



Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia - Química

Análisis de las propiedades físicas mecánicas en uniones soldadas de acero al carbono, a través de la soldadura manual por arco eléctrico.

Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

Autora: Learis Yanet Romero Alarcón

Tutora: Ms C Aurelia Viada Estévez

Moa 2023

Declaración de Autoridad:

Yo: Learis Yanet Romero Alarcón. Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Learis Yanet Romero Alarcón _____

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 el Ms. C. Aurelia Viada Estévez

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. Y en especial a mi hermano, amigo, padre Joao Afonso Chipepe

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 dedicarle este trabajo

A mi abuela: Alberta Corrales Castillo

A mi abuelo: Agustín Alena Aldana

A mi madre: Luz María Alarcón Sánchez

A mi padre: Israel Antonio Romero Ferrales.

A mis hijos: Liara Valeria Iglesias Romero y Liam Luciano Iglesias Romero

A demás familiares que me ayudaron e hicieron posible mi sueño de ser profesional Mis Tías, (Yunieska Ríos Tamayo; Leticia Milán Tamayo; Daisy Alarcón Corrales; Ramon Alarcón Corrales)

A todos, gracias

RESUMEN

En el trabajo se analizaron el comportamiento microestructural y la microdureza en la unión soldada del acero al carbono empleando como material de aporte el electrodo de tipo E 7018 de diámetros de 3 mm, a través del proceso de soldadura manual por arco eléctrico. Para establecer el procedimiento se prepararon las planchas con espesor de 8 mm y la unión metalúrgica se llevó a cabo en forma de V a 60°, las cuales fueron soldadas y caracterizado el comportamiento microestructural en las diferentes zonas de influencia térmica. Para la medición de la microdureza se trabajó con la norma ASTM NORMA E18 – 89a; y las mediciones fueron realizadas con un durómetro Vicker, usando una carga de 100 kgf/mm² (10 MPa) en la escala Vicker y en el análisis microestructural pudiéndose determinar características tales como forma, tamaño, y distribución de grano. De acuerdo a los resultados obtenidos se estableció que el electrodo E7018, solidifica con una estructura ferrita más perlita, siendo propensa al agrietamiento por la aparición de fases duras que provoca rotura de la unión soldada. en la zona de influencia térmica (ZF) 186 HV, en la zona afectada térmicamente de 188,3 HV y en la zona de influencia térmica (ZIT) 214,2 HV. El aumento de las microdureza se asocia al incremento de la presencia de la estructura de ferrita más perlita. Al realizar el costo económico del proceso de soldadura del acero al carbono se obtuvo un valor total de 37, 63 MLC, siendo factible el proceso para el CMNi.

Palabras claves: acero al carbono, material de aporte, soldadura,

Abstract

In the work, the microstructural behavior and microhardness in the welded joint of carbon steel were analyzed using the type E 7018 electrode with a diameter of 3 mm as a filler material, through the manual electric arc welding process. To establish the procedure, the 8 mm thick plates were prepared and the metallurgical joint was carried out in a V shape at 60°, which were welded and the microstructural behavior in the different zones of thermal influence was characterized. To measure microhardness, the ASTM STANDARD E18 – 89a was used; and the measurements were carried out with a Vicker durometer, using a load of 100 kgf/mm² (10 MPa) on the Vicker scale and in the microstructural analysis, characteristics such as shape, size, and grain distribution could be determined. According to the results obtained, it was established that the E7018 electrode solidifies with a ferrite plus pearlite structure, being prone to cracking due to the appearance of hard phases that cause breakage of the welded joint. in the thermal influence zone (ZF) 186 HV, in the thermally affected zone 188.3 HV and in the thermal influence zone (ZIT) 214.2 HV. The increase in microhardness is associated with the increase in the presence of the ferrite plus pearlite structure. When carrying out the economic cost of the carbon steel welding process, a total value of 37.63 MLC was obtained, making the process feasible for CMNi.

Keywords: carbon steel, filler material, welding,

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| Introducción..... | 1 |
| CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS | 4 |
| Introducción | 4 |
| 1.1 Características de los aceros..... | 4 |
| 1.1.1 Propiedades físicas del acero | 5 |
| 1.1.2 Propiedades químicas del acero..... | 6 |
| 1.1.3 Propiedades mecánicas del acero | 6 |
| 1.1.4 Tipos de acero | 7 |
| 1.1.5 Aplicaciones del acero: el material esencial en la industria moderna | 7 |
| 1.1.6 Tipos de acero utilizados en los procesos de soldadura..... | 8 |
| 1.1.7 Alteraciones en la estructura de los aceros | 9 |
| 1.2 Generalidades sobre la soldadura | 10 |
| 1.3 Electroodos (material de aporte)..... | 11 |
| 1.4 Soldabilidad de las Aceros..... | 13 |
| 1.4.1 Afectaciones del calor en la soldadura..... | 15 |
| 1.4.2 Efecto de la temperatura..... | 16 |
| 1.4.3 Transformaciones del acero en condiciones de soldadura | 17 |
| 1.4.4 Baño fundido y continuidad en la soldadura y el material base | 17 |
| 1.4.5 Transformaciones en la fase sólida durante el calentamiento | 18 |
| 1.4.6 Crecimiento del grano | 19 |
| 1.4.7 Transformaciones en la fase sólida durante el enfriamiento | 20 |
| 1.4.7.1 Transformación perlítica..... | 21 |
| 1.6 Antecedentes de la investigación..... | 23 |
| 1.7 Conclusiones del capítulo 1 | 25 |
| CPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 26 |

| | |
|---|-----------|
| Introducción | 26 |
| 2.1 Composición química del acero AISI 1025 | 26 |
| 2.1.2 Composición química del material de aporte Electrodo E7018. | 28 |
| 2.2 Material de aporte para la soldadura..... | 28 |
| 2.2.1 Características del electrodo E 7018 | 28 |
| 2.3 Materiales y equipos empleados en la realización del experimento..... | 29 |
| 2.3.1 Máquina para soldar empleado en la investigación | 30 |
| 2.4 Preparación metalográfica de la probeta | 31 |
| 2.4.1 Desbaste y pulido..... | 32 |
| 2.4.2 Limpieza y lavado de las superficies a investigar..... | 33 |
| 2.4.3 Ataque químico | 33 |
| 2.4.5 Ensayo de microdureza dureza..... | 34 |
| 2.4 Cálculo del carbono equivalente | 36 |
| 2.5 Metodología de cálculo para el proceso de soldadura | 36 |
| 2.5.1 Intensidad de corriente..... | 37 |
| 2.5.2 Voltaje del arco eléctrico | 38 |
| 2.5.3 Velocidad de soldadura..... | 38 |
| 2.5.4 Energía lineal del proceso de soldadura | 39 |
| 2.5.5 Cálculos numéricos para la soldadura | 39 |
| 2.5.6 Velocidad de enfriamiento del cordón | 40 |
| 2.6 Cálculo de costo del proceso de soldadura | 41 |
| 2.7 Conclusiones..... | 44 |
| CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS | 45 |
| Introducción | 45 |
| 3.1 Análisis de la composición química del material base | 45 |
| 3.2 Análisis del cálculo del carbono equivalente total | 46 |
| 3.3 Análisis microestructural | 46 |

| | |
|--|----|
| 3.4 Análisis de microdureza | 49 |
| 3.5 Análisis del cálculo de los parámetros de soldadura..... | 50 |
| 3.6 Análisis del costo del proceso de soldadura | 52 |
| 3.7 Protección al hombre y medioambiente | 53 |
| Conclusiones Generales | 56 |
| Recomendaciones..... | 57 |
| Bibliografía | 58 |
| Anexo | |

INTRODUCCIÓN

En los procesos de producción de estructura metálica mediante construcciones soldadas en la industria, a través de la soldadura, están sujetos 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. Con el desarrollo de nuevos materiales los procesos de unión han ido variando con el de cursar del tiempo; 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 y 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. 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 (. En la actualidad nuestro país tiene como objetivo según la Agenda 20-30 aprobada por la Asamblea del Poder Popular y el PPC, una de sus aristas principales es que se debe de evitar la importación de toda clase de materia prima, tratando de que seamos capaces de desarrollarnos con los recursos que estén en nuestro alcance, teniendo en cuenta la importancia de la vinculación de las empresas con las universidades. Nuestra universidad no está ajena a esto siendo de gran potencial científico en

el municipio de Moa para potenciar su desarrollo, realizándose varios trabajos investigativos que satisfagan las necesidades del cliente y de la sociedad.

La empresa Mecánica de Níquel tiene la responsabilidad de la construcción de un tanque para el almacenamiento de fiu - oil, empleado en la universidad, las cuales deben cumplir las exigencias del cliente y los aspectos de calidad, por lo que surge la necesidad de realizar la investigación donde deben de ser analizados los parámetros físicos mecánicos en las uniones soldadas de dicha estructura metálica.

Situación problemática

En las industrias, la recuperación por soldadura se ha convertido en una práctica habitual, donde equipos fabricados con aceros de bajo contenido de carbono se someten a un proceso de recuperación o restablecimiento de sus parámetros con el empleo de materiales de aportes, las cuales presentan diferentes composiciones químicas que las caracterizan, por lo que se necesita realizar un estudio sobre las características físicas mecánicas en las uniones soldadas durante la construcción del tanque de almacenamiento de combustible..

Problema a investigar

Aunque existen procedimientos establecidos para la soldadura de aceros de bajo contenido de carbono, surge la necesidad de realizar un estudio de los parámetros físicos mecánicos en la unión soldada teniendo como material base el acero al carbono y material de aporte UTP – 7018 y determinar de acuerdo a sus propiedades si es conveniente la construcción del tanque de almacenamiento de combustible de la Universidad de Moa por soldadura manual por arco eléctrico empleando como material de aporte el UTP – 7018.

Como **objeto de estudio**: Unión soldada de acero de bajo contenido de carbono.

Objetivo general: Analizar las propiedades físicas mecánicas en la unión soldada mediante la soldadura manual por arco eléctrico, empleando como material base un acero al carbono y material de aporte UTP – 7018, utilizados para la construcción del tanque de almacenamiento de combustible de la Universidad de Moa.

Objetivos específicos:

1. Realizar un estudio sobre los antecedentes de investigación.
2. Caracterizar el procedimiento de unión de soldadura, por arco eléctrico.
3. Determinar la microestructura y microdureza en la interface del cordón de soldadura del acero.

Como posible solución al problema se formula la siguiente **hipótesis**:

El proceso de soldadura de aceros de bajo contenido de carbono empleando como material de aporte el electrodo UTP – 7018, se podrá caracterizar el proceso de solidificación a partir de las microestructuras y microdureza, para poder determinar si el electrodo empleado es el ideal en la construcción del tanque de almacenamiento de combustible de la Universidad de Moa que garantice la calidad de la unión soldada en la estructura metálica.

El **campo de acción**: Microestructura y microdureza en las interfaces del cordón de soldadura con diferentes materiales de aportes.

Para dar cumplimiento a este objetivo han sido trazadas las siguientes **tareas**:

1. Establecer del estado del arte relacionado con el objeto de estudio.
2. Caracterizar experimentalmente el proceso de soldadura de aceros de bajo contenido de carbono, para la determinación del comportamiento microestructural y la microdureza.
3. Analizar los resultados y fundamentación del proceso metalúrgico de la unión del acero de bajo contenido de carbono con un material de aporte.
4. Analizar los efectos económicos y ambientales del proceso de soldadura.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Introducción

Actualmente la mayoría de los procesos de soldadura se llevan a cabo mediante la aplicación de calor a las piezas a unir. Este calor es, a menudo, de suficiente intensidad y cantidad como para producir la fusión de los materiales a unir. El calor aplicado a los materiales metálicos produce un cambio en su estructura metalográfica, cuando la temperatura alcanzada supera un determinado valor característico para cada metal o aleación. La modificación de la estructura conlleva a la variación de las propiedades de material. El objetivo del capítulo es realizar la búsqueda de información relacionada con el proceso de soldadura de recargue con electrodo cubierto en acero de bajo contenido de carbono.

1.1 Características de los aceros

Aleación de hierro con pequeñas cantidades de carbono y que adquiere con el temple gran dureza y elasticidad. El acero admite tratamientos térmicos que mejoran algunas de sus cualidades. Arma blanca, especialmente la espada.

El acero es una aleación de hierro y carbono en un porcentaje de este último elemento variable entre el 0,008 % y 2,11 % en masa de su composición. La rama de la metalurgia que se especializa en producir acero se denomina siderurgia o acería

Las propiedades del acero dotan a este material de una gran capacidad de cara a utilizarse, entre otras muchas situaciones, en el sector de la construcción. Y es que, debido a sus características, el acero es muy resistente a la tracción y a la compresión, siendo ideal para la construcción de grandes y pesadas estructuras. También es muy resistente a la corrosión y es muy duradero, características que lo convierten en un material perfecto para ambientes húmedos. Según (Aristizábal et al. 2009)

El acero es esencialmente hierro mezclado con otros elementos como:

Carbono: Reduce la ductilidad y soldabilidad del hierro mientras añade dureza a la mezcla.

Aluminio. Se produce acero de grano fino.

Azufre: Se añade para aumentar la maquinabilidad del acero.

Cromo: Aumenta la profundidad de endurecimiento.

Cobre: Aumenta la resistencia a la corrosión.

Manganeso: Opera como desoxidante y neutraliza el azufre, facilitando la laminación y moldeo.

Silicio: Antioxidante y endurecedor.

Níquel: Mejora el resultado del tratamiento térmico, y junto con el cromo, previene el desgaste.

