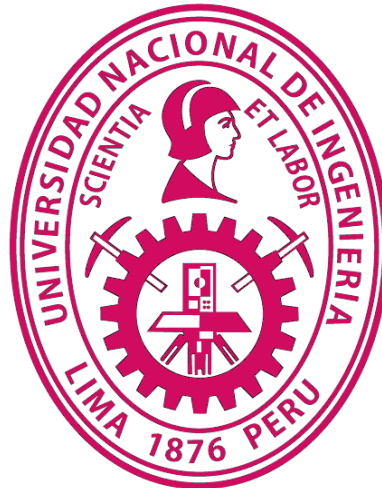


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



**APLICACIÓN DE CASCARILLAS DE ÓXIDOS DE HIERRO
EN LA FABRICACIÓN DE REVESTIMIENTOS
PARA ELECTRODOS DE SOLDADURA**

TESIS

**PARA OPTAR POR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA**

**ELABORADO POR:
JORGE ALFONSO UGARTE DÍAZ**

**ASESOR:
ING. JULIO UZA TERUYA**

LIMA – PERÚ

2013

RESUMEN

La industria siderúrgica nacional produce aproximadamente 1.1 millones de TM de acero por año, en cuyo proceso se genera un residuo sólido denominado “cascarillas de óxidos de hierro”.

El presente trabajo es un estudio acerca de la factibilidad de emplear dicho residuo siderúrgico en la fabricación de revestimientos para electrodos de soldadura, reemplazando a un óxido de hierro mineral de mayor costo, denominado óxido de hierro micáceo (MIO). La cascarilla posee un contenido aproximado de 68 % de hierro, que es equivalente al contenido de hierro que posee el MIO (66 %), lo que le confiere al revestimiento similares propiedades químicas y metalúrgicas.

Además, la cascarilla posee una granulometría en la que el 8 % del material es menor a 500 μm , mientras que el MIO posee una granulometría en la que el 99 % es menor a dicho tamaño. Es por ello que se realizaron balances metalúrgicos de carga y pruebas de molienda con el fin de obtener un tamaño de partícula adecuado para la fabricación del electrodo.

Los electrodos generados fueron evaluados por soldadores certificados; los cordones de soldadura obtenidos fueron sometidos a ensayos de conformidad para asegurar la calidad del producto final. Los resultados de estos ensayos cumplen con la especificación AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M.

ABSTRACT

The national steel industry produces approximately 1.1 million tons of steel per year, in which process generates a solid residue called “scales”.

The present work is a study of the feasibility of using such residue in manufacturing coatings for welding electrodes, replacing an iron oxide mineral more expensive, called micaceous iron oxide (MIO). The scales have approximately 68% iron by weight, which is equivalent to the iron content MIO holds (66 %), what gives the coating similar chemical and metallurgical properties.

Besides, the scales have a granulometry in which 8% of the material is less than 500 microns, while the MIO has a granulometry in which 99% is less than that size. This is why metallurgical load balances and grinding test were carried out to obtain a suitable particle size for the manufacture of the electrode.

The electrodes were evaluated by certificates welders; the weld beads obtained were subjected to tests in accordance to ensure final product quality. The results of these tests comply with AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M specification.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Hipótesis planteada	2
1.4 Antecedentes	3
CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL DE LA CASCARILLA	5
2.1 Oxidación a altas temperaturas	5
2.1.1 Tipos de óxidos generados	8
2.2 Aspectos termodinámicos	12
2.2.1 Diagramas de Ellingham - Richardson	16
2.3 Aspectos cinéticos	20
2.3.1 Difusión del oxígeno	21
2.3.2 Mecanismos de oxidación	24
CAPITULO 3: MARCO CONCEPTUAL DE LA SOLDADURA	28
3.1 Generalidades	28
3.2 Procesos de soldadura por arco eléctrico	31
3.3 Proceso de soldadura SMAW	34
3.3.1 Electrodo revestido	36
3.4 Clasificación de los electrodos	41
3.4.1 Tipos de revestimiento	43
3.5 Aspectos metalúrgicos	47

CAPITULO 4: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	52
4.1 Caracterización de la cascarilla	52
4.1.1 Composición química	55
4.1.2 Distribución granulométrica	56
4.2 Índice de finura	64
4.3 Fabricación de los electrodos revestidos	73
4.4 Validación de los electrodos revestidos	76
4.5 Preparación de la junta	77
4.6 Registro de calificación del procedimiento	78
4.7 Ensayos de conformidad de la soldadura	81
4.7.1 Análisis químico	82
4.7.2 Ensayo de ultrasonido	83
4.7.3 Ensayo de tracción	85
4.7.4 Ensayo de impacto	88
4.7.5 Ensayo de dureza	92
4.7.6 Ensayo de doblez	94
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	97
5.1 Resultados del análisis químico	97
5.2 Resultados del ensayo de ultrasonido	98
5.3 Resultados del ensayo de tracción	99
5.4 Resultados del ensayo de impacto	100
5.5 Resultados del ensayo de dureza	102
5.6 Resultados del ensayo de doblez	104
CONCLUSIONES	106
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXOS	

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

La oxidación de las aleaciones de hierro es un proceso termodinámicamente espontáneo que genera óxidos conocidos usualmente como cascarillas (scales). En las industrias con economía de escala, la cascarilla se recicla, mientras que en otros casos, como nuestra industria manufacturera y metal – mecánica, se acumulan como residuos sólidos generando impactos negativos al medio ambiente.

La presente tesis plantea la alternativa de darle valor agregado a estos residuos sólidos contribuyendo así mismo a una mejor gestión en su manejo. Para ello se presenta el desarrollo de un proceso de fabricación para el revestimiento de electrodos de soldadura por arco eléctrico usando como un insumo las cascarillas.

En el desarrollo de este proceso de fabricación, la cascarilla reemplaza a un insumo mineral primario de mayor costo, conocido como óxido de hierro micáceo (Micaceous Iron Oxide – MIO). De otro lado, el producto fabricado es sometido a ensayos de conformidad con la especificación internacional AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M.

1.2 Objetivos

General:

Obtener electrodos de soldadura manual por arco eléctrico (proceso SMAW) mediante la modificación de la composición del revestimiento.

Específico:

Obtener un revestimiento del tipo celulósico y rutílico incorporando cascarillas de óxidos de hierro para fabricar electrodos de soldadura que cumplan la norma AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M.

1.3 Hipótesis planteada

Las cascarillas de óxidos de hierro sustituirán a los óxidos de hierro mineral (MIO) de las fórmulas convencionales actuales, sin desmedro de las propiedades del revestimiento, con la consiguiente reducción de costos y abriendo nuevas aplicaciones para estos residuos sólidos de origen industrial.

1.4 Antecedentes

No se encontraron antecedentes acerca de la utilización de óxidos de hierro de origen industrial en la fabricación de revestimiento de soldadura; sin embargo existen estudios, informes y patentes desarrollados con el fin de reciclar estos residuos.

Según López Gómez, F. A. et al. [1] es viable la fabricación de nódulos de composición controlada a partir de escoria que proviene de acerías, mezclada con sustancias que aporten fósforo (P), potasio (K) y magnesio (Mg) a la mezcla. Para conseguir una buena modulación y consolidación, tanto la escoria como los distintos aditivos se muelen a tamaño inferior a las 80 μm .

Martín Hernández, M. I. [2] estudió el efecto de emplear la cascarilla de laminación como un material para eliminar iones en solución acuosa como cobre (Cu^{2+}), cadmio (Cd^{2+}), zinc (Zn^{2+}) y plomo (Pb^{2+}), contenidos en efluentes líquidos industriales. La eliminación de cadmio, cinc y plomo correspondiente a un proceso de adsorción superficial sobre la cascarilla, y se ha evaluado aplicando las isotermas de Langmuir y Freundlich. La eliminación de cobre ocurre por un proceso de oxidación-reducción o cementación en conjunto con el hierro (Fe^0) de la cascarilla ($\text{Cu}^{2+}/\text{Fe}^0$). Encontró que el incremento en la temperatura influye en la eliminación de los iones por adsorción en su superficie, pero no puede concentrar dichos metales, por lo que solo cumple la función de eliminarlos.

Young, R. D. & Norris, D. [3] trabajaron con cascarilla de acero, como componente para la elaboración de Clinker (materia prima para fabricar cemento Portland), ya que contienen óxidos de hierro (en mayor proporción), silicio, manganeso, cromo, calcio, etc., que favorece la disminución en la temperatura de clinkerización entorno a los 1400°C. Los hidrocarburos y aceites que acompañan a la cascarilla son volatilizados en todo el proceso y llevados a un área de combustión para formar dióxido de carbono y vapor de agua, que son liberados a la atmósfera.

Low, K.O. [4] realizó estudios acerca de la elaboración de pigmentos a base de los óxidos de hierro contenidos en la cascarilla. Esta cascarilla fue mezclada con otros óxidos de hierro (minerales) para acelerar su velocidad de oxidación durante el calentamiento a temperaturas entre 200 a 900 °C; encontraron que el color del pigmento dependía de la atmósfera de trabajo: Si esta operación se realiza en una atmósfera oxidante, se producirá un pigmento de color negro, marrón o rojo; si esta operación se realiza en una atmósfera no oxidante o reductora, se producirá un pigmento de color negro.

Meynerts, U. et al. [5] desarrollaron un método para aglomerar residuos sólidos siderúrgicos, en particular la cascarilla de laminación, con lodos de papel por medio de briquetas en caliente. La cascarilla le confiere a las briquetas una alta densidad y resistencia mecánica. Dichas briquetas, de aproximadamente 800 g, se pueden colocar en un horno de arco eléctrico como insumo en la producción de acero, los óxidos de hierro son reducidos y el hierro metálico se funde dentro del horno.

CAPÍTULO II

MARCO CONCEPTUAL DE LA CASCARILLA

2.1 Oxidación a altas temperaturas

Los aceros, como materiales de ingeniería, deben poseer una serie de características y propiedades adecuadas antes de entrar en servicio. El caso más genérico es que son sometidos a la acción de la energía térmica, ya que alcanzan un estado plástico y pueden ser deformados más fácilmente. Algunas tecnologías orientadas a la deformación plástica de los aceros son: Laminación, extrusión, forja, embutición, etc.

Al trabajar un acero a altas temperaturas, este reacciona químicamente cuando se expone al aire o a otros gases más agresivos. Como el gas reactivo más común es el oxígeno del aire, todas las reacciones metal – aire se identifican como una oxidación. A este tipo de oxidación se le conoce como oxidación a altas temperaturas, producto de la cual se forma en los aceros una película superficial compuesta por capas continuas y compactas de óxidos de hierro, a la que se le conoce comúnmente como **cascarilla de acero**.

La cascarilla se forma siguiendo tres etapas en las que intervienen diversos mecanismos, que se mencionan a continuación:

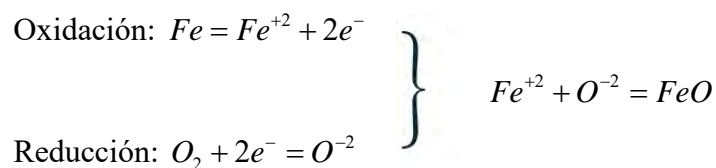
a) *Primera etapa:*

El oxígeno es adsorbido en la superficie del acero. Esta adsorción involucra una reacción química en la superficie (quimisorción).

b) *Segunda etapa:*

Se forma una película fina de óxidos (FeO); luego se forman núcleos discretos de óxido en la superficie, los cuales se expanden y eventualmente incrementan su velocidad de crecimiento. Algo de oxígeno atómico es disuelto en la superficie metálica [6].

Las reacciones que se producen son las siguientes:



Los iones metálicos se forman en la interfase metal/óxido y el oxígeno se reduce en la interfase óxido/gas.

c) *Tercera etapa:*

Esencialmente es el crecimiento de la capa de óxidos constituyendo la cascarilla, cuyo espesor final es resultado de la reacción en la interfase óxido/gas o metal/óxido debido al transporte de cationes (Fe^{+2}), aniones (O^{-2}) y electrones (e^{-}) a través del óxido formado, que se comporta como un electrolito sólido.

La **figura 2.1** muestra esquemáticamente los mecanismos mencionados durante la reacción acero/oxígeno.

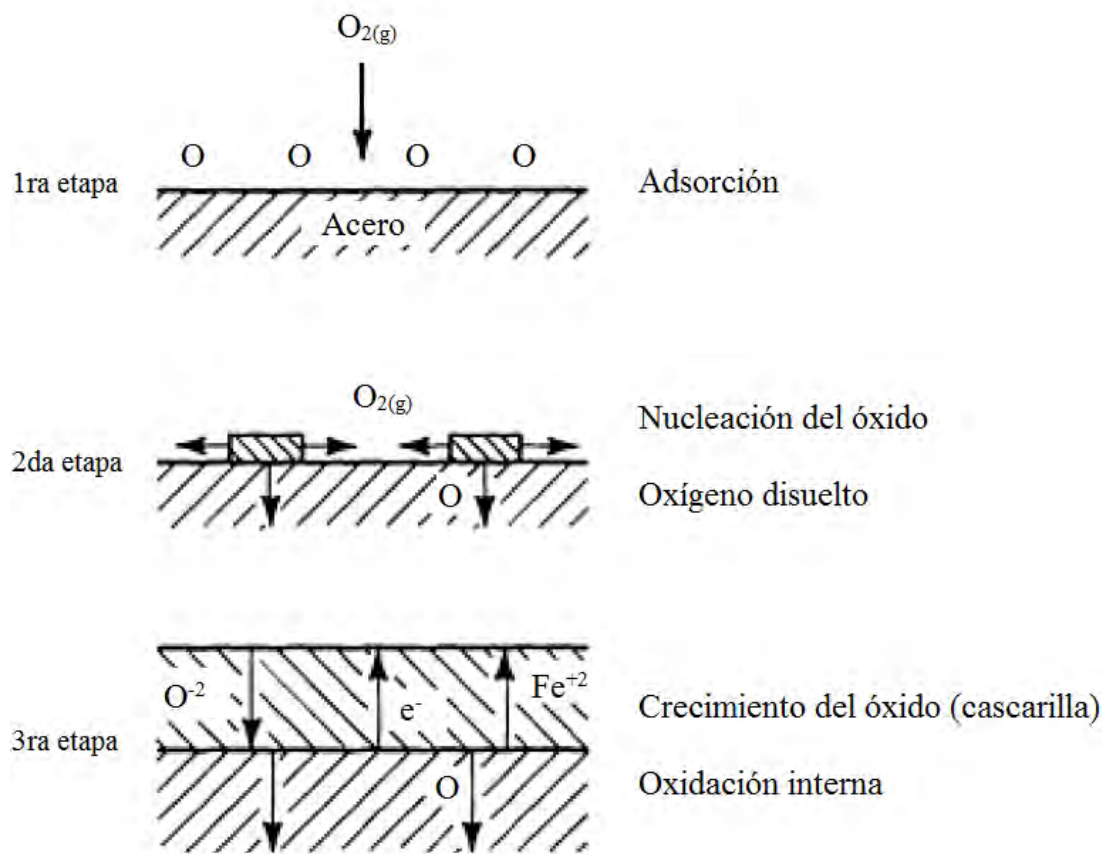


Figura 2.1: Fenómenos que tienen lugar durante la reacción acero/oxígeno [6].

2.1.1 Tipos de óxidos generados

La cascarilla formada a temperaturas de trabajo mayores a 570 °C en aceros aleados y aceros al carbono está constituida principalmente por wustita (FeO), magnetita (Fe₃O₄) y hematita (Fe₂O₃). La **figura 2.2** muestra el espectro de difracción de rayos X de una muestra de cascarilla de laminación.

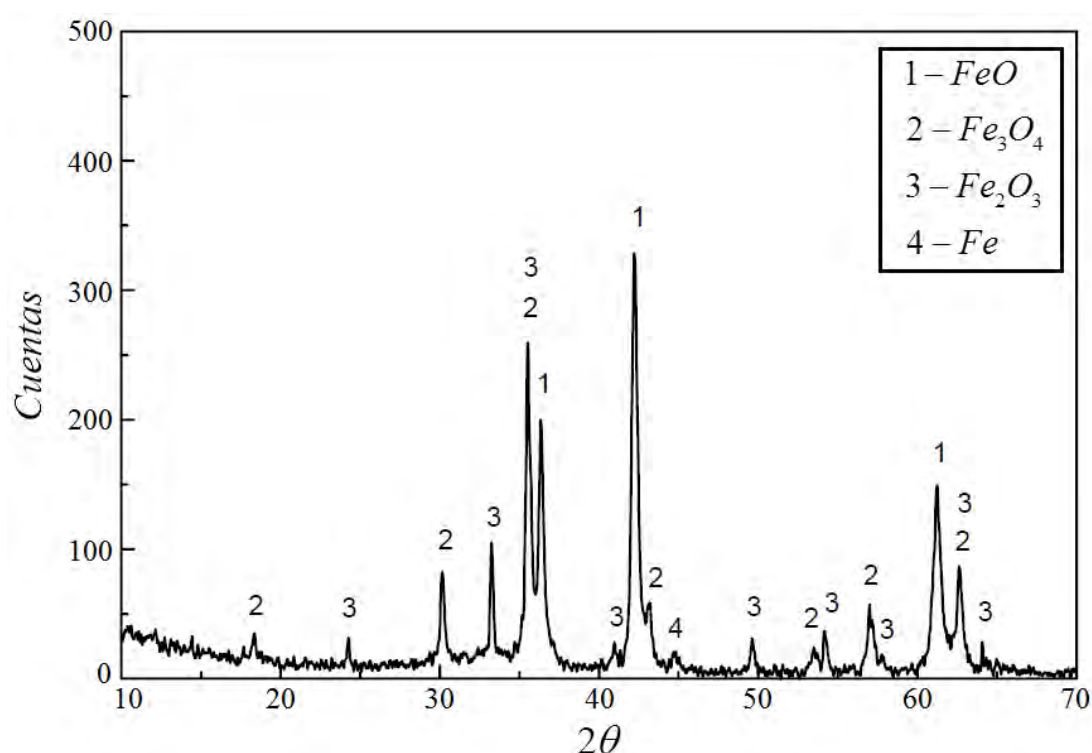


Figura 2.2: Espectro de difracción de cascarilla de laminación [2].

A temperaturas comprendidas entre 700 a 1250 °C, el óxido predominante es la wustita con alrededor de 95%, seguido por la magnetita con un 4% y sólo un 1% de hematita [7]. En la **figura 2.3** se observan los valores experimentales de los espesores de hematita y magnetita para dicho rango de temperaturas.

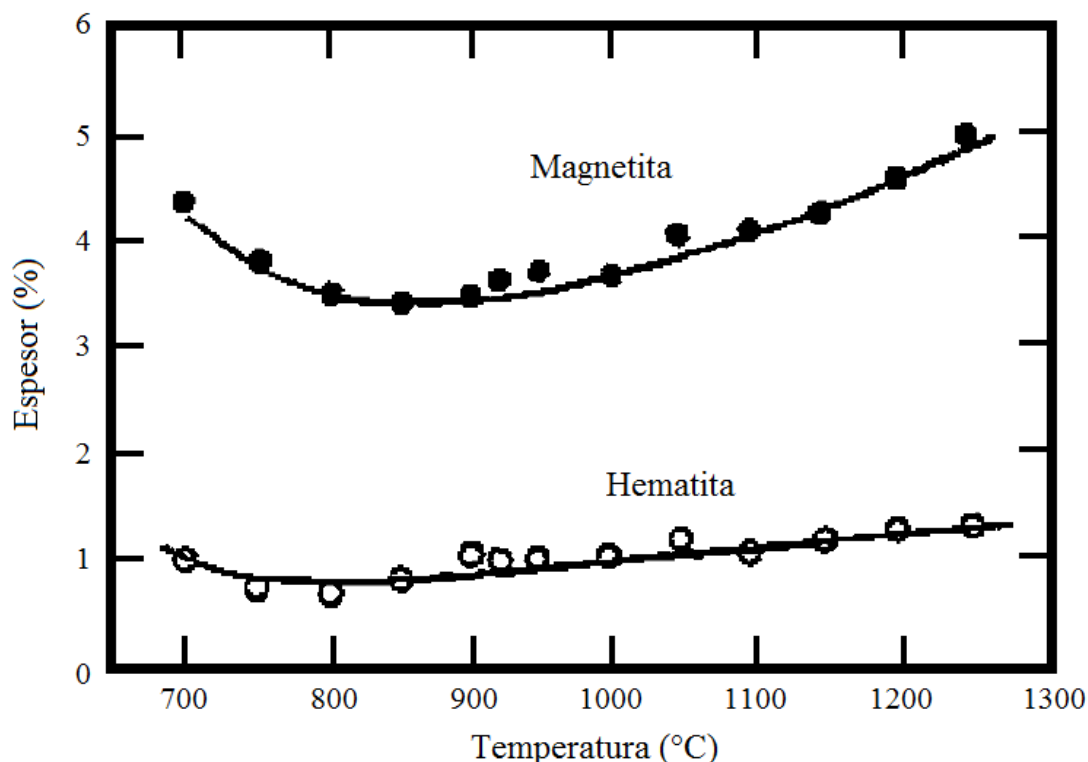


Figura 2.3: Espesores relativos de hematita y magnetita a elevadas temperaturas [7].

La wustita se forma cerca de la superficie del metal y por lo tanto, es la fase más rica en hierro, conteniendo teóricamente 78% de hierro aproximadamente. Este óxido es estable a partir de 570 °C y crece enteramente por difusión de los iones Fe^{+2} , mientras que los iones O^{-2} se agregan a la cara externa de la fase y permanecen prácticamente inmóviles.

La magnetita es una fase intermedia del óxido, conteniendo teóricamente 72% de hierro aproximadamente. Este óxido es estable a temperatura ambiente y es el principal constituyente de la cascarilla a 500°C. Durante su crecimiento, tanto los iones Fe^{+2} como los iones O^{-2} difunden a través de la capa de óxido.

La hematita es la capa más externa del óxido y es la fase menos rica en hierro, conteniendo teóricamente 70% de hierro aproximadamente. Este óxido es también estable a temperatura ambiente, pero requiere mayor concentración de oxígeno que la magnetita. El mecanismo de difusión de la hematita es por migración de iones O^{-2} , en la que los iones Fe^{+2} se agregan a la cara interna y permanecen inmóviles.

La **tabla 2.1** muestra las principales propiedades termo-físicas de los óxidos de hierro mencionados.

Tabla 2.1: Principales propiedades termo-físicas de los óxidos de hierro[8, 9].

Propiedad	Wustita	Magnetita	Hematita
Densidad ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	5.67	5.18	5.24
Esfuerzo a la tensión (Mpa)	0.40	4.00	1.00
Dureza (HV)	270 – 350	420 – 500	1000 – 1100
Conductividad térmica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	2.7 – 3.3	0.5 – 3.5	0.5 – 3.5
Difusividad térmica ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	$0.7\cdot 10^{-6}$	$0.2 – 3.0\cdot 10^{-6}$	$0.2 – 3.0\cdot 10^{-6}$
Calor específico ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	58	200	150

En los aceros inoxidable, además, se forma otro óxido llamado cromita (Cr_2O_3), que es más estable que los óxidos de hierro a altas temperaturas, por lo cual el espesor final de este óxido dependerá de la cantidad de cromo que posea el acero inoxidable. La **figura 2.4** muestra la variación de la velocidad de oxidación y de la composición de la cascarilla con el contenido de cromo, basados en estudios isotérmicos a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ y 0.13 atm. de oxígeno [10].

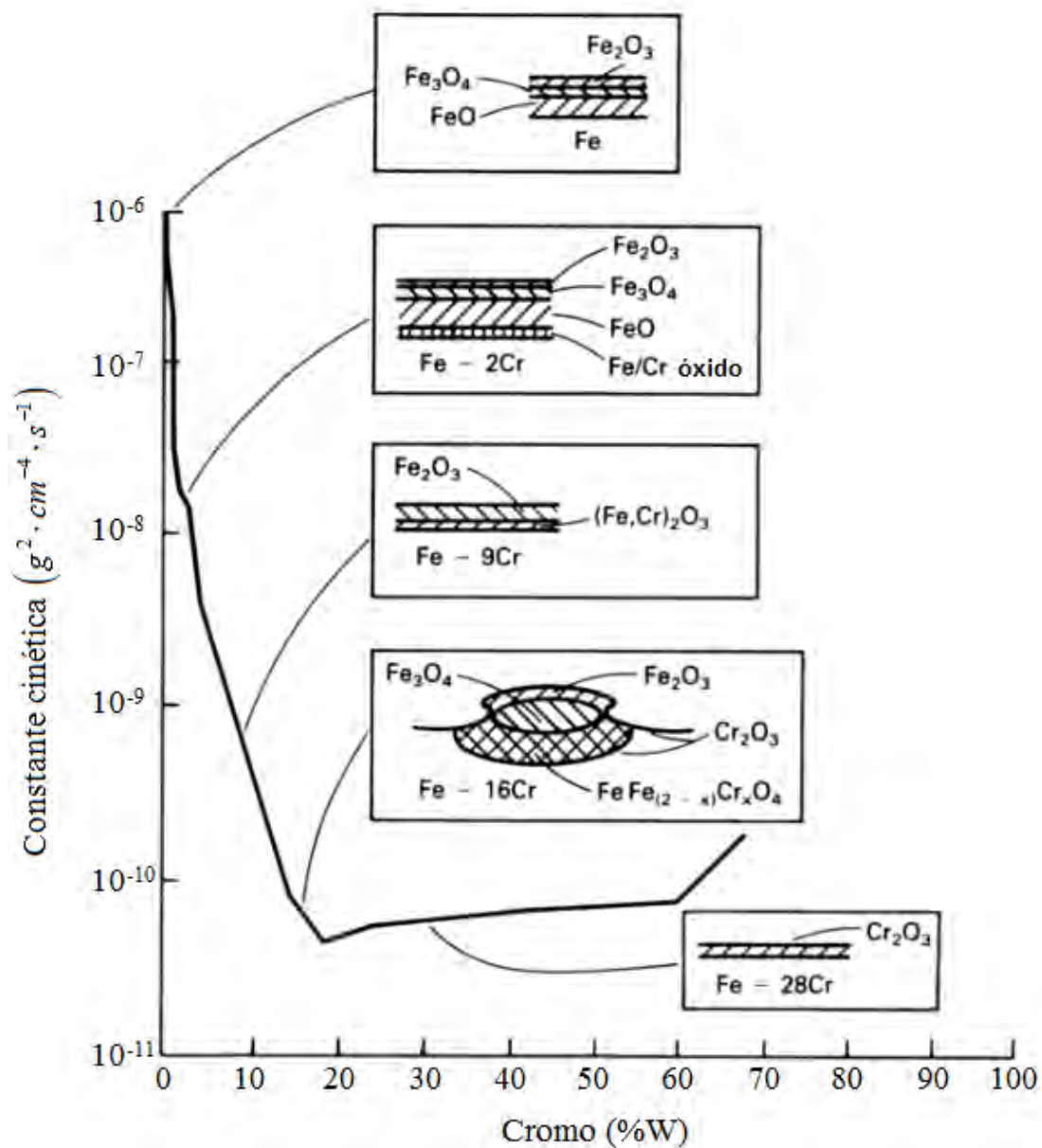


Figura 2.4: Variación de la velocidad de oxidación y de la composición de la cascarilla con el contenido de cromo [10].

2.2 Aspectos termodinámicos

Cuando un acero es sometido a altas temperaturas, este se oxida y el tipo de óxido que se forme dependerá de la reactividad del acero con la atmósfera en contacto.

Para predecir la ocurrencia de una reacción química a determinadas condiciones de presión y temperatura, se hace un análisis termodinámico, que además permite estudiar los cambios químicos de manera cuantitativa y cualitativa.

El criterio fundamental para evaluar una reacción química es el cambio de energía libre de Gibbs (ΔG). Para condiciones de presión y temperatura constantes, ΔG es descrito por la Segunda Ley de la Termodinámica:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde: ΔH : Variación de la entalpía.

T : Temperatura absoluta.

ΔS : Variación de la entropía.

Para una reacción química, el criterio de espontaneidad está definido por el valor de ΔG , esto es si $\Delta G < 0$.

Además, el cambio de la energía libre (ΔG) puede expresarse en términos del cambio de la energía libre estándar (ΔG°), esto es:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln(K) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde: ΔG° : Variación de la energía libre a condiciones estándar.
 R : Constante universal para gases ideales (8.314 J/mol.K).
 K : Constante de equilibrio.

La constante de equilibrio se representa mediante la siguiente relación:

$$K = \left[\frac{a_{prod.}}{a_{reac.}} \right] \quad (\text{Ec. 2.3})$$

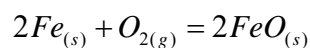
donde: $a_{prod.}$: Actividades de los productos, elevados a sus respectivos coeficientes estequiométricos.

$a_{reac.}$: Actividades de los reactantes, elevados a sus respectivos coeficientes estequiométricos.

Entonces, reemplazando la Ec. 2.3 en la Ec 2.2, se tiene:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \left[\frac{a_{prod.}}{a_{reac.}} \right] \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Bajo este contexto, por ejemplo, la formación de la wustita a partir de la oxidación del hierro puro considerando un mol de oxígeno, se expresa como:



Haciendo el reemplazo en la Ec. 2.4 se tiene:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \left[\frac{(a_{FeO_{(s)}})^2}{(a_{Fe_{(s)}})^2 (a_{O_{2(g)}})} \right] \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Para el ejemplo termodinámico, considerando el estado de equilibrio ($\Delta G = 0$) y se asume que en los sólidos puros (metal y óxido) se cumple que $a_{Fe(s)} \approx a_{FeO(s)} \approx 1$, mientras que para los gases (oxígeno) se cumple que su actividad es aproximadamente igual a la presión parcial ($a_{O_2} \approx p_{O_2}$). Entonces, reemplazando en la Ec. 2.5 se tiene:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln \left[\frac{(1)^2}{(1)^2 (p_{O_2})} \right]$$

$$\Delta G^\circ = RT \ln(p_{O_2}^{eq}) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde: p_{O_2} : Presión parcial del oxígeno (atm.).

