

EVALUACIÓN DE ELECTRODOS PARA LA FABRICACIÓN DE BLINDAJES LATERALES DE MOLINOS DE TRITURACIÓN DE ÁRIDOS

EVALUATION OF ELECTRODES FOR THE MANUFACTURE OF LATERAL SHIELDS FOR CRUSHING OF MILLS ARID

EDUARDO DÍAZ-CEDRÉ

Ph.D. Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, cedre@uclv.edu.cu

AMADO CRUZ-CRESPO

Ph.D. Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba,

AMERICO SCOTTI

Ph.D. LAPROSOLDA, Universidad Federal de Uberlandia, Uberlandia, Minas Gerais, Brasil

PEDRO RODRIGUEZ-PENA

M.Sc. UBP Molino de Piedra "El Purio", Empresa de Materiales de la Construcción

JORGE MIGUEL ORIA

Lic. Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba,

NANCY PÉREZ-PINO

Lic. Oficina Cubana de la Propiedad Industrial, CIGET- VC

Recibido para revisar Junio 15 de 2012, aceptado Diciembre 6 de 2012, versión final Enero 15 de 2013

RESUMEN: El presente trabajo estudia el comportamiento de electrodos revestidos para recubrimiento duro manual por arco eléctrico (SMAW), utilizados en la fabricación de blindajes laterales de molinos para la trituración de áridos. Se evaluaron tres materiales de aporte de diferentes fabricantes y recomendados para este tipo de aplicación. Se realizaron depósitos con diferentes niveles de corriente de soldadura, utilizando un dispositivo simulador que permite realizar ensayos de recubrimiento duro manual sin la interferencia directa del soldador. Se determinaron las características técnico-operativas de los consumibles de soldadura estudiados, tales como: tasa de fusión y deposición, rendimiento real, estabilidad de funcionamiento; así como se establecieron las propiedades de los depósitos: estructura metalográfica y dureza. El análisis integrado de estas características posibilitó la selección del metal de aporte más adecuado, así como la mejor corriente de soldadura para esta aplicación concreta. Finalmente se desarrolló un ensayo de desgaste comparativo en condiciones reales de servicio, demostrando de esta manera la factibilidad de la sustitución de un elemento por otro.

PALABRAS CLAVE: Molino de áridos, recubrimiento duro; SMAW.

ABSTRACT: The present paper study the behavior of hardfacing electrodes for shielded metal arc welding process (SMAW), used in the manufacturing of lateral shields mills for crushing arid aggregates. Filler metals, from three different manufacturers, and recommended for this application were evaluated. Deposits with different levels of current welding were made, using a simulator device that allows manual hardfacing tests without the interference of the welder. Technical and operational characteristics of the studied welding consumables, like: fusion and deposition rate, actual performance and operating stability, were determined; also the properties of the deposits: metallographic structure and hardness, were established. The integrated analysis of all these characteristics, allowed the selection of the most adequate filler metal, and the welding current that should be use for this specific application. Finally, comparative test of wear was developed under real service conditions, demonstrating the feasibility of the substitution among those elements.

KEYWORDS: mills arid, hardfacing, SMAW

1. INTRODUCCIÓN

Con el incremento de la necesidad de materiales de

construcción, se ha producido un incremento en las operaciones de molienda de áridos, y con ello se ha incrementado también el desgaste de los elementos que conforman estos equipos, principalmente aquellos que

están en contacto directo con las rocas (quebrantadoras, molinos, cribas, etc.) disminuyendo de manera significativa la vida útil de los mismo [1].

Un caso significativo, debido a su alta responsabilidad dentro de los molinos lo constituyen los blindajes laterales. Estos elementos se desgastan y posteriormente se fracturan, sobre la base de la acción de un mecanismo de alta abrasión con ligeros impactos [2]. Las características de estos elementos, (fundición blanca aleada al cromo) en cuanto a composición químicas (alto carbono y cromo) y una microestructura formada por austenita (zonas blancas) y eutéctico (zonas oscuras) donde se encuentran los carburos de cromo, según se muestran en la Tabla 1, impiden que puedan ser producidos por la industria nacional, por lo que al ocurrir un desgaste que limite el adecuado desempeño, la práctica habitual es sustituirlos, a pesar de su elevado costo en el mercado, que asciende a más de 104 USD/unidad [3].

Una forma de solucionar la problemática antes planteada, lo constituyó la sustitución de las piezas fundidas por elementos de las mismas dimensiones geométricas, pero fabricados de acero de bajo contenido de carbono, recubierto por la parte por donde entra en contacto con los áridos con materiales de aporte que sean resistentes al mecanismo de desgaste que provoca el deterioro del blindaje. Sin embargo, al seleccionar el material de aporte surge una disyuntiva, ya que en el mercado existían varios consumibles que según lo expresado por sus fabricantes [4, 5], podían ser utilizados para la solución del problema antes planteado, presentando características y precios similares, lo que hace difícil su selección. Por otra parte, al realizar una revisión bibliográfica de la temática, se puede apreciar que muchos autores [6, 7], se concentran en los elementos metalúrgicos y su vinculación con la resistencia al desgaste, pasando por alto, otros elementos de suma importancia que pueden ser tenidos en cuenta en la selección de un aporte para recubrimiento duro, como pueden ser los parámetros de consumo y la estabilidad de funcionamiento del consumible. Es por ello que el objetivo fundamental de este trabajo consistió en realizar un estudio que permita la selección del aporte más adecuado para la aplicación antes referida, así como el régimen de aplicación, integrando no solo las propiedades de los depósitos (metalografía, dureza y resistencia al desgaste) sino también elementos del comportamiento técnico-operacional (parámetros de