Molibdeno. Mejora el resultado del tratamiento térmico, aumenta la dureza y resistencia a la temperatura. (Derichebourg. 2020)

El acero se caracteriza por ser un material que se puede soldar con mucha facilidad. Es un material más duro que el hierro (y por ende más frágil), es un buen conductor de la electricidad y del magnetismo. Tiene la capacidad de conservar su forma después de ser sometido a un esfuerzo. Cuentan con la facilidad de ser roto al ser sometido a un esfuerzo. Resiste a la aplicación de una fuerza externa sin romperse. Tiene un cuerpo que incluye lo relacionado al peso, volumen, masa y densidad del acero. Es capaz de conducir temperatura y emanar rayos infrarrojos en el medio (radiación). (Matos et al. 2012)

1.1.1 Propiedades físicas del acero

Las propiedades físicas del acero son muy importantes de cara a entender tanto la composición, como la relevancia de dicho material. A continuación, tal y como hemos hecho en el apartado anterior, mencionaremos y explicaremos en profundidad algunas de las principales. (Díaz- Campoverde. 2019)

Propiedades térmicas. El acero es un material muy resistente a las altas temperaturas. Su punto de fusión es de aproximadamente 1.500°C, lo que lo convierte en un material idóneo para la fabricación de objetos que estarán sometidos a altas temperaturas

Propiedades eléctricas. El acero tiene la capacidad de conducir fácilmente la electricidad a través de su superficie. Esto es útil en la construcción de cables eléctricos y otros dispositivos que así lo requieren.

Propiedades ópticas. El acero es un material que tiene una alta reflectividad. Las superficies de los objetos de acero son generalmente lustrosas y brillantes. El acero también es transparente a los rayos infrarrojos y ultravioleta, por lo que es posible ver a través de él con una cámara de calor.

Propiedades magnéticas. El acero es un material ferromagnético, es decir, atraído por los imanes. (Díaz-Campoverde.2019)

1.1.2 Propiedades químicas del acero

Acero es una aleación de hierro y carbono que contiene otros elementos de aleación, los cuales le confieren propiedades mecánicas específicas para la utilización en la industria metalmeccánica.

Los principales elementos de composición son el Cromo, Manganeso, Níquel, Vanadio, Molibdeno, Cobre, Azufre y Fosforo. Estos elementos según su porcentaje ofrecen características específicas para determinadas aplicaciones. (Derichebourg. 2020)

1.1.3 Propiedades mecánicas del acero

Las propiedades mecánicas del acero son unas de las que más caracterizan y definen a este material. El acero es una aleación metálica constituida, esencialmente, por hierro y carbono, lo que lo convierte en uno de los mayores aliados para la construcción de puentes, edificios o grandes estructuras metálicas. (Aristizábal et al. 2009)

Desde Jansen mencionamos y explicamos en profundidad algunas de las principales propiedades mecánicas del acero.

Plasticidad. El acero es un material muy duro y resistente, pero también es muy maleable. Esto significa que puede ser moldeado y formado en una amplia variedad de formas sin romperse. Es esta propiedad única la que lo hace ideal para la fabricación de muchos objetos, tales como puentes y rieles. La plasticidad es una de las principales propiedades mecánicas de este material, permitiéndole, también, ser utilizado en la construcción de edificios y estructuras.

Resistencia. El acero es un material resistente y muy duro, lo que significa que no se rompe fácilmente en caso de ser sometido a un esfuerzo excesivo.

Maleabilidad. Es la capacidad que el acero tiene para ser deformado sin romperse, lo cual es posible gracias a la presencia del carbono en su composición. La maleabilidad y la dureza son dos características que se relacionan de forma inversa. Así, cuanto más duro es un metal, menos maleable es; y viceversa, cuanto más maleable es un metal, menos duro. (Aristizábal et al. 2009)

Dureza. El acero es un material muy duro, lo cual significa que presenta una gran resistencia ante los golpes y los arañazos que puedan darse. Se mide en una escala conocida con el nombre de “escala Brinell” y varía según el tipo de aleación, encontrándose, generalmente, entre 120 y 180.

Tenacidad. Mecánicamente, el acero es un material muy resistente. Se caracteriza por su gran capacidad de resistir a la tensión, lo cual le confiere una gran tenacidad. Y es que, esta se define como la capacidad de resistir a una posible fractura. (Aristizábal et al. 2009)

1.1.4 Tipos de acero

Encontramos diferentes tipos de acero, en función de los metales que componen su estructura en cada caso:

Acero Corten, Acero Corrugado, Acero Galvanizado, Acero Inoxidable, Acero Laminado, Acero al Carbono, Acero de Aleación, Acero Dulce, Acero Efervescente, Acero Estirado en Frío, Acero Estructural, Acero Intemperizado, Acero Suave, Acero Negro, Acero al Carbono.

El Acero al Carbono está compuesto principalmente por carbono, junto otros materiales como hierro o manganeso. Es el acero más presente en la industria de construcción, para fabricar maquinaria, vehículos, motores o tuberías, entre otros. (Derichebourg. 2020)

1.1.5 Aplicaciones del acero: el material esencial en la industria moderna

El acero es un material preferido para una amplia variedad de aplicaciones en la industria metalúrgica, como las destinadas a la edificación, la automoción o la producción de energía. Alguno de los 5 productos que usamos

cotidianamente contienen un elevado porcentaje de acero, y descubrimos cuáles.

el acero sirve para hacer marcos que proporcionan apoyo y estabilidad. Los puentes y otras estructuras de ingeniería civil también se construyen con acero debido a su capacidad para resistir cargas pesadas y altas tensiones.

Fabricación de maquinaria

Los fabricantes de maquinaria utilizan acero para crear piezas y componentes esenciales, como engranajes, ejes, rodamientos y pistones. El acero es adecuado para estos componentes debido a su alta resistencia y capacidad para soportar tensiones y cargas pesadas. Además, el acero es un material ideal para la fabricación de herramientas y equipos utilizados en la industria metalúrgica, como herramientas de corte como sierras y brocas, que están hechas de acero de alta calidad para asegurar su durabilidad y resistencia al desgaste.

En la energía nuclear, el acero se utiliza para la fabricación de contenedores de combustible nuclear, reactores y otros componentes críticos de seguridad debido a su alta resistencia y capacidad para soportar temperaturas y presiones extremas.

Fabricación de herramientas de mano

La fabricación de herramientas de mano, incluyendo llaves, alicates, martillos y destornilladores usan el acero porque las hace duraderas, resistentes al desgaste y pueden soportar altas tensiones y cargas pesadas. En el caso de las herramientas de corte, como cuchillos, tijeras y sierras, el acero permite la fabricación de hojas afiladas y precisas, lo que las hace ideales para cortar materiales duros como madera, metal y plástico. (Díaz Campoverde,2019).

1.1.6 Tipos de acero utilizados en los procesos de soldadura

Uno de los materiales que tiene gran aplicación en la soldadura es el acero; el acero es una aleación de varios elementos químicos principalmente hierro y carbono, se le agrega otros elementos químicos como el azufre, fosforo, silicio y manganeso, para fortalecer y/o mejorar sus propiedades principalmente

mecánicas. El resultado de estos elementos agregados da como origen a los aceros al carbono y aceros con aleación. Acero al carbono. Los aceros al carbono se clasifican a la vez en bajo, mediano y alto contenido de carbono; en estos aceros, el hierro y carbono son los componentes principales y se sueldan con facilidad los que presentan menos del 0.5 % de carbono. Acero con aleación. Este tipo de acero también presenta hierro, carbono y elementos químicos como el cromo, tungsteno, manganeso, níquel, vanadio, cobalto, molibdeno, cobre, azufre, fósforo, entre otros; con esta composición química, el acero ofrecerá mejores propiedades en la soldabilidad, resistencia a la corrosión, resistencia a la fractura, etc. Debido a la gran variedad de aceros que pueden obtenerse por los distintos porcentajes de carbono y otros elementos químicos que se pueden agregar, el Instituto Americano del Hierro y Acero (A.I.S.I.) y la Sociedad Americana de Ingenieros (S.A.E) clasifican a los aceros en cuatro dígitos; el primero indica el tipo de acero, el segundo dígito el contenido porcentual del elemento predominante en la aleación. Los dos últimos dígitos divididos entre 100 indican el porcentaje de carbono (Matos et al. 2012)

Ejemplo: Un acero 1040 tiene las siguientes características:

El 1 indica que es un acero al carbono, el 0 no presenta ningún porcentaje de aleación, los dos últimos dígitos indican 0.40% de carbono (Matos et al. 2012).

1.1.7 Alteraciones en la estructura de los aceros

Un acero se llama hipoeutectoide siempre cuando su contenido de carbono sea por debajo del 0,77 %. La imagen microscópica de estos aceros muestra perlita y ferrita. Con mayor porcentaje de perlita a medida que aumenta el porcentaje de carbono, es decir, con más contenido de carbono la dureza y la ductilidad aumentan (Hussainova & Schade. 2008). Un acero se llama eutéctico siempre y cuando su contenido de carbono sea de 0,77 %. El aspecto microscópico muestra perlita en todo el corte. La ductilidad y la tensión de rotura mantienen una relación excelente. Este acero se puede templar muy bien. Un acero se llama hipereutectoide cuando su contenido de carbono sea mayor a un 0,77 %. El cementita se separa alrededor de los cristales individual. esta aleación es posible hasta un contenido máximo de carbono del 2,11 %. Aleaciones de

hierro carbono solamente se llaman aceros cuando su contenido de carbono sea no mayor al 2,11 % (Li *et al.* 2005)

1.2 Generalidades sobre la soldadura

La soldadura con arco eléctrico se inició a principios del siglo XX, cuando el sueco Kjellber inventó el electrodo revestido. Hasta entonces los electrodos se fabricaban simplemente con varillas de acero. En esas condiciones, el metal fundido sin protección alguna reacciona libremente con el oxígeno y nitrógeno del aire, convirtiéndose al enfriar en un material metálico frágil. La idea de Kjellber consistió en recubrir los electrodos con una pasta de polvo y aglomerante, de tal forma que al fundirlos producían escoria, evitando de esta manera el acceso del aire al baño de metal fundido. Se inicia así el proceso de recubrimiento de los electrodos para proporcionar mejores características a la unión. En la actualidad, en la soldadura por arco eléctrico se establece la corriente eléctrica a través del aire ionizado producido por el voltaje o la diferencia de potencial inducida entre la pieza y el electrodo. La descarga eléctrica se caracteriza por una elevada intensidad de corriente que oscila entre 10 y 300 amperes y una diferencia de potencial entre 25 y 50 volts. Arco eléctrico y el efecto termoiónico. El calor obtenido por el arco es intenso, lo que resulta favorable para la operación de soldar. Las temperaturas alcanzadas son aproximadamente de 3 500°centígrados. En el circuito eléctrico formado por el electrodo y el arco, la intensidad de corriente depende de la tensión y la resistencia del circuito. (Matos *et al.* 2012)

El avance en los procesos de soldadura ha tenido que ver con el estudio de las propiedades de los materiales, su conocimiento es un factor imprescindible para obtener excelentes resultados en las uniones. En la selección de un material para soldar se tienen que considerar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

La soldadura de revestimientos duros es usada en procesos de fabricación y recuperación de diversos componentes y equipos metálicos empleados en los diferentes sectores industriales y agrícolas con el objeto de proporcionar resistencia al desgaste en su superficie. Los serios problemas que presenta la industria con relación al desgaste sobre los equipos y componentes causan un aumento significativo de los costos de mantenimiento y reposición, siendo en

gran parte evitables dados los beneficios que produce este tipo de procesos de soldadura y aun siendo usados, se hacen de una forma inadecuada en cuanto al proceso o material aplicado (Askeland. 1998).

Siguiendo la tendencia de la industria moderna, una mayor utilización de los procesos automáticos o semiautomáticos puede conferir a los cordones de revestimientos duros mejores propiedades, acabados superficiales de superior calidad, así como también una mayor productividad del proceso.

La fabricación de piezas nuevas con superficies recubiertas generalmente conduce a la construcción de componentes bimetálicos, pues las características del metal que se aporta a la superficie resultan diferentes a la del metal que constituye el resto del cuerpo.

1.3 Electrodo (material de aporte)

Los electrodos cubiertos se clasifican de acuerdo con los requisitos de especificaciones emitidas por la American Welding Society. Ciertas agencias del Departamento de Defensa de Estados Unidos también emiten especificaciones para los electrodos cubiertos. Los números de especificaciones de la AWS y las clasificaciones de electrodos correspondientes se dan en la tabla 1.1. Los electrodos se clasifican con base en la composición química o en las propiedades mecánicas, o en ambas cosas, de su metal de soldadura sin diluir. Los electrodos de acero al carbono, acero de baja aleación y acero inoxidable también se clasifican de acuerdo con el tipo de corriente de soldadura con la que trabajan mejor, y en ocasiones de acuerdo con las posiciones de soldadura las que pueden emplearse.

Tabla 1.1. Clasificación de los electrodos

| Tipos de electrodos | Especificación de la AWS |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Acero al carbono | A5.1 |
| Acero de baja aleación | A5.5 |
| Acero resistente a la corrosión | A5.4 |
| Hierro colado | A5.15 |
| Aluminio y aleaciones de aluminio | A5.3 |
| Cobre y aleaciones de cobre | A5.6 |
| Níquel y aleaciones de níquel | A5.11 |
| Recubrimiento | A5.13 y A5.21 |

Como se muestra en la tabla 1.1 la mayor parte de los electrodos de recubrimiento duro se diseñan de modo que cumplan con ANSI/AWS A5.13, especificación para electrodos y varillas de soldadura para recubrimiento sólido, o ANSI/AWS A5.21, especificación para electrodos y varillas de soldadura para recubrimiento compuesto. Se dispone de una amplia gama de electrodos para SMAW (dentro de esta y otras especificaciones AWS para metales de aporte) que producen capas resistentes al desgaste, el impacto, el calor o la corrosión sobre diversos metales base.

Todos los electrodos cubiertos especificados en A5.13 tienen alambre de núcleo sólido; los especificados en A5.21 tienen un núcleo compuesto. El sistema de designación de los electrodos en ambas especificaciones es similar al que se usa para los electrodos de carburo de tungsteno, en los que la E de la designación para estos electrodos va seguida por WC y por los límites de tamaño de malla para los gránulos de carburo de tungsteno para completar la designación. En este caso, el núcleo consiste en un tubo de acero relleno con los gránulos de carburo de tungsteno. El recubrimiento con electrodos cubiertos se emplea para revestimientos, untaduras, engrosamientos y aplicación de superficies duras. El objetivo del depósito de soldadura en estas aplicaciones es conferir a las superficies una o más de las siguientes cualidades:

- 1) Resistencia a la corrosión

- 2) Control metalúrgico
- 3) Control dimensional
- 4) Resistencia al desgaste
- 5) Resistencia al impacto

La selección de electrodos recubiertos para una aplicación de recubrimiento en particular deberá hacerse después de analizar detenidamente las propiedades que debe tener el metal de soldadura aplicado a un metal base específica.

