

CAVITACIÓN Y EROSIÓN POR LODOS DE RECUBRIMIENTOS POR ASPERSIÓN TÉRMICA

Cavitation erosion and slurry erosion of thermal spray coatings

RESUMEN: Se estudió la resistencia a erosión por lodos a ángulo rasante y la resistencia a cavitación de recubrimientos aplicados mediante aspersión térmica por llama sobre acero inoxidable martensítico. En algunos casos se aplicó un polímero sobre la superficie del recubrimiento con el propósito de generar un efecto de sellado de la porosidad y ver la influencia de este procedimiento sobre la resistencia al desgaste.

La microestructura de los recubrimientos y el aspecto de las superficies desgastadas se caracterizaron mediante Microscopía óptica (LOM) y electrónica de barrido (SEM), y las pruebas de desgaste se llevaron a cabo siguiendo un procedimiento estandarizado para el caso de cavitación (norma ASTM G32) y una rutina propia desarrollada en laboratorio para la erosión por lodos.

Los resultados mostraron que la mayor resistencia a cavitación de los recubrimientos se obtuvo en aquellos con altos porcentajes de matriz de Níquel, sin embargo, el acero presentó en todos los casos el mejor comportamiento. En el caso de erosión bajo ángulo rasante los recubrimientos cerámicos presentaron un mejor comportamiento. Los principales mecanismos de desgaste observados en los ensayos de erosión y cavitación fueron micro-corte y deformación plástica respectivamente.

Palabras clave: Aspersión térmica, cavitación, erosión por lodos.

ABSTRACT: The slurry erosion and cavitation erosion resistance of three thermal spray coatings applied onto ASTM A743 CA6NM steel by flame spraying process was studied.

The coatings microstructure and worn surfaces were characterized by light optical and scanning electron microscopy. Cavitation tests were done according to ASTM G32 standard; in some cases a sealant was applied to the specimens in order to improve their cavitation resistance. Erosion tests were done in a modified centrifugal pump with slurry composed of 10 wt-% of SiO₂ particles in water.

The results showed that coatings with higher nickel contents had better cavitation erosion resistance, although the uncoated steel reported the best behavior in all the cases. In slurry erosion tests, the coatings with high content of hard particles showed the best response. The main mass removal mechanisms observed in cavitation and erosion tests were plastic deformation and micro-cutting, respectively.

Keywords: Cavitation erosion, slurry erosion, thermal spray coatings.

1. INTRODUCCIÓN

Las superficies de los elementos de máquinas, particularmente aquellos que componen maquinaria usada en la industria minera y de generación eléctrica, sufren un gran deterioro durante su funcionamiento debido a la interacción con fluidos que por lo general contienen partículas inmersas, las cuales al impactar

con las superficies de los diferentes elementos, causan una degradación de las mismas. Este tipo de desgaste es conocido como erosión por lodos (*slurry erosion*). Por otro lado, cuando se tienen fluidos en movimiento se generan frecuentemente cambios súbitos de presión creando burbujas que implotan y generan ondas de choque que deterioran la superficie de los elementos causando el fenómeno conocido como erosión por cavitación (*cavitation erosion*).

LUIS ARMANDO ESPITIA SANJUÁN
Ingeniero Mecánico
Universidad Nacional de Colombia
laespitia@unalmed.edu.co

JUAN FELIPE SANTA MARÍN
Ingeniero Mecánico
Universidad Nacional de Colombia
jfsanta@unalmed.edu.co

JUAN CARLOS BAENA VARGAS
Ingeniero mecánico
Universidad Nacional de Colombia
jcbaena@unalmed.edu.co

SEBASTIAN ANDRES ROMO ARANGO
Estudiante Ingeniería mecánica
Universidad Nacional de Colombia
saromo@unalmed.edu.co

JAIRO ALBERTO BLANCO MARTINEZ
Estudiante Ingeniería mecánica
Universidad Nacional de Colombia
jablanca@unalmed.edu.co

ALEJANDRO TORO BETANCUR
Director
Grupo de Tribología y Superficies
Universidad Nacional de Colombia
atoro@unal.edu.co

Dada la necesidad de incrementar la resistencia al desgaste por erosión en algunos componentes de sistemas de bombeo de lodos y de generación de energía hidroeléctrica se ha optado por estudiar el comportamiento de recubrimientos sometidos a diferentes condiciones de operación. Un caso particular son los recubrimientos aplicados por aspersión térmica los cuales brindan una solución rápida para proteger y reparar elementos de máquinas sometidos a desgaste excesivo