consumos, estabilidad de funcionamiento)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el estudio, fueron utilizados tres electrodos para recubrimiento duro manual disponibles en el mercado. Uno revestido (denominado como 1), marcado con la clasificación DIN 8555 [8] como E 6-UM-60, de diámetro 4 mm por 350 mm de largo, otro desnudo (tubular) (denominado como 3), marcado con la clasificación AWS A5.21 [9], como ER-FeCr de 5 mm de diámetro por 500 mm de longitud y un tercero revestido (denominado como 2), sin ningún tipo de clasificación, pero con 4 mm de diámetro y 350 mm de longitud y que responde al sistema aleante Fe-Cr-C-Nb. Las características particulares de estos aportes se muestran en la Tabla 2.

Teniendo en cuenta trabajos precedentes en este campo [10, 11], a los materiales de aporte en estudio se le evaluaron los siguientes parámetros:

- Parámetros de consumo
- Estabilidad de funcionamiento
- Estructura metalográfica y Dureza de los depósitos

Para estudiar el comportamiento de los aspectos antes citados, se partió de un diseño de experimentos. El modelo elegido fue un modelo factorial del tipo $N=3^k$, donde: N es la cantidad de experimentos y k la cantidad de variables independientes. Este diseño se tomo debido a su simplicidad y tratando de lograr un mínimo número de experimentos, lo cual disminuye el costo y el tiempo de realización. Como en el proceso de recubrimiento duro por arco manual la velocidad de soldadura está asociada con la habilidad del soldador y que el voltaje no puede controlarse independientemente de la corriente [12], fue tomada como única variable independiente en los experimentos la corriente de soldadura (I_s) (manteniendo constante la velocidad de soldadura) con vistas a estudiar su efecto sobre el comportamiento del electrodo. Además, este parámetro del régimen es quien determina, la magnitud de calor aportado, por tanto la microestructura y propiedades finales.

En correspondencia con el diseño elegido, se tomaron tres niveles de significación (baja, media y alta), para de esa forma conocer con mayor precisión las tendencias de los fenómenos en estudio. De acuerdo

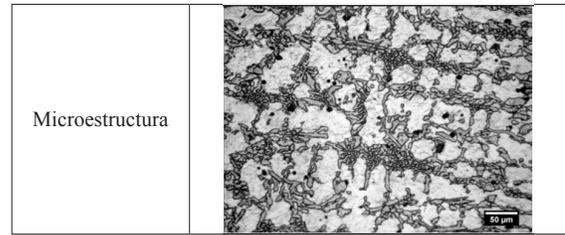
a las recomendaciones dadas por los proveedores de los materiales de aporte [4, 5], los niveles de corriente utilizados fueron: 90 A para el nivel bajo, 120 A para el nivel medio y 160 A para el nivel alto. Es necesario destacar que dichos niveles se encontraban dentro del rango de operación de los aportes en estudio. Con respecto al tipo de corriente se utilizó corriente continua con polaridad invertida (CC+).

Para evitar la interferencia del soldador, los depósitos fueron realizados en una instalación mecanizada para la soldadura SMAW en LAPROSOLDA (Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem), perteneciente a la Universidad Federal de Uberlândia [13]. Está instalación, por su diseño, permite mantener constante la velocidad de soldadura y la longitud de arco durante el funcionamiento del proceso. La velocidad de soldadura fue fijada en 15 cm/min, ya que es un valor que ha sido utilizado con éxito en trabajos precedentes [10] y que está considerada dentro del rango normal para el proceso SMAW. La instalación antes referida estaba acoplada a una computadora, con la cual, a través de una tarjeta de adquisición de datos, fueron registrados los valores instantáneos de corriente y voltaje, a una frecuencia de 10 kHz, una resolución de 12-bit, durante 6 s. Estos registros de valores instantáneos de corriente y voltaje con posterioridad fueron convertidos y tratados con ayuda de programas computacionales dedicados a tales propósitos, para de este modo obtener las informaciones relacionadas con la estabilidad de funcionamiento.

Para la obtención de las muestras y los registros, fueron realizados cordones sobre placas (*Bead-on-plate*) de ASTM A 36 de 150 mm x 50 mm x 6 mm en posición plana. Antes de soldar, tanto las placas como los electrodos fueron pesados en una balanza técnica.

Tabla 1. Composición química y microestructura de una placa de blindaje original de un molino de trituración de áridos [14]

Elementos químicos % en masa	C	Si	Mn	Cr	Mo
	3,14	2,25	1,77	10,65	0,29



Al finalizar el proceso de soldadura, las placas con los depósitos y las colillas fueron nuevamente pesadas, para obtener de esta manera la información necesaria para determinar los parámetros de consumo.

De los depósitos terminados, fueron extraídas tres secciones en el sentido transversal al cordón. Las muestras fueron preparadas y atacadas con reactivo de Murakami, y posteriormente observadas a 200X de aumento en un Microscopio Óptico Metalográfico NOVEL modelo NIM-100, con una cámara digital acoplada. De tal modo fueron adquiridas las imágenes que muestran la microestructura de cada uno de los depósitos.

