

*Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas*

*Facultad de Ingeniería Mecánica*



*Departamento de Ingeniería Mecánica*

*Trabajo de Diploma*

*Modificaciones en el revestimiento de un electrodo básico para aumentar su penetración en las uniones soldadas del semi-ómnibus*

*Autor. César Rubén Aguiar Guzmán*

*Tutor: Dr. Ing. Amado Cruz Crespo  
Dr. Ing. Eduardo Díaz Cedré  
Ing. Kenia Sota Sol*

*Dedicatoria*

*A mis abuelos que dios me los tenga en La gloria*

## **Agradecimientos**

A mis tutores en especial a Kenia Sota Sol por su incansable  
dedicación hacia esta investigación

A mi mamá por su ternura, amor y comprensión además de sus  
infinitas preocupaciones, desvelos, regaños y elogios durante estos 5  
años

A mi papa por enseñarme todo lo que no se aprende en la escuela por  
su complicidad su apoyo

A papi Fichy por siempre estar ahí por ser incondicional

A mi novia por quererme tanto y por darme sus grandes sicoterapias

A mi hermanito Carly por su cariño y ayuda al lidiar con mamá en sus  
días de luna llena

A mi hermanito Tikky por inspirarme la necesidad de una carrera

A mis primos y tíos por sus numerosas ayudas que me brindaron al  
facilitarme información científica técnica

A todos mis compañeros de aula sobre todo a Cabeza, Lisan y Maikel  
que han cargado conmigo y me han hecho reír, pensar, aprender y  
crecer

A todos los profesores que me han rodeado en el transcurso de mis  
estudios ya que soy en gran medida el resultado de todos ellos

A mi familia y amigos en general, ya que todos ellos sin exceptuar a  
nadie siempre se han mostrado atentos y preocupados por mis  
vicisitudes y necesidades

A todo aquel que de una forma directa o indirectamente ha contribuido  
a que haya logrado llegar hasta aquí

# ÍNDICE

	página
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Características fundamentales del semi-ómnibus</b>	<b>6</b>
<b>1.1.1 Principales tipos de uniones soldadas que conforman la estructura del semi – ómnibus</b>	<b>7</b>
<b>1.1.2 Características del metal base a utilizar en la estructura soldada del semi- ómnibus</b>	<b>7</b>
<b>1.1.3 Análisis de las condiciones del taller donde se fabrican los semi-ómnibus</b>	<b>9</b>
<b>1.1.4 Determinación de los costos de soldadura del semi-ómnibus</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Proceso soldadura por arco con Electrodo Revestido</b>	<b>12</b>
<b>1.2.1 Características generales del proceso SMAW</b>	<b>12</b>
<b>1.3 Argumentación del empleo en la fabricación por soldadura con proceso SMAW del semi-ómnibus</b>	<b>13</b>
<b>Capitulo II: Criterios de evaluación de electrodos revestidos para proceso SMAW</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Propiedades operativas que se evalúan en un electrodo de soldadura</b>	<b>16</b>
<b>2.1.1 Parámetros de consumo</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2 Desprendimiento de la escoria</b>	<b>19</b>
<b>2.1.3 Estabilidad del arco</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Propiedades de las uniones sold</b>	<b>21</b>
<b>2.2.1 Dimensiones de los cordones</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2 Estructura de la unión soldada</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2.1 Zona de la costura</b>	<b>23</b>
<b>.2.2.1.1. Microconstituyentes que pueden estar presentes en el metal del cordón durante la soldadura</b>	<b>23</b>
<b>2.2.2.2 Zona afectada térmicamente</b>	<b>25</b>
<b>2.2.2.2.1 Modificaciones estructurales y físico – química en la zona afectada térmicamente del metal base (ZAT)</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3 Propiedades físico-mecánicas de la unión soldada</b>	<b>30</b>
<b>2.4 Componentes formadores de escoria</b>	<b>32</b>
<b>2.4.1 Minerales de manganeso</b>	<b>33</b>
<b>2.4.1.1 Comportamiento de los minerales de manganeso a altas temperaturas</b>	<b>33</b>
<b>2.4.2 Caliza</b>	<b>35</b>
<b>2.4.3 Fluorita</b>	<b>36</b>
<b>Capítulo III. Fabricación y evaluación de electrodos</b>	<b>38</b>
<b>3.1. Plan experimental para la obtención de electrodos</b>	<b>38</b>
<b>3.2 Evaluación de los parámetros de consumo del electrodo 7018</b>	<b>42</b>
<b>3.3 Evaluación de la geometría de los cordones obtenidos con el electrodo comercial AWS E 7018</b>	<b>47</b>
<b>3.4 Obtención y evaluación del prototipo preliminar de electrodo experimental</b>	<b>53</b>
<b>Conclusiones Generales</b>	<b>58</b>
<b>Recomendaciones</b>	<b>59</b>

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se valoran las características constructivas del semi-ómnibus, las condiciones del taller y el equipamiento disponible con el objetivo de lograr una propuesta tecnológica que incluye, la selección del metal de aporte sobre la base del proceso manual con electrodo revestido. Se considera la aplicación de revestimientos periféricos al electrodo comercial 7018, en base a un diseño experimental de mezclas para una región restringida de tipo Mc. Lean Anderson que persigue fundamentalmente el aumento de la penetración por el aporte de oxígeno en forma de pirolusita ( $MnO_2$ ). Se evalúa el comportamiento de los parámetros de consumo y las dimensiones del cordón en función de la corriente dentro del rango de operación del electrodo experimental.

## **ABSTRACT**

Presently work the constructive characteristics of the semi-bus the conditions of the shop and the available equipment are valued with the objective of achieving a technological proposal that includes, the selection of the contribution metal on the base of the manual process with lined electrode. It is considered the application of outlying linings to the commercial electrode 7018, based on an experimental design of mixtures for a restricted region of type Mc. Anderson that pursues the increase of the penetration fundamentally for the oxygen contribution in pyrolusite form read ( $MnO_2$ ). it is evaluated the behavior of the consumption parameters and the dimensions of the cord in function of the current inside the range of operation of the commercial electrode AWS AND 7018. It is developed in a preliminary way a prototype of experimental electrode and their consumption parameters are evaluated.

## INTRODUCCIÓN

En el año 2002 con el objetivo de garantizar la reparación de los vehículos militares de las unidades pertenecientes a la Región Central se comienza a desarrollar en la Empresa Militar Industrial (Sancti Spíritus) dicha tarea. Un nuevo reto enfrenta hoy la Empresa de Construcciones Mecánicas “Fabric Aguiar Noriega, lo anteriormente planteado tiene especial interés en la fabricación de la estructura del semi-ómnibus montado sobre Zil-131.

Ante la imperiosa necesidad de contar con vehículos de transportación masiva, capaces de acceder a lugares intrincados y de difícil acceso, garantizando las condiciones mínimas de confort para sus pasajeros, se decide iniciar una línea de producción y montaje de un híbrido camión – ómnibus, dando como resultado final, el semi-ómnibus montado sobre Zil-131[1].

La importancia del revestimiento en el desempeño de electrodos para proceso SMAW es un criterio clásicamente establecido, mientras se reconoce por la mayoría de los autores la complejidad que encierra el desarrollo de un nuevo revestimiento, que obviamente no es ajena al sistema aleante del electrodo y consecuentemente a la aplicación de éste [2-9].

La soldadura con electrodos revestidos, ha sido abordada desde el punto de vista de la influencia de los materiales del revestimiento en las características operativas y económicas de los electrodos para soldar, producidos a partir de determinadas mezclas de minerales [4, 10].

Las investigaciones sobre electrodos revestidos no sustentan su vigencia exclusivamente en el interés científico de la temática, que obviamente ha evolucionado hacia un grado cada vez mayor de profundización teórica, pues un número importante de trabajos reportados presentan un enfoque de interés comercial, sea con la intención de ampliar el diapasón de materias primas aplicables a la fabricación de los electrodos o a la mejora de la calidad y eficiencia de éstos o incluso para trazar estrategias más flexibles de circunstancias de mercado [2-4, 6, 11, 12]. Ello, sin adentrarnos en la vigencia del proceso SMAW

por su versatilidad como proceso en sí mismo, que lo hacen aún competente frente a otros procesos en circunstancias determinadas a la par de una mayor accesibilidad desde el punto de vista económico- financiero.

De cualquier modo, sea en la búsqueda de mejorar la eficiencia del consumible en los aspectos económicos o en la obtención de propiedades determinadas del depósito, todo pasa por la influencia de los componentes del revestimiento. No obstante, la mayor parte de los estudios, abordan el efecto lineal de un componente, aunque condicionalmente, al tratarse de una relación porcentual, provocan la variación de otros componentes del revestimiento que no siempre es posible considerar íntegramente en los análisis. Ello, sin considerar que simultáneamente ocurren fenómenos químico-físicos que influyen sobre las propiedades del arco, las propiedades de la escoria y las propiedades del baño fundido, haciendo que, por ejemplo en el estudio del efecto del Mg en la estabilidad del arco haya tenido que enfrentar las modificaciones de las propiedades físicas de la escoria por el incremento del MgO en ésta [6, 13].

## **HIPOTESIS**

Es viable la modificación del revestimiento del electrodo AWS E 7018, mediante la colocación de un revestimiento con matriz básica con el probable aumento de la penetración de los depósitos y de la fiabilidad de las uniones de la estructura del semi-ómnibus.

## **APORTE**

Se define la viabilidad de la modificación del revestimiento de electrodos básicos AWS E 7018, mediante la colocación periférica de un revestimiento de matriz básica con el probable aumento de la penetración de los cordones.

## **OBJETIVO GENERAL**

Establecer, de manera preliminar, la posibilidad de modificar la composición de electrodos básicos AWS E 7018, mediante la aplicación periférica de un revestimiento con matriz básica que posibilite un aumento en la penetración que conduciría a un aumento de la fiabilidad de las uniones del semi-ómnibus.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

1. Valorar las posibilidades concretas de la fabricación del semi-ómnibus en la Empresa Militar Industrial (Sancti Spíritus) en base a, proceso a aplicar, materiales bases y consumibles.
2. Abordar las propiedades operativas esenciales que se evalúan a un electrodo revestido para SMAW y las propiedades fundamentales de la unión soldada.
3. Establecer un plan experimental para la fabricación de un electrodo básico con incremento de la penetración del cordón, que garantice la fiabilidad de las uniones del bastidor del semi-ómnibus.
4. Evaluar los parámetros de consumo y las dimensiones del cordón en función de la corriente de los electrodos comerciales AWS E 7018.
5. Obtener un electrodo prototipo experimental que valide la posibilidad de realización futura del plan experimental concebido.

## **TAREAS**

- Evaluación de la posibilidad técnica y económica de fabricación del semi-ómnibus en las condiciones concretas de la Empresa Militar Industrial (Santi Spíritus) mediante proceso SMAW.
- Revisión bibliográfica sobre el desarrollo de consumibles para soldadura que posibilite establecer criterios para concebir el plan experimental y los criterios de evaluación de electrodos.



- Planificación experimental para la obtención de los electrodos: Definir el tipo de diseño de experimento, las variables, su rango y establecer el plan experimental.
- Evaluación de los parámetros de consumo de electrodos comerciales básicos AWS E 7018, utilizados como referencia.
- Evaluación de la geometría de depósitos de electrodos comerciales básicos AWS E 7018, utilizados como referencia.
- Fabricación de un prototipo preliminar de electrodo experimental.
- Evaluación de los parámetros de consumo del prototipo de electrodo experimental.

## **CAPITULO I: Fabricación del semi- ómnibus**

En este capítulo se aborda las características fundamentales del semi-ómnibus y la viabilidad de fabricación de éste en las condiciones de la Empresa Militar Industrial (Sancti Spíritus), fundamentalmente en lo referente al proceso SMAW.

### **1.1 Características fundamentales del semi-ómnibus**

El semi-ómnibus es un vehículo de transporte de pasajeros por carreteras pavimentadas, terraplenes y caminos, siendo fundamentalmente producidos para aplicaciones dentro de la Empresa Provincial de Transporte.

Este generalmente va montado sobre un camión tipo ZIL-131, sus principales dimensiones constructivas son: largo 7 200 mm, ancho 2 500 mm, alto 3 720 mm. El mismo está diseñado para transportar 27 pasajeros sentados, 10 parados y 3 en la cabina. La mayoría de los camiones han sido re motorizados con un motor Yuchay de 6 cilindros con una potencia nominal de 112 Kw Se fabrican con cinco ventanillas, tres al lado izquierdo y dos al derecho que permiten una correcta ventilación e iluminación. En la parte posterior se le instalan dos cristales que permiten amplia visibilidad y en la parte delantera dos cristales fijos, dos superiores y uno inferior que coincide con el de la cabina del chofer.

El techo en su parte interior se cubre con cartón primite de 3 mm, fijado a la estructura con remache. A ambos productos se les coloca una plancha de poli espuma de 50 mm de espesor para la absorción del calor.

En su interior se instalan lámparas de techo para el alumbrado nocturno y una señal lumínica o sonora para el aviso de los pasajeros. Posee una puerta en el lateral derecho que permite la entrada y salida. Para el acceso al semi-ómnibus se previó una escalera fabricada con chapa de acero CT-3 de 3 mm de espesor con escalones distribuidos a 250 mm de altura.

Al furgón se le instalan nueve asientos dobles y en su parte trasera un asiento con capacidad para cinco pasajeros, los asientos y espaldares se fija a la estructura mediante tornillos cabeza de carruaje M8X30 mm. En la parte superior de la

estructura del asiento se le fija un pasamanos fabricado de tubos de aluminio de 25X1,5 mm unidos a la estructura mediante remaches [14].

### **1.1.1 Principales tipos de uniones soldadas que conforman la estructura del semi -ómnibus**

Los principales tipos de uniones que están presentes en la construcción del semi -ómnibus se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Datos de las uniones.

<b>Tipo de uniones</b>	<b>Tipo de costura</b>	<b>Posición</b>
A Tope	De Ranura	Todas las posiciones
En T	Unilateral y bilateral	Vertical ,Horizontal ,Sobre cabeza
De Esquina	De Ranura	Horizontal

### **1.1.2 Características del metal base a utilizar en la estructura soldada del semi- ómnibus**

La estructura del furgón se fabrica de materiales de aceros laminados que se contemplan en la NC10-54:84, tales como, tubos cuadrados de 50X3 mm, vigas rectangulares de 50 X30X2,5 mm, angulares de alas iguales de 32X3 mm, todos de acero CT-3 también se puede utilizar acero 10, acero 20 u otro con similares características. Esta estructura puede hacerse en cooperación con la Empresa de estructuras metálicas Ramón Peña u otras.

La plataforma se fabrica de viga U 80X40X6 mm, puede sustituirse por la viga U 100X52 X4,8 mm y vigas rectangulares de 50X30X2,5 mm, también se utiliza vigas rectangulares de 100X50X2,5 mm para la fabricación de los largueros, todos de acero CT-3, Acero 10, 20 u otro similar, utilizando el proceso SMAW, con electrodo del tipo E 6012 ó E 6013 de  $\varnothing$  3 mm. El piso de la plataforma se forra con chapa CT-3 espesor 3 mm.

La estructura del furgón se forra exterior e interiormente con chapas de acero de espesor 1,2 mm de los materiales antes señalados, fijados con remaches.

La soldabilidad es la capacidad de los materiales para ser soldados bajo las condiciones de fabricación impuesta a una determinada estructura diseñada adecuadamente bajo las condiciones de servicio previsto.

Aunque el carbono es el elemento de aleación más significativo que afecta la soldabilidad, los efectos de otros elementos pueden ser estimados por ecuaciones como la del carbono equivalente. Esto es el efecto del contenido total de aleaciones puede estar expresado en términos de Carbono Equivalente. En la Tabla 1.2 se muestran las principales características del Acero-10.

Tabla 1.2: Composición química del metal base.

