



CIENCIAS TÉCNICAS

Premio de la Academia de Ciencias de Cuba, 2019

Obtención y evaluación de recubrimientos para enfrentamiento al desgaste

Amado Cruz Crespo^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-0227-9853>

Américo Scotti² <https://orcid.org/0000-0002-1005-5895>

Tamara M. Ortiz¹ <https://orcid.org/0000-0002-1529-8570>

Eduardo Díaz-Cedrér¹ <https://orcid.org/0000-0002-4547-837X>

Antonio Valtair Ferraressi² <https://orcid.org/0000-0001-7052-1555>

Rafael Fernández¹ <https://orcid.org/0000-0003-3315-2652>

Rosenda Valdes Arencibia² <http://orcid.org/0000-0001-9543-8774>

Rodolfo Najarro^{1,3} <https://orcid.org/0000-0002-6760-4269>

Manuel Rodríguez¹ <https://orcid.org/0000-0002-4092-3470>

Lorenzo Perdomo¹ <https://orcid.org/0000-0002-3425-1487>

Alejandro Duffus¹ <https://orcid.org/0000-0001-9959-5697>

Alexis García¹ <https://orcid.org/0000-0001-5941-971X>

Rafael Quintana Puchol¹ <https://orcid.org/0000-0002-8861-0270>

¹ Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Cuba

² Laboratorio para el Desarrollo de Procesos de Soldadura (LAPROSOLDA), FEMEC, Universidad Federal de Uberlândia (UFU), Brasil

³ Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), Ecuador

*Autor para la correspondencia: acruz@uclv.edu.cu

Palabras clave

recubrimientos; desgaste; soldadura; ensayos tribológicos.

RESUMEN

Introducción: El desgaste es la causa principal de salida de servicio de componentes. Para enfrentarlo, la aplicación de recubrimientos por soldadura constituye la vía más eficiente. Objetivos: obtener recubrimientos de mejor desempeño frente al desgaste, empleando consumibles experimentales o controlando el proceso de deposición por soldadura por arco con consumibles comerciales, así como fabricar equipos y dispositivos para el montaje de ensayos para validar su desempeño tribológico. **Métodos:** Los recubrimientos fueron obtenidos por soldadura por arco. La evaluación fue enfocada hacia el desempeño al desgaste, abarcando otras propiedades que explican fenomenológicamente el comportamiento. Para los ensayos tribológicos fue realizado el diseño conceptual y la fabricación de equipos y dispositivos y fueron elaboradas técnicas operatorias y guías de prácticas de laboratorio. **Resultados:** Se obtienen recubrimientos de mejor desempeño para enfrentamiento al desgaste, en base a consumibles experimentales o en base al control del proceso de deposición con consumibles comerciales. Se realiza el diseño conceptual y la fabricación de equipos y dispositivos para ensayos tribológicos de recubrimientos para la investigación, la prestación de servicios al sector empresarial y la docencia. **Conclusiones:** Es posible explicar el desempeño tribológico de recubrimientos para alargar la vida en servicio de componentes sometidos a desgaste, en base al empleo de consumibles experimentales o en base al control del proceso de deposición por soldadura con consumibles comerciales. Los equipos y dispositivos fabricados para ensayos tribológicos brindan criterios consistentes sobre el desempeño de recubrimientos, posibilitando también la prestación de servicios al sector empresarial y la docencia.



Obtaining and evaluation of wear resistant hardfacings

ABSTRACT

Keywords

coatings; wear; welding; tribological tests

Introduction: The primary cause of component outage is wear. To solve it, the application of coatings by welding is the most efficient way. Objectives: To obtain improved performance wear resistant coatings, using experimental consumables or controlling the deposition process by arc welding with commercial consumables, as well as manufacturing equipment and devices for mounting tests to validate their tribological performance. **Methods:** The coatings were obtained by arc welding. The evaluation focuses on the deposit wear performance, covering other properties that phenomenologically explain the behavior. For the tribological tests, the conceptual design and manufacture of equipment and devices were performed and operative techniques and laboratory practice guides were developed for their use. **Results:** Improve performance coatings are obtained to work in wear conditions, based on experimental consumables or based on the control of the deposition process with commercial consumables. The conceptual design and manufacture of equipment and devices for tribological testing of coatings for research, service provision to the business sector and teaching are carried out. **Conclusions:** It is possible to explain the performance of tribological coatings to extend the service life of components subject to wear, based on the use of experimental consumables or based on the deposition process control by welding with commercial consumables. The equipment and devices manufactured for tribological tests provide consistent criteria of coating performance, in turn enabling the provision of services to the business sector and teaching.

