

# Comportamiento de la Resistencia al Desgaste entre Depósitos Obtenidos con Electrodo Simple y Doblemente Recubiertos

Odonel González-Cabrera<sup>1</sup>, Carlos R. Gómez-Pérez<sup>2</sup>, Lorenzo Perdomo-González<sup>2</sup>, Elizabeth Vázquez-Badillo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Información y Gestión Tecnológica de Villa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup> Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Centro de Investigaciones de Soldadura, Villa Clara, Cuba.

<sup>3</sup> Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería Mecánica, Villa Clara, Cuba.

Recibido: 05 Agosto, 2016

Aprobado: 08 Marzo, 2017

E-mails: ogonzalez@ciget.vcl.cu (OGC),  
crene@uclv.edu.cu (CRGP),  
lperdomo@uclv.edu.cu (LPG),  
evazquez@uclv.cu (EVB)

**Resumen:** Como objetivo del presente trabajo se persiguió determinar la influencia de la posición relativa de la carga de aleación en los recubrimientos de electrodos, sobre la resistencia al desgaste abrasivo. Para ello, se construyeron especialmente tres electrodos con similar composición química. Las variantes de electrodo construidas se diferenciaron por la posición de la carga de aleación respecto a la posición del recubrimiento ordinario empleado: internas, externas y homogéneas. Se realizan análisis estructurales y de composición química de los depósitos. El ensayo de desgaste aplicado consistió en la determinación de la pérdida de masa y volumen durante el ensayo de pin sobre disco. Se incluye, además, un ensayo de dureza. Del procesamiento de los análisis químicos practicados se obtienen los coeficientes de transferencia de cada uno de los elementos fundamentales de los depósitos. Como resultado se obtuvo que los electrodos con ferroaleaciones externas poseen mayor resistencia al desgaste, teniendo en cuenta las diferencias existentes entre las pérdidas de masa y volumen para las tres variantes de electrodos. Similar comportamiento ocurre con la dureza.

**Palabras clave:** Ensayo de desgaste; Dureza; Depósito de soldadura; Electrodo revestido; Doble recubrimiento.

## Wear Resistance Behavior in Deposits Obtained with Simple and Doubly Coated Electrodes

**Abstract:** The objective of this work was to determine the influence of the relative position of the alloy charge on the electrode coatings on the abrasive wear resistance. For this purpose, three electrodes with similar chemical composition were specially constructed. The electrode variants constructed were differentiated by the position of the alloy charge with respect to the position of the ordinary coating used: internal, external and homogeneous. Structural analyzes and chemical composition of the deposits were carried out. The applied wear test consisted in the determination of the loss of mass and volume during the pin-on-disk test. A hardness test is also included. The coefficients of transfer of each of the fundamental elements of the deposits are obtained from the processing of the chemical analyzes performed. As a result it was obtained that the electrodes with external ferroalloys have greater resistance to wear, taking into account the differences between the losses of mass and volume for the three variants of electrodes. Similar behavior occurs with hardness.

**Key-words:** Wear test; Hardness; Welding hardfacing; Electrode covered; Double covered electrode.

### 1. Introducción

Los electrodos revestidos se diferencian por el tipo de núcleo o de revestimiento que poseen. Evidentemente, cuando se trata de electrodos con un mismo tipo de núcleo, la única diferencia se deberá al tipo de revestimiento empleado en su confección [1]. En este caso, el tipo de revestimiento determinará las características de operación de cada electrodo, por lo que es importante conocer esas diferencias [2].

Dentro de los aspectos antes descritos, puede estimarse que la composición química del revestimiento influye de manera decisiva en la transferencia de material y la composición del baño fundido y las propiedades mecánicas de las uniones [3].

Las funciones operativas de los recubrimientos de los electrodos destinados al recargue superficial son similares a la de los electrodos destinados a la soldadura [4]. Al igual que ocurre con los fundentes para relleno superficial, el recubrimiento de los electrodos



destinados al mismo fin, pueden dividirse en dos partes constitutivas de funciones distintas: recubrimiento ordinario y carga de aleación [5]. Además, los electrodos para el relleno superficial se caracterizan por tener un mayor por ciento de elementos metálicos (ferroaleaciones) y grafito o carbono (que conjuntamente con la carga de aleación) y otra parte mayoritaria, considerada como recubrimiento ordinario [6]. Estos elementos de aleación posibilitan la formación de carburos, así como las propiedades de la matriz que se forma, dado por la distribución y las dimensiones de los carburos [7]. Se reconoce que en la soldadura con electrodo revestido la transferencia de elementos de aleación desde el electrodo hacia el baño de soldadura es el resultado de procesos metalúrgicos, a partir del aporte del núcleo metálico y del revestimiento [8] y está influenciada por los demás elementos que forman parte de este último [9]. La transferencia de elementos de aleación se realiza no solo hacia la pieza, parte también se pierde en la escoria [5]. En la transferencia de elementos de aleación hacia el baño de soldadura se debe prestar atención primero que todo a la afinidad del elemento por el oxígeno [10]. Luego estrechamente relacionado a la afinidad de los elementos por el carbono y la formación de carburo [11].

Comúnmente los recubrimientos de los electrodos están compuestos por mezclas de sus componentes técnicamente homogéneas, tanto en los electrodos destinados a la soldadura, como a los empleados para la recuperación de piezas [6]. Sin embargo, con menos nivel de comercialización han surgido electrodos con recubrimientos multicapas [3]. En estos electrodos multicapas, la relación entre las proporciones del recubrimiento ordinario y la carga de aleación desempeña un importante rol en las características operativas y metalúrgicas de los electrodos [3]. De igual forma la colocación de las diferentes capas y su constitución caracterizan, de manera diferente, la transferencia de elementos de aleación y las propiedades químicas y mecánicas del metal depositado, específicamente, de la resistencia al desgaste, en electrodos desarrollados para el relleno superficial [3].

A pesar de haberse estudiado y aplicado electrodos con recubrimientos múltiples, en la literatura consultada no se ha referido suficientemente el efecto del cambio de posición de las ferroaleaciones en la estructura del recubrimiento (posición relativa entre capas) sobre el comportamiento ante el desgaste de sus depósitos.

