

Alternativa de doble recubrimiento para electrodo destinado al proceso de relleno manual con arco eléctrico

Alternative of double coating for electrode dedicated to the manual metal arc filler process

Odonel González-Cabrera^I, Carlos-René Gómez-Pérez^{II}, Rafael Quintana-Puchol^{II}, Lorenzo Perdomo-González^{II}, Jorge-Víctor Miguel-Oria^{II}, Roney-Lázaro López-Fontanills^{II}

I. Centro de Información y Gestión Tecnológica. Villa Clara. Cuba

Correo electrónico: ogonzalez@ciget.vcl.cu

II. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Centro de Investigaciones de Soldadura. Villa Clara. Cuba

Recibido: 20 de marzo de 2014

Aceptado: 10 de julio de 2014

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue establecer diferencias entre el comportamiento de electrodos obtenidos con recubrimiento monocapa y bicapa para el proceso de relleno manual. La relación entre los materiales de los recubrimientos se estableció en 70 % de materiales no metálicos y 30 % de carga de aleación para cada tipo de electrodo. Para cumplimentar el objetivo fueron evaluados los procedimientos de fabricación por inmersión y extrusión, conjuntamente con la posición relativa de los constituyentes de los recubrimientos sobre el alma y su influencia en las propiedades eléctricas y operativas de los electrodos. Como resultado se obtuvo que el electrodo con recubrimiento bicapa consume un 4,8 % menos de potencia durante la soldadura que el electrodo de recubrimiento monocapa (más económico), pero con mayor cantidad, 27 %, de metal aportado por unidad de tiempo (mayor rendimiento), depositando cordones ligeramente menos altos (19,9 %), pero más profundos (46,5 %).

Palabras claves: electrodos con doble recubrimiento, electrodos doblemente revestidos, relleno superficial.

Abstract

The object of the present paper was to establish differences among one and twin coating electrodes dedicated to the manual filler process. The resulting relationship among the coating materials are established in 70 % of non-metallic compound and 30 % of alloy for each electrode type. For execute the work objective, two conventional procedures (immersion and extrusion) for manufacturing electrodes, as well as the influence of coating placement on the electrodes operational properties was evaluated. As result of experiment was obtained a twin coated electrode which consume a 4,8 % less than power during the welding that one layer electrode (more economic), but with bigger quantity (27 %) of metal contributed by unit of time (bigger yield), less height of reinforcement (19,9 %) and greater depth of penetration (46,5 %).

Key words: double covered electrodes, twin-coated electrodes, manual filler arc.

Introducción

El proceso de relleno manual tiene como propósito restablecer las dimensiones originales de una pieza, depositando un material con propiedades similares o mejoradas, que le permita extender su vida útil. Para este fin se emplean diferentes métodos de soldadura como el proceso con electrodo macizo, con electrodo tubular, principalmente. De estos métodos el relleno con electrodo macizo sigue ocupando un lugar preferente en la recuperación de piezas de todo tipo de equipo, sobre todo se hace insustituible cuando se trabaja en lugares de acceso limitado, sobre piezas de configuración compleja o alejado de condiciones donde no se podría emplear otro método [1]. Se han desarrollado electrodos con bicapa, usados en la soldadura de acero estructural con C-Mn, como una variante del electrodo E7018-1, de bajo hidrógeno, empleado específicamente para la soldadura de tuberías “*off shore*” de petróleo y gas. Este electrodo, de bajo hidrógeno y con polvo de hierro es recomendado para la soldadura de aceros estructurales de construcción, recipientes a presión, mantenimiento y reparaciones de plantas. El electrodo *AUSTARC 18TC (TC-Twin coated)*, del inglés, doble recubierto) es fabricado para estos fines usando una técnica de extrusión. Otros productos similares son el *AUSTARC 16TC* y el electrodo de doble capa básico *FOX EV 50-A*, fabricado por la “*BÖHLER Welding*”. El doble recubrimiento se logra mediante compresión, en dos pasos.

Los electrodos macizos monocapa destinados al recargue superficial, cuyos núcleos están conformados a partir de acero con bajo contenido de carbono y sin otras aleaciones, presentan una carga en el recubrimiento, cuya función es la de transformar, durante la soldadura, el metal del núcleo en una aleación especial. Para ello, compuestos complementarios son añadidos al recubrimiento, los cuales compiten con otros destinados a garantizar adecuadas propiedades operativas del electrodo [2].

Las cargas para materiales destinados al recargue superficial están constituidos por mezclas mecánicas de materiales triturados, obtenidas por procesos distintos que generan ciertos niveles de influencia en las formas y proporciones de las partículas [3, 4]. La cinética de molienda puede conducir a la obtención de tamaños, distribuciones granulométricas y formas de los granos específicas, en función del tipo de molino empleado, tiempo y procedimiento aplicado, entre otros aspectos. Las formas de los granos y su relación de clases y rangos producen distribuciones granulométricas con determinados volúmenes de gases ocluidos, que producen un efecto másico específico e influye en la concentración química del producto. El tiempo ocupado entre la fusión de los micro-constituyentes dentro del recubrimiento de los consumibles y su solidificación como metal aportado es relativamente insuficiente para obtener procesos de homogeneidad química y estructural [5]. La posición relativa de los micro-constituyentes conduce a la verificación de reacciones químicas termodinámicamente posibles solo en micro regiones [6]. La forma de colocar los constituyentes del recubrimiento es vital para lograr la eficiencia en el proceso cinético – químico [7]. En los electrodos convencionales para el recargue se aplican recubrimientos basados en mezclas de ferroaleaciones y aluminosilicatos aglutinadas con silicatos hidratados de sodio o potasio [8, 9].