La medición de la dureza fue realizada con un microdurómetro SHIMATZU, modelo HVS 1000. Fueron realizadas 10 mediciones en el centro de cada depósito con una carga de 1000 g.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Parámetros de consumo

De acuerdo con los resultados mostrados en las Figuras 1 y 2 y en concordancia con lo tratado en la literatura [10, 15] con el aumento de la corriente hay una tendencia al aumento de la tasa de fusión y deposición, donde las mayores tasas observadas corresponden al metal de aporte 3, el cual es un electrodo tubular desnudo. Esto se corresponde con el hecho que el electrodo 3 presenta una menor área metálica de la sección transversal (solo la parte tubular), ya que en el alma tubular, los materiales presentes (ferroaleaciones entre otros) no son buenos conductores de la corriente, aumentando de esa manera la densidad de corriente.

Tabla 2. Características de los metales de aporte para el proceso SMAW, utilizados en la investigación [4, 5].

Identificación	Clasificación	Composición química (% en masa)	
		Elemento	Porcentaje
1	DIN 8555 E 10-UM-60G	C	3,5
		Si	1,2
		Mn	2,5
		Cr	28
2	No declarado	C	4,09
		Cr	20,4
		Nb	6,4
3	AWS A5.21 ER-FeCr	C	3,5
		Cr	30

Según lo planteado por Quites y Dutra, [15], la tasa de fusión y deposición de un material de aporte están muy afectadas por las particularidades del revestimiento, lo que produce variaciones en los grados de ionización de las atmósferas y estas a su vez variaciones en los modos de transferencia. De modo general, cuanto mayor sea la energía de ionización de la atmósfera del arco, provocada por una mayor corriente de soldadura (para un revestimiento constante o alma tubular constante) menor serán el diámetro de las gotas que se transfieren, así como mayor su cantidad, incrementando de esta manera la tasa de fusión del material de aporte. Si bien es cierto que el efecto gobernante está dado por la influencia que ejerce la corriente sobre la energía de entrada.

Con respecto al comportamiento del rendimiento real (Figura 3), se advierte que el comportamiento difiere entre los electrodos evaluados. Para los materiales de aporte 1 y 2, en la medida que la corriente de soldadura aumenta se produce una disminución del rendimiento. Una explicación a tal comportamiento podría estar dada, en que un calentamiento mayor del revestimiento del electrodo, por el efecto Joule, provoca que el mismo alcance mayor temperatura en toda su longitud y no solamente en su punta en contacto con el arco. Esto como es de esperar, aumenta el intercambio de calor con el medio circundante e incrementa la oxidación de los elementos de aleación y su pérdida. En igual sentido de análisis, el electrodo tubular manifiesta un comportamiento contrario de su rendimiento por un contacto menor de los componentes de carga con el medio circundante en toda la longitud del electrodo.

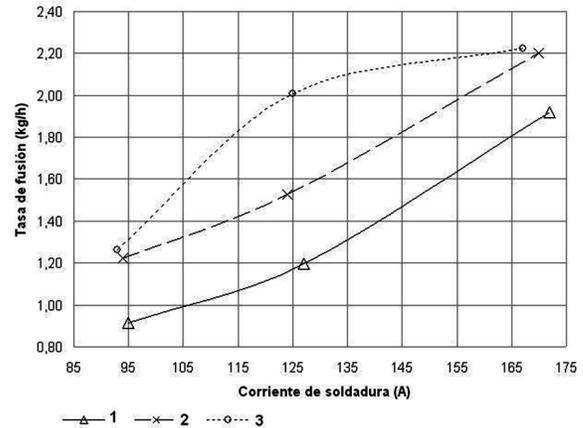


Figura 1. Comportamiento de la tasa de fusión con la variación de la corriente de soldadura.

También, de acuerdo a lo reportado por Brandi et al. [15], con el incremento de la corriente se puede producir un cambio en la transferencia metálica. Al aumentar la corriente, para los electrodos 1 y 2, puede producirse una disminución en el tamaño de las gotas que se transfieren, permitiendo el desarrollo de los mecanismos de salpicadura. Al mismo tiempo, un aumento de la corriente podría favorecer la explosión de las gotas al iniciarse el cortocircuito por el aumento de la presión de los gases en el interior de las gotas [16].

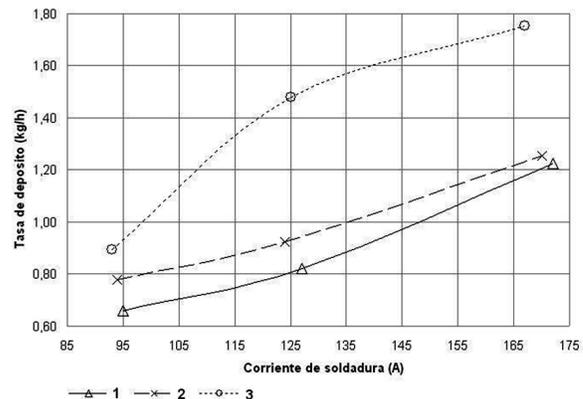


Figura 2. Comportamiento de la tasa de deposición con la variación de corriente de soldadura.

Es evidente que, desde el punto de vista del rendimiento real, la condición más favorable de comportamiento para los aportes 1 y 2 se logró para una corriente en el nivel bajo (90 A).

