

Artículo Original

EFFECTO DEL ESPESOR DEL REVESTIMIENTO SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO EN ELECTRODOS PARA EL RECARGUE POR SOLDADURA

EFFECT OF COATING THICKNESS ON ADHESIVE WEAR RESISTANCE OF ELECTRODES FOR WELDING OVERLAY

Pablo Oñoz Gutiérrez^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-8704-8450>

Manuel Rodríguez Pérez² <https://orcid.org/0000-0002-4092-3470>

Lorenzo Perdomo González² <https://orcid.org/0000-0002-3425-1487>

Ulises José González Pérez¹ <https://orcid.org/0009-0001-6241-831X>

Ruel Rosquete Rivas³ <https://orcid.org/0009-0000-7395-5172>

Nilo González Molina⁴ <https://orcid.org/0009-0005-5792-5949>

¹ Centro de Estudios de Exploración, Fabricación y Recuperación de Equipos y Piezas (CEEFREP).
Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba.

² Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

³ Empresa de Derivados del Acero, Camagüey, Cuba.

⁴ Empresa de Tecnologías Alternativas (TECAL SA). Camagüey, Cuba.

Recibido: Septiembre 31, 2025; Revisado: Octubre 16, 2025; Aceptado: Noviembre 7, 2025

RESUMEN

Introducción:

Una forma eficaz de incrementar la durabilidad de piezas es aplicar un recargue duro mediante soldadura. La fabricación de estos electrodos en Cuba es vital, pues se cuenta con la infraestructura y materias primas necesarias.

Objetivo:

Determinar las propiedades operativas, metalúrgicas de los electrodos ECromita 1 y ECromita 2, así como la influencia del espesor del revestimiento sobre su resistencia al desgaste adhesivo, en comparación con un electrodo comercial (UTP 620).

Materiales y Métodos:

Se evaluaron las propiedades operativas mediante criterio de expertos y métodos



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: Pablo Oñoz, Email: onozpablo@gmail.com



cuantitativos. Los depósitos se caracterizaron mediante espectrometría óptica, metalografía, medición de dureza y ensayos de desgaste adhesivo (espiga sobre disco).

Resultados y Discusión:

Las propiedades operativas fueron adecuadas para su uso industrial. El depósito del ECromita 2 en estado de recién soldado presentó mayor resistencia al desgaste adhesivo que el UTP 620. El ECromita 1 fue menos resistente, pero con potencial de mejora mediante tratamientos térmicos.

Conclusiones:

El electrodo ECromita 2 posee propiedades operativas y de resistencia al desgaste adhesivo que lo convierten en una solución viable a nivel industrial para recuperar piezas dañadas por este mecanismo.

Palabras clave: cromita refractaria; desgaste adhesivo; electrodos; propiedades operativas; recargue por soldadura; revestimiento rutílico.

ABSTRACT

Introduction:

An effective way to increase the durability of parts is to apply a hard welding overlay. The production of these electrodes in Cuba is vital, as the country has the necessary infrastructure and raw materials.

Objective:

To determine the operational and metallurgical properties of the ECromita 1 and ECromita 2 electrodes, as well as the influence of coating thickness on their resistance to adhesive wear, in comparison with a commercial electrode (UTP 620).

Materials and Methods:

The operational properties were evaluated using expert criteria and quantitative methods. Weld deposits were characterized by optical spectrometry, metallography, hardness measurement, and adhesive wear tests (pin-on-disc).

Results and Discussion:

The operational properties were suitable for industrial use. The ECromita 2 deposit in the as-welded condition showed greater resistance to adhesive wear than UTP 620. ECromita 1 was less resistant in this state, with potential for improvement through heat treatments.

Conclusions:

The ECromita 2 electrode has operational properties and resistance to adhesive wear that make it a viable solution for industrial application, specifically in the restoration of parts damaged by this wear mechanism.

Keywords: refractory chromite; adhesive wear; electrodes; operational properties; welding overlay; rutile coating.

