

Artículo Original

ESTUDIO SOBRE LA APLICABILIDAD DE ELECTRODOS DE FABRICACIÓN NACIONAL EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

STUDY ON THE APPLICABILITY OF NACIONAL MANUFACTURED ELECTRODES IN THE SUGAR INDUSTRY

Luis Iván Negrín Hernández^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-8180-1285>

Manuel Rodríguez Pérez¹ <https://orcid.org/0000-0002-4092-3470>

Christian Valdés Pimenta¹ <https://orcid.org/0000-0002-4839-9212>

Eduardo A. Pérez Ruiz² <https://orcid.org/0000-0002-9983-5926>

Nelson Cárdenas Olivier³ <https://orcid.org/0000-0003-0501-4949>

¹ Departamento Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½ Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Universidad de Ibagué, Programa de Ingeniería Mecánica. Carrera 22 Calle 67 B, Av. Ambalá, Ibagué, Colombia.

³ Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus de Engenheira, Av. Antonio Carlos Magalhães, 310, Santo Antônio, Juazeiro, Brasil.

Recibido: Febrero 11, 2022; Revisado: Marzo 4, 2022; Aceptado: Marzo 11, 2022

RESUMEN

Introducción:

La recuperación de piezas por soldadura juega un papel fundamental en la industria azucarera. En este trabajo se realiza un estudio comparativo de dos electrodos desarrollados en nuestro país con vistas a indagar sobre su posible utilización en los procesos de reparación que se desarrollan en los centrales azucareros.

Objetivo:

Realizar la comparación entre los electrodos con composición Fe-Si-V-C y Fe-Cr-Mn-C, concebidos en Cuba, y el UTP 620 que se utiliza, entre otras aplicaciones, para la recuperación de los dientes de las coronas de los molinos azucareros.

Materiales y métodos:

Para el cotejo se prepararon probetas con la deposición de los tres electrodos en iguales condiciones, es decir, mismo material base e iguales amperajes, polaridad y corriente. Se prepararon las probetas a partir del corte transversal de los cordones, se realizó el análisis metalográfico y se midió la dureza en diferentes partes del cordón.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Luis I. Negrín, Email: linegrin@uclv.edu.cu



Resultados y discusión:

Al comparar los resultados se pudo apreciar que las tres deposiciones tienen una estructura metalográfica diferente, y diferentes durezas. El electrodo con el sistema de aleación Fe-Cr-Mn-C garantiza una dureza en el orden de 326 HB. El electrodo con el sistema de aleación Fe-Si-V-C, garantiza una dureza en el cordón de 534 HB. El electrodo utilizado actualmente, el UTP 620, garantiza una dureza en la primera pasada de 610 HB.

Conclusiones:

Se considera que el electrodo Fe-Si-V-C tiene buenas perspectivas para su uso en esta aplicación, pues la dureza obtenida está por encima del límite establecido para la coronas de molinos azucareros.

Palabras clave: Electrodo tubulares; recuperación de piezas.

ABSTRACT

Introduction:

The recovery of parts by welding plays a fundamental role in the sugar industry. In the present work, a comparative study of two electrodes developed in our country is carried out in order to investigate their possible use in the repair processes developed in sugar mills.

Objective:

To carry out the comparison between the electrodes with Fe-Si-VC and Fe-Cr-Mn-C composition, conceived in Cuba, and the UTP 620 that is used, among other applications, for the recovery of sugar mill crown teeth.

Materials and methods:

For the comparison, test tubes were prepared with the deposition of the three electrodes under the same conditions, that is, the same base material and the same amperage, polarity and type of current. The specimens were prepared from the cross section of the cords, the metallographic analysis was carried out and the hardness in different parts of the cord was measured.

Results and Discussion:

Comparing the results, it was possible to appreciate that the three deposits have a different metallographic structure, as well as different hardnesses. The electrode with the Fe-Cr-Mn-C alloy system guarantees a hardness in the order of 326 HB. The electrode with the Fe-Si-V-C alloy system guarantees a bead hardness of 534 HB. The electrode currently used, the UTP 620, guarantees a hardness in the first pass of 610 HB.