Las mezclas de ferroaleaciones y otros componentes no metálicos, que conforman el recubrimiento monocapa de los electrodos, no conducen a que los componentes de la carga de aleación se encuentren próximos al núcleo de los electrodos, sino que la mayoría de los granos de las ferroaleaciones se dispersan en el volumen predominantemente oxidante de los componentes del recubrimiento.

Los aspectos antes señalados pudieran condicionar una pérdida material (ferroaleaciones) considerable, desde los electrodos hasta el metal depositado, debido a intensivos procesos de oxidación, producidos por la oxidación de la carga de aleación al reducirse los óxidos contenidos en los materiales del recubrimiento.

Considerar una capa de aleación adherida al núcleo y, sobre ella, un recubrimiento ordinario; es decir, un electrodo macizo con recubrimiento doble traería varias ventajas. En primer lugar, puede potenciar la reactividad de la carga de aleación con el núcleo del electrodo, al estar contiguos. Además, esta configuración minimizaría la oxidación de la aleación por la interacción con los constituyentes oxidantes del recubrimiento ordinario, tal como ocurre en los electrodos macizos. Otra ventaja posible sería el incremento de la relación (m_a/m_n) entre las masas de la carga de aleación (m_a) y del núcleo (m_n) del electrodo, si fuese necesario, al considerarse como una extensión más del diámetro del núcleo metálico.

Una desventaja a considerar es que aún no se conocen las diferencias operativas, ni metalúrgicas, sobre los depósitos de los electrodos doblemente recubiertos destinados a la recuperación de piezas sometidas a desgaste abrasivo, respecto al comportamiento de los convencionales, destinados al mismo fin. Para su estudio pueden aplicarse metodologías probadas [10].

En el presente trabajo se persigue como objetivo determinar algunas de las diferencias fundamentales sobre el comportamiento operativo de electrodos para el recargue con núcleos macizos y ferroaleaciones en el recubrimiento, a partir de la comparación de electrodos fabricados con recubrimientos monocapas,

respecto a otros, obtenidos con recubrimientos aplicados en dos capas, a la vez que en su fabricación se combinan los procedimientos de inmersión y extrusión.

Métodos y Materiales

La materia prima empleada para la obtención de la matriz es característica de electrodos revestidos y está conformada por: Calcita (12,88 %), Sílice (10,77 %), Rutilo (36,02 %), FeSi (6,86 %), FeMn (6,86 %) y Silicato de sodio (26,61 %). Los materiales empleados para la conformación de la carga de aleación son comúnmente usados para la obtención de electrodos destinados al relleno superficial que depositan aleaciones resistentes al desgaste; estas son: FeMn (17,79 %), FeSi (25,60 %), Grafito (8,08 %) y FeCr (48,51 %). La relación resultante se establece con un 70 % de materiales no metálicos y un 30 % de carga de aleación.

Para evaluar el efecto del tipo y posición del recubrimiento en el comportamiento de los parámetros operativos de los electrodos y obtener criterios para diferenciarlos, tal como se enuncia como objetivo del presente trabajo, se aplica un plan experimental factorial completo (tabla 1), con dos variables independientes (x_1 : Tipo de recubrimiento y x_2 : Método de recubrimiento) y dos niveles.

Tabla 1. Plan experimental factorial completo 2^2 , aplicado para el estudio

Experimento	Corridas	X_1	X_2	X_1X_2
2^2	1	+	+	+
	2	+	-	-
	3	-	+	-
	4	-	-	+

Siguiendo el plan experimental (tabla 1) se realizan 8 experimentos, con tres réplicas cada uno, para un total de 24 estudios. En la variable independiente "Tipo de recubrimiento" (x_1) se emplea, como niveles extremos (ver tabla 1):

- Aplicación de un recubrimiento monocapa, codificada como "+" y
- Aplicación de un recubrimiento doble, codificada como "-".

Para la variable independiente "Método de recubrimiento" (x_2), se emplean como niveles extremos:

- Recubrimiento por inmersión, codificada como "+", y
- Recubrimiento por extrusión, codificada como "-".

Como variables dependientes se evaluarán algunos de los parámetros eléctricos y de consumo de los electrodos durante el proceso de soldadura, los cuales son:

α_f : coeficiente de fusión (g/A·h)

α_d : coeficiente de depósito (g/A·h)

RD: razón de depósito o productividad del proceso (kg/h)

Ψ : coeficiente de pérdidas (%)

E: eficiencia de depósito referida al núcleo del electrodo (%)

Ed: eficiencia del depósito (%)

ET: eficiencia total del electrodo (%)

I: corriente de soldadura (A)

V: voltaje de soldadura (V)

P: potencia consumida durante el proceso (W)

El procesamiento del diseño experimental se hace mediante el software *Statgraphics Centurion XV*.