Acero	Elementos	%
<b>Acero 10</b>	Carbono (C)	0,22-0,28
	Manganeso (Mn)	0,30-0,60
	Fósforo (P) máx.	0,040
	Hierro (Fe)	99,03-99,48
	Azufre S máx.	0,050

Según [15] se determina el carbono equivalente de la siguiente forma:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} \quad (1.1)$$

Sustituyendo cada uno de los elementos en (1) se obtiene que el  $C_{eq}=0,38\%$ .

Generalmente los aceros de bajo carbono equivalente tienen buena soldabilidad, sin tener la necesidad de aplicar técnicas auxiliares para garantizar la misma, tales como: precalentamiento y tratamiento térmico posterior. La susceptibilidad al agrietamiento bajo el cordón por hidrógeno se incrementa cuando el Carbono equivalente excede el 40%.

El acero 10 tienen una gran capacidad para ser soldado, bajo las condiciones de fabricación impuesta para la estructura del semi-ómnibus y debe funcionar

adecuadamente bajo las condiciones de servicio prevista, ya que el mismo posee buena soldabilidad y no presenta problemas de agrietamiento. Sin embargo debido a elementos vinculados al proceso tecnológico (proceso de soldadura, tipo de material de aporte, etc) puede manifestar el agrietamiento por hidrógeno o en frío, pues éste ocurre generalmente a temperaturas inferiores a los  $92^{\circ}C$ , después que se enfría el metal, en dependencia del tipo de acero, de la magnitud de los esfuerzos ocasionados por la soldadura y del contenido de hidrógeno en el metal de aporte y de la zona afectada térmicamente. El metal de aporte puede agrietarse, aunque raramente esto ocurre, cuando su resistencia a la deformación está por debajo de los 620 MPa. La difusión del hidrógeno dentro de la zona afectada térmicamente, a causa del metal de aporte durante la soldadura, contribuye al agrietamiento en esta zona [16].

### ***1.1.3 Análisis de las condiciones del taller donde se fabrican los semi-ómnibus***

El taller donde se fabrican los semi-ómnibus está compuesto fundamentalmente por dos áreas, una de ellas es donde se realiza el corte de las vigas, angulares y tubos con una segueta mecánica, las chapas se cortan con una cizalla neumática. En la otra área existen 6 puestos de trabajo y los mismos cuentan con 3 Rectificadores de soldadura utilizados en el proceso SMAW, Taladradora manual, Equipo oxicorte y Grúa viajera con una capacidad de 2T y un Rectificador de soldadura para el proceso GMAW. Para nuestro caso dicha Empresa adopta las mismas condiciones para realizar dicho trabajo.

A continuación se brindan las principales características técnicas de los equipos de soldadura con que cuenta el taller.

#### **Rectificadores de soldadura para el proceso SMAW**

Tipo BD-306

Corriente de soldadura nominal	315A.
Voltaje de servicio	32V
Limitación de regulación de la corriente de soldadura	
Bajas corrientes	45-125 A
Alta corrientes	125-315 A

Limites de voltaje de arco	22-32 V
Duración del ciclo de soldadura	5 min
Relación entre un período de la carga y la duración d un ciclo de soldadura	60%
Potencia consumida kV*A	24
Rendimiento	70 %
Masa	190 kg
Dimensiones máximas	78X 765 X 750 mm

#### ***1.1.4 Determinación de los costos de soldadura del semi-ómnibus***

La estimación de los costos en la realización de la soldadura del semi-ómnibus es un elemento de vital importancia que permite establecer el valor que representa este proceso dentro del costo total de construcción del referido equipo.

Los datos tenidos en cuenta para la realización de la estimación de los costos de soldadura de filete utilizando el proceso SMAW se muestran a continuación:

- Metal de aporte: E 6013 de diámetro 4 mm
- Corriente de soldadura:140A
- Voltaje de arco: 20V
- Precio del electrodo E 6013: 1, 21\$/ Kg
- Longitud total de la unión de filete:47,7 m
- Dimensión del cateto:3 mm
- Área aproximada de la unión: 13 mm<sup>2</sup>
- Cantidad estimadas de pasadas: 1
- Precio de la corriente eléctrica: 0,1284 \$/ Kwh
- Salario de 1 soldador (semana de 6 días laborables y 8 horas diarias): 1,75 \$/h
- Peso específico del acero 7860 kg/m<sup>3</sup>

## Determinación de la velocidad de soldadura

$$V_s = \frac{RD}{\gamma_{MD} * AMD}$$

RD= razón de depósito para 140 A: 2 kg/h [6]

Vs = 12 m/h

Para este tipo de costura, con esta velocidad de soldadura, el tiempo de arco estimado es de 3,95 h.

Un resumen de los cálculos de los costos de soldadura se puede apreciar en la tabla 1.3.

Tabla 1.3: Resumen de los costos de la soldadura para la costura de filete

Parámetros	Valor
Masa de metal a depositar	4,84 kg
Masa de electrodo a consumir	9,68 kg
Costo de electrodo	11,72 \$
Costo de consumible de soldadura	11,72 \$
Costo de mano de obra y administrativos	22,40 \$
Costo de la energía eléctrica	313,00 \$
Total	347,06 \$

Los aspectos económicos que incluya la fiabilidad, pueden ser modificados positivamente, si se aplican modificaciones tecnológicas que lleven a uniones más fiables.

Una primera decisión podría estar encaminada a la utilización de electrodos 7018 con revestimientos periféricos que aporte pirolusita que, a causa del aporte del O<sub>2</sub> de este mineral durante el calentamiento (aspecto que se abordara en detalle más adelante) lleva a un aumento de la penetración de las uniones.

## **1.2 Proceso soldadura por arco con Electrodo Revestido**

El proceso de soldadura SMAW, por muchos años ha sido una de las técnicas más comúnmente aplicadas en la fabricación de estructuras de acero. Es también conocido como Soldadura Manual por arco con Electrodo Revestido, del inglés Manual Metal Arc (MMA). En la industria de fabricación del Reino Unido, se conoce como Stick Welding (Soldadura de Soporte) [17].

El empleo de la soldadura por arco eléctrico para la fabricación de las más variadas obras de características y responsabilidades importantes se pudo lograr a partir del momento en que fue posible tomar las medidas pertinentes para limitar el efecto perjudicial del aire (oxígeno y nitrógeno) sobre el metal que se sobrecalienta en las condiciones de soldadura y esto fue logrado mediante la aplicación de revestimientos a los electrodos y el empleo de fundentes y gases protectores.

### ***1.2.1 Características generales del proceso SMAW***

El proceso SMAW se inicia en presencia de una diferencia de voltaje entre la punta metálica del electrodo y la pieza de trabajo, es cortocircuitada el alma metálica del electrodo revestido con la pieza a soldar; produciéndose al paso de la corriente el calentamiento por efecto Joule del metal de la punta del electrodo y sus óxidos, que permite la emisión electrónica y la aparición de un flujo de electrones.

Producto de las altas temperaturas alcanzadas durante este proceso, los componentes del revestimiento son descompuestos en gases, que junto a los vapores del metal del alma pueden ionizarse para establecer un plasma térmico, que produce suficiente energía como para unir metales por fusión. El material fundido de la punta del electrodo aporta gotas (figura 1.1), que atraviesan el arco hasta ingresar al baño fundido, que una vez solidificado bajo la capa de escoria,



constituirá el cordón de soldadura. La atmósfera gaseosa que protege el arco evita la oxidación y la nitruración a altas temperaturas del metal depositado y la capa de escoria protege al metal fundido y contribuye a desulfurar y desfosforar el mismo, lo cual eleva las propiedades mecánicas del depósito. Durante el proceso se producen pérdidas metálicas por salpicadura, que atentan contra la economía del proceso, despidiéndose además gases y radiaciones perjudiciales para la salud [18].

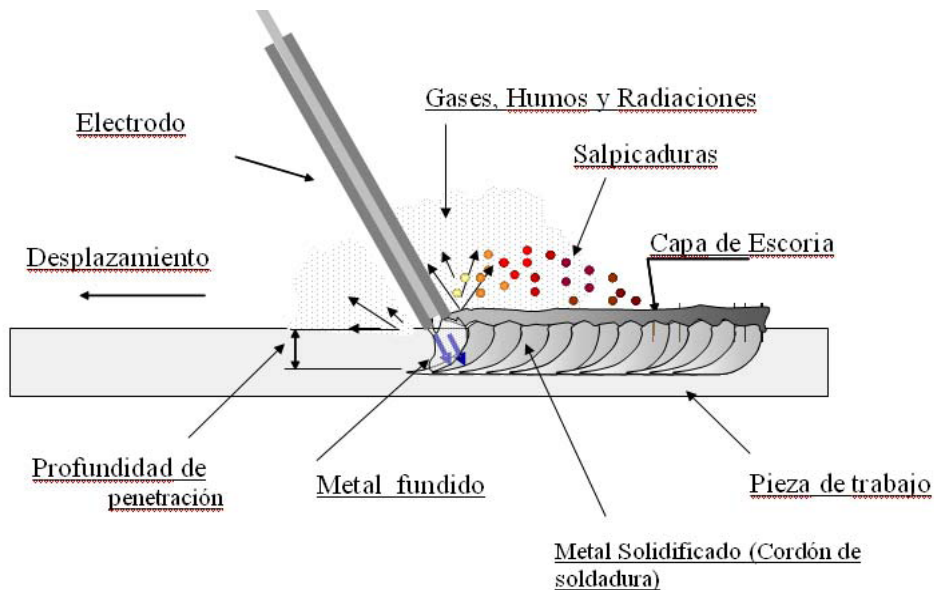


Figura 1.1. Representación esquemática del proceso SMAW durante su ejecución

### 1.3 Argumentación del empleo en la fabricación por soldadura con proceso SMAW del semi-ómnibus

De la gama de procesos de soldadura, el proceso SMAW es uno de los más ampliamente utilizados. Si bien los fabricantes continúan automatizando los procesos para incrementar la productividad, SMAW se mantiene en gran parte del total de las aplicaciones. Esto es debido a su versatilidad, bajos costos de accesorios y consumibles, simplicidad de la fuente de potencia, bajos costos de mantenimiento, durabilidad, relativa simplicidad de operación y fácil configuración [19].

El proceso SMAW se usa ampliamente en la construcción, ya sea en aplicaciones estructurales o en reparaciones en aceros inoxidable u ordinarios, y metales no ferrosos. A causa de que el soldador debe detener la soldadura para reemplazar el electrodo, una vez consumido, el proceso SMAW está siendo desplazado hoy día por procesos de alambre continuo en algunas aplicaciones industriales. No obstante, el proceso SMAW está siendo ampliamente utilizado en trabajos de reparación y mantenimiento [20].

El proceso SMAW se utiliza por su versatilidad en una amplia gama de aplicaciones, tanto en taller, como a pie de obra en la soldadura de materiales de espesores superiores a 1,5 mm. Los sectores de mayor aplicación son la construcción naval, de máquinas, estructuras, tanques y esferas de almacenamiento, puentes, recipientes a presión y calderería. La selección de los electrodos tiene una influencia decisiva en la calidad y el costo de la soldadura.

Este proceso cuenta con que el equipo es relativamente simple, barato y portátil. Tanto el metal de aporte como el medio para proteger al metal de soldadura se garantizan por el propio electrodo recubierto. No es necesario el empleo de un gas protector auxiliar o de fundentes. Es menos sensible a las corrientes de aire que los procesos de protección gaseosa, por lo que resulta ideal para trabajos en campo. Puede emplearse en áreas de acceso limitado. Puede utilizarse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía, ya que no requiere conductores de gases de protección, conductores de agua para el enfriamiento, etc.

En el caso particular de la fabricación del semi- ómnibus en los talleres de la EMI (Santi Spíritus) éste se considera el proceso más adecuado, ya que en la misma se realizan otras producciones y reparaciones para la cual la infraestructura debe ser flexible y versátil, lo cual se garantiza con el proceso SMAW .De otro lado, en Cuba no se comercializa mezclas de gases y el CO<sub>2</sub> que se distribuye es un subproducto del alcohol de grado alimenticio no adecuado por sus niveles de humedad para la soldadura

Otro aspecto a considerar es que la fabricación de los semi-ómnibus es una producción semi seriada de volúmenes no muy grandes de producción, que no justificaría inversiones y gastos para utilizar otros procesos.

Dado que el proceso SMAW está presente en casi todas las empresas que realizan trabajos de soldadura, concebir la fabricación del semi-ómnibus con SMAW garantiza la fácil generalización a todo el país.

## **Capítulo II: Criterios de evaluación de electrodos revestidos para proceso SMAW**

### **2.1 Propiedades operativas que se evalúan en un electrodo de soldadura**

Por propiedades operativas de los electrodos durante el proceso de soldadura se entiende la capacidad de éstos de permitir el encendido, de mantener la estabilidad del arco, de garantizar una forma adecuada del cordón, de formar en la superficie del cordón una capa fácil de desprender.

Si bien de una parte, la mayoría de los fabricantes sustentan la calidad de la producción de electrodos en los parámetros de consumo [6, 13] y evidentemente en las propiedades del metal depositado que es en definitiva lo que muestran en sus catálogos; de otro lado, muchas investigaciones, sin perder de vista estos aspectos, centran su interés en mejorar estas características abordándolas desde una perspectiva fenomenológica (Transferencia Metálica y de Carga, Micro estructura del Metal depositado y la Zona Afectada por el Calor, Transferencia de elementos de Aleación, Fenómenos de Dilución, Propiedades de las Escorias)[2, 3, 5, 8, 21-24].

#### **2.1.1 Parámetros de consumo**

Las características económicas de los electrodos son evaluadas en Cuba según [25]. Entre los parámetros de consumo de los electrodos ordinarios se contemplan: coeficiente de fusión, coeficiente de depósito, productividad del proceso, coeficiente de pérdidas, eficiencia de depósito respecto al núcleo del electrodo, eficiencia del depósito sin considerar las pérdidas por colillas, eficiencia total del electrodo.

Si bien se brinda especial importancia en estas normas a las tasas de fusión y de deposición como principales parámetros, no se contemplan los consumos efectivos de potencia eléctrica, ni la facilidad de encendido y re encendido del

arco, la facilidad de desprendimiento de la escoria, aspectos que modifican la operatividad del electrodo influenciando los costos de las producciones. Por otra parte, el re encendido y mantenimiento del arco, lo cual tiene estrecha relación con la estabilidad en la transferencia de masa y carga a través del arco y la morfología del cordón.

El cálculo de los parámetros de consumo se realiza de forma experimental siguiendo para ello las instrucciones de la norma elaborada con este fin [26].

**Coefficiente de fusión** ( $\alpha_f$ ): No es más que la cantidad de metal que se funde al pasar por el electrodo una corriente de un Ampere durante el transcurso de una hora.

$$\alpha_f = \frac{M_f}{I_s \bullet t_{bas}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde:

- Masa fundida del Electrodo (Mf): Esta es la que se transfiere desde el electrodo durante la deposición e incluye la parte que va al medio, al cordón y a las salpicaduras sobre el material base. Se puede determinar utilizando cuatro variantes [26]:
- Tiempo básico (tbas): Es el tiempo arco en horas para una deposición; el mismo se lee directamente desde un cronómetro con precisión de  $\pm 2$  seg.
- Corriente de soldadura (Is)

**Coefficiente de Depósito** ( $\alpha_d$ ): Es la cantidad de metal que se deposita al pasar una corriente de un Ampere durante una hora. Éste caracteriza la productividad del proceso (P), mientras mayor sea su valor mayor será la productividad del proceso de soldadura.

$$\alpha_d = \frac{M_d}{I_s \bullet t_{bas}} \text{ (g/A-h)} \dots\dots\dots (2.2)$$

- Masa de Metal depositado (Md): Es la masa del electrodo que pasa a formar parte del cordón, se determina mediante la expresión:

$$M_d = (M_{fp} - M_{ip}) \text{ (gramos)} \dots\dots\dots (2.3)$$

Donde:

M<sub>f</sub>: la masa final de la plancha, o sea, después de haber realizado el depósito y quitado las salpicaduras, escorias y haber limpiado con el cepillo metálico. (Gramos).

M<sub>ip</sub>: la masa de la plancha antes de realizar el depósito. (Gramos).