Con respecto al material de aporte 3, manifestó un comportamiento contrario al grupo formado por los materiales de aporte 1 y 2, logrando los mayores

rendimientos en el mayor nivel de corriente (160A). Este comportamiento también puede estar vinculado a la disminución de los fenómenos de la salpicadura en la medida que se incrementa la corriente. De acuerdo a lo reportado por Pokhodnya [17] el incremento de la corriente produce una intensificación de los procesos de disociación de los compuestos presentes en la carga del núcleo del electrodo. Esta disociación aumenta el contenido de elementos superficialmente activos en el interior del cono del extremo del electrodo, lo que permite la disminución de la tensión superficial de la interface metal-escoria, disminuyendo su espesor y posibilitando que la transferencia metálica no fluya al baño por un solo lugar, sino por varios lugares al mismo tiempo, a través de pequeños cortocircuitos o gotas pequeñas. Por lo que una parte importante del metal que es transferido, se realiza por la periferia del electrodo, a través de cortocircuitos pequeños, gotas transferidas de manera libre o utilizando el puente de escoria. Estos mecanismos posibilitan que la cantidad de movimiento con que dichas gotas impacten el baño fundido sea baja, por lo que evitan que las mismas al chocar con el baño exploten.

También de acuerdo a lo expresado por Pokhodnya [17], cuando la transferencia se realiza por la periferia del electrodo, las gotas presentan menor temperatura si se les compara con las que son transferidas desde la punta del electrodo, lo que evita que las mismas exploten al generarse las tensiones de contacto cuando interactúan con el baño fundido.

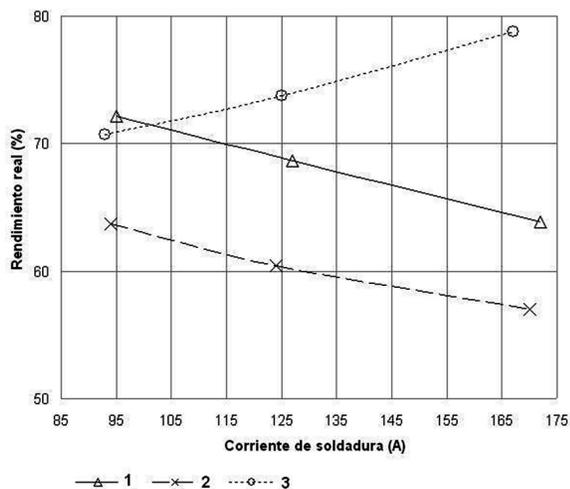


Figura 3. Comportamiento del rendimiento real con la variación de la corriente de soldadura.

3.2. Análisis de la estabilidad de funcionamiento

Para el estudio de la estabilidad de funcionamiento, y tomando como base lo planteado en la literatura [18, 19], se partió de los registros instantáneos de voltaje adquiridos durante la realización de los depósitos. Estos registros fueron procesados mediante programas computacionales, entregando como resultado los valores instantáneos de ambos parámetros. Para ello se siguió el principio de tener en cuenta solo los cortocircuitos cuya duración fuera mayor de 2 ms [11, 18]. Con estos datos se procedió al cálculo de los coeficientes de variación del voltaje (K_v) para cada uno de los consumibles en estudio. Este coeficiente permite determinar la variabilidad (dispersión estadística) de los datos. La fórmula (Ecuación 1) expresa la desviación estándar de la media aritmética, mostrando una mejor interpretación de la variabilidad de la desviación estándar. Un resultado ideal, significaría tener una dispersión con relación a la media lo más pequeña posible, lo que significaría en el caso en estudio, que el consumible tiene un funcionamiento estable y no tiene grandes oscilaciones ni diferencias de amplitudes. Es preciso destacar, que esta determinación solo tuvo un carácter comparativo.

$$K_v = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

K_v -Coeficiente de variación (%),

σ -Desviación estándar (V),

\bar{X} -Media de las mediciones (V),

En la Figura 4 se muestra el comportamiento del coeficiente de variación del voltaje ante el incremento de la corriente de soldadura. Este comportamiento es consistente con el comportamiento mostrado por el rendimiento real (Figura 3), ya que en la medida que el proceso se hace más estable (menor coeficiente de variación del voltaje), las pérdidas disminuyen, lo que concuerda con lo reportado en la literatura [20]. Para el material de aporte 3 en la medida que se incrementa la corriente de soldadura, mejoró los parámetros que caracterizan la transferencia (mayor estabilidad del proceso, sobre la base de un menor coeficiente de variación del voltaje), lo cual a su vez repercute en un incremento del rendimiento real. Esto puede ser un indicativo de la variación en el modo de transferencia. Por otra lado, los materiales de aporte 1 y 2 presentaron un mejor comportamiento desde el punto de vista de la estabilidad de funcionamiento, para el rango de

las bajas corriente, lo cual es coincidente también con el comportamiento en el rendimiento real, evidenciando de esa manera una disminución en el tamaño de las gotas de metal que se transfieren en la medida que la corriente de soldadura se incrementaba.

3.3. Caracterización metalográfica y determinación de la dureza de los depósitos

En la Figura 5 se muestran los valores de dureza de los depósitos obtenidos para los tres aportes en estudio con diferentes niveles de corrientes de soldadura. Se observa que para los menores niveles de corriente de soldadura, se obtienen los mayores valores de dureza, situación que ha sido abordada en la literatura [21], y que está justificada ya que para la menor intensidad de corriente, se produce una menor dilución, facilitando de esta manera la formación de un depósito con mayor aprovechamiento de los elementos de aleación del consumible y favoreciéndose en ello formación de carburos [6, 7, 21]. De acuerdo a los trabajos de Balsamo et al. [22], se hace evidente también, que para un mismo nivel de corriente los valores de dureza del depósito realizado con el aporte 2, son superiores al resto de los aportes (1 y 3). Lo que es consistente con las estructuras metalográficas observadas en las Tablas 3, 4 y 5.

