimo de la proporción entre la limpieza y penetración, manteniendo la estabilidad de arco al soldar diferentes aleaciones de aluminio. Ayuda a reducir la contaminación del tungsteno y el efecto de la rectificación del arco.

Dos medidores digitales - que permiten visualizar rápida y fácilmente tanto los valores reales como los valores prefijados de voltaje y amperaje de soldadura.

Memorización del último procedimiento de soldadura - automáticamente aparecen en pantalla los últimos valores de soldadura utilizados cuando se cambia la polaridad.

Instalado de fábrica, control de preflujo/postflujo - permite ajustar el tiempo de flujo de gas de protección entre 0,2 y 5 segundos antes y de 0 a 50 segundos después de establecido el arco.

Compensación de voltaje de línea que mantiene constantes los valores de los parámetros de operación a pesar de fluctuaciones en el voltaje primario +10 %.

Comportamiento para consumibles - localizado en el panel frontal, le permite al operador almacenar y acceder rápidamente a los consumibles que requiere, haciéndolo más productivo.

2.3.2. Material de aporte

Para las probetas soldadas con material de aporte se utilizó el ER 70 S - 6, que son varillas recubiertas de cobre que tienen un alto contenido de manganeso y silicio. El ER 70 S - 6 es especial para soldar aceros al carbono utilizando el proceso GTAW. Los gases recomendados para soldar con este material de aporte son el Argón puro y el Helio. La composición química del material de aporte depositado se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Composición química del material de aporte depositado

C	Mn	Si	P	S
0,06 – 0,12	1,3 – 1,6	0,7 – 1,0	< 0,025	< 0,025

2.3.3. Gas de protección

Para el soldeo de las probetas para los ensayos, se utilizó 100 % argón empleando un caudal de 9 litros/min en la realización de todos los cordones de soldadura.

Se empleó el argón por ser el más abundante de los gases raros del aire (0,9 % en volumen), por ser inerte, caracterizado por una perfecta estabilidad física y química a cualquier temperatura y presión, además no es corrosivo.

2.4. Elaboración de juntas

Para la realización de las probetas de soldadura, se utilizaron planchas de acero ASTM A 36 de 150 x 200 mm y de 2 mm de espesor como muestra la figura 2.2.



Figura 2.2. Planchas de acero ASTM A36 para la fabricación de probetas.

2.4.1. Tipo de junta

Por el espesor del material, el tipo de junta que se utilizó fue la junta a tope de bordes rectos como se aprecia en la figura 2.3.

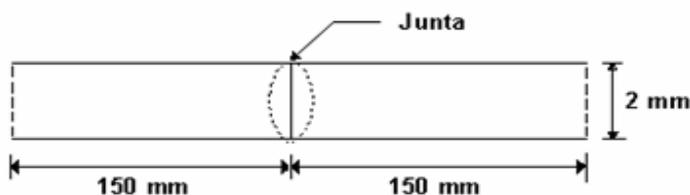


Figura 2.3. Junta a tope.

2.4.2. Procedimiento de soldeo

Para los ensayos experimentales se realizaron cuatro probetas soldadas con el proceso GTAW. Dos de las probetas realizadas fueron soldadas sin material de aporte, con una (probeta 1) y dos pasadas (probeta 2), y las otras dos probetas fueron soldadas usando el material de aporte ER 70 S - 6 con una (probeta 3) y dos pasadas (probeta 4).

Los parámetros y condiciones de soldadura se muestran en la tabla 2.5. En la figura 2.4 se visualiza el soldeo de una de las probetas sin la utilización de material de aporte, en la figura 2.5 se observa la probeta soldada con material de aporte con dos pasadas y en la figura 2.6 se observa la probeta soldada sin material de aporte con dos pasadas.

Tabla 2.5. Parámetros de soldadura de las probetas

Número de probetas	Pasadas	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Electrodo		Material de aporte	Gas de protección	
				Tipo	Diámetro (mm)		Tipo	Caudal (litros/min)
1	Única pasada	60	11	EW Th-	2,3	Sin aporte	Argón	9
2	Primera	54	11	EW Th-	2,3	Sin aporte	Argón	9
	Segunda	60	11	EW Th-	2,3	Sin aporte	Argón	9
3	Única pasada	54	11	EW Th-1	2,3	ER 70 S - 6 Ø 2,3	Argón	9
4	Primera pasada	54	11	EW Th-	2,3	ER 70 S6 Ø 2,3	Argón	9
	Segunda pasada	60	11	EW Th-1	2,3	ER 70 S6 Ø 2,3	Argón	9



Figura 2.4. Soldeo sin material de aporte de probetas.



Figura 2.5. Probeta soldada con material de aporte.

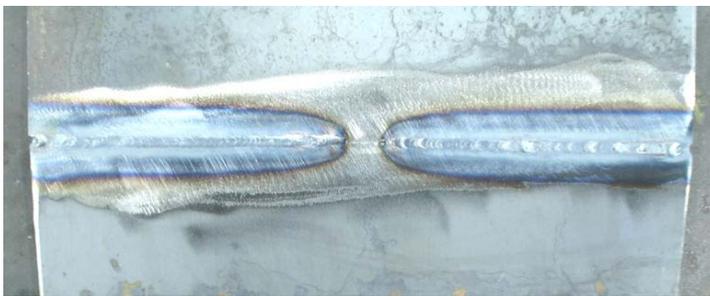


Figura 2.6. Probeta soldada sin material de aporte.

2.4.3. Técnicas de caracterización de las uniones

Una vez obtenidas las cuatro probetas, se procedió a realizar la inspección visual para localizar defectos. Luego se procedió a realizar el corte de los mismos con el fin de obtener las probetas que luego fueron ensayadas.

2.5. Caracterización mecánica

El comportamiento elástico y plástico de los materiales puede ser perfectamente analizado mediante la curva esfuerzo - deformación. Sin embargo, se ha comprobado experimentalmente que existe un límite, llamado límite elástico, tal que si cierta función homogénea de las tensiones supera dicho límite entonces al desaparecer la carga quedan deformaciones permanentes y el cuerpo no vuelve exactamente a su forma. Es decir, aparecen deformaciones no-reversibles.

2.5.1. Equipos y materiales utilizados

- Máquina de tracción: Para el ensayo de tracción se utilizó la máquina de tracción universal marca P - 50 de fabricación rusa. Este equipo se encuentra en el taller

de reparación del Combinado Gustavo Machín. La máquina de ensayo se muestra en la figura 3.8.



Figura 2.7. Máquina de tracción P - 50

- **Material base:** Se confeccionaron 3 probetas para realizar el ensayo de tracción en el material base, de acuerdo con la norma ASTM A 370. En la figura 2.8 se muestra una de las probetas empleadas.



Figura 2.8. Probeta para el ensayo de tracción del material base.

La tabla 2.6 muestran las dimensiones que presentaron las probetas realizadas con el material base.

Tabla 2.6. Probetas del material base para el ensayo de tracción

Probetas para ensayo de tracción			
Probeta	Sección transversal		
	Medidas (mm)		Área (mm ²)
	Ancho	Espesor	
MB1	12,45	1,91	23,78
MB2	12,53	1,91	23,93
MB3	12,30	1,94	23,86

- **Probetas soldadas:** Para conocer las características mecánicas de las probetas soldadas con diferentes parámetros, se fabricaron tres probetas a partir de cada uno de las muestras, con el objetivo de realizar los ensayos de tracción. Estas probetas se muestran en la figura 2.8. Las probetas fueron fabricadas tomando como referencia la norma de ensayo ASTM A 370 - 05 cuyas dimensiones transversales se muestran en las tablas 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10.

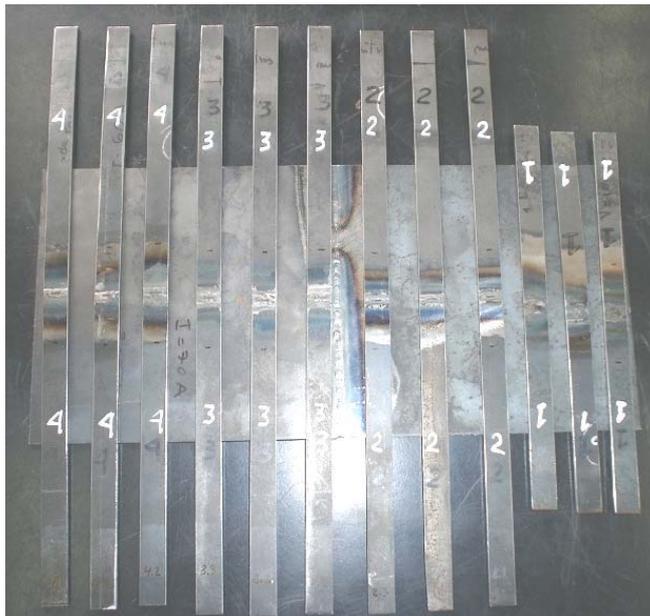


Figura 2.7. Probetas soldadas para el ensayo de tracción.

