



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

## **Tesis en opción al título de Ingeniero mecánico**

### **Agrietamiento en uniones soldadas de acero al carbono empleado en el tanque de descarga de lixiviación**

**Autor: Francisco Cremé Revé**

**Tutores: Dr. C. Tomás Hernaldo Fernández Columbié  
Ing. Fernando de la Vara Fernández**

**Moa, 2015  
“Año 57 de la Revolución”**



**Declaración de Autoridad:**

Yo: Francisco Cremé Revé

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

---

Francisco Cremé Revé

---

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié



## **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 Dr. C. Tomás Fernández Columbié.***

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

***A mis amigos que siempre creyeron en mí.***

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

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

***A todos***

***Muchas Gracias.***



## ***Dedicatoria***

***Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.***

***A mi madre: Paula Revé Osorio***

***A mi padre: Luís Cremé Hernández***

***A mis amigos***

***que estuvieron a mi lado durante los 6 años de mi  
carrera***

***A mis profesores***

***A nuestra revolución, por las posibilidades que me  
ofrece***



## **Resumen**

En el trabajo se analiza el comportamiento microestructural y la dureza del acero AISI 1025 soldado con electrodo del tipo E 6010 y E 7018 de diámetros de 3,2 y 4 mm respectivamente, empleando el proceso de soldadura SMAW. Para establecer el procedimiento se prepararon muestras las cuales fueron soldadas y caracterizado el comportamiento microestructural en la zona fundida, la zona de influencia térmica y la interfase del cordón para el depósito con ambos electrodos. La microdureza obtenida en el depósito con el electrodo E 6010 es de 35,2 HV y de 31,5 HV para el depósito con el electrodo E 7018, lo cual está asociado a la soldadura multipasadas, la cual se convierte en un tratamiento térmico de recocido, que disminuye la misma en la medida que se depositan los cordones. Por último se analiza la valoración económica y el impacto medioambiental.



### **Abstract**

This paper analyzes the behaviour microstructure and the hardness of the steel AISI 1025 welding with electrode of the type E 6010 and E 7018 of diameters of 3,2 and 4 mm respectively, using the welding process SMAW. To establish the procedure they got ready samples which were soldiers and characterized the behaviour microstructure in the fused area, the area of thermal influence and the interface of the cord for the deposit with both electrodes. The micro hardness obtained in the deposit with the electrode E 6010 is of 35,2 HV and of 31,5 HV for the deposit with the electrode E 7018, that which is associated to the welding multi pass, which becomes a thermal treatment of had recooked that it diminishes the same one in the measure that the cords are deposited. Lastly it is analyzed the economic valuation and the environmental impact.



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>SÍNTESIS</b>	<b>Pág</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS</b>	
1.1. Introducción	4
1.2. Generalidades sobre la soldadura	4
1.3. Electrodo cubiertos	5
1.3.1. Electrodo de recubrimiento	6
1.4. Soldabilidad de las aleaciones	7
1.5. Afectaciones del calor en la soldadura	8
1.5.1. Capacidad de endurecimiento y enfriamiento	10
1.6. Alteraciones de la estructura del acero	10
1.6.1. Efecto de la temperatura	11
1.6.2. Transformaciones del acero en condiciones de soldadura	11
1.6.3. Baño fundido y continuidad en la soldadura y el material base	12
1.7. Transformaciones en la fase sólida durante el calentamiento	12
1.7.1. Fenómeno de recristalización	12
1.7.2. Crecimiento de grano	14
1.7.3. Transformaciones en la fase sólida durante el enfriamiento	15
1.7.4. Transformación perlítica	15
1.7.5. Transformación martensítica	16
1.8. Recubrimientos duros o <i>hardfacing</i>	16
1.8.1. Propiedades de los materiales para recubrimientos	18
1.8.2. Factores de uso	19
1.9. Conclusiones del capítulo 1	21
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1. Introducción	22
2.2. Funciones del flash tank	22
2.2.1. Características del flash tank	22
2.3. Composición química del acero AISI 1025	23
2.4. Procedimiento experimental	23



2.4.1. Materiales de aporte para la soldadura	24
2.4.2. Características del electrodo E 6010 AWS A 5.1	24
2.4.3. Características del electrodo E 7018 AWS A 5.1	25
2.4.4. Cálculo del carbono equivalente	25
2.5. Parámetros de soldadura	26
2.5.1. Determinación del voltaje del arco eléctrico	27
2.5.2. Cálculo del calor aportado	27
2.5.3. Cálculo de la energía lineal del proceso de soldadura	27
2.5.4. Cantidad de electrodos	28
2.6. Máquina para soldar	28
2.7. Preparación metalográfica de la probeta	29
2.7.1. Desbaste y pulido	30
2.7.2. Limpieza y lavado de las superficies a investigar	31
2.7.3. Ataque químico	31
2.7.4. Ensayo de microscopía óptica	31
2.7.5. Comportamiento microestructural	32
2.7.6. Ensayo de dureza	32
2.8. Conclusiones del capítulo 2	34
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
3.1. Introducción	35
3.2. Análisis de la composición química	35
3.3. Análisis del cálculo del calor aportado	36
3.3.1. Análisis del ciclo térmico	37
3.4. Análisis de los regímenes de corte	38
3.5. Análisis de la dureza longitudinal	38
3.6. Caracterización microestructural de la zona fundida	40
3.6.1. Comportamiento microestructural para la ZIT	41
3.6.2. Comportamiento microestructural de la ZF con electrodo E 7018	43
3.6.3. Comportamiento microestructural de la ZIT con electrodo E 7018	44
3.6.4. Análisis microestructural de la interfase del cordón	45
3.6.5. Análisis macrográfico de la unión soldada	46



3.7. Análisis estadístico	47
3.7.1. Análisis de regresión múltiple	48
3.8. Valoración económica	49
3.9. Valoración del impacto medio ambiental	50
3.9.1. Humos producto de la soldadura	51
3.10. Conclusiones del capítulo 3	53
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>	
<b>RECOMENDACIONES</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍAS</b>	

## **Introducción**

En los procesos de producción de objetos mediante construcciones soldadas en la industria, la aplicación o ejecución de los procesos de soldadura están sujetos y se desarrollan de acuerdo con códigos, especificaciones y normas que regulan el proyecto y fabricación de las construcciones soldadas en dichos objetos. Estos códigos y especificaciones se han elaborado basados 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, desde las primeras armas soldadas en el Egipto de la edad del bronce hace más de 3 000 años, hasta las últimas soldaduras realizadas en los paneles solares de la estación espacial internacional.

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

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 el proceso de soldadura ocurren diferentes fenómenos físicos como consecuencia del campo de temperatura, campo de esfuerzos y deformaciones y campo de estado microestructural. Los esfuerzos residuales en las soldaduras tienen un efecto muy significativo en la integridad de las estructuras, componentes y piezas metálicas, debido a que disminuyen la resistencia a la fatiga y resistencia mecánica de los

materiales. En ocasiones los cordones de soldadura son mecanizados por condiciones de diseño induciendo posiblemente aun más esfuerzos residuales al material.

Actualmente la producción de níquel y cobalto constituye unas de las mayores posibilidades para el desarrollo de la economía cubana, ya que su precio cobra gran auge en el mercado internacional. Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo de la producción se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones y el equipamiento tecnológico, para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos de la región oriental de Cuba y se perfeccione el sistema de extracción minera; lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo.

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

El flash tank es utilizado en la industria minera metalúrgica y específicamente en la planta de Lixiviación en la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, el mismo es diseñado y fabricado con material de acero de bajo contenido de carbono y un espesor de plancha de 19 mm de espesor. Este material es certificado bajo la especificación de la norma ASME SA 516 Gr 70.

El recipiente tiene la función de recibir la pulpa lixiviada procedente de los enfriadores para eliminarle la presión de la misma, ya que en esta etapa del proceso, las presiones que influyen en el proceso, afecta la conducción del mineral lixiviado quien tiene un porcentaje de contenido entre 40 - 45 de sólido, lo cual ha provocado averías causadas por el agrietamiento en las uniones soldadas

El **Problema** a investigar:

Necesidad de determinar el agrietamiento en el cordón de las juntas soldadas del material del que se construye la parte exterior del flash tank en la planta de Lixiviación de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”.

Se define como **objetivo de la investigación**

Determinar las causas del agrietamiento en las uniones soldadas de aceros de bajo contenido de carbono empleado en la fabricación del flash tank de la planta de lixiviación.



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

En correspondencia con el agrietamiento que ocurren en la unión soldada del material del cual se fabrica el flash tank, se seleccionaran electrodos del tipo E 6011 y E 7018, así como el ciclo térmico de soldadura para minimizar las averías que ocurren en el cordón de soldadura.

El **campo de acción**: unión soldada del acero de bajo contenido de carbono del tipo SA 516 Gr 70.sometida a esfuerzo.

Como **objeto de estudio**: propiedades mecánicas y metalúrgicas de la unión soldada del acero SA 516 Gr 70.empleado en el flash tank.

Los **objetivos específicos**

1. Establecer los regímenes de soldadura a emplear en el proceso de soldadura SMAW con material de aporte en el acero SA 516 Gr 70.
2. Realizar diferentes ensayos mecánicos que permitan garantizar la calidad de la unión soldada, así como las propiedades mecánicas de la soldadura.
3. Analizar las estructuras presentes en las uniones soldadas luego de ejecutar el proceso de soldadura con y electrodos revestidos del tipo E 6011 y el E 7018 en el acero SA 516 Gr 70.

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

1. Revisión bibliográfica y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Planificación, diseño y realización de experimentos.
3. Análisis de resultados y obtención de la microestructura resultante del proceso de soldadura SMAW con electrodos revestidos.
4. Fundamentación de las inestabilidades metalúrgicas que surgen en el proceso de soldadura SMAW luego del proceso de soldadura con electrodos E 6011 y E 7018.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso de soldadura.

# CAPÍTULO 1

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

### **1.1. 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.

### **1.2. Generalidades sobre la soldadura**

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 cubiertos

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 en las que pueden emplearse.

Tabla 1.1. Clasificación de los electrodos recubiertos

Tipo de electrodo	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

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:

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.

### **1.3.1. Electrodo de recubrimiento**

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 específico.

#### **1.4. Soldabilidad de las aleaciones**

La American Welding Society define a la soldabilidad como "La capacidad de un material para ser soldado bajo las condiciones de fabricación impuestas dentro de una estructura específica y convenientemente diseñada y para tener un rendimiento satisfactorio en el servicio que se pretende". Esta definición incluye muchas afirmaciones. Una definición más práctica podría ser "la facilidad con la cual se pueda soldar satisfactoriamente y que se logre una unión igual al metal que se está soldando".

En cualquiera de estas definiciones es importante saber todo acerca de las aleaciones que se van a soldar, el diseño de la soldadura, y los requerimientos de servicios, incluyendo las cargas y el ambiente al cual se expondrán. Tal vez la mejor definición sea que un material soldable logre que la coyuntura sea igual en todos los aspectos al metal base, en otras palabras, una unión 100 % soldada.

El material base o el material que se va a soldar deben considerarse desde todos los puntos de vista. Esto incluye sus propiedades físicas, sus propiedades mecánicas, la composición y la estructura química.