En el electrodo con un solo recubrimiento (Fig. 1a) se mezclan homogéneamente un 70 % de recubrimiento y un 30 % de carga de aleación, definidas ambas con anterioridad. Los mismos porcentos son considerados para la fabricación del electrodo bicapa (Fig. 1b), solo que el recubrimiento y la carga de aleación se colocan separadamente.

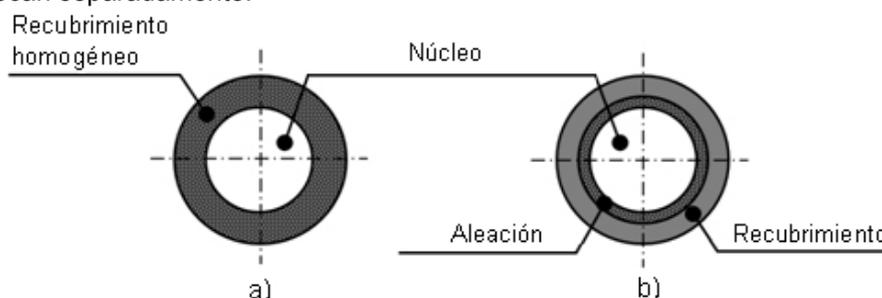


Fig. 1. Sección transversal de los electrodos empleados a) Electrodo macizo convencional para recubrimiento superficial (modelo de pudín con pasas). b) Electrodo con doble recubrimiento

El método de fabricación de los electrodos por inmersión se aplica colocando la capa de recubrimiento sobre el alma o núcleo del electrodo mediante su introducción en una mezcla fluida, que conformará su recubrimiento. Para fabricar los electrodos por extrusión, se emplea un procedimiento manual de prensado sin la traslación del electrodo [2].

Conjuntamente con la realización de los depósitos por soldadura, se determinan los parámetros de consumo y eléctricos de los electrodos, referidos anteriormente, bajo las condiciones siguientes:

- 1- Realizar los depósitos sobre placas de acero al carbono AISI 1010, dimensiones: ancho: 75 mm; largo: 200 mm; espesor: 10 mm;
- 2- Emplear la misma fuente para todos los ensayos;
- 3- Realizar los ensayos con los electrodos del mismo diámetro de alma, 3 mm;
- 4- Aplicar una corriente de soldadura (125 A) y voltaje de vacío en la fuente, 65 V, en cada ensayo;
- 5- Emplear un dispositivo de alimentación por gravedad para permitir la auto-regulación del arco en cada tipo de electrodo;
- 6- Censar la corriente y el voltaje de soldadura mediante un sistema computarizado;
- 7- Realizar el depósito en posición plana;
- 8- Depositar el metal del electrodo ininterrumpidamente cada vez, hasta que dejar una colilla de 250 mm (el dispositivo de alimentación lo regula).
- 9- Realizar tres corridas o depósitos, para cada punto experimental, tal que permita valorar estadísticamente los resultados.

El puesto de soldadura se compone de una fuente de corriente alterna, un acondicionador de señales y una computadora para captar y guardar los datos obtenidas [11]. El tiempo de deposición y los parámetros de corriente y voltaje se miden con el sistema computarizado y se procesa con el software *Sony Sound Forge*.

Se toman los parámetros de consumo referidos anteriormente (α_f , α_d ; RD ; Ψ ; E ; Ed ; ET ; I ; V ; P) mediante procedimientos (Norma ISO 2401-72) [10], lo que permite diferenciar el comportamiento de los electrodos. Para ello han de ser considerados, además, los siguientes indicadores:

Mn: masa del núcleo del electrodo (g);	Lc: Longitud final del núcleo del electrodo o colilla (mm)
Le: Longitud inicial del núcleo del electrodo (mm)	Mbf: masa final del electrodo (g)
de: diámetro del electrodo (mm)	Mfp: masa final de la plancha (g)
Mbi: masa inicial del electrodo (g)	Mu: Masa unitaria del núcleo del electrodo (g/mm)
Mip: masa de la plancha antes de realizar el depósito (g)	Mf: masa de metal fundido (g)
Tbas: tiempo básico de soldadura (s)	Md: masa de metal depositado (g)

Las planchas se limpian cuidadosamente con piqueta y cepillo de alambre para eliminar los restos de salpicaduras y escoria, luego de realizado el depósito. El pesaje de la plancha y de los electrodos, se debe realizar con una precisión de $\pm 0,01$ g, mientras que la medición de la longitud de las colillas se debe realizar con una precisión de ± 1 mm.

Resultados y Discusión

A partir del censado, acondicionamiento, registro y procesamiento digital de las señales de corriente y voltaje (Fig. 2), tomados durante la prueba, y la determinación de los parámetros de consumo, pueden compararse los desempeños de los electrodos evaluados (tabla 2). Estos criterios son útiles para encontrar diferencias en la estabilidad eléctrica operativa de los electrodos comparados.