Además de establecer el arco y proporcionar metal de aporte para el depósito de soldadura, el electrodo introduce otros materiales en el arco o sus inmediaciones, o en ambos lugares. Dependiendo del tipo de electrodo que se use, la cobertura desempeña una o más de las siguientes funciones:(Díaz-Campoverde. 2019)

1. Provee un gas para proteger el arco y evitar una contaminación excesiva del metal de aporte derretido por parte de la atmósfera.
2. Suministra limpiadores, desoxidantes y agentes fundentes para purificar la soldadura y evitar un crecimiento excesivo de granos en el metal de soldadura.
3. Establece las características eléctricas del electrodo.
4. Proporciona un manto de escoria que protege el metal de soldadura caliente del aire y mejora las propiedades mecánicas. La forma de la franja y limpieza superficial de dicho metal.
5. Constituye un medio para añadir elementos de aleación que modifiquen las propiedades mecánicas del metal de soldadura.

1.4 Soldabilidad de los Aceros

Un acero, según la ISO-581-80, se considera soldable en un grado prefijado, por un procedimiento determinado y para una aplicación específica cuando mediante una técnica adecuada se puede conseguir la continuidad metálica de la unión de tal manera que ésta cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y su influencia en la construcción de la que

forma parte integrante. La soldabilidad de un material bajo determinado proceso puede catalogarse de las siguientes formas: (Sánchez. 2009)

Buena soldabilidad: No hay que aplicar ninguna medida para garantizar la resistencia de la unión utilizando un determinado tipo de soldadura.

Ejemplos: precalentamiento, postcalentamiento, etc.

Soldabilidad limitada: Se logra la resistencia de la unión soldada bajo determinadas condiciones.

Ejemplo: Se necesita dar un precalentamiento a 200 °C al material para evitar fragilidad en la unión.

Soldabilidad nula: Bajo ninguna condición se puede garantizar la resistencia de la unión soldada.

Por ejemplo: la fundición blanca (fundiciones con alto % de cementita), no tiene soldabilidad por fusión, pues bajo ninguna condición se puede lograr una unión con resistencia mecánica suficiente. (Sánchez. 2009)

La soldabilidad puede abordarse bajo los tres aspectos siguientes:

La soldabilidad operatoria: relativa a la operación de soldadura, estudia las condiciones de realización de las uniones por fusión o por cualquier otro procedimiento, por ejemplo, por presión.

Ejemplo: El aluminio que forma óxidos de alto punto de fusión que no pueden soldarse a llama sin el empleo de fundentes o problemas para soldar con arco eléctrico.

La soldabilidad metalúrgica: relativa a las modificaciones físico-químicas y estructurales resultados de la operación de soldadura.

Ejemplo: Los aceros inoxidable austeníticos y la precipitación de carburos de cromo (corrosión intercrystalina) y aceros aleados y su tendencia a formar martensita.

La soldabilidad constructiva (o global): que se dedica a definir las propiedades de conjunto de la construcción por la sensibilidad de la unión o la deformación y a la rotura bajo el efecto de las tensiones. (Ricauter-Ospina et al. 2019)

Ejemplo: Los Hierros fundidos que por su poca plasticidad no pueden absorber las deformaciones propias del proceso de soldadura.

1.4.1 Afectaciones del calor en la soldadura

La mayoría de soldaduras implican el uso de calor y al agregar una estructura metalúrgica diferente respecto del material base no afectado. Las soldaduras también pueden incluir defectos como huecos, fracturas y materiales atrapados. El objetivo es lograr soldar sin problemas. Las fracturas por calor fuerte pueden resultar por cualquiera de los siguientes cuatro factores: estiramiento, forma de la soldadura, energía por calor excesivo o composición del material. Puede resultar por cualquier factor, pero es mucho más probable cuando se combinan dos o más factores. En cualquier tipo de soldadura siempre hay estiramiento porque a medida que se solidifica adquiere fuerza, pero continúa enfriándose y encogiéndose. Es el grado de estiramiento lo que se vuelve crítico. El estiramiento se relaciona con el diseño de la soldadura, con el diseño de la pieza por soldar, y con el grosor de los materiales que se están uniendo. La forma de la soldadura también es una función del diseño de la misma, del diseño de la pieza por soldar, y del procedimiento de soldadura. El procedimiento de soldadura se relaciona con el lugar que se va a soldar o con los rebordes en la soldadura, con la forma de los rebordes y con la que tiene la superficie terminada de la parte soldada. (Mohamed. 2003).

El tercer factor es la composición química del material. Sin embargo, la segregación es importante, puesto que las impurezas, como el azufre y el fósforo, tienden a formar películas con un punto de fundición bajo entre los granos solidificantes del material. Estas impurezas se relacionan con el detalle de la coyuntura de la soldadura y con el proceso de soldadura, puesto que afectan a la cantidad de dilución. El desgarre de las láminas también está asociado con las impurezas del material base y su fuerza transdireccional. Cuando el grado de estiramiento aumenta, tal como sucede con los materiales más gruesos, este problema se vuelve más serio. (Mohamed. 2003).

Los cuatro principales factores que afectan a la fractura de la zona afectada por el calor son: (Mohamed. 2003).

- El espesor del material base y el tipo de soldadura

- La composición del material base
- El proceso de soldadura y tipo de material de aporte
- El gasto de energía y las temperaturas de calentamiento previo.

Los efectos de los cuatro factores están interrelacionados. El espesor de la composición del material lo establece el diseño. La configuración de la unión de la soldadura, el tipo de material de aporte y el procedimiento de la soldadura pueden contribuir a que se efectúe una fractura tipo HAZ. El consumo de energía puede modificarse por el proceso de soldadura, por el procedimiento que se utilice y por la temperatura del calentamiento previo a la soldadura. Estos también se pueden modificar para reducir la velocidad de enfriamiento. Todos los factores anteriores determinan el tipo de microestructura que ocurrirá en la zona afectada por el calor. Los dos factores más importantes para la soldabilidad son la capacidad de endurecimiento y la susceptibilidad a las fracturas de la estructura endurecida. Ambas se incrementan usando un contenido de carbono más alto y de aleación más alta en el material base. Ciertos elementos de aleación incrementan la capacidad de endurecimiento sin un incremento significativo en la susceptibilidad de la fractura. (Mohamed. 2003).

1.4.2 Efecto de la temperatura

Cuando se somete un acero hipoeutectoide al efecto calorífico, la perlita se transforma con una temperatura de 727 °C. También la ferrita se descompone lentamente. Cuando un acero se enfría rápidamente después de una temperatura de algo más de 900 °C, las fases no disponen del tiempo suficiente como para regresar a su forma original. Se forma una estructura llamada martensita si se cumplen determinadas condiciones (Pitrun, 2004). Cuando al acero de estructura austenítica se calienta hasta 1 150 °C aproximadamente, los cristales en tamaño crecen. Los granos de la estructura, entonces serán mucho más grandes que los granos del material anteriormente. Las propiedades así se empeoran. En este caso el acero se llama material recalentado (Ramírez *et al.* 2006).

1.4.3 Transformaciones del acero en condiciones de soldadura

Se encuentran dificultades cuando se aplican, en los casos de soldadura, los diagramas TTT en las condiciones clásicas de tratamiento térmico. En efecto, las condiciones muy particulares de tratamiento térmico que sufren los aceros durante la soldadura, modifican sensiblemente el desarrollo de las transformaciones. Independientemente de la gran cantidad de ensayos de soldabilidad conocidos, pero que principalmente se refieren a la recepción de los productos de acero, es fácil deducir que son pocos los datos precisos que se obtienen del dominio de la metalurgia de la soldadura. Esto se debe a la complejidad de los fenómenos y por ello, hasta el momento, sólo se tenían en cuenta dos aspectos para verificar la soldabilidad de los aceros estructurales: limitar el carbono equivalente y la dureza bajo el cordón (Lippold & Kotecki. 2005; Pekka. 2003)

1.4.4 Baño fundido y continuidad en la soldadura y el material base

Actualmente la mayoría de los procesos de soldadura se llevan a cabo mediante la aplicación de calor a las piezas a unir. Este calor es, a menudo, de suficiente intensidad y cantidad como para producir la fusión de los materiales a unir. El calor aplicado a los materiales metálicos produce un cambio en su estructura metalográfica, cuando la temperatura alcanzada supera un determinado valor característico para cada material o aleación. La modificación de la estructura conlleva a la variación de las propiedades de material. (Ricauter-Ospina et al, 2019)

De acuerdo a estudios realizados (Lord *et al.* 2003), respecto a la explicación científica de una unión soldada han llegado a la conclusión de que el concepto de continuidad es el que mejor explica el fenómeno. Al iniciarse el enfriamiento en el material de contacto, se establece un gradiente de temperatura en el interior del material líquido y en la interface sólido - líquido, debido a la transferencia de calor hacia el exterior a través de las paredes del molde. En el proceso de soldadura, el movimiento continuo del electrodo hace que el fenómeno de la solidificación sea esencialmente un proceso dinámico, siendo la velocidad del proceso de soldadura la variable que regula la solidificación

1.4.5 Transformaciones en la fase sólida durante el calentamiento

Durante el proceso de soldadura existen transformaciones en fase sólida que sufre el material base y el material fundido por pasadas múltiples, durante el calentamiento debido al ciclo térmico del proceso de soldadura. Aunque muchas veces no se destaca, la fase de calentamiento es tan importante como la del enfriamiento de la zona fundida constituida por el cordón de soldadura, la región adyacente y el material base (Cisilino *et al.* 2002). El ciclo térmico de la soldadura establece en cada punto del material base un estado térmico estacionario, definido por la máxima temperatura alcanzada, y la velocidad de enfriamiento, que determinan los siguientes parámetros:

Fenómeno de recristalización

Cuando se realiza un proceso de soldadura en aleaciones que han sido trabajadas en frío, el calentamiento del ciclo térmico conduce a una recristalización del material base, debido a que sufre un tratamiento térmico localizado. La importancia de estas transformaciones se debe al ciclo térmico y a la naturaleza de la aleación (Muruganath. 2002).

Las aleaciones que han sido deformadas en frío, se encuentran en un estado inestable, caracterizado por un incremento en su resistencia a la tracción y su límite elástico. Este estado tiende a cambiar cuando se calienta por encima de su temperatura de recristalización, dando lugar a las siguientes etapas: }

Recristalización primaria: se lleva a cabo a la temperatura θ_R , en donde se realiza la reorganización de la estructura cristalina de la aleación. }

Recristalización secundaria: es la que ocurre cuando la aleación es sometida a temperaturas mayores que la recristalización primaria, la cual genera un gran crecimiento de grano dando lugar a una disminución en la resistencia a la tracción y dureza de la aleación. transformación alotrópica A3, la transformación $\alpha \rightarrow \gamma$ produce el efecto de un tratamiento térmico de normalizado, es decir la disminución del tamaño de grano y un ligero endurecimiento. (Ricauter-Ospina et al. 2019)

La Figura 1.1 presenta la variación de la dureza en una unión soldada de una aleación deformada por trabajo mecánico en función a la temperatura máxima alcanzada durante el enfriamiento.

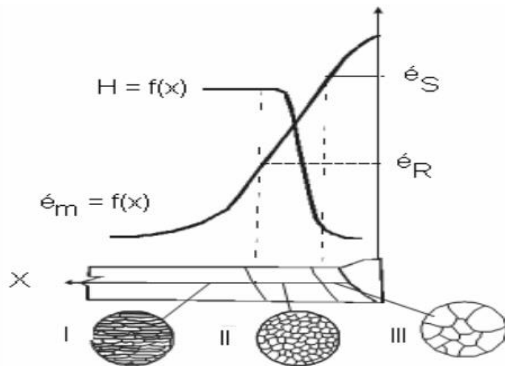


Figura 1.1 Variación de la dureza en función de la temperatura máxima alcanzada en el calentamiento.

En el proceso de soldadura de aceros al carbono deformados por trabajo mecánico, la disminución de su dureza por efecto de la recristalización se observará principalmente en la región calentada entre la temperatura de recristalización de la ferrita $\epsilon_{R\alpha}$, y el punto de recristalización de la ferrita $\epsilon_{R\alpha}$, y el punto de transformación alotrópica A_3 , la transformación $\alpha \rightarrow \gamma$ produce el efecto de un tratamiento térmico de normalizado, es decir la disminución del tamaño de grano y un ligero endurecimiento.

1.4.6 Crecimiento del grano

El efecto del calentamiento tiene influencias inmediatas durante el ciclo térmico del proceso de soldadura, generalmente aumenta el tamaño de grano de la zona afectada por el calor (ZAC) y también en la zona fundida. Este crecimiento de grano tiene como consecuencia alterar las propiedades mecánicas finales. Cuando se calienta lentamente un acero desde la temperatura ambiente hasta la temperatura A_3 , no se observa ningún cambio en la estructura hasta que se alcanza una temperatura ϵ_i figura 1.2, (Lütjering, 2007); en ese instante los granos comienzan a aumentar de tamaño, dando lugar a la formación de una estructura mixta con granos grandes y pequeños.

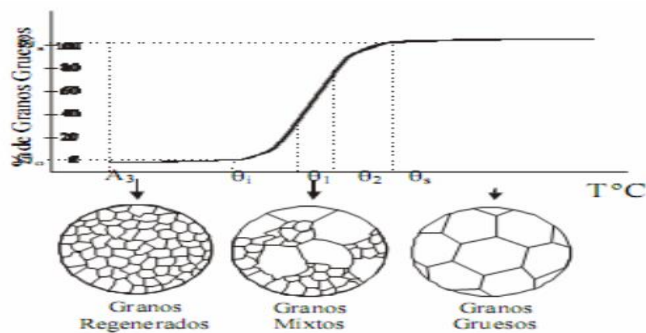


Figura 1.2 Influencia de la temperatura en el crecimiento de grano.