Las propiedades físicas no siempre son idénticas en los materiales de la misma composición. Esto se relaciona con el tamaño de la muestra de prueba, con el método de prueba, y con el tipo de microestructura. Las propiedades mecánicas pueden ser diferentes para cada uno de los materiales, aun cuando corresponda a la misma especificación o clase.

Por ejemplo, la dureza está relacionada con la estructura, la cual se ve afectada por los antecedentes térmicos o por el empleo de calor. La dirección de las pruebas tiene un gran efecto sobre los niveles de fuerza, dureza y ductilidad. Además, la composición y la microestructura pueden variar. En el material pesado, la composición puede tener más carbono o aleación para proporcionar la fuerza exigida por la especificación, y la estructura cambiará desde el exterior

hasta el centro, basándose en la diferencia de las velocidades de enfriamiento cuando se elaboró el material.

Para determinar mejor la soldabilidad, es necesario efectuar varias suposiciones:

- a) El material para soldar es satisfactorio para el uso que se pretende. En otras palabras, proporcionará las propiedades necesarias y adecuadas para soportar los requerimientos del servicio.
- b) El diseño de la soldadura es adecuado para el uso que se pretende. Al considerar el diseño de la soldadura hay que incluir el diseño de la parte por soldar.

Después de tomar en cuenta estas suposiciones, es necesario examinar la junta de la parte por soldar. La unión de la soldadura que se requiere tiene que tener fuerza uniforme, ductilidad, muesca dura, resistencia a los esfuerzos continuos, defenderse de la corrosión por medio de la soldadura y el material adyacente.

### **1.5. 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.

El tercer factor es la composición química del material. Si 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 mas serio. Los cuatro principales factores que afectan a la fractura de la zona afectada por el calor son:

- ✓ 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 las fracturas.

### **1.5.1. Capacidad de endurecimiento y enfriamiento**

El empleo de calor en los aceros para incrementar la dureza y la metalurgia de la soldadura tiene mucho en común. El uso del calor para incrementar la dureza se logra por medio de un calentamiento seguido por enfriamiento rápido del material dentro de la soldadura y en lugares adyacentes a ella es en el mismo orden. Si se logra un endurecimiento adecuado por medio del calor serán más precisos los cambios metalúrgicos que se efectúen durante la soldadura (Bedolla-Jacuinde, 2003).

La mayoría de los aceros tienen capacidad de endurecimiento, lo cual se define por la propiedad que determina la profundidad y la distribución de la dureza inducida por el templeado. Esta propiedad puede medirse por la prueba Jominy.

La microestructura del acero templeado también puede estudiarse o relacionarse con la microestructura de las soldaduras. En general el tamaño de grano y la microestructura se relacionan directamente con la dureza y la resistencia. Para incrementar la capacidad de endurecimiento del acero se agregan elementos de aleación. El carbono es el más importante y efectivo, el manganeso sigue en importancia. El cromo y el molibdeno también incrementan la capacidad de endurecimiento. Estas aleaciones también contribuyen con otras propiedades.

### **1.6. Alteraciones de la estructura del acero**

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 y 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 templear muy bien.

Un acero se llama hipereutectoide cuando su contenido de carbono sea mayor a un 0,77 %. La cementita se separa alrededor de los cristales individuales. 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)

### **1.6.1. 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).

### **1.6.2. 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 y Kotecki, 2005; Pekka, 2003).

### **1.6.3. 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. 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 interfase 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.

### **1.7. 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:

#### **1.7.1. 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 recrystalización, dando lugar a las siguientes etapas:

- ✓ **Recrystalización primaria:** se lleva a cabo a la temperatura  $\dot{\epsilon}_R$ , en donde se realiza la reorganización de la estructura cristalina de la aleación.
- ✓ **Recrystalización secundaria:** es la que ocurre cuando la aleación es sometida a temperatura mayores ( $\dot{\epsilon}_S$ ) que la recrystalización 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.

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.

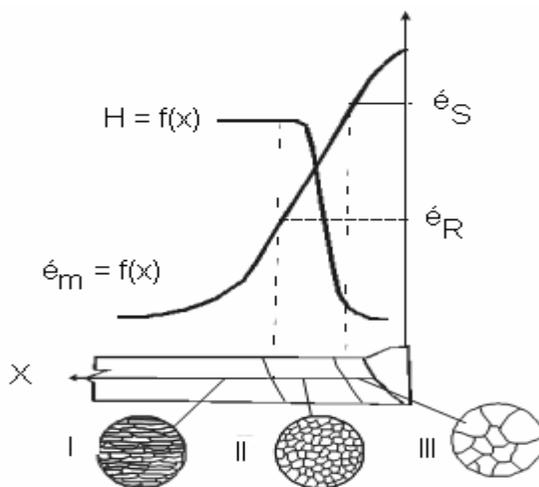


Figura 1.1. Variación de la dureza en función de la temperatura máxima alcanzada en el calentamiento.

En el proceso de soldadura de aceros al carbono deformados por trabajo mecánico, la disminución de su dureza por efecto de la recrystalización se observará principalmente en la región calentada entre la temperatura de

recristalización de la ferrita  $\alpha$ , 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.

### 1.7.2. Crecimiento de 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  $\theta_i$ , (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.

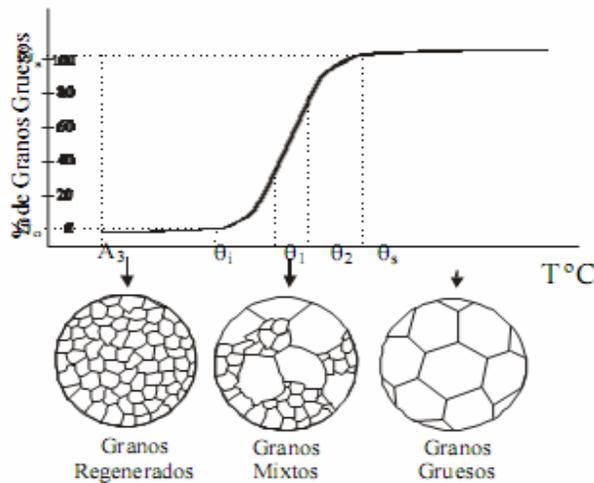


Figura 1.2. Influencia de la temperatura en el crecimiento de grano.

Desde este momento, al aumentar la temperatura, los granos grandes absorben a los pequeños y la proporción de los grandes aumenta. La temperatura  $\theta_s$ , 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  $\theta_i$ , 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.

### 1.7.3. 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 y 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).

### 1.7.4. 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 y

Eagar, 2000). Estructuras similares aparecerán también en el enfriamiento del material fundido si, su composición química coincida 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.

#### **1.7.5. 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).

#### **1.8. Recubrimientos duros o *hardfacing***

Los recubrimientos duros consisten en la aplicación de una capa de un revestimiento duro y resistente al desgaste sobre la superficie de un componente

por soldadura, termo rociado o algún otro proceso relacionado, para reducir el desgaste o pérdida de material por abrasión, impacto, erosión, soldadura localizada (galling) y cavitación. La estipulación de que la superficie se va a endurecer por soldadura, o algún otro proceso relacionado excluye la aplicación de cualquier otro tipo de proceso de endurecimiento, tal como un tratamiento térmico, nitruración (Dogan y Hauk, 1997).

Sobre el material a trabajar, igualmente si la capa de recubrimiento se realiza con el propósito principal de reducir el desgaste, se deben excluir, lógicamente, el uso de materiales usados como por ejemplo para prevenir la corrosión.

Los recubrimientos duros aplicados para disminuir el desgaste pueden variar ampliamente, pudiéndose usar desde las condiciones de servicio más severas de abrasión, tales como trituración y pulverización de rocas, hasta aplicaciones para disminuir el desgaste acero - acero, tal como del desgaste en válvulas donde unas pocas milésimas de mm, son intolerables (Fukaura et al., 2004).

La abrasión es la razón de la existencia de los recargues duros en la industria y la construcción. La abrasión, impacto y algunas veces la corrosión, causan daños y se necesitan materiales que protejan los equipos y alarguen la vida útil. La selección de estos materiales depende de las condiciones y causas de uso. Luego de evaluar las condiciones, se debe escoger el electrodo adecuado para el caso.

La dureza es usualmente una cualidad reduciendo los esfuerzos bajo abrasión. Este puede ser disminuido usando carburos de tungsteno, vanadio- tungsteno, carbono-cromo, o combinaciones de estas aleaciones.

Grupos de aleaciones de aceros austeníticos, martensíticos son usados para agregar dureza a la parte en uso. Al mejorar una propiedad se perjudica otra, como la resistencia ocurre a expensas de la dureza. Cuando existen altos esfuerzos y choques masivos la pieza tiende a fragilizarse y fracturar. En este caso el acero al manganeso es preferido como recubrimiento duro sobre el material base (Tabrett y Sare, 2000).

Existen aplicaciones en donde los recubrimientos duros también se usan para controlar combinaciones de desgaste y corrosión, como las que se encuentran en

los sellos para lodo, cuchillas para el procesamiento industrial de alimentos, bombas que transportan líquidos corrosivos, en donde la mayoría de los casos las partes son construidas de acero al carbono o acero inoxidable, materiales que por sí mismos no proporcionan una resistencia deseable al desgaste. Los recubrimientos son aplicados a las áreas de desgaste críticas de los equipos originales o durante la recuperación de las áreas desgastadas (Zhang et al., 2001)

En los procesos de recubrimientos se busca incrementar el tiempo de servicio de un componente debido principalmente a que las condiciones que causan el desgaste son muy variadas y complejas. Una simple correlación entre las propiedades de los revestimientos y las condiciones de servicio es muy difícil de establecer, pero el mejor aprovechamiento de las propiedades de estas aleaciones para recubrimientos solo se logra con un cuidadoso análisis de las condiciones de servicio, ya que la escogencia al azar de alguna aleación por su reputación o por un análisis superfluo no es aceptable desde un punto de vista ingenieril.

Las principales ventajas del uso de una aleación para recubrimientos duros son:

1. Resistencia al desgaste o corrosión exactamente donde es necesaria
2. Aplicación inmediata
3. Uso económico de costosas aleaciones
4. Proporciona una capa superficial dura resistente al desgaste sobre un material base tenaz que soporta las cargas.

#### **1.8.1. Propiedades de los materiales para recubrimientos**

Las principales propiedades que poseen los materiales para revestimientos duros son:

##### **- Dureza**

- ✓ Macro dureza
- ✓ Micro dureza
- ✓ Dureza en caliente

##### **- Resistencia a la abrasión:**

- ✓ Bajo esfuerzo bajos
- ✓ Bajo esfuerzos altos

✓ Bajo altos esfuerzos e impacto

**- Resistencia al impacto**

✓ Resistencia a la deformación plástica bajo el impacto de cargas cíclicas

✓ Resistencia al agrietamiento bajo impacto

**- Resistencia al calor**

✓ Resistencia al ablandamiento con el tiempo bajo una temperatura determinada

✓ Resistencia a los esfuerzos en caliente

✓ Resistencia al creep

✓ Resistencia a la oxidación o corrosión por gases calientes

✓ Resistencia a la fatiga térmica.