$p_{O_2}^{eq}$: Presión parcial del oxígeno en el equilibrio (atm.).

Según la Ec 2.6, las condiciones termodinámicas para la formación de la wustita pueden estudiarse convenientemente en función a su presión parcial de oxígeno. Modificando la Ec. 2.4 se tiene.

$$\Delta G = RT \ln(p_{O_2}^{eq}) - RT \ln(p_{O_2}) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

De estas ecuaciones se puede observar que modificando las presiones parciales de oxígeno, se puede conseguir la estabilidad del óxido a determinada temperatura.

La **figura 2.5** muestra el diagrama de fases binario para el sistema Fe – O; mediante este gráfico se puede analizar de manera sencilla la estabilidad de los óxidos de hierro en función de la temperatura y a presión constante (1 atm.).

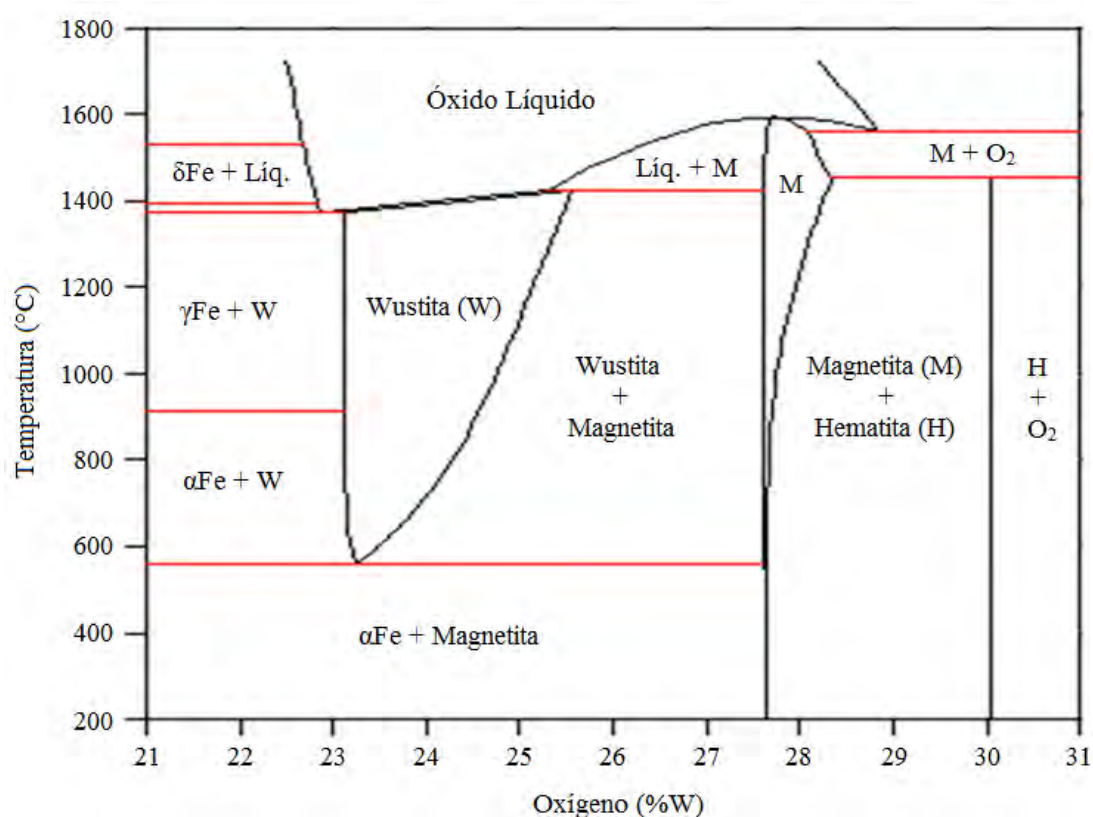


Figura 2.5: Diagrama de estabilidad para el sistema Fe – O [Elaboración Propia].

Se puede observar que a 570 °C se encuentra el punto más bajo en el cual es estable la wustita; además, a esta temperatura se forma un eutectoide hierro – magnetita – wustita.

Se puede apreciar también que por debajo de 570 °C la cascarilla estaría compuesta por magnetita y hematita, siendo la magnetita la capa de mayor espesor.

Por encima de 570 °C, la cascarilla estaría compuesta por los tres óxidos, siendo la wustita la capa de mayor espesor [10].

2.2.1. Diagramas de Ellingham – Richardson

Según la Ec 2.1, la energía libre estándar ΔG° se expresa mediante la siguiente expresión lineal:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Ellingham, H. J. T. [11] graficó esta ecuación para la formación de una serie de compuestos metálicos en un rango de temperaturas en el cual no se producían cambios de estado.

Para los óxidos metálicos, estos diagramas son una representación gráfica de las energías de formación estándar de Gibbs, por mol de oxígeno O_2 , en función de la temperatura. Ofrecen de manera simple un método reconocido para presentar información termodinámica, permitiéndonos predecir la posibilidad de reducir un óxido por desplazamiento con otro metal o sin necesidad de calentarlo hasta que el óxido se vuelva inestable.

Las escalas auxiliares en la parte superior, derecha e inferior del gráfico, fueron elaboradas por Richardson y se utilizan para determinar las condiciones en las que un metal se oxida debido al O_2 puro ó a una mezcla gaseosa (CO/CO_2 , H_2/H_2O).

La **figura 2.6** muestra el diagrama de Ellingham – Richardson para algunos óxidos importantes.

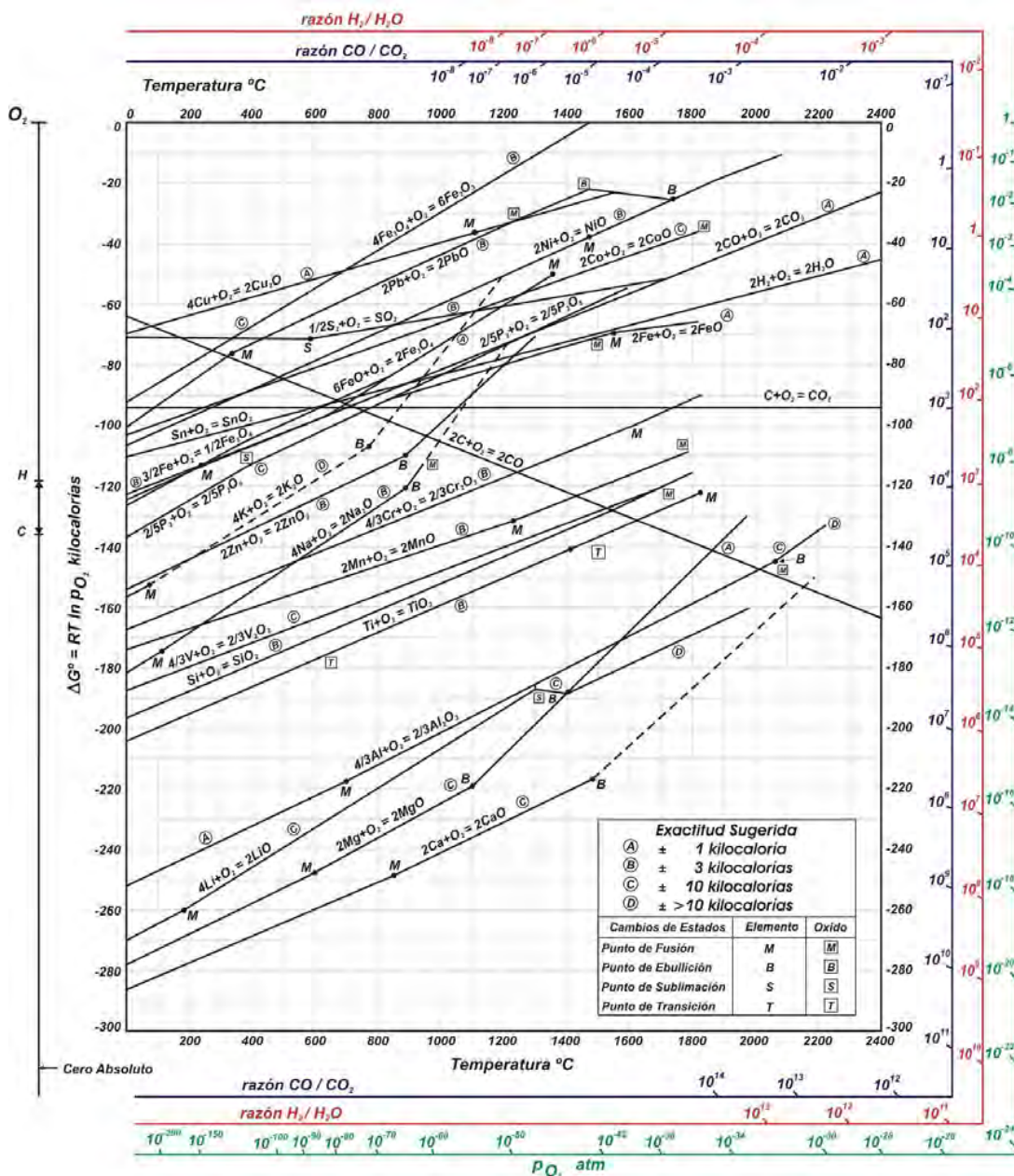


Figura 2.6: Diagrama de Ellingham–Richardson para algunos óxidos [11].

En la presente tesis, se elaboró un diagrama de Ellingham para los óxidos de hierro que se forman en los aceros con bajo contenido de carbono, como el que se muestra en la **figura 2.7**, con el fin de estudiar las fases que se forman a altas temperaturas.

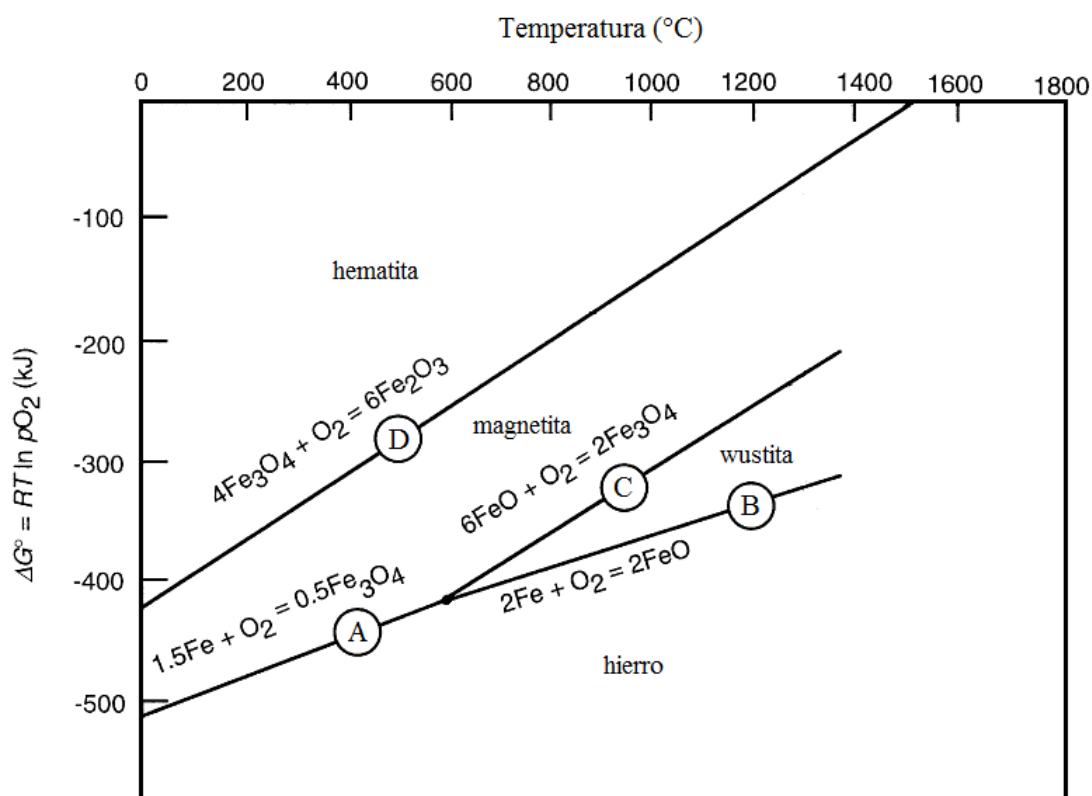


Figura 2.7: Diagrama de Ellingham para los óxidos de hierro [Elaboración Propia].

De la **figura 2.7** se tiene que:

- La recta A es el límite de estabilidad entre las fases hierro y magnetita.
- La recta B es el límite de estabilidad entre las fases hierro y wustita.
- La recta C es el límite de estabilidad entre las fases wustita y magnetita.
- La recta D es el límite de estabilidad entre las fases magnetita y hematita.

Se observa también que las rectas A, B y C se intersectan en un punto que corresponde a $T = 570\text{ °C}$, y a $p(\text{O}_2) = 9 \times 10^{-27}\text{ atm}$. En este punto, como se observó en la **figura 2.5**, se forma un eutectoide hierro-wustita-magnetita.

En la **tabla 2.2** se muestran las presiones parciales de oxígeno en el equilibrio para los tres tipos de óxidos de hierro a diferentes temperaturas.

Tabla 2.2: Presiones parciales de O_2 en el equilibrio a diferentes temperaturas [12].

Fases	Presiones parciales de oxígeno en el equilibrio (atm.)					
	600 °C	950 °C	1100 °C	1200 °C	1300 °C	1400 °C
$\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_3\text{O}_4$	$5.1 \cdot 10^{-14}$	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$5.2 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-1}$
$\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{FeO}$	$1.4 \cdot 10^{-25}$	$1.4 \cdot 10^{-14}$	$2.01 \cdot 10^{-11}$	$8.4 \cdot 10^{-10}$	$2.2 \cdot 10^{-8}$	$3.7 \cdot 10^{-7}$
$\text{FeO} - \text{Fe}$	$1.2 \cdot 10^{-26}$	$1.4 \cdot 10^{-14}$	$6.01 \cdot 10^{-14}$	$1.3 \cdot 10^{-12}$	$2.0 \cdot 10^{-11}$	$2.1 \cdot 10^{-10}$

2.3 Aspectos cinéticos

En la práctica, los óxidos termodinámicamente inestables se pueden formar durante la oxidación a altas temperaturas, y permanecer como tales a bajas temperaturas. Un ejemplo es la wustita, que solo es estable a temperaturas superiores a 570 °C; después de un enfriamiento rápido a la temperatura ambiente (25 °C), la wustita se mantiene en la cascarilla, debido a que posee una cinética de descomposición extremadamente lenta.

Los datos cinéticos son una prueba directa de la medida de la velocidad de oxidación como función de la temperatura y composición de la aleación.

La **figura 2.8** muestra el efecto del tiempo en la oxidación de un acero 1.25 Cr – 0.5 Mo en aire a 600 °C.

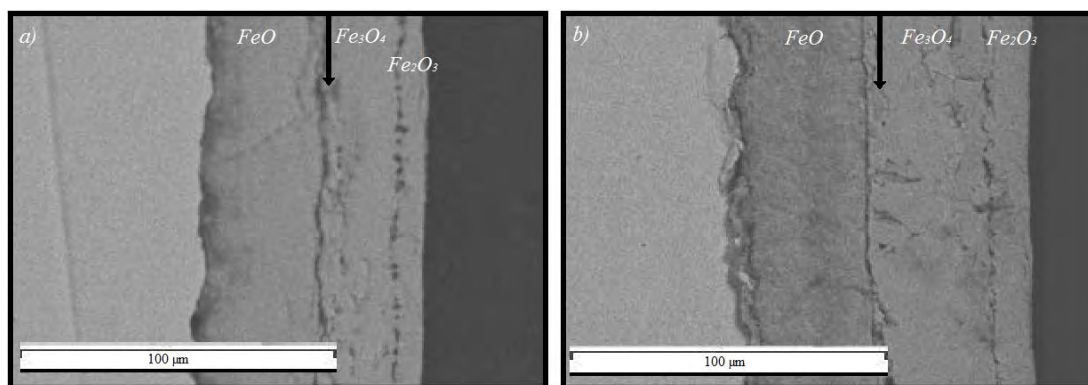


Figura 2.8: Sección transversal de un acero 1.25 Cr – 0.5 Mo en aire a 600 °C. a) 20 horas, b) 40 horas. Las flechas indican la posición de la superficie original [13].

Existen muchos fenómenos que intervienen en la velocidad de formación de los óxidos; en la presente tesis se estudiaron dos de ellos: La **difusión del oxígeno** y los **mecanismos de oxidación**.

2.3.1 Difusión del oxígeno

Las altas temperaturas de trabajo a la que son sometidos los aceros favorecen la difusión del oxígeno para formar la cascarilla. Para explicar este fenómeno se emplean las leyes de Fick.

La primera ley de Fick establece que un sistema binario a temperatura y presión constante, con un movimiento de átomos en una sola dirección, es la situación más común de la difusión a través de un óxido que crece sobre un metal puro [14]. Esta ley establece que la velocidad de transferencia de masa es proporcional al gradiente de concentración:

$$J = -D \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde: J : Flujo

D : Coeficiente de difusión.

$\frac{\partial C}{\partial x}$: Gradiente de concentración.

Para la difusión del oxígeno dentro del metal, la concentración de oxígeno cambia con el tiempo; la segunda ley de Fick describe este funcionamiento:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

La Ec. 2.11 se resuelve para la geometría particular y las condiciones de frontera implícita en el sistema que se requiera analizar. Asumiendo que los átomos de oxígeno difunden en una superficie plana con un valor de “ D ” y una concentración interfacial constantes, la concentración de oxígeno a cualquier distancia “ x ” de la superficie del metal se puede expresar como:

$$\frac{C_M - C_x}{C_M - C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

donde: C_M : Concentración de oxígeno en la interfase metal/óxido.
 C_x : Concentración a un tiempo “ t ” y a una distancia “ x ”.
 C_0 : Concentración inicial a cualquier distancia “ x ” para $t = 0$.

En el inicio de la oxidación C_M y C_0 son constantes por lo que para cualquier valor fijo de C_x , la ecuación se reduce a que “ x ” sea proporcional a la raíz cuadrada del tiempo ($x \propto \sqrt{t}$). La **figura 2.9** muestra la variación de “ C_x ” con “ x ” para la difusión en estado no estacionario.

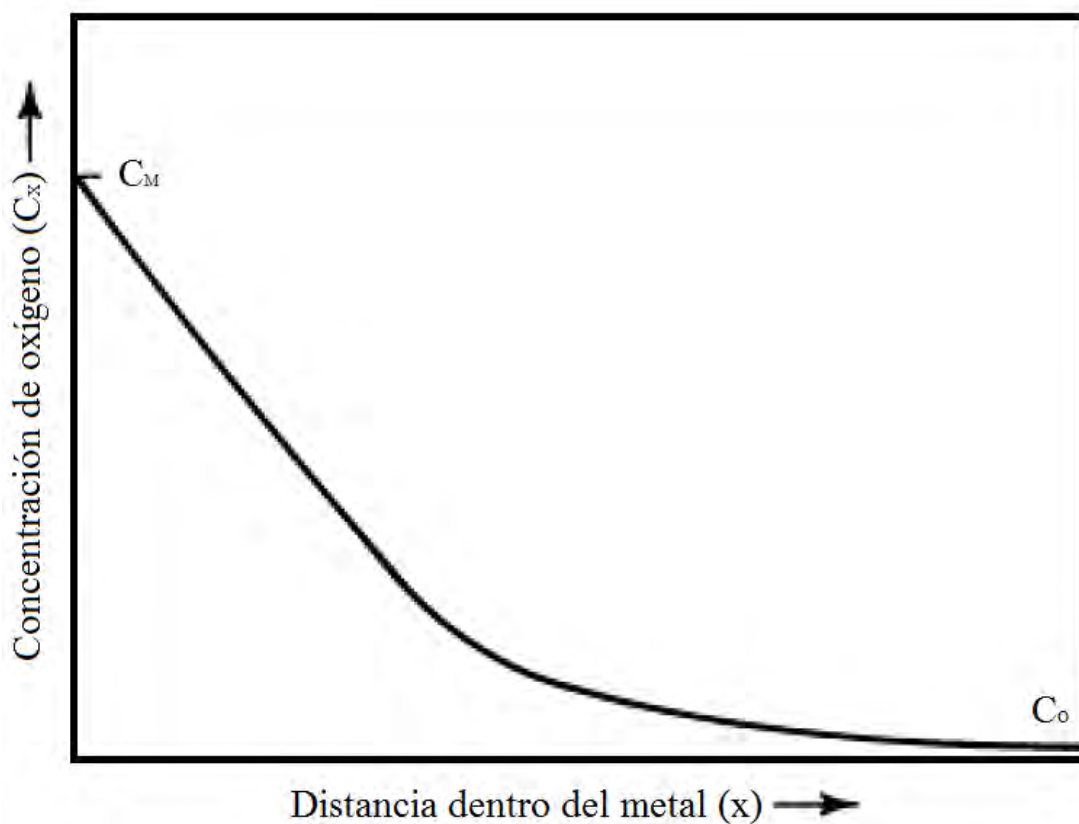


Figura 2.9: Difusión en estado no estacionario [14].

El coeficiente de difusión es afectado considerablemente por la temperatura, ya que “ D ” se incrementa exponencialmente de acuerdo a la Ecuación de Arrhenius:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde: D_0 : Factor de frecuencia.

Q : Energía de activación para la difusión.

R : Constante de los gases.

T : Temperatura absoluta.

Altos valores de “ Q ” significan que el proceso de difusión ocurrirá más rápido, en la **tabla 2.3** se muestran los principales factores de frecuencia “ D_0 ” así como las energías de activación para la difusión del oxígeno y del hierro [14].

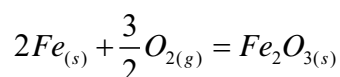
Tabla 2.3: Valores de “ D_0 ” y “ Q ” para los óxidos de hierro [14].

Óxido metálico	Temperatura (°C)	D_0 (cm ² ·s ⁻¹)	Q (KJ·mol ⁻¹)
O ₂ en Fe ₂ O ₃	1150 – 1250	10 ¹¹	610
Fe en Fe ₃ O ₄	750 – 1000	5.2	230
Fe en FeO	690 – 1010	0.014	126.4

2.3.2 Mecanismos de oxidación

Los primeros estudios cinéticos relacionaron el tipo de óxido que se forma con el carácter protector que ofrece a la superficie metálica, apoyándose también por la difusión los iones y las condiciones atmosféricas bajo las cuales están expuestos.

Uno de estos estudios se remonta al año 1923, cuando Pilling, N.B. & Bedworth, R.E. [15] clasificaron los óxidos metálicos en dos grupos: los que forman una cascarilla protectora y los que no lo hacen. Ellos sugirieron que las cascarillas no protectoras se forman generalmente cuando el volumen de la capa de óxido es menor que el volumen del metal que reacciona. Por ejemplo, en la oxidación del hierro:



La relación Pilling – Bedworth es la siguiente:

$$PB = \frac{\text{Volumen de un mol de } Fe_2O_3}{\text{Volumen de dos moles de } Fe} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

De aquí se desprenden tres posibilidades:

- Si $PB < 1$, la cascarilla es no protectora. Esta cascarilla se caracteriza por ser porosa, por lo que no constituye un obstáculo eficaz para proteger del oxígeno a la superficie metálica.
- Si $1 < PB < 2$, la cascarilla es protectora. La oxidación puede realizarse únicamente por difusión en estado sólido, que es lenta incluso a altas temperaturas.
- Si $PB > 2$, la cascarilla es no protectora. Durante el crecimiento de la cascarilla se desarrollan esfuerzos que, en muchos casos, provocan que se agriete y rompa, dejando el metal sin protección.

En la **tabla 2.2** se muestran las relaciones PB para los óxidos de hierro estudiados en esta tesis.

Tabla 2.4: Relaciones PB para óxidos de hierro estudiados [15].

Óxido	Estructura	V_M	PB	Comentario	Carácter
Wustita	Halita	12.6	1.78	sobre hierro α	protector
Hematita	Corindón	30.5	2.15	sobre hierro α	no protector
			1.02	sobre magnetita	protector
Magnetita	Espinela	44.7	2.10	sobre hierro α	no protector
			1.02	sobre wustita	protector

Excepciones a la clasificación Pilling – Bedworth son numerosas, ya que actualmente se sabe que no solo la difusión del oxígeno a través de la cascarilla influye en la velocidad de oxidación. A pesar de ello, esta relación describe muy bien las características de la cascarilla formada en los aceros.

Para predecir la velocidad y el carácter protector de los óxidos formados, se emplean curvas esquemáticas que relacionan el aumento de peso (debido al óxido generado) con el tiempo. El análisis isotérmico puede hacerse según los siguientes modelos matemáticos:

a) Modelo de oxidación lineal:

Si la superficie metálica no está protegida por una capa de óxido, entonces la velocidad de oxidación generalmente permanece constante con el tiempo. En tal caso, los procesos en la superficie controlan la velocidad de reacción. Esta situación se produce en muchos casos cuando se forma un óxido poroso y no protector sobre el metal, cuando el óxido es volátil o cuando la cascarilla se rompe debido a las tensiones internas.

La velocidad de oxidación lineal se representa como:

$$W = k_l \cdot t \quad (\text{Ec. 2.15})$$

donde: W : Masa del óxido formado por unidad de área.

k_l : Constante lineal.

t : Tiempo.

Bajo este contexto, la tasa de oxidación nunca decae, y después de un corto tiempo a elevadas temperaturas, el metal estará completamente oxidado.

b) Modelo de oxidación logarítmica.

A bajas temperaturas, cuando se forma una capa delgada de cascarilla, la velocidad de oxidación se inhibe. Entonces, los procesos de transporte a través de la cascarilla controlan la velocidad del proceso, por lo que la cinética de oxidación es descrita por una función logarítmica, que tiene la forma:

$$W = k_e \log(at + 1) \quad (\text{Ec. 2.16})$$

donde: k_l : Constante logarítmica.

a : Constante de ajuste.

Esta ecuación posee dos constantes que se pueden ajustar bastante bien a los datos. Los metales que se oxidan siguiendo esta cinética, alcanzan un espesor prácticamente constante, por lo que aparentemente se detiene la oxidación.

c) *Velocidad de oxidación parabólica.*

Cuando la cascarilla formada sobre la superficie metálica aumenta su espesor, aumenta también la distancia de difusión y la tasa de oxidación disminuye. Entonces, la difusión de los iones a través de la cascarilla es la etapa controlante del proceso de oxidación, con el gradiente de potencial químico como fuerza impulsora. Se dice entonces que la cinética de oxidación es descrita por una función parabólica, que tiene la forma:

$$W^2 = k_p \cdot t \quad (\text{Ec. 2.17})$$

donde: k_p : Constante parabólica.

Estos modelos pueden generalizarse para todos los aceros, como se puede observar en la **figura 2.10**.

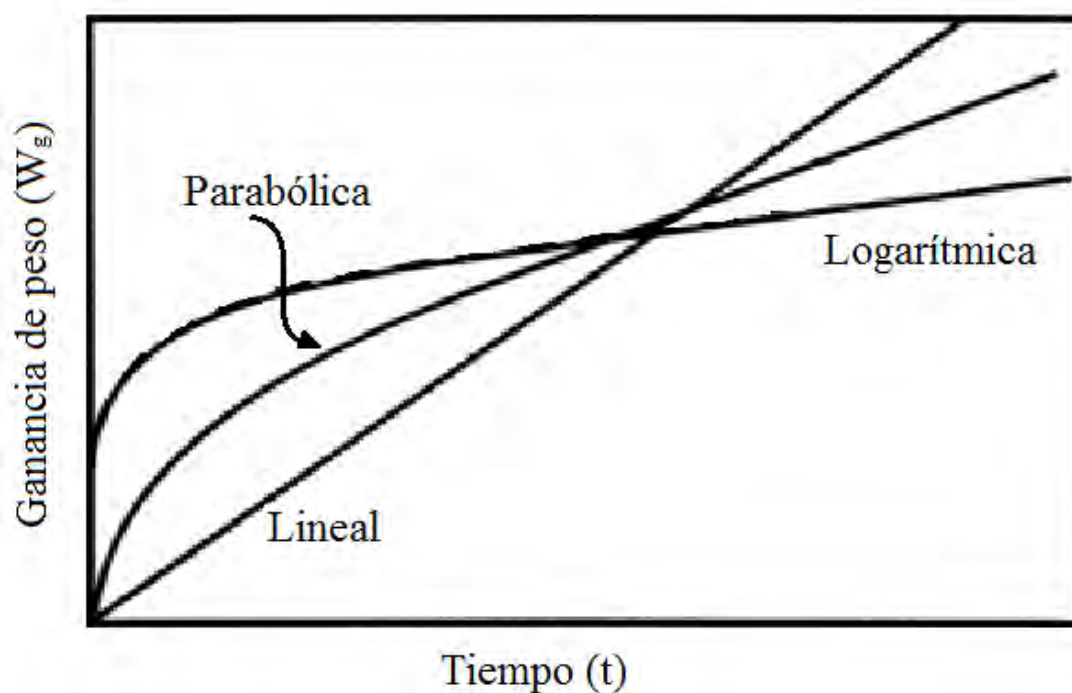


Figura 2.10: Modelos de oxidación para los aceros [14].

CAPÍTULO III

MARCO CONCEPTUAL DE LA SOLDADURA

3.1 Generalidades

La soldadura se define como la unión mecánicamente resistente de dos o más piezas metálicas. Metalúrgicamente, es un enlace metálico continuo (se generan redes cristalinas) con propiedades físicas y mecánicas similares a las partes unidas.

Las primeras manifestaciones de soldadura se remontan a los comienzos de la fabricación de armas, donde las partes metálicas a unir eran calentadas hasta alcanzar un estado plástico, para ser fácilmente deformadas por la acción de golpes sucesivos con un martillo. Luego de repetidas operaciones de calentamiento seguidos de un martilleo intenso, se lograba una unión satisfactoria. Este proceso es denominado forja y su práctica continuó casi sin sufrir cambio alguno, hasta hace alrededor de un siglo, cuando la invención de los modernos procesos de soldadura dieron paso a medios más eficientes para unir piezas metálicas.