Desde este momento, al aumentar la temperatura, los granos grandes absorben a los pequeños y la proporción de los grandes aumenta. La temperatura θ_s , a la cual se obtiene un 100 % de granos gruesos, es la temperatura de sobrecalentamiento. La temperatura no es el único factor que influye en el aumento del tamaño de los granos, también influye el tiempo. A partir de θ_1 , manteniendo la temperatura constante, el tamaño de grano aumenta con el tiempo y este aumento es mayor cuanto más cerca está la temperatura de sobrecalentamiento. (Aristizábal et al.2009)

1.4.7 Transformaciones en la fase sólida durante el enfriamiento

En un proceso de soldadura, se producen transformaciones en estado sólido en la zona fundida y en la zona afectada por el calor. Frecuentemente estas transformaciones en un acero al carbono, tienen lugar durante el enfriamiento continuo que se producen en un intervalo de temperaturas generando en cada enfriamiento estructuras en condiciones próximas al equilibrio. Sin embargo, las condiciones de los enfriamientos normales en un proceso de soldadura suelen estar alejadas de las de equilibrio (enfriamiento infinitamente lento), lo que afecta en las proporciones de los constituyentes del acero (ferrita y perlita) y a la naturaleza de fases metaestables (Mathew, 2001).

Debido a la influencia de la velocidad de enfriamiento desde el estado austenítico del acero de composición conocida, se utilizan curvas de transformación en enfriamiento continuo (TEC), que expresen los productos de transformación obtenidos en enfriamientos realizados a diferentes velocidades,

junto con los tiempos de inicio y fin de aquellas transformaciones (Menthe & Rie, 1999).

Estos diagramas, son de gran utilidad a la hora de realizar tratamientos térmicos de aceros, pero, tienen una aplicación restringida en los procesos de soldadura, debido a las altas temperaturas de austenización producidas y los tiempos cortos de permanencia a esas temperaturas. Durante un proceso de soldadura, la velocidad de enfriamiento de la austenita ocasiona las siguientes transformaciones (Ferraresi *et al.* 2000).

1.4.7.1 Transformación perlítica

En la ZAC de grano fino, la transformación de la austenita en ferrita (Mohamed, 2003) y perlita (si la velocidad de enfriamiento es suficientemente lenta) ocurre por nucleación y crecimiento, resultando una estructura final más fina a la del material base y cuando la velocidad de enfriamiento en un proceso de soldadura es rápida, la distancia interlaminar de la perlita es menor. En la región sobrecalentada de grano grueso, la ferrita proeutectoide se nuclea en las juntas del grano austenítico y forma también agujas dirigidas hacia el interior de los granos grandes existentes (estructura de Widmanstaetten) (Mendez & Eagar, 2000).

Estructuras similares aparecerán también en el enfriamiento del material fundido si, su composición química coincide con la del acero base. Las propiedades mecánicas de la ZAC (Plati, 2003), varían con respecto al acero base y se notará un ligero aumento en la dureza, límite elástico y resistencia a la tracción, mientras que la estructura basta de la zona recalentada (estructura Widmantaetten) supone una disminución de la resiliencia y como consecuencia un aumento en la fragilización, que en algunos casos se recomienda un posterior tratamiento térmico (Bhadeshia, 2003) con la finalidad de regenerar el grano.

1.4.7.2 Transformación martensítica

En los aceros con %C < 0,4, la transformación de la martensita está gobernada por su templabilidad y en la soldadura: si la velocidad del proceso de soldadura es 457,2 mm/min (Iqbal, 2002) influirá directamente sobre la velocidad de

enfriamiento formando martensita tan dura que podría generar fragilidad (Clapp *et al.* 1993).

La influencia de los elementos de aleación se puede saber a través del carbono equivalente. La martensita formada con contenidos altos en carbono, tiene mayor dureza y mayor tendencia a fisurarse en frío y es también un constituyente metaestable que se transforma en ferrita y cementita globular, o bien en austenita si se alcanzan temperaturas más altas (Suzuki, 2007).

La temperatura de formación de la martensita, también llamada punto de la martensita, desciende al aumentar los contenidos de los elementos carbono, manganeso, cromo, níquel, molibdeno y vanadio. De manera parecida actúa una temperatura de temple demasiado alta (Real *et al.*, 2002).

Este efecto solo puede disminuirse por la acción de los elementos cobalto y aluminio. Sin embargo, los datos obtenidos con estos gráficos, no son aplicables cuando se realizan procesos de enfriamiento continuo, como es el caso del temple, recocido, normalizado, soldadura (Haidar, 1998 y Villafiorita, 2002)

1.5 Diagrama hierro carbono

En la Figura 1.3 se muestra el diagrama hierro carbono, con las transformaciones que tiene lugar en una fundición.

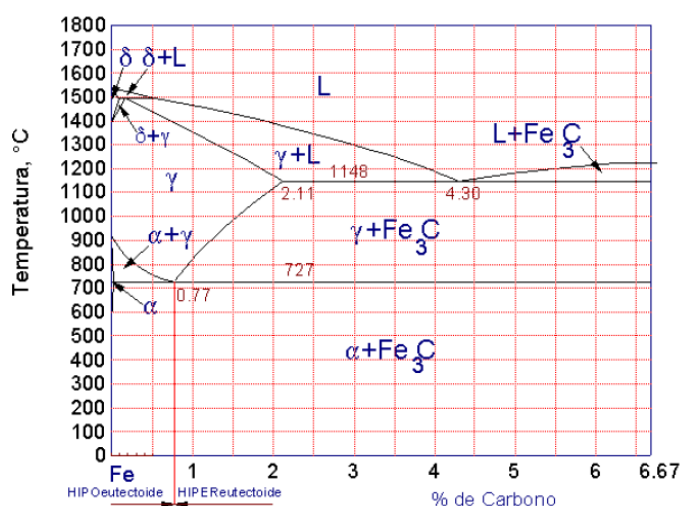


Figura 1.3 Diagrama de fases fuera del equilibrio del sistema Fe-Fe₃C. Fuente: (Borrajo *et al.* 2003)

Según (Aristizábal et al. 2009) las propiedades mecánicas y el desempeño en servicio de estos materiales están fuertemente influenciados por sus características microestructurales, tales como la morfología, el tamaño y la distribución de las láminas de grafito y del tipo de matriz, de las diferentes inclusiones y carburos presentes, las cuales, a su vez, dependen fundamentalmente de la composición química, del tratamiento del metal fundido y de la velocidad de enfriamiento durante la solidificación.

Las propiedades mecánicas del material se relacionan directamente con la microestructura final del mismo (Guo et al, 1997; Catalina *et al.* 2000), que se obtiene después de la última transformación de fase, cuando la pieza ya alcanzó la temperatura ambiente. Sin embargo, el proceso de solidificación también tiene una gran importancia en las características físicas de la fundición, ya que condiciona la transformación eutectoide posterior a través de factores tales como las microsegregaciones, el tamaño y morfología de los granos.

El hierro es uno de los cuatro elementos más abundantes sobre la superficie terrestre (5 %) en comparación con otros metales, el término hierro identifica a una extensa familia de aleaciones ferrosas en donde sus principales elementos constituyentes son: hierro (Fe) y carbono (C) los cuales forman diferentes fases dependiendo de la concentración en peso de cada uno y se representan en la figura 1.3

1.6 Antecedentes de la investigación

En este acápite se realizó un breve análisis de algunos trabajos precedente a la investigación.

Moreno López, 1996. En este trabajo se presentan, las clasificaciones principales de los aceros al carbono, aceros para herramienta y aceros inoxidable, bajo las normas AISI, así como algunas de sus aplicaciones prácticas. Pero no se realizaron los estudios microestructurales y de microdureza correspondientes.

Rodríguez, 2006; se analizaron los tres tipos de aceros al carbono y su clasificación desde el punto de vista de su soldabilidad. Se pueden observar los aspectos físico - químicos en la zona fundida, zona de transición y zona

afectada por el calor. Existen varios aspectos en la tecnología de la soldadura de los aceros al carbono, tales como: preparación de los bordes, limpieza superficial, posición relativa de las piezas, precalentamiento, selección del material de aporte, deposición de los cordones, postcalentamiento, tratamiento térmico posterior y el control de la calidad de las uniones soldadas a tomar en cuenta para realizar la soldadura. Sin embargo, no realiza un estudio sobre el análisis de microestructura, ni microdureza; tampoco determina el carbón equivalente en las uniones soldadas.

Sánchez, 2009: Concluyó que el proceso GMAW es viable para la unión de aceros de media y alta resistencia, entre otros aspectos por el bajo costo por consumibles y equipo. Dado su aporte calórico y Afectación térmica es uno de los que requieren mayor control para evitar transformaciones de fases y zonas de alta resistencia en las uniones, evitando la generación de grietas, tanto en caliente como en frío. Pero no analizo las propiedades físicas mecánicas del material de aporte UTP 7018.

Bunaziv et al, 2018. Analizó el posicionamiento al realizar la unión de un acero de sección gruesa como lo son de 45mm demostró que, al tener un bisel, se obtiene una mejor penetración hasta la raíz cuando el proceso GMAW es líder, ya que el metal de aporte de dicho proceso tiene un alcance óptimo hasta la raíz. Sin embargo, no se realizó una comparación con otros resultados obtenidos por otro método de soldadura y empleando materiales de aporte diferentes a los empleados en dicha investigación.

Marulanda et al, 2019 demostraron que durante el proceso de soldadura se siguió una especificación del procedimiento de soldadura (WPS), para que los resultados fueran repetibles, minimizando los problemas de agrietamiento en caliente, agrietamiento en frío, formación de fase sigma y precipitación de carburos. Sin embargo, no tuvieron en cuenta el análisis de otros microconstituyentes obtenidos en la microestructura del material después de soldado.

Díaz, 2019 realizó una investigación donde planteó importancia conocer las propiedades de los materiales que existen para saber cuáles podemos aplicar a la hora de realizar un trabajo de soldadura, pero no realiza un estudio profundo

sobre las principales causas de agrietamiento en las uniones soldadas a través de soldadura manual por arco eléctrico.

Ricauter Ospina et al, 2019: Plantearon que la necesidad de unir aceros disímiles mediante procesos de soldadura por arco eléctrico es una práctica muy poco común, pero que, en algunos casos, se hace necesario por la complejidad de algunos equipos y máquinas (como calderas recuperadoras de calor, turbinas, intercambiadores de calor, etc.) requeridos en la industria. En este trabajo no se abordó sobre el empleo de materiales de aporte UTP- 7018 para restablecer los daños ocasionados en estructura metálicas.

1.7 Conclusiones del capítulo 1

- ✓ Se determinó según el análisis del estado del arte que los aceros de bajo y medio contenido de carbono, se han usado desde hace más de tiempo que los demás materiales. Se siguen usando para operaciones de maquinado de baja velocidad y para la fabricación de diferentes tipos de estructuras ya que presentan buena maquinabilidad y soldabilidad.
- ✓ Se analizó los grupos de aleaciones de aceros austenítico, martensíticos son usados para agregar dureza a la parte de piezas en uso y mejorar las propiedades de las mismas, fundamentalmente la microdureza y la resistencia al desgaste.
- ✓ Se determinó que la soldadura de revestimientos duros es usada en procesos de fabricación y recuperación de diversos componentes y equipos metálicos empleados en los diferentes sectores industriales y agrícolas con el objeto de proporcionar resistencia al desgaste en su superficie.

CPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Introducción

La obtención o fabricación de materiales para soldadura es un proceso fisicoquímico complejo. En la formación de las propiedades del material influyen diversos factores y parámetros tales como: composición química, concentraciones, temperatura, velocidad de enfriamiento. El estudio de la metalurgia del metal de soldadura generalmente se restringe a la zona totalmente fundida, sin distinguir entre las regiones mezcladas y no mezcladas y excluyendo a la zona parcialmente fundida. En el capítulo se plantea como objetivo establecer el procedimiento de soldadura para realizar la unión soldada del acero AISI 1025 con electrodo E 7018

2.1 Composición química del acero AISI 1025

Tabla 2.1. Composición química del acero AISI 1025 en % (American Society for Testing Materials – ASTM)

En la tabla 2.1 se muestra la composición química del material base.

| C % | Mn % | Cu% | Si% | Cr% | Ni% | Mo% | Fe% |
|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|
| 0,20 | 0,59 | 0,16 | 0,020 | 0,01 | 0,020 | 0,10 | 97,75 |

La tabla 2.1, extraída del Databook 1988 y editada por la American SocietyforMetals, muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales, a su vez, coinciden con el sistema de numeración UnifiedNumberingSystem – UNS, de la American SocietyforTestingMaterials – ASTM y la SAE, establece la composición química del acero AISI 1025. Se muestra que entre los principales elementos químicos que contiene el acero se encuentra el Fe con 97, 75 %, le sigue el Mn con 0, 65 % y el C contenido de 0,25 %

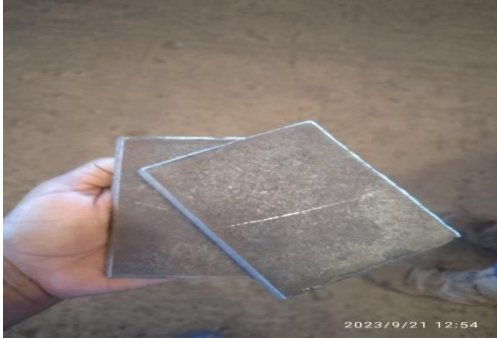


Figura 2.1 Material base (AISI 1025), sin someterse al proceso de soldadura.

2.1.1 Microestructura del material base según la norma ASTM E - 18

En la Figura 2.2 se muestra el análisis microestructural del material base (AISI 1025).



Figura 2.2 Microestructura del acero AISI 1025 según la norma ASTM E - 18.