Conclusions:

It is considered that the Fe-Si-V-C electrode has good prospects for its use in this application, since the hardness obtained is above the limit established for sugar mill crowns.

Keywords: Tubular electrodes; part recovery.

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia en el trabajo de los equipos y agregados en ramas, como la industria azucarera, la agricultura, el transporte, la minería, dependen en gran medida de la conservación de la forma, dimensiones y propiedades mecánicas de sus superficies de trabajo (Viaña y col., 2007); (Marulanda y Trujillo, 2007); (Marulanda-Arévalo y col., 2017). Los procesos de recargue han jugado un papel muy importante en la restauración de un sin número de piezas de estos mecanismos, debido a las amplias posibilidades que confiere al modificar la resistencia al desgaste de las superficies de trabajo de las piezas. La aplicación de estos procesos implica un favorable balance técnico-económico, para cualquier industria del país (Kotecki y Ogborn, 1995; Nganga y Byringiro, 2018). Aunque en la práctica se ha difundido el uso de aleaciones de recargue de alta resistencia, es aún insuficiente el conocimiento del efecto de los parámetros del proceso en la morfología en aras de incrementar la resistencia al desgaste. En la soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido, se utilizan aleaciones de recargue al Mn, Co, Ni y al Cr que es la más empleada actualmente por las ventajas que presenta desde el punto de vista técnico económico (Viaña y col., 2007).

El desgaste es el resultado del levantamiento del material por la separación física debido a la microfractura, por disolución química o por fusión de las superficies de contacto. Hay varios tipos de desgaste: el adhesivo, el abrasivo, por fatiga y corrosivo (Shibe y Chawla, 2013). El tipo de desgaste dominante puede cambiar de uno a otro por razones que incluye los cambios en las propiedades en la superficie del material y las respuestas dinámicas de la superficie, causadas por calentamiento friccional, la formación de películas químicas y el desgaste. Los mecanismos de desgaste son descritos considerando los cambios complejos durante la fricción. En general, el desgaste no tiene lugar a través de un solo mecanismo, no obstante entender cada tipo es importante (Nganga y Byringiro, 2018; Shibe y Chawla, 2013).

La industria de la caña de azúcar y sus derivados ha tenido un vertiginoso desarrollo en las últimas décadas, sobre todo en países como Brasil y la India (Martinelli y col., 2011; Solomon, 2011; Ferraz y col., 2015). Existe una amplia diversidad de Ingenios, pero aun la forma que predomina es la molida de la caña. Dentro de los elementos del molino un papel importante lo juegan las coronas. Estos engranajes de gran tamaño trabajan en condiciones muy duras, caracterizadas por fluctuaciones de la distancia entre centros, transmisión de grandes cargas con lubricación deficitaria y sometidos a la acción de diversos contaminantes como el guarapo, el agua y el bagazo, todo lo cual origina un desgaste acelerado de los dientes limitándose notablemente la vida útil, como se puede apreciar en la figura 1. En Cuba en la década de los 80 con el desarrollo de la industria azucarera y mecánica se comenzaron a producir en grandes cantidades coronas de molinos y a importarse de la Antigua Unión Soviética, Antigua Checoslovaquia y Corea (Moya y col., 2000). La reparación de coronas para molinos cañeros es una de las técnicas de recuperación más antigua aplicada en la industria azucarera, la cual puede convertirse en un importante rubro de recuperación, sin realizar grandes inversiones. Cuando se introdujo la soldadura en Cuba uno de los primeros trabajos de recuperación de piezas en la industria azucarera, desarrollado y puesto en práctica por los vendedores de soldadura fue el relleno de las coronas, el cual, desde la primera vez realizado, demostró brindar enormes beneficios para todo ingenio que lo aplicase (Alfonso, 1988).