1. INTRODUCCIÓN

Una forma eficaz de incrementar la durabilidad de las piezas sometidas a desgaste consiste en aplicar una capa de recargue duro mediante un consumible de soldadura (Garbade & Dhokey, 2021). Esta tecnología prolonga significativamente la vida útil de

componentes, reduciendo costos de mantenimiento y mejorando la eficiencia operativa (Ning et al., 2025; Gowthaman et al., 2020). En Cuba, los electrodos para recargue son importados, lo que implica un gasto significativo de divisas (Negrín et al., 2022).

El cromo (Cr) es un elemento fundamental en la composición de la mayoría de estos electrodos (AWS A5.13/A5.13M, 2010). Dado que la principal fuente de Cr, el ferrocromo (FeCr), no se produce en el país debido a la naturaleza refractaria de sus cromitas, se hace necesario buscar alternativas. Investigaciones previas (Oñoz et al., 2021) demostraron la viabilidad de utilizar cromitas refractarias cubanas como fuente de Cr en electrodos de recargue con revestimiento rutílico.

Basándose en estos resultados, se fabricaron industrialmente en la Fábrica de Alambres y Electrodos de Nuevitas dos prototipos de electrodos, denominados ECromita 1 y ECromita 2. El objetivo de este trabajo es determinar las propiedades operativas, metalúrgicas de los electrodos ECromita 1 y ECromita 2, así como la influencia del espesor del revestimiento sobre su resistencia al desgaste adhesivo, en comparación con un electrodo comercial (UTP 620).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Características de los electrodos ECromita 1 y ECromita 2

Se fabricaron dos electrodos, ECromita 1 y ECromita 2, siguiendo la tecnología del electrodo rutílico E6013, pero con una mezcla de revestimiento compuesta por una base rutílica (52,7 %), cromita refractaria (36 %) y grafito (11,3 %). La diferencia principal entre ambos radica en el espesor del revestimiento: 0,8 mm para ECromita 1 y 2,4 mm para ECromita 2 (Figura 1). Este incremento de espesor podría implicar variaciones en las propiedades operativas y metalúrgicas.

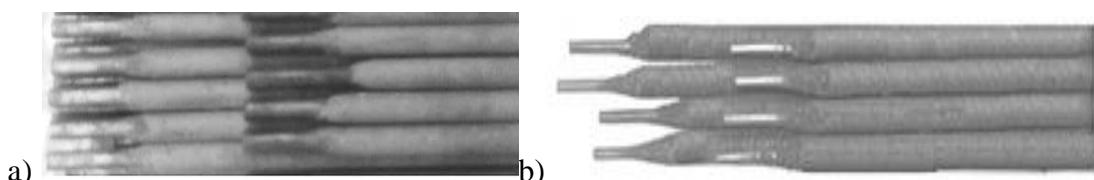


Figura 1. a) Electrodos ECromita 1, b) Electrodos ECromita 2

2.2. Evaluación de propiedades operativas

Las propiedades operativas (desprendimiento de escoria, sanidad y aspecto del cordón) se evaluaron cualitativamente mediante el criterio de expertos según la metodología aplicada por (Oñoz, 2024). La estabilidad del arco se cuantificó midiendo la longitud de ruptura del arco, y el efecto cañón mediante la profundidad de la copa en la punta del electrodo (Castellanos-González et al., 2021). La soldadura se realizó con un rectificador BESTER SPB 350 sobre acero AISI 1010, utilizando los parámetros de la tabla 1.

Tabla 1. Régimen de soldadura empleado en la experimentación

Electrodos	Intensidad de la corriente (A)	Tipo de corriente y polaridad	Velocidad de soldadura $m*s^{-1}$ (cm/min)
ECromita 1	100 ± 5	CDPI*	0,00285 - 0,00293 (15 - 16)
ECromita 2	120 ± 5	CDPI*	0,00293 - 0,0032 (16 - 18)

* Corriente directa de polaridad inversa (electrodo al positivo)

2.3. Caracterización de los depósitos de soldadura

Composición Química: se determinó en depósitos sin dilución mediante espectrometría de emisión óptica (equipo SPECTRO, modelo Spectromax), siguiendo la norma AWS A5.13:2010.