Tabla 2.7. Probetas soldadas con una pasada, sin material de aporte para ensayo de tracción

Probetas para ensayo de tracción – Sin aporte – 1 pasada					
Probeta	Pasadas de soldadura	Material de aporte	Sección transversal		Área (mm ²)
			Medidas (mm)		
			Ancho	Espesor	
1.1	1	Sin aporte	12,49	1,92	23,98
1.2	1	Sin aporte	12,56	1,90	23,86
			12,55	1,94	24,35

Tabla 2.8. Probetas soldadas con dos pasadas, sin material de aporte para ensayo de tracción

Probetas para ensayo de tracción – Sin aporte – 2 pasadas					
Probeta	Pasadas de soldadura	Material de aporte	Sección transversal		
			Medidas (mm)		Área (mm ²)
			Ancho	Espesor	
2.1	2	Sin aporte	12,48	1,98	24,71
2.2	2	Sin aporte	12,46	1,95	24,30
2.3	2	Sin aporte	12,41	1,92	23,83

Tabla 2.9. Probetas soldadas con una pasada con material de aporte para ensayo de tracción

Probetas para ensayo de tracción – con aporte – 1 pasada					
Probeta	Pasadas de soldadura	Material de aporte	Sección transversal		
			Medidas (mm)		Área (mm ²)
			Ancho	Espesor	
3.1	1	ER 70 S - 6	12,48	1,99	24,84
3.2	1	ER 70 S - 6	12,45	1,97	24,53
3.3	1	ER 70 S - 6	12,46	1,96	24,42

Tabla 2.10. Probetas soldadas con dos pasadas de material de aporte para ensayo de tracción

Probetas para ensayo de tracción – con aporte – 2 pasadas					
Probeta	Pasadas de soldadura	Material de aporte	Sección transversal		
			Medidas (mm)		Área (mm ²)
			Ancho	Espesor	
4.1	2	ER 70 S - 6	12,56	1,96	24,62
4.2	2	ER 70 S - 6	12,52	1,95	24,41
4.3	2	ER 70 S - 6	12,54	1,98	24,83

2.5.2. Metodología de ensayo

Para este ensayo, se coloca una probeta de sección transversal rectangular en una máquina de tracción sujetándola entre dos mordazas, una fija y la otra móvil. La probeta es sometida a tracción axial incrementando constantemente la carga, esta se consigue al desplazar la mordaza móvil hasta alcanzar la rotura de la probeta. Una de las probetas colocadas en las mordazas para el ensayo de tracción se muestra en la figura 2.8.



Figura 2.8. Probeta en las mordazas de la máquina de tracción listas para ensayar

2.5.2. Ensayo de microdureza Vickers

La microdureza se determina en aparato especial que consta de un mecanismo de carga con punta de diamante y de un microscopio metalográfico. Para el ensayo se utilizó un microscopio modelo: PMT-3 N0168 (MADE IN URSS), del Laboratorio de microscopia de minas del ISMM Moa (figura 2.9).



Figura 2.9. Microscopio utilizado para el ensayo de microdureza.

- Probetas: Para conocer las durezas alcanzadas en las zonas de fusión y en las zonas afectadas por el calor, en las probetas soldadas con el proceso GTAW en las planchas de acero ASTM A 36 con diferentes parámetros, se hicieron probetas tomadas transversalmente a las uniones soldadas de cada uno de las muestras

para realizar el ensayo de dureza. Las dimensiones de las probetas se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.10. Probeta con material de aporte para la medición de microdureza Vickers
Para realizar el ensayo de dureza, se necesita que el indentador penetre perpendicularmente sobre la cara que será sometida a este ensayo. Para esto se hicieron briquetas para cada probeta con lo que se consigue que la cara que será sometida al ensayo de dureza sea totalmente horizontal. Una de las probetas empleadas se muestra en la figura 2.11.

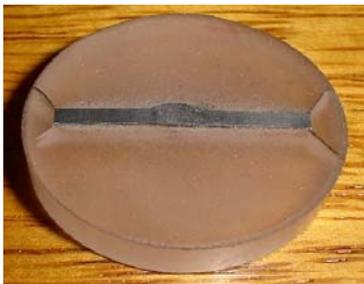


Figura 2.11. Probeta con material de aporte en una briquea para la medición de microdureza Vickers y caracterización microestructural

2.5.2. Metodología de ensayo

Este procedimiento emplea un penetrador de diamante en forma de pirámide de base cuadrada. El penetrador es aplicado perpendicularmente a la superficie cuya dureza se desea medir, bajo la acción de una carga. Esta carga es mantenida durante un cierto tiempo, después del cual es retirada y luego se mide la diagonal de la impresión que el indentador dejó sobre la superficie de la muestra. Con este valor se obtiene la dureza Vickers, que es caracterizada por HV. Para este ensayo se utilizó una carga de 200 gramos. La dureza Vickers se obtiene a partir de la siguiente fórmula según ASTM E 92 - 82:

$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (2.1)$$

Donde:

F - carga; N

d - promedio de las dos diagonales medidas en milímetros.

Las indentaciones se realizaron desde el centro de la probeta (zona de fusión), hasta llegar al material base a la derecha. La distancia entre indentación e indentación fue de 0,5 milímetros en la zona afectada por el calor; cuando se llegó al material base, la distancia entre indentaciones fue de 2 milímetros.

2.5.3. Caracterización microestructural

Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.

En la figura 2.12 se observa la imagen del microscopio empleado en la observación de las muestras.



Figura 2.12. Microscopio óptico NOVEL modelo NIM -100.

2.5.4. Pulidora metalográfica

La pulidora metalográfica empleada es marca MONTASUPAL, la cual está ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM, para lograr el acabado final, en ella se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo (Pasta GOI), las características de la máquina aparecen a continuación.



Voltaje.	250
V	
Corriente.	2,5 Amp
Número de revoluciones.	300 -1 000 rev/min
Potencia del motor.	3,7 kW

Para eliminar los residuos de partículas, grasas y suciedades se limpió la superficie con agua.

- **Probetas:** La fabricación de las probetas utilizadas para la metalografía fue realizada de la misma manera que para el ensayo de dureza. La preparación de las probetas empleadas fue mediante desbaste y pulido mecánico según la norma ASTM E3 – 95. El ataque químico utilizado fue con Nital al 3 % según ASTM 407 – 70.

2.6. Conclusiones del capítulo

- Se establecieron las técnicas experimentales, a través de las cuales se le dará cumplimiento al desarrollo del trabajo, así como la caracterización de cada uno de los equipos y máquinas para validar los resultados a obtener.
- Para conocer las durezas alcanzadas en las zonas de fusión y en las zonas afectadas por el calor, en las probetas soldadas con el proceso GTAW en las planchas de acero ASTM A 36 con diferentes parámetros, se hicieron probetas tomadas transversalmente a las uniones soldadas de cada uno de las muestras para realizar el ensayo de dureza.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. INTRODUCCIÓN

La soldabilidad de los aceros se caracteriza por la composición química, las propiedades mecánicas y físicas del material, teniendo en cuenta la superficie a soldar. La elección de los parámetros durante el proceso determinan en gran medida los resultados que queremos obtener.

En éste capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, las regularidades del comportamiento de la soldabilidad de acero estructural A 236. Así mismo se revela a partir de los modelos experimentales obtenidos; el comportamiento del acero A 36 soldado por el proceso GTAW.

El objetivo del capítulo es:

1. Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, la explicación de los fundamentos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.2. Análisis de las uniones soldadas

Se utilizó un electrodo de 1,5 mm, de tungsteno puro, para la intensidad seleccionada aumenta la capacidad de corriente del electrodo, así como su poder de emisión electrónica, lo que mantuvo el electrodo más frío en su extremo del electrodo; lo que facilitó el cebado del arco; el arco más estable y disminuyendo el riesgo de contaminación del electrodo.

3.2.1. Ensayo de tracción

En las siguientes tablas y gráficos se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fabricadas de material base, acero ASTM A36, así como las fabricadas con diferentes parámetros de soldadura.

En la tabla 3.1 se muestran los resultados del ensayo de tracción realizado en las probetas hechas del material base, acero ASTM A 36. Se observa que estas probetas alcanzaron un esfuerzo de fluencia promedio de 373 MPa, un esfuerzo máximo promedio de 512 MPa y una elongación promedio de 32 %.

Tabla 3.1. Ensayo de tracción del material base

Ensayo de tracción en el material base								
Probeta	Secc transv	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Ductilidad		
	Área (mm ²)	Fza de fluencia	Fza máxima	Esfzo de fluencia ($\sigma_{0,2}$)	Esfzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	Long / marca (mm)	ϵ (mm)	Elong (%)
MB1	23,78	9,0	12,5	378,5	525,7	50	66,8	33,6
MB2	23,93	8,9	12,2	371,9	507,7	50	66,5	33,1
MB3	23,86	8,8	12,0	368,8	502,9	50	65,2	30,4
Promedio				373,1	512,1			32,4

3.2.2. Uniones sin material de aporte – 1 pasada

En la tabla 3.2 se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas sin material de aporte y con una sola pasada. Se observa que estas probetas alcanzaron valores de esfuerzo de fluencia promedio de 351 MPa, esfuerzo máximo promedio de 491 MPa y elongación promedio de 22 %.

Los valores de esfuerzos de fluencia y esfuerzos máximos así como los valores de elongación, hallados en estas probetas soldadas sin material de aporte con una sola pasada, disminuyeron en relación a los valores alcanzados por el material base (tabla 3.2). En el ensayo de la probeta 1.3, se hallaron valores muy bajos de esfuerzo máximo y de elongación pues la probeta presentaba un poro, así que para el promedio no se tomó en cuenta.

Tabla 3.2. Ensayo de tracción de probetas sin material de aporte – 1 pasada

Ensayo de tracción sin material de aporte – 1 pasada										
Prob	Secc transv	Área(mm ²)	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Ductilidad			
			Fza de fluencia	Fza máxima	Esfzo de fluencia ($\sigma_{0,2}$)	Esfzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	Long / marca (mm)	ϵ (mm)	Elong	Zona rotura
1,1	1	23,98	8,4	11,8	349,5	493,3	50	62,3	24,6	28
1,2	1	23,86	8,4	11,7	352,8	488,6	50	60,1	20,2	28
*1,3	1	24,35	8,5	10,0	349,9	412,4	50	55,2	10,5	Centro de la unión MA
Promedio					351,1	491,0			22	28

MA = Material de aporte.

(*) Probeta descartada para calcular el promedio

3.2.3. Uniones sin material de aporte – 2 pasadas

En la tabla 3.3 se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas sin material de aporte y con dos pasadas. Se observa que estas probetas alcanzaron valores de esfuerzo de fluencia promedio de 345 MPa, esfuerzo máximo promedio de 470 MPa y elongación promedio de 17 %.