Como objetivo del presente trabajo se persigue determinar la influencia de la posición relativa de la carga de aleación en los recubrimientos de electrodos, sobre la resistencia al desgaste de sus depósitos.

## 2. Materiales y Métodos

Los tipos de electrodos se fabrican con el mismo núcleo metálico de diámetro interior 3 mm, composición del recubrimiento, con las mismas proporciones de ferroaleaciones y de recubrimiento ordinario de un electrodo E6013 (Tabla 1) y con el mismo diámetro exterior del recubrimiento (6,5 mm).

La comparación de los tres tipos de electrodos, fabricados por extrusión, se establece solo a partir del cambio de la posición de las ferroaleaciones en el recubrimiento, tal que se garantiza en cada uno la misma relación ( $A_1/A_2 = 0,43$ ) entre las áreas ocupadas por las ferroaleaciones ( $A_1 = 7,542 \text{ mm}^2$ ) y la recubrimiento ordinario ( $A_2 = 17,598 \text{ mm}^2$ ). Estos electrodos se identificarán como: variante A, con las ferroaleaciones en la capa interior; variante B, con las ferroaleaciones en la capa exterior; y variante C, con las ferroaleaciones distribuidas homogéneamente en todo el volumen del recubrimiento.

**Tabla 1.** Composición de los elementos químicos fundamentales que conforman las materias primas empleadas en la confección de los electrodos.

Componente del electrodo	Por ciento del elemento químico en cada componente del electrodo					
	Mn	Cr	C	Si	Ti	Fe
Alambre	0,48	0,11	0,11	0,4	0,002	balance
Ferrocromo	0,00	75,00	0,10	2,00	0,00	balance
Ferrocromo-manganeso	59,02	19,45	0,11	2,17	0,00	balance
Grafito	0,00	0,00	99,5	0,00	0,00	----
Recubrimiento E 6013 <sup>(*)</sup>	3,82	0,00	2,39	5,22	21,82	----

\*El cálculo de los por cientos de participación de cada elemento químico fue determinado a partir de la composición ( $\text{SiO}_2$ , 16%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 6%;  $\text{TiO}_2$ , 52%;  $\text{NaO}$ , 2,5%;  $\text{CaCO}_3$ , 2,5%;  $\text{FeMn}$ , 14%;  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ , 7%), en función de las masas molares de los respectivos constituyentes.

Como puede apreciarse en el caso de las variantes A y B son electrodos de recubrimiento en dos capas y en la variante C es un recubrimiento de una sola capa. Para todas las variantes la porción de ferroaleaciones es de un 30%, el resto lo ocupa el recubrimiento ordinario del electrodo (E6013).

Los depósitos requeridos para la preparación de las probetas fueron obtenidos mediante el relleno por soldadura manual (corriente: 120-125 A; voltaje; 28-32 V).

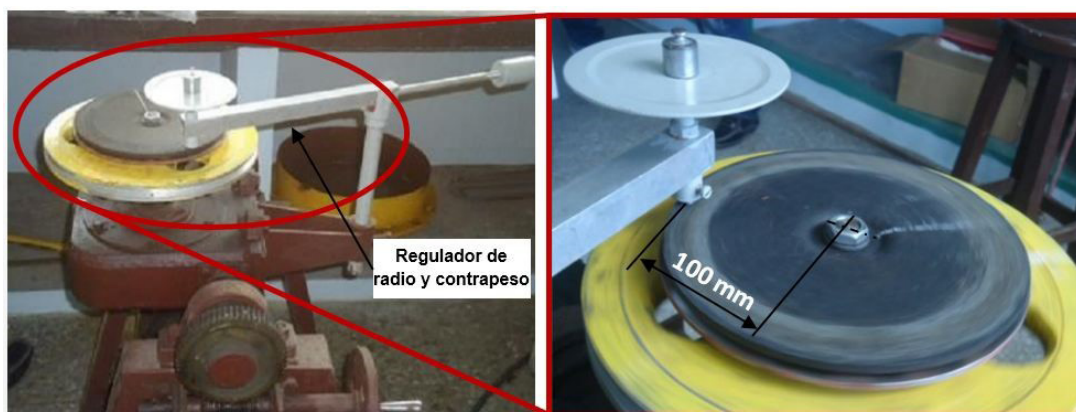
La caracterización química de las muestras se realiza empleando espectrómetro marca Belec de la empresa Planta Mecánica de Santa Clara. En cupones de AISI 1025 de 80 mm de largo, 40 de ancho y espesor 10 mm (según AWS A5.5/A5.5M:2014) se soldaron las muestras para determinar la composición química [12]. Se depositaron en tres pasadas para alcanzar un depósito sin dilución.

La microestructura se obtiene a partir de la observación, de los cortes transversales de los depósitos, con un microscopio óptico a 40x.

La dureza es una propiedad mecánica que está relacionada con la estructura y con la resistencia al desgaste [13,14]. Para corroborarse esta relación se practica ensayo de dureza, cuyos valores fueron obtenidos empleando el método Vickers, un durómetro *Wilson Hardness* con carga de 1000 gf y permanencia de 10 s, según la norma ASTM E384 [15].

Para el ensayo de desgaste se prepara un cupón de prueba de acero AISI 1025, con 20 mm de diámetro y 25 mm de largo, donde se realizan los depósitos, hasta alcanzar levantar 6 mm sobre la dimensión inicial del pin (3 pasadas), empleando una corriente de 100-120 A y un voltaje de 28-32 V. Este depósito constituye la posición de trabajo de los pines para ensayo, con un diámetro de 9 mm y 24 mm de largo, con una rugosidad superficial de  $R_a = 1 \mu$  (40  $\mu$ in) en el área de trabajo, atendiendo a criterios de normas especializadas ASTM [16,17].

La ejecución del ensayo de desgaste con la máquina de "pin sobre disco" (Figura 1) se desarrolla según normas [16,17] a partir de una técnica operatoria [18]. El ensayo se realiza empleando una máquina de ensayo de pin sobre disco (Figura 1) con una carga sobre los pines de 1000 g. Para la medición de la masa de los pines se empleara una balanza digital TE 124S, marca *Sartorius* (error: 0,1 mg; peso máximo: 120 g). Se tuvo en cuenta aspectos como la realización de un pre-desgaste de las muestras para preparar la superficie de ensayo, así como la ejecución de un lavado cuidadoso con alcohol de las probetas a ensayar, previendo la incorporación de partículas del abrasivo, que pudieran afectar el peso de las muestras.