Dureza y Microestructura: la dureza Rockwell C (HRC) se midió en la tercera capa del depósito (ISO 6508:2015) en un durómetro Rockwell, modelo 200S 481. Para el análisis metalográfico, las probetas se prepararon mediante pulido y ataque con Nital 3, observándose en un microscopio óptico Novel NFJ1.

Desgaste Adhesivo: se evaluó mediante el ensayo espiga sobre disco (ASTM G99-17). Se utilizó una carga de 20 N, una velocidad de 63 r/min y una distancia de 500 m. La pérdida de masa de la espiga se midió con una balanza analítica de marca Gilbertine con apreciación de 0,1 g.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados del desempeño operativo de los electrodos ECromita 1 y ECromita 2

La evaluación de las propiedades operativas se llevó a cabo de forma cualitativa mediante el “Criterio de Expertos” (González et al., 2020). El resultado promedio se expone en la tabla 2 y en la figura 2 se muestran los cordones obtenidos durante la soldadura.

Tabla 2. Desempeño operativo de los electrodos según “Criterio de Expertos”. Fuente: autores

Electrodos	Desprendimiento de la escoria	Sanidad del cordón	Aspecto del cordón
ECromita 1	Bien	Excelente	Bien
ECromita 2	Bien	Excelente	Bien

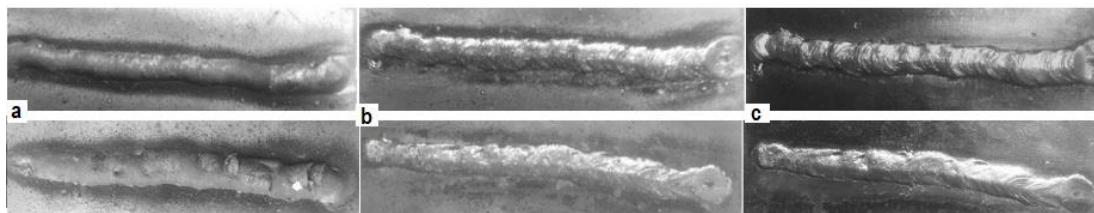


Figura 2. Cordones de soldadura de los electrodos ECromita 1 y ECromita 2.

a) Cordón cubierto de escoria, b) Separación de la escoria, c) Cordón limpio

El resultado (tabla 2) está influenciado por la composición del revestimiento, donde el 50 % está constituido por una mezcla rutílica. Los revestimientos con aportes de rutilo se caracterizan por ofrecer al consumible una fácil separación de la escoria del cordón de soldadura, cuyo efecto está dado por el aporte del TiO_2 sobre el aumento de la tensión superficial (Madhusoodhanan et al., 2022). También forma parte del revestimiento la cromita refractaria y el grafito. El grafito influye positivamente en el desprendimiento de la escoria, mientras la cromita actúa de forma desfavorable. Este efecto de la cromita se debe a la formación de espinelas sobre el cordón (Rodríguez, 1992). No obstante, en los cordones de soldadura la escoria se pudo separar completamente con la piqueta y el cepillo manual, figura 2b. Por ende, la influencia de la cromita no es determinante en esta propiedad operativa y prevalecen las cualidades que ofrece el revestimiento base rutilo.

La sanidad de los cordones fue evaluada de excelente en los dos electrodos (tabla 2), fundamentado en la influencia del contenido de mezcla rutílica y la presencia de grafito en la composición del revestimiento. La adición del grafito al revestimiento, ha demostrado que favorece las propiedades tecnológicas para la composición utilizada.

El aspecto del cordón fue evaluado a partir de considerar parámetros geométricos de ancho y altura, así como la regularidad y continuidad del cordón. Esta propiedad depende en cierta medida de las otras propiedades analizadas anteriormente; es decir, se considera que el cordón tiene una buena presencia, si el mismo es continuo y uniforme. De acuerdo a lo anterior, para obtener un cordón con buen aspecto, en principio el arco de soldadura debe ser estable y lograrse un adecuado desprendimiento de la escoria (Hernández, 2022).