La primera en desarrollarse fue la soldadura por arco eléctrico, a la que le siguió la soldadura oxiacetilénica y posteriormente la soldadura por resistencia eléctrica. Estos procesos de soldadura se utilizaron para reparar partes dañadas o desgastadas.

La soldadura moderna, al igual que la soldadura antigua por forjado, logra la unión de los metales por fusión. Con el desarrollo de estas tecnologías de soldadura, se logró una fusión completa del metal, observándose que el área soldada tenía mayor resistencia que cualquiera de las piezas que se habían unido.

En la actualidad, existen diversos sistemas de normalización para los distintos tipos de soldadura moderna; entre ellos tenemos:

- La norma AWS – EE.UU.
- La norma DIN – Alemania.
- La norma JIS – Japón.
- La norma GOST – Rusia.
- La norma NTP – Perú, etc.

La norma técnica de mayor difusión y de empleo más generalizado es la establecida por la American Welding Society (AWS) con la que una marca en cada país establece las respectivas equivalencias de sus productos. Esta norma clasifica los procesos de soldadura como se muestra en la **figura 3.1**.

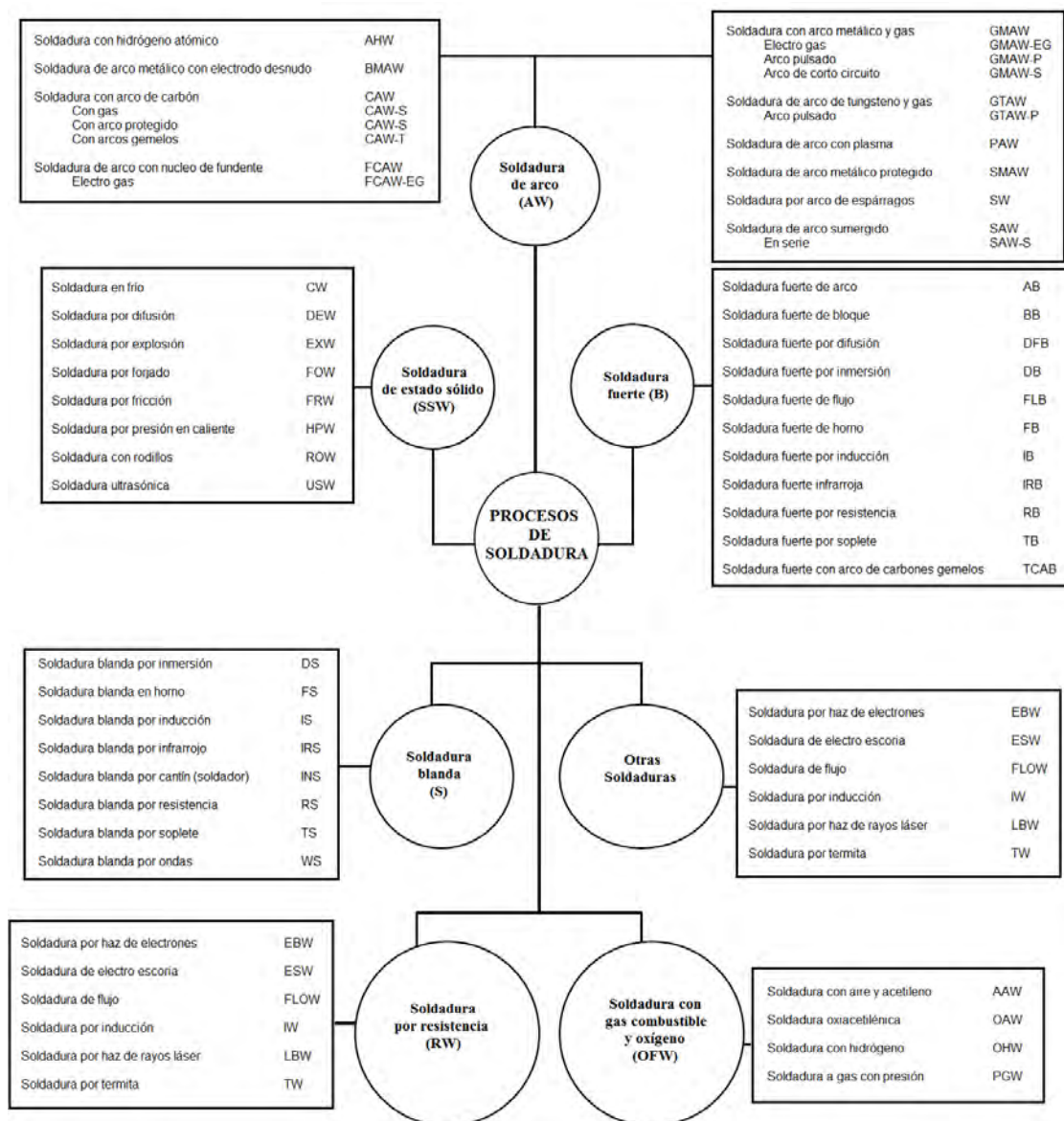


Figura 3.1: Diagrama maestro de los procesos de soldadura [16].

3.2 Soldadura por arco eléctrico

La soldadura por arco eléctrico es el proceso de más amplia aceptación a nivel mundial, ya que es el proceso más económico, natural y práctico para unir metales. En esta soldadura, la unión es producida por el calor generado por un arco eléctrico; la energía eléctrica se transforma en energía térmica, alcanzando temperaturas de aproximadamente 5000 °C en el centro [17].

El arco eléctrico se genera estableciendo un circuito eléctrico entre el material base y una varilla metálica, denominada electrodo, ambos conectados a una fuente de energía eléctrica. En la mayoría de los procesos de soldadura por arco, dicha fuente de energía es una máquina de soldar, la cual es conectada a una línea de tensión.

Los orígenes de este proceso se remontan al año 1801, cuando Sir Humphry Davy desarrolló por primera vez un arco eléctrico mediante la transmisión de una corriente eléctrica a través de dos varillas de carbono separadas a corta distancia.

De manera independiente, en 1802, el científico ruso Vasily Vladimirovich Petrov descubrió el efecto de arco eléctrico, gracias a que construyó la pila voltaica más grande y poderosa del mundo en esa época, que consistía en alrededor de 4200 discos de cobre y zinc. En su trabajo publicado en 1803, propuso el uso del arco eléctrico en la soldadura.

Sin embargo, no es hasta el año 1881 en que la soldadura por arco llega a ser desarrollado con el objetivo de uso industrial. En ese año, durante "**La Primera Exposición Eléctrica Mundial**" en París, el ruso Benardos, N. [18] presentó un método para la soldadura por arco que consistió en producir un arco eléctrico entre un electrodo de carbono y la pieza de trabajo. El material de aporte en forma de alambre era alimentado hacia el arco eléctrico, en donde se fundía producto del intenso calor.

A partir de entonces, junto a su amigo Stanislav Olszewski, gestionaron para obtener una patente en varios países entre 1885 y 1887. La patente mostró un prototipo de porta – electrodo, como se observa en la **figura 3.2**.

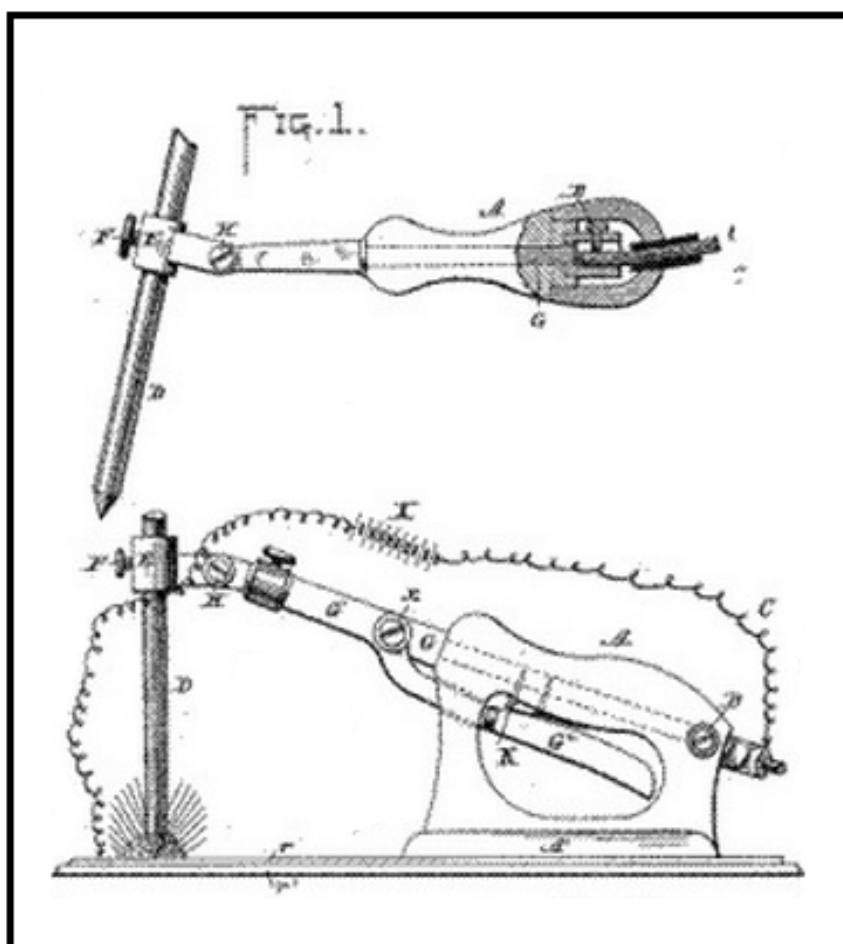


Figura 3.2: Proceso de soldadura por arco eléctrico creado por Bernardos, N. [18].

Seguidamente en 1890, un compatriota de Benardos, Nicolay Slavianoff, desarrolló aún más el método y obtuvo una patente por el uso de una varilla de metal como electrodo en lugar de carbono. El electrodo metálico funcionaba como generador del arco eléctrico y como metal de aporte. Sin embargo, la soldadura no estaba protegida del aire, por lo tanto se presentaron problemas posteriores en la calidad.

Es así, que el sueco Kjellberg, O. [19], fundador de la empresa ESAB en 1904, cuando utiliza este método para la reparación de calderas de vapor en los

buques, se dio cuenta de que la unión soldada estaba llena de poros y aberturas pequeñas, haciéndose imposible conseguir una soldadura hermética.

Tratando de mejorar el método inventó el electrodo revestido que se observa en la **figura 3.3**, que consistía en una varilla metálica sumergida en una mezcla de carbonatos, silicatos y óxidos pulverizados, con agua pura. Este revestimiento se caracterizaba por no ser ni conductor eléctrico ni combustible y cumplía la función de aumentar la estabilidad del arco y excluir el oxígeno en la soldadura, evitando cualquier reacción química y mejorando las propiedades mecánicas.

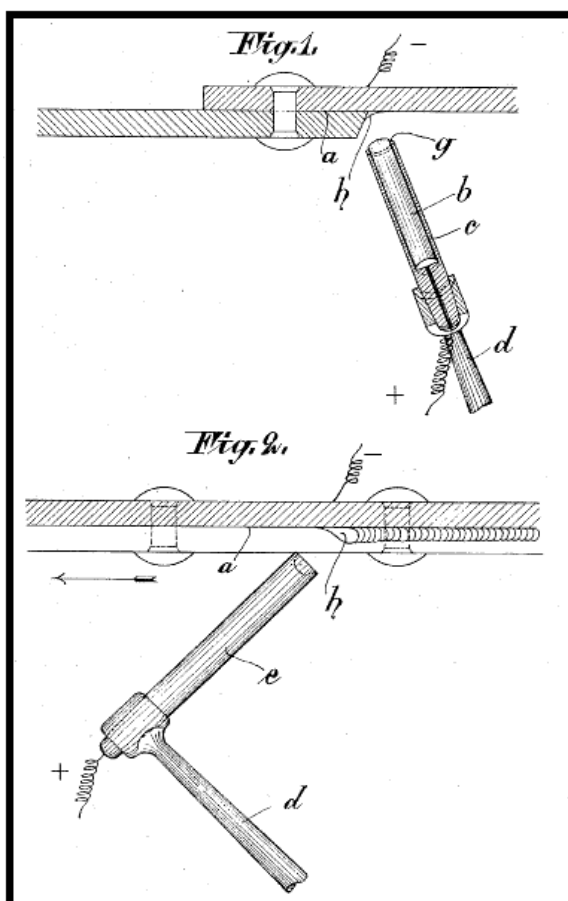


Figura 3.3: Proceso de soldadura por arco eléctrico creado por Kjellberg, O. [19].

Con la invención del electrodo revestido, se dio inicio a una carrera por mejorar la calidad de los procesos de soldadura eléctrica con el fin de obtener óptimos resultados en diversas aplicaciones industriales.

3.3 Proceso de Soldadura SMAW

Este proceso de soldadura, conocido como proceso SMAW por sus siglas en inglés (Shielded Metal Arc Welding), por muchos años ha sido una de las técnicas más comúnmente aplicadas en la fabricación de estructuras de acero. Es ampliamente utilizado 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 [16].

Esta soldadura emplea el calor generado por el arco eléctrico para llevar la pieza de trabajo y un electrodo consumible al estado de fusión. El circuito eléctrico se establece ordinariamente como se muestra en la **figura 3.4**.

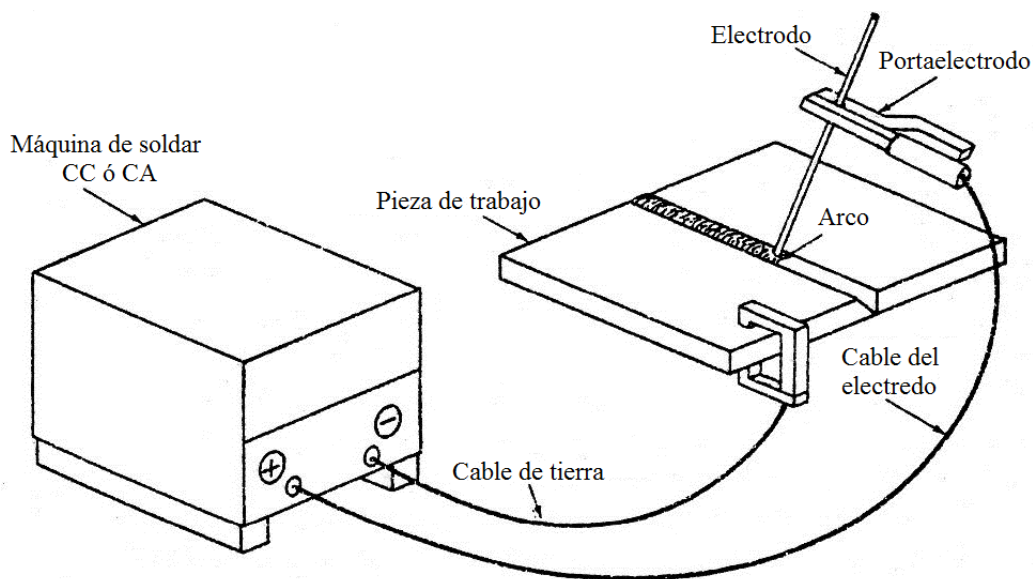


Figura 3.4: Disposición de los elementos básicos para el proceso SMAW [17].

El encendido del arco eléctrico se inicia al raspar la punta del electrodo sobre la pieza de trabajo; este raspado, en presencia de una diferencia de voltaje, genera un cortocircuito entre ambos y se produce, al paso de la corriente, el calentamiento por efecto Joule de la punta del electrodo y de la pieza de trabajo, que permite la emisión electrónica y la aparición de un flujo de electrones.

El calor producido por el arco eléctrico funde tanto a la pieza de trabajo como a la punta del electrodo. El electrodo fundido en forma de gotas es proyectado por la fuerza del arco al cráter, donde se solidifica formando el cordón de soldadura cubierto por una capa de escoria, que protege al cordón de soldadura y contribuye a desulfurar y desfosforar al metal depositado, elevando sus propiedades mecánicas.

Además, producto de las altas temperaturas alcanzadas, otros componentes del revestimiento se descomponen en gases ionizados, generando una atmósfera gaseosa que estabiliza y protege el arco eléctrico, así como también evita el ingreso del oxígeno y otros gases reactivos al cordón de soldadura. La **figura 3.5** muestra la fusión del electrodo y los fenómenos que se originan.

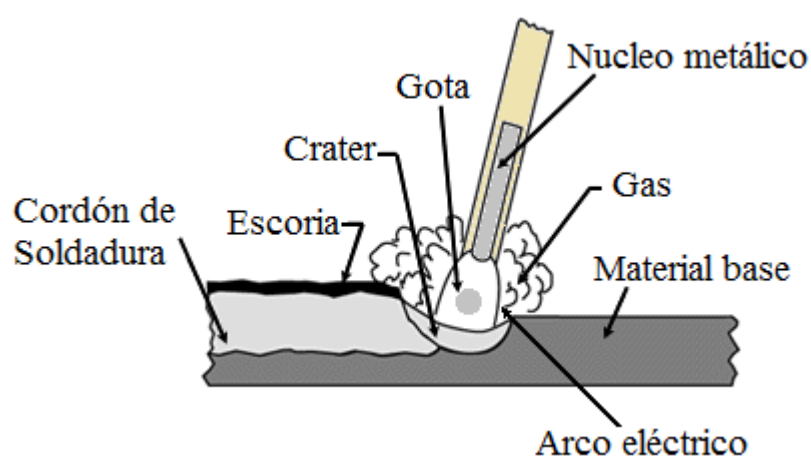


Figura 3.5: Fusión del electrodo revestido [16].

3.3.1 El electrodo revestido

El material de aporte que se usa en este proceso se conoce como electrodo revestido y está constituido por **varilla metálica** o alma, recubierta con un **revestimiento** concéntrico de fundente (flujo) extruido y seco. La **figura 3.6** muestra el electrodo revestido y sus componentes.

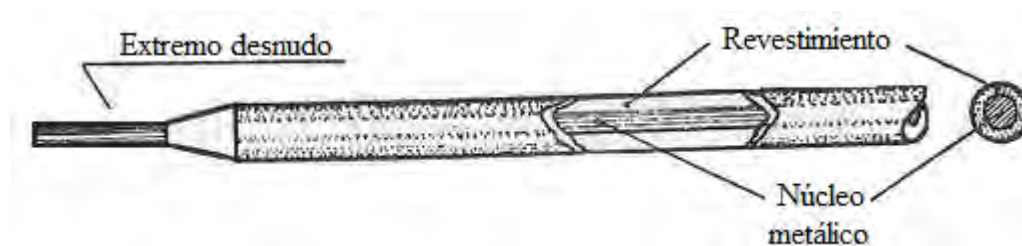


Figura 3.6: muestra el electrodo revestido y sus componentes [17].

La varilla metálica se obtiene a partir de alambión de 6 a 8 mm de diámetro, que la industria siderúrgica suministra en rollos o boninas. Es necesario aplicarle un decapado mecánico para eliminar el óxido adherido, en caso de haber rastros de óxido remanente, se emplea un decapado químico.

Posteriormente el alambión pasa a las cajas de trefilado, donde tiene lugar la reducción progresiva de diámetro hasta 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 5.0 y 6.0 mm según sea el requerimiento. Se utilizan sustancias lubricantes, como jabones, para facilitar esta operación y evitar un endurecimiento del alambre.

Finalmente una máquina endereza y corta el alambión, obteniéndose las varillas que son almacenadas hasta la fabricación del electrodo.

El revestimiento de fundente o flujo es elaborado con una mezcla de materiales y minerales que cumplen diversas funciones en el proceso. Según la AWS, los constituyentes típicos y sus funciones en los electrodos revestidos se muestran en la **tabla 3.1**.

Tabla 3.1: Constituyentes típicos y sus principales funciones [20].

Constituyente	Función del Constituyente	
	Primaria	Secundaria
Celulosa	Protección gaseosa	-
Calcita	Protección gaseosa	Fundente
Fluorita	Formador de escoria	Fundente
Dolomita	Protección gaseosa	Fundente
Rutilo	Formador de escoria	Estabilizador del arco
Titanato de potasio	Estabilizador del arco	Formador de escoria
Feldespató	Formador de escoria	Estabilizador del arco
Mica	Facilitar la extrusión	Estabilizador del arco
Arcilla	Facilitar la extrusión	Formador de escoria
Cuarzo	Formador de escoria	-
Asbesto	Formador de escoria	Facilitar la extrusión
Óxido de manganeso	Formador de escoria	Aleante
Óxido de hierro	Formador de escoria	-
Hierro en polvo	Fluidez de escoria	Rendimiento
Ferrosilicio	Desoxidante	-
Ferromanganeso	Aleante	Desoxidante
Silicato de sodio	Aglutinante	Fundente
Silicato de potasio	Estabilizador del arco	Aglutinante

La complejidad de los revestimientos es tal que pequeñas modificaciones de componentes pueden imprimir apreciables variaciones en la calidad de la unión soldada; por ello, se vienen realizando constantes investigaciones sobre el desarrollo, perfeccionamiento y desempeño de estos tipos de consumibles.

La selección, origen y dosificación de cada componente que va a intervenir en la composición del revestimiento es un secreto celosamente guardado por el fabricante.

Mediante esta formulación, el revestimiento cumple funciones indispensables y decisivas en la ejecución y calidad de la soldadura; estas funciones se pueden clasificar en [21]:

a) Eléctricas:

Permite el empleo de la corriente alterna, la cual cambia de polaridad 120 veces por segundo, creando una gran inestabilidad en el arco eléctrico; es por ello que se agregan algunos componentes (rutilo, feldespatos, etc.) al revestimiento que, al quemarse en el arco, producen una atmósfera de gases especiales ionizados que mantienen la continuidad del arco.

Facilita el cebado de arco, pues en general las sustancias que se descomponen produciendo gases fácilmente disociables exigen tensiones de cebado más elevadas, debido al calor absorbido en la disociación (proceso endotérmico). Con corriente alterna, se necesitan tensiones de encendido más altas. Los silicatos, carbonatos, óxidos de Fe, óxidos de Ti, favorecen el encendido y el mantenimiento del arco.

Estabiliza el arco, que depende entre otros factores, del estado de ionización de los gases comprendidos entre el ánodo y el cátodo. Para un arco en corriente alterna es imprescindible un medio fuertemente ionizado. Por este motivo se añaden al revestimiento sales de sodio y de potasio.

b) Metalúrgicas:

Formar la escoria protectora; ciertos componentes se funden y mezclan con las gotas de metal y van recogiendo las impurezas, haciéndolas flotar en la superficie, protegiendo al cordón de soldadura.

Retardar el enfriamiento brusco del metal fundido, para que no llegue a templarse por el contacto violento con el aire frío.

Reducir el número de inclusiones en la soldadura, al eliminar un gran número de impurezas.

Aislar el cráter de soldadura de elementos con los que tiene gran afinidad como oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, con los gases protectores que se producen, a fin de minimizar porosidades.

c) Mecánicas:

El revestimiento tiende a fundirse inmediatamente después que el núcleo metálico, formando una concavidad, de tal forma que el revestimiento permita dirigir la fuerza del arco y las gotas del metal fundido en la dirección deseada, siendo de gran utilidad para soldar en diferentes posiciones.

Además, permite el depósito de cordones arrastrando el electrodo, ya que en muchos casos el revestimiento que sobresale del electrodo, establece contacto con la pieza de trabajo a una separación adecuada, permitiendo que el arco arda dentro de la concavidad

La **figura 3.7** muestra algunas funciones que cumplen los electrodos revestidos y sus ventajas sobre los electrodos desnudos.

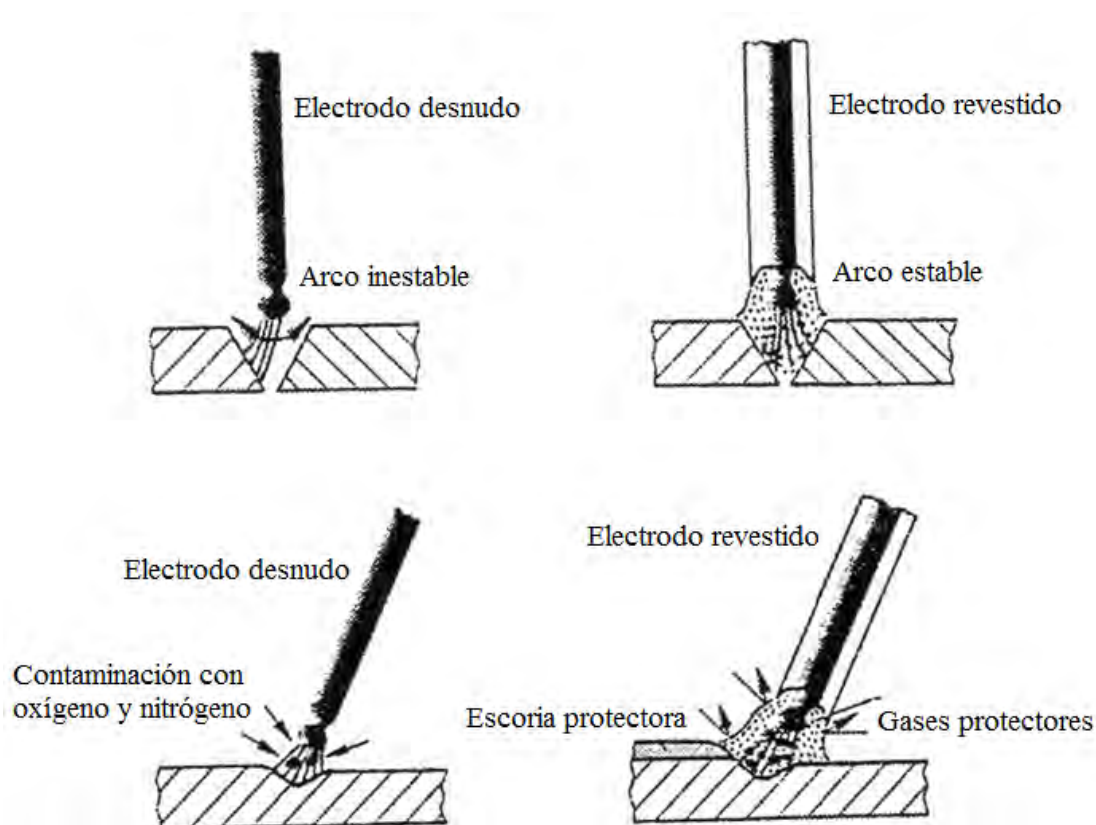


Figura 3.7: muestra algunas funciones que cumplen los electrodos revestidos [22].

Cabe recalcar, que un número importantes de trabajos reportados [23, 25] presentan su enfoque con la intención de emplear un mayor número de materias primas en la fabricación de los electrodos, mejorando incluso la calidad y eficiencia de éstos.

Por otra parte, algunos autores [26, 27] han estudiado el efecto de componentes minerales y adiciones metálicas sobre el comportamiento de la estabilidad del arco, y otros reportan este efecto sobre los procesos de oxidación-reducción [24, 28].

3.4 Clasificación de los electrodos revestidos

La clasificación de los electrodos es realizada principalmente teniendo como base las propiedades mecánicas del metal aportado, la posición de soldeo, el tipo de revestimiento y el tipo de corriente. La norma AWS establece para el caso de los aceros, las siguientes especificaciones:

AWS SFA-5.1/SFA-5.1M: Electrodo revestido para aceros al carbono.

AWS SFA-5.4/SFA-5.4M: Electrodo revestido para aceros inoxidables.

AWS SFA-5.5/SFA-5.5M: Electrodo revestido para aceros de baja aleación.

Para la presente tesis, se empleó la especificación AWS SFA-5.1/SFA-5.1M [41], cuyas características se observan en la **figura 3.8**.

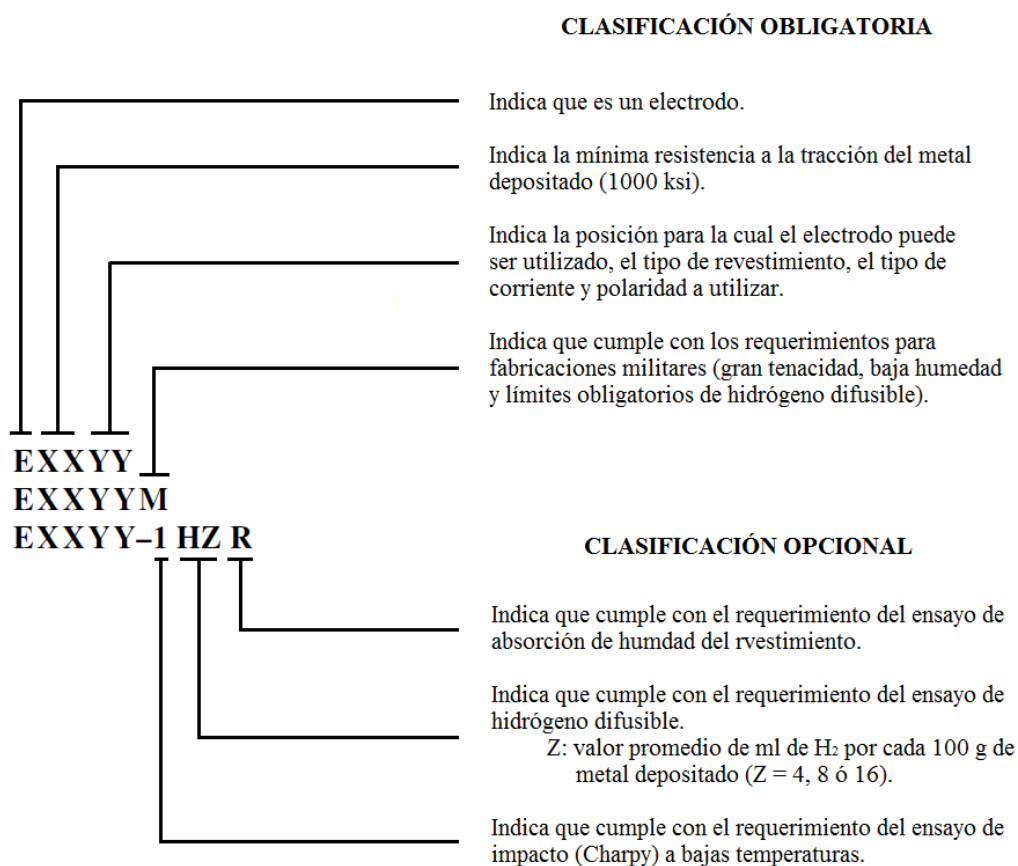


Figura 3.8: Clasificación obligatoria y opcional de los electrodos.