**1.8.2. Factores de uso**

Los recubrimientos duros necesitan la ayuda de la inspección para evitar y combatir los cinco defectos más comunes del uso: abrasión, impacto, adhesión, alta temperatura y corrosión. Una comprensión de los efectos de los diferentes tipos de uso en base a la utilización del recargue duro limita la aplicación a casos específicos.

Actualmente es muy fácil seleccionar el recargue duro basándose en la selección de un solo tipo de uso. Aunque, un acero particular es usado con combinación de dos o más tipos de uso, la selección del mismo no siempre es fácil. La decisión central para la escogencia, se basa en factores primarios con algunos secundarios.

Las aleaciones de recargues duro presentan un rango de maquinabilidad desde fácil hasta difícil. Por lo tanto es importante conocer a priori la selección de la aleación y el método de soldadura. Algunas aleaciones duras de carburos son sensitivas al agrietamiento por esfuerzos o después de depositarse la soldadura y enfriarse (Wayman, 1983).

Existen grietas presentes en el material, que son características de la aleación, y que a bajos esfuerzos y controladas no afectan el uso de dicho material. Usualmente un bajo contenido en el porcentaje de carbono, genera un alivio a que ocurran grietas de este tipo. El bajo porcentaje de carbono en la aleación, es

sinónimo de baja resistencia a la abrasión. Algunas de las aplicaciones de este tipo de materiales se encuentran en la industria de la comida, piezas que deben preservar un grado de aceptabilidad a las grietas por resistencia a la abrasión en uso (John, 2000).

Las aleaciones para desgaste acero-acero suelen ser base hierro y martensíticas con solo enfriarse al aire libre que aplicando con cuidado pueden ser usadas sin agrietamientos sobre partes mecánicas. Las aplicaciones típicas son sobre los carros inferiores de los tractores o palas mecánicas y rodamientos de grúas.

Son diseñadas para formar martensita durante el enfriamiento normal al aire del depósito, produciendo depósitos de entre 45 y 60 HRc, haciendo que este tipo de revestimiento se les denomine autoendurecibles. Los contenidos de carbono llegan hasta 0,7 % y otros elementos como Molibdeno, tungsteno, níquel y cromo (hasta 12 %) son agregados para aumentar la templabilidad, resistencia y la promoción de la formación de martensita y elementos como el manganeso y silicio son agregados para adicionar soldabilidad (Pero-Sanz y Verdeja, 2002).

Las aleaciones más usadas para este tipo de condiciones contienen carburos como por ejemplo, los de tungsteno, cromo molibdeno o vanadio en una matriz de cobalto, las aleaciones que contienen fases, aceros para herramientas u las aleaciones de aceros al manganeso.

Las más comunes aplicaciones de este tipo de revestimientos son rodamientos acero-acero, sin lubricación de las partes metálicas involucradas, tales como componentes de tractores, ruedas y rieles de trenes. La resistencia al impacto es inferior con respecto a los revestimientos perlíticos o austeníticos, pero existe una compensación con el incremento de la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo.



### **1.9. Conclusiones del capítulo 1**

- ✓ 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.
- ✓ Los grupos de aleaciones de aceros austeníticos, martensíticos son usados para agregar dureza a la parte de piezas en uso y mejorar las propiedades de las mismas, fundamentalmente la dureza y la resistencia al desgaste.
- ✓ 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.

# **CAPÍTULO 2**

## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. 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 electrodos E 6010 y E 7018

### 2.2. Funciones del flash tank (tanque de descarga)

Disminuir la presión existente en la pulpa de sulfuros procedente del autoclave y con ello garantizar que se desprenda el  $H_2S$  gaseoso y el vapor de agua disueltos en el licor, facilitando de esta manera la correcta sedimentación del sulfuro en los tanques.

#### 2.2.1. Características del flash tank

La línea de salida del AC por donde circula el sulfuro es de 204 mm de diámetro interior. Después de la válvula automática de control de nivel del autoclave se reduce a 50 mm hasta la entrada al despresurizador, donde al aumentar la velocidad y disminuir la presión se logra que se desprenda el  $H_2S$  gaseoso que está disuelto en el licor. La composición del  $H_2S$  una vez despresurizado es de 95 % y un 5 % de inerte. Este tanque posee recubrimiento de goma de 4,7 mm y ladrillos antiácidos. La tabla 2.1 muestra las características más notables.

Tabla 2.1. Características del flash tank

Tipo	Tanque vertical
Ø interior	2 134 mm
Altura	2 740 mm
Temperatura	98 – 99 °C
Presión de trabajo	0,002 MPa (250 mm de $H_2O$ )
Estrangulador de titanio	Ø 50 mm y largo de 610 mm
Volumen	3 322,7 galones
Material	AISI 1025

La rápida despresurización del flash tank hace que se desprenda gran cantidad de  $H_2S$  de la pulpa diluida de sulfuros. Esta pulpa sale por el fondo de este equipo y es trasladada por gravedad hasta el tanque de sello (TK-4).

El flujo de la corriente de gas del flash tank conjuntamente con gran parte de vapor de agua a una temperatura de  $99\text{ }^{\circ}C$ , entra por el fondo del deshumidificador (TO-1) o enfriador de gases por contacto directo, donde es obligado a pasar a contracorriente a través de una cama de empaquetaduras con anillos de cerámica y sometido a una lluvia intensa de agua de proceso desde la parte superior y central de este equipo proporcionada mediante un distribuidor, El  $H_2S$  en este equipo alcanza una temperatura de  $43 - 46\text{ }^{\circ}C$  y el agua de  $85 - 96\text{ }^{\circ}C$  a la salida. El agua fluye al tanque de desperdicio donde se une con el licor de desperdicio.

### 2.3. Composición química del acero AISI 1025

La tabla 2.1, extraída del Databook 1988 y editada por la American Society for Metals, 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 acero AISI 1025.

Tabla 2.1. Composición química del acero AISI 1025 en %

C %	Mn %	Cu %	Si %	Cr %	Ni %	Mo %	Fe %
0,25	0,65	0,16	0,18	0,25	0,20	0,10	97,75

Al someter un acero hipoeutectoide al efecto calorífico, la perlita se transforma con una temperatura de  $727\text{ }^{\circ}C$ . También la ferrita se descompone lentamente. Cuando un acero se enfría rápidamente después de una temperatura de algo más de  $900\text{ }^{\circ}C$ , 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.

### 2.4. Procedimiento experimental

Para lograr la condiciones de soldabilidad de las muestras seleccionadas se desarrolló un procedimiento experimental que contempla los pasos a seguir, estos pasos permitirán dar cumplimiento al desarrollo del trabajo. Se seleccionó el

material base del cuerpo del flash tank, se prepararon muestras para la soldadura (figura 2.1) de dimensiones 150 x 100 x 20 mm.

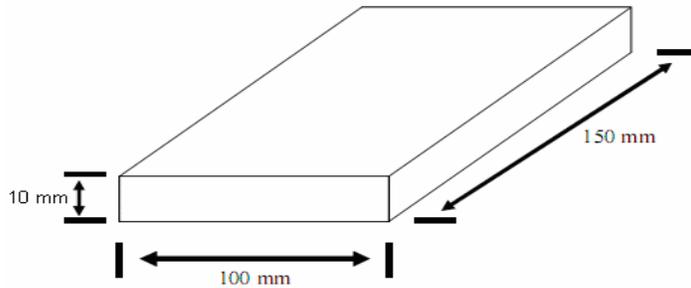


Figura 2.1. Dimensiones de las planchas para material base.

Se acondiciono una mesa de trabajo para la soldadura de tal manera que funcionara como soporte de la pieza de trabajo, con el objeto de obtener parámetros similares de deposición en cada una de las probetas.

#### 2.4.1. Materiales de aporte para la soldadura

Los materiales de aporte empleados para la soldadura y su empleo aparecen en la tabla 2.2. Se clasifican según la norma AWS/ASME: A5.1 – 91.

Tabla 2.2. Materiales de aporte empleados para los depósitos

Junta	1	2
Pase de raíz (PR)	E - 6010	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

#### 2.4.2. Características del electrodo E 6010 AWS A 5.1

Nuevo electrodo celulósico de alta penetración para la soldadura de aceros suaves y baja aleación, especialmente recomendado para soldar en todas posiciones incluyendo la vertical descendente en pasos múltiples o sencillos como en línea de tubería de baja y alta presión, calderas y pailería en general. Es el electrodo más recomendable para soldaduras temporales en montaje por su rápida solidificación y altas propiedades mecánicas.

Como características sobresalientes es un electrodo de facilísima operación en todas posiciones, utilizando corriente directa con polaridad invertida. Alta eficiencia de aporte por su gran contenido de polvo de hierro. Arco estable y penetrante con una fácil remoción de escoria, excelentes propiedades mecánicas a temperatura

bajo cero. Dentro de sus aplicaciones, es un electrodo para propósitos generales. Fabricación de tanques y calderas. Tendido de líneas de tuberías. Construcción y reparación naval. Fabricación de recipientes a presión.

### 2.4.3. Características del electrodo E 7018 AWS A 5.1

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.

El electrodo empleado según AWS se clasifica en:

INFRA 718, Básico (bajo hidrógeno)

Otras denominaciones

ASME SFA 5,1 E 7018

AWS A 5,1 E 7018

En el anexo 1 aparece el procedimiento para el proceso de soldadura.

### 2.4.4. Cálculo del carbono equivalente

El espesor combinado se define como la suma de los espesores que concurren a la junta. El carbono equivalente es la forma de normalizar la composición química de un acero en un solo número, para indicar cómo influye en su templabilidad. Una de las fórmulas más usadas es:

$$C_{eq} = C\% + \frac{Mn\%}{6} + \frac{(Cr\% + Mo\% + V\%)}{5} + \frac{Ni\% + Cu\%}{15} \quad (2.1)$$

**Donde:**

$C_{eq}$  - carbono equivalente; %

<i>C</i> -	carbono
<i>Mn</i> -	manganeso
<i>Cr</i> -	cromo
<i>Mo</i> -	molibdeno
<i>V</i> -	vanadio
<i>Ni</i> -	níquel
<i>Cu</i> -	cobre

La composición química del acero determina su templabilidad, donde el contenido de carbono es el que más afecta esta propiedad, aunque otros elementos químicos ejercen también influencia, como el manganeso, el cromo, el vanadio, 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.

## 2.5. Parámetros de soldadura

Los parámetros de soldadura definidos para cada probeta fueron: corriente de soldadura ( $I_s$ ), tensión de arco ( $U_a$ ) y velocidad de soldadura ( $V_s$ ). El diámetro de los electrodos fue de 3,2 y 4 mm con una longitud de 350 mm.