**Productividad del proceso (P)**: Esta dada por el valor del coeficiente de Depósito y la corriente de soldadura utilizada.

$$P = (\alpha_d \cdot I_s) \text{ (g/h)} \dots\dots\dots (2.4)$$

**Coeficiente de pérdidas ( $\psi$ )**: Las pérdidas son de aproximadamente de 10 a 20 % para electrodos de revestimiento delgado y de 5 a 10 % para electrodos de revestimiento grueso y depende de los siguientes factores:

- a) Espesor y tipo de revestimiento
- b) Tipo de corriente y polaridad.
- c) Habilidad del operario (longitud libre).
- d) Corriente de soldadura.

$$\psi = \frac{(\alpha_f - \alpha_d)}{\alpha_f} \bullet 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

**Eficiencia para electrodos ordinarios ( $\eta$ )**: Es la relación entre la masa de metal depositado y la masa neta fundida y se calcula según la expresión:

$$\eta = \left( \frac{M_d}{M_f} \right) \bullet 100\% = \left( \frac{\alpha_d}{\alpha_f} \right) \bullet 100\% \dots\dots\dots (2.6)$$

Nota: Este parámetro puede ser nominal ( $\eta_{nom}$ ) o efectivo ( $\eta_{ef}$ ). En el primer caso el concepto se asocia a la  $M_f$  nominal y en el segundo caso a la  $M_f$  real. La eficiencia nominal para los electrodos clásicos es de 80-90 %.

**Eficiencia del depósito ( $\eta_d$ ):** Es la relación entre la masa de metal depositado y la diferencia de la masa total del electrodo menos la de la colilla. Se calcula por la siguiente fórmula:

$$\eta_d = \frac{M_d}{M_t - M_c} \bullet 100\% \dots\dots\dots (2.7)$$

Observación: La definición del término Deposition Efficiency es interpretada de forma diferente Por la AWS y por la ISO 2401-72.

**Razón o tasa de Deposición:** Este término tratado por la AWS como (deposition rate) coincide con el término de productividad (P) abordado con anterioridad.

### ***2.1.2 Desprendimiento de la escoria***

Una elevada capacidad oxidante puede empeorar bruscamente la capacidad de desprendimiento de la costra de la escoria de la superficie de la costura. En realidad, si la concentración de los óxidos de hierro en la escoria es elevada, la oxidación de las capas superficiales del metal puede ocurrir incluso hasta su solidificación. Sobre la superficie del metal se forma una fina película de óxido, compuesta fundamentalmente de FeO cristalizado en el sistema cúbico. La red cristalina del FeO es una estructura sobre la base de una red cúbica de Fe- $\alpha$  por eso la película de óxido se agarra fácilmente sobre la superficie del metal. La presencia en la superficie de la interface de la escoria de compuestos cristalizados en el sistema cúbico, como el FeO, lleva en su momento a acabar la construcción con estos compuestos de red de óxido de hierro lo que significa un agarre suficientemente resistente de la escoria con el metal. Según el sistema cúbico

cristalizan compuestos del tipo espinela, que representan en sí óxidos complejos de dos y tres valencias en metales; Al, Mg, Fe y otros.

Desde el punto de vista de la adherencia mecánica de la escoria se separan más fácil, aquellas escorias con poca resistencia, con mayor coeficiente de dilatación lineal y de alta temperatura de reblandecimiento, siendo determinado fundamentalmente por su resistencia mecánica y no por la fuerza de adherencia de ésta con el metal.

Se plantea por [27] que la mayor adherencia tiene lugar cuando se forma una capa de óxidos mixtos de 1,5  $\mu\text{m}$  aproximadamente, entre el metal y la escoria. Los óxidos divalentes de varios metales de transición (fundamentalmente de la primera serie) que se forman por la oxidación en la interface (metal- escoria) se diluyen en la superficie de la escoria y según su viscosidad se transportan lentamente hacia el interior de ésta, por lo que no da tiempo a que su concentración en la superficie sea alta.

Cuando las escorias presentan menor densidad éstas se liberan más fácilmente del metal flotando sobre su superficie, lo que posibilita la obtención de cordones de soldadura libres de inclusiones exógenas.

### ***2.1.3 Estabilidad del arco***

El proceso puede efectuarse utilizando fuentes de corriente directa y alterna. La estabilidad del arco es más crítica en la soldadura con corriente alterna debido a la inversión de la polaridad a razón de ciento veinte veces por segundo, lo que provoca extinciones y re encendidos sucesivos del arco. La fuente debe tener una característica descendente, donde el voltaje cae mientras se incrementa la corriente de soldadura y viceversa, lo que produce la autorregulación del punto de operación cuando se suelda manualmente [28].



Un encendido no estable del arco puede ser provocado por varias causas: debilitamiento periódico del arco en el cambio de metal o por la utilización de corriente alterna, características insuficientes de la fuente de corriente y composición de los consumibles. Casi la totalidad de los autores, como [29], atribuyen la mayor responsabilidad a la composición del revestimiento y en menor medida a la del alambre electrodo y del metal base.

La estabilidad del arco depende, entre otros factores, del estado de ionización de los gases comprendidos entre el ánodo y el cátodo. Para un arco de corriente alterna (CA) es imprescindible un medio fuertemente ionizado. Por este motivo se puede influir sobre la estabilidad de encendido del arco mediante la introducción en el metal de elementos con bajo potencial de ionización, lo cual casi siempre se logra a través de la composición del revestimiento, como bien lo plantea [29]. Como complemento a esto [30] señala que los iones de los elementos referidos, en su movimiento hacia el cátodo bombardean la mancha catódica, formando segmentos, en los cuales decrece bruscamente el potencial de salida y ocurre la mayor emisión de electrones.

La presencia de fluoruros o haluros en el revestimiento desempeña un papel negativo, como señala [31], lo cual está condicionado por el arribo a la atmósfera del arco del anión  $F^-$  o  $X^-$ , junto al catión  $Ca^{2+}$ . Por esto la concentración del fluoruro de calcio en valores excesivos, según [27], hace decrecer significativamente la longitud del arco (la estabilidad).

## **2.2 Propiedades de las uniones soldadas**

### **2.2.1 Dimensiones de los cordones**

Sobre la forma de la sección transversal del cordón ejercen gran influencia las propiedades estabilizadoras del revestimiento, la densidad de la escoria que se forma y las propiedades de las escorias fundidas. Variando la longitud del arco y la

profundidad de su penetración en el metal base se puede variar el coeficiente de forma del cordón. Esto puede lograrse variando las propiedades estabilizadoras del revestimiento, de tal modo que un revestimiento con bajas propiedades estabilizadoras lleva a la disminución de la longitud del arco y la obtención de un cordón estrecho, con gran profundidad de penetración. Para altas propiedades estabilizadoras de las escorias fundidas hay un alargamiento del arco y en consecuencia la obtención de un alto coeficiente de forma del cordón.

Con el incremento de la intensidad de la corriente, la proporción del metal base en la costura aumenta y el ancho de la costura queda casi invariable. Cuando se mantiene la corriente constante y se disminuye el diámetro del alambre, la densidad de la corriente aumenta, lo cual provoca el incremento considerable de la profundidad de fusión (penetración de soldadura), el ancho de la costura disminuye y también el coeficiente de forma ( $\varphi_p$ ).

La influencia de la tensión del arco sobre la forma geométrica de la costura depende de forma proporcional de la longitud del arco y además de la composición de los gases que están en la zona del arco. El incremento de la tensión del arco hace que aumente la movilidad del mismo, como resultado de esto crece considerablemente el ancho de la costura, permaneciendo casi constante la profundidad de fusión dentro de los límites normales que tienen lugar en la práctica. Al incrementar el espesor del metal a soldar, aumenta la intensidad de la corriente y esto debe ir acompañado del aumento de la tensión del arco.

### ***2.2.2 Estructura de la unión soldada***

En una unión soldada de manera general, se distinguen macro gráficamente tres partes fundamentales: la zona de la costura soldada o zona fundida, la zona aledaña o zona afectada térmicamente (ZAT) del metal base, y finalmente el metal base no afectado por el ciclo térmico de la soldadura.

### **2.2.2.1 Zona de la costura**

La zona de la costura o zona fundida (ZF), formada únicamente por el metal fundido proveniente de los materiales de aporte y parte de los materiales base, y solidificados a partir del estado líquido sufre, durante la fusión, un cierto número de transformaciones que son de tipo químico, físico o estructural. En la zona fundida de la unión soldada ocurren procesos metalúrgicos donde se ponen de manifiesto cierto número de fenómenos como [32]:

- ✓ Modificaciones químicas.
- ✓ Absorción de gases.
- ✓ Precipitación de compuestos definidos de la solución sólida madre.
- ✓ Transformaciones eutécticas.
- ✓ Modificaciones estructurales.

#### **2.2.2.1.1. Microconstituyentes que pueden estar presentes en el metal del cordón durante la soldadura**

La micro estructura obtenida al enfriar el metal de soldadura desde el líquido hasta la temperatura ambiente se denomina estructura primaria o “como soldada”. Ésta consiste de ferrita alotrópica  $\alpha$ , ferrita con placas laterales o Widmanstätten  $\alpha_w$ , ferrita acicular  $\alpha_a$  y las llamadas microfases, que pueden incluir pequeñas cantidades de martensita, austenita retenida o perlita. La vainita también se puede encontrar en ciertos depósitos de soldadura [32].

**Ferrita acicular (FA):** Corresponde al tipo más frecuente de ferrita nucleada en el interior de los granos austeníticos, siendo formada a temperaturas tan bajas como aquellas de formación de la vainita en aceros bajo carbono y baja aleación enfriados continuamente. La ferrita acicular que se forma intragranularmente, nucleándose de forma heterogénea en sitios como inclusiones (o próxima a éstas), precipitados y otras irregularidades en los granos austeníticos. En la Zona

Fundida, su formación es favorecida por la presencia de precipitados y, particularmente, de numerosas inclusiones resultantes de la presencia de oxígeno, en general, en cantidades superiores a los del metal base [33].

La ferrita acicular es la fase más comúnmente encontrada como producto de la descomposición de la austenita en la soldadura de aceros al C-Mn y de baja aleación. Esta fase es de considerable importancia tecnológica, ya que provee una micro estructura relativamente tenaz y resistente. Se forma en un intervalo de temperaturas donde las transformaciones reconstructivas se vuelven relativamente lentas, y dan lugar a las transformaciones del tipo cooperativas como la ferrita Widmanstätten, la vainita o la martensita [32].

El Mn aumenta la fracción de ferrita acicular a expensas de la ferrita poligonal en los bordes de grano en las regiones primarias, refinando el grano en las zonas recristalizadas. Datos adicionales de otros procesos de soldadura caen en el rango de 90 a 150 MPa % en el límite de fluencia para GMAW y SAW, observándose un efecto más marcado en el último de ellos [33].

La adición de pirolusita en el revestimiento del electrodo, como será nuestro caso, aporta oxígeno favoreciendo la formación de inclusiones no metálicas que contribuyen a la nucleación de ferrita acicular (estructura considerada siempre favorable, ya que aumenta considerablemente la tenacidad). Durante el calentamiento del  $MnO_2$  ocurre su disociación como abordamos con mayor profundidad más adelante a su vez el oxígeno que se libera oxida elementos como el  $SiO_2$  que, quedando atrapados en el metal solidificado, nuclean la ferrita acicular.

La aparición de la escoria de MnO podría favorecer la transferencia de Mn al metal del cordón desde el revestimiento (en el revestimiento se adiciona Mn metálico a este propósito y para garantizar la adecuada desoxidación). Este hecho hace que se contribuya al mismo tiempo a la formación de inclusiones por el oxígeno

aportado por el  $MnO_2$  y la adición de Mn al metal por el principio de equilibrio por concentración de masa.

### **2.2.2.2 Zona afectada térmicamente**

El metal base aledaño a dicha zona o ZAT también sufre un tratamiento térmico variable según el punto que se considere y su distancia al eje de la costura, por ello sufre de transformaciones de tipo físico - químicas. La importancia de estas transformaciones es función, por una parte, del ciclo térmico y por otra, de la misma naturaleza de la aleación; aleaciones templables (aceros), aleaciones sensibles a los cambios de fase por precipitación (aleaciones de aluminio, por ejemplo), etc. El metal base en la zona afectada térmicamente sufre un tratamiento térmico variable en cada punto según el ciclo térmico impuesto por el procedimiento de soldadura. Este ciclo térmico estará influenciado, no solamente por el procedimiento de soldadura, sino también por el método de soldadura, las propiedades físicas del metal (como conductividad térmica), el tipo de unión y el espesor de las chapas a unir. En el caso de los aceros, el ciclo térmico puede provocar transformaciones de tipo estructural, provocando un agrandamiento exagerado de los granos, o de tipo físico-químico, como el temple, hasta una cierta distancia de ambas partes del eje de la soldadura [15]

#### **2.2.2.2.1 Modificaciones estructurales y físico – química en la zona afectada térmicamente del metal base (ZAT)**

El crecimiento de los granos en la ZAT, está ligado invariablemente al ciclo térmico de la soldadura, temperatura y velocidad de enfriamiento. En la soldadura por arco, la zona de crecimiento de los granos está más localizada y sus dimensiones pasan por un máximo, en una zona muy próxima a los bordes, disminuyendo bruscamente en las capas próximas al bisel. Este aspecto de la curva se debe al normalizado que provoca en el metal base las sucesivas pasadas del depósito por arco.

En la Figura 2.1 se muestra la influencia del ciclo térmico de soldadura en el tamaño del grano de la ZAT. En su parte izquierda representa una ZAT para una unión realizada mediante soldadura por llama, y la de la derecha mediante soldadura por arco, diferenciándose perfectamente el ancho mucho menor de esta última. Estos cambios de estructura generalmente están ligados a cambios en las propiedades del metal en esta zona debido al tratamiento térmico a que está sometido.

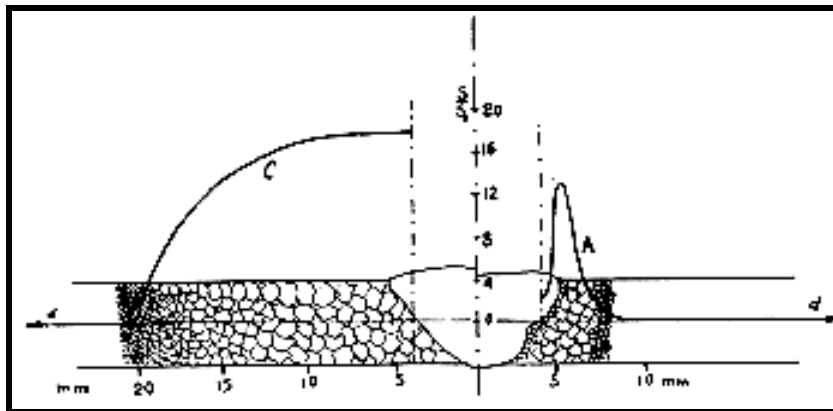


Figura 2.1. Influencia del ciclo térmico de soldadura en el tamaño del grano del metal base.

### ***Estructura de la Zona afectada térmicamente***

Según sea la potencia térmica aplicada en la zona fundida, así variará el ancho de la zona afectada térmicamente (ZAT) en el metal base, el cual será sometido a modificaciones alotrópicas, dando origen a toda una serie de estructuras que pueden ir desde el semi-temple del tipo bainítico, hasta el hipertemple totalmente austenítico. Estas modificaciones variaran en dependencia de las diferentes regiones de la zona térmicamente afectada donde se encuentre (figura 2.2).