Los valores de esfuerzos de fluencia y esfuerzos máximos así como los valores de elongación, hallados en estas probetas soldadas sin material de aporte con dos pasadas, disminuyeron en relación a los valores alcanzados por el material base (tabla 3.1), así como en relación a las probetas soldadas sin material de aporte con una sola pasada (tabla 3.2). Se observa que la zona de rotura en estas probetas están más alejadas del centro de la unión que las zonas de rotura de las probetas soldadas sin material de aporte con una sola pasada.

Tabla 3.3. Ensayo de tracción de probetas sin material de aporte – 2 pasadas

Ensayo de tracción sin material de aporte – 2 pasadas										
Prob	Secc transv	Área(mm ²)	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Ductilidad			
			Fza de fluencia	Fza máxima	Esfzo de fluencia ($\sigma_{0,2}$)	Esfzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	Long / marca (mm)	ϵ (mm)	Elong	Zona rotura
2.1	2	24,71	8,5	11,5	342,0	465,0	50	58,5	17,0	36
2.2	2	24,30	8,4	11,3	344,0	466,3	50	57,8	15,7	36
2.3	2	23,83	8,3	11,4	348,3	478,0	50	58,6	17,2	40
Promedio					344,8	469,8			17	37

3.2.4. Uniones con material de aporte – 1 pasada

En la tabla 3.4 se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas con material de aporte y con una sola pasada. Se observa que estas probetas alcanzaron valores de esfuerzo de fluencia promedio de 352 MPa, esfuerzo máximo promedio de 477 MPa y una elongación promedio de 12 %.

Los valores de esfuerzos de fluencia y esfuerzos máximos hallados en estas probetas soldadas con material de aporte con una sola pasada, aumentaron con relación a los valores alcanzados por las probetas hechas sin material de aporte con dos pasadas (tabla 3.3). Los resultados para estas probetas se acercan a los valores obtenidos de las probetas soldadas sin material de aporte y una sola pasada (tabla 3.2).

En el caso de la elongación, esta disminuyó con relación a los valores de elongación obtenidos de las probetas soldadas sin material de aporte. Se observa que la zona de rotura en estas probetas están más alejadas del centro que en los dos ensayos para las probetas anteriores.

Tabla 3.4. Ensayo de tracción de probetas con material de aporte – 1 pasada

Ensayo de tracción con material de aporte – 1 pasadas										
Prob	Secc transv	Área(mm ²)	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Ductilidad			
			Fza de fluencia	Fza máxima	Esfzo de fluencia ($\sigma_{0,2}$)	Esfzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	Long / marca (mm)	ϵ (mm)	Elong	Zona rotura
3.1	1	24,84	8,6	11,7	346,7	471,1	50	56,5	13,0	45
3.2	1	24,53	8,7	11,8	352,7	479,5	50	55,8	11,6	42
3.3	1	24,42	8,7	11,8	355,8	481,1	50	55,7	11,4	50
Promedio					351,7	477,2			12	46

3.2.5. Uniones con material de aporte – 2 pasadas

En la tabla 3.5 se muestran los resultados del ensayo de tracción para las probetas soldadas con material de aporte y con dos pasadas. Se observa que estas probetas alcanzaron valores de esfuerzo de fluencia promedio de 342 MPa, un esfuerzo máximo promedio de 470 MPa y una elongación promedio de 11 %.

Tabla 3.5. Ensayo de tracción de probetas con material de aporte – 2 pasadas

Ensayo de tracción con material de aporte – 2 pasadas										
Prob	Secc transv	Área(mm ²)	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Ductilidad			
			Fza de fluencia	Fza máxima	Esfzo de fluencia ($\sigma_{0,2}$)	Esfzo máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$)	Long / marca (mm)	ϵ (mm)	Elong	Zona rotura
4.1	2	24,62	8,4	11,5	340,8	468,4	50	55,7	11,5	109
4.2	2	24,41	8,4	11,5	344,1	470,6	50	55,9	11,9	45
*4.3	2	24,83	8,3	11,3	332,3	454,3	50	52,5	5,0	110
Promedio					342,4	469,5			11	77

(*) Probeta descartada para calcular el promedio.

Los valores de esfuerzos de fluencia y esfuerzos máximos hallados en estas probetas soldadas con material de aporte con dos pasadas fueron los menores valores obtenidos de todos los ensayos de tracción realizados. En el caso de la elongación, esta disminuyó con relación a todos los valores de elongación, siendo estos los más bajos entre todos los valores de elongación obtenidos.

En el ensayo de la probeta 4.3, la rotura se presentó en el material base, muy lejos de la zona soldada; además se aprecia la presencia de una discontinuidad en la zona de rotura. Es por esto que no se tomó en cuenta para el promedio.

3.3. Discusión de los ensayos de tracción de las uniones soldadas

• **Esfuerzo de fluencia ($\sigma_{0,2}$):** En la figura 3.1 se muestra en un diagrama de barras, la comparación entre los esfuerzos de fluencia promedio entre las probetas soldadas y el material base del acero ASTM A 36 utilizado.

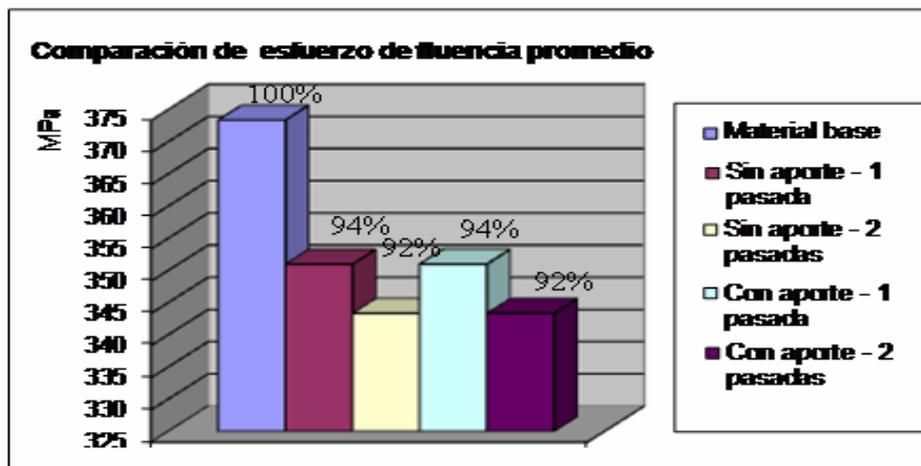


Figura 3.1. Comparación de esfuerzos de fluencia promedio en probetas soldadas.

Se observa que los esfuerzos de fluencia disminuyen al soldar el material cualquiera sean los parámetros utilizados, obteniéndose valores muy similares entre las probetas soldadas con sólo una pasada y con dos pasadas, con y sin material de aporte.

• **Esfuerzo máximo ($\sigma_{máx}$):** En la figura 3.2 se muestra en un diagrama de barras, la comparación entre los esfuerzos máximos promedio entre las probetas soldadas y el material base del acero ASTM A 36 utilizado.

Se observa un comportamiento similar respecto a los esfuerzos de fluencia, pues los esfuerzos máximos a la tracción disminuyen al soldar el material, cualquiera sean los parámetros utilizados. Se aprecia que los valores de las probetas soldadas con dos pasadas alcanzaron valores muy similares. Los mayores valores los alcanzaron las probetas soldadas con una sola pasada, siendo las probetas soldadas sin material de aporte las que alcanzaron mayores valores de esfuerzos máximos a la tracción.

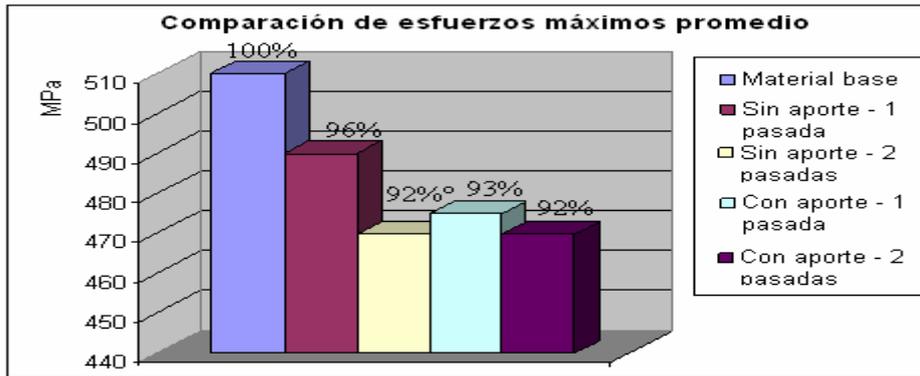


Figura 3.2. Comparación de esfuerzos máximos promedio en probetas soldadas.

• **Ductilidad (% ϵ):** En la figura 3.3 se muestra en un diagrama de barras, la comparación entre los porcentajes de elongación promedio entre las probetas soldadas y el material base del acero ASTM A 36 utilizado.

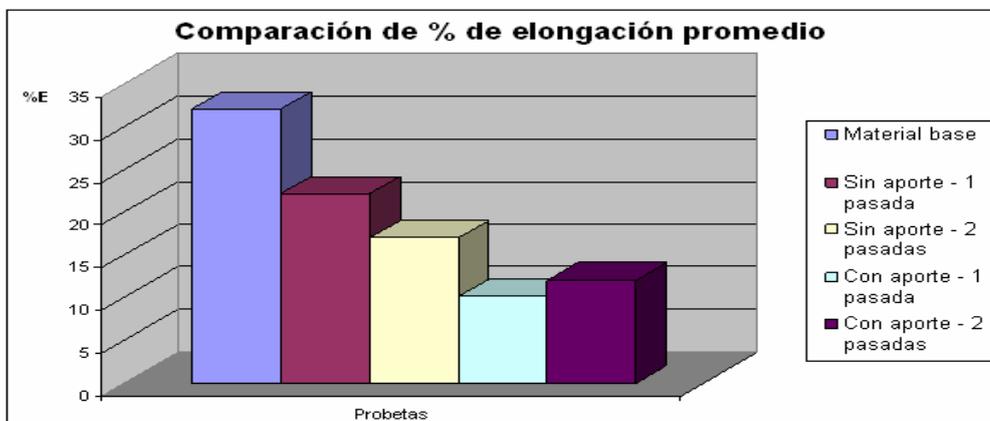


Figura 3.3. Elongación promedio entre las probetas soldadas y el material base.