La Figura 2.2 muestra la microestructura del acero AISI 1025, donde se observa una estructura de ferrita + perlita. Se observan los granos de ferrita (zonas blancas) y colonias de perlita (zonas oscuras), presentando una estructura bandeda, como resultado del proceso de conformado en caliente de este material. Se seleccionó la zona del metal base, es decir lo más alejado de donde pudiera tener influencia el ciclo térmico de soldadura, el objetivo de este análisis fue obtener una muestra sin afectación en su estructura cristalina que nos permitió determinar posibles cambios ocurridos tanto en la ZF como en la influencia térmica.

2.1.2 Composición química del material de aporte Electrodo E7018.

Tabla 2.2: Composición química del material de aporte Electrodo E7018.

(American Society for Testing Materials – ASTM)

| C% | Mn% | Si% | S% | P % | Fe % |
|------|------|------|------|------|-------|
| 0,08 | 1,60 | 0,75 | 0,03 | 0,03 | 97,51 |

La tabla 2.2, extraída del Databook 1988 y editada por la American Society for Metales, muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales, a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System – UNS, de la American Society for Testing Materials – ASTM y la SAE, establece la composición química del electrodo E7018. Como se muestra en la tabla el material de aporte empleado como principal elemento químico que presenta en su composición es de Mn con un contenido de 1,60 %.

2.2 Material de aporte para la soldadura

El material de aporte empleado para la soldadura y se muestra en la tabla 2.3; se clasifican según la norma AWS/ASME: A5.1 – 91.

Tabla 2.3. Material de aporte empleado para los depósitos

| Junta | 1 | 2 |
|-----------------------|----------|----------|
| Pase de raíz (PR) | E – 7018 | E – 7018 |
| Pase en caliente (PC) | E – 7018 | E – 7018 |
| Pase de relleno (PRE) | E – 7018 | E – 7018 |
| Pase de acabado (PA) | E – 7018 | E – 7018 |

2.2.1 Características del electrodo E 7018

El mismo es recomendable para la soldadura de los aceros de bajo y medio carbono hasta 0,45 % C, aceros al carbono - manganeso, aceros de baja aleación con resistencia a la tracción hasta 70 000 Psi (490 MPa), aceros con alto contenido de azufre y fósforo considerados difíciles de soldar. Soldadura de aceros fundidos, aceros de grano fino. Las aplicaciones específicas

incluyen plantas de potencia, plantas petroquímicas, montajes de estructuras de acero, equipos de minería, soldadura en ambientes de baja temperatura donde las propiedades de impacto sean importantes, construcción de vagones de trenes, rieles, equipos pesados. Construcciones navales en aceros de los grados A, B, D y E, erección de plataformas costa afuera, construcción de calderas, tanques, gasoductos y oleoductos.



Figura 2.3 Material de aporte empleado durante el proceso metalúrgico.

El tipo de electrodo empleado como se muestra en la figura 2.3, según AWS se clasifica en:

ASME SFA 5,1 E 7018

AWS A 5,1 E 7018

2.3 Materiales y equipos empleados en la realización del experimento

Para dar cumplimiento al objetivo propuesto en el trabajo se emplearon diferentes máquinas y equipos y que en lo posible los mismos se ajustaran a las condiciones experimentales y evitar errores causales que surgen de forma involuntaria.

Dentro de los procesos, el corte de las muestras debe realizarse meticulosamente, tratando en lo posible de la selección adecuada de cada máquina, para ensayos microestructurales, la no alteración de las propiedades de los materiales es de vital importancia, ya que el cambio de la misma refleja una imagen distorsionada de lo que queremos obtener. Los experimentos fueron realizados en la empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”.

En la *Figura 2.4* se muestra las planchas de acero al carbono soldadas con material de aporte.



Figura 2.4 Material base soldada.

En la *Figura 2.4* se representa la muestra soldada, con forma en U y soldadura manual por arco eléctrico a tope.

2.3.1 Máquina para soldar empleado en la investigación

La máquina soldadora es del tipo transformador, produce corriente alterna. La potencia es tomada directamente de una línea de fuerza eléctrica y transformada en un voltaje requerido para soldar. El tamaño de la máquina soldadora por utilizar depende de la clase y cantidad de soldadura por hacer.



Figura 2.5 Maquina de soldar Tipo Miller.

A continuación, se muestran las características empleadas en el proceso de soldadura manual por arco eléctrico.

En la tabla 2.4 aparecen las características de la máquina

| | | |
|---------------------------------------|------------------------|------------------|
| Alimentación primaria | 230V monofásica-50/60H | |
| Consumo primario de intensidad máxima | 19 A (TIG)-29A (ARCO) | |
| Voltaje en vacío | 82 V | |
| Gama de ajuste | 5A a150A | |
| Factor de marcha (a 40 °C) | a100% | 100 ^a |
| | a60 % | 120 ^a |
| | a35 % | 150 |
| Diámetro de electrodo máximo | 4 mm/5/32 pulg | |
| Índice de protección | IP23 | |
| Normas | EN 60974-1 | |
| Dimensiones | 420x175x300 mm | |
| Peso | 10 kg | |

En la tabla 2.4 se muestran las características de la máquina de soldar utilizada para el desarrollo de la investigación. La regulación de los parámetros se realizó modificando la velocidad de soldadura, actuando para ello sobre la corriente y la tensión de arco. El equipo cuenta con dos displays digitales que indican instantáneamente los valores eficaces medidos. Se soldó con corriente directa electrodo positivo y con intensidades de corriente de 105 y 160 Amp a 220 V.

2.4 Preparación metalográfica de la probeta

El examen microscópico proporciona información sobre la constitución del metal o aleación, pudiéndose determinar características tales como forma, tamaño, y distribución de grano, inclusiones y microestructura metalográfica en general. La microestructura puede reflejar la historia completa del tratamiento mecánico que ha sufrido el metal

. Las operaciones se resumen en el siguiente orden:

- Corte, desbaste, pulido, desengrasado, lavado y ataque químico.
- Corte Las muestras para la observación metalográfica con longitud de 15 x 15 (norma ASTM E3 – 95) se prepararon en una fresadora del tipo 6 H 82 Г. El corte se realizó con una fresa de disco marca P 6 M 5 de diámetro 80 mm y 12 dientes. Las probetas se elaboraron con abundante refrigeración, con el objetivo de lograr una superficie con la menor cantidad posible de rugosidad superficial.



Figura 2.6 Muestras obtenidas del proceso de corte.

La se Figura 2.6 puede apreciar las muestras obtenidas del proceso de corte. Al cortar la plancha, para la extracción de las probetas, cada corte proporciona dos secciones transversales de la unión, para hacer una inspección visual, en donde se pudo constatar que en las secciones expuestas no se aprecian defectos como: poros, inclusiones de escoria, agrietamiento, falta de penetración, socavamiento ni exceso de sobremonta, características que indican buena calidad de las uniones. Todas las probetas luego de ser extraídas de la plancha, se le pulieron los refuerzos de soldadura del cordón de terminación y raíz, produciendo una superficie continúa entre ambas planchas unidas.

2.4.1 Desbaste y pulido

El pulido se hizo siguiendo las normas (ISO 9001) con los papeles abrasivos (tipo 180, 400 y 600), se realizó variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina.

En el pulido fino se empleó pasta abrasiva (Pasta GOI), añadida sobre discos provistos de paños o motas. Este pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior. Para obtener una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL. Con el objetivo de lograr el acabado final, se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

2.4.2 Limpieza y lavado de las superficies a investigar

Para eliminar los residuos de partículas, grasas y suciedades se lavó la superficie con agua. Una vez pulida las probetas se lavan con agua destilada, se secan con papel de filtro y finalmente se vuelven a lavar con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.

2.4.3 Ataque químico

Antes de atacar, la probeta se le realizó un desengrasado. En este caso, para atacar el material se empleó Nital al 2 %. En la tabla 2.4 aparece el modo de preparación del reactivo químico empleado.

Tabla 2.5. Modo de preparación del reactivo químico empleado

| Reactivo químico empleado | Reactivo | Composición/uso |
|---------------------------|----------|--|
| Acero AISI 1025 | | Mezcla de 2 mL de ácido nítrico (HNO ₃) y 100 mL de alcohol etanol de 3 a 5 seg. |
| Nital al 2% | | |

Preparado el reactivo, se vierte un poco en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y se observa la superficie. La operación se repite hasta que la superficie a examinar esté bien atacada. Después del ataque se lavó la probeta de nuevo con abundante agua corriente, y se secó con alcohol (absoluto) y secada al aire.

2.5.4 Ensayo de microscopía óptica.

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 (figura 2.7) ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales de la empresa Mecánica del Níquel Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, de Moa.



Figura 2.7 Microscopio óptico binocular NOVEL modelo NIM -100.

El microscopio presentado en la Figura 2.7, 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.

2.4.5 Ensayo de microdureza

Para la medición de la microdureza se trabajó con la norma ASTM NORMA E18 – 89a; y las mediciones fueron realizadas con un durómetro Vicker, usando una carga de 100 kgf/mm² (10 MPa) en la escala Vicker para el material base y 310 kgf/mm² (31 MPa) en la escala Vicker para el material de aporte, con un indentador con punta de diamante. La dureza realizada a las probetas fue realizada en dos formas: a) Dureza longitudinal: luego de realizado el cordón se rectificó la parte superior del mismo, para obtener una superficie plana como lo exige la norma y poder realizar dureza Vicker a lo largo del

cordón, para cada una de las probetas. Se realizaron un total de 5 mediciones para cada caso posible por cordón con una separación entre lectura y lectura de un milímetro, además se promediaron dichos valores. Se realizó un barrido de dureza como se representa en la Figura 2.8



Figura 2.8 Esquema de las mediciones de microdureza.

En la Figura 2.8 se representó el esquema de las mediciones de la microdureza: barrido 1: zona superior; barrido 2: zona central; barrido 3: zona inferior

En la tabla 2.6 se especifican las pruebas de microdureza Vicker (HV) realizadas de acuerdo a la norma ASTM E-18 para cada una de las zonas de estudio. Se reportan el promedio de cinco mediciones para cada zona de estudio. (American Society for Testing Materials – ASTM)

Tabla 2.6 Zonas consideradas para la medición de microdureza

| Zona | Microdureza HVB | | | | | Promedio HVB |
|------|-----------------|------|------|------|------|--------------|
| MB | HVB1 | HVB2 | HVB3 | HVB4 | HVB5 | HVBP |
| MD | HVB1 | HVB2 | HVB3 | HVB4 | HVB5 | HVBP |
| ZAC | HVB1 | HVB2 | HVB3 | HVB4 | HVB5 | HVBP |

* MB – Metal Base, MD – Metal Depositado, ZAC – Zona Afectada por el Calor

El valor de microdureza obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales o tratamientos. El procedimiento de prueba y la preparación de la muestra suelen ser sencillos y los resultados pueden utilizarse para estimar otras propiedades mecánicas. La prueba de dureza se utiliza ampliamente para inspección y control. El tratamiento térmico o el trabajo efectuado en una pieza metálica resultan generalmente en un cambio de

dureza. Cuando se establece el valor resultante de la microdureza de un tratamiento térmico a un material dado por un proceso determinado.

2.4 Cálculo del carbono equivalente

El carbono equivalente total, se calculó en función de los contenidos de Si, P, Mn y S a través de la metodología de cálculo propuesta según Quintero *et al.* (2016),

La influencia combinada de los elementos que se consideran impurezas se evalúa mediante la expresión siguiente:

$$C_{eq} = \%C + 0,3(\%Si) + 0,33(\%P) - 0,27(\%Mn) + 0,4(\%S) \quad (2.1)$$

donde:

C- contenido de carbono, %

Si- contenido de silicio, %

P- contenido de fosforo, %

Mn- contenido de manganeso, %

S- contenido de azufre, %

El cálculo del carbono equivalente permite evaluar el efecto de los elementos en sus propiedades mecánicas, donde el contenido de carbono es el que más afecta esta propiedad, aunque otros elementos químicos ejercen también influencia, como el manganeso, el cromo, aunque en menor escala. La influencia de los elementos químicos que componen el acero sobre la templabilidad se acostumbra cuantificar a partir de un parámetro conocido como carbono equivalente (C_{eq}), que reduce teóricamente el efecto que sobre esta propiedad tienen los elementos químicos del acero, a un efecto equivalente pero donde el único elemento de aleación además del hierro fuera el carbono. Permite estimar si una determinada fundición será hipo o hipereutéctica y la posibilidad de agrietamiento durante la solidificación.

2.5 Metodología de cálculo para el proceso de soldadura

Como material de aporte, la especificación de la AWS A 5.16, establece varillas y materiales de aporte para la soldadura de la fundición gris y aleaciones (Yamauchi *et al.* 2002). En cualquier tipo de proceso de soldadura, la mejor que se puede obtener, es aquella donde la unión y el material base comparten las

mismas propiedades químicas, metalúrgicas y físicas. Para lograr esas condiciones la soldadura debe estar protegida de la atmósfera durante la operación de soldeo, de otra forma, el oxígeno y el nitrógeno de la atmósfera se combinarían literalmente, con el material fundido resultando en una soldadura débil y con porosidad. El proceso de soldadura de los materiales se efectuó siguiendo los procedimientos establecidos por las normas ASTM y la ASE, las planchas se soldaron en simples juntas a tope con un ángulo de 60°.

Los parámetros más aceptados para la soldadura de la fundición con el uso del método de soldadura SMAW se muestran en la tabla 2.4

Tabla 2.7. Parámetros para el proceso de soldadura

| | |
|-------------------------------|------|
| Diámetro del electrodo (mm) | 3 |
| Temperatura de fusión (°C) | 1420 |
| Temperatura de ignición (°C) | 34 |
| Rendimiento (%) | 0,75 |
| Conductividad Térmica (W/m°C) | 57 |

Entre los principales parámetros tenemos los materiales de aporte, esto determina la intensidad de soldeo. El régimen de soldadura depende de diversos factores: tipo de material base, tipo de alambre, fundente, tipo de unión. Este proceso ocurre en tiempos muy cortos y con una variación de temperaturas extremas que van desde la fusión hasta aquellas que no afectan la microestructura del metal base. En general la velocidad del arco a lo largo de la pieza de trabajo es mucho mayor que la velocidad de difusividad térmica, es decir, el flujo de calor en la dirección del trabajo es pequeño comparado con el de la dirección perpendicular de avance.