Figura 1. Diente de una corona al terminar la zafra

En las tecnologías vigentes en la industria azucarera cubana se proponen diversos electrodos importados para el proceso de recuperación de las coronas, sin embargo, en muchas ocasiones no se dispone del propuesto y es necesario utilizar otros. En el Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) se han desarrollado electrodos que pueden ser utilizados en los procesos de recuperación de elementos mecánicos sometidos a diferentes tipos de desgaste. Como parte del proceso de introducción de estos resultados en la industria se decide estudiar la posible utilización de dos de estos en la recuperación de las coronas de los molinos azucareros.

Este trabajo tiene como objetivo realizar la comparación entre los electrodos con composición Fe-Si-V-C y Fe-Cr-Mn-C, concebidos en Cuba, y el UTP 620 que se utiliza, entre otras aplicaciones, para la recuperación de los dientes de las coronas de los molinos azucareros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material base

Uno de los aspectos fundamentales en un proceso de recubrimiento por soldadura es la caracterización del metal base (Kenchi y Jayadeva, 2014); (Kenchi y col., 2014). En este caso, las coronas son fabricadas por el proceso de fundición, para el análisis se toman muestras de varias ruedas desechadas.

Primeramente, se realizó el análisis químico del material, en el mismo se utilizó una máquina Spektrometrie Opto-Electronik, marca Belec de fabricación alemana. El valor promedio de los principales componentes se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Valor promedio de los principales componentes del material de las coronas

Elemento	C	Si	Mn	P	S
%	0,439	0,187	0,610	0,031	<0,001
Elemento	Cu	Al	Mo	Ni	V
%	0,004	0,007	<0,001	<0,001	0,003

También se determinó la dureza de las coronas, este proceso se realizó en el período de reparaciones en un central azucarero y se midieron coronas nuevas, que estaban en funcionamiento y desechadas antes de su recuperación. El control se realizó utilizando un martillo Poldi y se procesaron 58 mediciones, dando como resultado una dureza promedio de 108 HB.

2.2. Preparación de las probetas

Para la realización de las probetas se utilizó como material base planchas de acero AISI 1020, sobre las mismas se realizaron los depósitos de los tres tipos de electrodos. Se trabajó con corriente de 120 A, corriente directa, polaridad invertida (CD⁺).

Una vez obtenido los depósitos, se realizó su preparación para analizar la microestructura y determinación de la dureza. El corte de las probetas se realizó en una máquina tronzadora META SECAR de fabricación alemana con velocidad de corte de 13 000 rev/min. En el proceso se utilizó líquido refrigerante para evitar cambios microestructurales durante la operación.

Las superficies de las muestras objeto de estudio fueron previamente pulidas, teniendo en cuenta un conjunto de operaciones que permitieron lograr la calidad necesaria para poder realizar la observación microscópica superficial. Las operaciones se realizaron según las normas (ASTM E3, 1995).

2.3. Análisis de la estructura y medición de la dureza

Para el análisis de la microestructura las probetas se atacaron previamente con el reactivo Nital al 2 %. La observación se realizó utilizando un microscopio óptico Neophot 32, ubicado en el CIS de la UCLV.

A cada uno de los depósitos se determinó la dureza en el centro del cordón, a una distancia de 2 mm de la superficie y en el centro de la capa de recargue. Para determinar la dureza se utilizó un durómetro Marca Shimatsu, la carga usada fue de 5 N, y el tiempo de exposición del penetrador fue de 15 segundos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la aplicación de un consumible en el recargue de piezas es indispensable conocer el tipo de microestructura y dureza del depósito, y también considerar los elementos de aleación que aporta (Shibe y Chawla, 2013).