Se observa que los valores de elongación disminuyen al soldar el material, cualquiera que sean los parámetros utilizados. Se aprecia que los mayores valores de porcentaje de elongación lo presentan las probetas soldadas sin material de aporte con una sola pasada, seguidas por las probetas soldadas sin material de aporte con dos pasadas. Los valores más bajos de porcentajes de elongación para este ensayo de tracción, los alcanzaron las probetas soldadas con material de aporte con una y dos pasadas.

3.4. Ensayo de microdureza Vickers

En las siguientes tablas y gráficos se muestran los resultados de los ensayos de microdureza realizados en las probetas hechas con diferentes parámetros de soldadura. Las indentaciones se realizaron desde el centro de la probeta (zona de fusión), hasta llegar al material base a la derecha. La distancia entre indentación e indentación fue de 0,5 milímetros en la zona afectada por el

calor; cuando se llegó al material base, la distancia entre indentaciones fue de 2 milímetros.

3.4.1. Uniones sin material de aporte – 1 pasada (Probeta 1)

En la tabla 3.6 se muestran los valores de dureza obtenidos mediante el ensayo de microdureza Vickers realizado en la probeta soldada sin material de aporte con una sola pasada. Se realizaron trece indentaciones partiendo el centro de la probeta (zona de fusión), hasta 9.5 milímetros a la derecha, es decir, hasta estar en el material base.

Tabla 3.6. Ensayo de dureza de probeta sin material de aporte – 1 pasada

PROBETA 1: Sin material de aporte - 1 pasada					
Número de huella	Distancia del centro a la huella (mm)	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal promedio (μm)	HV
1	0,5	52,5	48,0	50,25	146,9
2	1,0	53,5	49,5	51,50	139,8
3	1,5	52,5	50,0	51,25	141,2
4	2,0	53,0	51,5	52,25	135,9
5	2,5	52,0	51,0	51,50	139,8
6	3,0	55,0	50,5	52,75	133,3
7	3,5	54,5	51,5	53,00	132,0
8	4,0	53,0	52,0	52,50	134,6
9	4,5	53,5	53,0	53,25	130,8
10	5,0	53,0	52,5	52,75	133,3
11	5,5	54,0	53,5	53,75	128,4
12	7,5	55,5	52,0	53,75	128,4
13	9,5	54,5	53,0	53,75	128,4

En la figura 3.4 se muestra la curva de dureza obtenida con todos los valores de dureza.

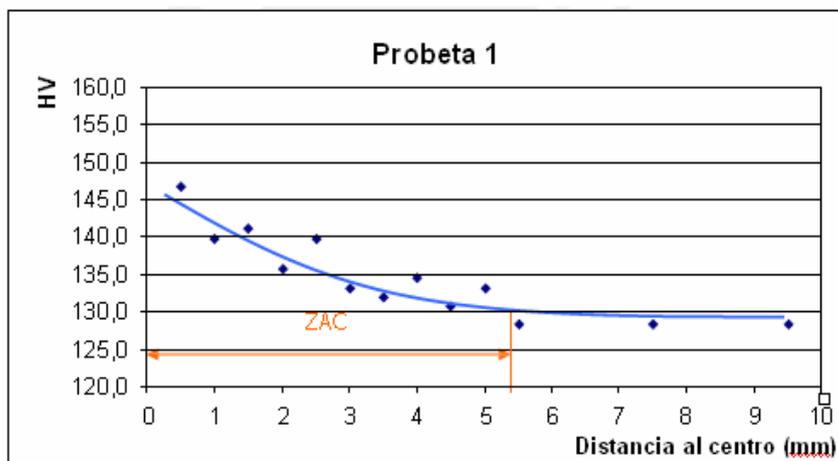


Figura 3.4. Curva de dureza HV para la probeta sin material de aporte – 1 pasada

Se observa que los mayores valores de dureza obtenidos se encuentran en el centro de la probeta, es decir, la zona de fusión. Esta zona alcanzó la más alta temperatura y también la mayor velocidad de enfriamiento, por ello su dureza aumenta, a diferencia de las zonas alejadas.

A medida que las indentaciones se van alejando de la zona fundida, los valores de dureza disminuyen hasta llegar a la dureza del material base. Para esta probeta no se alcanzaron dureza muy elevadas en el centro de la probeta; la mayor dureza alcanzada en esta probeta fue de 147 HV en la zona de fusión.

Asimismo en la figura 3.4 se muestra la tendencia de la curva de dureza que va desde el centro de la unión soldada hasta llegar al material base. Los valores de dureza alcanzados por esta probeta soldada sin material de aporte con una sola pasada, obtenidos en el centro de la unión soldada (zona de fusión) fueron los menores valores alcanzados en comparación a las demás probetas. Es por esta razón que la curva de tendencia es la más suave entre las cuatro probetas. Se aprecia también que la zona afectada por el calor presenta un valor de 5,5 milímetros desde el centro de la probeta.

3.4.2. Uniones sin material de aporte – 2 pasadas (Probeta 2)

En la figura 3.5 se muestra la curva de dureza realizada con todos los valores de dureza obtenidos con este ensayo para la probeta.

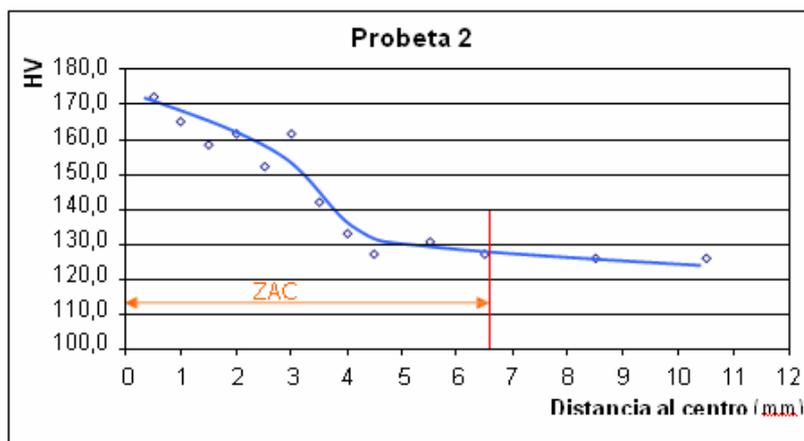


Figura 3.5. Curva de dureza HV para la probeta sin material de aporte – 2 pasadas

Se observa, que al igual que la muestra anterior, los mayores valores de dureza obtenidos se encuentran en el centro de la probeta, es decir, la zona de fusión. Esta probeta alcanzó durezas de 171 HV, mayores que en las

obtenidas con la probeta 1. A medida que las indentaciones se iban haciendo hacia la derecha, los valores de dureza iban disminuyendo hasta llegar a la dureza del material base. Asimismo en la figura 3.5 se muestra la tendencia de la curva de dureza que va desde el centro de la unión soldada hasta llegar al material base.

En esta curva de tendencia se observa claramente el aumento de la dureza en el centro de la unión soldada con respecto a la probeta 1. Se aprecia también que la zona afectada por el calor llega hasta 6,5 milímetros hacia la derecha del centro de la probeta (zona de fusión).

En la tabla 3.7 se muestran todos los valores de dureza obtenidos mediante el ensayo de microdureza Vickers realizado en la probeta soldada sin material de aporte con dos pasadas.

Tabla 3.7. Ensayo de dureza de probeta sin material de aporte – 2 pasadas

PROBETA 2: Sin material de aporte - 2 pasadas					
Número de huella	Distancia del centro a la huella (mm)	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal promedio (μm)	HV
1	0,5	47,0	46,0	46,50	171,5
2	1,0	48,0	47,0	47,50	164,4
3	1,5	50,0	47,0	48,50	157,7
4	2,0	50,0	46,0	48,00	161,0
5	2,5	51,0	48,0	49,50	151,4
6	3,0	48,0	48,0	48,00	161,0
7	3,5	52,5	50,0	51,25	141,2
8	4,0	54,0	52,0	53,00	132,0
9	4,5	54,5	54,0	54,25	126,0
10	5,5	54,0	53,0	53,50	129,6
11	6,5	54,0	54,5	54,25	126,0
12	8,5	55,0	54,0	54,50	124,9
13	1.5	55,5	53,5	54,50	124,9

Se realizaron trece indentaciones partiendo el centro de la probeta (zona de fusión), hasta 10,5 milímetros a la derecha, es decir hasta estar en el material base.

3.4.3. Uniones con material de aporte – 1 pasada (Probeta 3)

En la tabla 3.8 se muestran los valores de dureza obtenidos mediante el ensayo de microdureza Vickers realizado en la probeta soldada con material de aporte con una pasada. Se realizaron catorce indentaciones partiendo del

centro de la probeta (zona de fusión), hasta 7.5 milímetros a la derecha, es decir, hasta estar en el material base.

