

## Resistencia al desgaste de recubrimientos Fe-Nb-Cr-W, Nb, AISI 1020 y AISI 420 producidos por proyección térmica por arco eléctrico<sup>(\*)</sup>

E.A. López-Covaleda\*, J.L. Mercado-Velandia\* y J.J. Olaya-Flórez\*

### Resumen

Mediante proyección térmica de arco eléctrico fueron depositados tres materiales comercialmente conocidos como: 140MXC (a base de hierro, wolframio, cromo y niobio), 530AS (acero AISI 1020) y 560AS (acero AISI 420), sobre acero AISI 4340. Con el objetivo de evaluar la mejor estrategia para incrementar la resistencia al desgaste abrasivo, los recubrimientos fueron depositados de dos formas: (1) monocapas homogéneas de cada material y (2) recubrimientos depositando con alambres disimiles de 140MXC + 530AS y 140MXC + 560AS. Los recubrimientos fueron caracterizados microestructuralmente mediante Difracción de rayos X, Microscopía óptica, Microscopía láser confocal y Microscopía electrónica de barrido. La evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo se realizó mediante ensayo con arena seca y rueda de caucho (DSRW). Se encontró que la resistencia al desgaste depende entre otras de las propiedades mecánicas como la dureza. Por ejemplo, los recubrimientos más blandos tienen las mayores tasas de desgaste y su modo fallo se caracterizó por deformación plástica causada por indentación del abrasivo; por su parte los materiales más duros presentan la mejor resistencia al desgaste y un modo de fallo por microarado. Los detalles de los mecanismos de desgaste de los recubrimientos producidos se describen en esta investigación.

### Palabras clave

Desgaste; Proyección térmica; Recubrimientos; 140MXC.

## Wear resistance of Fe-Nb-Cr-W, Nb, AISI 1020 and AISI 420 coatings produced by thermal spray wire arc

### Abstract

The commercial materials 140MXC (with iron, tungsten, chrome, niobium), 530AS (AISI 1015 steel) and 560AS (AISI 420 steel) on AISI 4340 steel were deposited using thermal spray with arc. The aim of work was to evaluate the best strategy abrasive wear resistance of the system coating-substrate using the following combinations: (1) homogeneous coatings and (2) coatings depositing simultaneously 140MXC + 530AS and 140MXC + 560AS. The coatings microstructure was characterized using Optical microscopy, Scanning electron microscopy and Laser confocal microscopy. The wear resistance was evaluated through dry sand rubber wheel test (DSRW). We found that the wear resistance depends on the quantity of defects and the mechanical properties like hardness. For example, the softer coatings have the biggest wear rates and the failure mode was characterized by plastic deformation caused by particles indentation, and the other hand the failure mode at the harder materials was grooving. The details and wear mechanism of the coatings produced are described in this investigation.

### Keywords

Wear; Thermal spray; Coatings; 140MXC.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de proyección térmica se utilizan cada vez más en la industria nacional y en investigación, debido a su fácil aplicación y a la buena calidad de los recubrimientos producidos. Este proceso se fundamenta en depositar partículas fundidas y semifundidas en corto tiempo sobre un sustrato, de modo que éstas tengan el mínimo contacto con medios oxidantes como el aire<sup>[1 y 2]</sup>. Cuando estas partículas se depo-

sitan sobre el sustrato o pieza se deforman y generan una microestructura compacta a base de laminillas redondeadas llamadas “splats”, que se apilan y coalescen rápidamente dando lugar a la formación de los recubrimientos<sup>[3]</sup>. Éstos se caracterizan por ser policristalinos y uniformes y se aplican para mejorar propiedades superficiales o reparación de piezas que han sido desgastadas en servicio. Los métodos de deposición térmica se han diversificado ampliamente desarrollando técnicas de fundición y transporte de

(\*) Trabajo recibido el día 14 de abril de 2012 y aceptado en su forma final el día 11 de junio de 2013.

\* Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Dpto. de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Bogotá, Colombia.