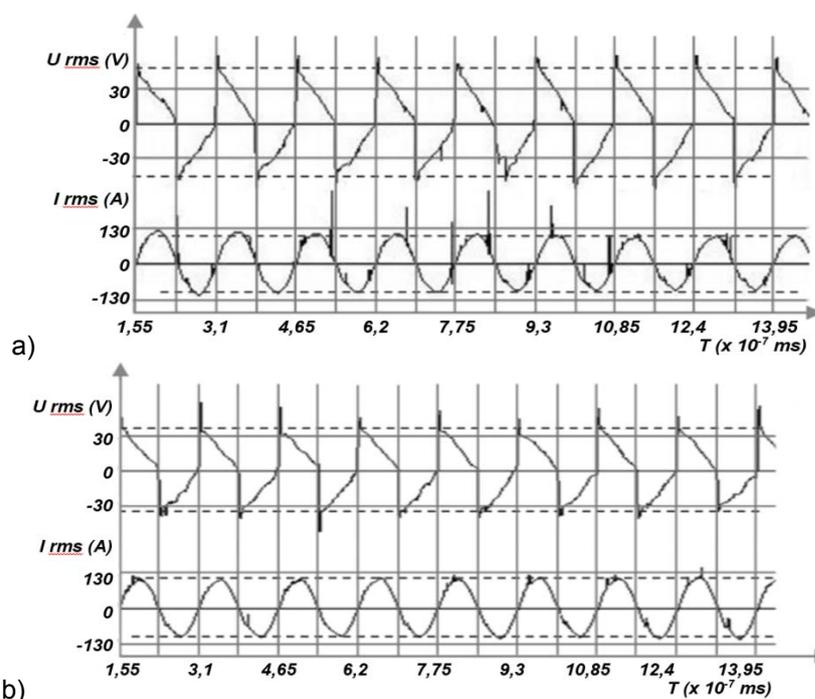


Fig. 2. Oscilogramas de corriente (I) y de voltaje (U) obtenidos durante la prueba operativa de los electrodos evaluados.

a) Electrodo de único recubrimiento; b) Electrodo con doble capa

Tabla 2. Promedios de los parámetros eléctricos y de consumo

I=125 A nominal	Doble Recubrimiento		Recubrimiento Único	
	Extrusión	Inmersión	Extrusión	Inmersión
Mn (g)	7,97	5,99	8,59	8,85
Le (mm)	159,50	125,00	178,33	171,00
de (mm)	2,85	2,80	2,80	2,90
Mbi (g)	16,15	11,58	19,28	9,52
Mip (g)	91,16	100,20	89,88	102,82
Tbas (s)	7,99	6,64	7,49	10,01
Lc (mm)	103,50	78,00	132,00	140,33
Mbf (g)	10,05	6,77	14,12	7,84
Mfp (g)	93,57	102,12	91,81	104,01
Mu(g/mm)	0,05	0,05	0,05	0,05
Mf (g)	2,79	2,31	2,24	1,53
Md (g)	2,41	1,91	1,93	1,18
af (g/A·h)	11,06	10,98	8,55	4,63
ad (g/A·h)	9,54	8,86	6,99	3,59
RD (kg/h)	1,19	1,11	0,87	0,45
Ψ (%)	13,68	14,27	19,46	22,80
E (%)	86,32	85,73	80,54	77,20
Ed (%)	39,45	39,99	35,00	71,58
ET (%)	14,95	16,65	9,76	12,78
RMS*	Corriente (A)	124,34		107,64
	Voltaje (V)	34,16		41,26
	Potencia (W)	4247,39		4441,23

* RMS (Raíz Cuadrática Media)

Los oscilogramas (Fig. 2) muestran que es similar el patrón de la corriente de soldadura en ambas ondas (curvas inferiores, Fig. 2a y Fig. 2b). Sin embargo, se pueden apreciar diferencias entre las magnitudes máximas de los voltajes de reencendido entre las dos ondas (curvas superiores, Fig. 2a y Fig. 2b), apreciándose valores mayores de voltaje de reencendido para el electrodo de único recubrimiento (tabla 2). Este resultado puede estar asociado a diferencias de la conductividad eléctrica en la columna del arco por la mayor y directa participación de elementos de bajo potencial de ionización. Este aspecto se traduce en diferencias (tabla 2) en los consumos de potencia de cada electrodo, donde puede constatar que el electrodo de recubrimiento único es el mayor consumidor de potencia aparente (4,44 kW) por ser el que con mayor voltaje cuadrático medio (41 V) realiza el proceso de soldadura. Este aspecto puede estar asociado con la longitud de arco durante el proceso.

La valoración de la forma de la copa del electrodo (figura 3) permite apreciar diferencias en cuanto a la forma de la campana del arco de soldadura, el comportamiento térmico de los recubrimientos de los electrodos y la longitud del arco de soldadura, entre otros, aspectos necesarios a considerar para diferenciación en el comportamiento operativo de los electrodos de único y doble recubrimiento.