3.1.1 Resultados de la estabilidad del arco en los electrodos ECromita

El análisis de la estabilidad del arco se realizó a través del estudio de la longitud máxima de ruptura del arco. En la tabla 3 se muestra el resultado.

Tabla 3. Longitud de ruptura en el arco

Electrodos	ECromita 1	ECromita 2	E6013 *
Longitud de ruptura del arco, mm	21,07	22,73	24,30
Desv. Std.	0,49	1,46	0,9
Interv. Conf. Norm.	21,07 ± 0,7994	22,73 ± 0,2475	24,30 ± 1,4585

*El electrodo E6013 se fabricó con el mismo espesor de revestimiento que los electrodos ECromita y se tomó como patrón en la comparación de las propiedades operativas.

Desv. Std.: Desviación Estándar

Interv. Conf. Norm.: Intervalo de Confianza Normal

En la composición de la mezcla rutílica utilizada el 76 % de los componentes (rutilo, caliza, mica y feldespato), según Reina (2015), tienen entre sus funciones estabilizar el arco de soldadura. El rutilo favorece la estabilidad del arco por la presencia del Ti, cuyo potencial de ionización es de 6,84 eV. El efecto del rutilo a favor de la estabilidad del arco, está relacionado con la descomposición de este mineral como consecuencia de la temperatura del arco eléctrico (5750 a 6200 °C), la cual depende de la intensidad de corriente utilizada (Vornovitsky et al., 2005).

La cromita constituye un mineral cuya presencia afecta la estabilidad del arco. El efecto negativo de la cromita, está determinado por la presencia del Al₂O₃ (28,05 %), MgO (19,71 %) y el SiO₂ (5,62 %), cuyos elementos se caracterizan por un alto potencial de ionización. Este efecto negativo en la estabilidad del arco, se ha logrado compensar con la introducción de grafito en la composición de los revestimientos. Muestra de ello, es que la diferencia máxima de la longitud de ruptura del arco es de aproximadamente 3 mm, respecto al electrodo E6013 (tabla 3).

3.1.2. Resultados del efecto cañón en los electrodos ECromita 1 y ECromita 2

La profundidad de la copa en la punta del electrodo (tabla 4) es el parámetro que determina el efecto cañón (Cruz et al., 2025). El efecto cañón es mayor en los electrodos ECromita, aspecto lógico, dado por la presencia de la cromita en la composición del revestimiento. La cromita utilizada es de tipo refractaria con elevados contenidos de

Al_2O_3 (28,05 %) y MgO (19,71 %), los cuales poseen alta temperatura de fusión (2040 °C y 2852 °C respectivamente) y por ello retardan la fusión del revestimiento del electrodo (Najarro et al., 2018).

Tabla 4. Profundidad de la copa de los electrodos ECromita, en mm

<i>Electrodos</i>	<i>ECromita 1</i>	<i>ECromita 2</i>	<i>E6013</i>
Profundidad de la copa (media), mm	2,70	5,25	2,13
Desv. Std.	0,17	0,67	0,31
Interv. Conf. Norm.	$2,70 \pm 0,1959$	$5,25 \pm 0,6426$	$2,13 \pm 0,3457$

El mineral de Cr está compuesto en un 44,73 % por los óxidos factibles de reducir (Cr_2O_3 y FeO) y en un 53,88 % por los óxidos que forman la escoria. A esta cromita le corresponde una temperatura de fusión de alrededor de 2050 °C. Por tanto, al ser la temperatura de fusión de este sistema de escorias superior a la requerida provoca un incremento en el efecto cañón (Perdomo et al., 2022). También el espesor del revestimiento ejerce influencia, muestra de ello es el electrodo ECromita 2, donde el espesor del revestimiento es de 2,4 mm tiene el mayor efecto cañón.