INTRODUCCIÓN

El desgaste constituye la causa principal de la salida en servicio de elementos mecánicos, conduciendo a grandes pérdidas por los costos de mantenimiento y reparación asociados y sobre todo por las pérdidas de paradas en los procesos de producción y servicios.

La aplicación de recubrimientos es el camino más eficiente y expedito para la restauración y fabricación de piezas sometidas a desgaste. Dentro de las diferentes vías, la deposición por soldadura es la técnica más frecuentemente usada para enfrentar el desgaste.⁽¹⁻¹¹⁾ Por sus características, el recargue duro por soldadura manual con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés) es el más difundido.

Los consumibles que se comercializan para recargue duro por soldadura, de acuerdo a los catálogos de fabricantes, son recomendados para aplicar bajo directrices generales dentro de un rango de parámetros de deposición; o sea, sin considerar las particularidades de los elementos sometidos a desgaste y las condiciones específicas de servicio a que son sometidos.^(2,5,6) A lo anterior se suma que, para un mismo rango de aplicaciones, en el mercado se ofertan diferentes consumibles, por lo que el usuario debe elegir uno bajo los

criterios de calidad del recubrimiento a obtener, costo y disponibilidad de mercado. Ello implica que, para una aplicación concreta se enfrente la disyuntiva de cual consumible usar y bajo que condiciones de parámetros de proceso aplicar el recubrimiento. Paralelo a lo anterior, frente a los consumibles que se comercializan, existe la posibilidad de elaborar, en base a materias primas locales, nuevos consumibles que permiten obtener recubrimientos más eficientes de enfrentamiento al desgaste.^(3,4,7-11)

Dada la complejidad de los fenómenos tribológicos en el servicio de los recubrimientos, existe un amplio número de ensayos estandarizados. Se reportan también ensayos no normados, que responden a condiciones particulares de laboratorio;⁽¹²⁾ o a especificidades de la investigación.⁽¹³⁾ Por los costos, son menos frecuentes los estudios tribológicos en condiciones de servicio.^(5,6)

El objetivo del presente trabajo es obtener recubrimientos de mejor desempeño en el enfrentamiento al desgaste, empleando consumibles experimentales o controlando el proceso de deposición por soldadura por arco con consumibles comerciales; así como fabricar equipos y dispositivos para el montaje de ensayos que permitan validar su desempeño tribológico.

MÉTODOS

Para los estudios del presente trabajo fueron obtenidos recubrimientos mediante soldadura por arco, con consumibles experimentales o controlando los parámetros del proceso de deposición con consumibles comerciales. Los estudios realizados incluyen también la obtención de depósitos aleados combinando consumibles comerciales y controlando parámetros de procesos. En la figura 1 se representa un esquema general que incluye etapas de las abordadas en los diferentes estudios realizados. Los recubrimientos obtenidos fueron caracterizados para, sobre la base de un análisis integrado, establecer criterios acerca de su capacidad para enfrentar el desgaste. En algunos de los estudios realizados, los criterios se establecen sobre la base de la composición química, física y microestructural, en otros se llega hasta la evaluación del comportamiento al desgaste, realizando incluso ensayos para condiciones reales en algunos de los casos.