En este caso se determinan los elementos de aleación que aportan los electrodos fabricados en el CIS, los porcentos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Composición del depósito de los electrodos fabricados

<i>Electrodo</i>	<i>C (%)</i>	<i>Mn (%)</i>	<i>Si (%)</i>	<i>V (%)</i>	<i>Cr (%)</i>	<i>Fe</i>
1- (Fe-Cr-Mn-C)	0,5-0,8	10-11	0,3-0,5	-	4,5-6	balance
2- (Fe-Si-V-C)	0,5-0,8	-	4-5	0,45-0,5	-	balance

Como se ha explicado, la comparación de los depósitos correspondientes al presente trabajo se realizó sobre la base de la dureza y microestructura de los mismos.

En la tabla 3 se muestra la dureza obtenida en el centro del cordón de los tres tipos de electrodos. Para facilitar las comparaciones los valores de dureza promedio Vickers se llevan a dureza Brinell.

Tabla 3. Mediciones de la dureza en las probetas (HV₅₀₀)

<i>Muestra</i>	<i>1^{ra} medición</i>	<i>2^{da} medición</i>	<i>3^{ra} medición</i>	<i>4^{ta} medición</i>	<i>Promedio</i>
1-(Fe-Cr-Mn-C)	335,1	333,9	327,6	330,8	331,85 HV (326 HB)
2-(Fe-Si-V-C)	546,2	541,8	543,5	544,1	543,9 HV (534 HB)
3-(UTP 620)	622,4	628,1	625,2	625,8	625,37 HV (610 HB)

El electrodo 1 pertenece al sistema de aleación Fe-Cr-Mn-C que garantiza una dureza en el orden de 326 HB. La estructura del metal depositado en el centro del cordón se puede observar en la figura 2. Esta microestructura se caracteriza por la presencia de ferrita y austenita de acuerdo a la morfología, dureza y a los elementos de aleación que aporta el consumible.

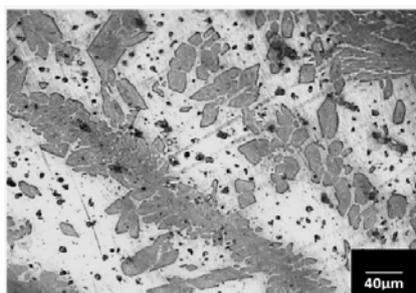


Figura 2. Microestructura del depósito Fe-Cr-Mn-C

El electrodo 2, que pertenece al sistema de aleación Fe-Si-V-C, garantiza una dureza en el cordón de 534 HB. El metal aportado por el electrodo en la primera pasada, considerando la dilución con el metal base caracteriza una microestructura donde prevalece la bainita y austenita residual como se puede apreciar en la figura 5.

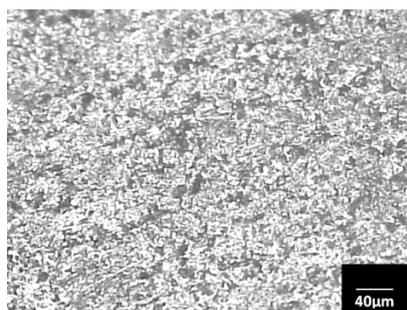


Figura 3. Microestructura del depósito Fe-Si-V-C

El electrodo utilizado actualmente, el UTP 620, garantiza una dureza en la primera pasada de 610 HB, con una microestructura martensítica y una red de cementita, figura 4. Esta microestructura es recomendada por la literatura para contrarrestar el desgaste en piezas sometidas al desgaste adhesivo y abrasivo (Bakshi y col., 2013).

Se puede indicar entonces, que de las dos variantes de electrodos tubulares estudiados el electrodo 1, aunque aporta cantidades apreciables de Mn y Cr, no garantiza una dureza apreciable en el depósito para contrarrestar el desgaste de las coronas. En este caso el

Mn, es un elemento que favorece la formación de la austenita, y de esta manera se reduce durante el enfriamiento la transformación martensítica (Bakshi y col., 2013).