La intensidad de la corriente de soldadura depende del diámetro del electrodo, el cual se selecciona atendiendo: al espesor del material base, al tipo de construcción soldada, además del tipo de revestimiento y la posición del cordón en el espacio que influyen en la magnitud de la intensidad y según Quintero *et al.* (2006), se determina como:

$$I_s = 2,5d_e^2 + 35,5d_e - 18 \quad (2.2)$$

**Donde:**

$I_s$  - intensidad de corriente de soldadura; A

$d_e$  - diámetro del electrodo; mm

### 2.5.1. Determinación del voltaje del arco eléctrico

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 (con tensiones bajas), pero siempre en el rango de tener un arco estable y según Rodríguez (1987) se determina como:

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

**Donde:**

$U_a$  - tensión del arco; V

### 2.5.2. Cálculo del calor aportado

Debido a las actuales exigencias de mejorar la productividad en la deposición de recargues fue necesario estudiar el efecto de parámetros de soldadura y su resistencia al desgaste. Para ello se seleccionaron dos grupos relacionados con el aporte térmico. El calor aportado se calculó en base a la ecuación 2.4.

$$Q = \frac{U_a \cdot I_s}{V_s} \quad (2.4)$$

**Donde:**

$Q$  - calor aportado; kJ/mm

$U_a$  - tensión del arco; V

$I_s$  - corriente de soldadura; A

$V_s$  - velocidad de soldadura; mm/s

### 2.5.3. Cálculo de la 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, Talero (2000) propone la siguiente ecuación:

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

$E_L$  - energía lineal; J/m

$\eta$  - eficiencia de la fuente de calor; %

La eficiencia ( $\eta$ ) del proceso de soldadura SMAW oscila entre 0,65 a 0,85 (Cary, 1998). A los efectos de los cálculos realizados, se asumió una eficiencia de 0,7.

#### 2.5.4. Cantidad de electrodos

Es habitual que quien tiene que efectuar o presupuestar un trabajo de soldadura de unión de un recipiente, una estructura o una construcción en particular, se vea en el problema de calcular cuanto material de aporte (varillas, alambres, fundentes, electrodos) necesita y muchas veces también el costo total de dicho trabajo.

$$C_e = \frac{S \cdot L_c}{10^6} \delta (1,2) \quad (2.6)$$

**Donde:**

$C_e$  – Cantidad de electrodos; kg

$S$  – Área de la sección transversal de la pieza;  $\text{cm}^2$

$L_c$  – Longitud a soldar; (mm)

$10^6$  – Factor de conversión.

$\delta$  - peso específico del material;  $\text{kg/dm}^3$

1,2 – Coeficiente que tiene en cuenta las pérdidas por salpicaduras, calentamiento, aprovechamiento del electrodo.

#### 2.6. Máquina para soldar

La máquina soldadora (figura 2.2) 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 2.2. Máquina soldadora.

En la tabla 2.3 aparecen las características de la máquina

Tabla 2.3. Características de la máquina empleada

Alimentación primaria		230V monofásica - 60/60 H
Consumo primario de intensidad máxima		19A (TIG) - 29A (ARCO)
Voltaje en vacío		82 V
Gama de ajuste		5A a 150 A
Factor de marcha (a 40 °C)	a 100 %	100 A
	a 60 %	120 A
	a 35 %	150 A
Diámetro de electrodo máximo		4mm / 5/32pulg
Índice de protección		IP23
Normas		EN 60974-1
Dimensiones (L x a x A)		420 x 175 x 300 mm
Peso		10 kg

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.

## 2.7. 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.

En la figura 2.3 se muestran las muestras obtenidas luego del proceso de corte, las cuales serán sometidas a los diferentes procesos para la preparación metalográfica.

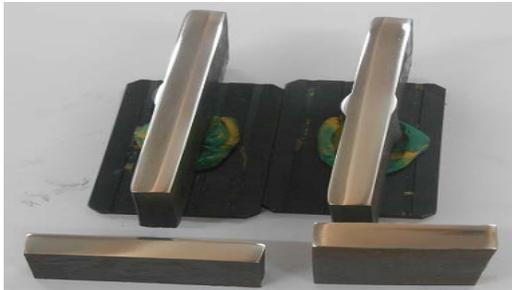


Figura 2.3. Muestras obtenidas del proceso de corte.

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 continua entre ambas planchas unidas.

### **2.7.1. 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.

### 2.7.2. 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.

### 2.7.3. 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 2.4. Reactivo químico empleado

Reactivo	Composición/uso
Acero AISI 1025	Mezcla de 2 mL de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 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.

### 2.7.4. 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 2.4) ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa.



Figura 2.4. Microscopio óptico NOVEL modelo NIM -100.

El microscopio presentado en la figura 2.4, 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.

### 2.7.5. Comportamiento microestructural

Consistió en la observación de una muestra patrón del acero AISI 1025, la cual se empleará para establecer la comparación en las microestructuras obtenidas luego de realizado el proceso de soldadura con electrodos revestidos del tipo E 6010 y el electrodo E 7018. La figura 2.5 se corresponden con la estructura metalográfica del acero AISI 1025.

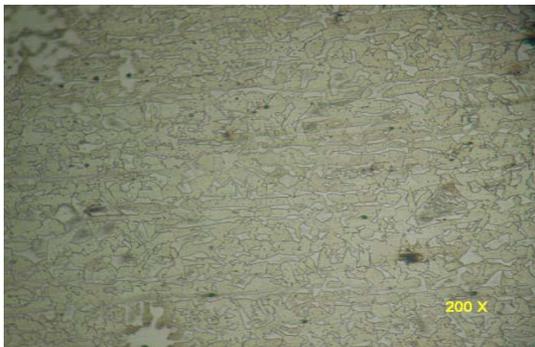


Figura 2.5. Microestructura del acero AISI 1045.

La figura 2.5 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 permitiera determinar posibles cambios ocurridos tanto en la ZF como en la influencia térmica.

### 2.7.6. Ensayo de dureza

Para la medición de la dureza se trabajó con la norma ASTM NORMA E18 – 89a; y las mediciones fueron realizadas con un durómetro Rockwell, usando una carga de  $100 \text{ kgf/mm}^2$  (10 MPa) en la escala Rockwell C para el material base y 310

kgf/mm<sup>2</sup> (31 MPa) en la escala Rockwell C 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 Rockwell C 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 2.6.

Barrido 1: Zona superior; Barrido 2: Zona central; Barrido 3: Zona inferior

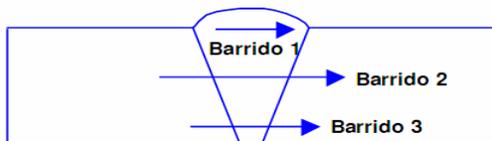


Figura 2.6. Esquema de las mediciones de dureza

La tabla 2.5 se especifican las pruebas de dureza Rockwell C 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.

Tabla 2.5. Zonas consideradas para la medición de dureza

Zona	Dureza HRB					Promedio HRB
MB	HRB1	HRB2	HRB3	HRB4	HRB5	HRBP
MD	HRB1	HRB2	HRB3	HRB4	HRB5	HRBP
ZAC	HRB1	HRB2	HRB3	HRB4	HRB5	HRBP

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

El valor de dureza 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 dureza de un tratamiento térmico a un material dado por un proceso determinado.



## 2.8. Conclusiones del capítulo 2

- ❖ Quedaron fundamentadas las propiedades a investigar, definiendo los principales parámetros a medir de la unión soldada en acero empleado en la fabricación del flash tank.
- ❖ La metodología de cálculo propuesta permite determinar el ciclo térmico de soldadura en función de las diferentes transformaciones de fase que ocurren en una unión soldada por el proceso de soldadura manual por arco eléctrico.
- ❖ Los procedimientos empleados en los diferentes equipos y máquinas están establecidos en las normas correspondientes.

# CAPÍTULO 3

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 3.1. 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 electrodos revestidos del tipo E 6010 y E 7018.

### 3.2. Análisis de la composición química

El análisis químico del material base y de la zona fundida, como se observa en las tablas 3.1 y 3.2, 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 %	Mn %	Cu %	Si %	Cr %	Ni %	Fe %
0,24	0,98	0,03	0,31	0,05	0,08	97,96

Tabla 3.2. Composición química de la zona fundida

C %	Mn %	Cu %	Si %	Cr %	Ni %	Fe %
0,17	1,38	0,05	0,58	0,05	0,08	97,39

Se observa en la tabla 3.2 que se corresponde con la composición química de la zona fundida, una variación en el porcentaje de los elementos, ha disminuido el carbono y se ha incrementado el manganeso y el silicio, elementos que durante el ciclo térmico de soldadura, luego de ser ejecutado, ambos elementos pueden formar carburos de manganeso y silicato, que son propenso a la fragilidad de la unión soldada.

### 3.3. Análisis del cálculo del calor aportado

El acero AISI 1025 a temperatura ambiente, está constituido por una estructura de hierro  $\alpha$ , 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. El calor aportado se determinó en adecuación con la fórmula 2.1, sustituyendo los valores de cada uno de las variables se tiene que:  $Q = 3\ 000\ \text{kJ} / \text{mm}$

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.

El carbono equivalente calculado por la ecuación 2.2 donde se consideran los diferentes elementos que intervienen en la composición química del acero AISI 1025 como son:

**- Metal base:**

C - 0,24 %; Mn - 0,98 %; Cr - 0,05 %; Ni - 0,08 %

$$C_{eq} = 0,24\% + \frac{0,98}{6} + \frac{(0,05\% + 0 + 0)}{5} + \frac{0,08 + 0}{15}$$

$$C_{eq} = 0,41\%$$

El carbono equivalente para el AISI 1025 es de 0,41 %, se manifiesta que la cantidad de carbono afecta en el proceso de soldadura cuando el proceso se realiza con electrodo E 6010, un material con estas propiedades está considerado dentro del grupo de acero que presenta buena soldabilidad, al analizar el material de aporte se aprecia que el carbono equivalente se encontrará en este intervalo, son los elementos del material de aporte lo que confieren a la zona fundida (ZF) y la zona de influencia térmica un incremento en la dureza, la resistencia al desgaste y a la corrosión.

### 3.3.1. Análisis del ciclo térmico

Los cálculos de los regímenes de elaboración para las probetas soldadas se recogen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados de los regímenes de soldadura

Ecuación	Variables	E 6010 M	E 7018	Unidad
2.2	$I_s$	120	160	Amp
2.3	$U$	16	18	V
2.4	$Q$	1 714, 2	2 571,4	kJ/mm
2.5	$E_L$	71 996,4	107 982	J/m
2.6	$Ce$	0,04	0,02	kg

En la tabla 3.3 aparecen los resultados de los regímenes de soldadura calculados a partir de las variables consideradas para el proceso. Las variables  $I_s$ ;  $U$  y  $E_L$ , son los parámetros que definen la reducción de tenacidad de la ZAT del electrodo con respecto a la ZAT de la junta símil, este está relacionada con el contenido de carbono en la composición química de la varilla en el que se registra que el efecto del aumento de carbono en un acero deriva en la reducción de su tenacidad.

Durante el calentamiento los granos iniciales del metal base se transforman y pueden alcanzar otro tipo de fase al superar la temperatura crítica. Luego de alcanzar esta temperatura, en el cambio de fase, la fase de formación que se obtiene puede tener un crecimiento relativamente lento superior  $A_3$  hasta alcanzar la temperatura de sobrecalentamiento que es 1 200 °C, una vez alcanzada esta temperatura la celeridad de crecimiento, de la fase que se obtiene puede incrementarse.