Como parte del trabajo, fue creada una infraestructura laboratorial para la caracterización tribológica de recubrimientos. Para ello, fue realizado el diseño conceptual y la fabricación de equipos y dispositivos de ensayos en el Centro de Investigaciones de Soldadura, creándose condiciones

para el estudio comparativo de recubrimientos y el efecto de las variables de ensayo, ampliando las posibilidades para la investigación, la prestación de servicios y la docencia.⁽¹⁴⁾

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estudios con vínculos al sector empresarial brindaron resultados de aplicación directa. Fue demostrado que la aplicación de recubrimientos por soldadura puede aumentar hasta en 8 veces la vida útil de álabes de exhaustores (sometidos a erosión), con respecto a los originales usados en una fábrica de cemento.⁽⁵⁾ La conversión de un aporte oxiacetilénico R FeCr en uno E FeCr para SMAW, permitió la obtención de recubrimientos para elementos sometidos a los mecanismos de desgaste abrasivo y erosivo, como es el caso de los tornillos extrusores para el conformado de arcilla.⁽⁴⁾ También, la aplicación de recubrimientos por SMAW en la fabricación de blindajes laterales de molinos de áridos, demostró el aumento de la vida útil de las placas de blindaje en las condiciones de producción.⁽⁶⁾ Fue corroborado que el aumento de la corriente de soldadura incrementa la dilución, influyendo sobre la composición y la microestructura del metal depositado en detrimento del desempeño frente al desgaste.⁽⁴⁻⁶⁾

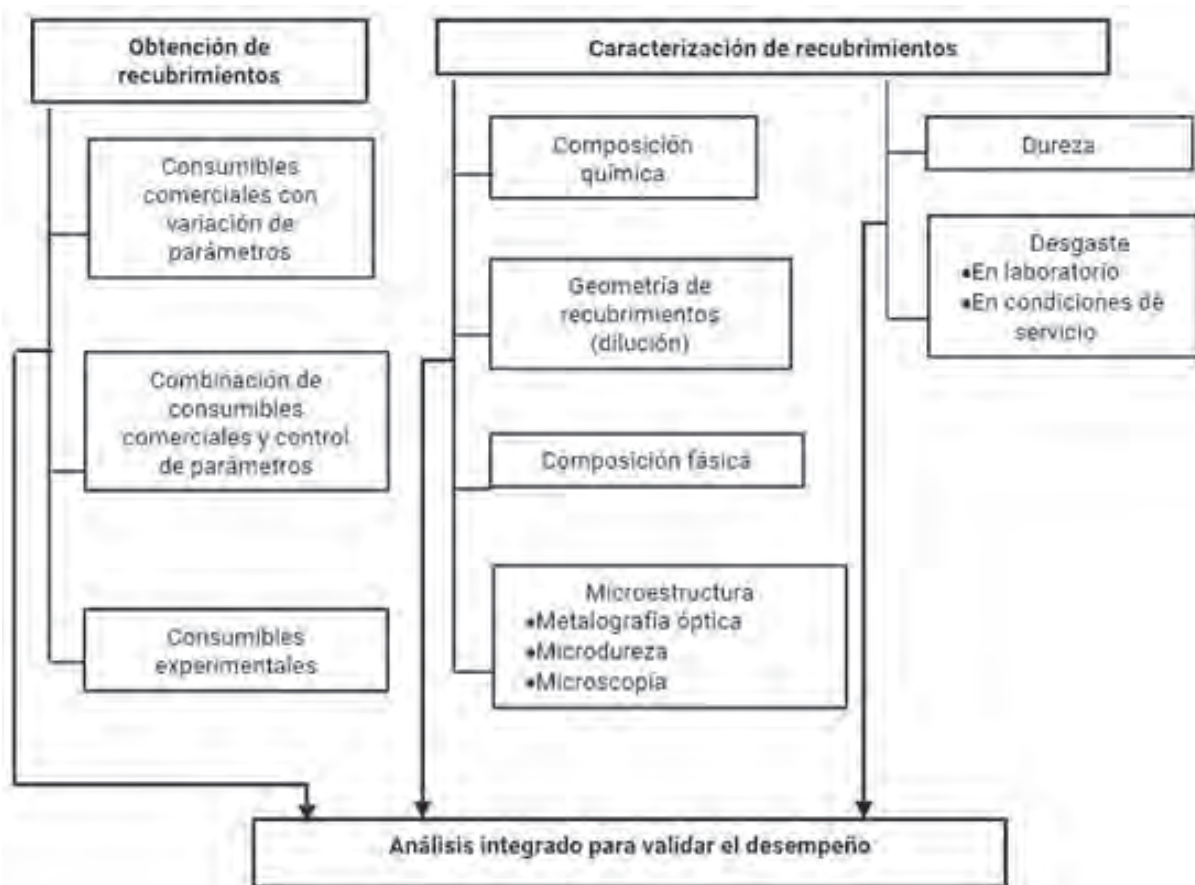


Fig. 1. Representación esquemática de obtención y caracterización de recubrimientos para validar su desempeño.