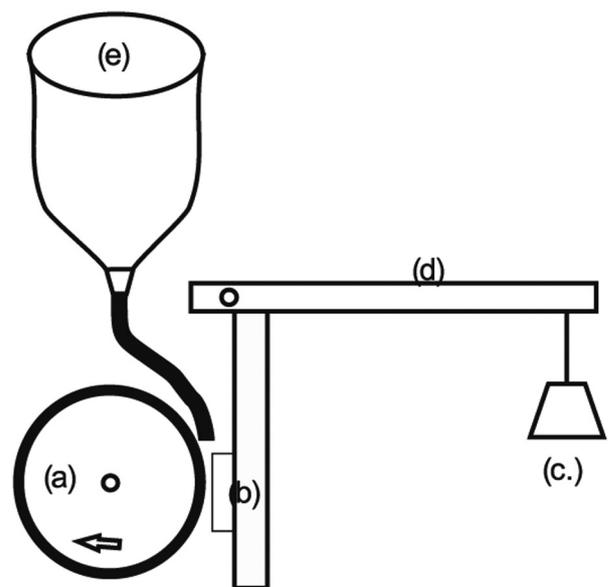
material, tales como llama, arco eléctrico, alta velocidad oxígeno-combustible (HVOF) y plasma atmosférico entre otras<sup>[4]</sup>. También se han desarrollado nuevos materiales con diversas composiciones químicas, presentación en alambres, polvos o alambres rellenos de polvos. La combinación de técnicas y materiales da como resultado una gran gama de aplicaciones industriales y de investigación. Cada aplicación y ambiente industrial es diferente y los recubrimientos ferrosos pueden responder a las necesidades de la industria, por ello son ampliamente usados debido a su versatilidad, economía y propiedades como maleabilidad, conducción eléctrica, barrera térmica, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión. Dentro de estos recubrimientos los aceros con bajo carbono suelen ser utilizados como material de sacrificio contra desgaste, como relleno en recuperación dimensional de piezas o como material de aporte en aplicaciones poco rigurosas; por otro lado los recubrimientos a base de aceros martensíticos del tipo AISI 420 tienen muchas aplicaciones<sup>[5]</sup>, por ejemplo, se recomiendan como resistentes a la corrosión en atmósferas húmedas con agua fresca. Un tercer recubrimiento ferroso, que en los últimos años se está utilizando en el área de proyección térmica, es la aleación basada en Fe-Cr-Nb-W y conocida como 140MXC<sup>[6]</sup>, ampliamente recomendada en aplicaciones como recuperación de elementos aeronáuticos y como barrera térmica en calderas y válvulas; estas aplicaciones son debidas a su composición química, estructura nanocomposite y elevada dureza.

La técnica de proyección térmica por arco eléctrico consiste en llevar a una pistola dos alambres cargados eléctricamente con polaridad contraria, aproximarlos entre sí a velocidad constante y formar un arco eléctrico que los funde. Simultáneamente una corriente de aire comprimido pasa a gran velocidad a través del arco atomizando y arrastrando el material fundido hacia la superficie del sustrato. En el mercado existen gran variedad de productos para ser aplicados con esta técnica; se diferencian en las propiedades del depósito, composición química y costo. Así, es posible encontrar desde aceros al carbono para aplicaciones generales hasta aleaciones complejas de composición especial para aplicaciones especializadas. Cada alambre es diseñado para aplicaciones específicas y debe ser depositado con corriente, potencial y presión de aire comprimido claramente definidos por los fabricantes. Mediante arco eléctrico en los últimos años han sido depositados e investigados diferentes materiales; sobre algunos de ellos se ha estudiado la resistencia al desgaste, por ejemplo recubrimientos de AISI 420 estudiados por Jin<sup>[7]</sup> en 2007 o AISI 1020 investigados por Edrisy<sup>[8 y 9]</sup> en 2001. Sin embargo son pocas las investigaciones

que correlacionan la microestructura con la resistencia al desgaste en recubrimientos disimiles o de multicapa.

Un estudio apropiado para evaluar la resistencia al desgaste en recubrimientos producidos por proyección térmica es el ensayo de abrasión con arena seca y rueda de caucho DSRW (*Dry Sand Rubber Wheel*). Este ensayo está normalizado por la ASTM bajo el estándar G65<sup>[10]</sup> y es considerado como de bajo esfuerzo. En la figura 1 se observa un esquema general del equipo utilizado en el ensayo, el cual utiliza una rueda de acero encauchada en la periferia (a) que gira en sentido horario deslizándose sobre la muestra fija en (b) mientras se ejerce fuerza normal entre las dos superficies por medio del peso (c) que aplica la palanca (d) que une el sistema; en la interfaz del desgaste se suministra arena seca (e) que ingresa por gravedad; este conjunto genera desgaste abrasivo de manera controlada en cuatro niveles de intensidad obtenidos al variar la carga y la duración del ensayo; este ensayo ha sido comparado con otros métodos de ensayo tradicional como "Pin on disk" y "Pin on Drum"<sup>[11]</sup>; en ellos se ha encontrado que los ensayos son cualitativamente equivalentes entre sí.