Tabla 3.8. Ensayo de dureza de probeta con material de aporte – 1 pasada

PROBETA 3: Con material de aporte - 1 pasadas					
Número de huella	Distancia del centro a la huella (mm)	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal promedio (μm)	HV
1	0,5	50,0	50,0	50,00	148,4
2	1,0	50,0	50,0	50,00	148,4
3	1,5	50,0	50,0	50,00	148,4
4	2,0	53,5	51,0	52,25	135,9
5	2,5	53,5	52,0	52,75	133,3
6	3,0	52,5	52,5	52,50	134,6
7	3,5	53,0	53,0	53,00	132,0
8	4,0	54,0	53,0	53,50	129,6
9	4,5	56,0	51,5	53,75	128,4
10	5,0	56,5	54,0	55,00	122,6
11	5,5	56,0	56,0	55,00	122,6
12	6,0	56,5	54,5	55,50	120,4
13	6,5	56,5	55,5	56,00	118,3
14	7,5	56,5	56,0	56,25	117,2

En la figura 3.6 se muestra la curva de dureza realizada con todos los valores de dureza obtenidos con este ensayo para la probeta soldada con material de aporte con una pasada (probeta 3). Se observa que los mayores valores de dureza obtenidos se encuentran en el centro de la probeta, es decir, la zona de fusión.

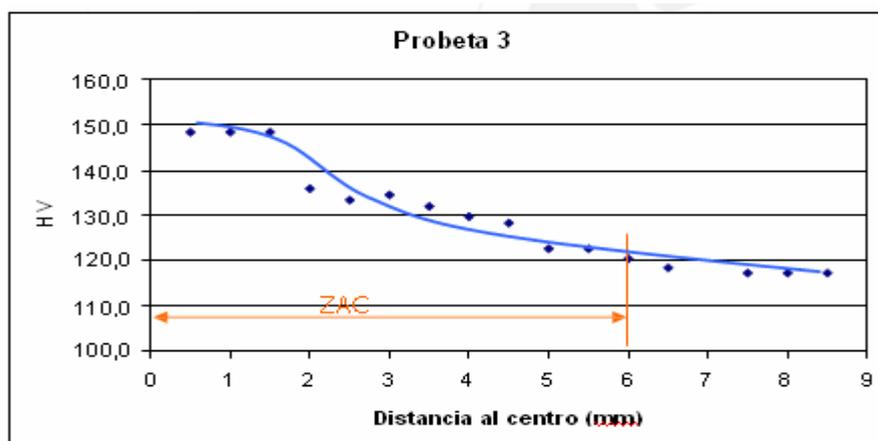


Figura 3.6. Curva de dureza HV para la probeta con material de aporte – 1 pasada

Esta probeta alcanzó durezas de 148 HV, similares a las obtenidas por la probeta soldada sin material de aporte con una pasada (probeta 1). A

medida que las indentaciones se iban haciendo hacia la derecha, los valores de dureza iban disminuyendo hasta llegar a la dureza del material base. Asimismo se muestra la tendencia de la curva de dureza que va desde el centro de la unión soldada hasta llegar al material base.

En esta curva de tendencia se observa, como en la probeta 1, que la variación de durezas entre el centro de la unión soldada y el material base, no es tan alta como en el caso de la probeta 2. Se aprecia también que la zona afectada por el calor llega hasta 6 milímetros desde el centro de la probeta.

3.4.4. Uniones con material de aporte – 2 pasadas (Probeta 4)

En la tabla 3.9 se muestran los valores de dureza obtenidos mediante el ensayo de microdureza Vickers realizado en la probeta soldada con material de aporte con dos pasadas. Se realizaron catorce indentaciones partiendo del centro de la probeta (zona de fusión), hasta llegar al material base.

Tabla 3.9. Ensayo de dureza de probeta con material de aporte – 2 pasadas

PROBETA 4: Con material de aporte - 2 pasadas					
Número de huella	Distancia del centro a la huella (mm)	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	Diagonal promedio (μm)	HV
1	0,5	43,0	44,0	43,50	196,0
2	1,0	43,5	45,0	44,25	189,4
3	1,5	44,0	45,0	44,50	187,3
4	2,0	44,0	44,5	44,25	189,4
5	2,5	45,0	45,0	45,00	183,2
6	3,0	45,0	46,5	45,75	177,2
7	3,5	45,0	46,5	45,75	177,2
8	4,0	49,0	49,0	49,00	154,5
9	4,5	50,5	51,5	51,00	142,6
10	5,5	51,5	51,5	51,50	139,8
11	6,5	55,0	53,0	54,00	127,2
12	7,5	54,0	51,5	52,75	133,3
13	8,5	56,5	54,0	55,25	121,5
14	9,5	57,0	55,0	56,00	118,3

En la figura 3.7 se muestra la curva de dureza obtenida. Se observa que los mayores valores de dureza obtenidos se encuentran en el centro de la probeta, es decir, la zona de fusión. Esta probeta alcanzó durezas de 196 HV, mayores que en las obtenidas con las probeta 3. A medida que las indentaciones se iban haciendo hacia la derecha, los valores de dureza iban disminuyendo hasta llegar a la dureza del material base. Asimismo se muestra

la tendencia de la curva de dureza que va desde el centro de la unión soldada hasta llegar al material base. En esta curva de tendencia se observa la gran variación de dureza entre el centro de la unión soldada y el material base; la variación es superior a los ensayos anteriores. Se aprecia también que la zona afectada por el calor llega hasta 8.5 milímetros desde el centro de la probeta.

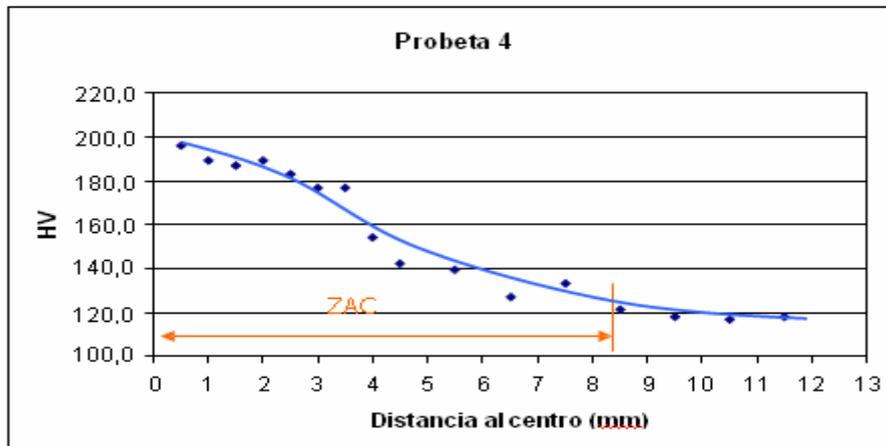


Figura 3.7. Curva de dureza HV para la probeta con material de aporte – 2 pasadas

• **Zona de rotura:** En la tabla 3.10 se muestran las longitudes de las ZAC de las cuatro probetas soldadas con sus diferentes parámetros, indicando la zona y lugar de rotura.

Tabla 3.10. Longitudes de ZAC de las probetas soldadas

Probeta	Material de aporte	Número de pasadas	Ancho total de ZAC (mm)	Zona de rotura medida desde el centro (mm)
1	Sin material de aporte	1 pasada	11	28 (Material base)
2	Sin material de aporte	2 pasadas	13	37 (Material base)
3	Con material de aporte	1 pasada	12	77 (Material base)
4	Con material de aporte	2 pasadas	17	46 (Material base)

Se aprecia que la rotura en todas las muestras se ubicó en el material base, en una zona alejada de la ZAC, indicando que los valores de las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tracción fueron los del material base y no del metal de soldadura ni de la zona afectada por el calor.

3.5. Ensayo de doblado

En las siguientes figuras se muestran los resultados de los ensayos de

doblado, de cara y de raíz, realizados en las probetas hechas con diferentes parámetros de soldadura.

En las figuras 3.12 y 3.13 se muestran las probetas soldadas sin material de aporte con una sola pasada, con doblado de cara y de raíz respectivamente. Se aprecia que en ninguno de los dos casos se presentan fisuras ni agrietamientos.

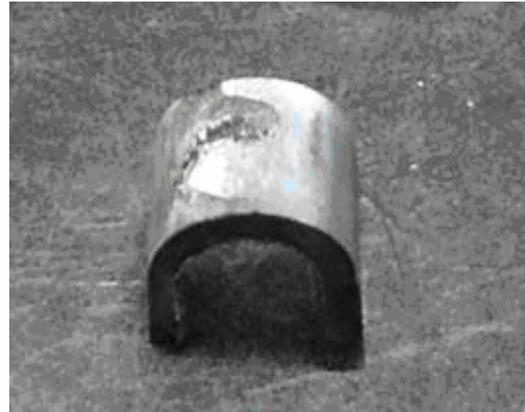


Figura 3.12. Doblado de cara en la probeta Figura 3.13. Doblado de raíz

En las figuras 3.14 y 3.15 se muestran las probetas soldadas sin material de aporte con dos pasadas, con doblado de cara y de raíz respectivamente. Se aprecia que en ninguno de los dos casos se presentan fisuras ni agrietamientos.

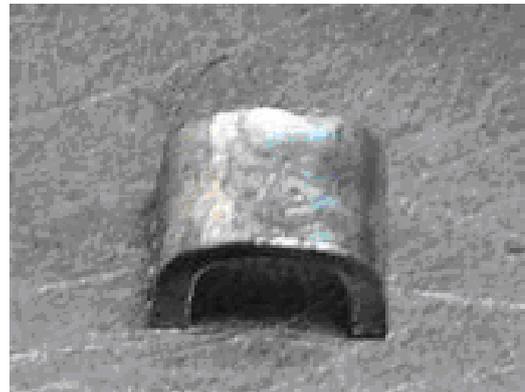


Figura 3.14. Doblado de cara en la probeta 2 Figura 3.15. Doblado de raíz

En las figuras 3.16 y 3.17 se muestran las probetas soldadas con material de aporte con una sola pasada, con doblado de cara y de raíz respectivamente. Se aprecia que en ninguno de los dos casos se presentan fisuras ni agrietamientos.



Figura 3.16. Doblado de cara en la probeta 3 Figura 3.17. Doblado de raíz

En las figuras 3.18 y 3.19 se muestran las probetas soldadas con material de aporte con dos pasadas, con doblado de cara y de raíz respectivamente. Se aprecia que en ninguno de los dos casos se presentan fisuras ni agrietamientos.