Es así que la zona adyacente de la zona de fusión, puede superar esta temperatura y la cantidad de crecimiento aumente consiguiendo la formación de la región microestructural de grano grueso. En tanto que en la zona de grano mixto la celeridad del crecimiento pueda disminuir y los granos crezcan en menor proporción que en la zona anterior, ya en la zona de grano fino, por la temperatura de sobrecalentamiento, el crecimiento de grano es de forma lenta.

### 3.4. Análisis de los regímenes de corte

La velocidad de corte se determinó teniendo en cuenta el diámetro de la fresa (120 mm), el número de revoluciones (250 rev/min). Sustituyendo en la ecuación 2.3 se tiene que la velocidad de corte a emplear, considerando la fricción entre la herramienta y el metal base, las condiciones de refrigeración es:

$$V_c = \frac{3,14 \cdot 120 \cdot 250}{1000}$$

$$V_c = 94,2 \text{ m / min}$$

La velocidad de corte calculada permite realizar el corte de la pieza sin dañar la superficie que luego será analizada, durante el corte se precisó de abundante refrigeración para evitar el efecto de la acritud. El tiempo de maquinado calculado por la ecuación 2.4 fue de 3 min para cada probeta.

### 3.5. Análisis de la dureza longitudinal

La evaluación de la dureza se realizó en dos ensayos diferentes, para la dureza longitudinal, solo se reportan los valores en el material de aporte a nivel superficial y se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en las tablas 3.1 y 3.2; que se corresponden con las muestras soldadas con el electrodo E 6010

Para los cordones de un pase en probetas con electrodos E 6010, la dureza HRC se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Dureza en los cordones con electrodos E 6010 (1 pase)

Probetas	Dureza	Promedio
1	35 – 31 – 35 – 34 – 34 – 36 – 32	33
2	34 – 34 – 33 – 34 – 34 – 34 – 33	34
3	34 – 39 – 39 – 36 – 36 – 31 – 38	36
4	35 – 37 – 37 – 37 – 38 – 37 – 35	36,5
5	35 – 36 – 34 – 35 – 37 – 37 – 37	35,8
6	35 – 37 – 36 – 36 – 35 – 37 – 38	36,2
7	33 – 35 – 35 – 36 – 35 – 32 – 35	34,4
8	36 – 32 – 36 – 35 – 36 – 35 – 35	35
9	36 – 38 – 36 – 37 – 36 – 37 – 35	36,4
	Promedio general	35,2

Se puede observar que los cordones evaluados presentan variaciones en cada una de las mediciones a lo largo del ensayo, pero las mismas no representan

diferencias significativas. Las durezas reportadas en todos los ensayos consecuentes son el promedio de dichas mediciones, esta dureza reportada no afecta la integridad del elemento soldado.

La tabla 3.2 recoge las dureza de los cordones de soldadura con 2 pases, aquí se han considerado las muestras que fueron sometida a este proceso después de ser soldadas con el electrodo E 7018.

Tabla 3.2. Dureza de las muestras con cordones de 2 pases (E 7018)

Probetas	Dureza	Promedio
1	33 – 30 – 32 – 31 – 31 – 32 – 32	31,5
2	31 – 31 – 31 – 33 – 32 – 30 – 32	31,4
3	32 – 31 – 32 – 32 – 33 – 32 – 32	32
4	33 – 32 – 32 – 33 – 31 – 32 – 33	32,2
5	32 – 33 – 32 – 32 – 31 – 33 – 32	32,1
6	32 – 33 – 32 – 31 – 30 – 33 – 31	31,7
7	32 – 31 – 31 – 30 – 30 – 31 – 32	31
8	30 – 33 – 32 – 33 – 30 – 31 – 30	31,2
9	33 – 31 – 31 – 30 – 31 – 32 – 31	31,2
	Promedio general	31,5

En las probetas ensayadas con el depósito del electrodo E 7018, podemos observar que la dureza en términos generales no sufre variaciones amplias, pero se delimita un decrecimiento en el valor de las mismas a medida que aumenta el número de pases. A partir de los valores reportados, se puede afirmar que todas las durezas del depósito se encuentran entre 31 - 33 HRC, por lo tanto, los cordones desde el punto de vista de la dureza presentan buena resistencia.

La disminución de la dureza en el depósito con electrodos E 7018 está asociada a que cuando se realiza soldadura multipasadas, esta se convierte en un tratamiento térmico de recocido, disminuyendo la dureza anterior.

En las probetas ensayadas con tratamiento térmico de recocido podemos observar que la dureza en términos generales no sufre variaciones amplias, existe una pequeña oscilación de los valores. Se puede observar que entre las diferentes pasadas se produjo un revenido de los cordones previos. Esto se evidencia a través del oscurecimiento de la martensita debido a la precipitación de carburos, que fue mayor en la primera capa y fue disminuyendo hasta desaparecer en la

última capa. También se observa que las zonas afectadas por el calor pueden producir una importante caída de dureza, principalmente en las de mayor calor aportado.

### 3.6. Caracterización microestructural de la zona fundida

La caracterización microestructural consistió en la observación de las muestras, para ello se analizó la zona fundida con material de aporte E 6010, y la zona de influencia térmica de la unión soldada. La figura 3.1 muestra el comportamiento de la zona fundida.



Figura 3.1(a). Zona fundida borde superior

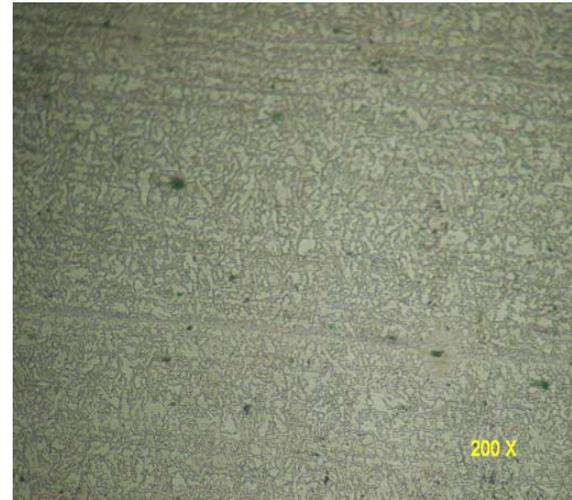


Figura 3.1 (b). Zona fundida (centro)

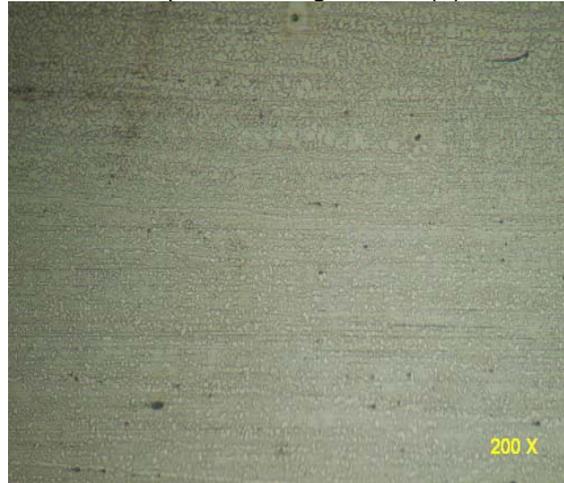


Figura 3.1(c). Zona fundida borde inferior

En la figura 3.1 se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, observado a 200 X (50  $\mu\text{m}$ ). La micrografía de la figura 3.1 fue tomada en una zona cercana al borde, se puede apreciar la presencia de una red de ferrita en

forma de placa (zonas claras), estructura equiaxial con una distribución del grano en forma homogénea, también se observa una estructura perlítica que corresponde a las zonas grises típica de un acero de bajo carbono. Se observa en las microestructuras, una sección de estructuras del tipo ferrita, de perlita, de zonas claras y oscuras respectivamente. La austenita presente se muestra en los límites de grano. La fotografía 3.1 (a) correspondiente a una sección del cordón, donde se puede observar la presencia exclusiva de carburos en los límites de grano en una matriz austenítica.

Se puede apreciar además en las microestructuras que no se revelan defectos típicos como falta de fusión y penetración del cordón, presencia de poros, inclusiones, microgrietas, lo que demuestra buena aplicación del cordón. En el detalle (c) se aprecia una microestructura más fina que la presentada por el material base en el detalle (b), lo cual se puede explicar en términos de un proceso de recristalización forzada por un incremento en la temperatura y el posterior enfriamiento brusco de las zonas cercanas a la zona de fusión, generándose una zona de grano más fina, trayendo como consecuencia una diferencia en cuanto a las propiedades mecánicas.

### **3.6.1. Comportamiento microestructural para la ZIT**

Se analiza en la figura 3.2 el perfil microestructural del depósito (ZIT del cordón de soldadura) para probetas soldadas con electrodos E 6010.



Figura 3.2(a). Zona IT borde superior.

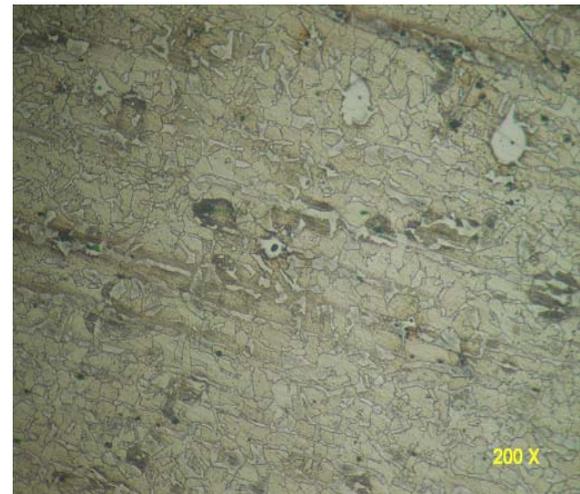


Figura 3.2 (b). Zona IT (centro).

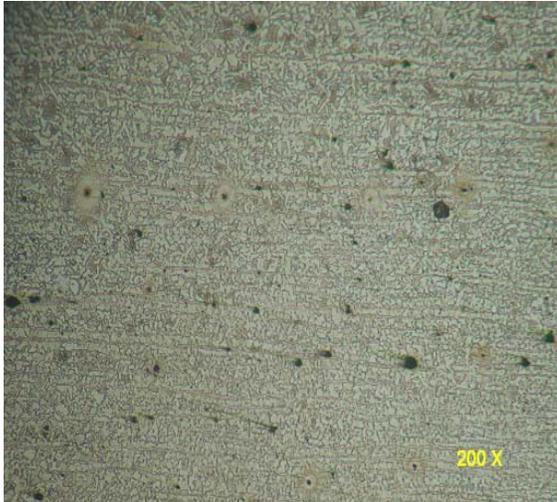


Figura 3.2(c). Zona IT borde inferior.



Figura 3.2(d). Zona de la interfase.

En la figura 3.2 se muestra un detalle de la intercara del cordón zona afectada por el calor. A mayor resolución se puede apreciar en la figura 3.2 (b) una variación morfológica local, comparando la microestructura desarrollada en el cordón con la de la zona afectada por el calor.