De acuerdo a esta clasificación, esta norma define 18 tipos de electrodos, cuyas características se observan en la **tabla 3.2**.

Tabla 3.2: Tipos de electrodos según la especificación AWS.

AWS	Revestimiento	Posición ⁽²⁾	Tipo de corriente	Penetración
E 6010	celulósico	F, V, OH, H	C.C. (+)	profunda
E 6011	celulósico	F, V, OH, H	C.A. ó C.C. (+)	profunda
E 6012	rutílico	F, V, OH, H	C.A. ó C.C. (-)	media
E 6013	rutílico	F, V, OH, H	C.A. ó C.C. (+/-)	poca
E 6018	básico (hp) ⁽¹⁾	F, V, OH, H	C.A. ó C.C. (+)	media
E 6019	rutíl – ácido	F, V, OH, H	C.A. ó C.C. (+/-)	media
E 6020	ácido	H-fillet, F	C.A. ó C.C. (+/-)	media
E 6022	ácido	H-fillet, F	C.A. ó C.C. (-)	media
E 6027	ácido (hp) ⁽¹⁾	H-fillet, F	C.A. ó C.C. (+/-)	alta
E 7014	rutílico (hp) ⁽¹⁾	F, V, OH, H	C.A. ó C.C. (+/-)	alta
E 7015	básico	F, V, OH, H	C.C. (+)	alta
E 7016	básico	F, V, OH, H	C.A. ó C.C. (+)	media
E 7018	básico (hp) ⁽¹⁾	F, V, OH, H	C.A. ó C.C. (+)	alta
E 7018M	básico (hp) ⁽¹⁾	F, V, OH, H	C.C. (+)	alta
E 7024	rutílico (hp) ⁽¹⁾	H-fillet, F	C.A. ó C.C. (+/-)	media
E 7027	Ácido (hp) ⁽¹⁾	H-fillet, F	C.A. ó C.C. (+/-)	alta
E 7028	básico (hp) ⁽¹⁾	H-fillet, F	C.A. ó C.C. (+)	media
E 7048	básico (hp) ⁽¹⁾	F, V, OH, H	C.A. ó C.C. (+)	media

(1) hp = polvo de hierro.

(2) F = plano; V = vertical; H = horizontal; H-fillet = horizontal en filete; OH = sobrecabeza.

3.4.1 Tipos de revestimiento

De acuerdo con la composición del revestimiento podemos diferenciar los siguientes tipos de electrodos revestidos:

a) Revestimiento ácido: Estos electrodos son de buena operatividad tanto en corriente alternada como en continua y en esta última preferentemente con polaridad negativa. Son usados en posición plana y filete horizontal. Los depósitos de estos electrodos tienen buenas propiedades siempre que sean usados con aceros de buena calidad, caso contrario son susceptibles a formar fisuras o grietas.

b) Revestimiento celulósico: Las principales características de este electrodo son la de soldar en toda posición, inclusive en vertical descendente, permite una penetración profunda dada la energía de su arco, forma una escoria fina y de fácil remoción.

c) Revestimiento rutílico: De buena operatividad, arco suave y de fácil re-encendido, suelda con corriente alternada y continua tanto con polaridad positiva como negativa. Apropiado para juntas mal preparadas, excelente terminación y su escoria es de rápida solidificación y fácil remoción.

d) Revestimiento básico: El electrodo ideal para la soldadura de los aceros de difícil soldabilidad, excelentes propiedades mecánicas, sueldan en cualquier posición, preferentemente con corriente continua polo positivo. Por su tendencia a absorber humedad deben ser conservados en lugares secos y eventualmente resecados antes de su utilización.

Existe además una clase de electrodos, que resulta de la adición de hierro en polvo a los revestimientos de los electrodos antes mencionados, excepto a los celulósicos. A estos electrodos se les conoce como electrodos de alto rendimiento gravimétrico.

El rendimiento gravimétrico de un electrodo viene dado por la relación entre el peso del metal depositado y el peso de la varilla fundida.

$$R_G = \left[\frac{W_{ma}}{W_{vm}} \right] \cdot 100\% \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde: R_G : Rendimiento gravimétrico.

W_{ma} : Peso del material de aporte.

W_{vm} : Peso de la varilla metálica.

En general, para su evaluación se desprecian 40 mm de la longitud del electrodo, que es aproximadamente igual a la parte desnuda del alma que se aloja en la pinza porta electrodos.

Tomando como ejemplo dos electrodos, un E6013 y un E7024, ambos de 450 mm de largo y de 4.0 mm de diámetro, como se muestra en la **figura 3.9**.

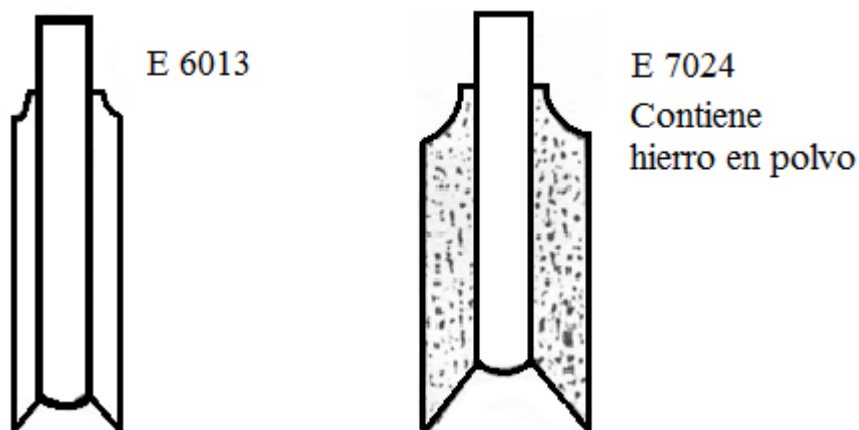


Figura 3.9: Comparación entre los electrodos E 6013 Y E 7024.

El peso del alma metálica es 43.2 g, mientras que el peso del material aportado de los electrodos E 6013 y E 7024 son 36.7 g y 60.5 g respectivamente; entonces haciendo los cálculos.

$$R_{G_{E 6013}} = \left[\frac{36.7}{43.2} \right] \cdot 100\% \approx 85\% \qquad R_{G_{E 7024}} = \left[\frac{60.5}{43.2} \right] \cdot 100\% \approx 140\%$$

Esta adición de hierro en polvo aumenta la fluidez de la escoria, debido a la formación de óxido de hierro; mejora la estabilidad del arco y la penetración es reducida, principalmente con alta intensidad de corriente, lo que puede minimizar la ocurrencia de mordeduras; aumenta la posibilidad de soldar por arrastre y reduce la tenacidad del metal de soldadura.

Para la formulación de los revestimientos, se emplea un parámetro muy útil, conocido como índice de basicidad (*IB*).

El concepto de basicidad fue adoptado en primera instancia para responder a las necesidades de la industria siderúrgica. Se utiliza para evaluar la capacidad de refinamiento de azufre de una escoria en prácticas de afino de acero en hornos de cuchara. Más tarde, el uso del índice de basicidad fue ampliado para medir la capacidad de oxidación de un fundente, y los mismos principios fueron aplicados a la soldadura. En consecuencia, es una práctica general el utilizar el índice de basicidad para caracterizar un fundente de soldadura con respecto a sus propiedades físicas y químicas.

El índice de basicidad es una estimación del contenido de oxígeno en el metal de soldadura y por tanto se utiliza para predecir las propiedades del metal de soldadura, así como la viscosidad de la escoria. La basicidad está relacionada con la facilidad con la que se disocian en óxidos en cationes y aniones de oxígeno. Los óxidos que se disocian con facilidad se denominan “básicos” y aquellos que se disocian parcialmente se denominan “ácidos”.

Los fundentes básicos tienen menores contenidos de oxígeno en el metal de soldadura y confieren una buena tenacidad al cordón de soldadura, mientras que los fundentes ácidos tienden a producir un metal de soldadura con mayor contenido de oxígeno y una microestructura gruesa con una menor resistencia al impacto. El índice de basicidad del fundente generalmente se calcula de la siguiente manera:

$$IB = \left[\frac{\sum(\text{Óxidos básicos})}{\sum(\text{Óxidos ácidos y anfóteros})} \right] \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Existen numerosas fórmulas para calcular el índices de basicidad de los flujos se han obtenido hasta la fecha. La más común fue desarrollada por Tuliani, S. S. et al [29], y se muestra a continuación:

$$IB = \left[\frac{CaO + MgO + BaO + K_2O + Li_2O + CaF_2 + 0.5(MnO + FeO)}{SiO_2 + 0.5(Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)} \right] \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Fundentes con un índice de basicidad superior a 1,5 se consideran básicos, los flujos inferiores a 1.0 se consideran ácidos.

Los flujos ácidos se prefieren típicamente para una sola pasada de soldadura debido a su operatividad superior y sus características de humectación. Además, los flujos de ácidos tienen más resistencia que los flujos básicos a la porosidad causada por la contaminación de las planchas por el petróleo, las grasas y la cascarilla.

Flujos básicos tienen mejores propiedades de impacto que los flujos de ácido. Esta ventaja es particularmente evidente cuando se realiza muchas pasadas. Los fundentes altamente básicos generalmente producen un metal de soldadura con muy buenas propiedades mecánicas. Su uso debe limitarse para soldaduras de muchas pasadas, donde se requiera que el metal de soldadura posea una buena tenacidad.

3.5 Aspectos metalúrgicos

La soldadura envuelve muchos fenómenos metalúrgicos, como son la fusión, solidificación, reacciones gas – metal, reacciones escoria – metal y reacciones en estado sólido. Estas reacciones ocurren muy rápido en la soldadura a diferencia de otros procesos metalúrgicos de manufactura, fundición o tratamientos térmicos. La metalurgia de la soldadura está relacionada con la composición química del material de aporte y del material base, del proceso de soldadura y de los parámetros de soldeo. Para lograr propiedades físicas y mecánicas similares al material base, el material de aporte debe poseer una composición química similar [30].

El método de fusión utilizado por el proceso de soldadura SMAW puede afectar significativamente las propiedades de la unión soldada. Uno de estos fenómenos que influyen significativamente en las propiedades mecánicas de una soldadura, y puede causar que las propiedades del metal base no puedan reproducirse en el unión es lo que se conoce como zona afectada por el calor (ZAC). La zona afectada por el calor se genera por el gradiente térmico producto de las elevadas temperaturas del arco para fundir el material base como se indica en la **figura 3.10**.

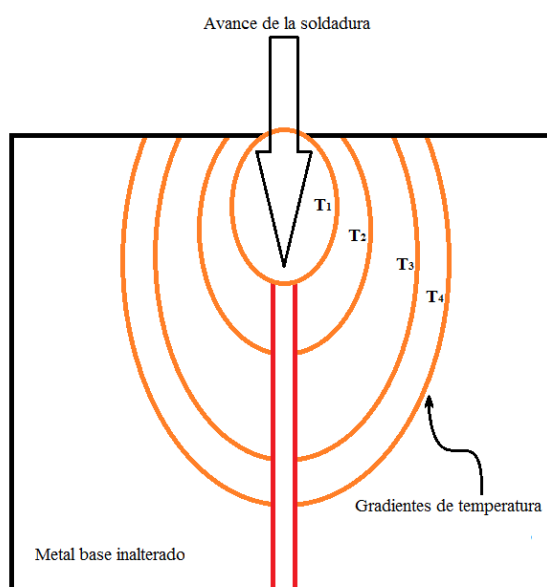


Figura 3.10: Efecto del calor en la pieza de trabajo [Elaboración propia].

Este gradiente se representa por líneas de diferentes colores alrededor de la zona donde se aplica el calor. En la zona de la unión, el metal alcanza una temperatura elevada. En las zonas lejanas a la unión, el metal no sufre cambio alguno de temperatura.

Este calentamiento no uniforme puede generar problemas de esfuerzos residuales en la zona cercana al cordón de soldadura, lo cual podría afectar la resistencia estructural de la unión. Sin embargo, el efecto más severo en la zona afectada por el calor es el cambio en la microestructura, y por consiguiente en las propiedades del material base.

El la **figura 3.11** se muestra la variación de la microestructura en la zona afectada por el calor, para un acero de bajo carbono.

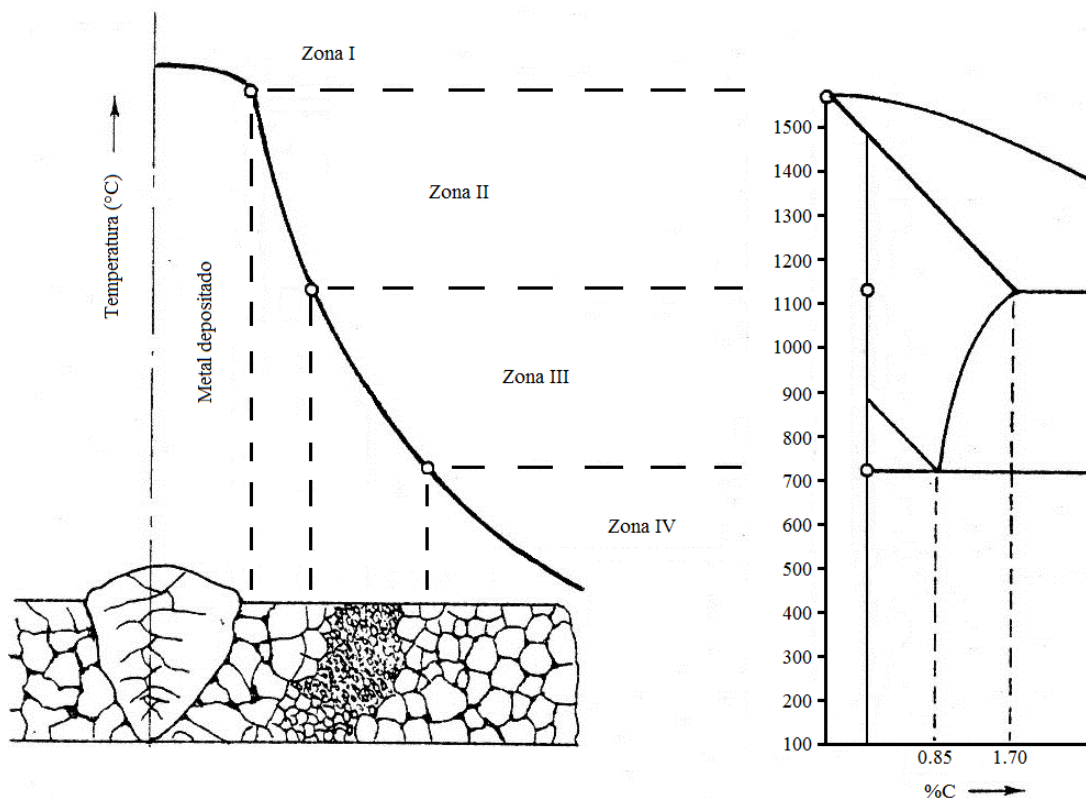


Figura 3.11: Variación de la microestructura en la zona afectada por el calor, para un acero de bajo carbono [17].

La **Zona I** es el cráter de soldadura que se forma cuando se aplica calor al material de aporte y a la pieza de trabajo. Este cráter solidifica formando granos alargados que siguen la dirección del gradiente térmico de la pieza.

La **Zona II** es una zona intermedia que siempre permanece en estado sólido durante todo el proceso, pero que se calienta a elevadas temperaturas y luego y luego se enfrían a una rapidez moderada debido a que la diferencia de temperatura con el metal cercano es relativamente pequeña. Como se observa en la **figura 3.11**, la temperatura en esta zona se encuentra en el rango de formación de la austenita. La microestructura original de acero (probablemente ferrita + perlita) cambia a austenita y, debido al enfriamiento moderado, los granos de austenita tienden a ser grandes.

La **Zona III** se encuentra en el rango de formación de la austenita, sin embargo su enfriamiento es más rápido, debido a que está en contacto con un volumen mayor de material a temperatura mucho menor, por lo que los granos de austenita formados son más pequeños.

En la **Zona IV**, denominada zona de fragilidad azul, el metal se encuentra a una temperatura menor a 723 °C, por lo que no sufre cambios significativos.

Generalmente el tamaño de los granos formados durante el proceso de soldadura se conserva a temperatura ambiente, por lo que las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor no serán uniformes. Por ejemplo, los granos de mayor tamaño producen valores de dureza bajos, mientras que los granos más pequeños aumentan la dureza. Un incremento en la dureza va acompañado por un aumento en la fragilidad y una reducción en la ductilidad. Dependiendo de la aplicación de la unión, esta variación en las propiedades mecánicas genera problemas de fallas en la soldadura.

Debe señalarse que al soldar aceros con bajo contenido de carbono, los cambios estructurales que ocurren en la zona cercana a la soldadura no afectan apreciablemente la resistencia de las piezas soldadas, ya que no se forman fases duras, como es el caso de la martensita. Una manera útil para conocer si un acero es soldable, es mediante el cálculo del carbono equivalente (CE).

En la soldadura, el contenido de carbono equivalente se utiliza para comprender cómo los diferentes elementos aleantes pueden afectar la dureza del acero que se está soldando y por tanto poder determinar su soldabilidad. Mayores concentraciones de carbono y otros elementos de aleación tales como manganeso, cromo, silicio, molibdeno, vanadio y níquel tienden a aumentar la dureza y por tanto a disminuir la soldabilidad, esto es debido a que algunos elementos forman fases duras con el carbono (como carburos en el caso del cromo) y otros ayudan a estabilizar estas fases duras a mayor profundidad (como el molibdeno, el manganeso y el níquel).

El método de uso común para calcular el carbono equivalente en una soldadura es aplicando la fórmula de la AWS, modificada de la fórmula desarrollada por Dearden y O'Neill, recomendada para aceros estructurales:

$$CE = \%C + \left(\frac{\%Mn + \%Si}{6} \right) + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \right) + \left(\frac{\%Cu + \%Ni}{15} \right) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Esta fórmula es adecuada para predecir la soldabilidad en una amplia gama de aceros al carbono. Los rangos de soldabilidad se presentan en la **tabla 3.3**.

Tabla 3.3: Rangos de soldabilidad [17].

Carbono Equivalente	Soldabilidad
< 0.35	excelente
0.36 – 0.40	muy buena
0.41 – 0.45	buena
0.46 – 0.50	aceptable
> 0.50	pobre

Debe resaltarse que, de obtenerse valores pobres en la soldabilidad, se puede emplear el CE con el fin de hallar la temperatura de precalentamiento de las planchas antes de realizar la operación de soldadura. Para ello, se localiza la posición en una gráfica carbono equivalente contra porcentaje de carbono del acero, tal como se muestra en la **figura 3.12**.

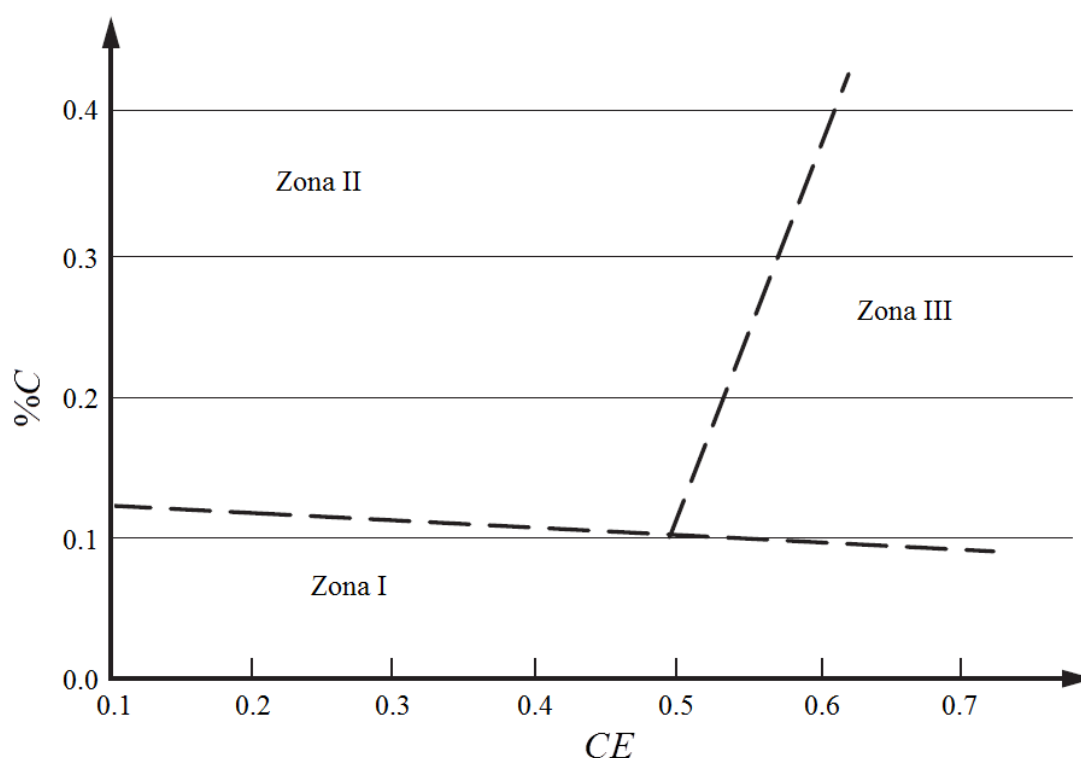


Figura 3.12: Clasificación por zonas de los aceros [31].

De la **figura 3.12**, si el acero cae en la **Zona I**, tendrá buena soldabilidad y poco riesgo de presentar un comportamiento frágil. Si cae en la **Zona II**, el acero es soldable, pero se deben tomar precauciones para evitar la formación de microestructuras frágiles mediante control de hidrógeno y temperatura de precalentamiento. Si cae en la **Zona III**, el acero es difícilmente soldable, se forman estructuras frágiles en la unión soldada; se debe calcular la temperatura de precalentamiento para preservar las propiedades mecánicas de la ZAC [31].

CAPÍTULO IV

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Material utilizado

La materia prima que se utilizó en esta investigación fue cascarilla de acero donada por la Corporación Aceros Arequipa. Esta cascarilla es un subproducto siderúrgico que se genera durante el proceso de laminación en caliente del acero, como resultado de la formación de capas de óxidos de hierro sobre la superficie del acero a alta temperatura.

La **figura 4.1** muestra el esquema de producción de la planta de Aceros Arequipa, ubicada en la ciudad de Pisco, departamento de Ica [32]. En este proceso existen muchos focos en los que se genera la cascarilla, por ejemplo después de la colada continua, en el horno recalentador, en el tren de laminación, en la mesa de enfriamiento, en el tren de alambrones, etc. Pero de todos ellos, es en el horno de recalentamiento de la Planta de Laminación donde se genera la mayor cantidad de cascarilla en todo el proceso.



Figura 4.1 Esquema de Producción de Acero de la Planta de Pisco {32}

En la Planta de Laminación, la palanquilla se transforma en los diferentes productos de acero largo que se requiere en el mercado nacional e internacional. Para ello, las palanquillas son calentadas en el horno recalentador a razón de 45 TM/h con el objetivo de homogenizar la temperatura de cada palanquilla, hasta un valor aproximado de 1200 °C y así poder deformarlas más fácilmente. Debido a estas temperaturas de trabajo y a que la atmósfera dentro del horno es ligeramente oxidante, se forma la cascarilla sobre la superficie de las palanquillas.

Pasado el tiempo en el horno, las palanquillas son conducidas al tren de laminación, que consta inicialmente de un tren de desbaste, donde las palanquillas sufren una primera pasada muy ligera para romper y eliminar la capa de cascarilla.

La cascarilla depositada en el suelo es recolectada y almacenada en un patio, donde se espera la orden para su utilización o eliminación final.

En esta cascarilla están presentes los tres tipos óxidos de hierro estudiados (wustita, magnetita y hematita). Además, en su composición se encuentra hierro metálico, ya que durante el descascarado de la palanquilla, una parte del metal es arrancado.

Normalmente la cascarilla contiene trazas de lubricantes (empleados para reducir la fricción de los rodillos laminadores), grasas (procedentes de derrames de los equipos asociados) y pequeñas cantidades de metales no ferrosos (Cu, Cr, Zn, Al, etc.) y otros elementos (C, S, P, Ca, etc.), así como otros compuestos derivados (óxidos, sulfuros, nitruros, etc.).

Se describen a continuación los ensayos llevados a cabo para caracterizar y preparar la muestra de cascarilla, como materia prima para la elaboración de revestimiento para electrodos de soldadura.

4.1.1 Composición química

Los resultados obtenidos en la determinación de la composición química de la cascarilla se observan en la **tabla 4.1**, empleando un equipo de espectrometría de plasma ICP:

Tabla 4.1: Composición química fundamental de la cascarilla de laminación.

Elemento	Peso (%)
Fe	68.213
Al	0.239
Ca	0.242
Cu	0.040
Mn	0.535
Si	0.044
V	0.228
Co	0.006
As	0.044
C	0.007
S	0.007
Otros (como el oxígeno)	30.395

El contenido de hierro en la cascarilla es aproximadamente 68 %. El MIO contiene 95 % de hematita (Fe_2O_3), por lo que tendría 66.5 % de hierro aproximadamente. Comparando ambos minerales, se tiene que hay una gran similitud química, inclusive el mayor contenido de hierro de la cascarilla puede favorecer al rendimiento del electrodo.

Se observa además que la cascarilla está constituida por pequeñas cantidades de otros elementos: Mn, Cu, Si, C, Ca, etc. También existe en la cascarilla un 2,0 % aproximadamente de aceites y grasas.

4.1.2 Distribución granulométrica

Se tomo una muestra de 4 kg, a la que se llamó “Muestra Testigo” que fue tamizada con la serie de mallas ASTM y un Ro – Tap. La **tabla 4.2** presenta las características granulométricas de esta muestra de cascarilla.

Tabla 4.2: Análisis granulométrico de la Muestra Testigo.

Malla ASTM	Tamaño de partícula (μm)	$f(x)$	$G(x)$	$F(x)$
5/8'	16000	2.60	2.60	97.40
1/2'	12700	2.30	4.90	95.10
3/8'	9510	4.94	9.84	90.16
4	4760	27.21	37.05	62.95
6	3350	15.60	52.65	47.35
8	2360	14.94	67.59	32.41
10	2000	5.01	72.60	27.40
20	850	17.57	90.16	9.84
30	600	2.82	92.99	7.01
40	425	2.21	95.20	4.80
50	300	1.20	96.40	3.60
70	212	1.07	97.47	2.53
100	150	0.77	98.24	1.76
150	106	0.35	98.59	1.41
200	75	0.40	98.99	1.01
270	53	0.35	99.34	0.66
fondo	-	0.66	100.00	-
TOTAL		100.00		

donde: $f(x)$: Porcentaje en peso retenido en cada malla.

$G(x)$: Porcentaje en peso acumulado retenido.

$F(x)$: Porcentaje en peso acumulado pasante.

Para generalizar y cuantificar estos resultados, se emplean modelos matemáticos denominados funciones de distribución de tamaños, que relacionan el tamaño de partícula con un porcentaje en peso, generalmente el acumulado retenido o pasante. Las funciones de distribución más difundidas son las funciones de Gates – Gaudin – Schuhmann (G – G – S) y la de Rosin – Rammler (R – R).

La función G – G – S tiene la siguiente expresión:

$$F(x) = 100 \left(\frac{x}{x_0} \right)^\alpha \quad (\text{Ec. 4.1})$$

La función R – R tiene la siguiente expresión:

$$G(x) = 100 \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^\alpha \right] \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Se emplearon ambos modelos para ajustar los datos del análisis granulométrico de la muestra de cascarilla.. Como estas ecuaciones no son lineales, se busca aproximar a una línea recta que facilite su interpretación. Para linealizar una ecuación de la forma que tienen las Ec. 4.1 y Ec. 4.2, se toma logaritmo a ambos miembros de la misma, hasta obtener una ecuación lineal de la forma:

$$Y = mX + c \quad (\text{Ec. 4.3})$$

a) Distribución G – G – S:

Se toma logaritmo natural una sola vez, entonces la Ec. 4.1 queda así:

$$\log[F(x)] = \alpha \log[x] + \log\left[\frac{100}{x_0^\alpha}\right]$$

Reemplazando los valores de la **tabla 4.2**, se grafican los datos y se ajusta a una línea recta, como se observa en la **figura 4.2**.

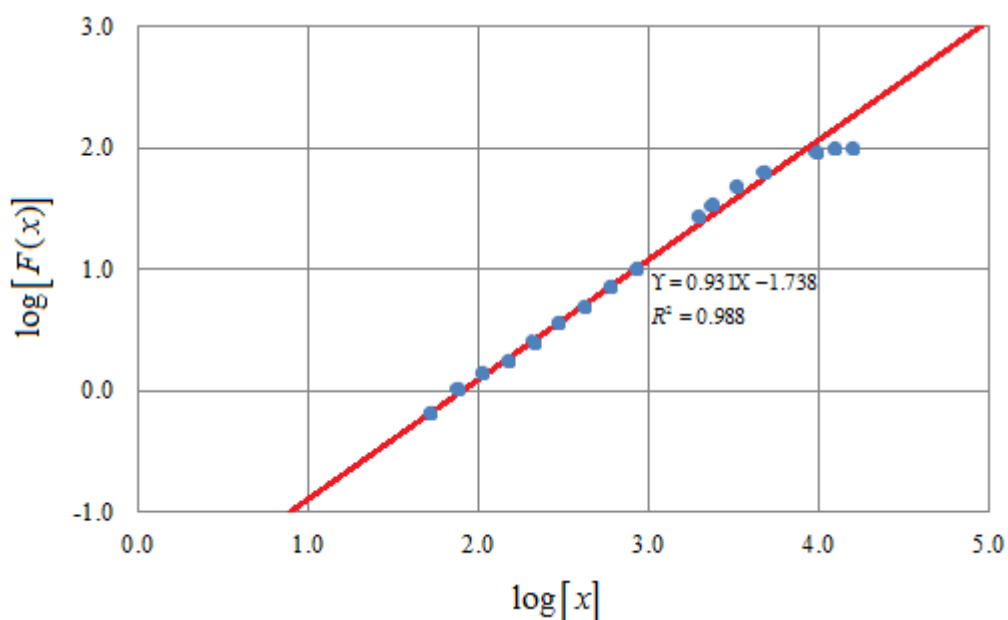


Figura 4.2: Curva G – G – S del análisis granulométrico de la cascarilla.