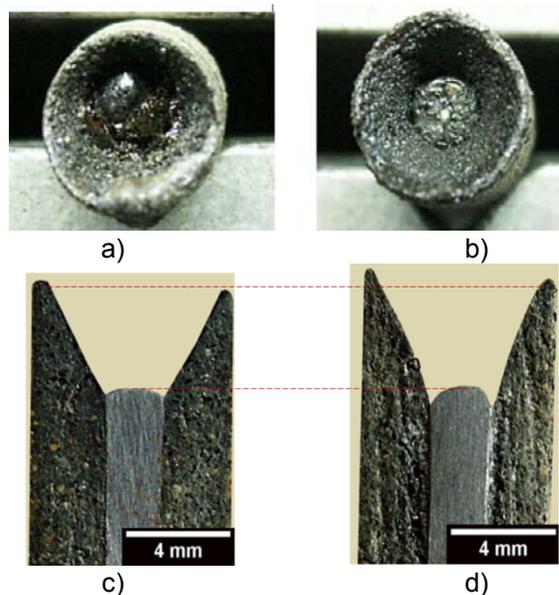


Fig. 3. Copa y recubrimiento de los electrodos fabricados por extrusión
a) y c) Con recubrimiento único. b) y d) Con doble recubrimiento

Al comparar las imágenes de los electrodos fabricados (Fig. 3), puede apreciarse una mejor limpieza del interior de la copa del electrodo de doble recubrimiento (Fig. 3b), que en la del recubrimiento monocapa (figura 3a), revelando la ausencia de escoria en el extremo (punta) del electrodo. Además, se aprecia una relativa mayor profundidad de penetración en la copa del electrodo con doble recubrimiento (Fig. 3d), en comparación con el otro de recubrimiento monocapa (Fig. 3c). La forma de los recubrimientos y la limpieza de la copa podrían estar asociados a la capacidad de reacción de las ferroaleaciones con el núcleo metálico.

Una apreciación de las particularidades de cada electrodo sobre la forma del metal depositado se obtiene de la comparación de las macrografías de las secciones transversales de los depósitos realizados (Fig. 4). Con dicha información, y empleando el software *ImageJ*, pueden determinarse los parámetros de forma del depósito (tabla 3) y evidenciarse diferencias en la influencia de la forma de colocación del recubrimiento en los electrodos sobre los depósitos evaluados.

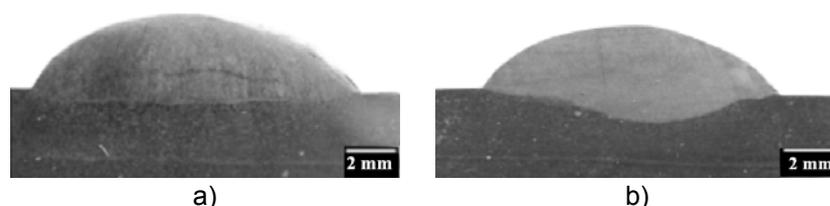


Fig. 4. Macrografías tomadas a las secciones transversales de los depósitos
a) Electrodo con recubrimiento monocapa, por extrusión b) Electrodo con doble capa, por extrusión

Tabla 3. Parámetros medidos en la macrografía

Denominación Muestras	Recubrimiento por extrusión		
	Doble capa	Monocapa	Diferencia
Parámetros medidos	Magnitud	Magnitud	(%)
Ancho del Cordón (mm)	12,01	13,03	-7,82
Altura del Refuerzo (mm)	2,195	2,74	-19,89
Prof. de Penetración (mm)	0,99	0,53	46,46
Área del Refuerzo (mm ²)	18,42	24,4	-24,5
Área de Penetración (mm ²)	7,2	5,14	28,47

Como resultado del análisis del diseño experimental aplicado se obtiene (Fig. 5) los efectos principales del coeficiente de depósito (α_d), de la eficiencia del depósito (E_d) y de la potencia consumida (P), aspectos que permiten destacar las diferencias operativas fundamentales entre los electrodos estudiados.