Esta diferencia puede atribuirse a la formación de una zona interfacial característica de estos procesos conocidos con el nombre de “Zona de Fusión del Material Base”. En la unión soldada, la intercara de la soldadura es un estrecho límite que separa la zona de fusión del material de aporte 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, pero antes de mezclarse con el metal en la zona del cordón. Por tanto su composición química es idéntica a la del metal base.

En las fotografías, se muestra una sección de estructuras del tipo ferrita, perlita, zonas claras y oscuras respectivamente. La austenita presente se muestra en forma de granos. La fotografía de la figura 3.2 (d) se muestra una sección de la probeta correspondiente a la interfase del cordón, donde se puede observar la presencia de martensita en color más oscuro sobre una matriz de austenita retenida.

### 3.6.2. Comportamiento microestructural de la ZF con electrodo E 7018

El estudio de microscopía óptica realizado a la ZF, permite observar el tamaño de grano promedio, la distribución de los microconstituyentes y algunos aspectos morfológicos que sugirieron durante el ciclo térmico de soldadura aplicado al mismo. La observación se realizó en el plano paralelo a la dirección de laminación, en la sección longitudinal. Las microestructuras que se observan en la figura 3.3 se corresponde con la zona fundida realizada con el electrodo E 7018.



Figura 3.3(a). Zona Fundida borde superior.



Figura 3.3 (b). Zona Fundida (centro).



Figura 3.3 (c). Zona Fundida (centro).

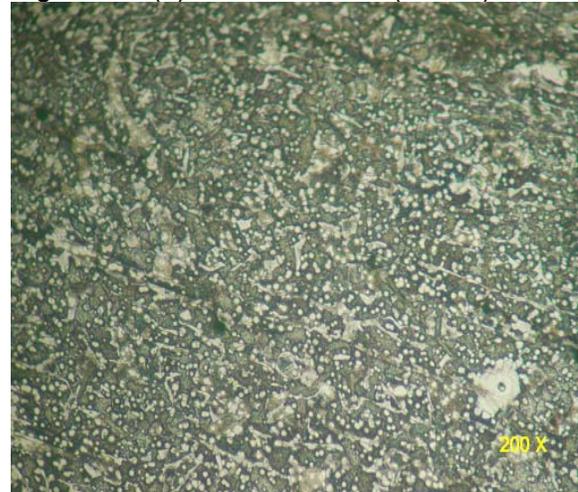


Figura 3.3 (d). Zona fundida (borde inferior).

Las fotografías de la figura 3.3 muestran una sección de la zona fundida del depósito realizado con el electrodo E 7018, donde se puede observar la presencia de martensita en color más oscuro sobre una matriz de austenita retenida (representada por las zonas blancas 3.3 (a)). Las zonas mucho más oscuras de la microestructura representan la presencia de martensita, pero en forma masiva.

Se puede observar que la microestructura observada en el material de aporte (3.3 b), para dos pases, corresponde a una estructura de matriz austenítica con la presencia de martensita, y la probeta 3.3 (d) presenta una estructura de matriz austenítica con presencia de carburos. Pero los resultados mostrados en la dureza nos indica que la dureza de la primera probeta es mayor, se corresponde con la teoría que explica que las estructuras martensíticas presentan la mayor dureza.

### 3.6.3. Comportamiento microestructural de la ZIT con electrodo E 7018

En la figura 3.4 se muestra un detalle de la intercara del cordón zona afectada por el calor. Se puede apreciar una variación morfológica local, comparando la microestructura desarrollada en el cordón con la de la zona afectada por el calor.

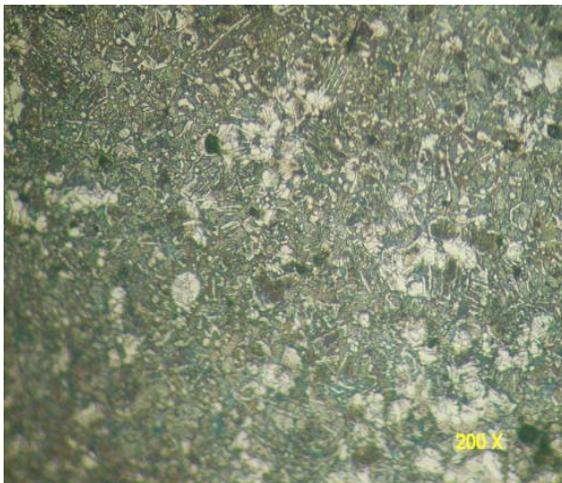


Figura 3.4 (a). Zona IT borde superior.

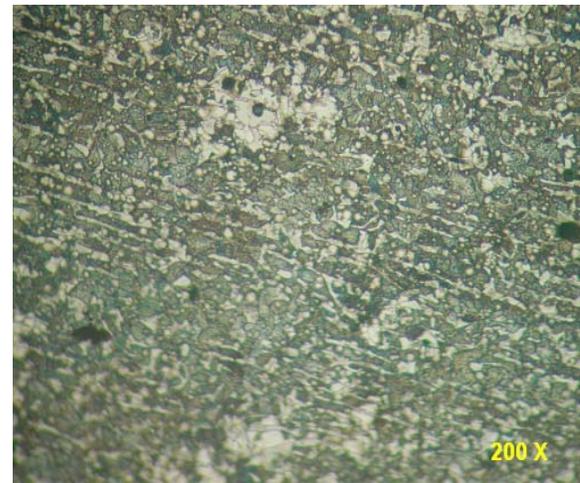


Figura 3.4 (b). Zona IT (centro).

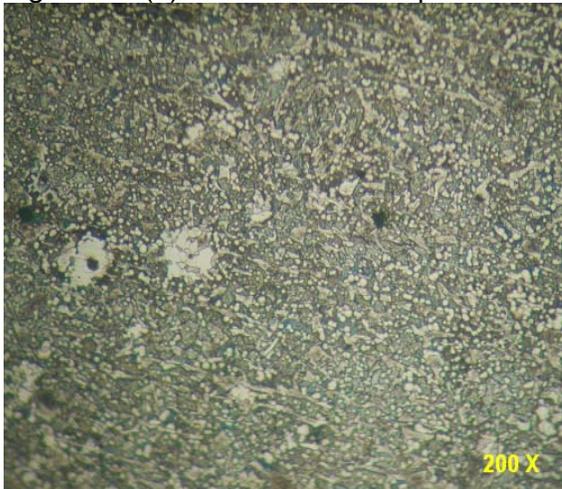


Figura 3.4 (c). Zona IT (centro).



Figura 3.4 (d). Zona IT (borde inferior).

En la figura 3.4 se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido en la ZIT con el electrodo E 7018. La trayectoria seguida en forma ascendente comienza

con una macrofotografía que muestra el cordón en la zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. En la figura 3.4 (a) se muestra una sección de estructuras del tipo Widmannstätten y granos bien definidos de ferrita. La fotografía de la derecha (3.4 (b) muestra una sección del cordón, donde se puede observar la presencia exclusiva de carburos en los límites de grano en una matriz austenítica.

En la figura 3.4 (c) se observa que al aplicar el cordón un tratamiento térmico posterior, las fases presentes son una matriz de austenita y martensita; presentando la forma de grano irregular, característica de dicha estructura con una distribución similar y en la figura 3.4 (d), se muestra una sección de estructuras del tipo ferrita, de perlita, con zonas claras y oscuras respectivamente. La austenita presente en los límites de grano.

Se observa que al aplicar en el cordón un tratamiento térmico posterior de temple, las fases presentes son Widmannstätten, perlita y ferrita; presentando la perlita y la ferrita tamaño de grano similar y la ferrita una distribución mayor.

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 Widmanstätten). Estructuras similares aparecerán también en el enfriamiento del metal fundido.

Las propiedades mecánicas de la ZAC, 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 Widmanstätten) suponen una disminución de la resiliencia y como consecuencia un aumento en la fragilización, que en algunos casos se recomienda un posterior tratamiento térmico con la finalidad de regenerar el grano.

#### **3.6.4. Análisis microestructural de la interfase del cordón**

La figura 3.5 muestran cortes transversales de las probetas soldadas observándose el metal base, el material recargado y el bajo nivel de defectos macroscópicos (poros, inclusiones de escoria, fisuras). Sobre los cortes transversales de los cupones soldados se puede ver que para las probetas

soldadas con electrodo E 7018, la composición del depósito es diferente al del electrodo E 6010, se obtuvo un mayor espesor, así como un mayor ancho de cordón.

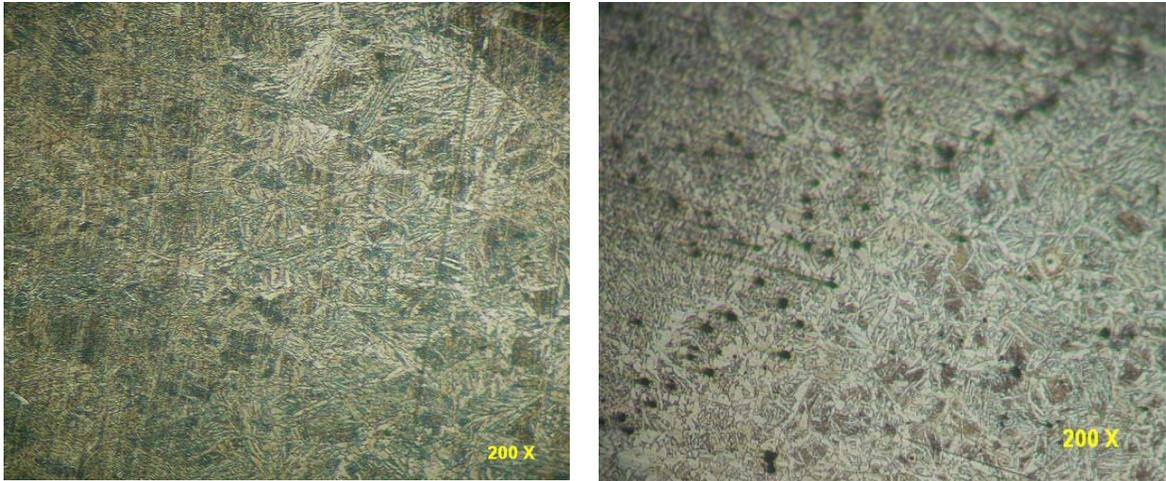


Figura 3.5 (a). Zona interfase borde superior. Figura 3.5 (b). Zona interfase (centro).

Durante el Post Welding Heat treatment (PWHT) tiene lugar la difusión de elementos segregados durante el proceso de solidificación, disminuyendo el gradiente de concentración de los mismos. Como consecuencia de este fenómeno difusivo la austenita retenida ya no se inestabiliza (3.5 (a)) y puede transformarse finalmente en martensita (3.5 (b)). Analizando la distribución de los diferentes aleantes en la microestructura de la probeta patrón, se observa una distribución relativamente uniforme de los mismos a través de los mapeos de composición química.

En la figura 3.5 (a) se observa la evolución microestructural en función de la distancia a la línea de fusión. Se pueden ver la fase martensita y la austenita retenida. Dicha martensita se presenta más oscura en la zona inferior del depósito, debido al revenido que realizaron los sucesivos cordones depositados, con la consecuente precipitación de carburos. Este efecto disminuye a partir de los 5 mm, estando prácticamente ausente en la superficie.