Figura 3.18. Doblado de cara en la probeta 4 Figura 3.19. Doblado de raíz

3.4. Análisis metalográfico

En las siguientes figuras se muestran los resultados de la metalografía y la caracterización microestructural de las secciones transversales de las cuatro probetas soldadas mediante el proceso GTAW con diferentes parámetros.

Se caracterizaron las tres zonas de las probetas soldadas, es decir, el material base, la zona afectada térmicamente (ZAT) y la zona fusión para las probetas soldadas sin material de aporte y el metal de soldadura para las probetas soldadas con material de aporte. Para las fotomicrografías se utilizaron aumentos de 200X y 500X.

3.4.1. Probeta sin material de aporte – 1 pasada

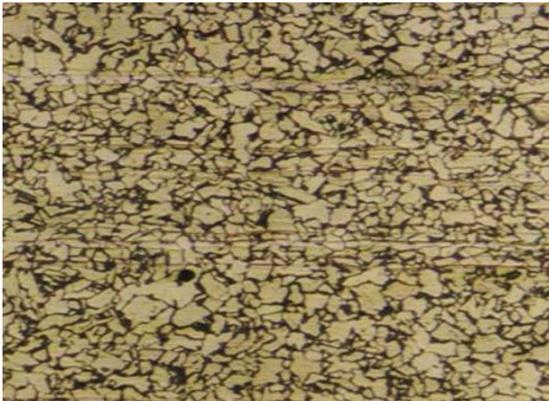


Figura 3.20. Material base izquierda (x200)

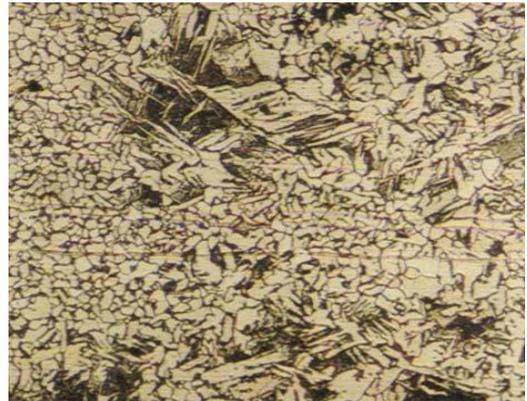


Figura 3.21. ZAT izquierda (x200)

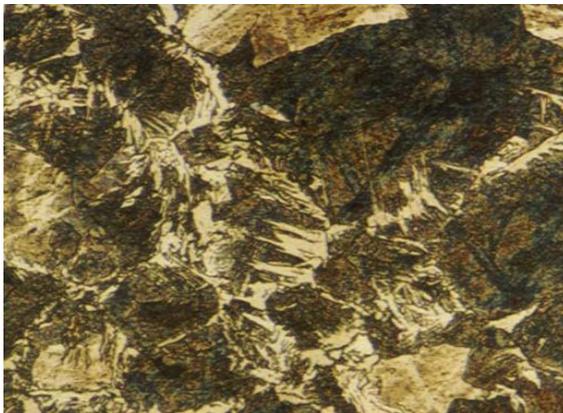


Figura 3.22. ZAT izquierda (x200)

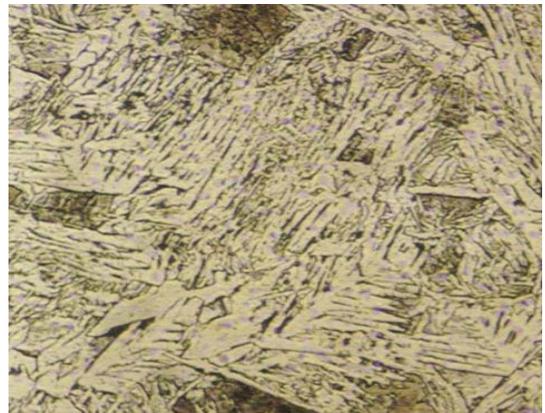


Figura 3.23. Zona de fusión (x200)

a) Material base: En la figura 3.20 se muestra el material base de la sección izquierda de la probeta sin material de aporte con una pasada, a 200 aumentos.

Microestructura:

Matriz : Ferrita equiaxial.
Otros : Perlita laminar fina 10 % y carburo globular fino.
Tamaño de grano : N° 8 - ASTM E112 - 97.
Inclusiones : Del tipo sulfuro serie fina N°2 - ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material : Microestructura compatible con acero de bajo carbono. Estado del material : Compatible con estado de normalizado.
Material de aporte : Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad : Perlita ligeramente deformada.

b) Zona afectada térmicamente: En las figuras 3.21 y 3.22 se muestra la zona afectada térmicamente de la sección izquierda de la probeta sin material de aporte con una pasada, a 200 aumentos.

Microestructura:

Matriz	: Ferrita acicular, reticular y equiaxial.
Otros	: Perlita fina globulizada y carburo globular fino.
Tamaño de grano	: ASTM E112 - 97.
Inclusiones	: Del tipo sulfuro. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono. Estado
	: Microestructura compatible con zona afectada térmicamente.
Material de aporte	: Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura distorsionada.

c) Zona de fusión: En la figura 3.23 se muestra la zona de fusión de la probeta sin material de aporte con una pasada, a 200 aumentos.

Microestructura:

Matriz	: Ferrita acicular y reticular.
Otros	: Carburo globular fino.
Tamaño de grano	: N° 8 - ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo no metálico. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono. Estado
	: Microestructura compatible con estado de colada. Material de aporte
	: Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura ferrítica acicular.

3.4.2. Probeta sin material de aporte – 2 pasadas

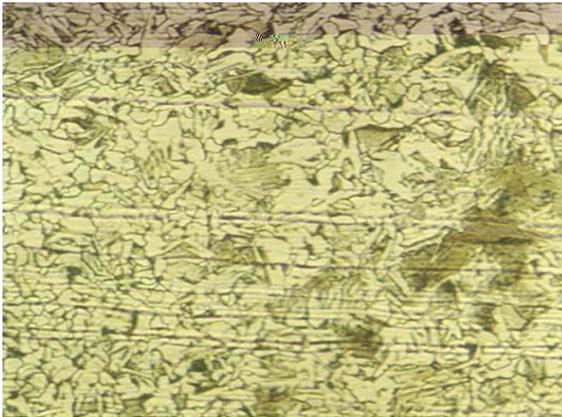


Figura 3.24. Material base (x200)

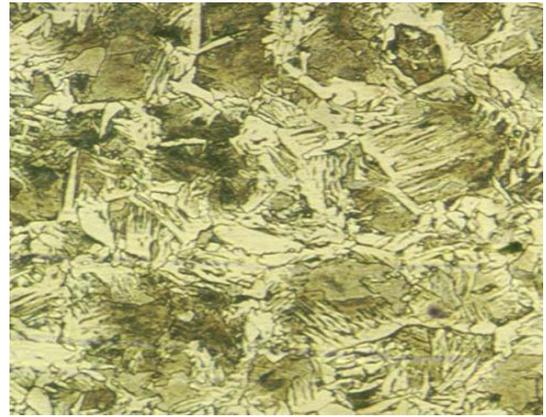


Figura 3.25. ZAT izquierda (x20).

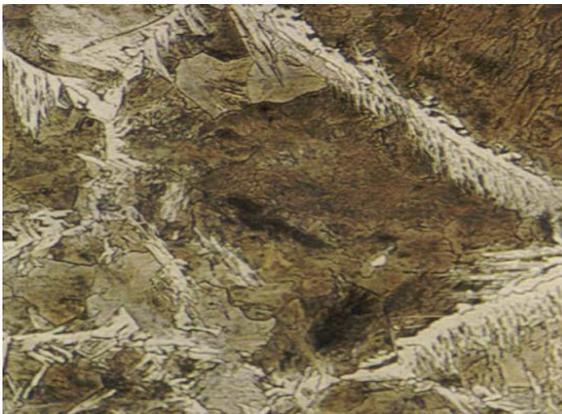


Figura 3.26. ZAT izquierda (x200)



Figura 3.27. Zona de fusión (x200)

a) Material base: En la figura 3.24 se muestra el material base de la sección izquierda de la probeta sin material de aporte con dos pasadas, a 500 aumentos.

Microestructura:

Matriz	: Ferrita equiaxial.
Otros	: Perlita laminar fina 10 % y carburo globular fino.
Tamaño de grano	: N° 8 - ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo sulfuro serie fina N°2 - ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
Estado	: Microestructura compatible con estado de normalizado.
Material de aporte	: Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura perlita bandeada y ferrita equiaxial deformada.

b) Zona afectada térmicamente: En las figuras 3.25 y 3.26 se muestran las zonas afectadas térmicamente, de la sección izquierda de la probeta sin material de aporte con dos pasadas, a 500 aumentos.

Microestructura:

Matriz : Ferrita acicular y reticular.
Otros : Perlita fina esferoidal en colonias y carburo globular fino.
Tamaño de grano : ASTM E112 – 97.
Inclusiones : Del tipo sulfuro. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material : Microestructura compatible con acero de bajo carbono. Estado : Microestructura compatible con zona afectada térmicamente.
Material de aporte : Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad : Microestructura distorsionada.

c) Zona de fusión: En la figura 3.27 se muestra la zona de fusión de la probeta sin material de aporte con dos pasadas, a 500 aumentos.

Microestructura:

Matriz : Ferrita acicular y reticular.
Otros : Carburo globular fino.
Tamaño de grano : N° 8 - ASTM E112 – 97.
Inclusiones : Del tipo no metálico. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material : Microestructura compatible con acero de bajo carbono.
Estado : Microestructura compatible con estado de colada.
Material de aporte : Sin material de aporte.
Tipo de discontinuidad : Microestructura ferrítica acicular.