2.5.1 Intensidad de corriente

La intensidad de la corriente de soldadura depende del diámetro del electrodo, el cual se selecciona atendiendo: al espesor del metal base, al tipo de construcción soldada, además el tipo de revestimiento y de la posición del cordón en el espacio influyen en la magnitud de la intensidad y según Quintero *et al.* (2016), se determina como:

$$I_s = 2,5d_e^2 + 355d_e - 18 \quad (2.2)$$

donde:

I_s - intensidad de corriente de soldadura; A

d_e - diámetro del electrodo; mm

2.5.2 Voltaje del arco eléctrico

Las funciones principales de la tensión (voltaje) es estabilizar el arco y proporcionar un cordón liso, sin salpicados; además, la tensión es dependiente del gas usado para la soldadura. La tensión de arco no influye significativamente en el ancho del cordón; influye notablemente en el refuerzo (forma cóncava o convexa del mismo), teniéndose soldaduras planas (con tensiones altas) y abultadas (contenciones bajas), pero siempre en el rango de tener un arco estable y según Quintero *et al.* (2016), se determina como:

$$U_a = 0,05 I_s + 10 \quad (2.3)$$

donde:

U_a - tensión del arco; V

2.5.3 Velocidad de soldadura

Es el desplazamiento del electrodo a una velocidad adecuada (velocidad de soldadura) fundiendo constantemente una porción del metal base y adicionando metal de aporte producto de su propia fusión. En la medida que el proceso se desarrolla el baño metálico solidifica y forma el metal de la costura, según Rowe & Jeffeus (2008) se determina como:

$$V_s = \frac{\alpha_d \cdot I_s}{F \cdot \rho} \quad (2.4)$$

donde:

V_s - velocidad de soldadura; mm/s

α_d - coeficiente de aporte; g/A min ($\approx 10 \% I_s$)

F - área de la sección del cordón, cm^2

ρ - densidad del metal fundido; g/cm^3

2.5.4 Energía lineal del proceso de soldadura

Cuando se deposita una pasada de soldadura sobre la superficie de una placa, el flujo de calor afecta cada punto produciendo tensiones en función de la distancia a la fuente de calor, Quintero *et al.* (2016), Proponen la siguiente ecuación:

$$E_L = 60 \eta \frac{U_a \cdot I_s}{v_s} \quad (2.5)$$

Donde:

E_L - energía lineal; J/cm

η - eficiencia de la fuente de calor; %

La eficiencia (η) del proceso de soldadura SMAW oscila entre 0,6 a 0,8. En la investigación se asumió un valor de eficiencia de 0,7.

2.5.5 Cálculos numéricos para la soldadura

El cálculo de la longitud del charco de soldadura según (Viada, 2019). mostrará el radio efectivo de la distribución del calor y de su influencia en la zona afectada por el calor.

$$L_t = \frac{Q}{2\pi\lambda(T_s - T_0)} \quad (2.6)$$

Donde:

L_t - longitud del charco de soldadura; mm

Q - energía entrante; W

λ - conductividad; W/mm K

T_s - temperatura de fusión; $^\circ\text{C}$

T_0 - temperatura inicial; °C

Si se combina la longitud de la gota de soldadura con la velocidad de recorrido o de avance (longitud entre velocidad), así resulta el tiempo de la fase líquida en un punto, en la línea central de la soldadura, el cual es observado por el soldador a la hora de ejecutar la soldadura.

Para el cálculo de la energía entrante se emplea la siguiente ecuación:

$$Q=q \cdot l \quad (2.7)$$

donde:

q - energía de calor en Joule por metro lineal de soldadura; J/m

l - longitud a soldar; m

El calor, que se genera en un arco móvil según Howard (2001) o la energía entrante, puede calcularse como:

$$q = \frac{I_s \cdot U_a}{V_s} \eta \quad (2.8)$$

donde:

v_s - velocidad de desplazamiento; m/s

η - rendimiento del proceso

2.5.6 Velocidad de enfriamiento del cordón

El método más usual es determinar la velocidad de enfriamiento sobre la línea central de soldadura en un instante en el cuál el metal pasa a través de una temperatura de interés T_c . Si esta temperatura es inferior a la de fusión, la velocidad de enfriamiento en la soldadura y en la zona afectada por calor inmediata es sustancialmente independiente de la posición.

(Viada, 2019). Propone determinar la velocidad de enfriamiento del cordón a partir del parámetro adimensional "espesor relativo de la placa" el cual permite

determinar cuándo considerar un flujo en dos o tres dimensiones y tipo de placa, su expresión matemática es:

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho C_e (T_c - T_0)}{q}} \quad (2.9)$$

donde:

τ - parámetro adimensional de espesor relativo de la placa

d - espesor de la placa: mm

ρ - densidad del material; g/cm³

C_e - calor específico; J/m °C

T_c - temperatura de fusión; °C

T_0 - temperatura inicial; °C

La velocidad de enfriamiento para una placa fina está dada por:

$$R = \frac{2\pi\lambda(T_c - T_0)^2}{q} \quad (2.10)$$

El tiempo de enfriamiento del cordón se determina por la ecuación 2..

$$t = \eta \frac{I_s^{(1,24+0,0003_e-0,005_s)} \cdot U_a^{0,59}}{108 v_s^{(0,78-0,0003_e)}}$$

2.6 Cálculo de costo del proceso de soldadura

La base para calcular el costo de la mano de obra en pesos por metro se muestra en la ecuación (2.12). El factor operador que se muestra es el mismo que el ciclo de la jornada, que es el porcentaje del tiempo de arco contra el tiempo total pagado (Fernández – Columbié *et al.* 2014).

$$C_{mo} = \left(\frac{Tps}{v_{ys} \cdot Fo} \right) \quad (2.11)$$

Donde:

C_{mo} - costo mano de obra; \$/m

T_{ps} - tarifa de pago al soldador; \$/h

F_o - factor operador; (%), En la soldadura eléctrica manual es de 5 a 30.

Cuando se realiza una construcción soldada hay dos tiempos que se deben tomar en cuenta, estos son: el tiempo en el que el operador está efectivamente depositando material y los tiempos accesorios. Al primero se le conoce como duración de arco y viene a ser el tiempo en que el soldador está depositando metal en la junta. Entre los tiempos accesorios se tiene: tiempo de ensamble, de posicionamiento y de preparación de la junta, cuando retira un montaje de su posición o limpia una soldadura, él está necesariamente ejecutando "reiteradas" operaciones, según se determina como:

$$t_o = \frac{\rho(F)L}{kH \cdot I_s} \quad (2.12)$$

Donde:

t_o - tiempo principal de soldadura; min

ρ - peso específico del material; kg/dm³

F - área de la sección transversal del cordón; cm²

$F_1 = (6-8)d_e$; para la primera pasada

$F_2 = (8-12)d_e$; para las demás pasadas

L - longitud a soldar; mm

kH - coeficiente de depósito; ($kH \approx 8,9-9,5$)

I_s - intensidad de corriente; A

El costo de la energía eléctrica se considera parte de los gastos generales. Por otro lado, cuando es necesario comparar procesos competitivos de manufactura o de soldadura se sugiere incluir el costo de la energía eléctrica como costo directo en los cálculos. En ciertas plantas, a la energía eléctrica se le considera

como gasto directo y se carga junto con cada uno de los trabajos. (Fernández – Columbié *et al.* 2014).

$$C_{ee} = \left(\frac{Te \cdot U_a \cdot I_s \cdot Pmd}{1000 \cdot Vd \cdot Fo \cdot Efe} \right) \quad (2.13)$$

Donde:

C_{ee} - costo de energía eléctrica; \$/m

Pmd - peso del metal depositado; kg/m

Vd - velocidad de depósito; kg/h

Efe - eficacia de la fuente de energía; %

La eficiencia de la fuente a considerar será del 95 %.

La cantidad de electrodos necesarios para realizar la unión se determina por la siguiente ecuación:

$$C_E = \frac{S \cdot L_c \cdot \rho}{10^6} \cdot 1,2 \quad (2.14)$$

Donde:

C_E - cantidad de electrodos; kg

S - área de la sección transversal de la pieza; mm²

10^6 - factor de conversión

$1,2$ - pérdidas por salpicaduras, calentamiento, aprovechamiento del electrodo

Para el cálculo de costo definimos una fórmula de cálculo que contemple las variables principales, así como la incidencia de cada proceso de soldadura a través de los distintos consumibles que participan y los rendimientos que afectan a cada uno de ellos (Fernández – Columbié *et al.* 2014).

$$C_{t_{kgmetaldepositado}} = \frac{M}{E_{ef}} + \frac{C_{mo}}{V_d \cdot B} + \frac{C_g \cdot Q}{V_d} + \frac{C_{ee} \cdot U \cdot I}{1000 \cdot V_d} + \frac{A}{V_d \cdot B} + F \cdot R \quad (2.15)$$

Donde:

$C_{t_{kgmetaldepositado}}$ - costo total por kg de metal depositado; \$/kg

- M - costo del material de aporte; \$/kg
- C_{mo} - costo de la MO directa; \$/h
- A - costos indirectos (MO indirecta, seguro, flete, mecanizado); \$
- C_g - costo del gas de protección; \$/m³
- C_{ee} - costo de la energía eléctrica; \$/kWh
- V_d - velocidad de deposición; kg/h
- E_{ef} - rendimiento del material o eficiencia del proceso; %
- R - relación fundente/alambre
- B - factor de marcha u operatividad; %

2.7 Conclusiones

- ✓ Se establecieron los procedimientos para caracterizar el comportamiento microestructural y de microdureza del acero AISI 1025 luego de ser sometido a proceso de SMAW empleando como material de aporte E- 7018.
- ✓ Se desarrolló la metodología del cálculo del carbono equivalente total, mediante el cual se permitirá evaluar la posibilidad de agrietamiento durante el proceso de solidificación.
- ✓ Se establecieron la metodología de los cálculos de costos del proceso de soldadura se considera la incidencia de los renglones que intervienen durante la soldadura del acero al carbono AISI 1025 en correspondencia de la preparación de las diferentes juntas, material y máquinas empleados.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Introducción

La soldadura por arco de metal protegido puede efectuarse con corriente tanto alterna como continua, siempre que se use el electrodo adecuado. El tipo de corriente de soldadura, la polaridad y los constituyentes de la cobertura del electrodo afectan la rapidez de fusión de todos los electrodos cubiertos.

Para un electrodo determinado, la rapidez de fusión se relaciona directamente con la energía eléctrica suministrada al arco. Parte de esta energía se destina a fundir una porción del metal base, y otra parte sirve para fundir el electrodo. El objetivo del capítulo es determinar el comportamiento microestructural del acero AISI 1025 sometido a proceso de soldadura con electrodo revestido del tipo E 7018.

3.1 Análisis de la composición química del material base

El análisis químico del material base, como se observa en las tablas 3.1, se realizó con el empleo de un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón, ubicado en el laboratorio del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, Moa.

Tabla 3.1. Composición química del material base.

| C% | Si% | Mn% | S% | P% | Cr % | Ni% | Fe% |
|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| 0,16 | 0,12 | 0,56 | 0,018 | 0,023 | 0,02 | 0,016 | 99,083 |

Como se observa en la tabla 3.1 los resultados del análisis de la composición química del material base, donde se observa un contenido de los elementos que conforman el acero al carbono, donde el mayor % corresponde al Fe con 99,083 % que corresponde con lo que establece la norma ASTM y según Guliaév, 2014 con respecto a los límites de contenido de Fe para este tipo de material que oscila entre 97,0 y 99,5 %

Se consideran impurezas constantes de los aceros en manganeso, silicio, fósforo, azufre y ciertos gases (hidrógeno, nitrógeno y oxígeno), que en mayor o menor cantidad están siempre presentes en los tipos técnicos de aceros.

Por lo general el contenido de estos elementos está limitado por los siguientes límites superiores: Mn 0.8 %; Si 0.5 %; P 0.05 % y S 0.05 %, si su contenido es mayor el acero debe considerarse aleado, tipo en el cual estos elementos se introducen especialmente (Guliaév, 2014). Con los contenidos de impureza obtenidos (tabla 3.1) en el análisis químico se puede concluir que no corresponde a un acero aleado o especial, ya que sus contenidos no superan los límites establecidos según (Guliaév, 2014).

3.2 Análisis del cálculo del carbono equivalente total

Según la metodología de cálculo descrita por la ecuación 2.1 según Quintero et al, 2016 en el capítulo 2 de la investigación se obtuvo un valor total de carbono equivalente igual a 0,06 %. De acuerdo a este resultado se puede analizar la influencia sobre el proceso de fundición de este material base (acero AISI 1025) aleado con el material de aporte (E 7018), pueden variar sus propiedades mecánicas y microestructural en la unión soldada. El aumento del contenido de carbono en el acero hace que se eleve su resistencia y disminuya su plasticidad (Fernández et al, 2014), propiedades mecánicas que se refieren a piezas laminadas en caliente sin tratamiento térmico, es decir, con estructura de perlitas más ferrita. A medida que aumenta el contenido de carbono, varía la estructura del acero; si el contenido de carbono es menor que el 0.8 % la estructura del acero constará de ferrita y perlita. Según el resultado obtenido el porcentaje de carbono equivalente total es inferior a 0,8 % por lo que en el material estudiado va a disminuir su resistencia y va a elevar su plasticidad que corresponde con lo planteado por Guliáev, 2014.

3.3 Análisis microestructural

A continuación, se representan las figuras que muestran el análisis microestructural, en las diferentes zonas analizadas para el desarrollo del estudio.