Para el caso del material de aporte 2, con el nivel de corriente mínimo (90A), la microestructura observada (Figura 2a de la Tabla 4), se corresponde con la mayor dureza (1724 HV). En este caso se observa una estructura fina formada por carburos de cromo y niobio (zonas claras) en una matriz eutéctica (zonas oscuras), estructura coincidente con la reportada en la literatura para depósitos con características similares [23, 24]. Para los niveles medio y alto de corriente con este material de aporte (Figura 2b y 2c de la Tabla 4) se observó que en la medida que se incrementó la corriente ocurrieron cambios en la morfología de los depósitos, aumentando el tamaño de los campos dendrítico de austenita (zonas claras) y disminuyendo el tamaño de la matriz eutéctica (zonas oscuras). Lo cual es consistente con la disminución de la dureza que se muestra en la Figura 9. Tal disminución de la dureza con el aumento de la corriente tiene lugar, a pesar de que dentro de las dendritas de austenita se advierta la aparición de formaciones que bien podrían ser carburos de niobio, a juzgar por la composición química mostrada en la Tabla 2 y que coincide con lo reportado por De Melo [23].

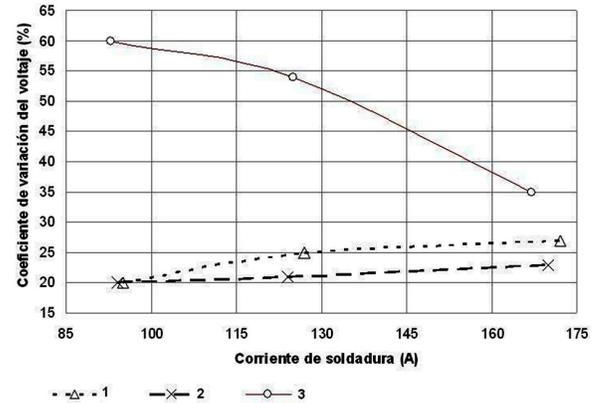


Figura 4. Comportamiento del coeficiente de variación del voltaje con la variación de la corriente de soldadura.

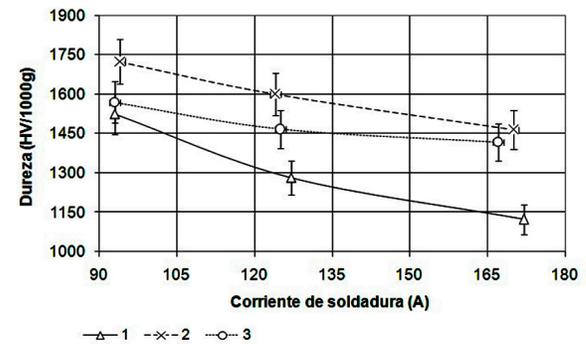


Figura 5. Comportamiento de la dureza promedio del depósito con la variación de la corriente de soldadura.

La disminución de la dureza en los depósitos realizados con los materiales de aporte 1 y 3 en la medida que se incrementa la corriente, es también consistente con las microestructuras mostradas en las Tabla 3 y 5. Ya que los mayores valores de dureza se corresponden con los depósitos que muestran mayor cantidad de eutéctico (zonas oscuras) y menor cantidad de austenita (zonas claras) (Figura 1a Tabla 3) o carburos primarios (zonas claras) y eutécticos (zonas oscuras) (Figura 3a Tabla 5). El incremento de la corriente va acompañada de modificaciones visibles en la microestructura cuyo indicativo es la presencia de la austenita (zonas claras en las figura 1c en la Tabla 3 y 3c en la Tabla 5).

Llama la atención que de acuerdo a las composiciones químicas mostradas en la Tabla 2, dichos materiales de aportes poseen composiciones químicas relativamente cercanas, sin embargo las microestructuras son completamente diferentes, formada en el caso de la muestra 1a por una microestructura compuesta por austenita en forma de dendritas en una matriz

eutéctica la que a su vez está formada por austenita mas carburos de cromo, y en el caso de la muestra 3a se observa una microestructura compuesta por carburos primarios de cromo en una matriz eutéctica formada por austenita y carburos de cromo. Para encontrar una explicación a esta variación, se determinó las áreas del metal fundido y las áreas del metal depositado a todas las muestras y sobre la base de ellas, se determinó la dilución alcanzada en función de la corriente de soldadura para cada aporte en estudio (Figura 6). Los niveles de dilución alcanzados por el aporte 1 son mucho mayores que los logrados por el aporte 3 para el nivel de corriente mínimo. Esta variación en la dilución de acuerdo a lo planteado en la literatura [21] provoca variaciones en las composiciones químicas de los depósitos, lo cual se une a una disminución de la velocidad de enfriamiento provocada por el incremento de la corriente, justificación plena de lo observado en la microestructura.