El término aspersión térmica describe una familia de procesos que usan energía generada químicamente o eléctricamente para fundir o reblandecer y acelerar partículas o gotas de un material que son depositadas sobre una superficie. Estos materiales pueden ser metálicos, poliméricos, cerámicos o compuestos.[1]

Una gran ventaja de este tipo de recubrimientos es su comportamiento al desgaste erosivo por lodos y por cavitación [2]. A pesar de ser un proceso conocido mundialmente desde los años 60 no se han realizado en el país avances significativos en el área de investigación en desgaste de recubrimientos por aspersión térmica y la selección de los materiales de aporte se ha realizado con base en recomendaciones de los fabricantes quienes reportan comportamientos relativos dentro de una misma familia de recubrimientos, sin embargo, no se tiene un conocimiento de comportamientos comparativos entre familias. Adicionalmente, los valores de dureza de las superficies no son un único indicador del comportamiento de las mismas a diferentes exigencias en desgaste y la microestructura de los recubrimientos es uno de los factores clave en el control del deterioro de las superficies [3].

Mediante este trabajo se pretende iniciar la adquisición de datos sobre las propiedades mecánicas y de superficie de recubrimientos cerámicos metálicos y compuestos para aplicaciones de erosión por lodos y erosión por cavitación.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Se aplicaron cuatro recubrimientos denominados R1,R2,R3 y R4 mediante la técnica de aspersión por llama con material de aporte en polvo (*OF*P) utilizando un equipo Terodyn 2000 sobre acero inoxidable martensítico ASTM A743 Tipo CA6NM (13Cr-4Ni) homogenizado a 1050 °C durante 2 horas, revenido a 620 °C durante dos horas y enfriado al aire. Este material se utilizó como referencia para los ensayos de desgaste. Se utilizaron como base las recomendaciones del fabricante realizando algunas

modificaciones al procedimiento de aplicación. Los parámetros de aplicación utilizados en el proceso se observan en la **tabla 1**. La preparación de las superficies fue realizada mediante impacto de óxido de Aluminio. (*sandblasting*). En todos los casos se obtuvieron espesores de capas entre 0.3 y 0.5mm. La porosidad del recubrimiento R4 fue sellada mediante una resina comercial calentando la superficie a 100°C aproximadamente.

2.2 Caracterización microestructural y química

La caracterización microestructural se realizó usando microscopio electrónico (MEB) de barrido JEOL 5910LV con microsonda EDS acoplada y con microscopio óptico (MO) Olympus PME.

La estimación de las características microestructurales de los recubrimientos fue realizada mediante análisis digital de imágenes sobre las micrografías obtenidas mediante MEB y MO. Se realizaron mediciones de dureza en un durómetro marca Wolpert en escala Vickers y un microdurómetro Shimadzu en escala Vickers utilizando diferentes valores de carga y un tiempo de aplicación fijo de 15s.

2.3 Ensayos de desgaste

Los dispositivos utilizados para realizar los ensayos se encuentran en el Laboratorio de Tribología y Superficies de la Universidad Nacional Sede Medellín. El dispositivo utilizado para realizar los ensayos de erosión por lodos (**figura 1a**) simula las condiciones de desgaste de sistemas centrífugos de bombeo y se aproxima a las condiciones cinemáticas de algunos sistemas con impacto de partículas en ángulo rasante con velocidades de impacto estimadas en 10ms^{-1} . La **figura 1c** muestra los detalles sobre el montaje de las muestras. Una completa descripción del montaje utilizado puede ser encontrada en [4].

Los ensayos de erosión por cavitación fueron realizados en un dispositivo de acuerdo con la norma ASTM G32 tipo indirecto mediante un pulsador ultrasónico que se muestra en la **figura 1b**. La **figura 1d** muestra algunos detalles del montaje de las probetas en el dispositivo.

Se realizaron mediciones de pérdida de masa en balanza con resolución de 0.1 mg cada 30 y 60 minutos en los ensayos de erosión por lodos y por cavitación. Los resultados fueron comparados a partir de pérdida de volumen de todos los materiales. El análisis de las superficies desgastadas fue realizado mediante microscopía electrónica de barrido y mediante microscopio estereoscópico.