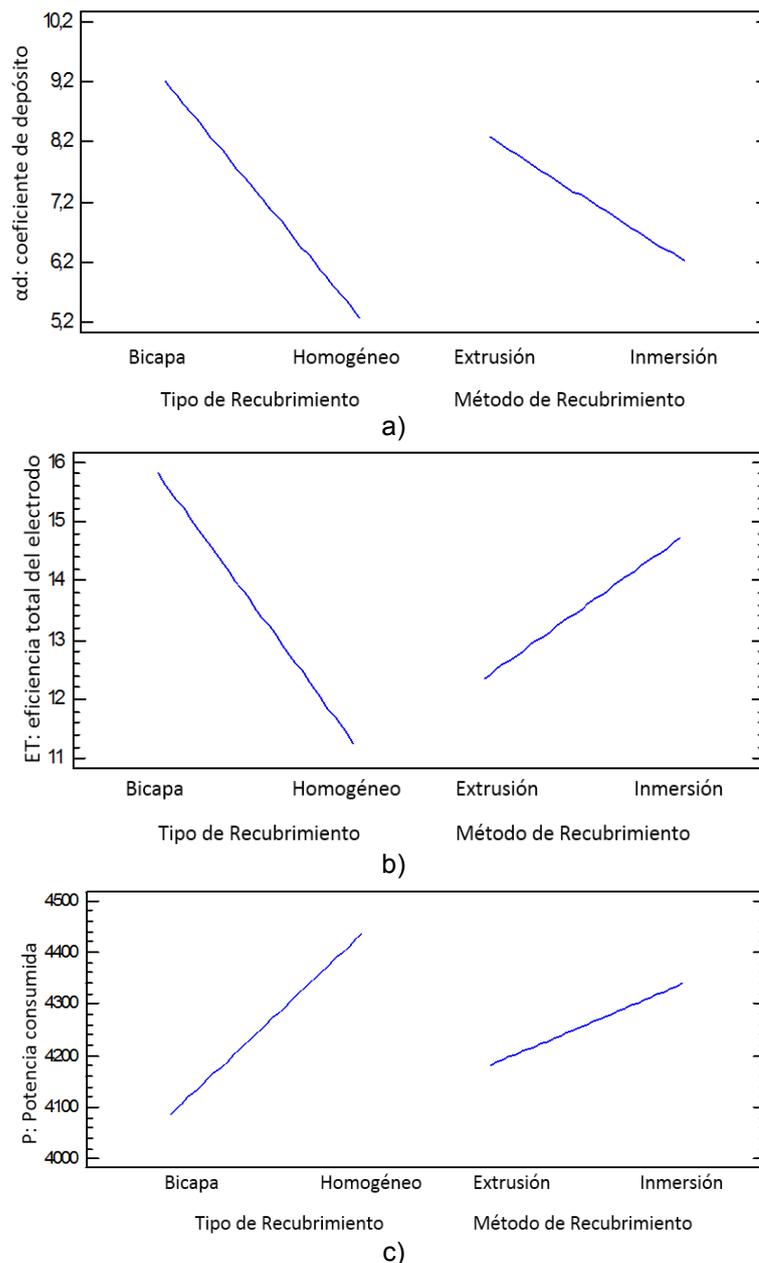


Fig. 5. Efectos principales en el comportamiento de: a) El coeficiente de depósito (α_d), b) La eficiencia del depósito (E_d), c) La potencia consumida (P)

Se puede considerar evidente un mayor efecto en el coeficiente (αd) y la eficiencia del depósito (E_d) para el electrodo de doble recubrimiento. Esto está asociado a la transferencia metálica, desde el electrodo al depósito y a las pérdidas por salpicaduras. El efecto principal de la potencia consumida (P) es el menor, para el caso del electrodo de doble recubrimiento, pudiéndose relacionar con los consumos eléctricos (corriente y voltaje de soldadura) reales involucrados en el proceso de soldadura.

El gráfico de superficie respuesta (Fig. 6) permite representar la optimización de las variables dependientes (αf : coeficiente de fusión; αd : coeficiente de depósito; RD : razón de depósito o productividad del proceso; Ψ : coeficiente de pérdidas; E : Eficiencia de depósito referida al núcleo del electrodo; E_d : eficiencia del depósito; ET : eficiencia total del electrodo; I : corriente de soldadura; V : voltaje de soldadura; P : potencia consumida durante el proceso) durante la evaluación del diseño factorial completo (tabla 1), efectuado para el estudio de la influencia del método de fabricación (extrusión e inmersión) y de la forma de colocación de la carga de aleación (monocapa y Bicapa). De su análisis puede concluirse el comportamiento integral de los electrodos evaluados y la evidencia de sus diferencias más significativas en cuanto a su comportamiento.

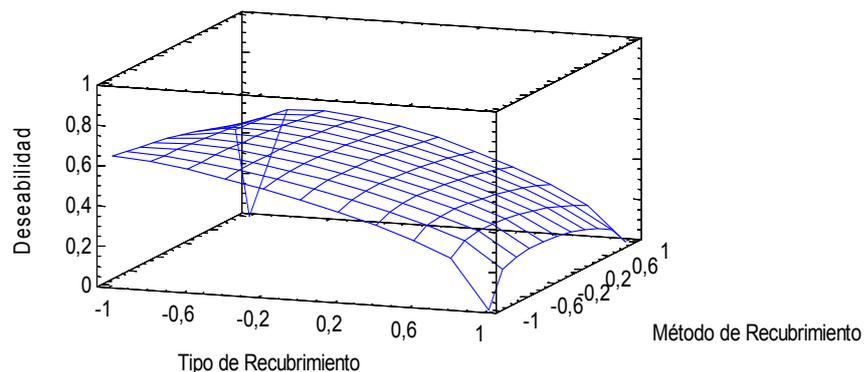


Fig. 6. Superficie respuesta estimada

Para la variable independiente "Tipo de recubrimiento" (x_1) se emplea, como niveles extremos (ver tabla1):

1. Aplicación de un recubrimiento monocapa, codificada como "+" y
2. Aplicación de un recubrimiento doble, codificada como "-".

Para la variable independiente "Método de recubrimiento" (x_2), se emplean como niveles extremos (ver tabla1):

1. Recubrimiento por inmersión, codificada como "+", y
2. Recubrimiento por extrusión, codificada como "-".

La carga de aleación de los electrodos con recubrimientos monocapa (Fig. 1a) está sometida a una barrera mecánica y química respecto al arco eléctrico, ambiente potencialmente oxidante y relativamente más frío, respecto del centro del plasma del arco. La carga de aleación, en los electrodos de doble capa (Fig. 1b), se encuentra formando una interface entre el núcleo metálico conductor de la corriente y los componentes del recubrimiento, no conductores y potencialmente oxidantes. Evidentemente, la diferencia en la situación física relativa respecto al núcleo del electrodo condiciona el por ciento de participación de la carga de aleación y su posibilidad de reacción con el resto del recubrimiento, con el arco y con el metal del electrodo. La disposición periférica inmediata de la carga de aleación (Fig. 1b) con relativo bajo potencial de ionización puede considerarse una extensión del diámetro metálico del núcleo del electrodo, en términos de conductividad eléctrica y térmica de sus constituyentes, además de encontrarse, en mayor por ciento, presente en la zona más caliente cercana al acto de soldadura. Estas condiciones favorecen la participación de las ferroaleaciones en el arco modificando su comportamiento eléctrico y termodinámico.