3.2. Composición química de los depósitos de soldadura de los electrodos ECromita 1, ECromita 2 y UTP 620

La composición química del metal depositado (tabla 5) se determinó de acuerdo al procedimiento descrito en el epígrafe 2.3. La presencia de grafito en la composición del revestimiento (10 %) propició la obtención de contenidos de C de 0,34 % y 0,94 % en el depósito. La diferencia se debe al espesor del revestimiento, el electrodo ECromita 2, al tener 2,4 mm de espesor de revestimiento, la disponibilidad de grafito es superior por unidad de área en comparación con el ECromita 1.

Tabla 5. Composición química del metal depositado sin dilución, en % masa

<i>Electrodos</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
ECromita 1	0,34	0,16	0,11	0,76	0,11	0,013	0,041	0,013
ECromita 2	0,94	0,26	0,27	1,98	0,14	0,011	0,065	0,016
UTP 620	0,25	0,70	0,90	2,0	0,09	0,5	0,016	0,014

La cromita realiza una contribución favorable sobre la composición química del cordón en cuanto al aporte de Cr. Este resultado es totalmente lógico debido a que el componente portador del Cr es el Cr_2O_3 y con el aumento de su concentración se favorece la obtención de este elemento en el metal depositado. El grafito ayuda a la transferencia del Cr debido a que el C reduce al Cr_2O_3 y propicia la presencia de este elemento en el cordón en solución sólida o formando carburos.

La composición del revestimiento de los electrodos, constituida por un 52,7 % de una mezcla base rutilo con adición de cromita refractaria y grafito, propició la aleación del metal depositado con C y Cr, todo ello fue posible por la reducción carbotérmica de la cromita refractaria bajo las condiciones termodinámicas del arco de soldadura (Perdomo et al., 2022).

3.3. Análisis de la microestructura de los depósitos de soldadura ECromita 1, ECromita 2 y UTP 620

El estudio de la microestructura de los depósitos de soldadura de cada tipo de electrodo, se realizó de acuerdo al epígrafe 2.3. El resultado se muestra en la figura 3.

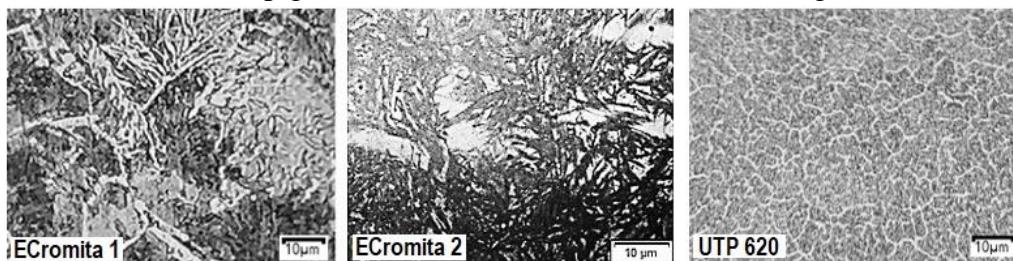


Figura 3. Microestructuras de los depósitos de soldadura

En la figura 3 se presentan las microestructuras de los depósitos de los electrodos, tomadas en el centro de la tercera capa en la parte superior. En la microestructura del electrodo ECromita 2 se observan dos zonas fundamentales, una clara y una oscura. Basados en la composición química y los grados de subenfriamiento propios de los depósitos de recargue es de esperar que las zonas se correspondan con martensita (zona oscura en forma de agujas) y austenita residual o retenida (zona clara) (Krauss, 2014). Tomando en consideración la composición química obtenida, este depósito se corresponde con un acero hipereutectoide aleado con Cr (Askeland & Wright, 2022). De igual forma, Lambert et al., (2000) en investigaciones realizadas en aceros de alto carbono muestran estructuras con una morfología semejante al depósito del electrodo ECromita 2. Por otra parte, (Hernández et al., 2016) comprobaron que en estos aceros la transformación de la austenita en martensita no es completa y, como resultado, se observa determinada cantidad de austenita residual.