El desgaste abrasivo generado con DSRW es de tres cuerpos, y éste a su vez se clasifica como deslizamiento (conocido como "Grooving" o "Sliding") y rodadura (conocido como "Rolling")<sup>[12-14]</sup>. En el modo de deslizamiento el desgaste se genera porque



**Figura 1.** Esquema general de la máquina DSRW normalizada por la ASTM como G65.

*Figure 1. General scheme of DSRW machine, normalized according to ASTM G65 standard.*

las partículas de arena se embeben en el caucho y generan surcos en la superficie ensayada, mientras que en el fenómeno de rodadura las partículas de arena simultáneamente ruedan y deslizan sobre la superficie ensayada; los bordes irregulares y filosos de la arena ejercen elevada presión sobre la muestra causando deformación plástica y desprendimiento de material<sup>[15]</sup>. Estos dos fenómenos son influenciados principalmente por la velocidad, fuerza de contacto rueda-muestra y dureza relativa entre estos dos últimos.

El ensayo de desgaste ha sido realizado sobre diferentes recubrimientos hechos por proyección térmica<sup>[11, 14 y 16-21]</sup>; cuando éstos contienen grandes cantidades de óxidos entre “splats”, se genera deslizamiento de ellos en la dirección del desgaste, fenómeno conocido como delaminación, y puede estar acompañado tanto de arado como de rodadura<sup>[20 y 21]</sup>. También se conocen ensayos realizados con depósitos de acero AISI/SAE 1020, en donde el fenómeno de delaminación depende de la fuerza y velocidad del ensayo, así como de la estructura del recubrimiento<sup>[21]</sup>.

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de la presente investigación es utilizar la técnica de proyección térmica de arco eléctrico para obtener monocapas disimiles y simultáneas de recubrimientos comerciales 140MXC, 530AS y 560AS sobre acero AISI 4340. Además se pretende correlacionar la resistencia al desgaste evaluada mediante DSRW con la microestructura caracterizada mediante Difracción de rayos X, Microscopía óptica, Microscopía electrónica de barrido (MEB) y dureza del material .

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los recubrimientos fueron producidos mediante la técnica de proyección térmica utilizando los siguientes materiales: (1) alambre tubular 140MXC, alambre

hueco de hierro relleno con polvos de cromo, wolframio y niobio<sup>[6]</sup>, (2) alambre 530AS de composición similar al AISI 1020<sup>[22]</sup> y (3) alambre 560AS de composición similar al AISI 420<sup>[23]</sup>. Estos materiales fueron depositados usando dos estrategias o arquitecturas, tal como se observa en la figura 2. Se han utilizado tres recubrimientos o monocapas simples (M) independientes a base de la composición química de los alambres comerciales 140MXC, 530AS, 560AS y dos recubrimientos tipo monocapa simultánea (MS), que consisten en depositar el recubrimiento utilizando dos alambres con diferente composición química: el primer recubrimiento se depositó con la mezcla 140MXC y 530AS y el segundo con la mezcla 140MXC-560AS. Todos los recubrimientos fueron depositados sobre el acero AISI 4340 como sustrato<sup>[5]</sup> con dureza ~5 GPa, pulido con disco abrasivo hasta una rugosidad (Ra) de 0,5 y limpiado con isopropanol y acetona en inmersión ultrasónica. Posteriormente los sustratos fueron granallados con óxido de aluminio de pureza 96,04%, malla 30 y presión de 413 MPa de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes<sup>[24-26]</sup>, consumiendo en promedio 3,108 cm<sup>3</sup> de abrasivo por cada cm<sup>2</sup> tratado hasta obtener metal blanco con rugosidad (Ra) de 2,2.