La caracterización de depósitos de electrodos tubulares revestidos experimentales, desarrollados en el CIS, brindó resultados que sustentan su satisfactorio desempeño en condiciones de desgaste abrasivo.^(1, 7-9) La microestructura del metal depositado varía en función del número de pasadas (de la dilución), pudiendo ir de una fundición blanca aleada al cromo hipoeutéctica con austenita y eutéctica, cuando la dilución es alta,^(7, 9) a una hipereutéctica con carburos primarios (Fe-Cr)₇C₃, cuando es poca o nula la dilución^(1, 8). El aumento de la corriente en la deposición altera la composición y la microestructura, afectando la capacidad de enfrentamiento al desgaste.⁽⁷⁾ En el estudio comparativo de desgaste microabrasivo, frente a un depósito de electrodo comercial AWS A5.13 EFeCr-A1, el experimental mostró un desempeño satisfactorio.⁽⁹⁾ La incertidumbre de los valores de microdureza de los microconstituyentes en los depósitos es significativamente influenciada por la desviación estándar de los valores.⁽¹⁾

Fue demostrado que es posible aumentar la resistencia a la abrasión, junto al aumento de la productividad de deposición, mediante la obtención de recubrimientos Fe-Cr-C y Fe-Cr-C-Nb por S-FCAW (Soldadura por Arco con Electrodo Tubular Autoprotectido) con adición de alambre frío al baño. La presencia de Nb en las fundiciones blancas ricas en cromo, propicia el refinamiento de la microestructura y la presencia de carburos NbC de alta dureza, lo que favorece también la resistencia a la abrasión.⁽²⁾

La posibilidad de enfrentar el desgaste abrasivo en base a la obtención de recubrimientos por SAW, con fundentes desarrollados a base de escorias industriales fue demostrada.^(3, 10 y 11) Fueron obtenidas ecuaciones que relacionan cuantitativa-

mente los contenidos de elementos de aleación del depósito y la dureza de este con la composición del fundente obtenido con escorias del sistema MnO-SiO₂-CaO.⁽³⁾ El metal depositado con el fundente desarrollado a base de escorias de soldadura por SAW, como el depositado con el fundente a base de escorias de afino del acero, se caracterizan por significativos contenidos de C, Cr y Mn, con microestructura martensítica y cierta presencia de austenita residual, y con altos valores de dureza.^(3, 10) Estas características los hacen similares a las de recubrimientos de consumibles comerciales destinados para trabajo en abrasión.

En todos los casos de estudio, los recubrimientos validados para el enfrentamiento al desgaste abrasivo y erosivo se caracterizan por una composición química, donde el Cr y el carbono juegan un papel significativo. De modo general, los recubrimientos responden a dos grupos de aleaciones ferrosas, fundiciones blancas ricas en cromo y aceros de alto carbono y baja aleación. Bajo las condiciones de enfriamiento rápido del metal depositado, propio de un proceso de recargue por soldadura por arco, y el efecto de los elementos de aleación, la microestructura obtenida en todos los casos presenta alto desequilibrio. En la microestructura de los recubrimientos de fundiciones blancas pueden aparecer austenita y eutéctica, eutéctica o carburos primarios y eutéctica, correspondiendo con aleaciones hipoeutécticas, eutécticas e hipereutéctica, respectivamente. Cuando, junto al cromo se introduce el niobio como elemento de aleación en las fundiciones blancas, aparecen dos tipos de carburos, los M₇C₃ de cromo y de hierro y los MC de niobio. En el caso de los recubrimientos de acero, la microestructura presenta martensita y austenita residual.