Comparando los términos de la ecuación logarítmica con la recta que se ajusta a los datos, la función G – G – S sería:

$$F(x) = 100 \left(\frac{x}{10352} \right)^{0.931} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

b) Distribución R – R:

Se toma logaritmo natural dos veces, entonces la Ec. 4.2 queda así:

$$\log \left[\log \left[\frac{100}{G(x)} \right] \right] = \alpha \log [x] + \log \left[\frac{\log [e]}{x_0^\alpha} \right]$$

Reemplazando los valores de la **tabla 4.2**, se grafican los datos y se ajusta a una línea recta, como se observa en la **figura 4.3**.

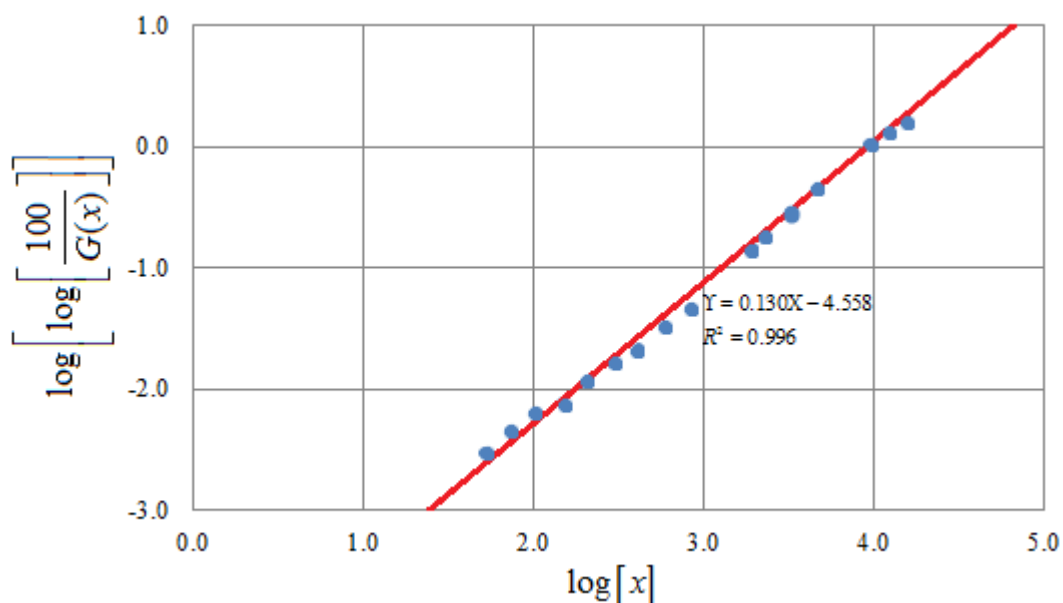


Figura 4.3: Curva R – R del análisis granulométrico de la cascarilla.

Comparando los términos de la ecuación logarítmica con la recta que se ajusta a los datos, la función R – R sería:

$$G(x) = 100 \cdot \exp \left[- \left(\frac{x}{5164} \right)^{1.130} \right] \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Empleando estos modelos matemáticos, se elabora la **tabla 4.3** y se compara los porcentajes en peso calculados con los porcentajes en peso obtenidos del análisis granulométrico.

Tabla 4.3: Comparación de los modelos matemáticos con el análisis granulométrico.

Análisis Granulométrico		G – G – S		R – R	
F(x)	G(x)	F(x) ₁	F(x) – F(x) ₁	G(x) ₁	G(x) – G(x) ₁
97.398	2.602	149.985	-52.587	2.762	-0.160
95.101	4.899	120.963	-25.862	6.300	-1.402
90.159	9.841	92.406	-2.247	13.618	-3.778
62.954	37.046	48.514	14.440	40.170	-3.123
47.351	52.649	34.981	12.370	54.160	-1.510
32.410	67.590	25.246	7.164	66.181	1.409
27.402	72.598	21.641	5.761	71.009	1.589
9.836	90.164	9.757	0.079	87.793	2.371
7.012	92.988	7.055	-0.042	91.592	1.396
4.799	95.201	5.117	-0.318	94.225	0.976
3.600	96.400	3.700	-0.100	96.066	0.333
2.528	97.472	2.678	-0.150	97.326	0.146
1.757	98.243	1.941	-0.184	98.183	0.060
1.411	98.589	1.405	0.006	98.769	-0.180
1.011	98.989	1.018	-0.007	99.166	-0.177
0.659	99.341	0.737	-0.077	99.436	-0.095

De la **tabla 4.3** se puede concluir que los datos obtenidos del análisis granulométrico de la muestra de cascarilla se ajustan a un modelo de distribución R – R; por tanto se empleó este modelo para predecir diferentes parámetros.

Uno de estos parámetros es el tamaño de partícula que debe poseer la cascarilla para entrar en la formulación del revestimiento.

Para determinar este tamaño, se cuenta con la distribución granulométrica máxima y mínima que posee el MIO preparado de acuerdo a las normas internacionales. Esta distribución se resume en un papel R – R, como se observa en la **figura 4.4**, en la cual se grafica también la distribución de la muestra testigo para la comparación.

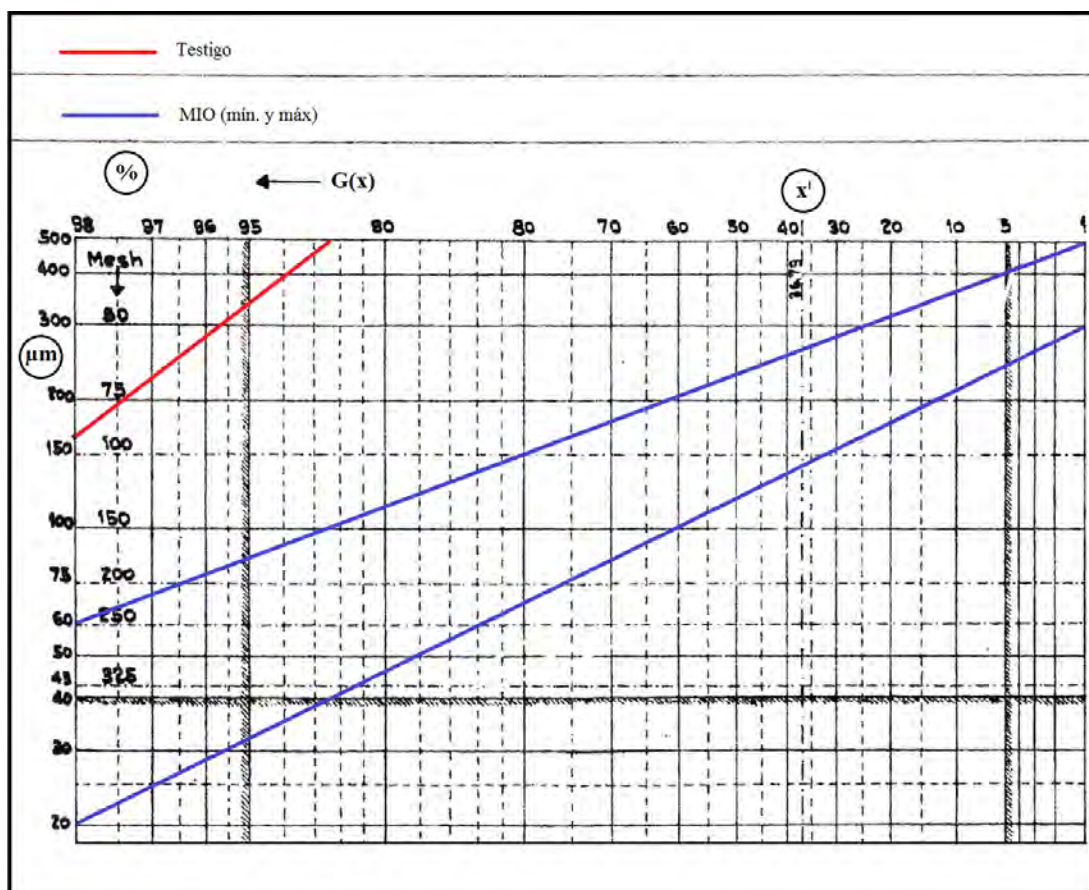


Figura 4.4: Rango de aceptación en la distribución granulométrica para el MIO

Se puede observar que solo un 8 % del total tiene el tamaño adecuado para la mezcla, pero su distribución está muy alejada del rango de aceptación; la cascarilla debe tener en lo posible una distribución granulométrica semejante a la del MIO.

Se debe conocer también el rango de tamaños de partícula que debe poseer la cascarilla para ingresar en la mezcla, es decir, a partir de que malla se empleará la cascarilla.

Este análisis se debe efectuar revisando el diámetro del electrodo que se va a fabricar en este proyecto. La **figura 4.5** muestra la sección transversal de un electrodo revestido de longitud “ L ”.

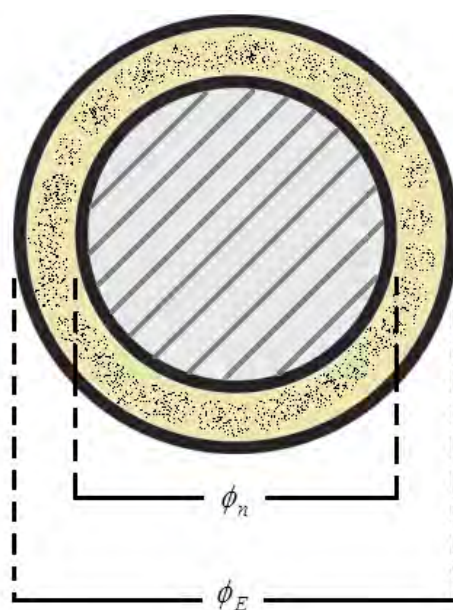


Figura 4.5: Sección transversal de un electrodo revestido.

donde: ϕ_n : Diámetro del núcleo metálico.

ϕ_E : Diámetro del electrodo revestido.

La **tabla 4.4** muestra las dimensiones en milímetros exigidas por la norma AWS/ASME SFA 5.1-SFA 5.1M para los electrodos a fabricar.

Tabla 4.4: Dimensiones requeridas para los electrodos de soldadura.

ϕ_n (mín.)	ϕ_E (máx.)	L (mín.)
1.6	3.0	150
2.0	3.0	150
3.2	5.0	300
4.0	10.0	300
5.0	13.0	300
6.0	13.0	400
8.0	13.0	400

Para el objetivo del proyecto, se empleó un electrodo de diámetro “ ϕ_n ” 3.2 mm, y de diámetro “ ϕ_E ” 4.7 mm. Entonces las partículas que entren en la mezcla deberán tener un tamaño máximo de 0.75 mm (750 μm).

Se debe tener en cuenta que cuando la mezcla de materiales entre en contacto con el agua y el aglutinante, las partículas absorberán algo de humedad y aumentarán de tamaño, por lo que se emplea un factor de seguridad para corregir el tamaño teórico calculado, denominado factor NEXSOL de fabricación, igual a 0.8.

Entonces, multiplicando este factor por el valor teórico de tamaño máximo de las partículas, se tendría que el tamaño máximo corregido es 600 μm .

Revisando la **tabla 4.2**, se emplearía la cascarilla que se encuentra por debajo de la malla 30. Pero se debe hacer una observación, y esta es que existe minerales en la mezcla cuyos tamaños de partículas corregidas bordean los 400 μm . Entonces, para propósito de este proyecto, el tamaño de partícula de la cascarilla seleccionado será el que pase la malla 50 (300 μm).

Se observa que hasta la malla 50 se retiene un 96.40 % del peso total de la muestra de cascarilla y solamente el 3.60 % cumple con la acotación anteriormente establecida.

Ante este alto nivel de rechazo, se vio en la necesidad de efectuar pruebas de molienda para reducir el tamaño de partícula, empleando un molino de Bond. Además, se tuvo como indicador operativo un parámetro conocido como Índice de Finura (IF).

4.2 Índice de Finura

El índice de finura (IF) es un parámetro empleado convencionalmente en arenas de moldeo para determinar el tamaño de granos que predomina en la arena examinada. Esta teoría es también aplicable a la fabricación de los revestimientos, ya que los procesos de mezcla e insumos empleados son similares.

El índice de finura se determina por el tamaño y distribución de los granos, que se representa mediante una curva de distribución granulométrica.

La finura de los constituyentes del revestimiento afecta las propiedades físicas que desarrollan las mezclas, así como a su resistencia y plasticidad; estas deficiencias se ven reflejadas en el proceso de extrusión de los electrodos.

Cuando la mezcla tiene un alto contenido de gruesos, los electrodos presentan excentricidad (el núcleo metálico no está rodeado de manera uniforme por el revestimiento).

Cuando la mezcla tiene un alto contenido de finos, se requiere mayor cantidad de aglutinantes para obtener las propiedades físicas requeridas. La **tabla 4.5** muestra la relación entre el IF y el tamaño de grano.

Tabla 4.5: Relación entre el índice de finura y el tamaño de grano.

Grano	IF	Tamaño (µm.)
muy grueso	< 18	1000 – 2000
grueso	18 – 35	500 – 1000
medio	35 – 60	250 – 500
fino	60 – 150	100 – 250
muy fino	> 150	< 100

Para calcular el IF, se hace pasar la muestra a través de una serie de tamices y se anota el material retenido en cada malla, en porcentaje en peso $f(x)$. Luego, se multiplican estas cantidades por una serie de factores establecidos por la ASTM. La **tabla 4.6** muestra las características de las mallas y sus factores respectivos

Tabla 4.6: Características de las mallas ASTM

Malla	α_i	$f(x)_i$	$\alpha_i \cdot f(x)_i$
6	3	$f(x)_1$	$3 \cdot f(x)_1$
10	5	$f(x)_2$	$5 \cdot f(x)_2$
20	10	$f(x)_3$	$10 \cdot f(x)_3$
30	20	$f(x)_4$	$20 \cdot f(x)_4$
40	30	$f(x)_5$	$30 \cdot f(x)_5$
50	40	$f(x)_6$	$40 \cdot f(x)_6$
70	50	$f(x)_7$	$50 \cdot f(x)_7$
100	70	$f(x)_8$	$70 \cdot f(x)_8$
150	100	$f(x)_9$	$100 \cdot f(x)_9$
200	140	$f(x)_{10}$	$140 \cdot f(x)_{10}$
270	200	$f(x)_{11}$	$200 \cdot f(x)_{11}$
fondo	300	$f(x)_{12}$	$300 \cdot f(x)_{12}$
TOTAL		100.00	$\Sigma[\alpha_i \cdot f(x)_i]$

Entonces, el IF se calcula de la siguiente manera:

$$IF = \frac{\sum[\alpha_i \cdot f(x)_i]}{100} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Para el proyecto, se ha calculado que el IF de la cascarilla no debe exceder de 150, es decir, el tamaño predominante del grano debe ser fino.

Como se observó anteriormente, la cascarilla no posee el tamaño adecuado para poder entrar en la mezcla, entonces se requiere de una molienda. En resumen, la operación de molienda permitirá aumentar la cantidad de material que pase la malla 50, aproximar su distribución granulométrica dentro del rango de distribución de la muestra de MIO y además, debe poseer un IF que no exceda a 150.

Se realizaron tres test de molienda en un molino de Bond con las siguientes características.

Dimensiones : Φ 12.0" x 12.0"
 Velocidad del motor : 3450 RPM
 Velocidad de salida : 74 RPM
 Voltaje : 220 V
 Potencia del motor : 1.80 HP

La **tabla 4.7** muestra los tiempos en minutos que se escogieron para realizar cada test de moliendabilidad.

Tabla 4.7: Parámetro de molienda para los test

Test	Tiempo de molienda (min.)	
	Molienda 01	Molienda 02
A	10	15
B	20	15
C	5	15

En la **figura 4.6** se muestra el esquema general de la prueba de molienda que se llevó a cabo para determinar el IF de la cascarilla.

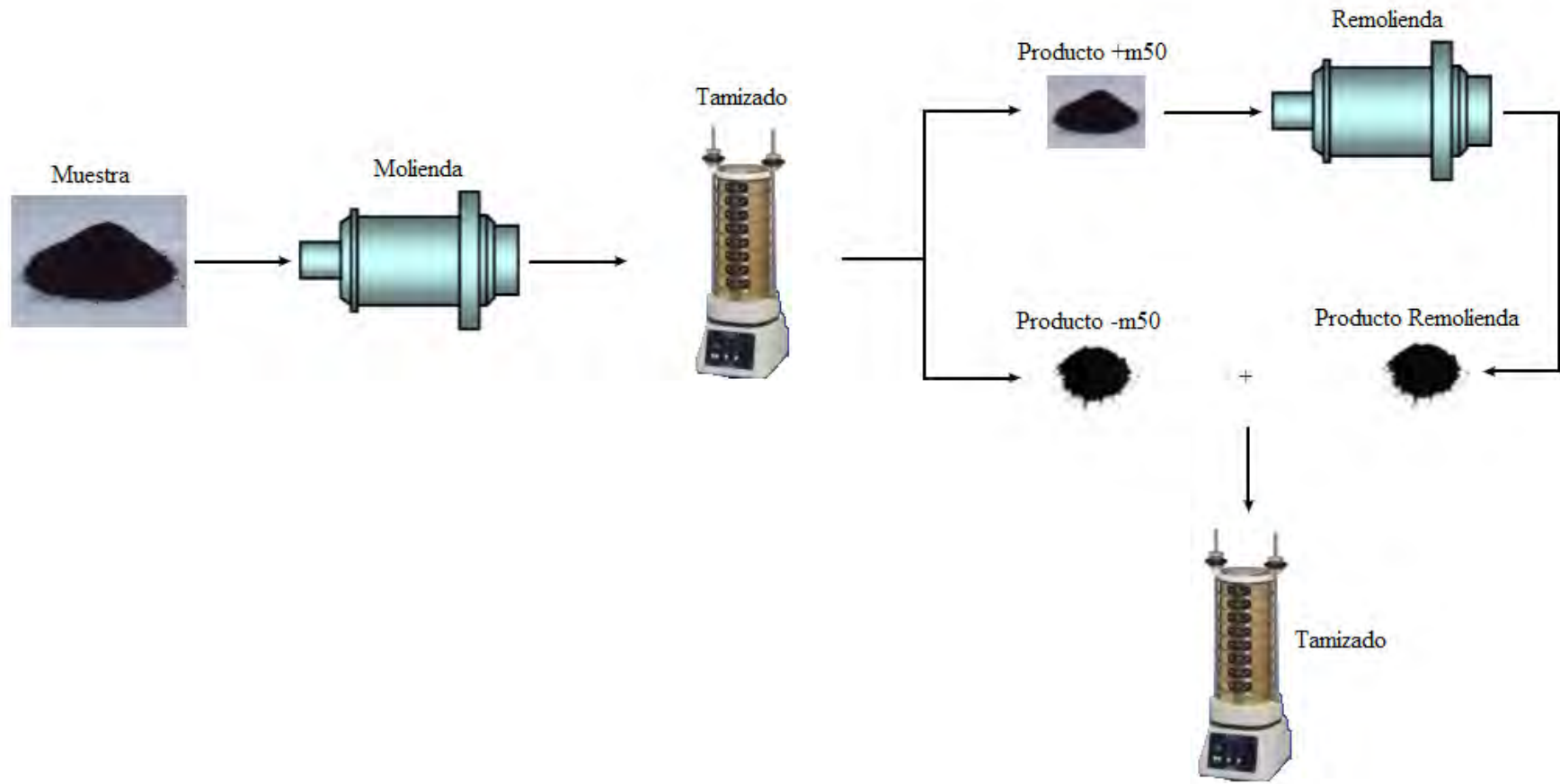


Figura 4.6: Esquema de la prueba de molienda.

Los ensayos se realizaron con muestras de 1.600 Kg., de las cuales se tomó 100 g para el análisis en el RO – TAP, que tiene las siguientes características.

Número de mallas	: 6 mallas + 1 tapa + 1 base (fondo)
Velocidad del motor	: 1730 RPM
Voltaje	: 115-230 V
Potencia del motor	: 0.50 HP
Sistema	: Monofásico

El material molido fue homogenizado siguiendo los procedimientos establecidos por la designación ASTM C 702 [33], empleando lonas y cuarteadores de rifles (chutes) como se observa en la **figura 4.7**.

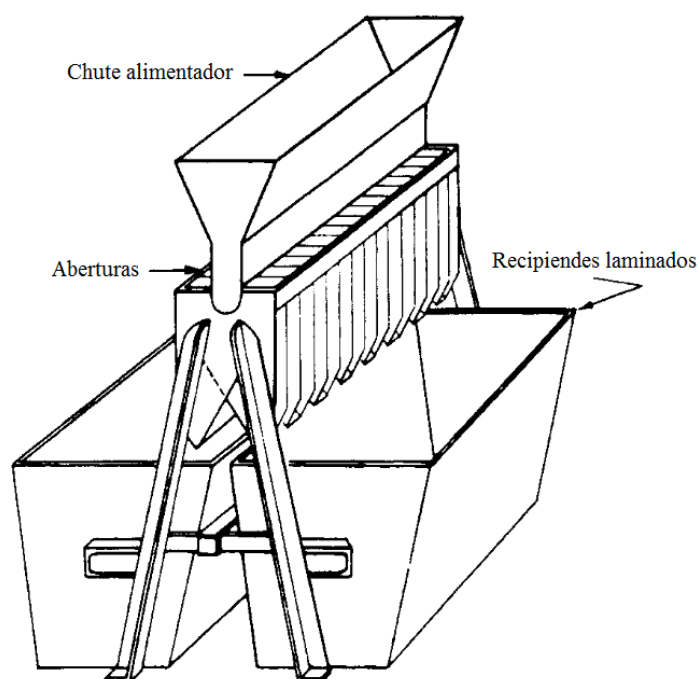


Figura 4.7: Cuarteador de rifles [33].

Los resultados obtenidos de cada ensayo se muestran a continuación

La **tabla 4.8** muestra el resultado del análisis para una muestra sometida al test “A” de molienda.

Tabla 4.8: Análisis de la muestra según el test “A”.

Malla	α_i	$f(x)_i$	$\alpha_i \cdot f(x)_i$
6	3	3.016	9.048
10	5	2.097	10.485
20	10	3.992	39.920
30	20	1.381	27.620
40	30	1.217	36.510
50	40	1.198	47.920
70	50	9.207	460.350
100	70	11.513	805.910
150	100	10.259	1025.900
200	140	18.686	2616.040
270	200	15.866	3173.200
fondo	300	21.569	6470.700
TOTAL		100.00	14723.603

Reemplazando los resultados obtenidos de la **tabla 4.8** en la Ec. 4.6.

$$IF_A \approx 147$$

De la **tabla 4.8** también se puede observar que hasta la malla 50 se encuentra retenido el **12.901 %** del material tamizado.

La **tabla 4.9** muestra el resultado del análisis para una muestra sometida al test “B” de molienda.

Tabla 4.9: Análisis de la muestra según el test “B”.

Malla	α_i	$f(x)_i$	$\alpha_i \cdot f(x)_i$
6	3	1.676	5.028
10	5	1.151	5.755
20	10	1.277	12.770
30	20	0.215	4.300
40	30	0.183	5.490
50	40	0.215	8.600
70	50	5.135	256.750
100	70	6.172	432.040
150	100	12.173	1217.300
200	140	13.564	1898.960
270	200	31.978	6395.600
fondo	300	26.262	7878.600
TOTAL		100.00	18121.193

Reemplazando los resultados obtenidos de la **tabla 4.9** en la Ec. 4.6.

$$IF_B = 181$$

De la **tabla 4.9** se puede observar que hasta la malla 50 se encuentra retenido el **4.717 %** del material tamizado.

La **tabla 4.10** muestra el resultado del análisis para una muestra sometida al test “C” de molienda.

Tabla 4.10: Análisis de la muestra según el test “C”.

Malla	α_i	$f(x)_i$	$\alpha_i \cdot f(x)_i$
6	3	2.121	6.363
10	5	1.579	7.895
20	10	4.693	46.930
30	20	2.14	42.800
40	30	2.121	63.630
50	40	2.305	92.200
70	50	11.348	567.400
100	70	9.648	675.360
150	100	12.233	1223.300
200	140	13.22	1850.800
270	200	16.545	3309.000
fondo	300	22.047	6614.100
TOTAL		100.00	14499.778

Reemplazando los resultados obtenidos de la **tabla 4.10** en la Ec. 4.6.

$$IF_C = 145$$

De la **tabla 4.10** se puede observar que hasta la malla 50 se encuentra retenido el **14.959 %** del material tamizado.

En la **figura 4.8** se muestran las curvas realizadas en el papel R – R para los tres test, comparándolos además con la muestra testigo.

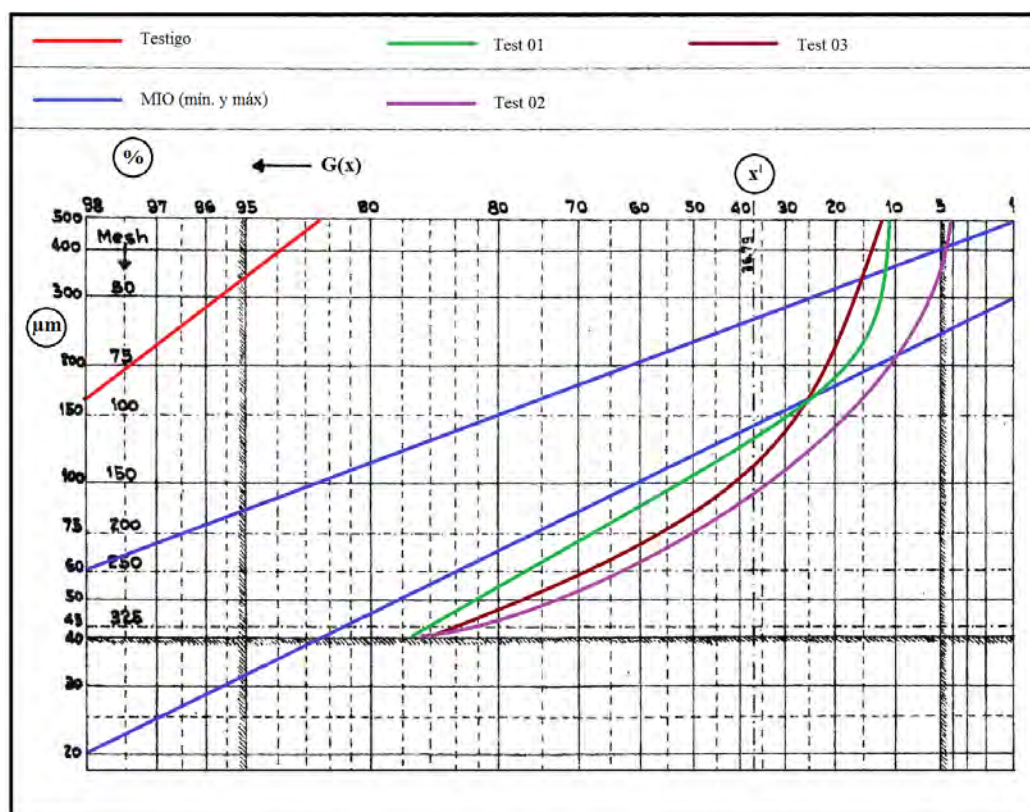


Figura 4.8: Distribución granulométrica de las muestras sometidas a los test.

De estos cálculos y revisando la **figura 4.8**, se concluye que el test “A” sería el que mejor se adecue para realizar la mezcla. Cabe resaltar que se debe descartar el material retenido hasta la malla 50 (12.901 % del total) ya que, como se mencionó anteriormente, no cumple con la especificación para elaborar el revestimiento.

¿Qué sucede con el material retenido hasta la malla 50? Se determinó el contenido de hierro metálico (Fe^0) de 100 g de cascarilla retenida hasta la malla 50, para lo cual se quemó la muestra con oxígeno-gas a más de 1600 °C. Se obtuvo que posee un 40% de hierro metálico. Considerando que la masa de cascarilla retenida hasta la malla 50 es la octava parte del peso de la muestra, entonces se concluye que el contenido de hierro metálico en la cascarilla es aproximadamente 5%.

4.3 Fabricación de los electrodos revestidos

Después de preparar este último constituyente del revestimiento, se procede a fabricar las mezclas de acuerdo a las especificaciones de la empresa.

Para elaborar el producto, se vio en la necesidad de elaborar las siguientes instrucciones para un mejor entendimiento de las operaciones del equipo y el funcionamiento del proceso de extrusión.

a) Preparación del alambre.

El alambre que conformará el núcleo del electrodo es de acero SAE 1008. Las bobinas de alambón de 3.25 mm de diámetro son colocadas en el alimentador de bobinas, donde son estiradas primeramente por la máquina estiradora para luego ser cortadas en longitudes de 350 mm. En esta etapa se emplean lubricantes sólidos, como jabones sódicos y potásicos, para reducir la fricción. Los alambres cortados son almacenados y llevados a la máquina alimentadora de alambres en cantidades que se requieran.

b) Preparación de la mezcla seca.

En paralelo al corte del alambre, se preparan los constituyentes del revestimiento (minerales, compuestos orgánicos, ferroaleantes y la cascarilla); todos estos constituyentes poseen una distribución granulométrica específica de acuerdo a las normas internacionales; la mezcla de estos materiales se da en proporciones establecidas dentro de la mezcladora. Los revestimientos a fabricar son del tipo celulósico, rutilico y rutil – celulósico.

c) Preparación de la mezcla húmeda.