Toda vez que lo que se evalúa son depósitos para recubrimiento duro, deben ser jerarquizadas en lo posible, aquellas propiedades que propician una mayor resistencia al desgaste. En tal sentido, el depósito 2 al mostrar los valores más altos de dureza y una estructura con la presencia de carburos de cromo y niobio, al tiempo que su comportamiento en la soldadura es más estable de acuerdo a su nivel más bajo de coeficiente de variación del voltaje, por lo que se considera el más adecuado para la aplicación referida (recubrimiento duro de componentes de molinos que trabajan bajo abrasión). Este electrodo muestra su mejor desempeño (mayor rendimiento real) en el nivel bajo de la corriente (90 A).

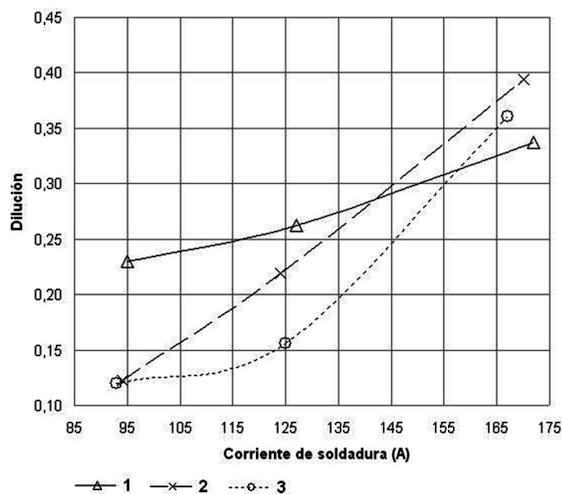


Figura 6. Comportamiento de la dilución con la variación de la corriente de soldadura.

3.4. Ensayo de desgaste

Luego de definido el aporte de mejores características, desde el punto de vista de la microestructura, para su aplicación frente al desgaste, así como la corriente donde presentó mejor desempeño. Se realizó un ensayo de desgaste comparativo en condiciones reales de servicio, tomando como referencia un blindaje original de molino el cual como se mencionó anteriormente fue elaborado de fundición blanca al cromo. La realización del ensayo directamente en condiciones de servicio del molino permite que estén presentes todos aquellos aspectos que pueden incidir sobre el desgaste durante el proceso de molienda, entre los cuales [25]:

- Modo de alimentación de los áridos
- Tamaño máximo de alimentación
- Reglaje del molino
- Velocidad de molienda.

Para la elaboración de la muestra de prueba, primeramente se desmontaron dos placas de blindajes laterales contiguas de un molino terciario HAZEMAG, del tipo APK-40, perteneciente a la Unidad Básica Empresarial “El Purio”. Una para tomarla como referencia y la otra para que su lugar fuera ocupado por la placa de acero de bajo contenido de carbono (ASTM A36) pero recubierta con el material de aporte 2.

Este tipo de molino posee 44 placas rectangulares y 12 triangulares, además de otras de configuración variada, las cuales protegen los elementos que se encuentran en el interior del molino, tales como apoyos de rodamiento, articulaciones etc. En el caso de las placas rectangulares, sus dimensiones fueron de 250mm x 152mm x 19,5 mm. La placa de acero utilizada fue de iguales dimensiones que la placa original, pero de 15,8 mm de espesor para que una vez realizada la operación de relleno quedara también en los 19,5 mm.

La placa fue rellena utilizando el nivel de corriente de soldadura que mejor resultados logró durante la evaluación de los electrodos (90 A) y aplicado por un soldador con alta experiencia en trabajos de recubrimiento por SMAW. Durante la aplicación de la soldadura se logró que al iniciar los sucesivos cordones

la placa siempre estuviera a temperatura ambiente, para esto se instruyo al soldador que solo se podía reiniciar la soldadura cuando la placa se pudiera tocar con la mano (temperatura menor de 42 °C).

La aplicación de los cordones fue realizada del centro de la placa hacia la periferia, estando los cordones de la segunda capa perpendiculares a los primeros aplicados. Todas estas precauciones permitieron que la deformación en la placa fuera mínima.

Ambas placas (la original de fundición blanca y la de acero recubierta por SMAW) fueron pesadas, utilizando una balanza técnica, la masa de ambas placas se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Masas de las muestras y pérdida de masa.

Identificación	Masa Inicial (kg)	Masa Final (kg)	Perdida Masa (kg)	Perdida de masa/caliza molida (kg/m ³)
Placa original	6,52	6,47	0,05	3,08x10 ⁻⁶
Placa sustituta	7,06	7,02	0,04	2,46x10 ⁻⁶

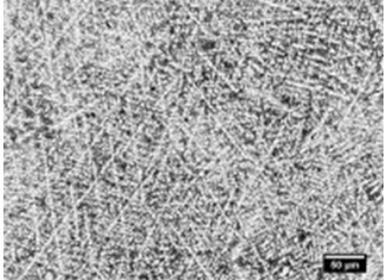
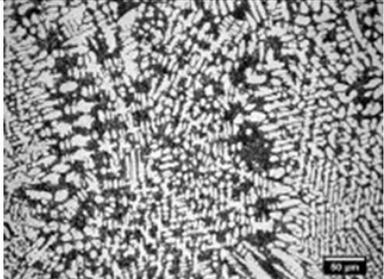
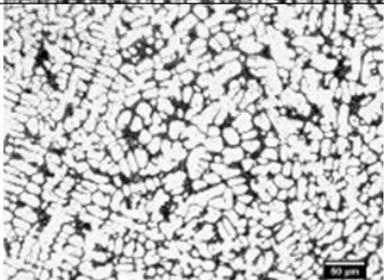
Dichas placas fueron colocadas en el interior del molino y sometidas al proceso de molienda de rocas calizas, cuyo componente principal es la calcita (CaCO₃), con dureza 3 en la escala de Mhos.