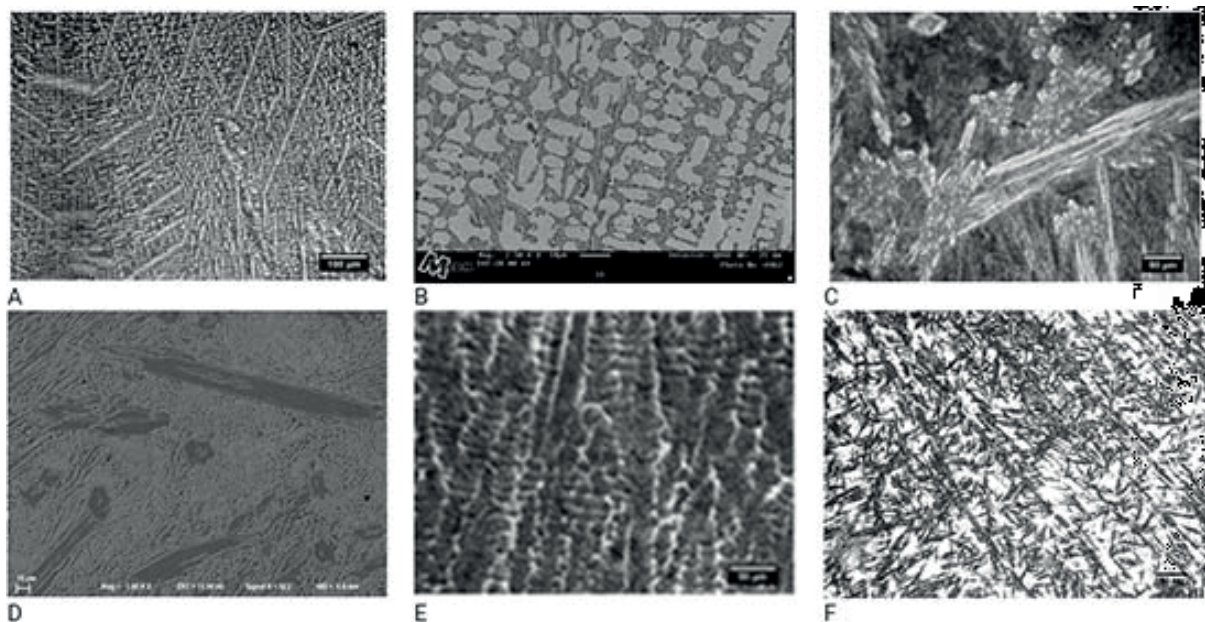


Fig. 2. Microestructuras representativas de los recubrimientos.

En todos los casos los valores de dureza de las aleaciones de los recubrimientos son altos, propios para enfrentamiento al desgaste abrasivo y erosivo. En la figura 2 se muestran, a modo de ejemplo, imágenes representativas de la microestructura de los recubrimientos estudiados. Las imágenes de las figuras 2A y 2B, se corresponden a una fundición blanca hipoeutéctica, donde se observan las dendritas de austenita y la eutéctica interdendrítica, constituida por austenita y carburos de cromo.^(5, 7) En las figuras 2C y 2D son mostradas microestructuras de recubrimientos de fundición blanca hipereutéctica, caracterizados por la presencia de carburos de cromo M_7C_3 en una matriz eutéctica de austenita y carburos.^(2, 6) Finalmente, en las figuras 2e y 2f se observan imágenes de la microestructura de recubrimientos de acero de baja aleación, caracterizados por la presencia de martensita y austenita residual.^(3, 10)