Luego de permanecer un tiempo en la máquina mezcladora, se añade silicato (sódico o potásico) para que aglomere las partículas. Este aglutinante es mezclado previamente con agua en la proporción de 1:1. La mezcla resultante se prensa para formar una briqueta cilíndrica y cargarla en la unidad hidráulica.

d) La aplicación del recubrimiento por extrusión.

En esta etapa, la varilla es alimentada rápidamente hacia la prensa hidráulica, mientras esta extruye el revestimiento alrededor de la varilla. Los electrodos que salen de la prensa se ponen a prueba en un probador de excentricidad. Los electrodos que son rechazados, son enviados a la máquina de extracción de revestimiento, para reutilizar la varilla y el revestimiento.

Los electrodos que pasan son transportados hacia la máquina de cepillado, la cual retira el exceso de masa en las puntas de los electrodos, facilitando el encendido. Después de que los electrodos se extienden en la bandeja son secados al aire y luego se introducen en el horno para eliminar la humedad (no debe exceder el 7%).

e) Módulo de validación de electrodos

El control de calidad de los electrodos la realizan soldadores certificados efectuando pruebas de soldeo en diferentes posiciones, verificando el contenido de humedad y revisando las dimensiones externas del electrodo.

La **figura 4.9** muestra la vista de planta de la Planta de Fabricación de Electroodos Revestidos de la empresa.

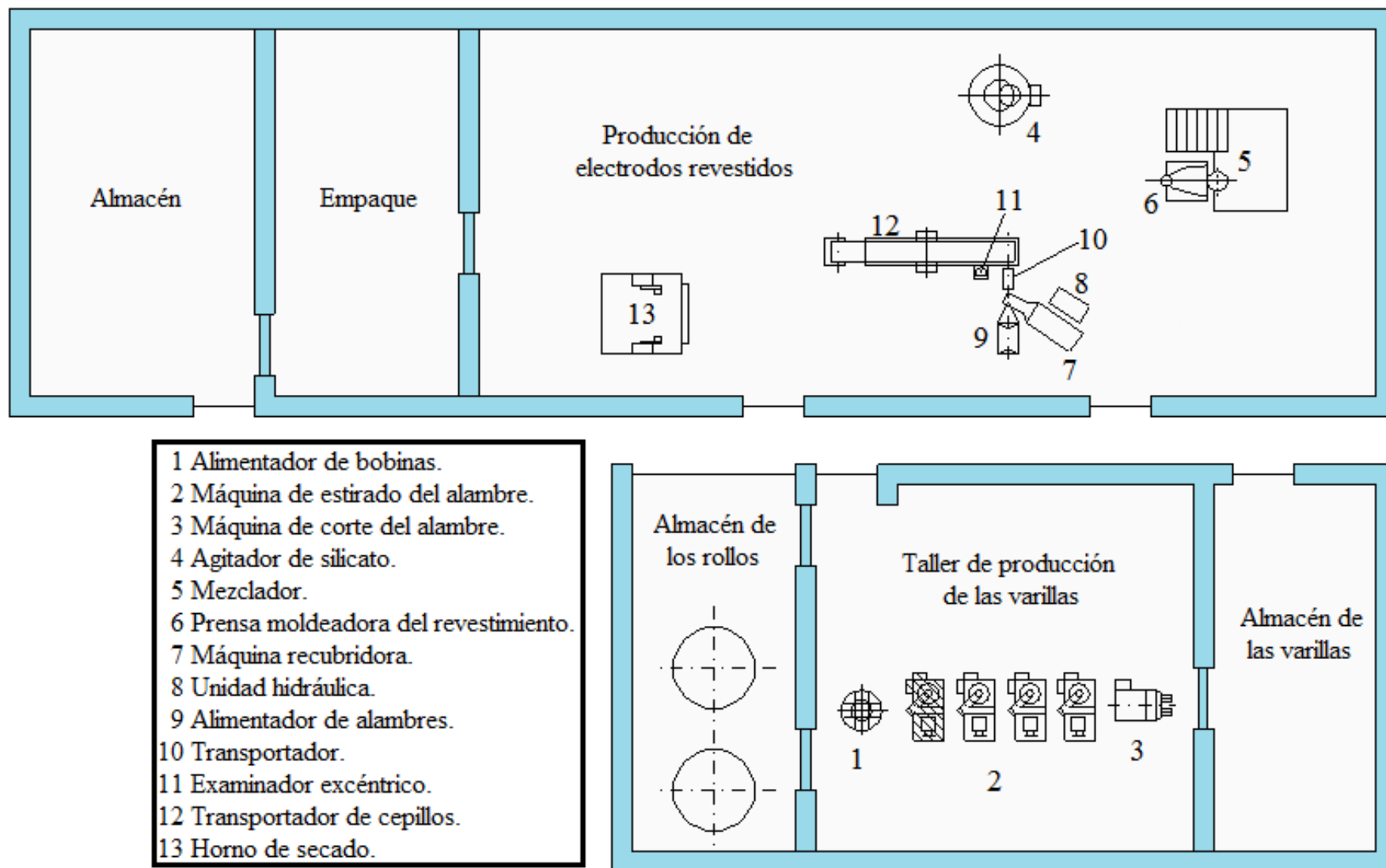


Figura 4.9: Vista en planta de la Planta de Producción de Electrodos Revestidos.

4.4 Validación de los electrodos revestidos

Se fabricaron 18 tipos de mezcla empleando la cascarilla y variando el contenido de los otros constituyentes; con cada mezcla formulada se fabricó 1 lote de electrodos revestidos. La cascarilla se utilizó parcialmente reemplazando una parte del MIO, con contenidos que van desde el 15% al 40% del peso total de MIO; los electrodos se soldaron entre 75 – 125 A según lo establecido por la especificación AWS. El criterio de validación de los electrodos fue el siguiente.

- a) Los electrodos soldados entre 75 – 125 A deben ser capaces de encender y reencender el arco eléctrico con facilidad.
- b) Los electrodos no deben quemarse (revestimiento calcinado color negro) producto del amperaje de trabajo, ya que originan reacciones químicas y los constituyentes se transforman, y no brindan la protección adecuada al cordón de soldadura.
- c) Los electrodos deben presentar un cordón de soldadura aceptable a simple vista, sin porosidades ni inclusiones no metálicas, además de una escoria fácilmente removible.

Bajo estas condiciones, solo 3 lotes cumplen con los requerimientos anteriores según las pruebas realizadas por un soldador certificado. Estos 3 lotes son de electrodos rutil – celulósicos. Los resultados se muestran en la **tabla 4.11**.

Tabla 4.11: Electrodos que cumplen con el módulo de validación.

Lote	Fácil encendido	Revestimiento saludable	Cordón saludable	Cascarilla (%)
Lote 106	○	○	○	15.0
Lote 114	○	○	○	20.0
Lote 115	○	○	○	20.0

4.5 Preparación de la junta

La preparación de la junta se hace empleando la especificación AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M. En la **figura 4.10** se observa el montaje de una probeta de soldadura con ranura (V) para realizar ensayos de sanidad y pruebas mecánicas.

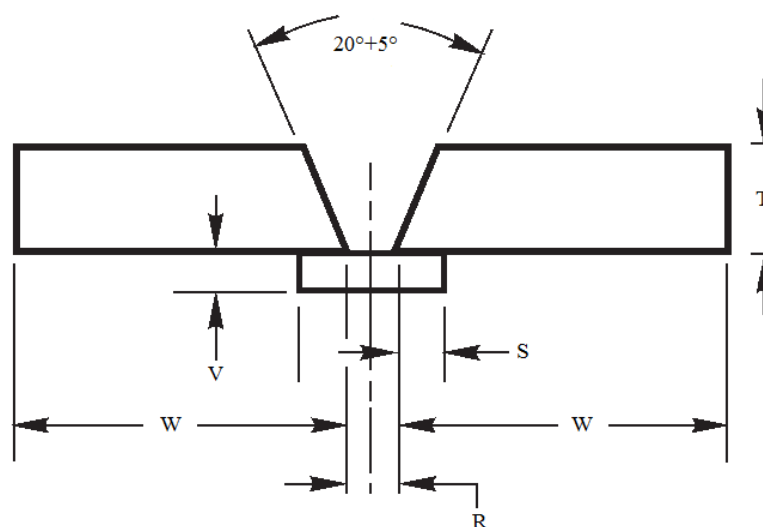


Figura 4.10: Montaje de la probeta de soldadura con ranura [41].

La **tabla 4.12** muestra las dimensiones establecidas para esta probeta, tomando como referencia el electrodo de diámetro 3.2 mm.

Tabla 4.12: Dimensiones establecidas para la probeta.

Dimensión (mm.)	Descripción	Medida (para $\phi_n = 3.2$ mm.)
T	Espesor de la plancha	13.0
S	Solape del respaldo	6
V	Espesor del respaldo	6
W	Longitud hasta la raíz	125
R	Abertura de la raíz	13

Para establecer los parámetros adecuados, se empleará un PQR establecido por la empresa NEXSOL.

4.6 Registro de calificación del procedimiento

La AWS define un Registro de calificación del Procedimiento (PQR) como un registro de las variables de soldadura que se utilizan durante el proceso de soldadura y de los resultados de pruebas realizadas en las piezas soldadas, para asegurar que el procedimiento va a producir un producto aceptable.

Las variables esenciales y resultados de la calificación de los procedimientos de soldadura se registran en un PQR. El formato para la elaboración del PQR debe ser conforme a lo que se establece en el código AWS D1.4/D1.4M. El contratista debe presentar a NEXSOL y conservar el PQR original sin modificación. Un PQR contiene la información acerca del proceso de soldadura a emplear, parámetros de soldadura, características del material base y material de aporte.

La calificación de los procedimientos de soldadura debe efectuarse por medio de las pruebas indicadas en la normativa de referencia. Las pruebas destructivas realizadas a los especímenes deben ser realizadas por un laboratorio de pruebas reconocido. Las variables a considerar fueron las siguientes:

Tipo de junta	: Bisel (25°).
Características eléctricas	: CC (+).
Posición de soldadura	: Plano.
Espesor de la plancha	: 12.5 mm.
Temp. precalentamiento	: 0° - 50°
Temp. entre pases	: 50 °C aprox.
Material base	: SAE 1008.
Material de aporte	: SAE 1008.

Para un acero SAE 1008, la composición química se muestra en la **tabla 4.13**, donde se observa que su bajo contenido de carbono no permitirá la formación de fases duras en la soldadura.

Tabla 4.13: Composición química de un acero SAE 1008

Elemento	Peso (%)
C _{max}	0.10
Mn	0.25 – 0.50
P _{max}	0.04
S _{max}	0.05

La **tabla 4.14** muestra los rangos típicos de amperaje empleados para los electrodos fabricados en esta tesis.

Tabla 4.14: Rangos típicos de amperajes.

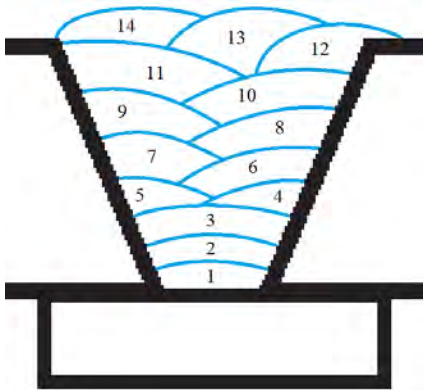
ϕ_n (mín.)	E 6010, E 6011	E 6012	E 6013
1.6	–	20 – 40	20 – 40
2.0	–	25 – 60	25 – 60
3.2	75 – 125	80 – 140	80 – 130
4.0	110 – 170	110 – 190	105 – 180
5.0	140 – 215	140 – 240	150 – 230
6.0	210 – 320	250 – 400	250 – 350
8.0	275 – 425	300 – 500	320 – 430

Todas las probetas se soldaron en corriente continua positiva (CC +) y en posición horizontal, ya que se obtiene mayor operatividad.

La variación de temperatura es importante para evitar el choque térmico y por ende la formación de fisuras en el cordón de soldadura.

Los electrodos fueron evaluados por un soldador certificado con el fin de observar las características de la junta y posteriormente realizar los ensayos exigidos por la especificación AWS. Los parámetros de soldadura empleados para el lote 106, lote 114 y lote 115 se muestran en la **tabla 4.15**.

Tabla 4.15: Parámetros de soldeo para los tres lotes.

Pase	Amperaje	Temperatura (°C)	Detalle de la junta
1	140	0 – 50	
2	140	50	
3	140	50	
4, 5	125	50	
6, 7	120	50	
8, 9	120	50	
10, 11	115	50	
12 – 14	110	50	

La **tabla 4.16** muestra los resultados de los electrodos soldados y sus características principales de acuerdo al PQR establecido.

Tabla 4.16: Características principales de los electrodos aceptados.

Características	Lote 106	Lote 114	Lote 115
Encendido	Fácil	Fácil	Fácil
Rencendido	Fácil	Fácil	Fácil
Estabilidad del arco	Buena	Buena	Buena
Remoción de escoria	Fácil	Fácil	Fácil
Salpicaduras	Normal	Excesivo	Excesivo
Penetración	Poca	Media	Media
Humectabilidad	Buena	Buena	Buena
Fluidez del metal	Buena	Buena	Buena
Fluidez de escoria	Buena	Buena	Buena

Se observa que el lote 106 tiene características de un electrodo rutílico, mientras que los lotes 114 y 115 tienen características de un electrodo celulósico; se procede entonces a realizar los ensayos de conformidad.

4.7 Ensayos de conformidad

Estos ensayos tienen el objetivo de asegurar que el cordón de soldadura sea de calidad. Para ello la norma AWS versa sobre una serie de ensayos, dentro de ellos se tienen los siguientes:

- a) Análisis químico.
- b) Ensayo de Ultra Sonido.
- c) Ensayos mecánicos [34].

La **figura 4.11** muestra los principales ensayos mecánicos para evaluar la soldadura según la especificación AWS.

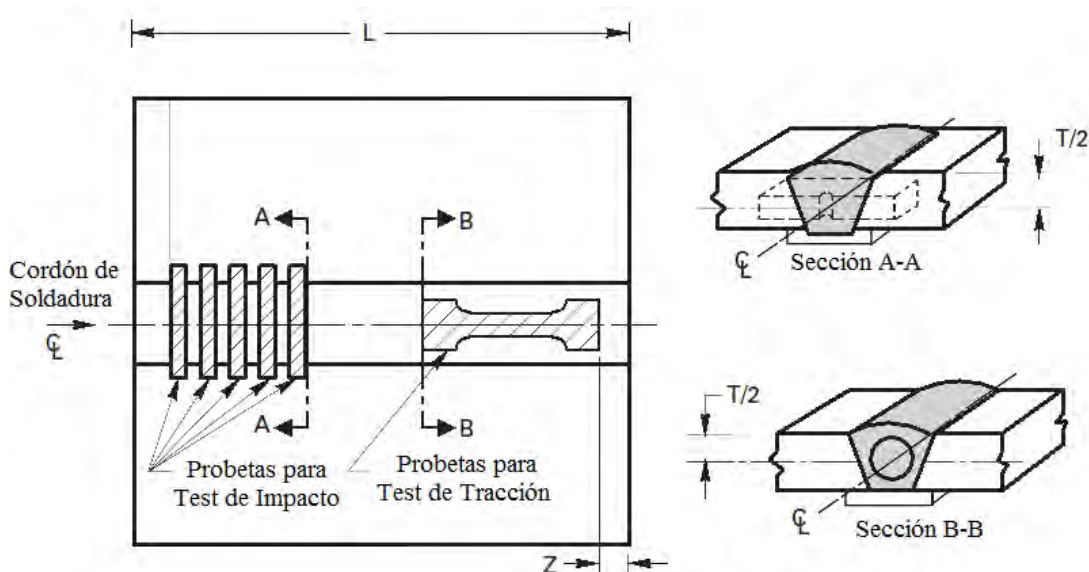


Figura 4.11: Principales ensayos mecánicos para evaluar la soldadura.

Como se puede observar en la **figura 4.11**, las probetas para los ensayos deben ser seleccionadas de tal manera que la sección metálica a ensayar corresponda al cordón de soldadura. Con esta especificación, se procede a explicar los ensayos realizados a la soldadura. Cabe mencionar que el análisis químico se realizó en paralelo a los otros ensayos, ya que no se requería una junta en "V", sino depositar el material sobre la superficie de la plancha.

4.7.1 Análisis químico

Este análisis se realiza para conocer la composición química del material de aporte, ya que ligeras variaciones repercuten en las propiedades mecánicas de la unión soldada. El ensayo consiste en formar un depósito de soldadura, conocido como “pad”, sobre una plancha del material base. Este pad es formado por varios cordones de soldadura y su altura depende de la cantidad de capas que se aplican sobre el depósito anterior. La **figura 4.12** muestra la probeta para el análisis químico.

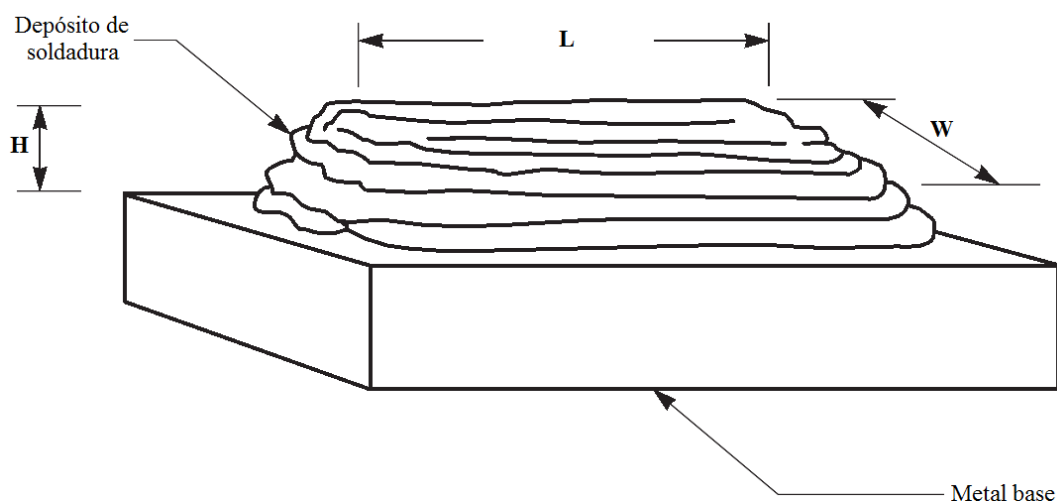


Figura 4.12: Probeta para el análisis químico.

Para obtener las muestras, se limpió una plancha de 12 mm de espesor en la superficie donde se va a depositar el cordón de soldadura. Se soldó en posición plana empleando 4 electrodos por capa y variando el amperaje de trabajo según lo establecido en la **tabla 4.14**; la escoria se removió en cada pasada. Los pads formados tenían una longitud “L” entre 80 y 100 mm, un ancho “W” de 38 mm y una altura “H” de 19 mm; de esta última, se tomaron 15 mm contados desde arriba para realizar el análisis químico.

Se extrajeron virutas del pad empleando un taladro con una broca de 10 mm. Esta muestra se llevó a un laboratorio para su análisis, por medio de ICP.

4.7.2 Ensayos no destructivos por ultra sonido

Este ensayo no destructivo proporciona información acerca de posibles discontinuidades internas y superficiales que se generan al finalizar el proceso de soldadura, como son su ubicación, sus dimensiones y su cantidad.

La designación ASTM E 164 [35] versa sobre los métodos de aplicación de este ensayo en soldaduras. Esta aplicación se basa en la reflexión del ultrasonido (oscilaciones sonoras con frecuencias comprendidas entre 01 y 20 MHz) en las discontinuidades del material en que se propagan, lo que permite la detección y evaluación de las mismas, siendo especialmente adecuado para la detección de discontinuidades que presentan superficies perpendiculares al haz ultrasónico.

Para el ensayo de ultrasonido se hace uso de cristales piezoeléctricos o de materiales cerámicos ferromagnéticos contenidos en los palpadores. Las ondas ultrasónicas son generadas por un cristal o un cerámico piezoeléctrico denominado transductor y que tiene la propiedad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

Al ser excitado eléctricamente el transductor vibra a altas frecuencias generando ultrasonido. Las vibraciones generadas son recibidas por el material que se va a inspeccionar, y durante el trayecto la intensidad de la energía supersónica se atenúa exponencialmente con la distancia del recorrido. Al alcanzar la frontera del material, el haz sónico es reflejado, y se recibe el eco por otro (o el mismo) transductor. Su señal es filtrada e incrementada para ser enviada a un osciloscopio de rayos catódicos.

La **figura 4.13** muestra los métodos de cálculo de distancia y dimensiones de una discontinuidad.

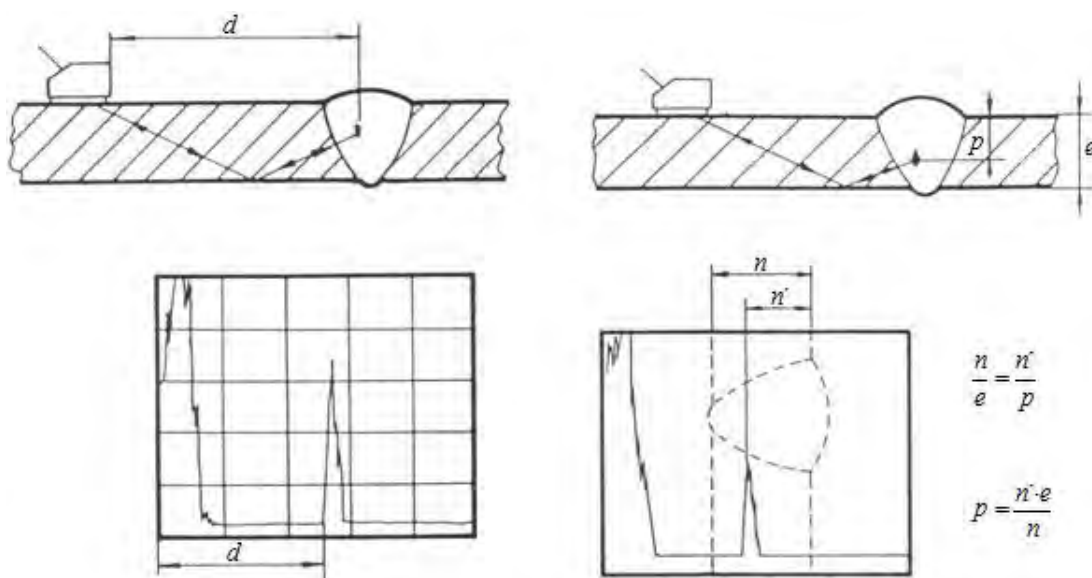


Figura 4.13: Métodos de cálculo de distancia y dimensiones de una discontinuidad.

Para este ensayo, las planchas soldadas de acuerdo al PQR establecido fueron limpiadas con cepillo metálico para eliminar la escoria.

El ensayo se realizó sobre la cara "A" y siguiendo un movimiento en zig zag para barrer la mayor cantidad del área posible, como se muestra en la **figura 4.14**.

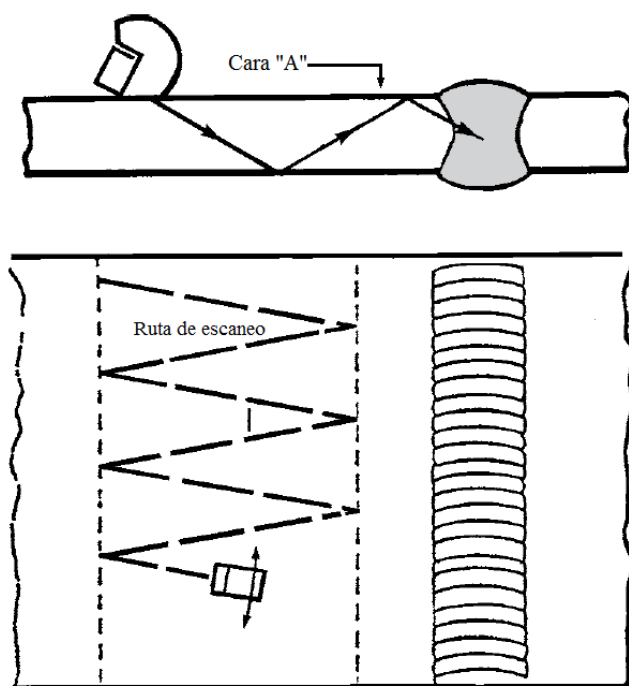


Figura 4.14: Método de escaneo por ultrasonido.

4.7.3 Ensayo de tracción

La designación ASTM E 8 [36] define el ensayo de tracción como un ensayo mecánico donde se somete una probeta normada de un material determinado a una carga medida hasta ocasionar su ruptura.

Son muchos los dispositivos de sujeción que se utilizan para transmitir la fuerza medida aplicada por la máquina a las probetas. Para asegurar un esfuerzo de tracción axial dentro de la longitud de calibre, el eje de la probeta debe coincidir con la línea central de las cabezas de la máquina de ensayo. Cualquier desviación puede introducir esfuerzos de flexión que no están incluidos en el cálculo de la tensión normal (fuerza dividida por área de sección transversal).

La **figura 4.15** muestra el esquema para el ensayo de tracción con el equipo necesario para realizar dicha prueba.

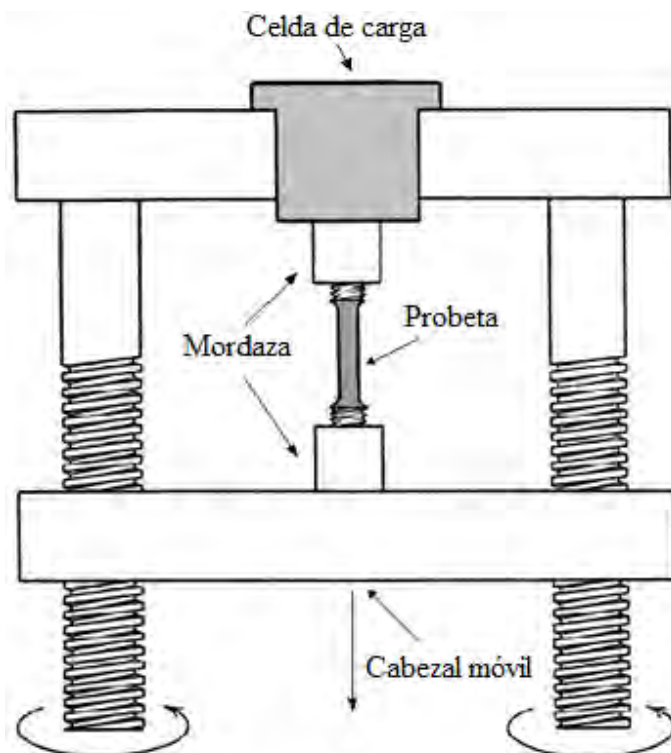


Figura 4.15: Máquina para el ensayo de tracción.

Las dimensiones de las probetas circulares seleccionadas para este trabajo se observan en la **figura 4.16**. Después de maquinar las probetas, se les hace unas marcas para poder conocer la elongación producto del ensayo.

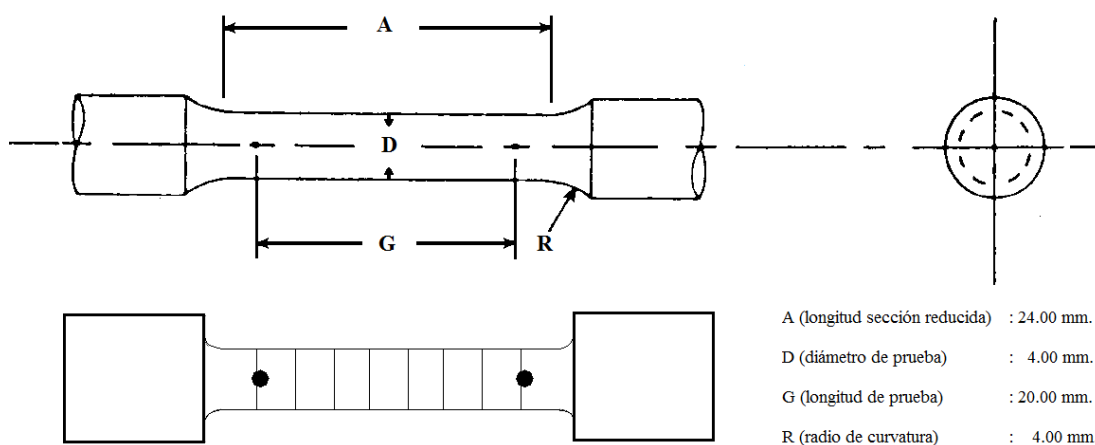


Figura 4.16: Probeta para el ensayo de tracción con sus respectivas medidas.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica, empleando el equipo Alfred J – Amsler. Como resultado del ensayo, se obtiene una gráfica tensión – alargamiento, que se muestra en la **figura 4.17**.

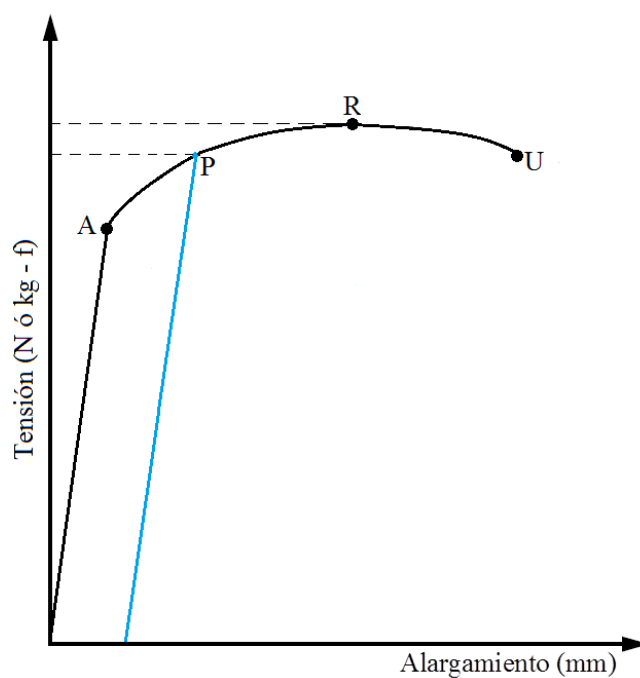


Figura 4.17: Gráfica tensión – alargamiento.