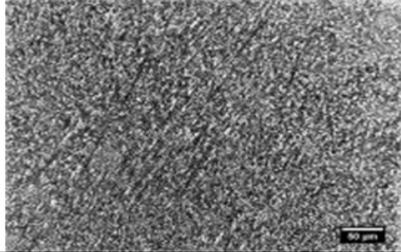
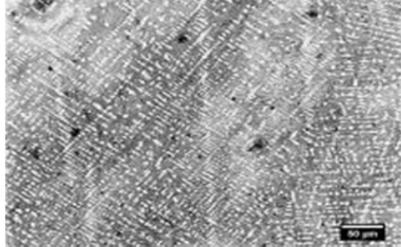
El molino estuvo trabajando jornadas de 12 horas diarias por un periodo de 30 días, de acuerdo a informes de producción de la planta [26]. Durante este periodo fueron procesados por el molino un total de 16200 m³

de rocas. Las placas fueron extraídas del molino, limpiadas cuidadosamente y pesadas nuevamente. En la Tabla 6 se muestra la masa final y la pérdida de masa de las muestras en estudio en función de la masa de roca caliza molida.

La Figura 7 muestra la relación existente entre la masa perdida de las muestras en estudio y el volumen de roca caliza molida. Está relación es un indicativo de que el elemento fabricado por soldadura perdió un 20% menos de la masa, con respecto al originalmente fundido, demostrando de esta manera la factibilidad de la sustitución de un elemento por otro. La causa de tal comportamiento al desgaste en servicio entre la placa original y la recubierta está dada ante todo por la diferencia de composición entre el recubrimiento y la placa original.

Tabla 3. Microestructura de los depósitos realizado con el aporte 1.

Nivel de corriente de soldadura (A)	Microestructura Metal de aporte 1 (Ataque con Murakami observación a 200 X).
Bajo (1a)	
Media (1b)	
Alto (1c)	

Nivel de corriente de soldadura (A)	Microestructura Metal de aporte 2 (Ataque con Murakami observación a 200 X).
Bajo (2a)	
Media (2b)	
Alto (2c)	

Por su parte, el recubrimiento aplicado a la placa con material de aporte 2 responde a una fundición blanca eutéctica, aleada al Cr y Nb, en cuya microestructura aparecen, junto a los carburos de cromo de tipo M_7C_3 , los de niobio de tipo MC. La presencia del niobio en el recubrimiento provoca un refinamiento en la microestructura que también influye favorablemente sobre la resistencia al desgaste.

Tabla 4. Microestructura de los depósitos realizado con el aporte 2.

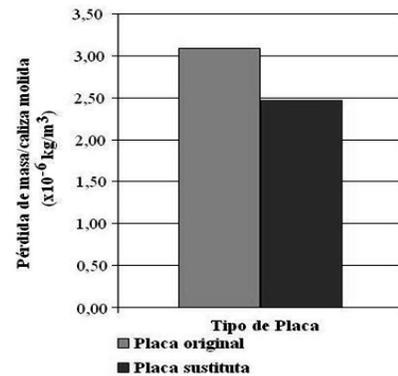
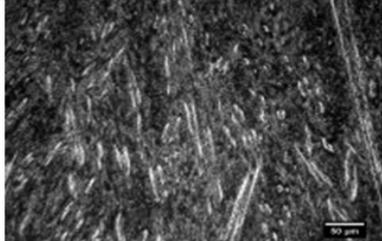
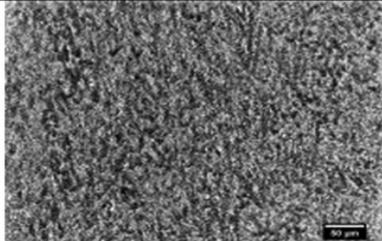


Figura 7. Pérdida de masa de las muestras para 16200 m³ de roca caliza molida.

Tabla 5. Microestructura de los depósitos realizado con el aporte 3.

Nivel de corriente de soldadura (A)	Microestructura Metal de aporte 3 (Ataque con Murakami observación a 200 X).
Bajo (3a)	
Media (3b)	
Alto (3c)	

4. CONCLUSIONES

- De los aportes estudiados para ser utilizado en la fabricación por soldadura de los blindajes laterales de los molinos de impacto, el electrodo identificado como 2, en el nivel bajo de corriente (90 A), presentó el mejor comportamiento, (parámetros de consumo y estabilidad de funcionamiento), unido a una dureza promedio de 1724 HV/1000g y una microestructura formada por carburos (Cr y Nb), en una matriz eutéctica, lo que favoreció la resistencia al desgaste abrasivo.
- En la medida que aumenta la corriente la dureza disminuye a causa de una mayor dilución y una menor velocidad de enfriamiento que lleva a estructuras más bastas y con menor nivel de aleación del depósito. Tal aumento de la corriente hace disminuir el rendimiento y la estabilidad de funcionamiento para los electrodos 1 y 2 y aumentar para el electrodo 3, lo cual puede estar vinculado fundamentalmente a las modificaciones que tienen

lugar en el modo de transferencia.