Este aspecto produce una mayor estabilidad eléctrica, traducida en un menor voltaje (17,2 %) promedio de arco (Fig. 2) y menor potencia consumida (tabla 2). El menor voltaje promedio puede deberse al acortamiento de la longitud libre del electrodo o a un incremento de la conductividad del plasma del arco. La alimentación del electrodo se produce empleando un dispositivo de gravedad. En este tipo de técnica el extremo del recubrimiento se apoya sobre la pieza y garantiza razones de consumo y depósito acordes a las particularidades del electrodo. Al observar que las copas de los electrodos poseen prácticamente las mismas longitudes (Fig. 3c y Fig. 3d), el decremento del voltaje (17,2 %) solo es atribuible al incremento de la conductividad del arco. Este comportamiento puede ser consecuencia de una participación más activa de las ferroaleaciones en la conducción dentro del arco, dada por su ubicación concentrada en la zona contigua al alma metálica del electrodo de doble recubrimiento. Esta participación de la carga metálica de aleación en el arco trae consigo la disminución de la interacción con el recubrimiento y de la formación consecuente de sus óxidos. Este aspecto favorece el paso de dichos elementos al arco y,

podiera ser, a través de éste al metal depositado. La evidencia de la participación efectiva de la carga de aleación en este proceso se evidencia por la falta de material (socavadura) en la zona aledaña a la periferia y cercana a la punta del alma del electrodo (Fig. 2d). Otra forma de constatar la participación más activa de las ferroaleaciones lo constituye al valorar la limpieza relativa de la superficie de la punta del electrodo de doble recubrimiento (Fig. 3b), donde se puede constatar la potencial acción reductora de las ferroaleaciones y, por tanto de su participación más activa en esta disposición de doble recubrimiento. De igual forma, puede apreciarse (Fig. 3) la leve reducción del ángulo de la copa en la zona cercana a la punta del electrodo como otro indicio del incremento de la participación de las ferroaleaciones a la columna del arco, lo cual puede estar dado por la configuración de anillo concentrado que forman las ferroaleaciones en el electrodo de doble capa, la relativa más alta conductividad térmica y eléctrica de los compuestos de la carga de aleación concentrados, que distribuidos dentro de una masa homogénea.

La participación de los constituyentes de la carga de aleación dentro del arco pueden explicar el comportamiento del menor voltaje (punto de operación) requerido (17,2 %) y la mayor longitud del arco verificada por el electrodo de doble recubrimiento durante el relleno (tabla 2). La longitud de electrodo en este tipo de aplicación (autoalimentación) está dada por la refractariedad del revestimiento y la conductividad eléctrica del arco. Al participar en el arco eléctrico mayor cantidad de elementos metálicos con relativamente más bajo potencial de ionización (carga de aleación metálica concentrada) en la variante de electrodo de doble recubrimiento, se aprecia un arco estable con 13,43 % mayor intensidad de corriente, que requiere menor diferencia de potencial para mantenerse (tabla 2), lo que demuestra una menor resistencia eléctrica en la columna. Este decremento de voltaje inducido por la disminución de la resistencia eléctrica de la columna del arco es debido, presumiblemente, a la incorporación de mayor cantidad de elementos de bajo potencial de ionización, tales como los presentes en la carga de aleación que está concentrada en la periferia del núcleo del electrodo. La combinación de estos parámetros eléctricos conduce a un decremento (4,8 %) de la potencia eléctrica de proceso (tabla 2), resultando este aspecto más positivo (Fig. 5c) en el caso de los electrodos de doble recubrimiento. Estos aspectos se pueden constatar a través de algunos de los parámetros fundamentales de consumo; así el coeficiente de depósito (αd) es un 22,7 % mayor que el obtenido con el electrodo de recubrimiento monocapa (Fig. 5a). Además, puede apreciarse que el electrodo bicapa posee (tabla 2) un 27 %, aproximadamente, mayor razón de depósito (RD), que el electrodo monocapa (Fig. 5b). El consumo de potencia está asociado a los costos eléctricos del proceso. De los aspectos anteriormente analizados puede señalarse que el electrodo con recubrimiento de doble capa es más económico (consume un 4,8 % menos potencia durante la soldadura) que el electrodo de recubrimiento monocapa, a la vez que posee mayor rendimiento, al soldar con un 13,43 % mayor intensidad de corriente y depositando mayor cantidad (27 %) de metal por unidad de tiempo, que el de recubrimiento monocapa.

Las imágenes macrográficas (Fig. 4) revelan una aparente similitud entre la forma de los depósitos realizados; sin embargo, se aprecia una diferencia porcentual (tabla 3) en todos sus parámetros fundamentales. Así, el ancho del cordón es relativamente poco mayor (7,8 %) al emplear el electrodo con recubrimiento monocapa, respecto al depósito realizado con electrodo de doble capa; igualmente, más pronunciada su altura (19,9 %) y área de refuerzo (24,5 %). No obstante, el electrodo de doble capa produce mayor profundidad (46,5 %) y mayor área de penetración (28,5 %), que el de monocapa. El incremento de la profundidad de la copa de los electrodos de doble recubrimiento puede deberse a la incorporación mayoritaria de elementos metálicos al arco, reduciendo su resistencia, incrementando su concentración y, como resultado, la fuerza del arco eléctrico sobre el metal líquido. Dicha concentración energética está acorde con una posible reducción del ancho del cordón (tabla 3), debido a la disminución consecuente con el ángulo del cono del arco, explicado con anterioridad.