**Figura 1.** Máquina de ensayo de desgaste de "pin sobre disco". Laboratorio de tribología. Centro de Investigaciones de Soldadura [18].

### 3. Resultados

La caracterización química de las muestras soldadas (Tabla 2), según el contenido de carbono, caracteriza a un acero hipereutéctico.

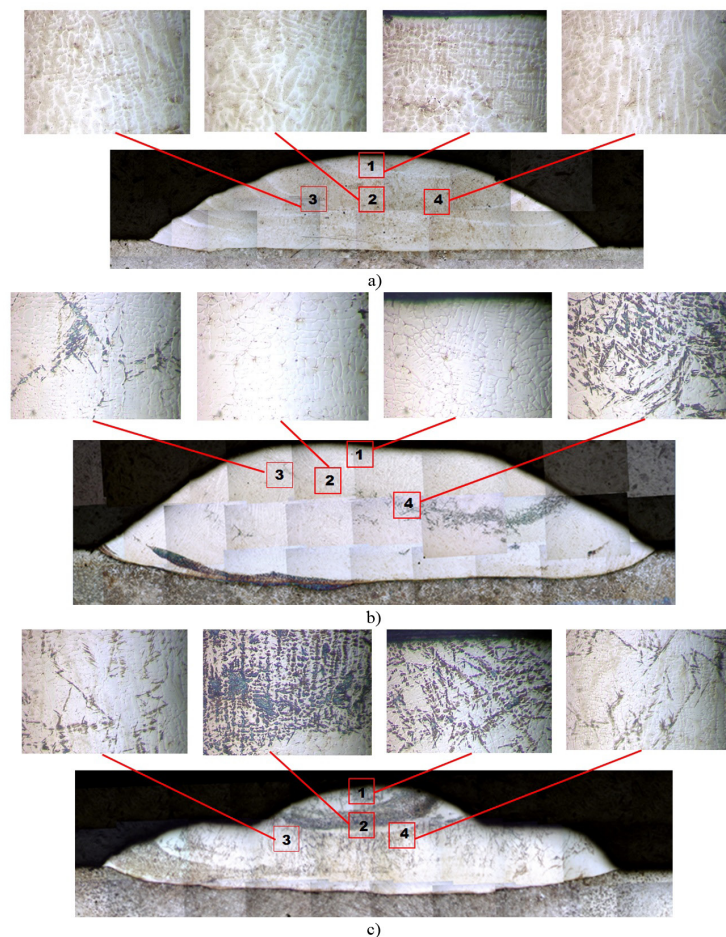
De las muestras analizadas (Tabla 2) presenta mayor concentración de elementos de aleación en el depósito realizado con electrodos de doble recubrimiento con las ferroaleaciones externas. Se observa mayores concentraciones de elementos de aleación como el C, Mn, Cr y Si.

**Tabla 2.** Composición de los depósitos realizados con los electrodos.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
Ferroaleaciones internas (A)	0,823	1,816	2,258	0,013	0,012	4,537	0,033	0,129	balance
Ferroaleaciones externas (B)	1,043	2,698	4,133	0,018	0,012	7,021	0,008	0,145	balance
Ferroaleaciones homogéneas (C)	0,938	2,663	3,716	0,012	0,023	6,330	0,007	0,111	balance

La caracterización metalográfica muestra (Figura 2) diferencia entre las estructuras fundamentales encontradas en los depósitos realizados con cada variante de electrodo.

El análisis óptico de los depósitos (Figura 2) mostró un acero hipereutético aleado al cromo manganeso. Se apreció diferencias en la formación estructural de los mismos, donde las cantidades de carburos formados es mínima en los depósitos con electrodos de ferroaleaciones internas (Figura 2a) y más elevadas en los depósitos obtenidos con electrodos de ferroaleaciones externas (Figura 2b) y en los formados con electrodos homogéneos (Figura 2c). La estructura de éste último depósito se asemeja a un acero hipereutético aleado al cromo manganeso y matriz austenítica, con carburos  $M_7C_3$ , similares a los encontrados en la literatura [19,20]. Estas diferencias entre los constituyentes de los depósitos evaluados (Figura 2) sugieren distinciones en el mecanismo de transferencia de las ferroaleaciones al depósito, ya que los electrodos elaborados parten de las mismas composiciones químicas fueron sujetos al mismo proceso de soldadura y solo se diferencian en la posición de las ferroaleaciones en la estructura del recubrimiento (posición relativa entre capas).



**Figura 2.** Macro (20x) y micrografías (40x) de depósito realizado con: (a) Electrodo con ferroaleaciones internas; (b) Electrodo con ferroaleaciones externas; (c) Electrodo con ferroaleaciones homogéneas.

Sobre los cortes transversales de las probetas con el microscopio electrónico se realiza la toma de las macro y microestructuras. En las macroestructuras no se aprecian defectos como poros o alguna inclusión de escorias.

Como datos del ensayo de desgaste se obtuvieron (Tabla 3) las masas iniciales ( $M_i$ ) y finales ( $M_f$ ) y las longitudes iniciales ( $L_i$ ) y finales ( $L_f$ ) de las probetas evaluadas.

**Tabla 3.** Datos de la prueba de desgaste “pin sobre disco”.

Probeta	Ferroaleaciones		
	internas (A)	externas (B)	homogénea (C)
Mi, g	13,1711	13,4233	13,1821
	13,1710	13,4232	13,1819
	13,1708	13,4230	13,1820
Promedio	13,1710	13,4232	13,1820
Mf, g	13,1530	13,4158	13,1665
	13,1530	13,4157	13,1667
	13,1529	13,4157	13,1667
Promedio	13,1530	13,4157	13,1666
Li, mm	24,01	24,00	24,00
	24,01	24,01	23,99
	23,99	24,00	24,00
Promedio	24,00	24,00	24,00
Lf, mm	23,72	23,90	23,70
	23,71	23,91	23,71
	23,70	23,90	23,71
Promedio	23,71	23,90	23,71

Un aspecto importante a considerar es la medición del radio medio de ensayo, considerado desde el centro del disco, hasta el centro del pin ( $r = 100$  mm), que se empleó para determinar el perímetro medio ( $P_m = 628$  mm) de una vuelta.