- El material de aporte 2 presenta un mejor comportamiento al desgaste en condiciones reales de explotación cuando es comparado con un blindaje original del molino.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CAPES (Brasil) y al MES (Cuba) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo cooperativo, en el marco del Proyecto CAPES/MESCUBA 59/09 y en especial a LAPROSOLDA/UFU (Brasil), por brindar las instalaciones experimentales para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Chandel, R.S., Hardfacing consumables and their characteristics for mining and mineral processing industry, *Indian Welding Journal*, 6, pp. 26-34, 2004.
- [2] METSO Minerals, Molinos de Impacto, 2006.
- [3] Nieto, J., Re: solicitud de cotización de piezas, comunicación electrónica, 2010.
- [4] EUTECTIC DE MEXICO, Gama de electrodos, Disponible: <http://www.Eutectic.com.mx>. [Consultado el día 15 de Abril de 2010]
- [5] CUAREPOTI, CONSUMIBLES, Catálogo de Productos Cuarepoti, Buenos Aires, 2006.
- [6] Buchanan, V.E., Shipway, P.H. and McCartney, D.G., Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry, *Wear*, 263, pp. 99-110, 2007.
- [7] León, L., M., Gutierrez, J., C., Toro, A., Relación microestructura resistencia al desgaste de recubrimientos duros ricos en cromo y tungsteno aplicados por soldadura eléctrica (SMAW), *Dyna*, 71, 144, pp. 165-171, 2004.
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN 8555: Filler Materials for Hardfacing and Surfacing, 1998.
- [9] AMERICAN WELDING SOCIETY, A5.13 Specifications for Surfacing Welds Rods and Electrodes, 2002.
- [10] Cruz-Crespo, A., Scotti, A., Rodríguez-Perez, M., Operational behavior assesment of coated tubular electrodes

for SMAW hardfacing, *Journal of Materials Processing Technology*, 199, pp. 265-273, 2008.

[11] Farias, J., Bálamo, P., Surian, E., The effect of wollastonite on operational characteristics of AWS E6013 electrodes, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 26, 3, pp. 17-21, 2004.

[12] Méndez, P. and Eagar, T.W., Penetration and defect formation in high-current arc welding, *Welding Journal*, 10, pp. 296s-305s, 2003.

[13] Souza, M.S., Gadotti, I. y Scotti, A., Um Banco de Ensaio para Avaliar Eletrodos Revestidos, XIII Congrego Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM – II Congrego Ibero Americano de Engenharia Mecânica – CIDIM, Belo Horizonte, MG, Dez, pp. 45-49, 1995.

[14] LABORATORIO DE METALOGRAFÍA, Informe Técnico: Caracterización de blindajes laterales para molino de trituración de áridos, Centro de Investigaciones de Soldadura, UCLV, Santa Clara, 2010.

[15] Quites, A.M., Dutra, J.C., Influência do Arco Voltaico sobre o Consumo do Eletrodo e Geometria da Solda, *Soldas e Eletrodos*, 4, pp. 18-25, 1979.

[15] Brandi, S.D., Taniguchi, and Liu, S., Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc Welding, *Welding Journal*, October, pp. 261s-270s, 1991.

[16] Díaz-Cedré, E., Ramos-Morales, F., Tello-Rico, M., Chaparro-González, J., Cruz-Crespo, A., Rodríguez-Pérez, M., Ortiz-Méndez, T. y Pozo Morejón, J.A., Estudio del comportamiento de la emisión de salpicadura, en el proceso de GMAW, utilizando mezclas de CO₂ + O₂ como gas de protección, *Revista Soldagem & Inspeção*, 11,1, pp. 34-38, 2006.

[17] Pokhodnya, K., Relationship between the duration of short circuit and electrode droplet mass, *Aut. Svarka*, 9, pp. 28-31, 1983.

[18] Scotti, A. and Ponomariev, V.N., *Soldagem MIG/MAG, Melhor entendimento, Melhor desempenho*, Editora Artliber, São Paulo, 2008.

[19] Sharma, B.C., Process Stability Evaluation of Basic Coated Manual Metal Arc Welding Electrodes. *Journal of the Institution of Engineers (India)*, 86, March, pp. 28-32, 2006.

[20] Rehfeldt, D. and Bollman, A., Comparing investigations of covered electrodes of different fabrications by statistical process analysis, *IIW Document*, 212-677-87, 1987.

[21] Monsalve, H.I., Mena-Herrera, D.A., Giraldo-Barrada, J.E., Efecto del amperaje en las propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abrasión aplicados por soldadura, *Dyna*, 71, 144, pp. 151-163, 2004.

[22] Bálamo, S., Scotti, A., Biasoli, Y.J., Interpretación de la microestructura de recargues duros depositados por soldadura utilizando la superficie de liquidus de diagramas Fe-Cr- C, *Revista de Soldadura, CENIM*, 25, 4, pp. 199-207, 2005.

[23] De Melo, R., Villani-Marques, P., Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, *Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares, Soldagem & Inspeccao*, 14, 4, Out/Dez, pp. 329-335, 2009.

[24] Coelho-Lima, A., Ferraresi, A., Análise da Microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira, *Soldagem & Inspeccao*, 14, 2, Abr/Jun, pp. 140-150, 2009.

[25] Gonzalo, I., Gómez-Limón, D., Núñez, A., Ruiz, C., Desgaste de aceros en equipos de trituración en plantas de tratamiento de áridos, *Memorias del 1er Congreso Argentino de Áridos, Mar del Plata, Tomo II*, pp. 234-237, 2008.

[26] UNIDAD BÁSICA EMPRESARIAL “EL PURIO”, Reporte de Producción, julio-septiembre 2011