### **3.6.5. Análisis macrográfico de la unión soldada**

La figura 3.5 muestra la macrografía de la unión soldada con procedimiento de soldadura con el depósito de electrodo E 6010 y con el electrodo E 7018 sin precalentamiento antes y después del proceso de la unión soldada.

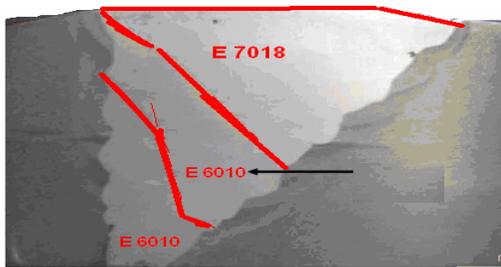


Figura 3.5. Unión desarrollada con electrodo E 6010 y E 7018.

Como se observa en la figura anterior, en la muestra preparada con procedimiento de soldadura y sin precalentamiento se aprecia buena fusión del material de aporte (MA) y del material base (MB), libre de poros y fisuración.

Mediante el precalentamiento se reduce la caída de temperatura y el riesgo de agrietamiento, los índices de expansión y contracción, queman la grasa, modifica la forma del cordón, evita la fractura frágil, permite la difusión del hidrógeno, con una temperatura de 150 °C como mínimo y 185 °C como máximo. En la selección del metal de aporte se realizó en función de su resistencia mecánica a la tensión, la cual debe ser igual o superior al material base.

### 3.7. Análisis estadístico

Se modeló estadísticamente a través del análisis de regresión, la influencia de las variables carbono equivalente sobre la dureza luego de realizado los depósitos de cordones en el acero AISI 1025 con electrodos E 6010 y E 7018, para lo cual es necesario definir si el efecto de la variable en estudio es significativo. En la figura 3.6 muestra el comportamiento de las curvas al plotear cada una de las variables teniendo en cuenta sus niveles.

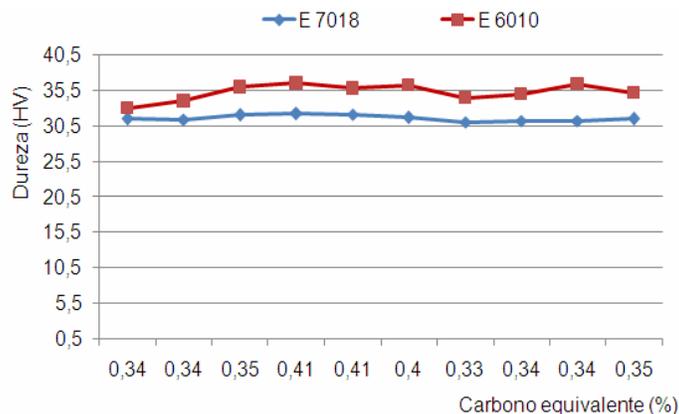


Figura 3.6. Comportamiento de la dureza vs carbono equivalente.

Al considerar el carbono equivalente y su influencia en la dureza de la zona fundida de la unión soldada con electrodos E 6010 y E 7018, realizada con proceso SMAW, se puede apreciar que existe un incremento de la dureza para el electrodo E 6010 y una disminución de esta para el electrodo E 7018. A pesar de que este último se emplea para ofrecer mayor resistencia a la unión, hay que considerar que al depositar los primeros cordones de soldadura (raíz) con el E 6010, este provocó la alteración de la red cristalina e incrementó la dureza, luego el depósito con el electrodo E 7018, provocó el efecto de un recocido en la unión soldada.

### 3.7.1. Análisis de regresión múltiple

Los resultados experimentales fueron procesados por el análisis de regresión múltiple donde se consideró la interacción del carbono equivalente sobre la dureza de los electrodos E 6010 y E 7018. La tabla 3.3 muestra estos resultados.

Tabla 3.3. Análisis de regresión múltiple

Análisis de Regresión Múltiple					
Variable dependiente: CE					
	Error	Estadístico			
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
CONSTANTE	27,8317	41,0174	0,678533	0,3192	
E 7018	-0,0106022	1,4663	-0,00723054	0,49944	
E 6010	21,4768	18,7312	1,14658	0,2892	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	4,24142	2	2,12071	1,90	0,2196
Residuo	7,82358	7	1,11765		
Total (Corr.)	12,065	9			
R-cuadrado = 35,1547 porcentaje					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96,6275 porcentaje					
Error estándar de est. = 1,05719					
Error absoluto medio = 0,65759					
Estadístico de Durbin-Watson = 1,26356 (P = 0,0285)					
Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,158996					

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CE y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$CE = 27,8317 - 0,0106022 * E 7018 + 21,4768 * E 6010$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es menor o igual a 0,5; existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 90 % o superior.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 35,1547% de la variabilidad en CE. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 96,6275 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 1,05719. El error absoluto medio (MAE) de 0,65759 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0,05, hay indicio de una posible correlación serial.

Para decidir la simplificación del modelo, tenga en cuenta que el p-valor más alto en las variables independientes es 0,4944, perteneciendo a E 7018.

La tabla 3.4 muestra el intervalo de confianza para las variables para un 95 %.

95,0% intervalos de confianza para las estimaciones de los coeficientes				
Error				
Parámetro	Estimación	Estándar	Límite Inferior	Límite superior
CONSTANTE	27,8317	41,0174	-69,1594	124,823
E 7018	-0,0106022	1,4663	-3,47787	3,45666
E 6010	21,4768	18,7312	-22,8155	65,7692

Esta tabla muestra 95,0% intervalos de confianza para los coeficientes en el modelo. Los intervalos de confianza muestran la precisión con que pueden estimarse los coeficientes dada la cantidad de datos disponibles y el ruido que está presente.

### 3.8. Valoración económica

Los costos se definen como aquellos recursos que aplicamos en la fabricación de los bienes o servicios que la empresa ofrece, por el contrario los gastos serían aquellos recursos, aplicados en el período contable, en los que se incurrió para conseguir los ingresos de un determinado período o que fueron necesarios para que la empresa pudiera existir durante el mismo. En la tabla 3.3 se recogen los

costos por concepto de rotura y reparación del flash tank, por concepto de agrietamiento en el cordón de soldadura.

Tabla 3.14. Resumen de los costos de la reparación.

Descripción	Renglones	Costos CUC
Equipos y materiales	Ladrillos antiácidos	659 446, 94
	Herramientas	
	Goma	
Tubería y accesorios	Válvulas y tuberías	163 659, 69
	Tornillerías	
	Disco de corte	
Mano de obra	Reparaciones dinámicas	414 927, 16
	Reparación de motores	
	Trabajos eléctricos	
	Instrumentación	
	Reverbería	
Compra de materiales	Viga	44 479,84
	Plataformas (andamiaje)	
	Planchas	
Servicio de ingeniería	Fabricación del Flash Tank	20 200,00
	Administ y proyectos	
	Grupo técnico de mtto	
Otros gastos	Impuestos	111 800,00
	Contingencia	
	Estimado	
Total		1 486 355, 86

Como se puede apreciar en la tabla anterior, al estimar los costos de reparación del Flash Tank por efecto del agrietamiento del cordón de soldadura, se tiene un costo de 1 486 355, 86 CUC. Se puede plantear entonces que al agrietarse el cordón de soldadura, la pulpa lixiviada afecta el sistema de construcción del tanque y conlleva a realizar reparaciones costosas que afectan a la empresa y la economía del país.

### 3.9. Valoración del impacto medio ambiental

El proceso de industrialización y desarrollo ha traído una explotación indiscriminada de los recursos naturales y con ello la contaminación a niveles permisibles de los principales recursos con los cuales cuenta el hombre. Es por ello que constituye una prioridad dentro de cada empresa que se vele y se trabaje sobre la base de disminuir la contaminación que se puede producir.

En las plantas de procesamiento de minerales también se generan grandes cantidades de residuales líquidos que contaminan las aguas. Cuba por ser una isla larga y estrecha hace que la contaminación que se produce en las cuencas hidrográficas se traslade rápidamente a la zona costera y por tanto estos también deben ser incluidos.

Todo residuo o desecho que pueda causar daño a la salud o al medio ambiente es considerado como un residuo peligroso, fundamento por el cual los gobiernos tienen la responsabilidad de promover la adopción de medidas para reducir al máximo la generación de estos desechos, así como establecer políticas y estrategias para que su manejo y eliminación se ejecuten sin menoscabo del medio ambiente y se reduzcan sus propiedades nocivas mediante técnicas apropiadas.

Moa constituye un foco contaminante, producto de las industrias que posee, las cuales arrojan al medio ambiente gran cantidad de productos tóxicos que contaminan tanto el aire, la tierra y el agua. En el caso específico de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, se ha logrado trazar una efectiva política que permite que no ocurran agresiones al medio ambiente y en el caso que ocurran provoquen el menor daño posible. En esta se almacenan gran cantidad de productos que pueden constituir focos de contaminación. Entre estos podemos mencionar el amoníaco, el azufre y el petróleo.

En el caso del amoníaco es un gas tóxico, el cual puede provocar asfixia al ser inhalado. Al constituir una reserva grande puede llegar a afectar un gran porcentaje de los habitantes de la ciudad. En caso de llegar a producirse un escape se recomienda acostarse en el piso y cubrirse la cara con un pañuelo o ponerse la careta antigas. En caso de existir obras protectoras, correr de forma transversal al viento hasta llegar a ella.

### **3.9.1. Humos producto de la soldadura**

Es un problema frecuente en talleres y zonas de trabajo de soldadura, la degradación de la calidad ambiental, motivada por los humos y gases producidos



por las emanaciones ocasionadas por la fusión de los materiales de aporte y de los mismos metales a soldar.

Los gases más comunes que aparecen como componentes del humo de soldadura son: el ozono, los gases nitrosos y el dióxido de carbono, aunque existen otros que se presentan en ocasiones particulares y en dependencia de las características específicas del proceso que se está realizando, como por ejemplo el gas fosgeno, los fluoruros

La solución más común consiste en despedir el aire viciado al exterior, lo cual si bien soluciona el problema inmediato, significa expulsar al exterior elementos contaminantes, acción que las legislaciones medioambientales al respecto restringen severamente. Además, en los talleres donde existe climatización, significa expulsar al exterior un aire climatizado y, por tanto, derrochar así la energía utilizada para llevarlo a esa condición. La solución óptima consiste en depurar y reciclar el aire ambiente, mediante sistemas de filtrado adecuados.

### **3.10. Conclusiones del capítulo 3**

- ❖ Las microestructuras obtenidas han permitido observar y analizar los importantes cambios a los que están sujetos los aceros de bajo contenido de carbono AISI 1025 al ser sometidos al proceso de soldadura manual por arco eléctrico con electrodos.
- ❖ Fue caracterizado el comportamiento microestructural en la zona fundida, la zona de influencia térmica y la interfase del cordón de soldadura en el depósito con electrodo E 6010 y con electrodo E 7018 en el acero AISI 1020.
- ❖ Se caracterizó las incidencias medioambientales que inciden en el proceso de industrialización de la empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, así como las afectaciones fundamentales de la emanación de humo de soldadura en los talleres y zonas de trabajo.