La distancia media de deslizamiento o recorrido ( $S = 21352$  mm) es directamente proporcional (Ecuación 1) al producto de la velocidad de rotación del disco ( $v_r = 34$  rpm) con el perímetro de recorrido ( $P_r$ ) y el tiempo de ensayo ( $t = 10$  min).

$$S = v_r \cdot P_r \quad (1)$$

Para apreciar una mayor diferencia en los resultados el período de ensayo se alargó hasta los 220 min, realizando medidas intermedias a los 40, 80, 100 y 160 min (Figura 3).

La pérdida de masa ( $\Delta M$ ) se calculó (Ecuación 2) a partir de la diferencia entre el masa inicial ( $M_i$ ) y la masa final ( $M_f$ ) de la probeta, mientras que la pérdida de volumen ( $\Delta V$ ) se determinó (Ecuación 3) como el cociente entre la pérdida de masa ( $\Delta M$ ) y la densidad ( $\rho = 7,85$  kg/dm<sup>3</sup>) de la aleación (Tabla 4).

$$\Delta M = M_i - M_f \quad (2)$$

$$\Delta V = \Delta M / \rho \quad (3)$$

Los resultados del ensayo de desgaste mostraron diferencias entre las pérdidas de masa y volumen de las tres muestras evaluadas depositadas con ferroaleaciones internas, externas y homogéneas. Las muestras soldadas, obtenidas con los electrodos con ferroaleaciones colocadas exteriormente, son las que poseen mayor resistencia al desgaste teniendo en cuenta que perdieron solo un 0,05% de volumen, mientras que las demás perdieron aproximadamente un 0,12% de volumen. Como el resultado de volumen se obtiene a partir de la Ecuación 3, y

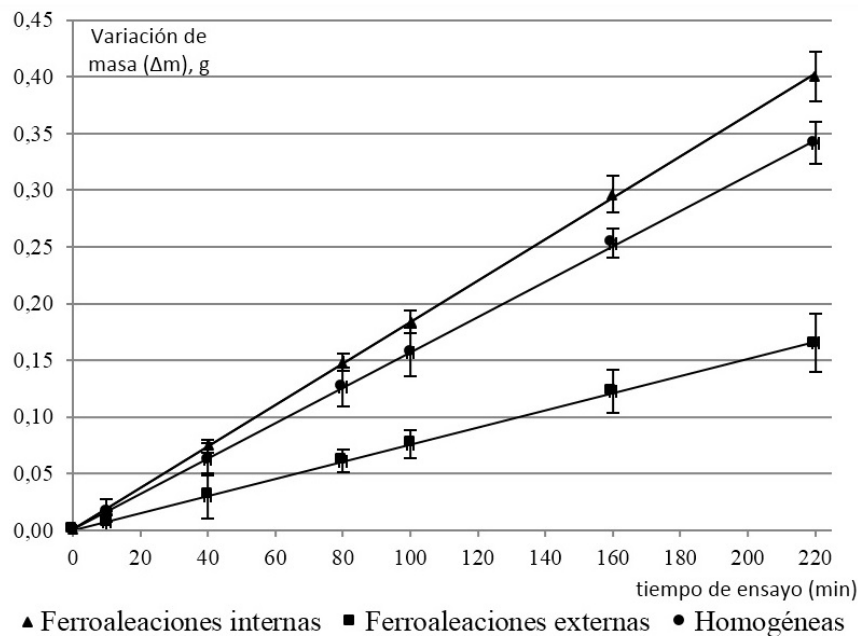


**Tabla 4.** Resultados de la prueba de desgaste de “pin sobre disco”.

Muestras	$\Delta M$ , mg	$\Delta V$ , mm <sup>3</sup>
Ferroaleaciones internas	18	0,0141
Ferroaleaciones externas	7,4	0,0058
Ferroaleaciones homogéneas	15,4	0,0121

la tendencia de los resultados sigue siendo la misma, se prefiere seguir comentando los resultados a partir del resultado obtenido de las pérdidas de masa.

Para demostrar la diferencia entre los resultados de desgaste (Figura 3) entre las diferentes muestras ensayadas se realiza un conjunto de pruebas estadísticas. Las pruebas aplicadas consisten en un análisis de varianza, pruebas de medias, de múltiples rangos, de *Kruskal-Wallis* y de medianas de *Mood*. Al aplicar dicho estudio, para la variable dependiente diferencia de las pérdidas de peso ( $\Delta M$ ), en el ensayo de desgaste, se obtuvo que todas las pruebas practicadas convergen en que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las diferencias de peso obtenidas entre las muestras evaluadas, con un nivel del 95,0% de confianza.

**Figura 3.** Variación de masa. Ensayo de desgaste.

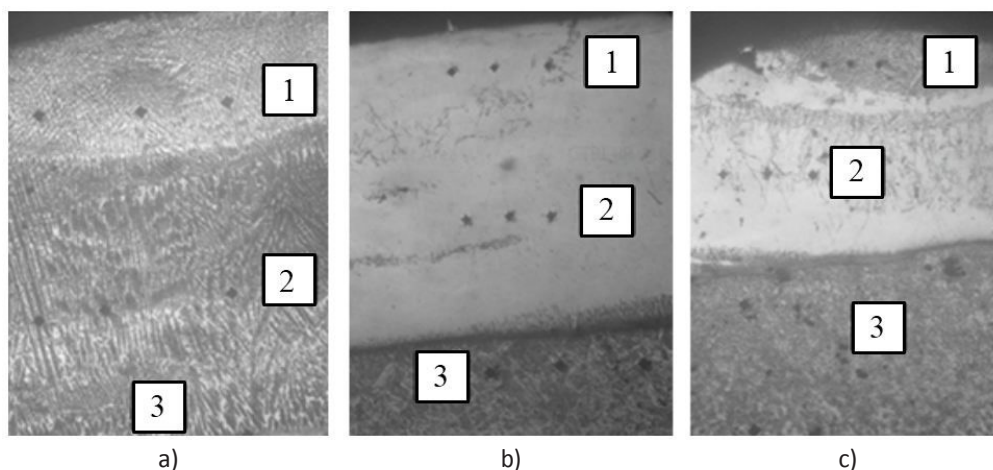
Para facilitar la comprensión, en lo adelante los electrodos recubiertos con la capa de las ferroaleaciones adheridas al núcleo se clasifica como A, los electrodos recubiertos con la capa de las ferroaleaciones colocados externamente, se clasifican como B y los que poseen las ferroaleaciones homogéneamente distribuidas, como C.