El depósito del electrodo ECromita 1 de acuerdo a la composición química (tabla 5), se corresponde con un acero hipoeutectoide aleado con Cr (acero de baja aleación). La velocidad de enfriamiento continua en la soldadura, propició la obtención de una microestructura compuesta, fundamentalmente, por perlita fina, (término antiguo: sorbita). Este tipo de microestructura se caracteriza por incrementar la resistencia mecánica y la dureza en el metal depositado (tabla 6). En estado de recién soldado la dureza es del orden de 35 - 37 HRC, lo que permite la elaboración mecánica de la superficie mediante el arranque de virutas con herramientas de corte con calzos metal cerámico. Sin embargo, el depósito en condiciones de enfriamiento rápido, o sea con tratamiento térmico de temple, es factible de endurecer y obtener microestructuras martensíticas o bainíticas.

3.4. Resultados de la medición de la dureza en los depósitos de soldadura ECromita 1, ECromita 2 y UTP 620

La dureza del metal depositado se determinó en estado de recién soldado, y se siguió el procedimiento descrito en el epígrafe 2.3. Los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Dureza de los cordones de soldadura en la tercera capa, en HRC

Electrodos	ECromita 1	ECromita 2	UTP 620
Dureza (media), HRC	35,375	52,250	43,625
Desv. Std.	1,3	1,28	0,74
Interv. Conf. Norm.	$35,38 \pm 1,043$	$52,25 \pm 0,888$	$43,63 \pm 0,515$

La dureza obtenida en los depósitos es totalmente lógica y está en correspondencia con la composición química (tabla 6) y las microestructuras analizadas en la figura 3. La mayor dureza del depósito del electrodo ECromita 2 se debe al alto contenido de C (0,94 %) y de Cr (1,98 %). El C es uno de los elementos que mayor influencia ejerce sobre el endurecimiento de los aceros, ya que induce a una disminución en la temperatura de inicio de la transformación martensítica (Smith, 2023; Balos et al., 2025).

Por otro lado, el Cr en esta concentración (1,98 %) provoca el desplazamiento de la curva de transformación isotérmica de la austenita hacia la derecha y a temperaturas más altas. Pero en condiciones de enfriamiento continuo (recargue) la temperatura de menor estabilidad de la austenita disminuye en aproximadamente 55 °C y el tiempo mínimo para el inicio de la transformación se incrementa en 1,5 veces en comparación al enfriamiento isotérmico (Srikarun et al., 2021; Pachacama et al., 2023).

3.5. Resultados del ensayo de desgaste adhesivo ECromita 1, ECromita 2 y UTP 620

La resistencia al desgaste adhesivo del metal depositado (tabla 7) se determinó mediante el ensayo de espiga sobre disco. La resistencia al desgaste adhesivo del depósito del electrodo ECromita 2 es superior a la del electrodo comercial UTP 620 (electrodo de referencia) (tabla 7). Este resultado se fundamenta en un mayor contenido de C (0,94 %) respecto al UTP 620 (C: 0,25 %) y contenidos de Cr similares (Cr≈ 2 %).

Este factor en las condiciones de enfriamiento continuo de la soldadura de recargue, favorece la formación de estructuras resistentes a condiciones de desgaste adhesivo, figura 3. De igual forma se manifiesta en la magnitud de la dureza en la tercera capa (tabla 6), en el UTP 620 (≈43 HRC) y en el electrodo ECromita 2 (≈52 HRC).

Tabla 7. Resultados del ensayo de desgaste adhesivo (promedio), g

Electrodos	ECromita 1	ECromita 2	UTP 620
Desgaste (media), g	0,0063	0,0027	0,0053
Desv. Std.	0,00025	0,00020	0,00026
Interv. Conf. Norm.	$0,0063 \pm 0,00028$	$0,0027 \pm 0,00023$	$0,0053 \pm 0,00029$

Por otra parte, el electrodo ECromita 1 cede en la resistencia al desgaste adhesivo en comparación con el electrodo UTP 620. Este resultado está fundamentado en un menor contenido de Cr (0,76 %), aunque el contenido C (0,34 %) es superior (tabla 5). A la velocidad de enfriamiento de la soldadura, el tipo de microestructura que se forma es de perlita fina, figura 3, caracterizada por una dureza de 35 - 37 HRC. Sin embargo, en la composición del electrodo UTP 620 está presente el Mo, que es un magnífico refinador de la perlita provocando que la dureza de la fase aumente sustancialmente, así como la resistencia a la tensión (Askeland & Wright, 2022; Smith, 2023).