## Conclusiones generales

- ❖ El acero AISI 1025 se considera un acero de buena soldabilidad por presentar un 0,25 % C, sin embargo el depósito con electrodos E 6010 incrementa la dureza hasta 36,5 HV con respecto al electrodo E 7018 que es de 32,2 HV, por lo que los cordones no requieren de un tratamiento térmico para evitar el agrietamiento.
- ❖ Las microestructuras obtenidas tanto en la zona fundida, en la zona de influencia térmica y en la interfase del cordón con depósito de electrodos E 6010 y E 7018, son del tipo ferrita, de matriz austenítica con presencia de martensita y estructura aislada del tipo ferrita Widmannstatten, las cuales no se caracterizan por provocar agrietamiento en uniones soldadas.
- ❖ La reparación del flash tank o tanque de descarga de la planta de lixiviación por concepto de materiales, mano de obra y otros insumos, incurre en costos generales de 1 486 355, 86 CUC
- ❖ Durante el proceso de soldadura se generan gases y humos tóxicos propios del proceso que afectan la salud de los operarios y del personal que allí labora, igual incidencia presenta el derrame de fluido tóxico que se generan en el proceso de lixiviación.



## **Recomendaciones**

- ❖ Los resultados del trabajo demuestran que el agrietamiento no es producto del proceso de soldadura, por lo que habría que considerar si este fenómeno es producto de las tensiones que surgen en el proceso de conformación del cilindro del tanque de descarga.
- ❖ Considerar someter a proceso de tratamiento post soldadura en las proximidades del cordón, con el objetivo de eliminar las tensiones que surgen durante el proceso de soldadura y que algunas de estas tensiones están presentes en el material producto del proceso de obtención por laminado.
- ❖ En próxima investigación, elaborar un prototipo de cilindro considerando el escalado y analizar que influencia ejercen las tensiones radiales, las longitudinales y las transversales en el material luego de ser sometido a proceso de soldadura.

# **BIBLIOGRAFÍAS**



## **Bibliografías**

1. Askeland, D., La Ciencia e Ingeniería de los materiales. Grupo Ed. Iberoamérica, México, 1998.
2. Bhadeshia, H., Atomic diffusion, Materials Science & Metallurgy, 2 year course, Metals and Alloys, 2003
3. Bedolla-Jacuinde, A.; Arias, L.; Hernandez, B., Kinetics of Secondary Carbides Precipitation in a High-Chromium White Iron Journal of Materials Engineering and Performance. 12 (4) 371 – 382, 2003.
4. Clapp, P.; Becquart, C.; Charpenay, S.; Kim, D.; Shao, Y.; Zhao, Y.; Rifkin, J., Martensitic Transformations and Fracture Examined by Computer Simulation, Annual Report of the Centre d'Etude, Saclay, France, 1993.
5. Cisilino, A.; Chapetti, M.; Otegui, J., Minimum thickness for circumferential sleeve repair fillet welds in corroded gas pipelines. International Journal of Pressure Vessel and Piping, v. 79, p. 67 – 76, 2002.
6. Dogan, Ö.; Hauk, J., Laird II G Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons Metallurgical and Materials Transactions A; 28A (12) 25 – 30, 1997.
7. Ferraresi, V.; Modenesi, P.; Mastelari, N.; Trevisan, R., Utilization of acoustic emission to detect reheat cracks during post weld heat treatment, Brasil 2000.
8. Fukaura, K.; Yokoyama, Y.; Yokoi, D.; Tsujii, N.; Ono, K., 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, 2004.
9. Haidar, J., 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, 2008.
11. Iqbal, S., Tensile Properties of Austenitic, Corpus Christi College, University of Cambridge, 2002.



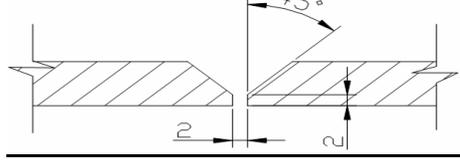
12. John, Y., "Hardfacing: tips and techniques to prevent wear". American Welder. Enero- Febrero de 2000. pág 16-17.
13. Lippold, J.; Kotecki, D., Welding metallurgy and weldability of stainless steels, 1st edition. Jhon Wiley & Sons, New Jersey, USA. 2005.
14. Li, C.; Zhu, Z.; Liu, T., Microhardness of pore walls in porous titanium prepared with novel powder metallurgy. Powder Metallurgy, 48 (3) 237 – 240, 2005.
15. Lord, M.; Svensson, E.; Bhadeshia, H., Silicon–Rich Bainitic Steel Welds, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, 2003.
16. Lütjering, G., Engineering Materials and Process: Titanium, New York, pp. 203 – 250. 2007.
17. Mathew, P., Neural network modelling of hot deformation of austenite, Wolfson College, University of Cambridge, 2001.
18. Mendez, P.; Eagar, T., Modeling of Welding Processes through Order of Magnitude Scaling, Proceedings of the International Conference on Modeling and Simulation of Metal Technologies, Ariel, Israel, 2000.
19. Menthe, E.; Rie, K., Further investigation of the structure and properties of austenitic stainless steel after plasma nitriding. Surface and Coatings Technology. 116 (119) 199 – 204, 1999.
20. Mohamed, Y., Strain-Induced Transformation of Very Strong Metal St Edmund's College, University of Cambridge, 2003.
21. Muruganath, M., Design of welding alloys creep and toughness, University of Cambridge, 2002.
22. Plati, A., Modelling of ã Precipitation in Superalloys, Tesis, Universidad de Cambridge, 2003.
23. Pekka, N., Predictive Model for the Prevention of Weld Metal Hydrogen Cracking in High Strength Multipass Welds. Doctorate thesis, University of Oulu, Faculty of Technology. 2003.
24. Pero-Sanz, J.; Verdeja, J., Solidificación y Transformaciones en el Sistema Fe – C – Cr. Bases para el Diseño por Propiedades de sus Aceros y Fundiciones Ternarias RDM Revista de Minas, 2002.



25. Pitrun, M., The Effect of Welding Parameters on Levels of Diffusible Hydrogen in Weld Metal Deposited Using Gas Shielding Rutile Flux Cored Wires, doctorate thesis, The University of Wollongong, Dpt. of Materials Engineering. 2004.
26. Ramírez, A.; Cerpa, S.; Mejías, G.; León, J.; Quintero, A., Soldadura de un acero inoxidable duplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW. Revista Latinoamericana de Metalurgica y Materiales 2006; 26 (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.
28. Rodríguez, H. Metalurgia de la Soldadura. Edit Pueblo y Educación 1987. 613 pp.
29. Suzuki, H., A new formula for estimating HAZ maximum hardness in welded steel, I.I.W. Doc IX 1351-85, 2007.
30. Tabrett, C.; Sare, I., Fracture Toughness of High-Chromium White Irons: Influence of Cast Structure Journal of Materials Science. 3 (2) 2069 – 2077, 2000.
31. Villafiorita, A., Integration of Formal Methods in the Software Development Process, Cambridge, 2002.
32. 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.
33. 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 1

No: _____ OT: _____ Proceso de Soldadura: <u>SMAW</u> Elaborado por: Francisco Cremé Revé Fecha: _____		Denominación: _____ Destino: _____ Tipo: _____ Revisado por: _____ Fecha: _____	
<u>Metal Base:</u> Especificación SFA No: 1025 Análisis Quím. y Prop: C: 0,25; Mn: 0,66; Cr: 0,08; Otros: _____		<u>Croquis:</u> 	
Clasificación AWS:	E 6010		
Dimensión del Electrodo:	455		
Espesor del Depósito:	3,2 mm		
Preparación:	Mecánica		
Fundente del Elect. (Clase)	Básico		
Nombre comercial del Fundente			
Otros:			
<u>Posición:</u> Posición de la Ranura: Plana Progresión de Soldadura: Ascend. _ Descend. _____ Plana: X _____		<u>Pre calentamiento:</u> Temp. Mín. de Precal: 200 °C Temp. Máx. de Interpasos: _____ °C Temp. de Post: 180 _____ °C Otros TT: _____	
<u>Tratamiento Térmico Post – Soldadura:</u> Rango de Temp. 30 min _____ Tiempo de Permanencia: _____ Enfriamiento: Al aire _____ Medio: Al aire _____			



Características Eléctricas:  
 Corriente: continua \_\_\_ Polaridad: \_\_CC+\_\_\_ Voltaje (Rango) \_\_25\_\_\_ (Volts)  
 Amperaje: 75\_\_\_ (Amp:) \_\_\_ (Amp:) \_\_\_

Electrodo de tungsteno:  
 Transferencia del metal (GMAW): \_\_\_\_\_  
 (Spray, corto circuito)  
 Velocidad de Alimentación del Alambre: \_\_\_\_\_ (mm / seg)

Técnica:				Valoración económica:			
Dimensiones de la boquilla: _____				Valor inicial: \$ _____			
Método de ranurado posterior de la raíz: __X___				Precio de Recup.: \$ _____			
Mov del electrodo: Recto __X___ Oscilatorio _____				Gasto de Material: kg. _____			
Distancia boquilla superficie de trabajo: _____				Gasto de mano de obra: hrs. _____			
Pases sencillos o múltiples (por lados): _____				Otros Gastos: _____			
Electrodos: Sencillos __X___ Múltiples _____				Peso de Pieza: kg. _____			
Velocidad de ejecución (Rango): 1,12___ mm /seg.				Costo de Recuperación: \$ _____			
Martillado: _____				Ahorro: \$ _____			
Otros: _____							

No. Cordón	Proc	Metal de aporte Clase	Diám	Corriente AC/CD	AMP	Voltaje Mín	Max	Vel de ejec (mm/seg)	Otros
1	SMAW	E 6010	2,5 mm	AC	121	16	18	1,12	
2	SMAW	E 6010	2,5 mm	AC	121	16	18	1,12	
3	SMAW	E 7018	2,5 mm	AC	160	18	20	1,12	
4	SMAW	E 7018	2,5 mm	AC	160	18	20	1,12	

### Técnica de reparación o mantenimiento preventivo

Tipo de limpieza inicial y entre pases:

Cepillo \_\_X\_\_ solventes \_\_\_\_\_ abrasivos \_\_\_\_\_ Calor \_\_\_\_\_ otros \_\_\_\_\_

Preparación:

- ❖ Maquinar la superficie a recuperar.
- ❖ Eliminar toda grasa y suciedades del metal.
- ❖ Limpiar con acetona u otro líquido la superficie a soldar.

### Factores del paro de trabajo

❖ Desgaste por:

\_\_\_ Impacto \_\_\_ Presión / Fricción \_\_\_ Abrasión \_\_X\_\_ Corrosión \_\_\_ Calor  
 \_\_\_ Cavitación \_\_\_ Erosión

❖ Rotura por:

\_\_\_ Accidente \_\_X\_\_ Fatiga \_\_\_ Choque \_\_\_ Sobrecarga \_\_\_ Temperatura



#### **4. Otros**

\_\_\_\_\_ Defectos de fundición

\_\_\_\_\_ Defectos por maquinado

#### **5. Técnicas de aplicación**

- ❖ Revisar el material que esté limpio de suciedad.
- ❖ 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.