El ensayo proporciona la siguiente información de la soldadura:

a) Límite Elástico Convencional al 0.2%

Es el esfuerzo que es necesario aplicar a una probeta para que en un tiempo de 10 segundos se obtenga una deformación del 0.2% de la longitud inicial (l_0). Se calcula de la **figura 4.17** dividiendo el valor de la fuerza en “P” entre la sección transversal inicial de la probeta:

$$R_{P,0.2\%} = \frac{F_P}{S_0} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

b) Resistencia a la tracción

Es la carga máxima que resiste la probeta antes de romperse. Se calcula de la **figura 4.17** dividiendo el valor de la fuerza máxima “R” entre la sección transversal inicial de la probeta:

$$R_R = \frac{F_R}{S_0} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

c) Elongación

Es la diferencia entre la longitud de prueba (G_f) de la probeta después de fracturarse y su longitud inicial de prueba (G_0), expresada como porcentaje respecto a su longitud inicial. Se mide colocando los extremos de la muestra fracturada y tomando medida desde las marcas elaboradas después del maquinado:

$$El(\%) = \left(\frac{G_f - G_0}{G_0} \right) 100\% \quad (\text{Ec. 4.9})$$

4.7.4 Ensayo de impacto

La designación ASTM E 23 [37] define el ensayo de impacto como una prueba dinámica a velocidades muy elevadas de deformación, que determina la cantidad de energía absorbida por un material hasta su fractura. Para tal fin, se emplea una máquina que trabaja de acuerdo al principio del péndulo simple, para fracturar un espécimen entallado en forma de V, de un solo golpe. La **figura 4.18** muestra el principio del péndulo simple que emplea la máquina para el ensayo de impacto y las variables que intervienen en su realización.

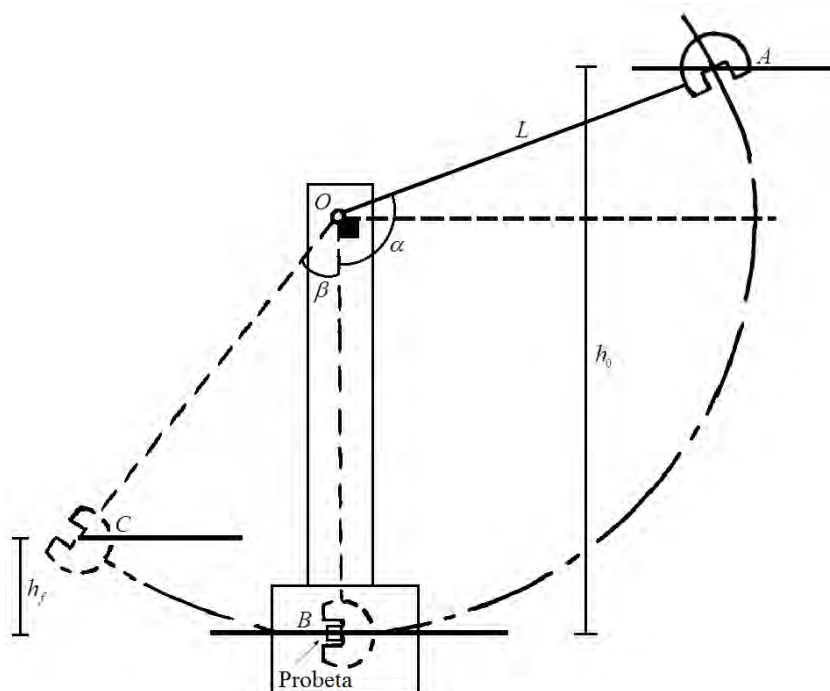


Figura 4.18: Medición del ensayo de impacto.

Inicialmente, el hacha de masa “ M ” que se encuentra acoplada al extremo del péndulo de longitud “ L ” en la posición “ A ”, se deja caer desde una altura “ h_0 ”, mediante la cual se controla la velocidad de aplicación de la carga al momento del impacto. La fractura de la probeta se produce en la posición “ B ” y como producto de esta fractura, el péndulo pierde velocidad hasta llegar a la posición “ C ”, donde la velocidad es nula.

La Designación ASTM E 23 define las medidas para el espécimen tipo A, como se muestra en la **figura 4.19**.

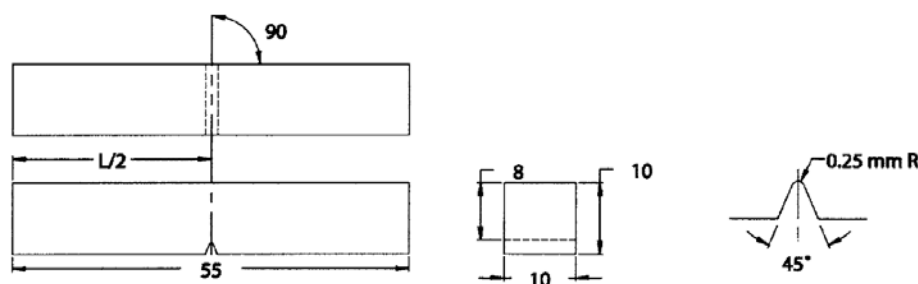


Figura 4.19: Especimen para el ensayo de impacto.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de la FIGMM, empleando el equipo “*Veb Werkstoffprufmaschinen Leipzig*”. El ensayo proporciona la siguiente información de la soldadura:

a) *La energía absorbida por el espécimen.*

Este valor puede ser calculado realizando un balance de energía total entre las posiciones A y C. Dicha energía total se denomina energía mecánica (E_M), la cual se define como la suma de la energía cinética y potencial. Por tanto, al remplazar en las anteriores, la energía absorbida por la probeta (E_a) es la diferencia entre las energías mecánicas entre los puntos “A” y “C”; como en esos puntos la energía mecánica es solo función de la energía potencial, la energía absorbida se calcula como:

$$E_a = MgL(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Un valor más exacto lo proporciona la lectura de la escala de la máquina de impacto, que ha sido corregida para considerar las pérdidas de energía por resistencia del aire o por fricción.

b) *El porcentaje de fractura de dúctil.*

Los mecanismos de fractura suelen clasificarse como dúctiles y frágiles según la deformación plástica que acompaña a la rotura. La fractura dúctil ocurre después de una intensa deformación plástica y se caracteriza por una lenta propagación de la grieta. La fractura frágil se produce a lo largo de planos cristalográficos llamados planos de fractura y tiene una rápida propagación de la grieta. Después del ensayo, se revisa la superficie y se analiza el tipo de fractura que presenta.

La temperatura de trabajo tiene un marcado efecto en este ensayo ya que, en general, el aumento de temperatura favorece la deformación plástica, mientras que su disminución favorece la fractura. Los materiales que poseen una estructura BBC (como los aceros), exhiben un comportamiento de transición entre una fractura dúctil y una fractura frágil, que depende de la temperatura. Esta temperatura se denomina temperatura de transición (T_R) y determinada mediante una serie de ensayos de impacto a diferentes temperaturas, donde la temperatura de transición se toma como el punto donde el 50% de la fractura es frágil. La **figura 4.20** muestra la variación de la energía absorbida con la temperatura.

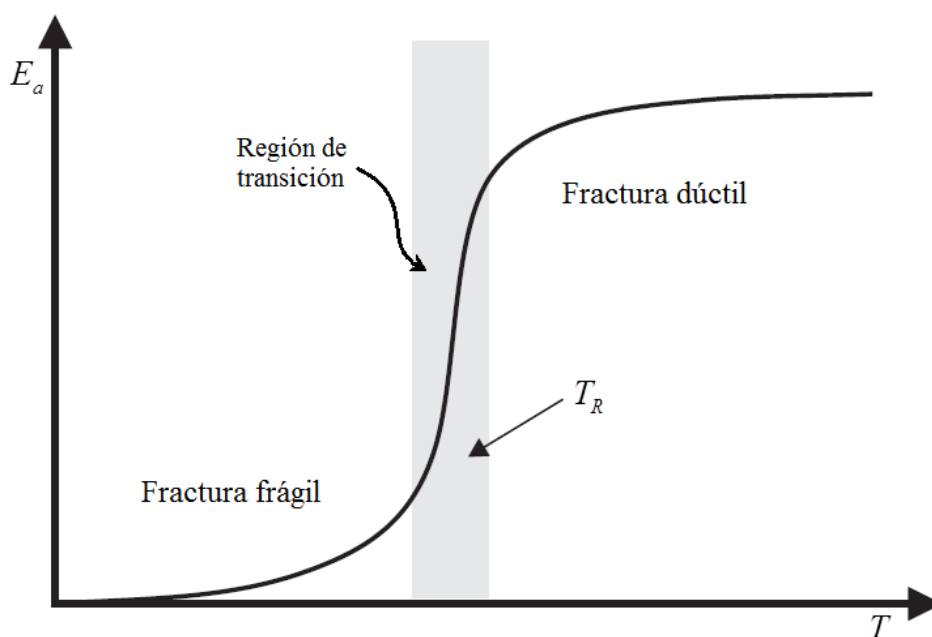


Figura 4.20: Variación de la energía absorbida con la temperatura.

El método más sencillo para calcular el porcentaje de área dúctil del cordón de soldadura es midiendo el ancho y el largo de la zona brillante de la probeta, como se aprecia en la **figura 4.21**.

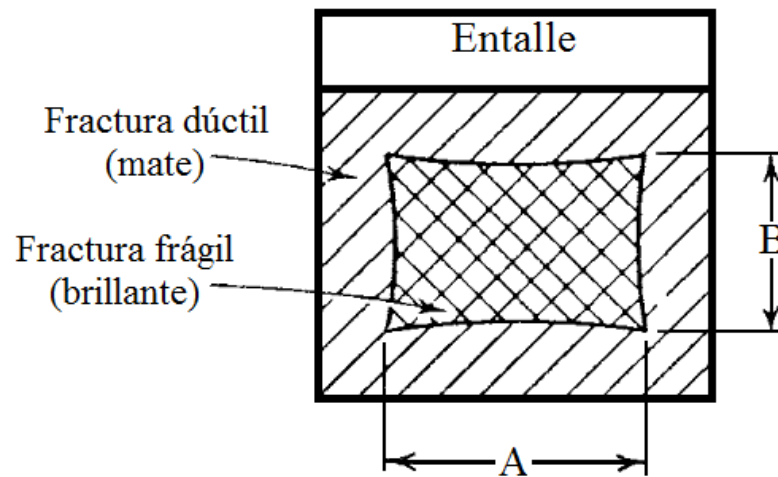


Figura 4.21: Sección transversal de la probeta después del ensayo de impacto.

Entonces, el porcentaje de área dúctil se calcularía:

$$F_D (\%) = \left[\frac{80 - A \cdot B}{80} \right] \cdot 100\% \quad (\text{Ec. 4.11})$$

4.7.5 Ensayo de dureza Rockwell

La designación ASTM E 18 [38] define la dureza Rockwell como un método de ensayo por indentación mediante el cual, con el uso de durómetro calibrado, se fuerza un indentador contra la superficie del material a ser ensayado para luego medir la profundidad obtenida bajo condiciones específicas de carga. El indentador puede ser cónico – esferoidal de diamante o de bola de carburo de tungsteno (o acero endurecido). La **figura 4.22** muestra la determinación de la dureza Rockwell empleando un indentador cónico-esferoidal de diamante.

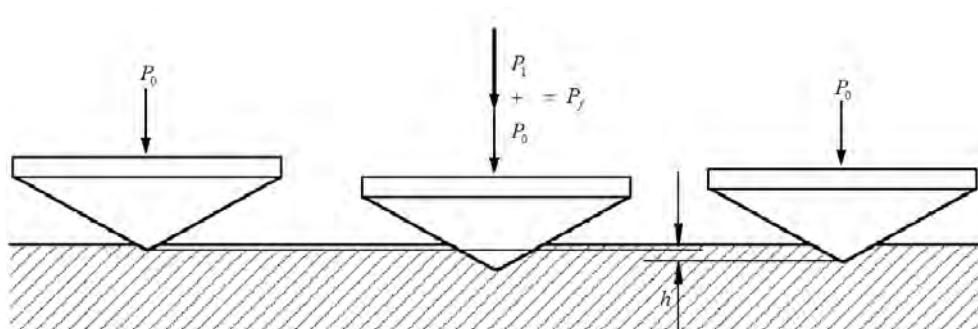


Figura 4.22: Medición de la dureza Rockwell.

Inicialmente, el indentador penetra un poco en la superficie de la probeta bajo la acción de la carga previa “ P_0 ”, la cual se mantiene hasta el final del ensayo. Después, se incrementa la fuerza en el indentador añadiendo una carga denominada carga adicional “ P_1 ”, alcanzando así la carga total “ P_f ”, que se mantiene por un tiempo determinado; se retira luego la carga P_1 ocasionando que ocurre una recuperación elástica en la probeta, siendo posible la medición de la profundidad de penetración “ h ” (en mm), la cual determina el número de dureza Rockwell (HR) mediante la siguiente dependencia:

$$\text{Cono diamante } HR = 100 - \frac{h}{0.002} \quad (\text{Ec. 4.12})$$

$$\text{Bola de acero } HR = 130 - \frac{h}{0.002} \quad (\text{Ec. 4.13})$$

En la práctica no hay necesidad de usar estas fórmulas, ya que los indicadores de las máquinas de Rockwell de manera automática realizan estas operaciones mostrando directamente el número de dureza en sus diales. Las cargas aplicadas se muestran en la **tabla 4.17**.

Tabla 4.17: Cargas aplicadas para el ensayo de dureza Rockwell.

Cargas (Kg – f)		
P0	P1	P _f
10	50	60
10	90	100
10	140	150

A partir de las combinaciones posibles de distintos indentadores y cargas, se definen quince escalas diferentes de durezas Rockwell. Dentro de estas escalas, las más difundidas son las escalas B y C. Las características de ambas se muestran en la **tabla 4.18**.

Tabla 4.18: Características de las escalas B y C

Escala	Indentador	P _f (Kg – f)	Color de escala	Campo de aplicación
B	bola de φ 1/16"	100	rojo	35 a 100 HRB
C	diamante	150	negro	20 a 71 HRC

La escala Rockwell B es empleada cuando se requiere medir la dureza en aceros blandos o de construcción, así como en metales no ferrosos (aleaciones de cobre, aluminio, etc.). La escala Rockwell C es empleada cuando se requiere medir la dureza en aceros duros, superficies templadas, carburos cementados, etc.

Con este ensayo se pretende analizar el tamaño de la ZAC mediante un barrido de dureza, empleando el Durómetro Rockwell del Laboratorio de la FIGMM.

4.7.6 Ensayo de Doblado

El ensayo doblado (flexión) es definido por la designación ASTM E 190 [39] como una prueba guiada que determina la ductilidad de la soldadura. Esta prueba es de suma importancia, ya que existen algunos defectos que no son detectados por los END (ultrasonido o rayos X) y que pueden aparecer en la superficie de la probeta cuando se somete a esfuerzos localizados progresivos.

Según la designación ASTM 290 [40], la prueba de doblado guiada se realiza mediante el apoyo de la probeta sobre piñones o rodillos colocados cerca de cada extremo de la misma, a la que se le aplica una fuerza por medio de otro piñón o rodillo en el medio de los dos soportes, como se muestra esquemáticamente en la **figura 4.23**, hasta que se forme la curva deseada. Ninguna fuerza se aplica directamente a la cara exterior de la curva.

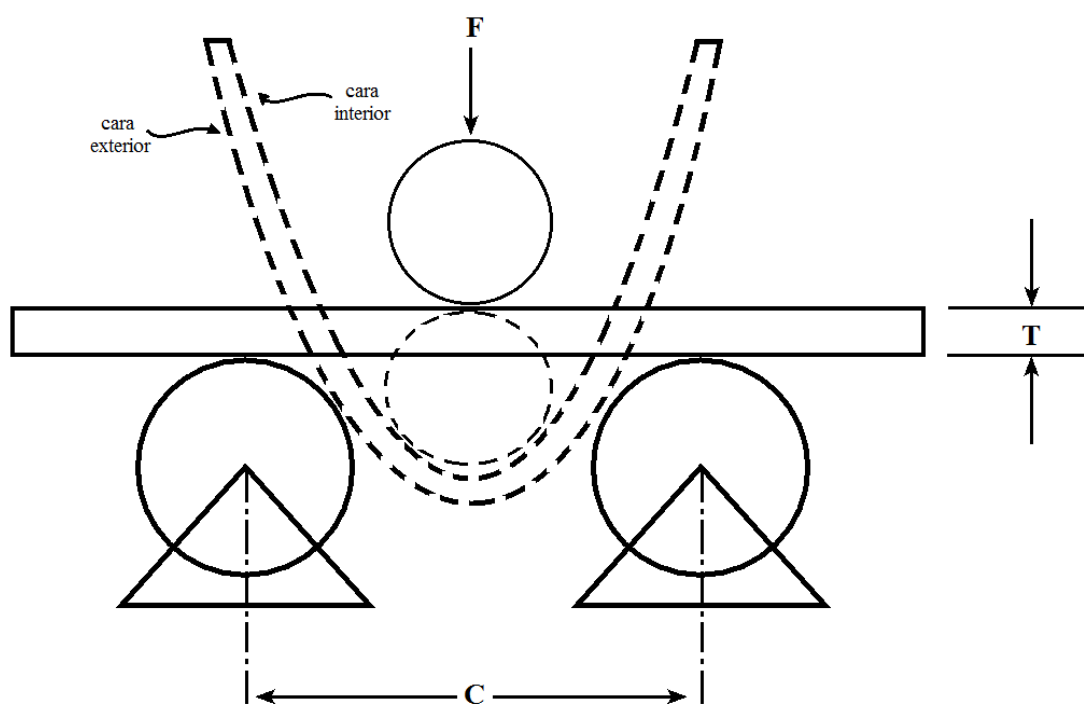


Figura 4.23: Medición del ensayo de doblado.

Para este ensayo se tomaron tres probetas de la plancha. La selección de las mismas se observa en la **figura 4.24**.

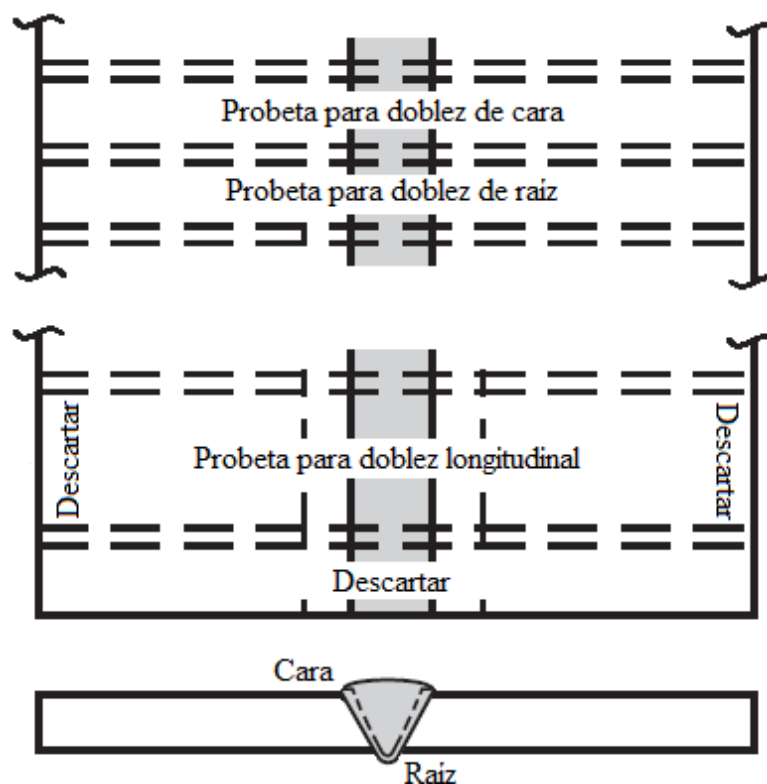


Figura 4.24: Selección de probetas para el ensayo de doblado.

- La probeta para el doblado de cara se ensayó sobre la raíz.
- La probeta para el doblado de raíz se ensayó sobre la cara.
- La probeta para el doblado longitudinal se ensayó sobre la raíz y a lo largo del cordón de soldadura.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Mecánica, empleando el equipo Alfred J – Amsler con cabezal modificado.

Con las probetas maquinadas se inició el ensayo, colocando la probeta sobre los apoyos. Se aplica una fuerza que aumenta paulatinamente hasta que la probeta se dobla completamente (180°) o comienzan a aparecer las primeras grietas; si la probeta se rompe durante el ensayo, se concluye que la soldadura no es aceptable.

Finalizado el ensayo, se examinó la cara exterior (superficie convexa) de la probeta doblada en busca de grietas o irregularidades en la superficie. Si la probeta se dobló completamente y no presenta grietas, la soldadura es aceptable.

En el caso de encontrarse una grieta, la soldadura es aceptable cuando la medida de esa grieta en la superficie sea menor a 1/8" o cuando un grupo de grietas zonales tengan una longitud combinada que no exceda dicha medida.

Cualquier grieta en los límites de la probeta no se considera un fallo. Las fracturas que se producen en las esquinas de la parte doblada no se consideran significativas a menos que excedan el tamaño especificado (1/8").

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados del análisis químico

Los resultados del análisis químico del lote 106, lote 114 y lote 115 se observan en la **tabla 5.1**.

Tabla 5.1: Resultados del análisis químico

Producto	%C	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Si	%S
Lote 106	0.11	0.71	0.03	0.04	0.01	0.08	0.43	0.015
Lote 114	0.07	0.64	0.04	0.03	0.01	0.06	0.31	0.012
Lote 115	0.09	0.54	0.04	0.03	0.01	0.07	0.20	0.013
AWS A5.1: E 6010 E 6011 E 6012 E 6013	0.20	1.20	0.30	0.20	0.30	0.08	1.00	No especifica

Se observa que los tres lotes cumplen con la especificación internacional AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M para el análisis químico de los electrodos celulósicos y rutílicos.

5.2 Resultados del END por ultra sonido

La **figura 5.1** muestra la forma de escaneo de los tres lotes, todos sobre la cara "A" de la unión soldada.

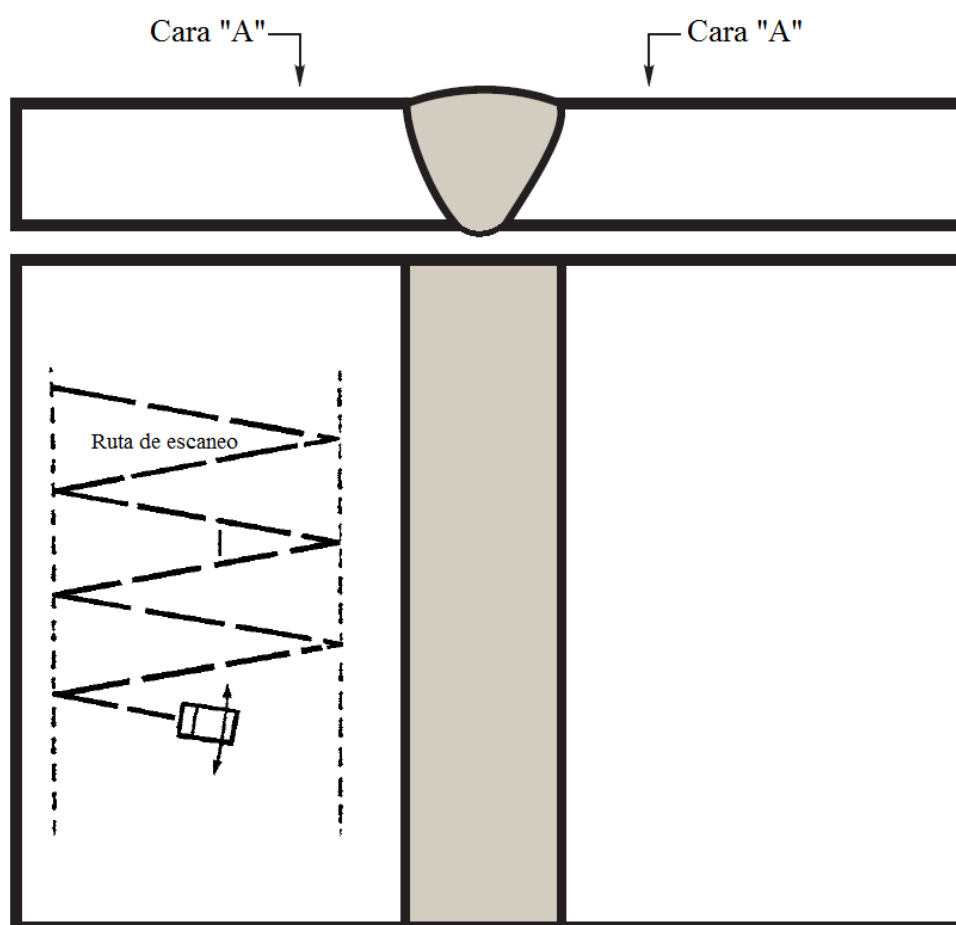


Figura 5.1: Método de escaneo de la soldadura.

Se empleó un equipo de ultrasonido MITECH – MFD510B con una frecuencia de 2.25 MHz y manipulado por un técnico certificado.

En ninguno de los caso se reportaron discontinuidades significativas, por tanto los tres lotes cumplen con la especificación internacional AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M para el análisis por ultrasonido de los electrodos celulósicos y rútilicos.

5.3 Resultados del ensayo de tracción

Las longitudes de prueba medidas al inicio y al final de ensayo de tracción para el lote 106, lote 114 y lote 115 se observan en la **tabla 5.2**. Con estas medidas se calcula también la elongación de la soldadura.

Tabla 5.2: Longitudes de prueba.

Producto	G ₀	G _F	Elongación (%)
Lote 106	20.29	26.20	29.11
Lote 114	20.32	24.89	22.49
Lote 115	20.31	26.67	31.32

Los esfuerzos fueron calculados de la gráfica obtenida del ensayo; los resultados se resumen en la **tabla 5.3**.

Tabla 5.3: Resultados del ensayo de tracción.

Producto	R. fluencia (MPa)	R. Máxima (MPa)	Elongación (%)
Lote 106	473	540	29.11
Lote 114	479	567	22.49
Lote 115	468	574	31.32
AWS A5.1: E 6010			22.00
E 6011			22.00
E 6012	330	430	17.00
E 6013			17.00

Se observa que los tres lotes cumplen con la especificación internacional AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M para el ensayo de tracción de los electrodos celulósicos y rutílicos.

5.4 Resultados del ensayo de impacto

Se realizaron pruebas a diferentes temperaturas (20 / 0 / -20 / -30 °C) empleando hielo seco y pinzas para colocar las probetas en la máquina.

Los resultados del ensayo de impacto del lote 106, lote 114 y lote 115 para electrodos celulósicos se observan en la **tabla 5.4**.

Tabla 5.4: Resultados del ensayo de impacto para electrodos celulósicos.

Producto	Temperatura (°C)	E _a promedio (J)
Lote 106	- 30	22.1
Lote 114	- 30	84.4
Lote 115	- 30	30.9
AWS A5.1: E 6010 E 6011	- 30	27.0

Se observa que para los electrodos celulósicos, el lote 106 posee un valor menor al establecido por la especificación, por lo tanto este lote no se adecua a dicho tipo de electrodos.

En el caso de los electrodos rútilicos, la norma AWS no especifica los valores mínimos de energía absorbida, debido a que este tipo de electrodos tiene muchas clasificaciones (rutil – ácido/básico/celulósico/etc.), por lo tanto se buscó otras normas que nos proporcionen los rangos necesarios para validar estos electrodos.

Es así que se consultó con la norma DIN/DVS que clasifica nuestro electrodo como rutil – celulósico. Los resultados del ensayo de impacto del lote 106, lote 114 y lote 115 para electrodos rútilicos, según esta norma, se observan en la **tabla 5.5**.

Tabla 5.5: Resultados del ensayo de impacto para electrodos rútilicos según la especificación internacional DIN/DVS.

Producto	Temperatura (°C)	E _a promedio (J)
Lote 106	0	47.0
Lote 114	0	110.0
Lote 115	0	45.0
DIN/DVS: E 6012 E 6013	0	47.0

Se observa que el lote 115 no cumple con esta especificación. Pero no se puede descartar este electrodo aún, ya que la norma DIN es muy exigente. Este resultado nos indica que probablemente el lote 106 cumpla con la especificación AWS y que el lote 115 no la cumpla; además nos indica que el lote 114 cumple con la norma DIN/DVS.

Debido a estos resultados, se consultaron especificaciones de diferentes fabricantes, escogiéndose a Oerlikon como referencia. Los resultados del ensayo de impacto del lote 106, lote 114 y lote 115 para electrodos rútilicos, según este fabricante, se observan en la **tabla 5.6**.

Tabla 5.6: Resultados del ensayo de impacto para electrodos rútilicos según el fabricante Oerlikon.

Producto	Temperatura (°C)	E _a promedio (J)
Lote 106	20	98.6
Lote 114	20	131.9
Lote 115	20	115.8
Oerlikon: E 6012 E 6013	20	80.0

Se observa que los tres lotes cumplen con la especificación de Oerlikon; como este fabricante ha tomado esta información de ediciones anteriores de la norma AWS, se concluye que los tres lotes cumplen con la especificación para este tipo de electrodos.

5.5 Resultados del ensayo de dureza

Los resultados del ensayo se observan en la **tabla 5.7**.

Tabla 5.7: Resultados del barrido de dureza.