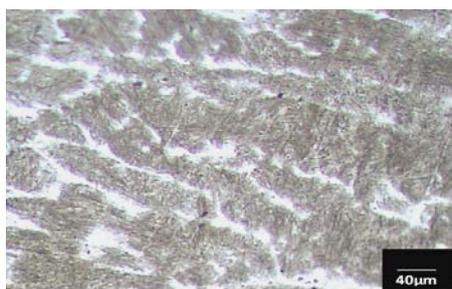


Figura 4. Microestructura del depósito UTP 620

El Cr, es un elemento que, junto al C, puede formar diferentes tipos de carburos de elevada dureza garantizando alta resistencia al desgaste por abrasión (Poderoso y col., 2016). Para lograr con este electrodo mayor dureza, es necesario incrementar el contenido de C, en el revestimiento a través del grafito, lo cual podría también favorecer la microestructura y ser competente ante el desgaste adhesivo y abrasivo.

Aunque la microestructura no es exactamente similar a la que aporta el electrodo UTP 620, el consumible 2, puede ser recomendado para el recargue de las coronas de los molinos. En la bibliografía consultada (Inthidech y col., 2006), aparece recomendado que para lograr una buena resistencia al desgaste adhesivo y abrasivo es necesario obtener una microestructura en el cordón de recargue del tipo acicular (martensita, bainita o trostita) con una dureza superior a los 500 HB.

4. CONCLUSIONES

1. La recuperación de las coronas de los molinos azucareros por soldadura manual de arco eléctrico es un procedimiento aplicado en la industria azucarera prácticamente desde sus inicios. En todos los centrales de Cuba está establecido el procedimiento para la recuperación de estos engranajes y en todos los casos se establece la utilización de electrodos importados, fundamentalmente el UTP 620 o sus equivalentes.
2. Considerando la dureza y la microestructura obtenida se puede concluir que el electrodo Fe-Si-V-C tiene excelentes perspectivas para su aplicación en el recargue de las coronas de los molinos cañeros. No sucede lo mismo con el electrodo Fe-Cr-Mn-C, pues su dureza es menor que el límite establecido para la recuperación de piezas sometidas a abrasión y fluencia friccional.

REFERENCIAS

- Alfonso, M., Recuperación de las coronas (engranes) para los molinos cañeros., Delegación Provincial MINAZ, Villa Clara, 1988, pp. 12-27.
- ASTM E3., Práctica estándar para la preparación de especímenes metalográficos., 1995, pp. 1-30. <https://www.monografias.com/docs/Norma-Astm-E3-95-Traducida-F33T7XKR99JF>
- Bakshi, S., Shipway, P.H., & Bhadeshia, H., Three-body abrasive wear of fine pearlite,