4. CONCLUSIONES

1. Los electrodos ECromita 1 y ECromita 2 presentaron un comportamiento operativo favorable durante las pruebas de soldadura mediante el proceso manual por arco, lo que habilita desde el punto de vista tecnológico, su uso en procesos de recargue de piezas sometidas al desgaste.
2. A partir del ensayo de desgaste, se demostró la aptitud de los depósitos del electrodo ECromita 2 con un revestimiento grueso (2,4 mm), para operar en condiciones de desgaste adhesivo, siendo en su estado de recién soldado, capaz de presentar una mayor resistencia al desgaste adhesivo frente al electrodo UTP 620.
3. El electrodo ECromita 1, si bien presenta una menor resistencia al desgaste adhesivo en estado de recién soldado, su composición química lo convierte en un candidato prometedor para aplicaciones que requieran una posterior elaboración mecánica y cuyo desempeño ante el desgaste pueda ser mejorado significativamente mediante un tratamiento térmico de temple y revenido.

REFERENCIAS

- Askeland, D. R., & Wright, J. W. (2023). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (7a ed.). Cengage Learning.
- Balos, S., Zlatanović, D. L., Janjatović, P., Pećanac, M., Erić Cekić, O., Rosić, M., & Stopić, S. (2025). Microestructura, dureza y comportamiento al desgaste de las capas obtenidas por procesos de revestimiento duro por arco eléctrico. *Materiales*, 18(2), 299. <https://doi.org/10.3390/ma18020299>
- Castellanos-González, O. M., Moreno-Uribe, A. M., Ramón-Ramón, S. A., & Jácome, J. L. (2021). Evaluación de la transferencia metálica y estabilidad del proceso GMAW. *Revista UIS Ingenierías*, 20(3), 47-60. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021003>
- Cruz, M., Cruz, A., Acevedo, M., Duffus, A., Najarro, R., & Díaz, E. M. (2025). Parámetros de consumo de electrodos con cenizas y carbón de marabú en un revestimiento periférico. *Revista Centro Azúcar*, 52(1), e1109. https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/842
- Garbade, R., & Dhokey, N. (2021). Overview on hardfacing processes, materials and applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1017(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1017/1/012033>
- González, O., Gómez, C. R., & Del Pino, U. B. (2020). Metodología para la selección de la mejor variante entre electrodos de doble revestimiento para recargue. *TecnoL.*, 23(49), 53–62. <https://doi.org/10.22430/22565337.1608>
- Gowthaman, G., Thenammai, N., & Noorullah, D. (2020). A literature review on hardfacing and its welding allies. *IJSART*, 6(12), 38-44. <https://ijsart.com/a-literature-review-on-hardfacing-and-its-welding-allies-41719>
- Hernández, G. (2022). *Manual del soldador*. (6^a ed.). CESOL.
- Hernández, T., Dueñas, G., Mariño, A., Velázquez, A., & Alcántara, D. (2016). Modificación de las propiedades de la fundición blanca ИЧХ2Н4 con tres variantes de temple. *Minería y Geología*, 32(4), 110-123.

https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art8_No4_2016/0?articlesBySameAuthorPage=3

Krauss, G. (2014). Quench and tempered martensitic steels: Microstructures and performance. En G. E. Totten (Ed.), *Steel heat treating technologies* (Vol. 12, pp. 363-378). Elsevier Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01212-7>

Lambert, A., Drillet, J., Gourgues, A. F., Sturel, T., & Pineau, A. (2000). Microestructura de los componentes de martensita-austenita en zonas afectadas por el calor de soldaduras de acero de baja aleación de alta resistencia en relación con las propiedades de tenacidad. *Science and Technology of Welding and Joining*, 5(3), 168–173. <https://doi.org/10.1179/136217100101538164>