Tabla 1. Parámetros de aplicación y propiedades de los recubrimientos

Tipo de recubrimiento	Material de aporte	Caudales reales /cfm	Presión Aire / psi	Distancia de aplicación / mm	Blanco de aspersión /mm	Densidad gmm ⁻³
Recubrimiento metálico (R1)	Partículas Ricas en Ni (95%) y Al (5%)	O ₂ =40 CH ₂ =64	30	200	22	7.7
Recubrimiento cerámico (R2)	Óxidos de Cromo (100%)	O ₂ =40 CH ₂ =60	40	200	14	4.6
Recubrimiento metálico (R3)	Partículas ricas ¹ en Ni, Cr, Mo, Ti	O ₂ =40 CH ₂ =64	30	200	27	7.8
Recubrimiento compuesto (R4)	Partículas de WC/Co (46%) y Ni-Fe-Cr (54%)	O ₂ =40 CH ₂ =50	50	75	7	15.4

¹ Debido al proceso de fabricación de las partículas (*cladding*) no es posible tener una composición química promedio mediante la técnica utilizada (EDS).

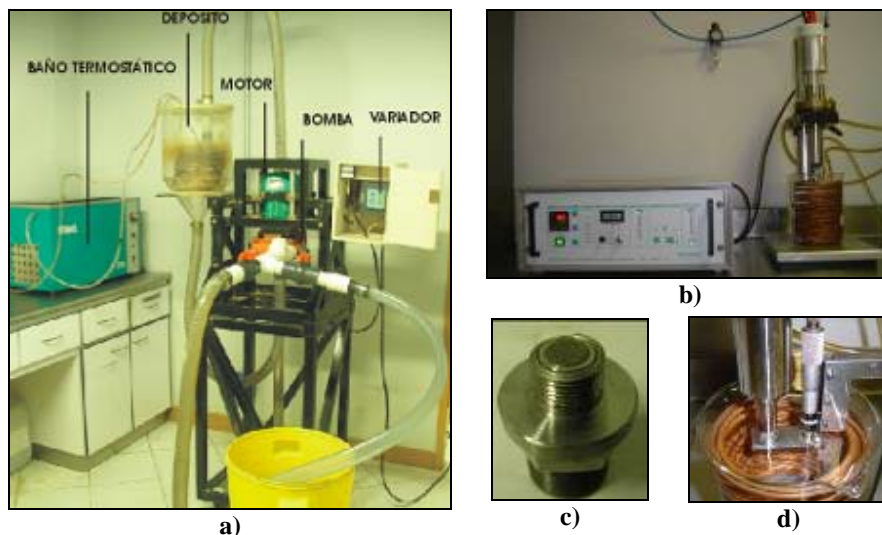


Figura 1. Dispositivos empleados para la realización de ensayos de erosión.
a) Máquina de ensayos de erosión, **b)** Máquina de ensayos de cavitación
c) Detalle montaje erosión por lodos **d)** Detalle montaje erosión por cavitación

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización microestructural

Las observación metalográfica del acero reportó una microestructura martensítica con morfología de listones, típica de aceros de bajo Carbono, como se muestra en la **figura 2a**. La dureza media del acero es 280 HV_{31.25}. De acuerdo con la literatura, este valor de dureza es consecuente con la historia térmica del material [5]. Los valores de rugosidad superficial promedio (Ra) y rugosidad RMS (Rq) obtenidos mediante el proceso de adecuación de las superficies previo a la aplicación fueron Ra = 3.4 μm Rq = 4.2 μm.

Los recubrimientos R2 y R4 requieren un capa previa de anclaje para evitar su desprendimiento. Para este fin se utilizó el recubrimiento R1. La microestructura de R1 (**figura 2b**) está compuesto de una matriz de Níquel (191 HV_{300g,15seg}) y un porcentaje de aproximadamente 15 % en volumen de óxidos de aluminio identificados como (1) en la misma figura. El porcentaje de porosidad (2) estimado es 8%.

La microestructura del recubrimiento R2 está compuesta por Cr₂O₃ (1853 HV_{300g,15seg}) identificada como (2) en la **figura 2c**, con un porcentaje de porosidad del 30%. Se observa también la capa base de la aleación identificada como (1) en la misma figura.

El recubrimiento R3 está compuesto de una matriz rica en Ni-Fe-Mo-Si (385 HV_{50gf,15}) identificada como (1) en la **figura 2d** y de un 28% de óxidos de Titanio (701 HV_{50gf,15}) identificados como (2) en la misma figura (partículas más oscuras). El porcentaje de porosidad estimado fue del 8%.

La microestructura del recubrimiento R4 se observa en la **figura 2e**. Allí se observa la capa de anclaje R1 identificada como (1) la cual alcanza un espesor del orden de 100 µm. La capa del recubrimiento R4 consta en un 46% de partículas de WC-Co con una microdureza media de 1211 HV_{300g,15seg} y de un 54% de partículas de Ni-Cr con una microdureza media de 639 HV_{300g,15seg}. El porcentaje de porosidad del recubrimiento es 15% aproximadamente.