Los recubrimientos fueron depositados con el equipo de deposición *Eutronic Arc Spray 4 system*, operando en modo *arc jet* utilizando presión primaria de 400 KPa y secundaria de 275 KPa, amperaje 170 A, voltaje de 30 a 37 V y distancia de proyección de 0,33 m. Estos parámetros fueron establecidos después de estudiar el rango recomendado por el fabricante para cada material.

La resistencia al desgaste fue evaluada en máquina construida según norma ASTM G65<sup>[10]</sup> en el modo C. Para ello, se empleó una carga (130 N), distancia recorrida 1.436 m (2.000 revoluciones) a 2,39 m/s (200 rpm) y la temperatura del sustrato se mantuvo siempre menor que 25 °C. En la figura 3 se muestra la morfología que presenta la arena empleada en el

(M) Monocapas			(MS) Monocapas simultáneas	
140MXC	530AS	560AS	140MXC - 530AS	140MXC - 560AS

**Figura 2.** Recubrimientos realizados sobre el sustrato AISI 4340 divididos en dos tipos monocapas de cada material: independiente (M) y monocapas simultáneas (MS) 140MXC - 530AS y 140MXC - 560AS.

*Figure 2. Coatings produce on AISI 4340 substrate, divided in single layers (S), for each commercial material, and simultaneous layers (SL) produced with 140MXC - 530AS and 140MXC - 560AS.*

ensayo de desgaste, la cual cumple con las regulaciones ASTM<sup>[27 y 28]</sup>; tamaño promedio 50-70 AFS y suministrada a razón promedio de 365 g/min.

La caracterización morfológica y estructural fue realizada mediante Microscopía óptica tipo Leco 500, Microscopía láser confocal (MLC) en el equipo LSM 700 con láser de 405 nm, *pin hole* en 38  $\mu\text{m}$  y software de visualización ZEISS 2010, Microscopía electrónica de barrido (MEB) Fei Quanta 200 operando con voltaje de 30 kV y un equipo de Difracción de rayos X (DRX) utilizando un equipo X-Pert Pro Panalytical en modo Bragg-Brentano con la línea monocromática  $\alpha$  del cobre (1,540998Å), trabajando a 45 kV y 40 mA. Se realizaron ensayos complementarios de dureza mediante micro durómetro Vickers marca Leco con carga de 300 g.

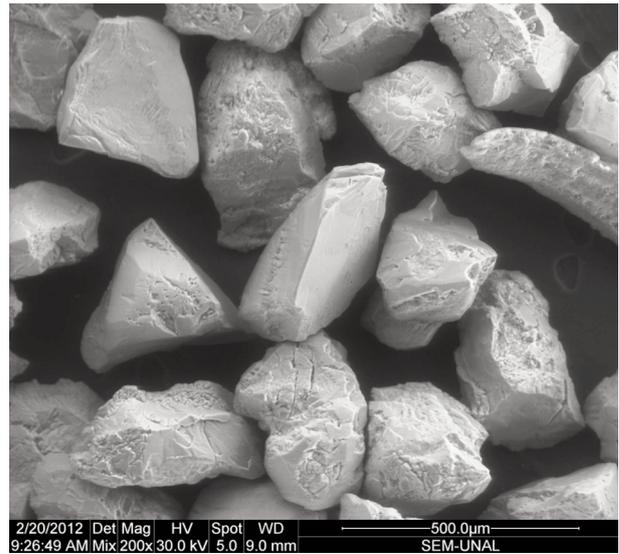


Figura 3. Imagen (MEB) de arena AFS 50-70.

Figure 3. SEM images of AFS 50-70 sand.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4 se observan los espectros DRX de los recubrimientos producidos. En todos los recubrimientos se aprecia la fase del hierro, aunque, dependiendo de la estrategia de depósito, se observan otras fases. Por ejemplo, en el recubrimiento 140MXC solamente se aprecia la formación de fase cúbica del hierro. Sin embargo investigaciones previas que implementan Microscopía electrónica de transmisión<sup>[29]</sup> identifican formación de granos nanocrista-

linos orientados aleatoriamente embebidos en matriz amorfa. Esta estructura pudiera formarse debido a que a elevadas temperaturas, las tasas de nucleación de cristales son mayores que las de crecimiento; así son generados nanocristales que no crecen significativamente debido al rápido enfriamiento que puede generar un vidrio metálico en las zonas intercristalinas.