El acero AISI 1025 a temperatura ambiente, está constituido por una estructura de hierro α , al aplicar temperatura sobre él, los cambios en la microestructura

no son apreciables. Sin embargo cuando en estos tipos de acero se realiza unión de soldadura con materiales de aporte que depositan alto contenido de carbono (0,5 -0,9), entonces la microestructura del metal base cambia su comportamiento. La importancia de conocer el estado inicial del material base mediante una micrografía radica en la necesidad de observar el cambio de estructura durante la deposición de los cordones del revestimiento aplicado y los tratamientos térmicos aplicados, con respecto a la condición inicial del mismo, ya que los cordones y dichos tratamientos someten al material base a diferentes condiciones de calentamiento y enfriamiento que producen variaciones dentro del mismo en función del calor aportado. (Creme, 2015)

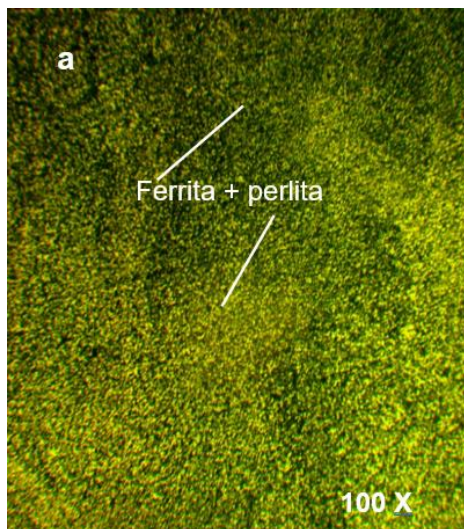


Figura 3.1 Zona Fundida.

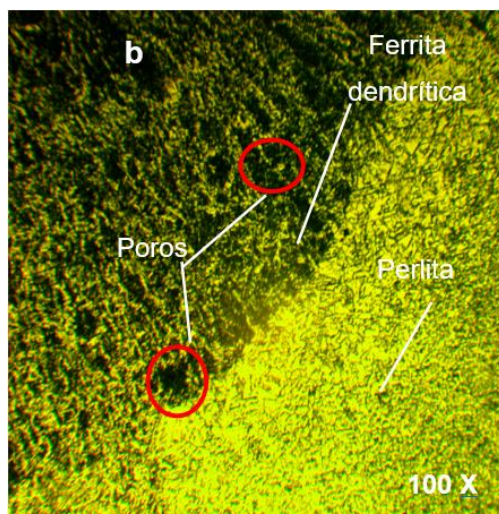


Figura 3.2 Interface del cordón.

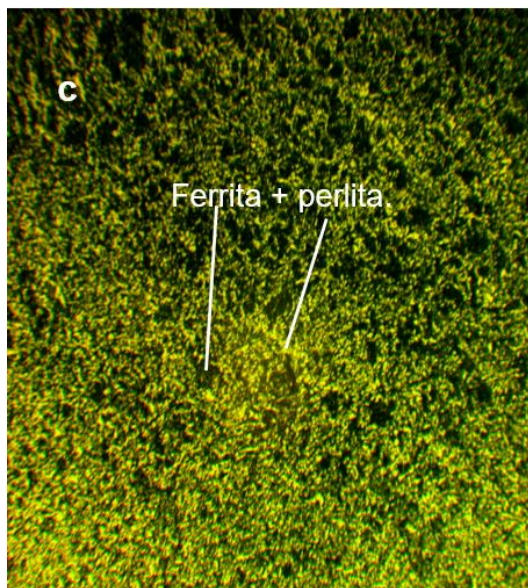


Figura 3.3 Zona afectada térmicamente.

De acuerdo al análisis microestructural en el cual se realizaron el estudio en la zona fundida (ZF), zona afectada térmicamente (ZAT) y la zona de interface del cordón de soldadura (ZIC). En Figura 3.1 se obtiene una formación de microconstituyentes de ferrita más perlita en la zona fundida; en la Figura 3.2 ocurrió la formación de ferrita más perlita, pero ocurriendo la formación de poros el cual ocasionaron el agrietamiento del material durante el proceso de solidificación con el empleo del material de aporte E 7018, los cuales están asociados a la inadecuada preparación de la unión, en la cual no se eliminó todo vestigio de suciedad. En la unión soldada, la intercara de la soldadura es un estrecho límite que separa la zona de fusión del material base del electrodo, de la zona afectada por el calor, constituida por una banda completa y delgada de metal base parcial o completamente fundido durante el proceso de fusión, el cual se ha solidificado inmediatamente después.

El material base se caracteriza por su baja resistencia a la tracción y deformación plástica, siendo esta última propiedad junto a la presencia de inclusiones de grafito el factor de mayor incidencia en las propiedades de soldadura de reparación en las piezas de acero al carbono. Con el calentamiento local en una pequeña masa de metal producto de la incidencia de la fuente térmica para realizar el proceso aparece la dilatación en todas las direcciones, surgiendo en las zonas adyacentes tensiones de compresión (Viada, 2020).

En la Figura 3.3 se muestra la zona afectada térmicamente se puede apreciar la formación de ferrita más perlita esto está dado porque los contenidos de carbono del material base y el material de aporte empleado para el desarrollo de la investigación es menor a 0,8 % solo teniendo lugar la formación de ferrita y perlita de acuerdo con lo establecido por (Guliáev, 2014).

3.4 Análisis de microdureza

En la tabla 3.2 se muestran los valores obtenidos en el análisis de microdureza, analizada en cada zona afectada por la transferencia de calor. El método empleado para medir la microdureza se expuso en el capítulo número 2 de la investigación.

Tabla 3.2 Análisis de la microdureza del acero al carbono

| Microdureza HV | | | | Promedio (HV) |
|----------------|-------|-------|-------|---------------|
| MB | 126,2 | 112,8 | 117,9 | 118,9 |
| ZF | 180 | 177,8 | 200,5 | 186 |
| ZAC | 181,8 | 188,1 | 194,9 | 188,3 |
| ZIT | 242,3 | 198,9 | 201,5 | 214,2 |

Según los valores obtenidos se puede afirmar que con respecto al material base aumenta la microdureza en las zonas analizadas después de someter a material a un proceso de fundición por soldadura manual por arco eléctrico. Se realizó con el objetivo de determinar las variaciones asociadas a la geometría de la pileta ya que no se alcanza la misma deformación en todos los puntos de las zonas de soldadura. El material base presenta una microdureza promedio de 118,9 HV, en la zona de influencia térmica (ZF) 186 HV, en la zona afectada térmicamente de 188,3 HV y en la zona de influencia térmica (ZIT) 214,2 HV. El aumento de la microdureza se asocia al incremento de la presencia de la estructura de ferrita más perlita, los cuales, en los aceros son microconstituyentes de gran dureza, además con la introducción de calor en el material base, existen mayores transformaciones debido a los ciclos de calentamiento y enfriamiento. El menor

tamaño de grano y la mayor densidad de dislocaciones hacen entonces que la fase de ferrita y perlita tengan una microdureza mayor.

3.5 Análisis del cálculo de los parámetros de soldadura

Se realiza el análisis del ciclo térmico de soldadura para el acero al carbono, independientemente de que durante la soldadura manual por arco eléctrico se emplea electrodo de tipo E7018, se consideran que los resultados obtenidos son aplicables en todas las condiciones por la deposición de los mismos que son del tipo ferrítico.

El diámetro del electrodo seleccionado fue de 3 mm para la soldadura de la unión similar con preparación de bordes a 60°, se considera este diámetro porque los aceros al carbono al estar expuestos a altas temperaturas, en ellos surgen esfuerzos térmicos y de contracción, por los mismos no ser susceptibles al tratamiento térmico.

A partir de la selección de los electrodos y por la ecuación 2.2 se determinó la intensidad de la corriente, para un diámetro de electrodo de 3 mm, la intensidad de corriente a emplear es de 120 A, corriente continua y polaridad inversa.

En los procesos de soldadura manual por arco eléctrico y electrodos revestidos para la unión del hierro gris, se requiere de la polarización invertida que permite lograr mayor fusión en el baño y menor penetración, de esta forma se evita el emblanquecimiento o estructura blanca, que provoca fragilidad en los cordones de soldadura de estos materiales base. Con esta polarización se consigue mayor penetración y un aumento en la duración del electrodo. (Fernández – Columbié *et al.* 2014).

La tensión del arco fue calculada por la ecuación 2.3 donde se consideró la intensidad de la corriente, se determinó que la tensión necesaria para realizar el proceso de soldadura es de 16 V, siendo esta magnitud permisible dentro de los parámetros de la soldadura SMAW que es de (5 – 35) V (Maratray, 2000).

Las funciones principales de la tensión (voltaje) son estabilizar el arco y proporcionar un cordón liso, sin salpicaduras. Por otro lado, reporta Ghosh *et al.* (2004) que para electrodos de 3 mm la tensión del arco no influye

significativamente en el ancho del cordón, sino, en el refuerzo y en una junta de 8 mm de espesor, la penetración depende del parámetro tensión del arco, de la velocidad de avance y principalmente de la corriente, la penetración varía alrededor de la velocidad y la tensión (Mohamed, 1998).

La velocidad de soldadura para realizar el proceso de unión del acero al carbono se determinó por la ecuación 2.4, para un coeficiente de aporte de 12,1 g/(A·h), el área de la sección transversal del cordón en una junta de 60° es de 0,1293 cm² y una densidad del material de 7,2 g/cm³, se obtuvo una velocidad de soldadura de 0,0043 m/s.

La velocidad de soldadura encontrada, la corriente y el voltaje en conjunto, controlan el calor aportado por el proceso de soldadura, en la soldadura disímil, por la diferencia de los materiales base, hay que tener presente las características que presentan los mismos, no obstante, el propósito de una adecuada selección de la velocidad, causará la fusión de los materiales para que al solidificar permitan la formación de una unión integral, según fue reportado por Marulanda *et al.* (2007).

La energía lineal del proceso de soldadura se determinó por la ecuación 2.5, se tuvo en cuenta una tensión del arco de 16 V, la intensidad de la corriente de 120 A, la velocidad de 0,0043 m/s y el rendimiento del proceso de soldadura, que para la soldadura SMAW es de 0,7, el valor obtenido para la energía lineal es de 18753,48 J/m.

El proceso de soldadura está caracterizado por los diferentes aportes de energía, así como las variaciones de temperaturas según las isotermas del proceso, la distancia a que se encuentra la fuente y la velocidad de traslación e intensidad de la misma en cada punto del material, donde para el caso correcto de la distancia, según la literatura consultada (Radhakrishnan, 2000) plantea que la temperatura lograda en un punto determinado guarda una relación inversa con la separación desde la línea de aplicación del calor.

Los efectos, más graves, en el material base serán en las zonas cercanas al cordón, debido a la disipación del calor, Esta zona alcanza temperaturas mayores a la de fusión del propio material y por lo comentado anteriormente, la estructura del acero dúplex varía proporcionalmente a la zona afectada por el

calor.

3.6 Análisis del costo del proceso de soldadura

El costo de la mano de obra se determinó por la ecuación 2.11, la tarifa del pago del soldador según la tarifa salarial de la empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, un soldador con categoría de homologado devenga \$ 3,20 por hora, el factor operador escogido fue 5, así como una velocidad de soldadura de 0,0043 m/s, el costo de la mano de obra estimado para realizar el proceso de soldadura de un metro de soldadura es de 4,10 \$/m. Para la soldadura de la unión disímil, el costo de la mano de obra será de \$ 0,287.

Por la ecuación 2.12 se calculó el tiempo principal de soldadura donde se tuvo en cuenta el peso específico del hierro fundido, el área de la sección transversal del cordón calculada para tres pasadas, es de 0,12938 cm², la longitud del cordón de soldadura es de 70 mm, la intensidad de corriente y el coeficiente de depósito considerado fue 8,9, por lo que el tiempo de soldadura es de 3,66 min.

Para determinar el costo de la energía eléctrica se tuvo en cuenta la tarifa de pago del MINEM a la UNE. La tarifa del MINEM es tarifa A1, que es el pago en MLC, con una demanda contratada de 1 500 kW para obtener este servicio de pago de \$ 3,00. Para los diferentes horarios (pico, normal y madrugada) se establece una tarifa de pago, siendo el precio de \$ 0,04 la tarifa eléctrica establecida en horario normal.

El costo de la energía eléctrica determinado por la ecuación 2.13 se tuvo en cuenta la tensión, la intensidad de corriente, el peso de material depositado, la velocidad de soldadura, un factor operador de 5 y una eficiencia de la fuente de energía de 0,7, permitió establecer que el costo es de 0,895 \$/m. Para 70 mm de longitud de cordón se tendrá un costo de \$ 0,06.

La cantidad de electrodos necesarios calculado por la ecuación 2.14 para un área de la sección transversal de la junta de 12,93 mm², la longitud a soldar 70 mm, la densidad del material de aporte de 7,2 g/cm³, permite establecer que para soldar las muestras seleccionadas se requiere de 0,0072 kg de electrodos.

Para determinar el costo total por peso de kilogramo depositado, se empleó la ecuación 2.21, la cual tiene en cuenta el costo del material de aporte (E7018) que es de \$ 4,48; el costo de la mano de obra de \$ 0,287, los costos indirectos de \$ 6,35; el costo de la energía eléctrica de \$ 0,89; la velocidad de deposición de 1,12 kg/h, la eficiencia del proceso de 0,7 y el factor de marcha u operatividad de 5. En el proceso de soldadura se incurre en un costo en peso por kilogramo de 34,73 \$/kg, en él se han incluido todos los elementos de costos para la unión soldada

3.7 Protección al hombre y medioambiente

El proceso de fundición es altamente generador de residuos sólidos y gaseosos, en la fundición se generan gases nocivos que van a parar en la atmósfera afectando así el medio circundante y la vida de la flora y la fauna de las zonas aledañas.

Las descargas eléctricas pueden causar la muerte lo que significa que no aplicar las medidas de seguridad contra este riesgo puede ser fatal. El riesgo de choque eléctrico está asociado con el equipamiento eléctrico. Esto incluye todos los tipos de equipos energizados eléctricamente. En una máquina de soldadura convencional por lo general el voltaje interno (115 V) es mayor que el voltaje de salida.

Con respecto a la instalación de las máquinas de soldadura, esta debe ser hecha en concordancia con el Código Eléctrico Internacional y los demás códigos locales. Las instrucciones de instalación están incluidas en el manual del fabricante, que acompaña a la máquina de soldadura. Este manual da, además, las dimensiones de los cables de corriente que deben ser usados para conectar la máquina a la línea principal. (Fernández – Columbié *et al.* 2014).