La **figura 2f** muestra la microestructura de los recubrimientos R4 con sellante (R4S) donde se evidencia la penetración del mismo en todo el espesor de la capa.

3.2 Ensayos de erosión por lodos y por cavitación

Los resultados globales de pérdida de volumen acumulada de los materiales ensayados por cavitación realizados se muestran en la **figura 3a**. Los datos observados son el promedio de tres repeticiones realizadas a cada material bajo las mismas condiciones de ensayo de desgaste mencionadas anteriormente. Los valores de densidad utilizados se muestran en la **tabla 1**. Nótese que el eje y en la derecha de la figura representa sólo los valores de R2 (línea punteada). Los valores de pérdida de volumen para todas las demás muestras deben leerse en el eje de la izquierda.

Los resultados de las pruebas de cavitación indican entonces que existe una notable diferencia en el comportamiento de los recubrimientos en el ensayo realizado. El recubrimiento que presentó el mejor comportamiento fue R4 seguido de R3 y por último R4S, R1 y R2. Todos los recubrimientos presentaron valores superiores de pérdida de volumen comparados con el acero desnudo. Este comportamiento se debe a la alta resistencia a erosión por cavitación del acero y a la técnica de baja energía utilizada en la fabricación de los recubrimientos, la cual genera estructuras con bajos valores de cohesión y con un alto número de defectos. Sin embargo, estos niveles de defectos son aceptables para la técnica de aspersión utilizada [6].

La **figura 4** muestra el aspecto macroscópico de las superficies desgastadas por cavitación. Allí se pueden evidenciar diferencias en las superficies del material

después del ensayo. El recubrimiento R4S presenta un aspecto muy diferente al del recubrimiento R4, este último presenta marcas más profundas en su superficie. A nivel macroscópico las marcas más profundas se ven en el recubrimiento R2 seguido de R4, Y R4S. La marcas en los recubrimientos R1 y R3 son menos profundas pero más uniformes sobre toda la superficie.

La **figura 5** muestra el aspecto microscópico de las superficies desgastadas por cavitación. Los mecanismos de falla para el acero y los recubrimientos R1 y R3 se asocian a una respuesta dúctil de la superficie, caracterizada por alta deformación plástica. Para el recubrimiento R2, R4 y R4S se observan fallas frágiles caracterizadas por superficies agudas originadas por la poca deformación aceptada y por la baja capacidad de disipar las ondas de choque en este tipo de materiales (en el caso de cavitación).

La **figura 3b** muestra la pérdida de volumen acumulada de los recubrimientos en el ensayo de erosión por lodos. El recubrimiento R4 presenta el mejor comportamiento, nótese el cambio de la pendiente en la última media hora de ensayo de R3 mostrando que el recubrimiento se había desprendido totalmente. Este mismo comportamiento se observó para R2 a partir de la media hora de ensayo debido a la baja cohesión interna en este recubrimiento, el cual a su vez presentó los valores más altos de pérdida de volumen. El acero desnudo presentó pérdidas de volumen superiores a las reportadas por R3 y R4, pero inferiores a las de R2. Los comportamientos anteriores indican que los recubrimientos utilizados tienen uso potencial en condiciones de erosión por lodos bajo ángulo rasante y velocidad de impacto moderada.

La **figura 6** muestra el aspecto macroscópico de las superficies desgastadas en erosión por lodos. Allí se pueden evidenciar diferencias en la huellas sobre las probetas notándose mayores áreas afectadas en R2 seguidas del acero, y posteriormente R3, R2 y R4. Este comportamiento coincide con las pérdidas de volumen reportadas.

La **figura 7** muestra el aspecto microscópico de las superficies desgastadas en erosión por lodos. Los mecanismos de falla para todos los casos son marcas típicas de rayado bajo ángulo rasante mostrando marcas de micro-corte y micro-arado. Para el caso de los recubrimientos cerámicos se observan fracturas interlaminares y desprendimiento completo de laminillas de recubrimiento.