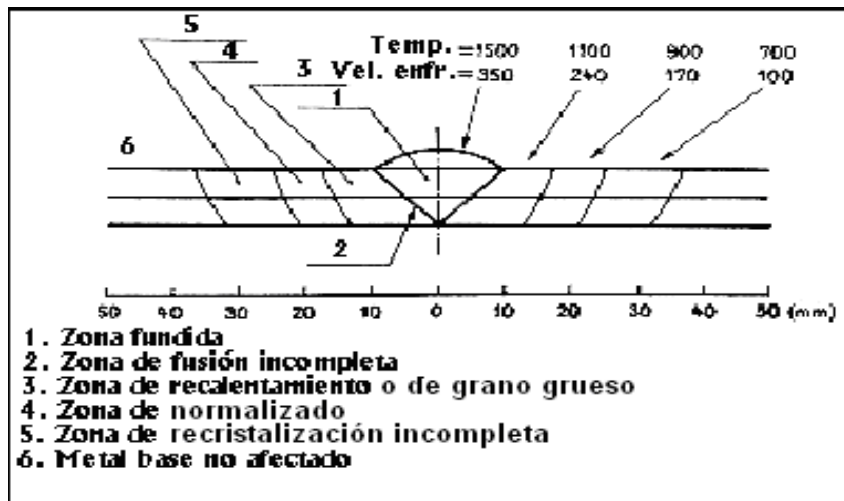


Figura 2.2. Estructura de la unión soldada.

A continuación se enumeran las diferentes zonas que se presentan en la ZAT durante la soldadura de los aceros al carbono y de baja aleación:

2- Zona de fusión incompleta: Constituye la zona de transición entre el metal de la costura o zona fundida y el metal base no fundido. Es una zona estrecha del metal base que se calienta a temperaturas por debajo de la línea de líquidos y por encima de la línea de sólidos, o sea, a temperaturas que solo sobrepasan un poco la temperatura de fusión por lo que el metal se encuentra en estado bifásico sólido-líquido. El estado bifásico que se alcanza permite que ocurran procesos difusivos de algunos elementos entre las fases líquidas y sólidas de la zona de fusión incompleta, lo que provoca que esta zona se diferencie en cuanto a composición química tanto de la zona de la costura, como del metal base. El ancho de esta zona depende del carácter de la fuente de calor y de la composición química del metal, y varía desde 0,1- 0,4 mm. Las propiedades de esta zona en ocasiones ejercen una influencia decisiva en la resistencia de la unión.

3- Zona de sobrecalentamiento: Zona limitada a los puntos cuyas temperaturas máximas se limitan entre aproximadamente los  $1100^{\circ}\text{C}$  (temperatura de crecimiento intensivo del grano austenítico) y la línea de sólidos. En esta zona el metal durante el calentamiento de soldadura sufre la transformación alotrópica de hierro- $\alpha$  a  $\gamma$  y producto de que el metal se calienta a temperaturas bastante por encima de

$A_{c_3} = 850^{\circ}C$  (para aceros de baja aleación) ocurre un sobrecalentamiento y crecimiento del grano austenítico. Luego del enfriamiento la estructura final de esta zona depende de la composición del metal y el ciclo térmico de soldadura, de forma que en algunos casos durante la soldadura SMAW con un sobrecalentamiento significativo del acero y un contenido de carbono elevado, y durante la soldadura con electro escoria, incluso en aceros de bajo carbono se forma una estructura de grano grueso, que no influye significativamente en la resistencia del metal, pero que sí disminuye significativamente su plasticidad. En estos casos la resistencia al impacto puede caer en un 25 %. El ancho de esta zona oscila entre 1 y 3 mm. Por lo anterior se considera una de las zonas que más afectación puede sufrir en la ZAT.

4- Zona de normalizado: Está constituida por el metal calentado por encima de  $A_{c_3}$  hasta la temperatura de aproximadamente  $1100^{\circ}C$ . En esta zona se obtiene una estructura de grano fino muy favorable desde el punto de vista de propiedades mecánicas, siendo en algunos casos incluso superiores a las del metal base no afectado. El ancho de la zona varía de 1,2 a 4 mm.

5- Zona de re cristalización incompleta: Se presenta en la zona calentada a temperaturas entre  $A_{c_1}$  y  $A_{c_3}$ , que en los aceros de bajo carbono va de  $725$  a  $850^{\circ}C$ . El metal en esta zona alcanza solo una re cristalización parcial.

6- Metal base no afectado: En los aceros al carbono por debajo de la temperatura  $A_{c_1}$  no ocurren transformaciones que afecten de forma importante las propiedades mecánicas, por lo que por debajo de esta temperatura se considera metal base no afectado térmicamente. Algunos autores extienden la ZAT por debajo de esta temperatura porque determinados aceros son susceptibles de sufrir modificaciones. [16].

Por las particularidades de este trabajo, que como fue referido arriba considera la adición de  $MnO_2$  al revestimiento de electrodos y que este óxido puede ser una fuente importante de oxígeno, a la vez que las mayores consecuencias de ello se expresan en el metal fundido, es precisamente hacia ahí donde dirigimos nuestro énfasis en la estructura de la unión soldada.



El oxígeno en la atmósfera del arco afecta las propiedades del metal de soldadura en tres formas: a través de la formación de inclusiones no metálicas, por oxidación de los elementos de aleación y causando porosidad por CO [28].

El oxígeno es introducido a la pileta líquida a altas temperaturas debido a tres fuentes principales. Por los óxidos presentes en el fundente que se disocian en el arco, por reacciones escoria-metal en la pileta líquida y por la atmósfera que rodea el ambiente del arco. Bajo estas condiciones el oxígeno reacciona directamente con los elementos de aleación en la pileta, promoviendo la desoxidación y modificando la templabilidad del metal de soldadura.

El oxígeno puede ser disuelto en el metal líquido desde la atmósfera del arco o a partir de reacciones metal-escoria. En los casos donde la soldadura se realiza con una atmósfera con bajo potencial de oxidación el factor controlante del contenido de oxígeno disuelto en el metal de soldadura son las reacciones metal-escoria [28].

Los óxidos precipitan en el metal líquido cuando éste se enfría y aparecen en el metal de soldadura como inclusiones esféricas. Estas inclusiones están compuestas de óxidos de Si, Mn y cualquier otro desoxidante que esté presente, junto con sulfuro de manganeso. Los diámetros pueden ir desde 0,05  $\mu\text{m}$  hasta máximos que pueden alcanzar los 10  $\mu\text{m}$ , mientras que la fracción en volumen puede llegar hasta 1 %. Al aumentar la corriente de soldadura aumenta el diámetro de las inclusiones no metálicas [28].

En los procesos que utilizan electrodos consumibles la oxidación de los elementos de aleación tiene lugar en las gotas que se forman en la punta del electrodo y que se transfieren a través del arco. En resumen hay poca reacción en la pileta de soldadura. El Mn y el Si son utilizados como desoxidantes en la soldadura por arco eléctrico de aceros al carbono. El manganeso se pierde tanto por oxidación como por evaporación, mientras que el silicio solo se pierde por oxidación [28].

En resumen se puede ver que las inclusiones no metálicas, si bien muchas veces se presentan como una herramienta fundamental para la formación de microestructuras tenaces de ferrita acicular, también tienen la característica de nuclear fallas por clivaje y dúctiles. Estos aspectos contradictorios llevan a una solución de compromiso en el nivel inclusionario, pareciendo probable que en los depósitos de soldadura que se realizan actualmente la concentración de oxígeno suele ser excesiva, mucho más allá de los niveles necesarios para inducir la formación de ferrita acicular. Es probable que este problema se vuelva más crítico a medida que el nivel de resistencia requerido para los depósitos de soldadura sea cada vez mayor y por lo tanto la tenacidad se vuelva más sensible a la presencia de las inclusiones no metálicas [34].

En el caso particular nuestro, este aspecto de la formación de inclusiones es algo importante a considerar, ya que se adiciona  $MnO_2$  (pirolusita) y  $CaCO_2$ , que aportan  $O_2$  y respectivamente, contribuyendo a la formación de inclusiones, o sea, que un adecuado manejo de la formación de inclusiones nos llevaría a la obtención de resultados deseados en la formación de ferrita acicular.

### ***2.2.3 Propiedades físico-mecánicas de la unión soldada***

En soldadura, en general, la resistencia y la dureza de los depósitos son altas. Esto se debe a la abundancia de impurezas y elementos de aleación los que en combinación con las rápidas velocidades de enfriamiento, tienden a promover menores temperaturas de transformación. Muchos de los productos de transformación a estas bajas temperaturas, particularmente la vainita, tienen una muy alta densidad de dislocaciones, que junto con el endurecimiento por solución sólida, causa la alta dureza y resistencia de los depósitos. Un factor adicional que probablemente contribuye a la dureza del metal de soldadura es la deformación plástica debida a las tensiones residuales, la que aumenta la densidad de dislocaciones en todos los componentes microestructurales [35].

Las propiedades al impacto y la tenacidad de los depósitos soldados no son generalmente altas. Esto se debe fundamentalmente a la inhomogeneidad de la micro estructura que resulta de su estructura de solidificación columnar relativamente gruesa y de la segregación [35].

Las propiedades mecánicas más comunes de la unión soldada son: la resistencia, la ductilidad, la dureza y la tenacidad o resistencia al impacto.

**Resistencia:** representa la capacidad de la misma de soportar la acción de las fuerzas externas sin romperse y se determina a través de un ensayo de tracción.

Es de extrema importancia tener en consideración que sí en una unión soldada existen áreas de elevada concentración de tensiones la vida a fatiga puede disminuir bruscamente. Se consideran concentradores de tensiones la presencia de entallas, grietas, poros, inclusiones, cambios bruscos de sección, etc.

Cuando se diseñen uniones soldadas para construcciones o ensambles que van a soportar cargas de fatiga se deben seguir las exigencias y recomendaciones de los códigos o manuales de diseño, aplicables al campo de empleo de dichas uniones.

**Ductilidad:** es la propiedad que le permite estirarse o cambiar de forma de algún otro modo sin romperse, reteniendo dicha forma después que se haya eliminado la carga. Además puede ser determinada a través de un ensayo de tracción. Para esto se unen lo más perfectamente posible las dos mitades de la probeta fracturada y se mide la distancia entre las marcas. El incremento de longitud brinda el alargamiento unitario de la probeta. Una alta ductilidad en una costura soldada indica que será menos propensa al agrietamiento en servicio.

**Dureza:** Se define como resistencia a ser penetrado por otro cuerpo duro. Además se mide introduciendo una bola de acero endurecido o un diamante dentro de la superficie de la probeta, bajo una carga definida y en una máquina de ensayo de dureza. Existen además ensayos de dureza Vickers, Brinell, Rockwell.

**Tenacidad o resistencia al impacto:** Capacidad de absorber la energía de una carga que se aplica sobre el miembro. Una unión soldada puede poseer una ductilidad satisfactoria bajo cargas estáticas, pero puede fallar bajo cargas dinámicas o de impacto. Además es determinada con más frecuencia por el ensayo "Charpy", aunque en ocasiones se mide por el ensayo "Izod". Ambos tipos de ensayos emplean la misma máquina del tipo péndulo [36].

La presencia del oxígeno en el acero empeora todas las propiedades del metal, los límites de resistencia y de fluencia, alargamiento relativo y resistencia al impacto caen bruscamente con el incremento del contenido de oxígeno y el que con mayor intensidad lo hace es la resistencia al impacto.

Además de los aspectos señalados, el incremento del contenido de oxígeno en el acero también provoca lo siguiente:

- disminuye la resistencia a la corrosión
- se manifiesta la tendencia al envejecimiento
- para contenidos de oxígeno de más de 0,08 % se manifiesta una tendencia a la fragilidad en frío y fragilidad al rojo.
- se incrementa el crecimiento de los granos durante el calentamiento.
- empeora la maquinabilidad por corte y por forja
- disminuye la permeabilidad magnética y se incrementa la resistencia eléctrica.

## **2.4 Componentes formadores de escoria**

Los elementos formadores de escoria no son más que sistemas de óxidos de diferentes elementos y de compuestos halógenos (con frecuencia fluoruros). Algunos de éstos, en las condiciones propias de la soldadura interactúan con el metal y lo oxidan.

## **2.4.1 Minerales de manganeso**

Entre los principales minerales de manganeso se destacan los oxidados y los carbonatos. A los primeros pertenece la pirolusita ( $\text{MnO}_2$  con 63,2 % de Mn), que es el más frecuente y entre los carbonatos se destaca la rodocrosita ( $\text{MnCO}_3$  con 47.8% de Mn). Existe además un tercer grupo, que son los silicatos de calcio y manganeso -Rodantita (Mn, Ca). ( $\text{Si}_3\text{O}_9$ ) y bustamita (Ca, Mn). ( $\text{Si}_3\text{O}_9$ ).

El primer campo de aplicación de los minerales de manganeso lo constituye la producción de ferromanganeso. No obstante, en la producción de materiales para soldar este mineral es ampliamente utilizado, solo que esta industria requiere de volúmenes de producción sumamente inferiores a los requeridos por la siderurgia. Por ello, incluso la literatura especializada en la metalurgia del manganeso, a veces no aborda este campo de aplicación de este mineral.

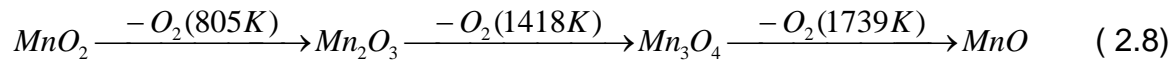
### **2.4.1.1 Comportamiento de los minerales de manganeso a altas temperaturas**

El revestimiento de un electrodo sufre en la soldadura un proceso piro metalúrgico, acompañado de cambios de fases, en el cual llega a alcanzarse el estado fundido. Conocer las transformaciones que tienen lugar con el aumento de la temperatura para el mineral implica prever la composición de las escorias a obtener, el requerimiento energético para los estadios del proceso, así como la composición de los gases de salida.

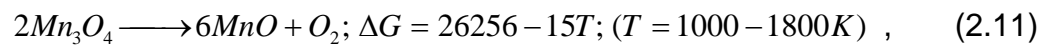
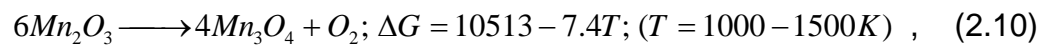
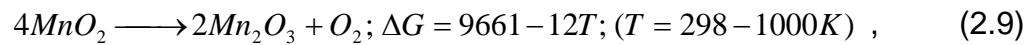
Al someter el mineral a la elevación de la temperatura el primer proceso que ocurre es la pérdida de agua de adsorción ( $\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}=\text{H}_2\text{O}_{\text{vapor}}$ ), que se verifica en el intervalo de temperaturas de 100-110°C, lo cual es un hecho general como lo plantean [37-39].

El tratamiento térmico de la pirolusita, que es el mineral más difundido entre los minerales de manganeso, se caracteriza fundamentalmente por la disociación de los óxidos superiores hasta MnO a relativamente bajas temperaturas, de manera

escalonada según el esquema de Baikov, señalado por muchos autores [40-42]:



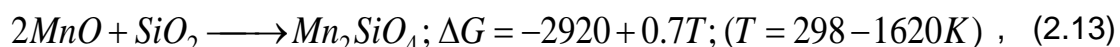
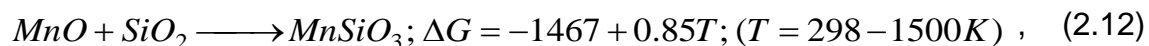
Cada uno de los estadios de este esquema ha sido abordado detalladamente en diversos trabajos, entre ellos [40, 43], los cuales han dado expresiones de energía libre de Gibbs para determinados rangos de temperatura, adecuándolas a la formación de un mol de oxígeno, con el objetivo de compararlas:



Para estas reacciones de descomposición la entropía ( $\Delta S$ ) toma valores pequeños ( $20 > \Delta S > -20$  J/(mol.K), por lo cual se considera  $\Delta S \approx 0$  (principio que se conoce como la regla de Kelly-Kubashevskii), y por lo tanto los valores de  $\Delta H$  de la reacción y  $\Delta G$  se aproximan. Los trabajos que refieren este hecho [44-46] lo relacionan a un mayor ordenamiento de las redes cristalinas.

Para el caso particular de la reducción de minerales de manganeso frente al carbono, en la producción de ferromanganeso, existen otras consideraciones. Un grupo importante de autores, como [47-50], plantean un esquema de reducción donde el paso de  $Mn_3O_4$  a  $MnO$  tiene lugar frente al CO y por supuesto ello ocurre a una temperatura inferior a la de disociación.