Se hace evidente que la muestra B es la de comportamiento diferente (mayor resistencia) respecto al desgaste volumétrico. Este criterio concuerda con el resultado de la prueba de múltiple rangos donde son significativas las mismas combinaciones (A y B, y B y C).

En los resultados se apreciaron una correspondencia entre las pérdidas de masa (Figura 3) en las muestras. Las mayores pérdidas relativas de masa se observaron (58,89%) en el pin correspondiente al electrodo con ferroaleaciones internas, respecto a las pérdidas que se apreciaron en el recubrimiento obtenido con ferroaleaciones externas (Tabla 4).

Estos aspectos refieren un comportamiento diferente de las muestras ensayadas, compuestas por los mismos materiales aportados por cada una de las variantes de los electrodos evaluados, pero ubicados en diferentes posiciones en el recubrimiento. Estas diferencias sugieren que los depósitos obtenidos no poseen la misma resistencia al desgaste, debido a una dureza y una estructura diferente en los depósitos.

El ensayo de dureza se realizó, a través de perfiles (Figura 4), obtenidos en la sección de los depósitos realizados con las tres variantes de electrodos estudiados (Tabla 5), en tres zonas distintas de las probetas: 1) superior del cordón; 2) intermedia del cordón; 3) material base.



**Figura 4.** Perfiles de microdureza en depósitos estudiados, realizados con: (a) Electrodo con aleación interna; (b) Electrodo con aleación externa; (c) Electrodo con aleación homogéneamente distribuida en el recubrimiento.

**Tabla 5.** Resultados del análisis de dureza.

Electrodos	Análisis de dureza (HV)								
	Ferroaleaciones internas			Ferroaleaciones externas			Ferroaleaciones homogéneas		
Muestras	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	490,00	453,20	395,10	581,15	520,45	507,85	494,90	462,40	421,90
Medición	485,10	468,80	423,60	560,40	519,70	508,90	510,00	468,60	425,10
	477,00	455,00	390,10	557,10	511,25	502,50	505,00	457,80	420,90
Promedio	484,03	459,00	402,93	566,22	517,13	506,42	503,30	462,93	422,63

Como resultado del ensayo de dureza se apreció en las tres muestras un crecimiento de la dureza, a medida que se acerca la medición hacia la superficie del cordón, lo cual corresponde con lo planteado por Chotěborský [7]. Este autor afirma que en esta zona es donde se verifica la mayor concentración de carburos. La diferencia de valores de las mediciones más cercanas a la superficie, con respecto a las de la zona intermedia, se encontraron entre un 5% y un 9% y, respecto a la zona más interna, entre 10% y 17%.

Además, se observó que el depósito más duro fue el obtenido en la muestra correspondiente al realizado con el electrodo que posee la carga de aleación ubicada exteriormente, siendo en un 12,71% (promedio para todo el perfil de dureza) mayor que el depósito realizado con el electrodo con las ferroaleaciones homogéneas y en un 15,40%, respecto a los electrodos con ferroaleaciones interiores.

El comportamiento de la dureza sugiere que es presumible una organización microestructural diferente en cada uno de los depósitos evaluados (Figura 4), lo que se confirma con el comportamiento, no solo de la dureza (Tabla 4), sino del desgaste (Tabla 3).

Los coeficientes de transferencia (Tabla 6) se determinan (Ecuación 4) por las relaciones entre la composición del elemento en el depósito ( $CD_{(ij)}$ ) y la suma de la composición del elemento en el electrodo (núcleo ( $CE_{(ij)}$ ) y recubrimiento ( $CR_{(ij)}$ )), en función de la razón ( $k_p$ ) dada por la participación del núcleo y el recubrimiento.

**Tabla 6.** Coeficientes de transferencia ( $\eta_{(i)}$ ) para cada uno de los electrodos ( $i = A, B$  y  $C$ ).

	Mn	Cr	C	Si
$\eta_{(A)}$	0,26	0,54	0,10	0,39
$\eta_{(B)}$	0,48	0,84	0,13	0,57
$\eta_{(C)}$	0,43	0,75	0,12	0,56

$$Kt_i = \frac{C_{D(i)}}{(C_{E(i)} + k_b \cdot C_{R(i)})} \quad (4)$$

Se aprecia que existe cierta relación entre la transferencia de elementos de aleación (Tabla 6) y la posición de las ferroaleaciones en la estructura del recubrimiento (posición relativa entre capas). El cromo se transfiere desde un 54%, en el caso de los electrodos con las ferroaleaciones en la parte interna del recubrimiento, hasta un 84%, en los electrodos con las ferroaleaciones en la parte externa. El manganeso presenta la misma tendencia, desde un 26% para los electrodos con las ferroaleaciones internas, hasta un 48% de transferencia en los que presentan las ferroaleaciones externas. En el caso del carbono (13% y 12%) y el silicio (57% y 56%) se obtienen valores más cercanos para los electrodos con ferroaleaciones externas y los de las homogéneamente distribuidas, mientras que se obtienen valores más aislados, cuando se comparan con los electrodos de ferroaleaciones internas (carbono 10% y silicio, 39%). En resumen, los coeficientes de transferencia de los elementos hacia el depósito son mayores en los electrodos de tipo B (fabricados con las ferroaleaciones externas) y menores en los electrodos de tipo A (fabricados con las ferroaleaciones internas).

Se aprecia que el paso de las ferroaleaciones, desde el interior del recubrimiento, a través de este, hasta ser colocadas exteriormente marca una progresión en el incremento del coeficiente de transferencia. Este aspecto permite asociar directamente proporcional el crecimiento del coeficiente de transferencia respecto a la posición que ocupan las ferroaleaciones en el recubrimiento de los electrodos. Una explicación de este fenómeno pudiera darse a través de un modelo físico de transferencia de los elementos, que parten desde el electrodo, hasta el metal depositado, a través de la columna del arco, como se ha hecho para electrodos simplemente recubiertos [21], sin llegar, por ahora, a particularizar en los modelos matemáticos, que aparecen en la literatura para electrodos simplemente recubiertos [22].