3.6.3. Probeta con material de aporte – 1 pasada

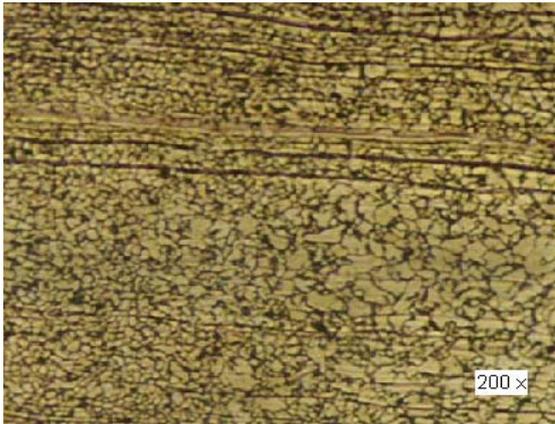


Figura 3.28. Material base Izq (x200)

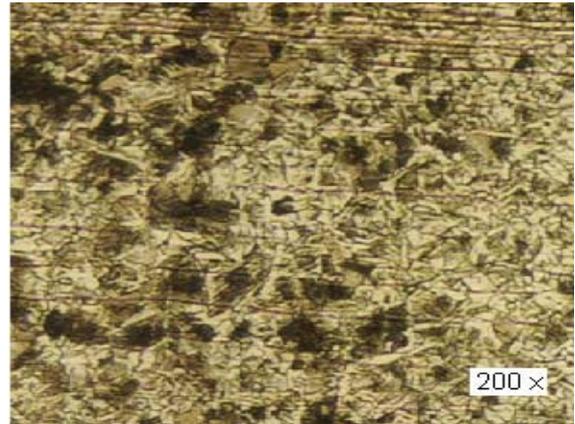


Figura 3.29. ZAT izquierda (x200)

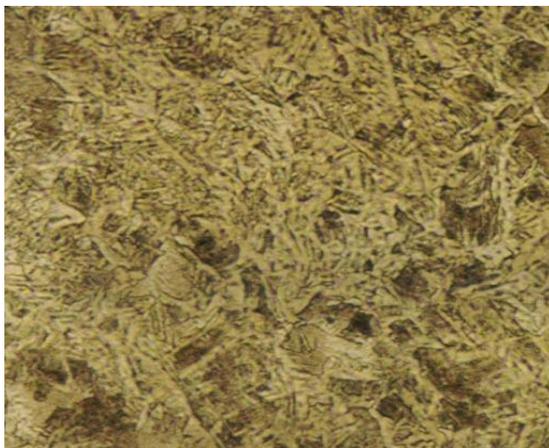


Figura 3.30. ZAT izquierda (x200)

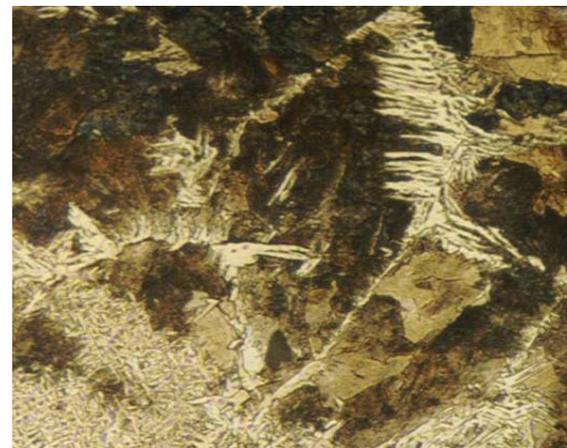


Figura 3.31. Material de aporte (x200).

a) Material base: En la figura 3.28 se muestra el material base de la sección izquierda de la probeta con material de aporte con una pasada, a 200 aumentos.

Microestructura:

Matriz	: Ferrita equiaxial
Otros	: Perlita laminar fina 7 % y carburo globular fino
Tamaño de grano	: N° 8 - ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo sulfuro serie fina N°2 - ASTM E45 - 96
Material de aporte	: Electrodo ER70 - S6.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura perlita ligeramente bandeada.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo
----------	--

carbono.

Estado : Microestructura compatible con estado de normalizado.

Material de aporte

b) Zona afectada térmicamente: En las figuras 3.29 y 3.30 se muestran las zonas afectadas térmicamente, de la sección izquierda de la probeta con material de aporte con una pasada, a 500 aumentos.

Microestructura:

Matriz : Ferrita acicular y reticular.

Otros : Perlita fina esferoidal y carburo globular fino

Tamaño de grano : ASTM E112 – 97.

Inclusiones : Del tipo sulfuro. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material : Microestructura compatible con acero de bajo carbono. Estado : Microestructura compatible con zona afectada térmicamente.

Material de aporte : Electrodo ER70 - S6.

Tipo de discontinuidad : Microestructura distorsionada.

c) Zona de fusión: En la figura 3.31 se muestra la zona de fusión de la probeta con material de aporte con una pasada, a 500 aumentos.

Microestructura:

Matriz : Ferrita acicular y reticular.

Otros : Carburo globular fino y perlita globular.

Tamaño de grano : ASTM E112 – 97.

Inclusiones : Del tipo no metálico. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material : Microestructura compatible con acero de bajo carbono. Estado : Microestructura compatible con estado de colada.

Material de aporte : Electrodo ER70 - S6.

Tipo de discontinuidad : Microestructura ferrítica acicular.

3.6.4. Probeta con material de aporte – 2 pasadas

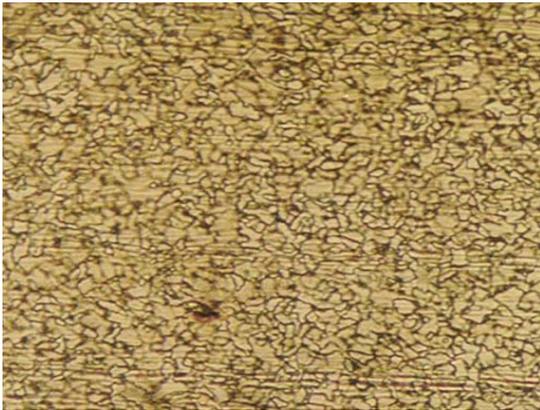


Figura 3.32. Material base (x200)



Figura 3.33. Material base – ZAT (x200)

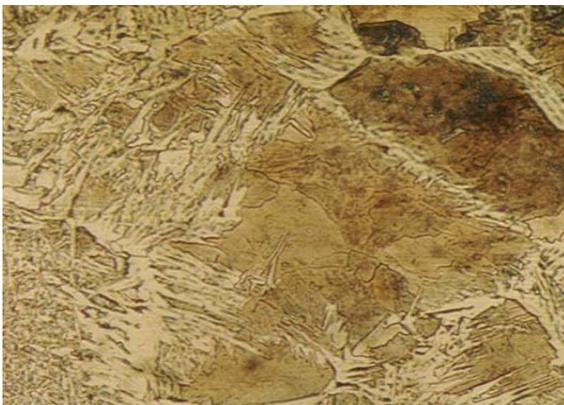


Figura 3.34. ZAT – Material de aporte (x200)



Figura 3.35. Material de aporte (x200)

a) Material base: En la figura 3.32 se muestra el material base de la sección izquierda de la probeta con material de aporte con dos pasadas, a 500 aumentos.

Microestructura:

Matriz : Ferrita equiaxial.

Otros : Perlita laminar fina 10% y carburo globular fino.

Tamaño de grano : N° 8 - ASTM E112 – 97.

Inclusiones : Del tipo sulfuro serie fina N°2 - ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material : Microestructura compatible con acero de bajo carbono.

Estado : Microestructura compatible con estado de normalizado.

Material de aporte : Electrodo ER70 - S6.

Tipo de discontinuidad : Microestructura perlita bandeada ligeramente.

b) Zona afectada térmicamente: En las figuras 3.33 y 3.34 se muestran las

zonas afectada térmicamente de la sección izquierda de la probeta con material de aporte con una pasada, a 500 aumentos.

Microestructura:

Matriz	: Ferrita acicular y reticular.
Otros	: Carburo globular fino.
Tamaño de grano	: ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo no metálico. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono. Estado
	: Microestructura compatible con estado de colada. Material de aporte
	: Electrodo ER70 - S6.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura ferrífica acicular

c) Zona de fusión: En la figura 3.35 se muestra la zona de fusión de la probeta con material de aporte con dos pasadas, a 500 aumentos.

Microestructura:

Matriz	: Ferrita acicular y reticular.
Otros	: Carburo globular fino.
Tamaño de grano	: ASTM E112 – 97.
Inclusiones	: Del tipo no metálico. ASTM E45 – 96.

Caracterización:

Material	: Microestructura compatible con acero de bajo carbono. Estado
	: Microestructura compatible con estado de colada. Material de aporte
	: Electrodo ER70 - S6.
Tipo de discontinuidad	: Microestructura ferrífica acicular.

Es normal que por el proceso de soldeo se presenten los cambios microestructurales mostrados en las fotomicrografías. En este caso concreto, se tiene un acero de bajo carbono por lo que estos cambios no influyen de manera significativa en las propiedades mecánicas como lo demuestran los ensayos mecánicos.

3.7. Valoración económica

Al evaluar los costos en los cuales se incurrió, se tuvo en cuenta mano de obra, consumo eléctrico entre otros, en la tabla 3.13, aparece el resumen de los costos.

Tabla 3.13. Costo de soldadura de las piezas.