Como consecuencia de la presencia de relativamente altos contenidos de  $SiO_2$  en los minerales oxidados de manganeso, durante el procesamiento térmico de estos es posible la formación de  $MnSiO_3$  y  $Mn_2SiO_4$ . Las ecuaciones que representan estos procesos, así como los valores de energía de Gibbs, según [51-53], son como sigue:



Para las ecuaciones anteriores también se cumple la proximidad de  $\Delta H$  y  $\Delta G$ . Como puede apreciarse desde el punto de vista termodinámico la formación de  $Mn_2SiO_4$  resulta más probable.

### 2.4.2 Caliza

La caliza es una roca cuyo componente mineral principal lo constituye la calcita. La calcita pura está formada por 56% de CaO y 44% de  $CO_2$  y presenta una densidad de  $2,71 \text{ g/cm}^3$ , aspectos que pueden ser encontrados en una amplia literatura.

Al ser calentada la calcita se descompone, en un recipiente abierto y a presión atmosférica, de acuerdo a la siguiente:



En la producción de electrodos de soldadura la caliza es adicionada en calidad de componente básico, para regular una serie de propiedades físicas, tecnológicas y metalúrgicas. El requisito fundamental que deben cumplir estas rocas para su empleo en la conformación de revestimientos de consumibles de soldadura, como refiere [8], es que su contenido de CaO sea alto ( $\geq 89\%$  de pureza).

La caliza, al aportar CaO, mejora la transferencia del manganeso y cromo, a la vez que limita la del silicio, con una participación activa en el afino (defosforación y desulfuración), con la reducción de los enlaces Si-O en el fundido de silicato aumenta la tensión superficial del fundido. La influencia del CaO puede tener un límite justo cuando  $O:(Si + Al) = 4$ , pero su efecto positivo sobre la estabilidad del arco y sobre el coeficiente de dilatación lineal de la escoria pueden justificar su incremento más allá de tal circunstancia.

Por su parte, la Caliza ( $CaCO_3$ ) aporta CaO con relativamente alto punto de fusión, pero sufre un proceso de disociación en el entorno de los  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  que va acompañado de la liberación de  $CO_2$  a la atmósfera gaseosa del sistema ( $CaCO_3 = CaO + CO_2 \uparrow$ ) que evidentemente se verifica con una pérdida de masa [54, 55]

### **2.4.3 Fluorita**

El fluoruro de calcio ( $\text{CaF}_2$ ) está formado por 51,2% de Ca y 48,8% de F. Su dureza es de 4 en la escala de Mohs y su densidad es de  $3,18 \text{ g/cm}^3$ , junto a otras propiedades físicas como plantea [31].

La Fluorita influye positivamente sobre la basicidad y disminuye la temperatura de fusión, favoreciendo en este sentido la interacción y la transferencia de elementos aleantes como el Cr y el Mn (favoreciendo la Deposición)[31]. La temperatura de fusión de la fluorita es de  $1382 \text{ }^\circ\text{C}$ , esta temperatura de fusión relativamente baja provoca que al fundirse la fluorita produzca un corrimiento de las isoterma de las regiones básicas del sistema de óxidos en los diagramas de fases hacia temperaturas menores, facilitando la fusión. Por otra parte, la fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) posee un efecto dual sobre los enlaces Si-O al aportar  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{F}^-$ . Este último con tamaño próximo al del  $\text{O}^{2-}$ , por lo que lo sustituye en la estructura del silicato. El  $\text{F}^-$  al interactuar con el Si forma fluoruros volátiles que disminuyen los enlaces Si-O. Todo ello hace que se pueda controlar convenientemente la fluidez del fundido y contrarrestar los efectos de otros minerales sobre la viscosidad, mejorando la interacción metal-escoria.

La fluorita a temperaturas superiores se convierte en básico a causa de su comportamiento frente al  $\text{SiO}_2$ , actuando como regulador de propiedades, por ejemplo el carácter corto o largo del fundido o la conductividad eléctrica [27, 56]. Este mineral constituye un diluyente de escoria, donde disminuye la viscosidad. De esta forma, para la soldadura lo más deseable es tener escorias de poca viscosidad, de fácil movimiento o ligera, de rápida solidificación o endurecimiento. Estas condiciones la satisfacen con mayor completamiento las escorias cortas básicas.

Su efecto sobre la tensión superficial, explicado por el efecto que ejerce sobre la estructura del enrejado silicático, favorece la transferencia metálica y reduce el nivel de pérdidas por salpicadura. A lo anterior se agrega que en polaridad inversa los iones voluminosos de Flúor ( $\text{F}^-$ ) que descienden hacia la punta del



electrodo realizan un efecto de apantallamiento al paso de los electrones y reducen el efecto de calentamiento excesivo de la gota y su pérdida de elementos. A su vez que, en este tipo de polaridad las gotas son mayores en electrodos básicos, lo cual favorece la disminución de pérdidas [57].

## Capítulo III. Fabricación y evaluación de electrodos

### 3.1. Plan experimental para la obtención de electrodos

Para la realización de este trabajo se establecen los componentes a variar en el revestimiento: MnO<sub>2</sub> pirolusita (X<sub>1</sub>), CaCO<sub>3</sub>+CaF<sub>2</sub>(X<sub>2</sub>) y FeCrMn (X<sub>3</sub>). Este estudio en sentido general pretende lograr un electrodo que asegure mayor penetración, partiendo de la adición periférica de los referidos componentes al electrodo AWS E 7018, donde fungen como matriz de dicho revestimiento X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub>, mientras X<sub>3</sub> se considera el sistema aleante. Para el estudio en cuestión será aplicado un diseño de experimentos de tipo Mc. Lean Anderson, que considera condiciones de frontera para una región restringida. En la tabla 3.1 se dan los rangos de variación de las variables de entrada del diseño.

Tabla 3.1 Variables independientes del diseño del experimento.

<b>Variables</b>	<b>Min.</b>	<b>Máx.</b>
X <sub>1</sub> MnO <sub>2</sub>	0	50 %
X <sub>2</sub> (CaF <sub>2</sub> + CaCO <sub>3</sub> )	25	100 %
X <sub>3</sub> FeCrMn	0	75 %

La Adición de pirolusita (aportadora de MnO<sub>2</sub>) responde a la búsqueda de una mayor penetración, ya que como fue abordado en el epígrafe 2.4.1.1 este mineral sufre una serie de disociaciones durante el calentamiento con liberación de oxígeno que participaría en la atmósfera del arco y obviamente en la zona delantera de este oxidando a los elementos desoxidantes del revestimiento (Mn, Si, entre otros) y al ser estas reacciones exotérmicas aportan una energía adicional que se reviste en mayor penetración del cordón. El valor mínimo del rango de variación de esta variable X<sub>1</sub> responde a la intención de evaluar la condición cuando esta variable no influya exclusivamente, en particular la condición cuando solo influya la matriz del revestimiento (X<sub>1</sub>=0 y X<sub>2</sub>=0 y X<sub>3</sub>=25 %), al tiempo que el valor máximo de X<sub>1</sub> ha

buscado evaluar en un amplio rango su efecto como aportador de oxígeno, pero al mismo tiempo como aportador de MnO al sistema de escoria.

De otro lado, la adición de  $CaF_2$  y  $CaCO_3$  ( $X_2$ ) aseguran un medio básico en la escoria que favorece la participación activa en la escoria del MnO formado por la disociación del  $MnO_2$ . El rango entre 25 % y 100 % responde a los siguientes criterios: el valor mínimo (25 %) se basa en la idea de que para preparar la carga de revestimiento a aplicar al electrodo debe existir una matriz mineral que funja de soporte y de textura a la mezcla para su aplicación adecuada durante la fabricación del electrodo. El extremo máximo (100 %) se ha establecido en base al criterio de que la mezcla ( $CaF_2 + CaO$ ) influye positivamente en la basicidad del sistema y en consecuencia, aún cuando no se adicione un sistema aleante adicional al electrodo podría potenciarse la transferencia de elementos como el Manganeso, presentes en el núcleo del electrodo y en la propia escoria en forma de MnO y mejorar por esta vía la resistencia del metal depositado. Al mismo tiempo y por aumento de la basicidad del sistema de escoria se podría disminuir el Fósforo y el Azufre evitando sus efectos nocivos en el metal del cordón. El medio básico limita también la presencia del Hidrógeno en el metal depositado con su efecto positivo frente al agrietamiento en frío.

Se define la adición de FeCrMn ( $X_3$ ) para asegurar la presencia de elementos desoxidantes como el Mn y el Cr ( $[Mn] + [FeO] = [Fe] + (MnO)$ ;  $[Cr] + [FeO] = [Fe] + (Cr_2O_3)$ ). Tanto el Cr, como el Mn son elementos que aumentan la resistencia del acero, por lo que su adición en el revestimiento del electrodo puede crear una condición de relación de variables, donde junto a su función desoxidante hagan un efecto aleante a favor de la resistencia del metal. El rango de variación de esta variable tiene un carácter exploratorio, por lo que se mueve desde 0 (cero) hasta un valor suficientemente alto para validar su efecto en la condición extrema más allá de su participación como desoxidante del metal líquido.

Para todas las mezclas debe cumplirse la condición de normalidad, es decir:

$$\sum_{i=1}^q X_i = 1$$

La cantidad de experiencias a realizar se establece como  $N = q * 2^{q-1}$

=12, siendo, "q" el número de componentes, como lo refleja la Tabla 3.2, donde se muestra la Matriz Completa del Diseño de experimentos.

Tabla 3.2 Matriz Completa del Diseño de Experimentos.

No	X <sub>1</sub> (%)	X <sub>2</sub> (%)	X <sub>3</sub> (%)
1	(+) 50	(+) 100	(:)*
2	(+) 50	(?)*	(+) 75
3	(?)*	(+) 100	(+) 75
4	(-) 0	(-) 25	(75)*
5	(-) 0	(100)*	(-) 0
6	(?)*	(-) 25	(-) 0
7	(+) 50	(-) 25	(25)*
8	(+) 50	(50)*	(-) 0
9	(0)*	(+) 100	(-) 0
10	(0)*	(-) 25	(+) 75
11	(-) 0	(+) 100	(0)*
12	(-) 0	(25)*	(+) 75

*Nota: Los números entre paréntesis y con asteriscos de exponente (n)\* significa que es el valor determinado en base a una mezcla de 100 %, o sea, % X<sub>1</sub> + % X<sub>2</sub> + % X<sub>3</sub> = 100% .*

*Cuando dentro del paréntesis aparece un signo de interrogación significa que el número que se obtiene no es válido en base a las condiciones de frontera establecida para las variables y en base a la condición de normalidad (∑ X<sub>i</sub> = 100%).*

Solo son válidos a realizar los experimentos 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Los experimentos 4, 10 y 12 son iguales. También son iguales entre sí los experimentos 5, 9 y 11. Luego de esto solo quedan los experimentos a realizar que denominamos a, b, c, d como muestra la Tabla 3.3 y la Figura 3.1 y que corresponden a los vértices de un trapecio en el triángulo de composición. En centro de cada una de las aristas se inserta un nuevo punto, obteniéndose así los puntos: ac, cd, db y ba con sus coordenadas correspondientes en base a la

ubicación en el triángulo de composición (ver figura 3.1 y tabla 3.3). Finalmente se inserta un punto abcd en el centroide del trapecio.

Tabla 3.3 Plan experimental a realizar

Variante	X <sub>1%</sub>	X <sub>2%</sub>	X <sub>3%</sub>
<b>a</b>	0	25	75
<b>b</b>	0	100	0
<b>c</b>	50	25	25
<b>d</b>	50	50	0
<b>ac</b>	25	25	50
<b>cd</b>	50	37,5	12,5
<b>db</b>	25	75	0
<b>ba</b>	0	62,5	37,5
<b>abcd</b>	25	50	25

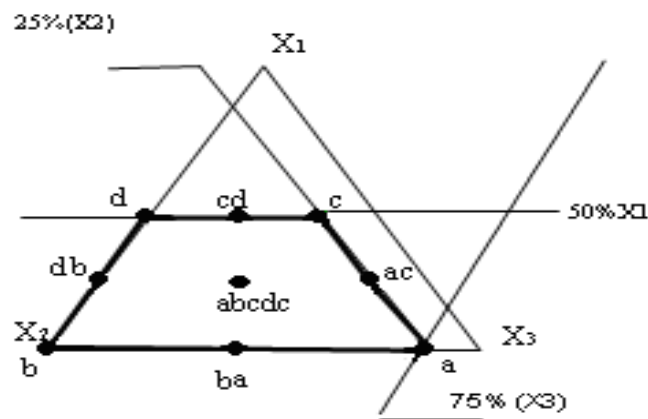


Figura 3.1. Representación gráfica de la zona experimental para la composición de los revestimientos de electrodos.

Para evaluar el efecto de los componentes del revestimiento sobre el comportamiento del electrodo y las propiedades del metal base pueden ser consideradas diferentes variables respuestas ( $Y_i$ ): tasa de deposición; tasa de consumo; rendimiento; profundidad de penetración; ancho del cordón; altura de refuerzo; ancho de la ZAT; % cromo; % manganeso; dureza, etc.

En el caso particular de este trabajo que tiene un alcance preliminar, no se llegará a la obtención de una respuesta concreta, y solo se hará un prototipo de uno de los puntos experimentales del plan de la tabla 3.3.

### **3.2 Evaluación de los parámetros de consumo del electrodo 7018**

Toda vez que el estudio se basa en aplicar un sistema aleante periférico a electrodos comerciales 7018 con el propósito de lograr electrodos básicos de mayor capacidad de penetración en busca de una mayor fiabilidad de las uniones soldadas del semi-ómnibus para transporte de personal, se considera como un punto de partida esencial la determinación de los parámetros de consumo de estos electrodos comerciales para utilizarlos como criterio de referencia en el desarrollo futuro de los electrodos experimentales.

Utilizando los electrodos comerciales AWS 7018 de 3,2 mm de diámetro y 350 mm de largo se realizaron cordones sobre chapa para la adquisición de los datos para determinar los parámetros de consumo. Este proceso fue realizado en la Empresa Enrique Villegas en base a las indicaciones ya descritas en el epígrafe 2.1.1 y con apego a la norma ISO 2401-72.

Para ello fueron pesados antes de la realización de los depósitos las chapas y los electrodos, utilizando una balanza técnica de 0,1 g de precisión. El estudio fue realizado para tres niveles de corrientes 90 A, 120 A y 150 A, respectivamente, con el empleo de una fuente (transformador Modelo Lincoln Electric AC 225 ARC Welder OHIO .USA). Con las corrientes indicadas fueron realizados depósitos sobre chapa en posición plana y controlando el tiempo de soldadura con el empleo de un cronómetro de 0,2 s de precisión (el soldador que realizó los depósitos está calificado para SMAW en la posición referida). Luego de la realización de los depósitos las chapas y las colillas de electrodos fueron pesadas para de esta forma obtener la masa de electrodo consumida y la masa de metal depositada. En base a las masas consumidas y depositadas en función del tiempo de soldadura fueron obtenidas la razón de depósito y de consumo, así como la eficiencia de depósito y las pérdidas, en base a las expresiones dadas en el epígrafe referido con anterioridad, cuyos valores son mostrados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados de los parámetros de consumo de los electrodos.

	Parámetros	E7018		
Datos	Is (A)	90	120	150
	Le (mm)	350	350	350
	de (mm)	3,2	3,2	3,2
	Mbi (g)	34,2	34,4	33,2
	Mip (g)	655	655	660
	Tbas (s)	100	88	73
	Lc (mm)	70,5	69,7	81
	Mbf (g)	6,0	5,9	7,2
	Mfp (g)	683	681	684
	Mf (g)	28,2	28,5	26
	Md (g)	28	26	24
	RF (kg/h)	1,02	1,17	1,28
	RD (kg/h)	1,01	1,06	1,18
	$\psi$ (%)	0,71	8,77	7,69
	E (%)	99,29	91,23	92,31

Para una interpretación más clara de los resultados fueron construidas gráficas de Razón de Depósito y de consumo; así como de eficiencia de deposición y de pérdidas en función de la corriente de soldadura, como lo muestra la figura 3.2. En una primera observación se hace evidente que el consumo de electrodo aumenta de manera lineal con la corriente. Este hecho tiene una explicación casi evidente, reportada con mucha frecuencia en la literatura clásica [58, 59]. Al aumentar la corriente para un diámetro invariable del electrodo también aumenta la densidad de corriente. De acuerdo con el efecto Joule, en la medida que aumenta la corriente la energía disipada en el electrodo aumenta y en consecuencia el calentamiento del núcleo y del revestimiento propician una mayor fusión, al mismo tiempo que contribuye que el mayor calentamiento del núcleo del electrodo aumenta la resistividad de éste y en consecuencia se traduce también en un mayor calentamiento. El aumento de la corriente también tiene consecuencias directas sobre las características del arco y la energía aportada por éste al baño de soldadura.