Conclusiones

Son obtenidos recubrimientos por soldadura por arco con empleo de consumibles experimentales o comerciales con variación de los parámetros del proceso de deposición, que satisfacen el enfrentamiento al desgaste, posibilitando alargar la vida útil de componentes. Las propiedades de los depósitos son relacionadas con la capacidad de enfrentamiento al desgaste, en función de la composición de los consumibles de aporte o de los parámetros del proceso de deposición. Se realiza el diseño conceptual y la fabricación de equipos y dispositivos para la realización de ensayos tribológicos comparativos de recubrimientos, que permiten también la evaluación del efecto de las variables de ensayo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cruz-Crespo A, Leal JES, Piratelli-Filho A, Mendez TO and Arencibia RV. Determination of the uncertainty of microhardness in the evaluation of hardfacing obtained by welding. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2015; 648: 1-10. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/648/1/012004/pdf>
2. Cruz-Crespo A, Fernández-Fuentes R, Valtair Ferraresi A, Ariza Gonçalves R, Scotti A. Microstructure and Abrasion Resistance of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-Nb Hardfacing Alloys Deposited by S-FCAW and Cold Solid Wires. *Soldagem & Inspeção*. 2016; 21(3): 342-353. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2103.09>
3. Cruz-Crespo A, Perdomo González L, Fernández R, Scotti A. Composición y microestructura del metal depositado con fundentes obtenidos con empleo de escorias del sistema $MnO-SiO_2-CaO$. *Centro Azúcar*. 2017; 44(3): 43-52. <http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/en/volumen-2017-eng/issue-3>
4. Díaz-Cedré EM, Cruz-Crespo A, Scotti A, García-Hernández A, Miguel-Oria JV, Pérez-Pino NM. Conversión de un aporte oxiacetilénico R-FeCr en E-FeCr para recubrimiento de piezas sometidas a desgaste erosivo. *Minería y Geología*. 2013; 29(4): 45-60. <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/739>
5. Díaz-Cedré E, Perdomo-Álvarez LE, Cruz-Crespo A, Miguel Oria JV, Rodríguez S, Pérez-Pino NM. Aumento de la vida útil de los álabes de exhaustores de una fábrica de cemento mediante la aplicación de relleno superficial por soldadura. *Welding Journal*. 2016; (4): 65-70. <https://www.aws.org/publications/WeldingJournalSpanishPortuguese>
6. Díaz-Cedré EM, Cruz-Crespo A, Scotti A, Rodríguez Peña P, Miguel-Oria JV, Pérez-Pino NM. Evaluación de electrodos para la fabricación de blindajes laterales de molinos de trituración de áridos. *Dyna*. 2013; 177(2): 75-85. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/rt/printerFriendly/30225/0>
7. Fernández Fuentes AR, Cruz-Crespo A, Gonçalves RA, Scotti A, Guedes De Alcântara N. Caracterización de depósitos obtenidos con electrodos tubulares revestidos para el recargue de medios de labranza sometidos a desgaste abrasivo en el sector azucarero. *Centro Azúcar*. 2014; 41(2): 1-11. <http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/es/volumen-2014/numero-2>
8. Ortiz Méndez T, Cruz Crespo A, Rodríguez Pérez M. Caracterización de depósitos de un electrodo tubular del sistema Fe-Cr-Mn-Si-C destinado al recargue de piezas sometidas a desgaste abrasivo. *Centro Azúcar*. 2017; 44(3): 93-100. <http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/en/volumen-2017-eng/issue-3>
9. Ortiz T, Cruz-Crespo A, Rodríguez M. Effect of welding passes number on the micro-abrasive wear performance of hardfacing welds obtained with an experimental coated tubular electrode. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. 2019; 42(1): 19-26. <http://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica>
10. Najarro Quintero R, Cruz-Crespo A, Perdomo González L, Ramírez Torrez J, López Bustamante RJ. Potencialidades de las escorias de afino del acero en la obtención de un fundente para recargue por soldadura. *Centro Azúcar*. 2018; 45(4): 32-40. <http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/en/volume-2018/issue-4>
11. Najarro-Quintero R, Cruz-Crespo A, Perdomo-Gonzalez L, Ramirez-Tórrez J, Orbea-Jiménez M. Empleo de escorias de horno cuchara y de cenizas de paja de arroz como componentes de un fundente para recargue por soldadura. *Minería y Geología*. 2018; 34(3): 331-344. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1993-80122018000300007&lng=es&nrm=iso
12. Cruz-Crespo A, Rodríguez Acosta E, Ortiz Méndez T, Díaz-Cedré E, Duffus Scott A, Najarro Quintero R. Fabricación y validación de máquina para ensayo de erosión húmeda. *Centro Azúcar*. 2019; 46(2): 45-56. <http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/en/volume-2019/issue-2>
13. Ortiz Méndez TM, Cruz-Crespo A, Espino Rodríguez Y. Estudio de los ensayos de desgaste aplicados en depósitos de recargue. Editorial Academia Espanola; 2019. 72 p. ISBN-13: 978-3-8417-6156-9; ISBN-10: 3841761569. <https://www.eae-publishing.com/catalog/details/store/it/book/978-3-8417-6156-9/estudio-de-los-ensayos-de-desgaste-aplicados-en-dep%C3%B3sitos-de-recargue?search=Estudio%20de%20los%20ensayos%20de%20desgaste%20aplicados%20en%20dep%C3%B3sitos%20de%20recargue>
14. Cruz-Crespo A, Perdomo L., Gómez I, Ortíz T, Najarro R., Velázquez E., Herrera A., Duffus A., Abreu K. Montaje de un laboratorio de ensayos tribológicos para la docencia y la investigación. X Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica (COMEC 2019). Cayería Norte V.C.; Junio 2019.