- nanostructured bainite and martensite., *Wear*, Vol. 308, No. 1-2, 2013, pp. 46-53. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164813004985>
- Ferraz, M.A., Ribeiro, F.C., & Diaz, R.A., Socio-economic impacts of Brazilian sugarcane industry., *Environmental Development*, Vol. 16, 2015, pp. 31-43. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211464515000627>
- Inthidech, S., Sricharoenchai, P., & Matsubara, Y., Effect of alloying elements on heat treatment behaviour of hypoeutectic high chromium cast iron., *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 1, 2006, pp. 72 - 81. https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/47/1/47_1_72/article
- Kenchi, K.M., & Jayadeva, C., The effects of welding process and microstructure on 3 body abrasive wear resistances for hardfacing deposits., *The International Journal of Engineering and Science*, Vol. 3, No. 12, 2014, pp. 35-44. <https://www.theijes.com/papers/v3-i12/F031201035044.pdf>
- Kenchi, K., Jayadeva, C., & Sreenivasan, A., The effects of welding parameters on abrasive resistance for hardfacing alloys., *Global Journal of Engineering, Design & Technology*, Vol. 3, No. 4, 2014, pp. 6-12. <https://www.longdom.org/articles/the-effects-of-welding-parameters-on-abrasive-wear-resistance-for-hardfacing-alloys.pdf>
- Kotecki, D.J., & Ogborn, J.S., Abrasion Resistance of Iron - Based Hard facing Alloys., *Welding Research Supplement*, 1995, pp. 269-s-278-s. The Lincoln Electric Co., Cleveland, Ohio, Paper presented at the AWS 74th Annual Meeting April 25 - 29, 1993, Houston, Texas. https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1995_08_s269.pdf
- Marulanda, J.L., & Trujillo, S.G., Recuperación de piezas desgastadas con recubrimientos protectores., *Scientia Et Technica*, Vol. 1, No. 37, 2007, pp. 199-204. <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4061/2221>
- Marulanda-Arévalo, J.L., Cañas-Mendoza, L.A., Barón-Jaimez, J.A., Abrasive wear in wear plates and hard coatings applied by welding with shielded electrode., *Revista Facultad de Ingeniería*, Vol. 26, No. 46, 2017, pp. 105–112. <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/7322>
- Martinelli, L.A., Garret, R., Ferraz, S., & Naylor, R., Sugar and ethanol production as a rural development strategy in Brazil: Evidence from the state of São Paulo., *Agricultural Systems*, Vol. 104, No. 5, 2011, pp. 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.01.006>
- Moya, J., Negrín, L., & Cabello, J., Aspectos generales sobre el diseño y la recuperación de las coronas de molinos de caña de azúcar., *Reporte Técnico*, 2000, pp. 1-11. <https://www.researchgate.net/publication/291328556>
- Nganga, C., & Byiringiro, J., Effective maintenance strategy of cane crushing mills for improvement of sugar production in Kenya., *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 15, No. 2, 2018, pp. 01-12. <http://repository.dkut.ac.ke:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/736/Effective%20Maintenance%20Strategy%20of%20Cane%20Crushing%20Mills%20for%20improvement%20of%20sugar%20production%20in%20Kenya.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Poderoso, R., Filgueiras, S., Silva, V., Silva, G., Aranas, C., & Ferraresi, V.V., Influence of pushing and pulling the electrode procedure and addition of second

- layer of welding on the wear in hardfacing of Fe-Cr-C., *Materials Research*, Vol. 19, No. 5, 2016, pp. 1193-1200. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0230>
- Shibe, V., & Chawla, V., Enhancement in wear resistance by hardfacing: A review., *Mechanica Confab*, Vol. 2, No. 3, 2013, pp. 111-122. https://www.researchgate.net/publication/319207085_Enhancement_in_wear_resistance_by_hardfacing_a_review
- Solomon, S., Sugarcane By-Products based industries in India., *Sugar Tech*, Vol. 13, No. 4, 2011, pp. 408-416. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12355-011-0114-0>
- Viaña, K.M., Rojas, S., Mejía, D.S., Niebles, M.T., & Goenaga, E.E., Recubrimientos duros: alternativa de recuperación en piezas afectadas por el desgaste., *Prospectiva*, Vol. 5, No. 1, 2007, pp. 69-77. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496251109012>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Luis Iván Negrín Hernández. Coordinó el desarrollo del trabajo y propició los intercambios entre los participantes. Participó en la realización de los ensayos de dureza y el procesamiento de los resultados. Participó en el análisis de los resultados. Se encargó de la redacción del artículo.
- Dr.C. Manuel Rodríguez Pérez. Coordina el proyecto de investigación del cual se desprende este trabajo. Preparó los experimentos a realizar así como la realización del proceso de soldadura. Participó en el análisis de los resultados. Revisó el artículo y aportó criterios en su versión final.
- Ing. Christian Valdés Pimienta. Realizó en trabajo de campo en el central azucarero, la medición con el martillo Poldi y la toma de muestras de las coronas para el análisis químico. Participó en el análisis de los resultados. Revisó el artículo y aportó criterios en su versión final.
- Dr.C. Eduardo Pérez Ruiz. Realizó el análisis metalográfico y participó en el análisis de los resultados. Revisó el artículo y aportó criterios en su versión final.
- Dr.C. Nelson Cárdenas Olivier. Preparó la revisión bibliográfica y participó en el análisis de los resultados. Revisó el artículo y aportó criterios en su versión final.