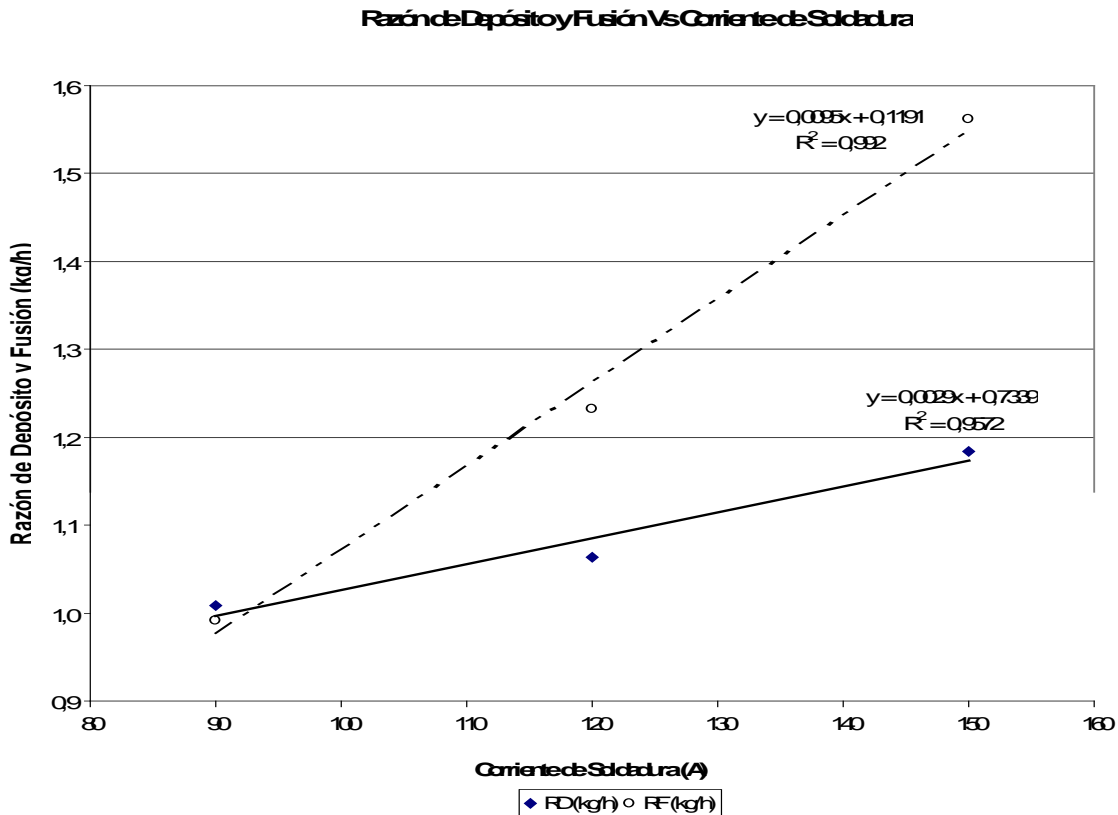


Figura 3.2: Influencia de la corriente de soldadura sobre la razón de deposición y de consumo.

Como se puede ver en la figura 3.2, la razón de deposición tiene un comportamiento también lineal creciente semejante al del consumo, lo cual obviamente era algo esperado, ya que se trabajó en un rango de corrientes dentro de lo recomendado para este diámetro de electrodo [59, 60]. El hecho de que la deposición aumenta lineal en la medida que lo hace el consumo, da criterio de que el material está pasando en una cantidad proporcional al baño de soldadura. Si se hace una observación detallada se advierte una pendiente marcadamente mayor para la recta de la fusión, lo cual indica que en la medida que aumenta la corriente menor masa de material del que se funde se está incorporando al metal del baño.

Lo anterior podría tener como explicación el hecho de que el  $\text{CaCO}_3$  presente en el revestimiento sufre una mayor disociación en la medida que aumenta la corriente de soldadura, mediante la verificación más intensa de la reacción



fuertemente endotérmica en el entorno de los 850 °C ( $\text{CaCO}_3=\text{CaO}+\text{CO}_2$ ) con el consecuente paso de CaO a la escoria y de  $\text{CO}_2$  a los gases. De otro lado, las pérdidas se manifiestan por mayores niveles de proyecciones metálicas por salpicadura, primero por el alargamiento posible del arco a causa de un aumento de tensión con el aumento de la corriente como consecuencia de las características estáticas del arco y por el aumento de la transferencia metálica por explosiones a causa del aumento de la presión parcial del  $\text{CO}_2$ , alojado en el interior de la gota metálica a transferir desde la punta del electrodo.

Ya lo que ocurre con el rendimiento en la figura 3.3 no es más que la consecuencia del comportamiento de la deposición y el consumo, ya que éste no es más que la relación de estos dos parámetros. Éste tiene en el rango de corrientes evaluando un carácter marcadamente decreciente en los niveles bajos de corriente con una tendencia a mantenerse prácticamente en el mismo orden de valores para las corrientes superiores a los 120 A.

La ligera tendencia a un cierto aumento para las corrientes más altas podría explicarse desde la óptica de una disminución de los diámetros de las gotas y una transferencia con menores explosiones mediante transferencias metálicas con corto-circuitos de menor duración y con mayor frecuencia de cortos. Asociado ello al comportamiento del balance de fuerzas estáticas sobre la gota bajo la columna del arco.

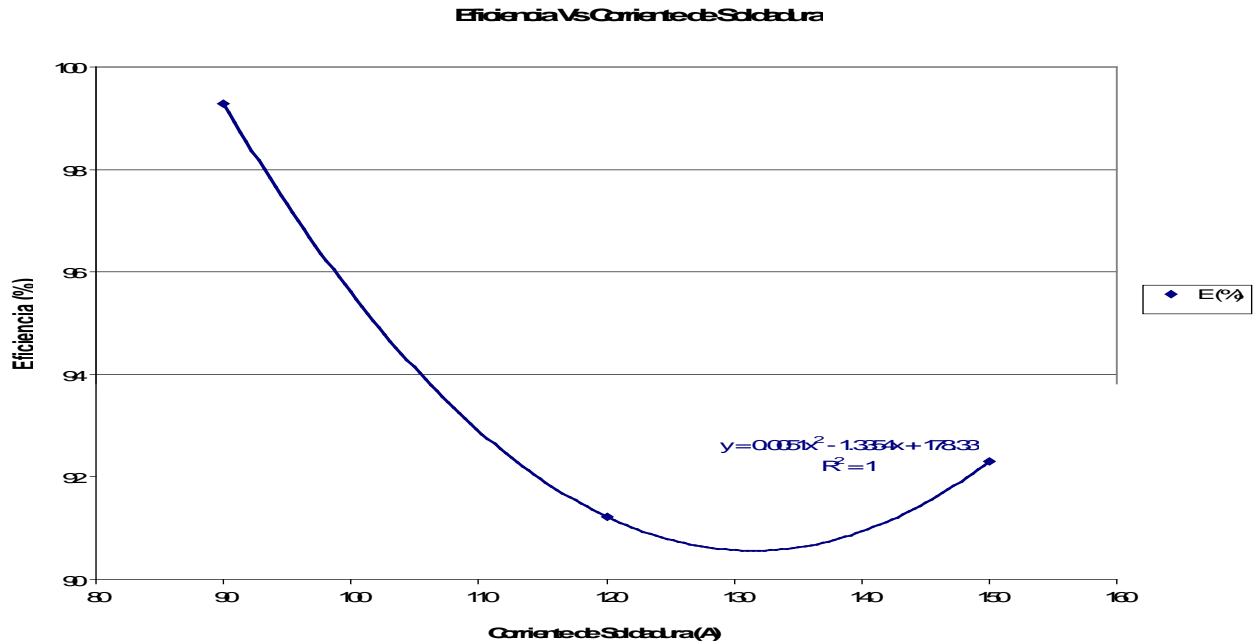


Figura 3.3 Influencia de la corriente de soldadura sobre la eficiencia del electrodo.

En igual sentido, la figura 3.4 muestra un comportamiento marcadamente creciente de las pérdidas en los valores de corrientes bajas con un comportamiento de estancamiento en el orden de valores en las corrientes altas a partir de 120 A. Esto hace entender claramente que con la corriente tampoco aumenta la pérdida por salpicadura, algo que podría haber sido posible si se creciera a valores aún mayores de corriente, pero que carecería de sentido desde el punto de vista tecnológico.

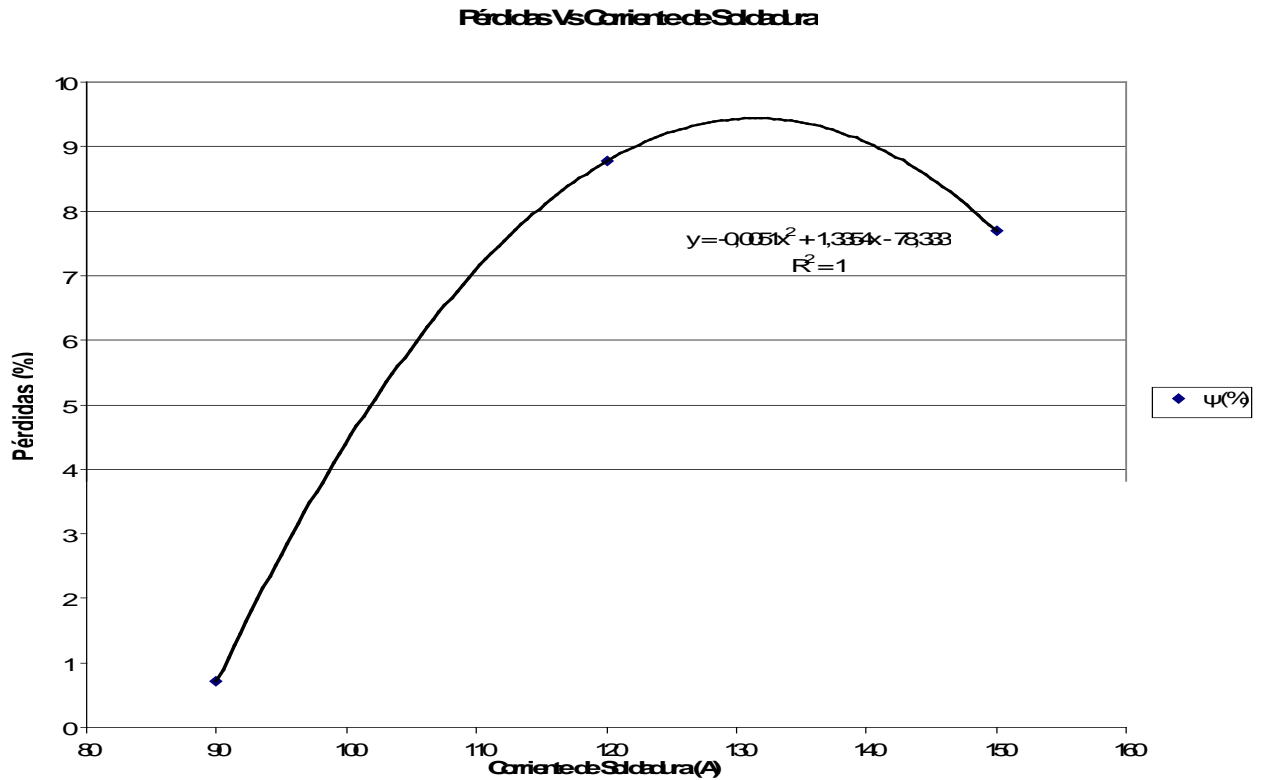


Figura 3.4 Influencia de la corriente de soldadura sobre las pérdidas.

De lo planteado queda claro que desde el punto de vista de los parámetros de consumo el nivel de corriente más bajo es el que garantiza los mejores resultados, ya que ofrece el mayor rendimiento. Este hecho debe ser valorado con determinado cuidado, ya que se logra el mayor rendimiento con la menor razón de deposición y en tal sentido habría que colocar en el análisis una valoración más integral que permitiese establecer relaciones más exactas de compromiso.

### 3.3 Evaluación de la geometría de los cordones obtenidos con el electrodo comercial AWS E 7018

A semejanza de los parámetros de consumo, la geometría de los cordones de los electrodos comerciales AWS 7018 constituye un punto de partida importante para

el desarrollo de un electrodo básico con incremento de la penetración del cordón, ya que utilizaremos este electrodo como referencia, toda vez que ha sido usado en el trabajo como soporte para la aplicación del revestimiento periférico de los electrodos experimentales.

La obtención de los depósitos para la determinación de las dimensiones fue realizada simultáneamente a la evaluación de los parámetros de consumo para diferentes corrientes, lo cual ya fue descrito en el epígrafe 3.2. A los depósitos le fueron realizados cortes transversales con disco abrasivo, seguido a lo cual fue realizado el proceso de preparación de la muestra hasta el revelado de la geometría del cordón por ataque con Nital al 2 %. Las imágenes de las secciones de los cordones fueron obtenidas con una cámara digital (en la figura 3.5 se muestra a modo de ejemplo una de las imágenes obtenidas), para luego determinar las dimensiones con el empleo del programa IMAGEN J. En la tabla 3.5 se muestran los resultados de dimensiones del cordón, así como el ancho de la Zona Afectada por el Calor (ZAC) de los depósitos obtenidos en los tres niveles de corriente de soldadura evaluados.

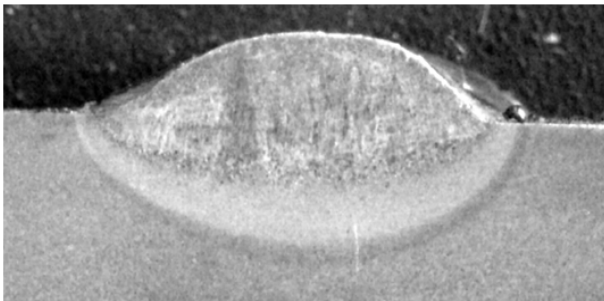


Figura 3.5. Imagen obtenida de las secciones de los cordones.

Tabla 3.5 Dimensiones del cordón y ZAC en función de la corriente.

<b>Parámetros</b>	<b>E7018</b>		
Is (A)	90	120	150
ZIT (mm)	1.3	1.9	2.6
B (mm)	7.5	8.5	9.0
hr (mm)	2.6	3.0	3.1
hp (mm)	1.3	1.5	1.6

Los resultados de dimensiones del cordón, mostrados en la tabla 3.5, fueron graficados en función de la corriente de soldadura para facilitar aún más la interpretación de los resultados (Figuras 3.6 a la 3.9)

Como era esperado, con el aumento de la corriente la profundidad de penetración aumenta (ver figura 3.6). Esto es algo ampliamente abordado en la literatura especializada, estando su fundamento asociado a la potencia específica del arco, o sea, la relación de calor generado hacia la pieza por unidad de tiempo y al área de contacto entre la pieza y el arco. En este trabajo se utiliza una corriente continua con electrodo positivo (CC+), por tanto la zona catódica está en el metal base y el calor generado en esta zona (calor de la zona catódica,  $Q_c$ ) es responsable del calentamiento y fusión del metal base y la potencia específica asociada ( $Q_c/A_o$ ), sería la responsable de la fusión local. La energía  $Q_c$  está dada por la energía generada por el paso de los electrones por la zona catódica ( $QV=I \cdot V_c$ , donde  $V_c$  es la tensión catódica), menos la energía que se precisa para la emisión de electrones en el cátodo ( $Q\phi=I \cdot \phi$ , donde  $\phi$  -función de trabajo) y la energía que se requiere para el calentamiento de este a la temperatura de arco ( $Q_T=3/2KT I/e$ , donde  $T$  es la temperatura del arco,  $K$  la constante de Boltzman y  $e$  es la carga del electrón). O sea,  $Q_c=I(V_c-3/2(KT/e)-\phi)$ , aumenta de forma proporcional con el aumento de la corriente [61].