Todas estas consideraciones están asociadas, evidentemente, a la forma en que se ubican las ferroaleaciones en el recubrimiento, la modificación que esto produce en la conductividad eléctrica, su influencia en la forma de la copa de los electrodos, sobre la longitud (voltaje) y concentración de vapores metálicos en el arco.

La aplicación de un recubrimiento doble por extrusión es el método que refleja el funcionamiento más eficiente de las cuatro combinaciones (Fig. 6) de electrodos evaluados (recubrimiento monocapa obtenido por inmersión; recubrimiento monocapa obtenido por extrusión; recubrimiento bicapa obtenido por inmersión; recubrimiento bicapa obtenido por extrusión).

Conclusiones

- 1- La combinación de un 70 % de materiales no metálicos y de un 30 % de carga de aleación permite la obtención, tanto de recubrimientos monocapas, como bicapa para electrodos destinados al relleno superficial.

- 2- El electrodo con recubrimiento doble capa referido consume un 4,8 % menos de potencia durante la soldadura que el electrodo de recubrimiento monocapa (más económico), pero con mayor cantidad (27 %) de metal depositado por unidad de tiempo (mayor rendimiento).
- 3- El electrodo de doble recubrimiento deposita un metal con una geometría caracterizada por un ancho del cordón relativamente poco menor (7,8 %), que al emplear el electrodo con recubrimiento monocapa, con una altura y área de refuerzo menos pronunciadas (19,9 % y 24,5 %, respectivamente). No obstante, el electrodo de doble capa produce mayor profundidad (46,5 %) y mayor área de penetración (28,5 %), que la obtenida por los electrodos con recubrimiento monocapa.

Referencias

1. Ramirez, J. E. y Johnson, M. 2010. "Effecto of welding parameters and electrode conditions on alloying enrichment of weld metal deposited with coated cellulosic electrodes". *Welding Journal*. vol. 89, p. 11. ISSN 0043-2296.
2. Gómez Pérez, C. R., Paula Perotti, A. y García Rodríguez, A. 2013. "Diseño Mc. Lean-Anderson aplicado para obtener recubrimientos de electrodos aleados con carbono, cromo y titanio". *Ingeniería Mecánica*. vol. 16, nº. 2, p. 132-143. ISSN 1815-5944.
3. Pérez Pérez, D., Gómez Pérez, C. R. y Ruiz Martínez, F. A. 2011. "Estudio del proceso de fragmentación de fundentes fundidos usando aire". *Revista Cubana de Ingeniería*. vol. 2, nº. 2, p. 25-33. ISSN 22323-1781.
4. Quintana Puchol, R., Prieto Garcia, O. y Hernández Ruiz, J. 2010. "Síntesis de una Matriz Cuasiceramica Destinada a la Obtención de Fundentes Aglomerados para Proceso SAW y Evaluación Cinético-termodinámica de su Proceso de Humectación". *Soldagem & Inspeção*. vol. 15, nº. 2, p. 130-140. ISSN 0104-9224.
5. American Welding Society. 1997. *Welding Handbook. Metals and Their Weldability*. En: *Materials and Applications*. 8va ed. USA: American Welding Society, vol. 2, Part 2.
6. Quintana Puchol, R., Rodríguez Blanco, J. y Perdomo Gonzalez, L. 2007. "Influencia del Aire Ocluido en la Capa de Deposición de Fundentes durante la Soldadura Automática". *Soldagem & Inspeção*. vol. 12, nº. 4, p. 316-325. ISSN 0104-9224.
7. Queiroz Bracarense, A. y González Lorenzo, P. 2009. "Development of tubular coated electrodes for underwater wet welding". *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*. vol. 32, nº. 2, p. 89-97. ISSN 0254-0770.
8. Tordonato, D. S., Madeni, J. C., Babu, S., et al. 2010. "A new method for the design of welding consumables". *Welding Journal*. vol. 88, nº. Welding Research Supplement, p. 201-s - 209-s. ISSN 0043-2296.
9. Chen, B., Han, F. y Huang, Y. 2009. "Influence of Nanoscale Marble (Calcium Carbonate-CaCO₃) on Properties of D600R Surfacing Electrode". *Welding Journal*. vol. 88, nº. Welding Research, p. 99s-103s. ISSN 0043-2296.
10. García Rodríguez, A. y Gómez Pérez, C. R. "Criteria for some methodologies of operative characterization of coated electrodes in welding in short-circuit metallic transference mode". *Welding International*. vol. 23, nº. 4, p. 282-290. ISSN 1754-2138.
11. García Rodríguez, A., Gómez Pérez, C. R. y Borroto, R. 2010. "Behaviour of short-circuit frequency and duration time and electrical conductivity during arc re-ignition in SMAW (AC) with E6013 electrodes". *Welding International*. vol. 24, nº. 9, p. 673-679. ISSN 1754-2138.