#### 4. Discusión

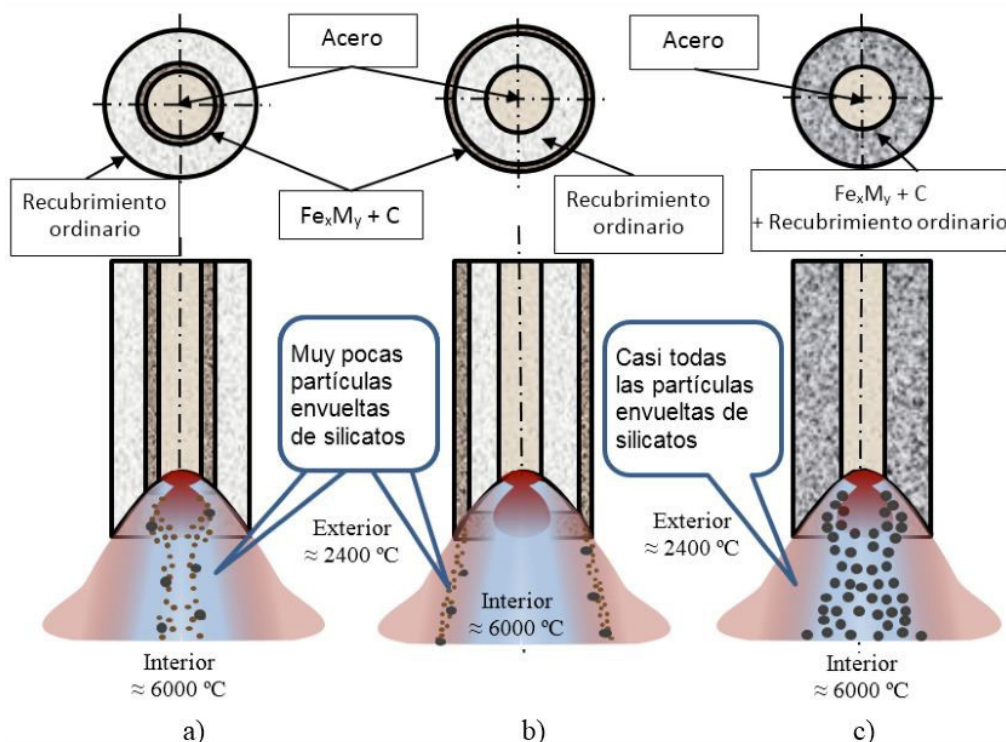
La transferencia de las ferroaleaciones desde el recubrimiento, hacia el metal depositado, pudiera conducir a su precipitación dentro de la columna del arco en tres condiciones diferentes, dependiendo de la posición de estas en la estructura del recubrimiento: interno, externo y homogéneamente distribuida.

Para una mejor comprensión del fenómeno se hace una abstracción (Figura 5) del proceso de transferencia de la carga de aleación desde los electrodos hacia la pieza, durante el proceso de relleno superficial por arco eléctrico empleando las variantes de electrodos, con tres estructuras diferentes en su recubrimiento: a) Electrodo con ferroaleaciones internas; b) Electrodo con ferroaleaciones externas; c) Electrodo con ferroaleaciones homogéneas.

El esquema referido (Figura 5) muestra la sección transversal de dichos electrodos (parte superior), a partir de las consideraciones experimentales establecidas, así como su correspondiente sección longitudinal, asociada al proceso de mantenimiento del arco eléctrico. En la misma se muestran sus elementos constitutivos y su relación geométrica con los esquemas de transferencia de las ferroaleaciones, específicamente respecto a su posición dentro de la columna del arco eléctrico y sus temperaturas extremas aproximadas.

En el caso del electrodo con la carga de aleación ( $Fe_xM_y + C$ ) colocada adherida al núcleo (Figura 5a), la carga de aleación puede comportarse como una extensión del metal del electrodo, fundamentalmente por su similitud en propiedades electro y termoconductoras, en comparación con el recubrimiento ordinario del electrodo del sistema mayoritariamente tricomponente  $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$ .





**Figura 5.** Esquema de transferencia de la aleación en los electrodos estudiados (a) Electrodo con ferroaleaciones internas; (b) Electrodo con ferroaleaciones externas; (c) Electrodo con ferroaleaciones homogéneas.

Cuando la carga de aleación ( $Fe_xM_y + C$ ) se ubica en el exterior del electrodo (Figura 5b), sus propiedades electro y termoconductoras pudieran atenuarse al estar separadas de un aislante eléctrico y térmico (recubrimiento ordinario tricomponente) y por encontrarse en la zona del arco donde la temperatura es la menor. Por otra parte, cuando las ferroaleaciones ( $Fe_xM_y + C$ ) se encuentran uniformemente distribuidas dentro de toda el recubrimiento ordinario tricomponente (Figura 5c) están sujetas a un proceso de transferencia, caracterizado fundamentalmente por un apantallamiento físico (barrera mecánica) y químico (oxidativo), restringiendo su capacidad de interacción directa con la columna del arco.

Luego, la transferencia desde el recubrimiento, hacia el metal depositado, pudiera conducir a su precipitación dentro de la columna en tres condiciones diferentes; a) directamente en la zona del arco donde las temperaturas son extremadamente altas (Figura 5a); directamente en la zona del arco donde las temperaturas son más bajas (Figura 5b); b) dentro del arco, en diferentes condiciones térmicas y rodeadas de silicatos fundidos.

De lo anterior se deduce que la ubicación de la carga de aleación dentro de la columna del arco y las características eléctricas, químicas y termoconductoras de sus constituyentes pudiera ejercer una influencia específica, desde el punto de vista eléctrico, químico y termodinámico, sobre el comportamiento del arco eléctrico y la transferencia de los elementos de aleación hacia los depósitos, como pueden ser la volatilización de carbono y la pérdida de elementos de aleación por oxidación.