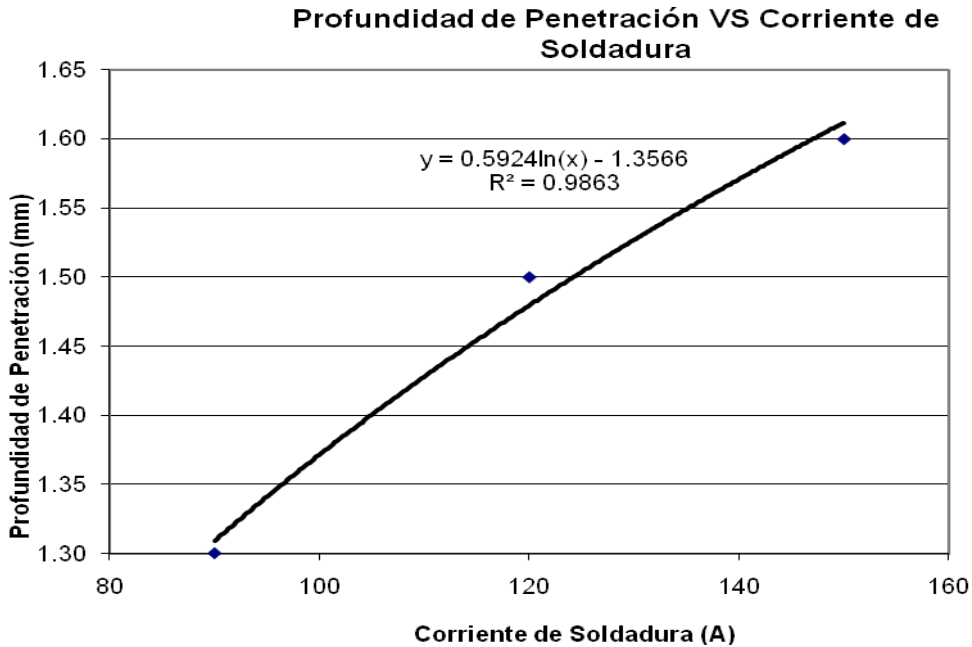


Figura 3.6 Influencia de la corriente de soldadura sobre la profundidad de penetración.

Para el caso del ancho de los cordones existe una tendencia a aumentar con la corriente (ver figura 3.7), asociado esto, más que con la corriente misma, con la tensión de arco, lo cual también es ampliamente abordado por la literatura especializada. En este trabajo se ha tratado de mantener constante la longitud de arco en las pruebas, y un aumento de la corriente, como es bien conocido, conduce a un aumento de la tensión de arco, de acuerdo con las características estáticas de éste. En concordancia con lo expresado anteriormente y recordando la forma cónica del arco se ha introducido más energía en un área aproximadamente constante del metal base en la medida en que la corriente aumenta, haciendo esto que el calentamiento sea mayor en la dirección lateral del metal base, al mismo tiempo en que es aumentada la profundidad de penetración. Este comportamiento del ancho con la corriente tiene también un reflejo en la tasa de deposición, la cual como fue descrito en el epígrafe 3.2 también crece con carácter prácticamente lineal con la corriente de soldadura. Una mayor masa de metal a depositar en la unidad de tiempo hace posible que se transfiera una

mayor cantidad de energía, contenida en el metal fundido como calor latente, en la unidad de área contribuyendo así a un mayor calentamiento lateral.

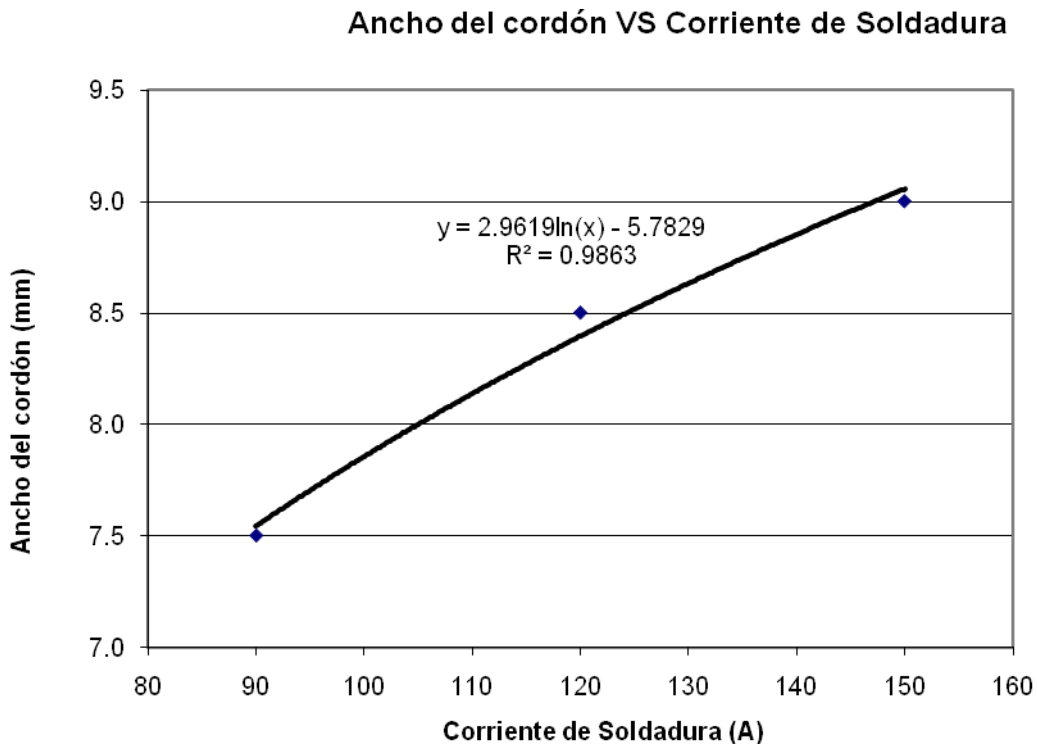


Figura 3.7 Influencia de la corriente de soldadura sobre el ancho del cordón.

En el caso de la altura del refuerzo (ver figura 3.8) es observada una tendencia al aumento que podría estar asociado a que al mismo tiempo que una mayor masa de metal es aportada (ver Figura 3.2, la temperatura del metal no aumenta suficientemente como para distribirse más haciendo que el aumento del ancho no sea suficiente para repartir el metal.

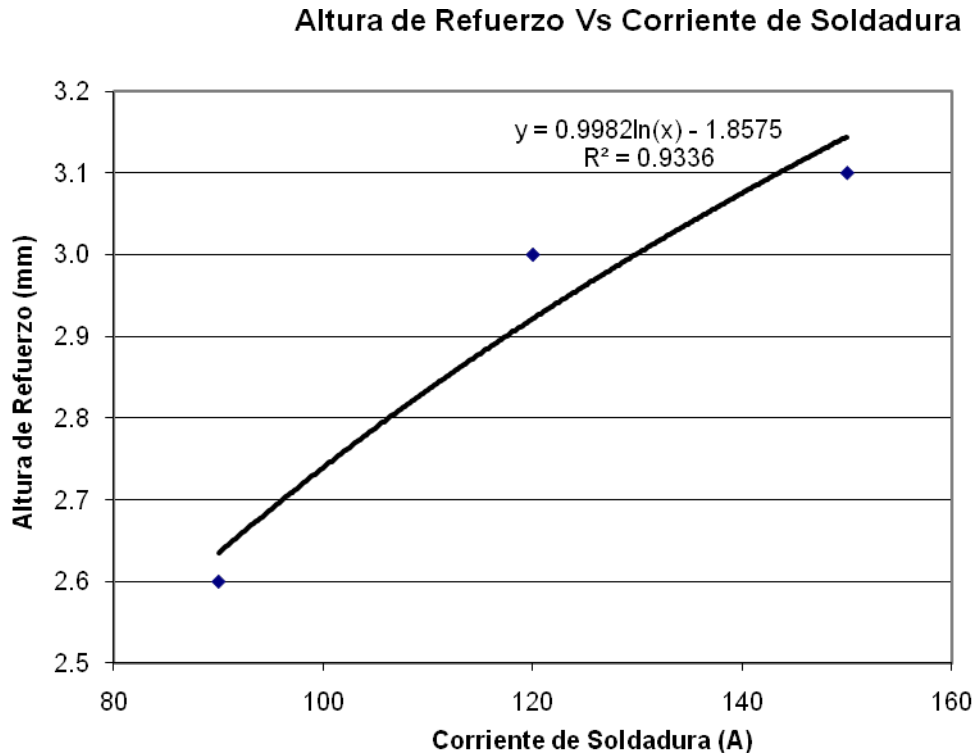


Figura 3.8 Influencia de la corriente de soldadura sobre la altura de refuerzo

El comportamiento con la corriente de la Zona Térmicamente Afectada (ver figura 3.9) es algo obviamente esperado. En la medida que se aumenta la corriente (aumento de la Energía Lineal de Soldadura  $H = \eta(I \cdot U) / V_s$ , J/min) hay un mayor calentamiento del metal base adyacente al cordón, al mismo tiempo que un mayor tiempo se requiere para el enfriamiento del metal. Si se quiere relacionar la temperatura máxima alcanzada por el metal con la distancia desde el borde de fusión, en base a una Energía Lineal de Soldadura puede ser considerada la fórmula:  $1/(T_p - T_o) = 0.0413 \rho C k y / H L$   $1/(T_f - T_o)$ , donde  $T_p$  es la temperatura de pico máxima alcanzada en °C,  $T_o$  es la temperatura inicial del metal base en °C,  $T_f$  es la temperatura de fusión del metal base en °C y  $y$  es la distancia del punto considerado a la línea de fusión en mm,  $k$  es la conductividad térmica del metal en  $J/(cm \cdot s \cdot \phi \cdot ^\circ C)$  (es de 0,54 para el acero al carbono),  $\rho$  es la densidad del metal en  $g/cm^3$  (es de 7,83 para en acero al carbono) y  $C$  es el Calor Específico en  $J/(g \cdot ^\circ C)$  (es de 0,46 para el acero al carbono) [62].



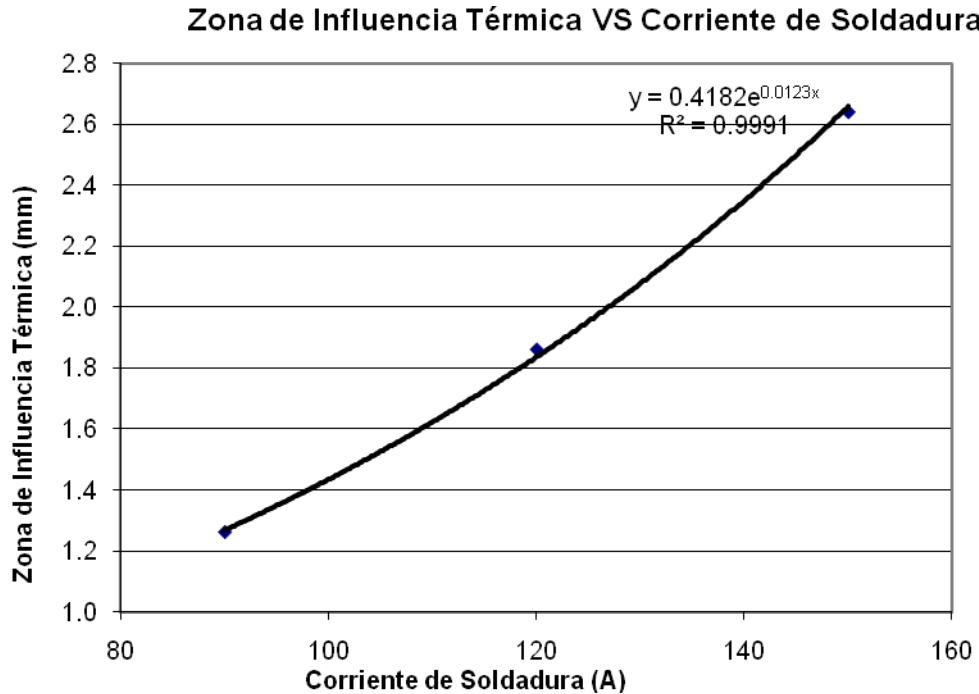


Figura 3.9 Influencia de la corriente de soldadura sobre la zona de influencia térmica.

En un análisis general y muy somero de las dimensiones del cordón queda claro que deben ser atendidos dos aspectos fundamentales: los coeficientes de forma de los cordones, sobre todo el coeficiente de forma de penetración (relación penetración/ancho) y el ancho de la ZAT. Es casi claro que una mayor ZAT siempre es un elemento de riesgo para la fiabilidad de las uniones, no obstante se debe buscar una condición donde se garantice la penetración suficiente en base a que es precisamente la condición de mayor penetración posible lo que se busca en el trabajo como objetivo global.

### 3.4 Obtención y evaluación del prototipo preliminar de electrodo experimental

La obtención de los electrodos comerciales fue realizada siguiendo una secuencia de etapas como lo esquematiza la figura 3.10.

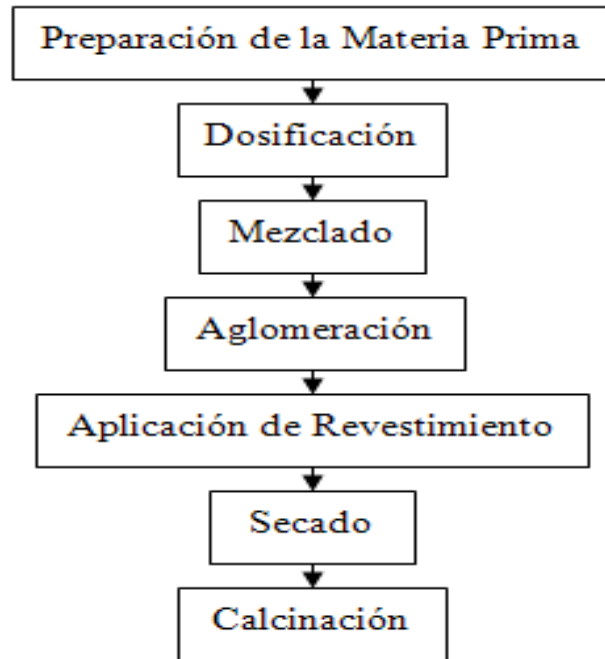


Figura 3.10 Esquema de obtención de los electrodos experimentales.

La primera etapa consiste en la preparación de las materias primas (Pirolusita, FeCrMn, Caliza y Fluorita). El FeCrMn es materia prima resultante de un proceso de reducción aluminotermia de Cromita y Pirolusita. Esta materia prima, luego del proceso reductivo se encuentran en fracciones de tamaño promedio superior a 15 mm, lo cual implica la necesidad de un proceso de trituración, molienda y tamizado. Las fracciones de mayor tamaño fueron fragmentadas de manera manual en un mortero hasta una granulometría del orden de 5 mm, posterior a lo cual fue realizada la molienda en un molino de disco en el laboratorio del Taller “Román Roca” de la Empresa “Enrique Villegas”. El proceso de molienda fue realizado en ciclo cerrado, controlando, mediante tamizado, la granulometría entre 0,1 mm y 0,25 mm. La Caliza y la Pirolusita fueron igualmente procesadas, siendo en este caso realizado el proceso de molienda con ciclo cerrado en el molino de bolas del laboratorio de materiales del Centro de Investigaciones de Soldadura. La granulometría final de la caliza fue controlada por tamizado  $\approx 0,1$  mm. En el caso de la Florita, ya esta se encontraba en forma de polvo y solo fue tamizada a una granulometría de  $\leq 0,1$  mm.