La máquina de soldadura tipo motor generador prioriza la separación completa de la energía primaria y el circuito de soldadura, debido a que el generador está mecánicamente conectado al motor eléctrico. Sin embargo, la caja y la estructura soporte deben estar conectadas a tierra desde las líneas principales del alto voltaje. En las máquinas transformadoras y rectificadoras, los enrollados primarios y secundarios del transformador están eléctricamente aislados entre sí. Este aislamiento puede estropearse en determinado período de tiempo si no se

realizan las prácticas de mantenimiento adecuadas. (Fernández – Columbié *et al.* 2014).

La estructura metálica y la caja de los transformadores y de las máquinas transformador - rectificador deben conectarse a tierra. El terminal de trabajo de soldadura no debe ser conectado a tierra. Es correcto emplear en todas las fuentes de energía los interruptores de desconexión, de forma que ellas puedan ser desconectadas de las líneas principales de mantenimiento. Es extremadamente importante, cuando la máquina de soldadura tipo transformador trabaja en paralelo, que las fases de la línea de corriente trifásica estén seguramente identificadas. Esto asegurará que las máquinas estén en la misma fase, lo que puede chequearse de una forma relativamente fácil, conectando las salidas de trabajo juntas y midiendo el voltaje entre la tenaza del electrodo y las dos máquinas. (Fernández – Columbié *et al.* 2014).

Este voltaje debe ser prácticamente cero. Si es el doble del voltaje del circuito abierto, esto significa que la conexión secundaria o la primaria están invertidas. Si el voltaje es aproximadamente 1½ veces el voltaje normal de circuito abierto, esto significa que las máquinas están conectadas a diferentes fases de la línea de corriente trifásica. Estas conexiones deben realizarse antes de comenzar la soldadura.

El incremento de la vida útil de las piezas de acero al carbono, contribuye en determinada medida a un mejor aprovechamiento de las posibilidades productivas de estos materiales, es decir con el aumento de su durabilidad, se reportan otras ventajas como la reducción del costo de explotación y de mantenimiento del equipo. Con lo que podrían disminuir las importaciones y derivar recursos hacia otros renglones contribuyendo así al aprovechamiento eficiente de los recursos.

3.8 Conclusiones

- ✓ Se determinó que las fases presentes en las microestructuras obtenidas han permitido analizar los importantes cambios a los que están sujetos los aceros de bajo contenido de carbono al ser sometidos al proceso de

soldadura manual por arco eléctrico con electrodo E 7018; cuyas fases son ferrita más perlita.

- ✓ Se caracterizó el comportamiento microestructural en la zona fundida, la zona de influencia térmica y la interface del cordón de soldadura en el depósito con electrodo E 7018 en el acero al carbono se puede apreciar que en la zona de influencia térmica existe la presencia de poros provocando el agrietamiento de material durante el proceso de solidificación.
- ✓ Se concluyó, de acuerdo al análisis de microdureza que existe un incremento en comparación con el material base en las diferentes zonas analizadas; siendo la ZIT con mayor valor de 214,2 HV.

CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ Se determinaron las microestructuras obtenidas tanto en la zona fundida, en la zona de influencia térmica y en la interface del cordón con depósito de electrodo E 7018, son del tipo ferrita, de matriz perlítica y estructura aislada del tipo ferrita dendrítica, cuya formación está dada a que el contenido de carbono, tanto en el material base como en el material de aporte es menor que 0,8 %.
- ✓ Se analizó que durante la soldadura se estableció que el electrodo E7018, solidifica con una estructura ferrita más perlita, siendo propensa al agrietamiento por la aparición de fases duras que provoca rotura de la unión soldada.
- ✓ De acuerdo al análisis de microdureza el material base presenta una microdureza promedio de 118,9 HV, en la zona de influencia térmica (ZF) 186 HV, en la zona afectada térmicamente de 188,3 HV y en la zona de influencia térmica (ZIT) 214,2 HV. El aumento de las microdureza se asocia al incremento de la presencia de la estructura de ferrita más perlita, los cuales, en los aceros son microconstituyentes de gran dureza, además con la introducción de calor en el material base,
- ✓ Al realizar la valoración económica del proceso de soldadura del acero al carbono, el costo total es de 37, 63 MLC, siendo factible el proceso para el CMNi.

RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar el ciclo térmico de soldadura manual por arco eléctrico empleando otro material de aporte, ya que el electrodo E7018 se produce agrietamiento durante el proceso de solidificación del material fundido; por tal motivo no se recomienda usar este material de aporte en la construcción del tanque de almacenamiento de petróleo de la Universidad de Moa.
- ✓ Realizar el análisis estadístico para evaluar la incidencia de la microdureza según la distancia medidas en cada zona de la unión soldada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Askeland, D., 1998, La Ciencia e Ingeniería de los materiales. Grupo Ed. Iberoamérica, México.
2. Bhadeshia, H., 2003, Atomic diffusion, Materials Science & Metallurgy, 2 year course, Metals and Alloys.
3. Bedolla-Jacuinde, A.; Arias, L.; Hernandez, B., 2003, Kinetics of Secondary Carbides Precipitation in a High-Chromium White Iron Journal of Materials Engineering and Performance. 12 (4) 371 – 382.
4. Clapp, P.; Becquart, C.; Charpenay, S.; Kim, D.; Shao, Y.; Zhao, Y.; Rifkin, J., 1993, Martensitic Transformations and Fracture Examined by Computer Simulation, Annual Report of the Centre d'Etude, Saclay, France.
5. Ferraresi, V.; Modenesi, P.; Mastelari, N.; Trevisan, R., 2000, Utilization of acoustic mission to detect reheat cracks during post weld heat treatment, Brasil
6. Fukaura, K.; Yokoyama, Y.; Yokol, D.; Tsujii, N.; Ono, K., 2004, Fatigue of Cold-Worked Steels: Effect of Heat Treatment and Carbide Morphology on Fatigue Crack Formation, Life, and Fracture Surface Observations Metallurgical and Materials Transactions A. 35A (25) 1 289 – 1 300.
7. Haidar, J., 2008, An analysis of the formation of metal droplets in arc welding, CSIRO Telecommunications and Industrial Physics, Australia, 1998.
10. Hussainova, I y Schade, K. Correlation between solid particle erosion of cermets and particle impact dynamics. s.l. : Tribology International,. 41 (14) 323 – 330.
8. John, Y. Enero- febrero de 2000, “Hardfacing: tips and techniques to prevent wear”. American Welder. pág 16-17.
9. Lippold, J.; Kotecki, D., 2005, Welding metallurgy and weldability of stainless steels, 1st edition. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
10. Li, C.; Zhu, Z.; Liu, T., 2005, Microhardness of pore walls in porous titanium prepared with novel powder metallurgy. Powder Metallurgy, 48 (3) 237 – 240.

11. Lord, M.; Svensson, E.; Bhadeshia, H. ,2003, Silicon–Rich Bainitic Steel Welds, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge.
12. Lütjering, G., 2007, Engineering Materials and Process: Titanium, New York, pp. 203 – 250.
13. Mathew, P., 2001, Neural network modelling of hot deformation of austenite, Wolfson College, University of Cambridge,
14. Mendez, P.; Eagar, T., 2000, Modeling of Welding Processes through Order of Magnitude Scaling, Proceedings of the International Conference on Modeling and Simulation of Metal Technologies, Ariel, Israel.
15. Mohamed, Y., 2003, Strain-Induced Transformation of Very Strong Metal St Edmund's College, University of Cambridge.
16. Murugananth, M., 2000, Design of welding alloys creep and toughness, University of Cambridge.
17. Plati, A., 2003, Modelling of ã Precipitation in Superalloys, Tesis, Universidad de Cambridge.
18. Pekka, N.,2003, Predictive Model for the Prevention of Weld Metal Hydrogen Cracking in High Strength Multipass Welds. Doctorate thesis, University of Oulu, Faculty of Technology.
19. Pitrun, M., 2004, 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.
20. Ramírez, A.; Cerpa, S.; Mejías, G.; León, J.; Quintero, A. 2006, Soldadura de un acero inoxidable duplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW. Revista Latinoamericana de Metalurgica y Materiales.
- 21 (1): 43-50. 27. Real, E., Estrada, I.; Mirambell, E., Experimental and numerica investigation on shear response of stainless steel plated girders. Proceedings of the third European Conference on Steel Structures. Coimbra, September 2002.

22. Rodríguez, H. 1987, Metalurgia de la Soldadura. Edit Pueblo y Educación. 613 pp.
23. Suzuki, H., A new formula for estimating HAZ maximum hardness in welded steel, I.I.W. Doc IX 1351-85, 2007.
24. Tabrett, C.; Sare, I., Fracture Toughness of High-Chromium White Irons: Influence of Cast Structure Journal of Materials Science. 3 (2) 2069 – 2077, 2000.
25. Villafiorita, A., 2002, Integration of Formal Methods in the Software Development Process, Cambridge.
26. Wayman, C., Phase transformations, nondiffusive, en Physical Metallurgy. 3ª edición. Capítulo 15, Ed. R.W Cahn y P. Haasen, Elsevier Science Publishers BV, 1031 – 1074. 1983.
27. Zhang, M.; Kelly, P.; Gates, J., The Effect of Heat Treatment on the Toughness, Hardness and Microstructure of Low Carbon White Cast Irons Journal of Materials Science. 36 (15) 3865 – 3875, 2001.

ANEXO

Anexo 0

| | | | |
|---|-----------|---|--|
| No: <u>01</u> | | Denominación: _____ | |
| OT: _____ | | Destino: _____ | |
| Proceso de Soldadura: <u>SMAW</u> | | Tipo: | |
| <u>Manual</u> | | | |
| Elaborado por: Aníbal E. Nicot Hinojosa | | Revisado por: <u>Tomás Fernández</u> | |
| Fecha: _____ | | Fecha: _____ | |
| <u>Metal Base:</u> | | <u>Croquis:</u> | |
| Especificación SFA No: Hierro Fundido (HF 24) | | | |
| C: 0.16; Si: 0.12; Mn: 0,56; Cr: 0,02; Ni 0,016; P: 0,023; S: 0,08; Fe: Resto | | | |
| Clasificación AWS: | | | |
| Dimensión del Electrodo: | 3.2 x 350 | | |
| Espesor del depósito: | 100 mm | | |
| Preparación: | Mecánica | | |
| Fundente del electrodo. | Básico | | |
| <u>Posición:</u> | | <u>Pre calentamiento:</u> | |
| Posición de la ranura: V | | Temp. Mín. de Precal: <u>850 - 950 °C</u> | |
| Progresión de Soldadura: | | Temp. Máx. de Interpasos: _____ °C | |
| Ascend. _ Descend. _____ Plana: <u>X</u> | | Temp. de Post: _____ °C | |
| | | Otros TT: _ | |
| <u>Tratamiento Térmico Post – Soldadura:</u> | | <u>Gas:</u> | |
| Rango de Temp.: <u>600 – 700 °C</u> | | <u>Composición %:</u> | |
| Tiempo de Permanencia: <u>48 hrs</u> | | | |

| | |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| Enfriamiento: Al aire _____ | Gas: _____ Mezcla: _____ Flujo: _____ |
| Medio: Al aire _____ | Protección: _____ |

Anexo 2

| Características eléctricas: | | | | | | | | | |
|--|------|-----------------|--|-----------|-----|---------|-----|--------------------|-------|
| Corriente: <u>Alterna</u> Polaridad: <u>CCPN</u> Voltaje (Rango) <u>48</u> (Volts) | | | | | | | | | |
| Amperaje: <u>170</u> (Amp:) _____ (Amp:) _____ | | | | | | | | | |
| Técnica: | | | Valoración económica: | | | | | | |
| Dimensiones de la boquilla: _____ | | | Valor inicial: _____ | | | | | | |
| Método de ranurado posterior de la raíz: <u>X</u> | | | Precio de recup: <u>\$ 51,63</u> | | | | | | |
| Mov del electrodo: Recto _____ Oscilatorio <u>X</u> | | | Gasto de material: \$/kg. <u>7,19</u> | | | | | | |
| Distancia boquilla superficie de trabajo: _____ | | | Gasto de mano de obra: \$/m. <u>4,10</u> | | | | | | |
| Pases sencillos o múltiples (por lados): _____ | | | Otros gastos: <u> </u> | | | | | | |
| Electrodos: Sencillos <u>X</u> Múltiples _____ | | | Peso de pieza: kg. <u>0,022</u> | | | | | | |
| Velocidad de ejecución (Rango): h /m. | | | Costo de recuperación: <u>\$ 11,29</u> | | | | | | |
| Martillado: <u>No</u> | | | Ahorro: <u>\$</u> | | | | | | |
| Otros: _____ | | | Ahorro: <u>\$</u> | | | | | | |
| No. Cordón | Proc | Metal de aporte | | Corriente | | Voltaje | | Vel de ejec (mm/s) | Otros |
| | | Clase | Diám | AC/CD | AMP | Mín | Max | | |
| 1 | SMAW | UTP 309L-16 | 3,2 mm | AC | 120 | 16 | 20 | 4.3 | |

Técnica de reparación o mantenimiento preventivo

1. Tipo de limpieza inicial y entre pases:

Cepillo _____ solventes _____ abrasivos _____ Calor _____ otros _____

2. Preparación:

- Maquinar la superficie a recuperar.
- Eliminar toda grasa y suciedades del metal.

- Limpiar con acetona u otro líquido la superficie a soldar.

3. Factores del paro de trabajo

- Desgaste por:

Impacto Presión/Fricción Abrasión Corrosión Calor

Cavitación Erosión

- Rotura por:

Accidente Fatiga Choque Sobrecarga Temperatura

4. Otros

Defectos de fundición Defectos por maquinado

5. Técnicas de aplicación

- Revisar el material que esté limpio.

- Control de la temperatura de calentamiento y mantenerla durante el proceso.

- Evitar el derrame del depósito en los extremos.

- Limpiar cada cordón después del primer pase o al concluir el mismo.

- No depositar cordones de forma continua para evitar torceduras.