Estos aspectos serán empleados para explicar el comportamiento de los electrodos durante el proceso de deposición, su rendimiento y la resistencia al desgaste observado en los depósitos.

La relativa baja transferencia de carbono ( $\eta_{(C)} = 0,10$ ), desde el electrodo al metal depositado, puede conducir a la formación de menor cantidad de compuestos de gran dureza (Figura 2a). Por esta razón, la forma y distribución de esta posible poca cantidad de estructuras de gran dureza hace que la pérdida de masa (resistencia al desgaste) sea relativamente más alta (Figura 3) en los electrodos de ferroaleaciones adheridas al núcleo, que en el resto de las anteriores alternativas de electrodos valoradas.

El electrodo con doble recubrimiento y ferroaleaciones exteriores (Figura 5b) se transfiere desde el recubrimiento, hacia el metal depositado, probablemente, por la parte exterior del arco, donde las temperaturas son relativamente las más bajas. La relativamente más baja temperatura del arco puede no volatilizar tanto carbono y relativamente poco por ciento de las ferroaleaciones incorporadas, como parte de la carga de aleación.

Este proceso conduce a una relativa mayor transferencia de elementos de aleación y carbono desde el electrodo al metal depositado, comparado con el electrodo de ferroaleaciones internas (Tabla 6). Al introducirse mayor cantidad de carbono se propicia la formación de cierta cantidad de compuestos de gran dureza (carburos). Por esta razón, la forma y distribución de esta cierta cantidad de carburos pudiera reducir la pérdida de masa, incrementar la resistencia al desgaste (Figura 3), en comparación con la variante que emplea un electrodo, también doblemente recubierto, pero con las ferroaleaciones internas. Esto coincide con Tang, al plantear que los carburos primarios se hacen más bastos con el aumento de la concentración de carbono. Esto contribuye al aumento de la fracción de volumen de los carburos con el aumento de la concentración de elementos formadores de carburos, tales como Cr. Se determinó que la formación de carburos primarios aumentaba la dureza y contribuía a la resistencia al desgaste [23]. Zhang and Farrar [24] apunta hacia el efecto del manganeso como promotor de ferrita acicular, y en los contenidos obtenidos en esta investigación se puede inferir que influye notablemente sobre la resistencia al desgaste, lo cual es también reportado por Surian et al. [25]. Los porcentos de Cr y Mn (Tabla 2) obtenidos en la composición de los aportes y sus coeficientes de transferencia calculados (Tabla 6) justifican los niveles de dureza y resistencia al desgaste obtenidos e indican hacia la posible formación de estructuras de ferrita acicular con carburos de Cr. Filipovic plantea que la fracción de volumen de la fase de carburo, el tamaño y la distribución del carburo ejercen una influencia importante en la resistencia al desgaste [26].

El electrodo con recubrimiento homogéneo posee las ferroaleaciones ( $Fe_xM_y + C$ ) uniformemente distribuidas dentro de toda el recubrimiento ordinario tricomponente. La transferencia de la carga de aleación, en este caso, se realiza en toda la sección transversal del recubrimiento, ya que están uniformemente distribuidas, pero se incorporan al arco en diferentes condiciones térmicas y rodeadas de silicatos fundidos (recubrimiento ordinario tricomponente). La envoltura con un recubrimiento ordinario tricomponente produce un apantallamiento físico (barrera mecánica) y químico (oxidativa), restringiendo su capacidad de interacción directa con la columna del arco y la volatilización del carbono. La transferencia de una proporción adecuada de carbono puede conducir a la formación de compuestos duros, lo que le pudiera transferir cierta resistencia al desgaste en el metal depositado (Figura 3), superior para el caso de las ferroaleaciones internas, pero inferior a la de las ferroaleaciones externas.

La dureza en las secciones transversales de los depósitos de soldadura es una propiedad que cambia con la posición de la muestra. Se aprecia (Tabla 5) un crecimiento de la dureza, en función de la posición en que fueron tomadas, hacia la superficie de los depósitos. Se aprecia que el electrodo recubierto externamente garantizaría una relativa mayor dureza en el depósito.

Los resultados de dureza concuerdan plenamente con los de resistencia al desgaste, dados por las diferencias de masa observadas (Tabla 4).

La coincidencia de los resultados expuestos permite asumir que es válido el modelo físico propuesto de transferencia de la aleación en los electrodos estudiados.

## 5. Conclusiones

1. Se obtiene mejor transferencia de elementos de aleación durante el empleo de electrodos doblemente recubiertos, con ferroaleaciones dispuestas externamente ( $Mn\eta_{(B)} = 0,48$ ;  $Cr\eta_{(B)} = 0,84$ ;  $C\eta_{(B)} = 0,13$  y  $Si\eta_{(B)} = 0,57$ ), que cuando estas se colocan homogéneamente o internamente en el recubrimiento;
2. El depósito de mayor dureza es el obtenido mediante el empleo del electrodo con la aleación adherida externamente al recubrimiento ordinario en un 12,71% y 15,40%, respecto a los valores de los perfiles obtenidos para los depósitos con los electrodos con las ferroaleaciones distribuidas homogéneamente y los de ferroaleaciones internas, respectivamente;
3. La mayor resistencia al desgaste se observa en el depósito obtenido mediante el empleo del electrodo con ferroaleaciones externas, mientras que el de menor resistencia al desgaste corresponde al depósito

obtenido con la aleación ubicada entre el núcleo metálico del electrodo y el recubrimiento ordinario (interna). Los valores de las pérdidas de masa son de solo 0,05% en los pines con depósito realizado con electrodo con las ferroaleaciones adherida externamente al recubrimiento ordinario, con respecto a la masa inicial del pin y de 0,12%, aproximadamente, para los demás;

4. La combinación de la aleación dispuesta exteriormente al recubrimiento ordinario de los electrodos garantiza la transferencia de los elementos a través del arco, en las condiciones tales, que favorecen una mayor dureza y resistencia al desgaste en los depósitos, lo cual se ajusta al modelo físico planteado para la descripción de la transferencia de los elementos desde el electrodo hasta el metal depositado, considerando cada una de las variantes de estructura de recubrimiento (posición relativa entre capas) para los electrodos estudiados.