Agradecimientos. Los autores agradecen a CAPES y UFU de Brasil, así como al MES y UCLV de Cuba por el apoyo brindado en la realización de las investigaciones en el marco del convenio CAPES/MES. También agradecen la colaboración de Juan A. Pozo, Jorge V. Miguel Oria, Luis Perdomo Álvarez, Evit Rodríguez Acosta, Yoan Espino Rodríguez de la UCLV, así como a José Ramírez Torrez de ACINOX Las Tunas y a Rafael Ariza Gonçalves de la UFU.

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribuciones de autoría:

1. Conceptualización: Dr. Amado Cruz-Crespo, Dr. Américo Scotti
2. Curación de datos: -
3. Análisis formal: Dr. Amado Cruz-Crespo, Dra. Tamara M. Ortiz, Dr. Rafael Fernández Fuentes, Dra. Rosenda Valdés Arencibia, MSc. Rodolfo Najarro
4. Adquisición de fondos: Dr. Amado Cruz-Crespo, Dr. Américo Scotti
5. Investigación: Dr. Amado Cruz-Crespo, Dra. Tamara M. Ortiz, Dr. Eduardo Díaz Cedré, Dr. Rafael Fernández Fuentes, MSc. Rodolfo Najarro, MSc. Alexis García Hernández

6. Metodología: Dr. Amado Cruz-Crespo, Dr. Antonio Valtair Ferraressi, Dra. Rosenda Valdés Arencibia
7. Administración del proyecto: Dr. Amado Cruz-Crespo, Dr. Américo Scotti
8. Recursos: Dr. Américo Scotti, Dr. Antonio Valtair Ferraressi, Dra. Rosenda Valdés Arencibia, MSc. Rodolfo Najarro
9. Software: -
10. Supervisión: Dr. Amado Cruz-Crespo, Dr. Américo Scotti
11. Validación: Dr. Amado Cruz-Crespo, Dra. Tamara M. Ortiz, Dra. Tamara M. Ortiz, Dr. Eduardo Díaz Cedré, Dr. Rafael Fernández Fuentes, MSc. Rodolfo Najarro
12. Visualización: Dr. Amado Cruz-Crespo, Dra. Tamara M. Ortiz, Dr. Eduardo Díaz Cedré, Dr. Rafael Fernández Fuentes, MSc. Rodolfo Najarro, Dr. Manuel Rodríguez Pérez, Dr. Lorenzo Perdomo, Dr. Alejandro Duffus Scott, MSc. Alexis García Hernández, Dr. Rafael Quintana
13. Redacción-borrador original: Dr. Amado Cruz-Crespo, Dr. Rafael Fernández Fuentes, Dr. Manuel Rodríguez Pérez, Dr. Lorenzo Perdomo
14. Redacción-revisión y edición: Dr. Américo Scotti, Dr. Antonio Valtair Ferraressi, Dr. Alejandro Duffus Scott, Dr. Rafael Quintana

Financiación. Este trabajo fue realizado con apoyo financiero del proyecto CAPES-MES 146/12.