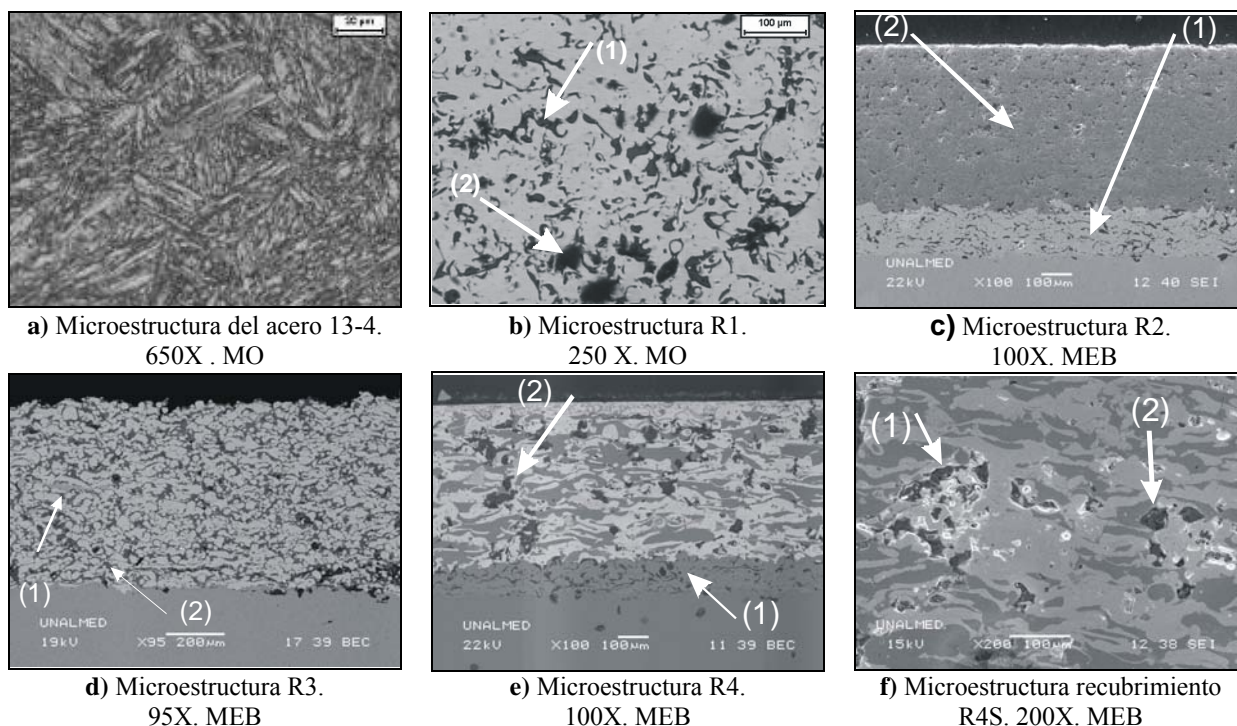


Figura 2. Microestructura de materiales utilizados.

4. CONCLUSIONES

- La microestructura de los recubrimientos obtenidos indica procedimientos adecuados de aplicación que derivan en niveles aceptables de defectos para la técnica de aspersión térmica utilizada.

- Los resultados de erosión por cavitación indican que en todos los casos el acero presenta un mejor comportamiento con respecto a los recubrimientos ensayados.

- Los ensayos de erosión por lodos realizados mostraron que, bajo condiciones de ángulo rasante, los recubrimientos por aspersión pueden mejorar la resistencia del acero 13-4 hasta 3 veces mediante el recubrimiento R3

- Los principales mecanismos de desgaste observados en el ensayo de erosión por cavitación son: alta deformación plástica y fractura frágil. Para el caso de los ensayos de erosión por lodos los principales mecanismos observados son: micro-corte y micro-arado y en algunos casos fractura frágil.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Empresas Públicas de Medellín EPM por la financiación brindada, a industrias HRV y a los laboratorios de Metalografía y Soldadura de la Universidad Nacional de Colombia, por la disposición de

su infraestructura física para la realización de las labores experimentales.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Cramer, D. Thermal Spray Processes, en: Handbook of thermal spray technologies, ASM International, , pp. 54-76. 2004.

[2] Kushner B., Thermal spray coatings en: ASM Handbook Vol 18: Friction, lubrication and wear technology, ASM Int., p.829-833.1992.

[3] Zum Gahr, K. H. Microstructure and wear of materials, P531-553. Elsevier, Amsterdam 1987.

[4] Olaya, C *et al.* Análisis del desgaste en la carcasa de bombas centrífugas para el transporte de lodos. En: memorias de III Congreso Internacional de materiales ISBN 958-655-889-4. Cartagena, Colombia. Septiembre 2005.

[5] ASTM A 743/A 743M. Standard Specification for Casting, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application, 2003.

[6] Pawlowski L., The Science and Engineering Of thermal Spray Coatings, John Wiley & Sons Ltd., England, 1995.