La segunda etapa (Ver figura 3.10) correspondió a la dosificación, lo cual se hizo mediante un proceso de pesaje en una balanza técnica en las correspondientes proporciones para una masa total de 200 g. En este caso solo fue aplicado el revestimiento correspondiente al punto experimental (c) de la Tabla 3.3, a modo de prototipo preliminar. El proceso de mezclado fue realizado en el laboratorio del Taller “Román Roca” de la Empresa “Enrique Villegas”.

La tercera etapa, realizada también en el laboratorio del Taller “Román Roca” de la Empresa “Enrique Villegas”, corresponde al mezclado (ver figura 3.10). Esta fue realizada en un mezclador de tambor rotatorio durante 30 min.

La etapa próxima del proceso se corresponde a la aglomeración (ver figura 3.10), la cual se realizó en el laboratorio de materiales del CIS. En esta etapa le fue adicionado silicato de sodio en una proporción de 40 % de la masa seca (80 g para 200 g de masa seca) previamente mezclada. El silicato de sodio fue adicionado de manera gradual al mismo tiempo que se iba aglomerando manualmente con una varilla de cerámica, a la masa le fue añadida también determinada cantidad de agua hasta que se logró una textura de la pasta adecuada para aplicar como revestimiento por inmersión.

Luego de obtenida la pasta para aplicar al revestimiento (ver figura 3.10), esta fue adicionada a un recipiente en forma cilíndrica de 20 mm de diámetro y 350 mm de longitud. Los electrodos comerciales AWS E 7018 fueron sumergidos en dicho recipiente con la pasta y extraídos lentamente para, mediante inmersión, aplicar un revestimiento periférico, obteniéndose 5 electrodos revestidos en este caso.

Los electrodos revestidos fueron colocados de manera vertical para someterlos durante 24 horas al proceso de secado al aire (ver figura 3.10). Luego de secados los electrodos fueron introducidos en una estufa a 160 ° C durante 2 horas para extraerle toda la humedad posible en la etapa de calcinación (ver figura 3.10).

Con los electrodos obtenidos fue realizado un depósito, siguiendo los procedimientos ya descritos en el epígrafe 3.2 en la obtención de depósitos para el electrodo comercial AWS E7018, solo que en este caso se hizo únicamente para una corriente media de 120 A. Como resultado fueron obtenidos los datos

para la determinación de los parámetros de consumo que se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Evaluación de los parámetros de consumo del prototipo de electrodo experimental

	<b>Parámetros</b>	<b>Experimental</b>
<b>Datos</b>	Is (A)	120
	Le (mm)	350
	de (mm)	3,2
	Mbi (g)	45,38
	Mip (g)	476,16
	Tbás (s)	60,30
	Lc (mm)	46,40
	Mbf (g)	27,01
	Mfp (g)	490,16
<b>Resultados</b>	Mf (g)	18,37
	Md (g)	14,00
	RF (kg/h)	1,10
	RD (kg/h)	0,84
	$\psi$ (%)	23,79
	Er (%)	76,21

De manera cualitativa el comportamiento en la soldadura del prototipo de electrodo evaluado se fue adecuadamente en cuanto a: estabilidad del arco, desprendimiento de la escoria y aspecto del cordón. Si se valora de manera global los resultados de las tablas 3.6 y 3.2 se advierte que para igual valor de corriente el rendimiento real del electrodo experimental es inferior, siendo inferiores la razón de fusión y de deposición. Las pérdidas fueron superiores para el experimental. Es probable suponer que entre los depósitos obtenidos con el electrodo comercial AWS E 7018 y el prototipo experimental existen diferencias de geometría y de composición química, ya que la introducción de componentes en el revestimiento sin dudas afecta la basicidad del sistema, las actividades de los óxidos, la composición másica de la masa fundida, las propiedades físicas del arco, las propiedades físicas del metal fundido, las condiciones de transferencia metálica, el aporte térmico por la verificación de los procesos redox, entre otros.

De lo obtenido con el electrodo experimental se confirma la viabilidad de realizar el plan experimental planteado en la tabla 3.2, lo cual será objeto de un trabajo futuro de continuidad a la presente investigación que permitirá establecer relaciones cuantitativas de las respuestas y las variables de entrada; así como permitirá la selección de una composición de revestimiento más adecuada que responda a una condición de compromiso entre las variables respuestas.

## Conclusiones Generales

- La fabricación del semi-ómnibus en las condiciones de la Empresa Militar Industrial (Santi Spiritus) con proceso SMAW es viable desde el punto de vista técnico- económico, ya que se cuenta con las condiciones de infraestructura tecnológica y recursos humanos y se logran indicadores económicos favorables.
- La evaluación de los parámetros de consumo de un electrodo, las características operativas, las dimensiones, las estructuras y propiedades de las uniones soldadas, son aspectos de importancia relevante a la hora de evaluar un electrodo que defina su viabilidad de aplicación.
- Se puede lograr un aumento en la penetración del cordón, mediante la adición de elementos en el revestimiento del electrodo AWS E 7018 en base a un diseño experimental de mezcla de tipo de Mc Lean Anderson, donde sea considerada la adición de Pirolusita, FeCrMn y Caliza+ Fluorita.
- Para el electrodo comercial AWS E 7018 se advierten variaciones en los parámetros de consumo con la variación de la corriente dentro del rango de operación del electrodo, donde la eficiencia es favorecida para los niveles más bajos de corriente. De igual manera la geometría del cordón se modifica al variar la corriente, siendo mayores para las corrientes altas la penetración, el ancho, el refuerzo y las dimensiones de la ZAT.
- El prototipo preliminar de electrodo experimental obtenido demuestra la viabilidad de desarrollo futuro del plan experimental planteado, existiendo potencialidades de alcanzar modificaciones favorables al revestimiento a partir del electrodo comercial AWS E 7018.

## **Recomendaciones**

- Dar continuidad a este trabajo, desarrollando el plan experimental planteado y lograr así las relaciones cuantitativas de las propiedades respuestas con las variables de entrada (componentes del revestimiento), así como definir una composición de electrodo que responda a una condición de compromiso entre las respuestas evaluadas. Realizar a dicha composición seleccionada una evaluación económica integral en cuanto a fabricación y aplicación del electrodo que tome como referencia los electrodos comerciales AWS E 7018.

## **Referencia Bibliográfica**

1. Autocamión ZIL-131 y sus Modificaciones.

2. (I. N. Vornovitsky, "Regulating Splashing of Electrode Metal in Manual Arc Welding" *Welding International* 2007 21 (2) 157-159.
3. Yu. A. Mazel "Development of High-productivity High-alloyed Electrodes" *Welding International* 2006 20 (11) 913-917.
4. N. M. R. De Rissone "ANS/AWS A5.1-91 E6013 Rutile Electrodes: The Effect of Calcite" *Welding Journal*, July 2002 113-124.
5. J. P. Farias "The Effect of Magnesium Content on the Arc Stability of SMAW E7016-C2L/8016-C2 Covered Electrodes" *Welding Journal* 1997 76 (6) 245-250.
6. V. V. Sulima and M. I. Kucherova "Ensuring the Stable Level of the Quality of Welding Electrodes" *Avt Svarka* 2002 (11) 38-41.
7. A. V. Yarovchuk "Effect of Ferrochrome Content on the Oxidation-reduction Processes in Welding Slags Based on Titanium Dioxide" *Welding International* 2005 19 (8) 651-656.
8. J. P. Farias "The Effect of Wallastonite on Operational Characteristics of AWS E6013 Electrodes" *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.* V. 26 No 3 2004, I. V. Vornovitsky "Technological Peculiarities of High-alloy Steel Welding by Electrodes With Rutile Coating" *Paton Welding Journal*, No 2, 2005, 46-47 pag.
9. I. R. Yadoshcin "New Electrodes for Welding of Carbon and Low-alloyed Steels" *Paton Welding Journal*, No 3, 2005, 36-37 pag.). .
10. ANSI/AWS, Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding, Standard 5.1-91, Miami, Fl., 1991, American National Standards Institute/American Welding Society.
11. E. Suriam "ANSI/AWS E7024 SMAW Electrode: The effect of Coating Magnesium Additions, part 1: on The Operational behavior, Diffusible Hydrogen and All-Weld –Metal Mechanical Properties and Microstructure. *Welding Journal* 1997 76 (10), 400-411.
12. A. V. Yarovchuk "Special Features of Using Slightly Enriched Ilmenite Concentrate in the Coating of Welding Electrodes for General Applications" *Avt. Svarka* 1997 (11) 46-56).



13. V. V. Semendyaev "Introduction of the Quality Control System at The Elektrode Zavod Company a new Stage of Development of the Plant" Svarshik 1998 (3) 26;.
14. Norma de Consumo Unitaria, Fabricación de Semi-ómnibus 2006.
15. Rodríguez, H., Metalurgia de la Soldadura. 1983: Editorial Pueblo y Educación 613 pp. .
16. Autores, C.d., ed. Apuntes de Soldadura.
17. Norrish, J., Advanced Welding Processes. New Manufacturing Processes and Materials Series, ed. D.A. John Wod. 1992, Philadelphia, New York: IOP Publishing LTD. 499.
18. Cary, H.B., Modern Welding Technology third edition. 1996.
19. Chu, W.-H., Automatización SMAW mediante control Fuzzy para controlador PID con ganancia programada. 2004. p. 108.
20. Safety, C.C.f.O.H.a., WELDER Health and Safety Guide. 2003.
21. Héctor Rodríguez, Metalurgia de la Soldadura.
22. J; V. V; A. V. Yarovchuk "Effect of Ferrochrome Content on the Oxidation-reduction Processes in Welding Slags Based on Titanium Dioxide" Welding International 2005 19 (8) 651-656.
23. I. K. Pokhodnya "Research into the Special Features of Metal Transfer and Arc Running Stability in Welding Using Basic-coated electrodes. Abt. Svarka, 1984 No 5 39-42;.
24. SCOTTI, A.; QUITES, A.M.; KOBAYASHI, Y. & FARIAS J.P., Características dinâmicas de eletrodos revestidos, Metalurgia ABM, vol. 41, no336, pp., 1985, 619-622 p. (ISSN 0026-0983).
25. ISO 2401-72. Organización Internacional para Estandarización.1972.
26. Technical Committee ISO TC 44: ISO 2401-72. Covered Electrodes. Determination of the Efficiency metal recovery and the deposition coefficient.
27. L.Oson David, Lui Stephen, G.I.R. Edwards, Weld. Mater., Proc. Mater.Weld.Symp. (1990) 183-189
28. J.F.Lancaster, The physics of welding. Second Edition. 1986. 340.

29. CRUZ, A., Obtención, mediante fusión, de un fundente fundido del sistema MnO-SiO<sub>2</sub> para la soldadura por arco sumergido, Tesis Doctoral, Instituto Superior Minero Metalúrgico: Moa 2002, 158 p.
30. Frolov, V. V., Teoría de los procesos de soldadura, Vishaya Scola, 1988, 486 p. .
31. (V. Podgayetskii and G. Kuzmenko "Theory of Slags" Naukoma Dumka, Kiev, 1988, 255 p). .
32. Reina Gómez, M Soldadura de los aceros y sus aplicaciones. 1986.
33. IIW DOC. IX-1533-88 Guidelines for the Classification of Ferritic Steel Weld Metal Microstructure Constituents using the Light Microscopy"
34. H. K. D. H. Bhadeshia, L. E. Svensson, "Mathematical Modelling of Weld Phenomena", 1993, Institute of Materials, London.
35. K. Easterling, "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding", 1983, London, Butterworths.
36. Pozo, construcciones soldadas.
37. Sirina, T. P. et al.: Sobre las bases físico- Químicas de tratamiento de minerales de manganeso pobres. Memorias de la V Conferencia "Metalurgia del manganeso". Nikopol. 1991.
38. Kucher, A. et al.: Estudio de las propiedades termofísicas de los diferentes minerales de manganeso, de materiales de carga y de cargas para la obtención de aleaciones al manganeso. Conferencia científico- técnica "Novedades y perfeccionamiento de la tecnología de sinterización, producción de arrabio y de ferroaleaciones. Varna. 1990.
39. Karmanov, E. S.: Estudio de la velocidad y el carácter del descenso de los materiales de carga durante la fusión de aleaciones al manganeso en hornos minerotérmicos de arco cerrados. Rev. Stal No7 del 1991.
40. Misra, V. N.: Prereducción of manganese ore for manganese smelting. Pap 14th congres counc. Mining an met. Inst. Edinburgh. Julio del 1990.
41. Uchida Susumu, et al.: Relación de fases en el sistema CaO-MnO-SiO<sub>2</sub> aplicada al proceso de reducción de mineral de manganeso. Iron and Steel Institut. No4 del 1991. .

42. Mats, M.: Phase equilibria, phase diagrams and phase transformations: Their Thermodynamic basis. Cambridge University Press. 1998.
43. Bobkova, N. V.: Sobre el mecanismo de fusión de materiales en forma de óxidos y reducción de fundidos oxidados. Rev. Stal No1 del 1991.
44. Smart, L.: Solid state chemistry. Chapman and Hall. London 1995.
45. Jiang Quo- Chang, et al.: A laboratory Investigation on the carbon bearing Manganese ore lump in solid state. Proc. 6th International Iron and Steel Congres. Nagoya. Octubre del 1990.
46. Kulikov, I. S.: Disociación de los óxidos de manganeso y procesos de reducción. Memorias de la V Conferencia "Metalurgia del manganeso". Nikopol. 1991.
47. Atui, Y. et al.: Cinética de la reducción conjunta de los óxidos de hierro y manganeso en las condiciones no isotérmicas. Rev. Izvestia (Chernaya Metalurguía) No5 del 1984.
48. Batterhan, R. J.: Fabricación de ferroaleaciones utilizando un reactor de baño fundido. Patente ES 2060171 España 1992.
49. Runov, M. A.: Capacidad de reacción y reducción del monóxido de manganeso. Teoría y práctica de la metalurgia del manganeso. Academia de Ciencias de la URSS. 1990a.
50. Gasik, M. I. et al.: Pronóstico de las estructuras y valoración de la tendencia de las transformaciones de fase en los fundidos del sistema MnO-SiO<sub>2</sub>-CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Memorias de la V Conferencia "Metalurgia del manganeso". Nikopol. 1991b.
51. Mchedlov- Petrosian, O. P.: Termodinámica de los silicatos. Literatura po Stroitelstvu. Moscú. 1985.
52. Lucio, A. et al.: Metalurgia dos ferroligas. Volumen 1. Belo Horizonte Universidade Federal de Minas Gerais. 1979.
53. Drew, R. et al.: Ciencia y Tecnología de los Materiales Cerámicos. Departament of Mining Metallurgical and Engineering, McGill University, Montreol, Canada. 1999.

54. (T. P. Quinn, A. Q. Bracarence and S. Liu "A Melting Rate and Temperature Distribution for Shilded Metal Arc Welding Electrodes" Welding Journal, No 12, 1997, 532-538 pag.
55. A. Q. Bracarence and S. Liu "Chemical Composition and Hradness Control by Endothermic Reaction in the Coating of Covered Electrodes" Welding Journal, No 12, 1997, 509-516 pag ). .
56. A.S. Pismennyi, Patton Welding Journal, 2 (1996) 97-100.
57. S. Brandi, C. Taniguchi and S. Liu "Analysis of Metal Transfer in Shilded Metal Arc Welding" Welding Journal, 1991, No 10, pag 261-270). .
58. American Welding Society (AWS): Metals Handbook, v., Welding and Brazing 8va Edición, 1971.
59. coefficient., T.C.I.T.I.-C.E.D.o.t.E.m.r.a.t.d.
60. Fernández Fuentes, R.P.D., Influencia del régimen de relleno sobre las características de depósitos obtenidos utilizando fundentes de producción nacional. 4to Simposio de Soldadura CIS-UCLV 1991. .
61. MONDENESI, P.J., Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais, UFMG, Belo Horizonte, 2004, 145 p.
62. M.Adams, J.C., Welding Journal. may 1958.