Madhusoodhanan, R., Paramashivan, S. S., Mohan, S., Sivapirakasam, S. P., Mathew, J., & Surianarayanan, M. (2022). Fabricación de electrodos de soldadura de bajo humo utilizando material sintético de flujo rutilo. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(11-12), 8197–8208. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09834-5>

Najarro, R., Cruz, A., Perdomo, L., Ramírez, J., & López, R. (2018). Potencialidades de las escorias de afino del acero en la obtención de un fundente para recargue por soldadura. *Centro Azúcar*, 45(4), 32-40. https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/79

Negrín, L. I., Rodríguez, M., Valdés, C., Pérez, E. A., & Cárdenas, N. (2022). Estudio sobre la aplicabilidad de electrodos de fabricación nacional en la industria azucarera. *Centro Azúcar*, 49(3), 48-56. https://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/713

Ning, Y., Qiu, Z., Wu, B., Pan, Z., & Li, H. (2025). Hardfacing of metals: A review of consumables, properties and strengthening processes. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 6330-6349. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.221>

Oñoz, P. (2024). *Desarrollo de electrodos para el recargue de piezas, a partir de un revestimiento con mezcla rutilica, cromita refractaria, caliza y grafito*. [Tesis doctoral, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas]. Repositorio Institucional UCLV. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/16426>

Oñoz, P., Rodríguez, M., Perdomo, L., Quinta, F., & Acosta, U. (2021). Evaluación de las cromitas refractarias de Camagüey como fuente potencial de cromo para electrodos revestidos de recargue por soldadura. *Minería y Geología*, 37(1), 44-57. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s1993-80122021000100044

Pachacama, V. P. (2023). Comportamiento de desgaste y características metalográficas del revestimiento duro en aplicaciones de acero al carbono: una revisión. *Investigación Tecnológica IST Central Técnico*, 5(2), 17. <https://doi.org/10.70998/itistct.v5n2.161>

Perdomo, L., Rodríguez, M., Quintana, R., Cruz, A., Gómez, I., Alfonso, I., González, O., Gómez, C. R., & Herrera, A. (2022). Procesamiento pirometalúrgico de minerales y desechos sólidos industriales para la obtención de productos de utilidad industrial. *Analés de la ACC*, 12(2), e1118. <http://www.scielo.sld.cu/pdf/aacc/v12n2/2304-0106-aacc-12-02-e1118.pdf>

- Reina, M. (2015). *Soldadura de los aceros: aplicaciones* (5ta ed.). Weld Work S.L.
- Rodríguez, M. (1992). *Electrodo tubular revestido para el relleno superficial de centralizadores-estabilizadores y piezas que trabajen en condiciones similares*. [Tesis doctoral, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas].
- Smith, W. F. (2023). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales* (7a ed.). McGraw Hill.
- Srikarun, B., Oo, H. Z., & Muangjunburee, P. (2021). Influence of different welding processes on microstructure, hardness, and wear behavior of martensitic hardfaced cladding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 8984–8995. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06078-4>
- Vornovitsky, I. N., Zakharova, N. V., Shishkova, O. V., Vilisov, A. A., & Zinchenko, A. V. (2005). Technological peculiarities of high-alloy steel welding by electrodes with rutile coating. *The Paton Welding Journal*, (2), 46-48. <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/2005/02/00>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Pablo Oñoz Gutiérrez. Conceptualización, investigación, metodología, redacción - primera redacción, redacción - revisión y edición, supervisión.
- Dr.C. Manuel Rodríguez Pérez. Conceptualización, investigación, metodología, redacción - revisión y edición.
- Dr.C. Lorenzo Perdomo González. Conceptualización, investigación, metodología, redacción - primera redacción, redacción - revisión y edición.
- Ing. Ulises José González Pérez. Conceptualización, investigación, metodología, redacción - primera redacción.
- Ing. Ruel Rosquete Rivas. Análisis formal, redacción - revisión y edición.
- Ing. Nilo González Molina. Análisis formal, redacción - revisión y edición.