Costo de soldadura de la pieza.			
Tipo de material	Costo del material(\$)	Peso del semiproducto (kg)	Precio (\$)
Acero A 36	12,50	0,14	1,75
Operario	Tarifa (\$)	Tiempo efectivo(h/\$)	Costo (\$)
Soldador A	2,57	0,45	1,15
Salario Básico (Sb) = Suma de los costos = \$ 3,50			
Salario complementario Sc = (Sb*0,1) = \$ 0,35			
Aporte a la seguridad social Ss = (Sc + Sb)*0,09 = \$ 0,34			
Gasto de Energía			
Máquinas	Tiempo trab (h)	Potenc máquina/kW	Energ cons. (kW/h)
Máquina de soldar	0,45	1,5	0,68
Costo Energía			
Máquina de soldar	$C_{m\acute{a}q} = 0,06.Ec = 0,041$	Costo Energía Eléctrica. Ce = 0,54	
Costo Total = \$ 5,45 x 16 = 87,20 CUP			

3.8. Análisis de las afectaciones en la soldadura

La soldadura es actualmente una de las principales ocupaciones con que cuenta la Industria Mecánica Nacional. Durante todos estos años se ha estado realizando una serie de inversiones en ella, con el objetivo de aumentar sus capacidades de producción, así como diversificar la misma. Sin embargo, la protección e higiene del trabajo han estado un tanto alejadas de los planos en que merecen realmente estar; esto ha repercutido en un aumento de los accidentes vinculados con las operaciones de soldadura.

Aunque el aspecto de las afectaciones a la salud y seguridad de los trabajadores vinculados con el proceso de soldadura ha estado históricamente ligado a los procesos de fabricación mediante este método, no es común que en la bibliografía relacionada con el tema, aparezcan con frecuencia referencias a las afectaciones que provocan estos procesos en el ser humano, aunque de forma aislada sí ha podido encontrarse información relacionada con esto.

En la Enciclopedia de la soldadura, publicada en el año 1921 en Chicago, se relaciona lo siguiente:

Los rayos del arco eléctrico son de tal grado de intensidad que el ojo desnudo o la piel no deben exponerse a ellos dentro de 20 pies del punto en que el arco está en funcionamiento. Los rayos del arco eléctrico son más dañinos que los rayos de la luz del sol de la misma intensidad. Las lesiones causadas por la luz del arco son debidas a la intensidad de la luz y no a su composición. El efecto de exposición a esta es similar a las quemaduras de sol, es doloroso, temporal y en ningún caso los daños son permanentes. Donde los operadores están usando el arco eléctrico debe ser una práctica habitual, para proporcionar seguridad a los demás trabajadores, el uso de pantallas portátiles, para que la luz del arco no interfiriera a otros hombres que trabajan en la vecindad...

La seguridad del trabajo ha ido evolucionando, al principio su campo de acción se limitaba a los factores mecánicos y ambientales, posteriormente el hombre fue el objeto de su más cuidadoso estudio. Se descubre el factor humano y su importancia se pone de relieve al analizar los casos de accidentes del trabajo.

Por otra parte, hay que señalar que en la actualidad un aspecto importante que limita la protección en los trabajadores de soldadura, sobre todo para países pobres, tiene que ver con el alto precio de los equipos de protección. Muchas industrias a causa de no disponer de los capitales suficientes o en ocasiones para no hacer inversiones que afecten sus ganancias, no crean las condiciones necesarias de protección, a riesgo de afectar la salud de los trabajadores. Una dificultad que tienen que afrontar las industrias de los países pobres es la relacionada con la transferencia de tecnología en el campo de la protección. En ocasiones los equipos y medios son desarrollados por transnacionales y estos de ningún modo se ponen a la disposición de la mayoría de los países, incluso ni a los acostumbrados altos precios.

3.8.1. Generación de humo durante el proceso de soldadura

La soldadura por arco es un proceso común, en el cual se produce un aumento significativo del humo en el medio inmediato del soldador, afectando así su confort y su salud. El humo de soldadura es una mezcla de partículas finas y gases suspendidos en el aire.

Aproximadamente de un 0,5 al 1 % de los consumibles de la soldadura al arco



se convierte en polvos y humos contaminantes. En el Reino Unido, por ejemplo, donde se gastan 70 000 toneladas de consumibles de soldadura anualmente, se plantea que esto equivale a 1 000 kg de humo y polvo por soldador. Otra estadística preocupante es que en la soldadura manual y MIG la concentración de humos dentro de la careta con frecuencia excede los límites permisibles si no se toman las medidas de prevención.

3.9. Conclusiones del capítulo 3

- ✓ Las resistencias obtenidas en las uniones soldadas con y sin material de aporte corresponden a los del material base, en los ensayos de tracción rompen en el material base, alejados de la ZAC, por lo que la resistencia mecánica satisface los cuatro casos estudiados.
- ✓ Las uniones que presentaron mayores valores de elongación fueron las muestras soldadas sin material de aporte con una pasada, alcanzando el 69 % de la elongación del material base.
- ✓ En la valoración económica del proceso de soldadura del acero A 36 por proceso GTAW se consideró mano de obra y máquinas, todo ellos relacionado con los gastos en los que se incurren.
- ✓ Se pudo determinar que de un 0,5 al 1 % de los consumibles de la soldadura al arco se convierte en polvos y humos contaminantes, cuando se gastan 70 000 toneladas de consumibles, es equivalente a 1 000 kg de humo y polvo por soldador.



Conclusiones generales

- Para establecer el comportamiento de la soldadura GTAW con y sin material de aporte del acero AISI A 36, se realizaron probetas para ensayo de doblado, para ensayo de tracción, demostrándose la soldabilidad que presentaron las mismas.
- Se determinó que en probetas soldadas sin material de aporte se obtiene una estructura de ferrita equiaxial deformada y con material de aporte se obtienen estructuras del tipo Perlita fina esferoidal y carburo globular, lo que demuestra que se puede realizar el proceso se puede realizar sin material de aporte para minimizar gastos innecesarios.
- Se pudo determinar que los consumibles de la soldadura al arco se convierten en polvos y humos contaminantes, los cuales generan patologías que causan lesiones de gran impacto al soldador.
- Según la ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles que se utiliza como norma empresarial el costo total empleado en el desarrollo del experimento fue de 87,20 CUP.



Recomendaciones

- ✓ Proponer a la Empresa “Comandante Gustavo Machin Hoed de Beche” la realización del proceso de soldadura del A 36 sin metal de aporte como método de unión de piezas.
- ✓ Realizar en próximas investigaciones la dureza promedio de los microconstituyentes de las microestructuras obtenidas con y sin metal de aporte.
- ✓ Generalizar los resultados de este trabajo en otro proceso de soldadura como el GMAW, para determinar el comportamiento mecánico de la unión realizada.

BIBLIOGRAFÍAS

Bibliografías

1. American Society for Testing and Materials, 1998 Annual Book of ASTM Standards– Iron and Steel Products, Vol. 01.04, 1998.
2. American Welding Society, Welding Handbook, eight editions, 1987.
3. ASM International. Trends in Welding Research. (2003).
4. Bakker, F.; y Horestreydt, A., Soldadura por arco, Madrid, 1968.
5. Blunt, J.; y Nigel, C., Health and Safety in Welding and Allied Processes. 2002.
6. Burgos, J., Tecnología de soldadura. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, 1987.
7. Cary, H.; y Scott, C., Modern Welding Technology. Upper Saddle River. 2005.
8. Cary, Howard, Modern Welding Technology, fourth edition, N Prentice Hall, 1998.
9. Fosca, C., Introducción a la metalurgia de la soldadura, Lima PUCP, cuarta edición, 2003.
10.) García, P. y Casto, M., Metodología para la enseñanza práctica de soldadura por arco eléctrico. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983.
11. Gerken, J., Gas Tungsten Arc Welding, James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1991.
12. Giraldo, J., y Chaves, C., El agrietamiento Inducido por Hidrógeno en Soldadura de Acero, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, 2000.
13. Glizmanenko, O., Soldadura y corte de metales. La Habana. Instituto Cubano del Libro. 1975.
14. González, V., Manual de Soldadura a Fuego. Plátano Editora. Lisboa. 1978.
15. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial MIR. 1983.
16. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial MIR. 1983.
17. Hernández, G., Manual del soldador, Madrid CESOL, décimo quinta edición, 2006.
18. Hicks, J., Welded Joint Design. 1999.
19. Horwitz, H., Enciclopedia de la soldadura, Mexico Ediciones PC, 1990.

20. James, M., y Back, O., Medidas no destructivas cuantitativas de Tensiones Residuales. CRC, Revisión crítica en ciencias de los materiales en estado sólido. Vol. 9, Issue 1. 1980.
21. Jefferson, T., Metals and how to weld them, OH James F. Lincoln Arc Welding Foundation, second edition, 1990.
22. Jellison, R., Welding Fundamentals, NJ Prentice Hall, 1996.
23. Kalpakjian, S.; y Steven R., Schmid. Manufacturing Engineering and Technology. 2001.
24. Kalpakjian, S., Manufactura, ingeniería y tecnología, 2002.
25. Lajtin, Y., Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1ed. Editorial Mir Moscú. 1973.
26. Lancaster, J., Metalurgia de la soldadura. Sixth Ed., 256-268, Woodhead Publishing, Abington Cambridge, England. 1999.
27. Lean, P., Introducción a la Ingeniería de Materiales, Lima PUCP, 2008.
28. Lincoln Electric. The Procedure Handbook of Arc Welding. 1994.
29. O'Brien, R., Manual de soldadura, México: Prentice-Hall. 1996.
30. Pekka, N., Predictive Model for the Prevention of Weld Metal Hydrogen Cracking in High Strength Multipass Welds. Doctorate thesis, University of Oulu, Faculty of Technology. 2003.
31. Pero - Sanz, J., Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades, Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición.
32. Pitrun, M., The Effect of Welding Parameters on Levels of Diffusible Hydrogen in Weld Metal Deposited Using Gas Shielding Rutile Flux Cored Wires, doctorate thesis, The University of Wollongong, Dpt. of Materials Engineering. 2004.
33. Rodríguez, H., Metalurgia de la Soldadura. Edit Pueblo y Educación 1983.
34. Weman, K., Welding processes handbook, 2003.
35. Zavaleta, N., Metalografía de aceros y fundiciones.
36. Zinn, W., y Scholtes B., In Handbook of Residual Stresses and Deformation of Steel, Edited by G. Totten, M. Howes and T. Inoue, ASM International. 2002.