Punto	M10	M12	M14
1	67.0	68.0	71.0
2	69.0	67.0	71.0
3	73.0	68.0	69.0
4	71.0	68.0	69.5
5	73.0	68.0	70.0
6	73.5	67.0	72.0
7	74.0	69.0	71.0
8	74.0	69.0	69.0
9	74.0	69.0	73.0
10	73.0	71.0	73.0
11	73.0	71.0	72.5
12	75.0	73.0	75.0
13	77.0	74.0	74.0
14	76.0	76.0	73.0
15	77.0	78.0	75.0
16	81.0	83.0	79.0
17	83.0	85.5	82.0
18	90.0	84.5	82.0
19	87.0	85.0	83.5
20	87.0	86.0	82.0
21	87.0	84.5	80.0
22	87.0	81.5	82.5
23	88.0	77.0	83.5
24	90.0	75.5	82.0
25	83.0	74.0	79.0
26	77.0	73.0	74.0
27	77.0	71.5	74.0
28	77.0	71.0	73.0
29	75.5	70.5	73.0
30	74.0	71.0	72.0
31	74.0	71.0	70.0
32	72.0	71.0	70.0
33	71.5	68.0	70.5
34	70.5	68.0	70.0
35	68.0	69.5	69.0
36	68.0	69.0	70.0
37	69.0	68.5	69.0

Con este barrido de dureza se calcula el tamaño de la ZAC. La **figura 5.2** muestra la gráfica de todos los puntos obtenidos.

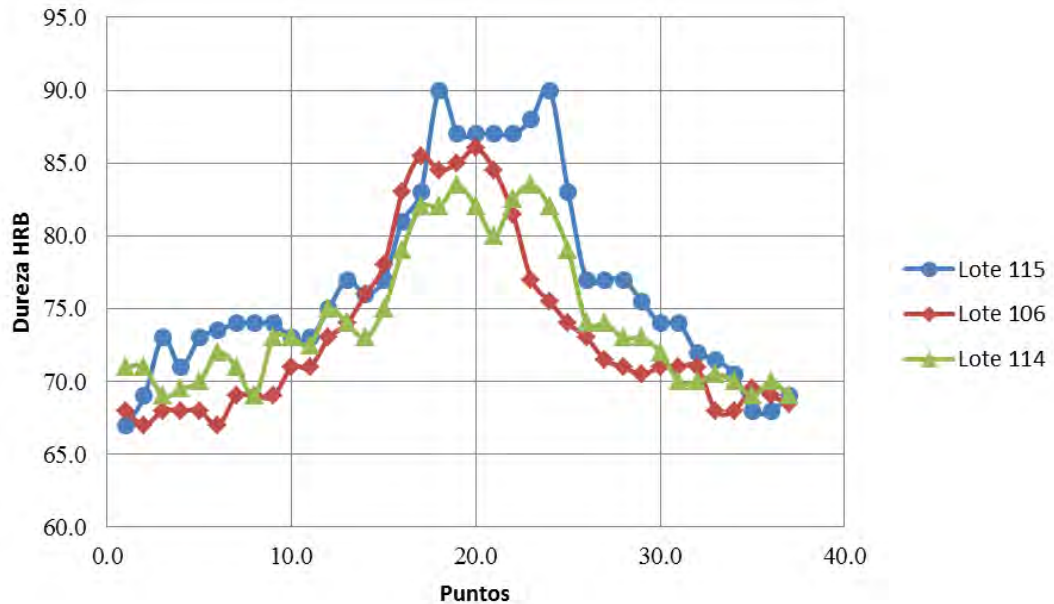


Figura 5.2: Barrido de dureza de los tres lotes.

Esta gráfica se comparó con macrografías realizadas a las planchas soldadas, haciendo un corte transversal. La **figura 5.3** muestra la sección de la probeta.

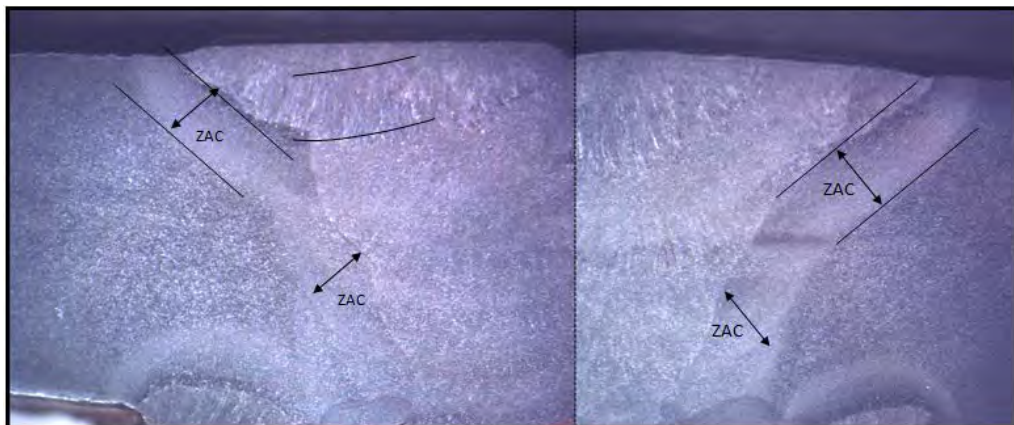


Figura 5.3: Sección transversal pulida de la probeta (los tres lotes).

De la **figura 5.2** se puede observar que el lote 106 aporta menos calor a la soldadura; las mediciones realizadas revelan que posee una ZAC que varía entre 0.8 y 1.0 mm. Los otros dos lotes poseen una ZAC que varía entre 1.0 y 1.2 mm.

5.6 Resultados del ensayo de doblez

Los resultados del ensayo de impacto del lote 106, lote 114 y lote 115 para electrodos celulósicos se observan en la **tabla 5.8**.

Tabla 5.8: Resultados del ensayo de doblez.

Producto	Ensayo	Carga (kg – f)	Ángulo (°)	Resultado
Lote 106	Doblez cara	2500	180	ok
	Doblez raíz	2500	180	ok
	Doblez longitudinal	2500	180	ok
Lote 114	Doblez cara	2500	180	ok
	Doblez raíz	2500	180	ok
	Doblez longitudinal	2500	180	ok
Lote 115	Doblez cara	2500	180	ok
	Doblez raíz	2500	180	ok
	Doblez longitudinal	2500	180	ok

Se observa que los tres lotes cumplen con la especificación internacional AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M para el ensayo de doblez de los electrodos celulósicos y rutilicos.

Finalmente se presenta, en la **tabla 5.9**, un resumen con todos los resultados de los ensayos realizados.

Tabla 5.9: Resumen de los resultados obtenidos.

Tipo de Revestimiento	Lote	Resultados PQR	Análisis químico	Ultrasonido	Tracción	Impacto	Doblez	Comentario
Celulósico	Lote 106	✘	○	○	○	✘	○	Inadecuado
	Lote 114	○	○	○	○	○	○	Adecuado
	Lote 115	○	○	○	○	○	○	Adecuado
Rutílico	Lote 106	○	○	○	○	○	○	Adecuado
	Lote 114	✘	○	○	○	○	○	Inadecuado
	Lote 115	✘	○	○	○	○	○	Inadecuado

Cabe mencionar que en el caso del lote 114 y lote 115, se recomienda revisar la formulación para poder obtener resultados satisfactorios en el PQR, en caso se desee adecuarlos como revestimientos rutílicos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo conducen a las siguientes conclusiones:

1. Se ha demostrado que la cascarilla de óxidos de hierro puede ser utilizada en la fabricación de revestimientos para electrodos de soldadura.
2. La inserción de la cascarilla en la formulación de la mezcla está restringida por el tamaño de partícula; los ensayos realizados demuestran que el tamaño de partícula adecuado debe ser menor a 300 μm .
3. El material retenido hasta la malla 50 no se desperdicia, ya que por su alto contenido de hierro metálico (40%) puede fácilmente retornar como materia prima al proceso de producción del acero, bajo condiciones adecuadas de balance metalúrgico de carga.
4. De acuerdo a los ensayos de conformidad realizados bajo la especificación internacional AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M, el lote 106 se adecua a la clase E 6012 y E 6013 (electrodos rutilicos).

5. De acuerdo a los ensayos de conformidad realizados bajo la especificación internacional AWS/ASME SFA-5.1/SFA-5.1M, el lote 114 y el lote 115 se adecuan a la clase E 6010 y E 6011 (electrodos celulósicos).

6. Entre el electrodo fabricado a partir del lote 114 y del lote 115, se observa que los resultados del ensayo de impacto para el lote 114 cumple satisfactoriamente con la norma DIN/DVS, por tanto este electrodo es de mayor calidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] López Gómez, F. A. et al. (1991) *Procedimiento para la fabricación de nuevos productos para su aplicación en la lucha contra la acidificación de suelos agrícolas y forestales*. Patente ES 2020356 A6. (Int. Cl. C09K 17/00).
- [2] Martín Hernández, M. I. (2004) *Aplicación tecnológica de un residuo siderúrgico de la industria del acero en la eliminación de metales contaminantes*. Tesis (Doctorado en Ciencias Químicas). Madrid, España. Universidad Complutense de Madrid. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Facultad de Ciencias Químicas.
- [3] Young, R. D. & Norris, D. (2004) *Process for using mill scale in cement Clinker production*. Patent US 6709510 B1. (Int. Cl. C04B 7/36).
- [4] Low, K.O. (2008) *Iron oxide pigments from mill scale*. Patent US 7347893 B1. (Int. Cl. C09C 1/24, C09C 3/00, C09C 3/04, C01G 49/02).
- [5] Meynerts, U. et al. (2012) *Briquetting of mill scale*. Patent US 2012/0017725 A1. (Int. Cl. C22B 9/10, C22B 1/24, C22B 1/14).
- [6] Kofstad, P. (1983) Oxidation Mechanisms for Pure Metals in Single Oxidant Gases, *High Temperature Corrosion*, R.A. Rapp, Ed., National Association of Corrosion Engineers, p 123-138
- [7] Paidassi, J. (1957) *Oxidation of iron in air between 700°C and 1250°C*. *Mam. Sci. Rev. Met.* **54**, pp. 569.
- [8] Sheasby, J.S. et al. (1984) *Scale growth of steels at 1200 °C: rationale of rate and morphology*. *Metal Science* **18** (3) pp 127-136.

- [9] Cabrera, N. & Mott, N.F. (1949) *Theory of oxidation of metals*. Rep. Prog. Phys, Vol. 12, pp 163 – 184.
- [10] Davis, J.R. (1997) *Heat – Resistant Materials*. ASM International. Handbook Committee, pp 591.
- [11] Gaskell, D.R. (2003) *Introduction to Metallurgical Thermodynamics*. 4th Ed., pp 618.
- [12] Kubashewski, O. et al. (1993) *Materials thermochemistry*, 6th ed., Pergamon Press, pp 363.
- [13] Yliana S. Barón et al. (2010) *Mecanismo de oxidación de un acero 1,25 Cr – 0,5 Mo wt% en aire a 600 °C*. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, **30** (1), pp 40 – 45.
- [14] ASM Metals Handbook (1987) *Corrosion*, vol. 13, 9na ed. En: Samuel A. Bradford., pp. 122 – 173.
- [15] Ramirez Cuellar, J. (2005) *Cinética de crecimiento, mecanismos de remoción y morfología del óxido de hierro en aceros laminados en una planta compacta de productos planos*. Tesis (Doctorado en Ingeniería de Materiales). México. Universidad Autónoma de Nuevo León. División de Estudios de Post – Grado. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- [16] Welding Handbook (1978) *Welding processes – arc and gas welding and cutting, brazing and soldering*, vol. 2, 7th ed. Kearns, W.H., Editor. En: J. C. Fallick et al., pp. 43 – 76.
- [17] H. Horwitz. (1997) *Soldadura Aplicaciones y Práctica*. En su: Metalurgia de la soldadura. Alfaomega. pp. 471 – 679.
- [18] Bernardos, N. (1887) *Process of and apparatus for working metal by the direct application of the electric current*. Patent 363,320.
- [19] Kjellberg, O. (1910) *Electric welding, brazing or soldering*. Patent 948,764.
- [20] ASM Metals Handbook (1993) *Welding, Brazing, and Soldering*, vol. 6, 9na ed. En: D.L. Olson et al., pp. 136 – 151.
- [21] Manual de Soldadura OERLIKON, Servicios Técnicos EXSA S.A. SETEXSA, 5ta edición, pp. 159.

- [22] Hinostroza Córdova, J. R. (2006) *Estudio de la soldabilidad del acero AISI 4340 para recuperar ejes de extrusora EX50 de alimentos precocidos*. Tesis (Título Profesional de Ingeniero Metalurgista). Huancayo, Perú. Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales.
- [23] Yarovchuk, A. V. (2005) *Effect of Ferrochrome Content on the Oxidation – reduction Processes in Welding Slags Based on Titanium Dioxide*. *Welding International* **19** (8), 651-656.
- [24] De Rissone, N. M. R. et al. (2002) *ANS/AWS A5.1-91 E6013 Rutile Electrodes: The Effect of Calcite*. *Welding Journal*. *Welding Research* 113S – 124S.
- [25] Suriam, E. (1997) *ANSI/AWS E7024 SMAW Electrode: The effect of Coating Magnesium Additions*. *Welding Journal* **76** (10), 400 – 411.
- [26] Yarovchuk, A. V. (1997) *Special features of using slightly enriched ilmenite concentrate in the coating of welding electrodes for general applications*. *Avt. Svarka* (11) 46 – 56.
- [27] Farias, J. P. (1997) *The effect of magnesium content on the arc stability of SMAW E7016-C2L/8016-C2 covered electrodes*. *Welding Journal* **76** (6) 245 – 250.
- [28] Farias, J. P. (2004) *The effect of wallastonite on operational characteristics of AWS E6013 electrodes*. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.* **26** (3).
- [29] Tuliani, S. S. et al. (1969) *Notch toughness of commercial submerged arc weld metal*. *Welding and Metal Fabrication* **37**(8) 327 – 339.
- [30] AWS WHB – 1, Chapter 4, *Welding metallurgy* (1999), pp. 89 – 124.
- [31] AWS D1.1/D1.1M (2004) *Structural Welding Code – Steel*, 19th ed. pp. 541.
- [32] Suplemento Corporación Aceros Arequipa (2006) *40 años produciendo acero de calidad internacional*. pp. 36.
- [33] Designation ASTM C 702: *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. pp. 4
- [34] Designation ASTM A 370: *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*.
- [35] Designation ASTM E 164: *Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of Weldments*.

[36] Designation ASTM E 8: *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.*

[37] Designation ASTM E 23: *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.*

[38] Designation ASTM E 18: *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.*

[39] Designation ASTM E 190: *Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds.*

[40] Designation ASTM E 290: *Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility.*

[41] SFA-5.1/SFA-5.1M: Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding

ANEXOS

ANEXO 1

Cascarilla de laminación y equipos empleados en su reducción



Foto 1.1: Cascarilla de laminación.



Foto 1.2: Serie de mallas ASTM y Ro – Tap.



Foto 1.3: Cuarteador de Rifles.



Foto 1.4: Molino de Bond.

ANEXO 2

Equipos empleados en la fabricación de los electrodos



Foto 2.1: Máquina recubridora y prensa hidráulica.



Foto 2.2: Transportador de cepillo.

ANEXO 3

Equipos empleados para los ensayos mecánicos y resultados

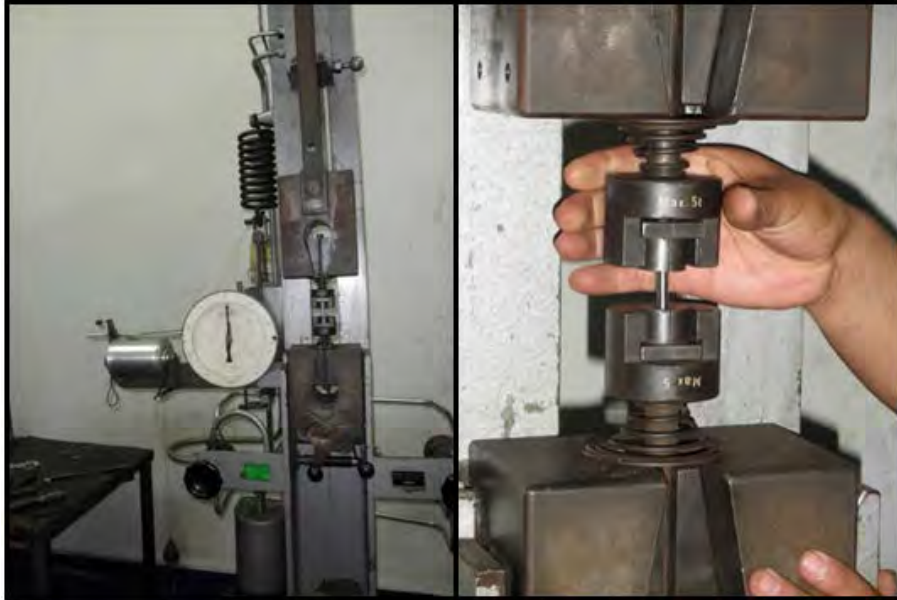


Foto 3.1: Máquina para el ensayo de tracción y probeta.



Foto 3.2: Máquina para el ensayo de impacto y probeta.



REPORTE DE ANALISIS QUIMICO ICP

CC-F-78

Edicion:01

Espectrometro Optico de Emision Atomica Mediante Plasma de Acoplamiento Inductivo

Lugar de Prueba : Laboratorio Quimico

Printing Date: 10/02/2012 04:41:49 p.m.

Method Name: Acero Steel - camara Teflon

Measure Date: 2012-02-10 16:30:45	N° Analisis				
Sample Name	Weight	Volumen	Dilution	Analista	
Muestra testigo -2	0.1507	250	1658.925000	FT	

	Al	Ar 430.010	As	B	Bi	Ca	Co
Conc 1	0.239[%]	3816240	<-0.044[%]	<-0.187[%]	<-1.354[%]	0.243[%]	0.007[%]
Conc 2	0.240[%]	3904850	<-0.044[%]	<-0.191[%]	<-1.350[%]	0.241[%]	0.006[%]
Conc Mean	0.239[%]	3860550	<-0.044[%]	<-0.189[%]	<-1.352[%]	0.242[%]	0.006[%]
Conc RSD	0.185	---	0.640	1.537	0.169	0.485	2.989
Conc SD	0.000[%]	62656.7	<0.000[%]	<0.002[%]	<0.002[%]	0.001[%]	0.000[%]

	Cr	Cu	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni
Conc 1	<0.001[%]	0.040[%]	<-0.043[%]	0.534[%]	<-0.000[%]	<-0.005[%]	6.261[%]
Conc 2	<0.000[%]	0.041[%]	<-0.043[%]	0.537[%]	<0.000[%]	<-0.003[%]	6.178[%]
Conc Mean	<0.001[%]	0.040[%]	<-0.043[%]	0.535[%]	<-0.000[%]	<-0.004[%]	6.219[%]
Conc RSD	64.689	2.136	0.211	0.325	2281.17	25.994	0.943
Conc SD	<0.000[%]	0.000[%]	<0.000[%]	0.001[%]	<0.000[%]	<0.001[%]	0.058[%]

	P	Pb	S	Si	Sn	Ti	V
Conc 1	<-0.024[%]	<0.011[%]	<-0.139[%]	<-0.033[%]	0.111[%]	<-0.007[%]	0.224[%]
Conc 2	<-0.025[%]	<0.002[%]	<-0.134[%]	<-0.055[%]	0.111[%]	<-0.007[%]	0.233[%]
Conc Mean	<-0.025[%]	<0.007[%]	<-0.136[%]	<-0.044[%]	0.111[%]	<-0.007[%]	0.228[%]
Conc RSD	2.059	88.489	2.674	35.486	0.202	3.414	2.864
Conc SD	<0.000[%]	<0.006[%]	<0.003[%]	<0.015[%]	0.000[%]	<0.000[%]	0.006[%]

Determinacion de Carbono Analista (_____)

W1(g)	W2(g)	Cc1%	Cc2%	Prom.Cc	N°Std.	Lectura Std.	Fecha Analisis

Determinacion de Azufre

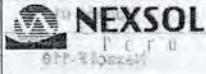
W1(g)	W2(g)	Cc1%	Cc2%	Prom.Cc	N°Std.	Lectura Std.	Fecha Analisis

Resumen

%Cr	%Cu	%Mn	%Mo	%Ni	%Si	%C	%S
						0,0072	0,0069

Analista

V° B° Responsable



Hoja de evaluación de soldadura y calificación para procesos SMAW

FINCYT - CONTRATO
N° 081-2010
Edición 01

Nexsol F-110

CONDICIONES DE SOLDABILIDAD

Código de la probeta: E6011-R
 N° Producción: 100-M008 (12)
 Especificación de Material: AS1
 Posición de Soldadura: PLANO
 Especificación del metal Aporte: E6011
 Norma: AWS D11
 Producto: _____
 Espesor de Ensamble: 12.5mm (1/2")
 Corriente de Soldadura: DCEP DCEN CA
 Temp. de Precaletamiento: 0°-50° (Seco)
 Temp. Entre pases: 50°C Aprox.
 Equipo de Soldar: INVERSORA

Proceso SMAW (✓)

Ø revestimiento _____ ø Núcleo _____
 Factor: _____ Tensión de Vacío _____
 Peso de las colillas: _____

Proceso GMAW () / Proceso GTAW ()

Gas de Protección _____ l/min _____
 Gas dew Point _____ ø Núcleo _____ Velc _____
 Alimentación _____ ø Varilla W _____
 Ø Tobera _____

ENSAYO MECANICO

Fecha de los Ensayos Mecánicos: 15. Dec. 2012

AREA: 1- 31.71 mm²
 2- _____

Posición de la Rotura: Centro
Prueba Tracción del Metal depositado.
 Tensión máxima, MPa: 540
 Fluencia, MPa: 473
 Reducción Area %: 54 Eo %: 29.11%

DOBLES

1. 6L-1012C 2. 6L-1012L OK
 3. 6L-1012R 4. _____

EXAMEN RADIOGRAFICO/ULTRA-SONIDO:

PR informe N°: _____
 PU informe N°: _____

PRUEBAS DE IMPACTO

Tamaño de espécimen: 10X10
 Temperatura de prueba: _____
 JOULES: 1. 25 2. 20 3. 24
 4. _____ 5. _____ 6. _____

PROMEDIO: 22.1
 Valor a descartar Alto: _____ Bajo: _____

Fragilidad %: 43%

DUREZA ROCKWELL: HRB

1. 85.5 2. 85.5 3. 84.5
 4. 85 5. 86 6. 84

PROMEDIO: _____

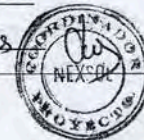
Descripcion de calidad de la Soldadura

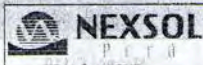
Encendido:	<input checked="" type="radio"/> Fácil / <input type="radio"/> Difícil	Tipo de transferencia	<u>rutílico</u>
Reencendido:	<input checked="" type="radio"/> Fácil / <input type="radio"/> Difícil	Penetración:	<u>poco</u> Mediana / Alta
Comp. Del revestimiento:	<u>Excentrico / poco mojado</u>	Humedabilidad:	<input checked="" type="radio"/> Buena / Mala
Estabilidad del arco:	<input checked="" type="radio"/> Buena / Mala	Fluidéz del metal:	<input checked="" type="radio"/> Buena / Mala
Remoción de escoria:	<input checked="" type="radio"/> Fácil / <input type="radio"/> Difícil	Fluidéz de escoria:	<input checked="" type="radio"/> Buena / Mala
Chisporroteo:	<input checked="" type="radio"/> Normal / <input type="radio"/> Excesivo	Aspecto del cordón:	<u>liso como rutílico</u>
Salpicaduras:	<input checked="" type="radio"/> Normal / <input type="radio"/> Excesivo		

OBSERVACION: Difícil para trabajar en la RAIZ POR RAZON ELECTRODOS SON EXCENTRICOS.
(2) BISEL: NECESITO 37° POR DE HUMECTACION Y UNA PASO SOLO EN LA RAIZ (POSIBLE LOS DOS PRIMERAS PASOS).
(3) NECESITO TRABAJAR CON CORRIENTE ALTERNAN Y EN LAS POSICIONES HORIZONTAL Y VERTICAL.
(4) NECESITO UN ASISTENTE.
(5) CARACTERISTICAS SON BUEN PARA SU APLICACION (CERCA JEROS).
 Nota: VEA DIBUJO

Fecha: _____ Técnico Soldador: GARY S. LURCH
 Firma del soldador: _____ Ing. Responsable: Juan Luis Cáceres

Ing. Luis C. Cáceres Linares
 INGENIERO METALURGISTA
 CIP. 56780





Hoja de evaluación de soldadura y calificación para procesos SMAW

Edición 01

Nexsol F-110

FINDYT - CONTRATO
N° 081-2010

PROCEDIMIENTO DE SOLDEO

N° Pase	Ø mm	Volt	Amp	Temp	Detalle de la Junta				
① 1	3,25		140	0-50°C	<p>Nota: Talon = 2,50 - 3,25 mm y ancho de CARRA de CORDON ES TRES VECES DEL DIAMETRO NUCLEO.</p>				
② 2	3,25		140	50°C aprox					
③ 3	3,25		140	50°C					
④ 4,5	3,25		125	50°C					
⑤ 6,7	3,25		120	50°C					
⑥ 8,9	3,25		120	50°C					
⑦ 10,11	3,25		115	50°C					
⑧ 12-14	3,25		110	50°C					
C	Si	Mn	Cu	S		P	Cr	Ni	Mo
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]		[%]	[%]	[%]	[%]
0.109	0.43	0.71	0.08	0.015		-	0.04	0.03	-

CONCLUSIONES:

Nosotros los que firmamos abajo, certificamos que la declaración en este registro son correctas y las pruebas de soldadura fueron preparadas, soldadas y examinadas según los requerimientos de la sección;

NORMA ANSI/AWS (AS-1) Structural Welding Code-Steel.
 IX, ASME Codigo (—) Boiler and Pressure Vessels.
 API, 1104 (—) American Petroleum Institute.
 Sociedades de Certificación (—) ABS, LR, LR
 Año

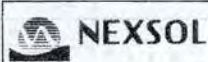


Procedimiento No. V°B°

Responsable
 Ing. Lu Linares
 INGENIERO METALURGISTA
 CIP. 66780

Fecha de ejecución : 20. NOV. 2012

Fecha culminación : 20. DIC. 2012

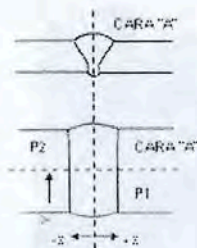


FINCYT - CONTRATO
N° 081-2010 Edición 01

**HOJA DE EVALUACIÓN DE SOLDADURA
POR ULTRASONIDO**

Nexsol F-95

REPORTE N°: 012 - 001 - UT/12



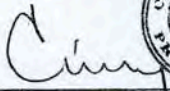
PROYECTO: PROYECTO 081 FINCT - NEXSOL
CLIENTE: NEXSOL S.R.L.
PROCEDIMIENTO: NDT-AWS-UT001-11
ELEMENTO INSPECCIONADO: PROBETA N°10
ZONAS INSPECCIONADAS: UNION SOLDADA
ESPESOR: 12.00 mm
MATERIAL: ASTM A-36
EQUIPO UTILIZADO: MITECH - MFD510B
PATRON DE CALIBRACION: V1 (IIW)
TRANSDUCTOR ANGULAR: 69.8°
FRECUENCIA: 2.25 MHz
ESCALA: 100 mm
GANANCIA PRIMARIA: 68.5dB
GANANCIA DE ENSAYO: 82.5dB
COMENTARIOS: COND. DE LA JUNTA SOLDADA: **PROBETA N°10 = ACEPTABLE**


INSPECCIÓN REALIZADA POR LA CARA "A".

ITEM	NUMERO DE INDICACION	ANGULO TRANSDUCTOR	CARA DE BARRIDO	MEDIO PASO (mm)	DECIBELES				LONGITUD (mm)	DISCONTINUIDAD			EVALUACION DE LA DISCONTINUIDAD	
					NIVEL DE INDICACION	NIVEL DE REFERENCIA	FACTOR DE ATENUACION	CLASIFICACION DE INDICACION		DISTANCIA ANGULAR (RECORRIDO DEL HAZ)	PROFUNDIDAD DESDE LA SUPERFICIE "A"	DISTANCIA (mm)		
												a		b

Nosotros, suscribimos y certificamos que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras fueron preparadas y ensayadas en conformidad con los requerimientos de la sección 6, del código AWS D1.1 - 2010. Cuadro 6.2

FECHA DEL ENSAYO: 1 de Diciembre del 2011
CONTRATISTA: NEXSOL S.R.L.
INSPECTOR: ING. JAIME GIRALDO GIRALDO - Nivel II SNT TC -1A
AUTORIZADO POR: ING. CESAR CACERES


Ing. Luis C. Cáceres Linares
 INGENIERO METALURGISTA
 DIP. 56780





INFORME DE ENSAYO DE TRACCION

Nombre de Cliente : Proyecto 081 Fincyt - Nexsol
 Referencia : Ing. Luis Cáceres
 Muestra : Metal depositado
 Reporte N° : CC-2012-007
 Fecha : 26/12/2010

Codigo N°	Ancho (Lo) mm	Ancho (Lf) mm	Sección Transversal		CARGAS		TENSIONES		Alargamiento		Reduccion Area	
			Diámetro (do) mm	Diámetro (df) mm	Fluencia kgf	Máxima kgf	Fluencia MPa	Máxima MPa	% Lo	% Ar		
M10	24.55	32.24	6.43	3.1	1550	1900	468	574	31.32%	43%		
M12	24.56	31.71	6.40	3.75	1550	1770	473	540	29.11%	54%		
M14	24.59	30.12	6.40	5.10	1570	1860	479	567	22.49%	76%		

OBSERVACIONES :

Norma de Ensayo : ASTM A 370 - 09
 Norma Calificación : AWS/ASME SFA-5-1/ SFA 5.1M
 Equipo usado :
 Temperatura de Ensayo : 25 Celcius
 Las muestras han sido suministrado por el solicitante

Prohibida la reproducción total o parcial del reporte sin la autorización escrita del Laboratorio de FIGMM
 Los resultados de este informe solo son validos para la muestra analizada.

Universidad nacional de Ingeniería - FIGMM



VoBo
 Ing. Luis C. Cáceres Limares
 INGENIERO METALURGICO
 CIP. 56780

A. Fuentes del Valle
 ALDEN SUFUENTES DEL VALLE
 INGENIERO METALURGICO
 Reg. CIP N° 60444

Fincyt - CONTRATO
 N° 081--2010