## Referencias

- [1] Il'yashchenko DP, Chinakhov DA, Gotovshchik YM. Calculation of the heat content of the electrode metal droplet when applying power supplies for manual arc welding with different volt-ampere characteristic. *Applied Mechanics & Materials*. 2015;756:101-104. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.756.101>.
- [2] Gómez-Pérez CR, Paula-Perotti A, García-Rodríguez A, Esmerio-Mazzaferro J, Rubén-Gonzalez A, Guerra-Machado I, et al. Lean-Anderson aplicado para obtener recubrimientos de electrodos aleados con carbono, cromo y titanio//Mc. Lean-Anderson design applied for recovered electrodes obtaining with carbon, chrome and titanium alloys. *Ingeniería Mecánica*. 2013;16(2):132-143.
- [3] González-Cabrera O, Gómez-Pérez CR, Quintana-Puchol R, Perdomo-González L, Miguel-Oria JV, López-Fontanills RL. Alternativa de doble recubrimiento para electrodo destinado al proceso de relleno manual con arco eléctrico. *Ingeniería Mecánica*. 2014;17(3):245-254.
- [4] Gómez Pérez CR, Guerra Machado I, Esmerio Mazzaferro JA, Gonzalez AR, García Rodríguez A. Electrodo para el recubrimiento protector de piezas que trabajan en condiciones de desgaste abrasivo. In: *METANICA 2009 - XIII Congreso Metalúrgico*; 2009; La Habana. Cuba: METANICA; 2009. 10 p.
- [5] Sham K, Liu S. Flux-coating development for SMAW consumable electrode of high nickel alloys. *Welding Journal*. 2014;93:271-277.
- [6] López-Fontanills RL. Comparación entre electrodos simple y doblemente recubiertos destinados al relleno superficial. *Villa Clara: Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas*; 2012. p. 62.
- [7] Chotěborský R, Hrabě P, Müller M, Válek R, Savková J, Jirka M. Effect of carbide size in hardfacing on abrasive wear. *Research in Agricultural Engineering*. 2009;4:149-158.
- [8] Delta Technology [página web]. Aleación del metal aportado por soldadura eléctrica. Russia: Biblioteca de la Literatura Técnica; 2015 [acceso el 8 dic. 2015]. Available from: <http://delta-grup.ru/bibliot/30/92.htm>
- [9] Cruz-Crespo A, Fuentes RF, Scotti A. The influence of calcite, fluorite, and rutile on the fusion-related behavior of metal cored coated electrodes for hardfacing. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;19(5):685-692. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-009-9543-2>.
- [10] Varnauskas V, Rudzinskas V, Černašėjus O. Influence of covering components of welding electrodes on chemical composition and mechanical properties of fused metal. *Materials Science*. 2004;10(1):7-10.
- [11] Lazić V, Milosavljević D, Aleksandrović S, Marinković P, Bogdanović G, Nedeljković B. Carbide type influence on tribological properties of hard faced steel layer. Part I: theoretical considerations. *Tribology in Industry*. 2010;32(2):11-20.
- [12] American Welding Society. AWS A5.5/A5.5M:2014: specification for low-alloy steel electrodes for shielded metal arc welding. 10th ed. Danvers: AWS.
- [13] Kenchi Reddy KM, Jayadeva CT. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacing used in agricultural implements. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2015;3(1):193-202. <http://dx.doi.org/10.17762/ijritcc2321-8169.150141>.
- [14] Nedeljkovic B, Alexandrovich S, Krsti B, Mutavdzic M, Milosavljevi D, Iorievi M. Influence of the carbide type on tribological properties of the hard faced layers. *MJoM*. 2010;16(2):77-90.
- [15] American Society for Testing and Materials. ASTM E384-16: standard test method for microindentation hardness of materials. West Conshohocken: ASTM; 2016.
- [16] American Society for Testing and Materials. ASTM Standard G132-96: standard test method for pin abrasion testing. West Conshohocken: ASTM; 2001. p. 8.
- [17] American Society for Testing and Materials. ASTM Standard G99-04: standard test method for wear testing with a pin-on disk apparatus. West Conshohocken: ASTM; 2004. p. 5.
- [18] Anicacio Palacio Caballero E. Diseño y fabricación de una máquina de ensayo de desgaste abrasivo del tipo "pin sobre disco" según la norma ASTM G99-04. *Villa Clara: Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas*; 2014. p. 81.
- [19] Kuo CW, Fan C, Wu SH, Wu W. Microstructure and wear characteristics of hypoeutectic, eutectic and hypereutectic (Cr,Fe)23C6 carbides in hardfacing alloys. *Materials Transactions*. 2007;48(9):2324-2328. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.MB200716>.
- [20] Franek F, Badisch E, Kirchgäßner M. Advanced methods for characterisation of abrasion/erosion resistance of wear protection materials. *FME Transactions*. 2009;37:61-70.
- [21] Votínova EB. Predicción de la transferencia de elementos de aleación al metal de aporte con soldadura por arco con electrodo metálico recubierto para la optimización de los recubrimientos: procesos y tecnología de soldadura. Ekaterinburg: Universidad Federal de los Urales; 2015. p. 9. En ruso.
- [22] Zinigrad M, Mazurovsky V. Development of new welding materials on the base of mathematical modeling of metallurgical processes. Ariel: Colledge of Judea and Samaria; 2002.
- [23] Tang XH, Chung R, Pang CJ, Li DY, Hinckley B, Dolman K. Microstructure of high (45 wt.%) chromium cast irons and their resistances to wear and corrosion. *Wear*. 2011;271(9-10):1426-1431. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.047>.

- [24] Zhang Z, Farrar RA. Influence of Mn and Ni on the microstructure and toughness of C-Mn-Ni weld metals. *Welding Research*. 1997;76(5):186-197.
- [25] Surian E, Trotti J, Cassanelli A, Vedia LA. Influence of chromium on the mechanical properties and microstructure of weld metal from a high-strength SMA electrode. *Welding Journal*. 1994;73(3):45-53.
- [26] Filipović MM. Iron–chromium–carbon–vanadium white cast irons: the microstructure and properties. *Hem. Ind.* 2014;68(4):413-427. <http://dx.doi.org/10.2298/HEMIND130615064F>.