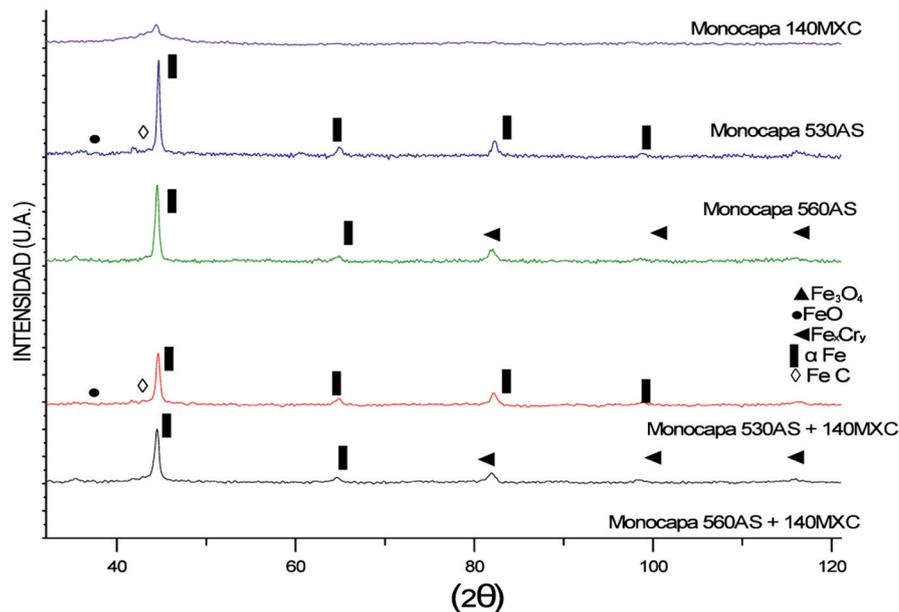


Figura 4. Espectros de Difracción de rayos X realizada sobre los recubrimientos producidos.

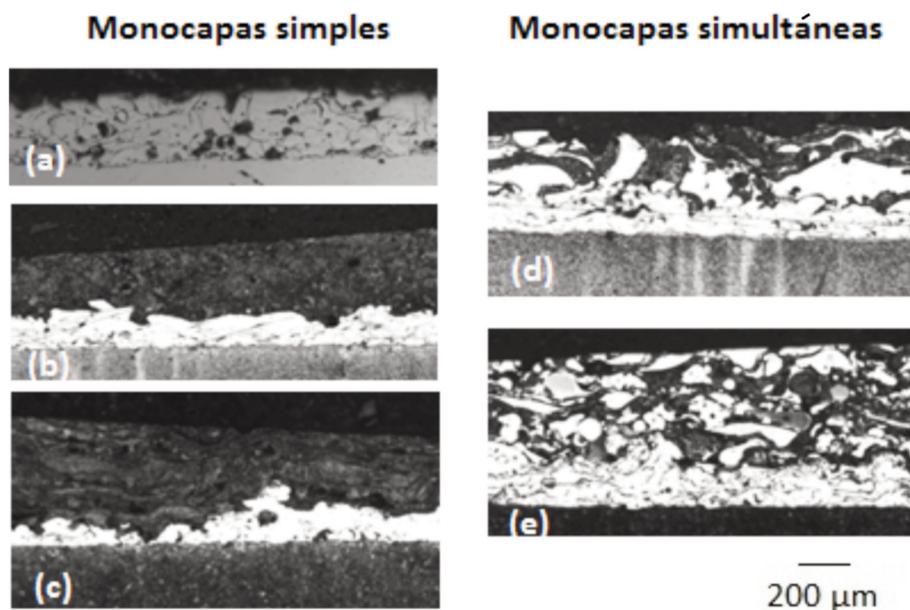
Figure 4. XRD spectra of the coatings produced.

Los recubrimientos monocapa simple de 530AS y monocapa simultánea con materiales disimiles 140MXC-530AS presentan la estructura BCC del hierro alfa con una orientación mixta en los planos (110), (200), (220), (310) y (310). También se puede observar que la muestra 140MXC-530AS tiene menos intensidad de la señal alrededor de  $45^\circ$  que la de 530AS en monocapa; este efecto posiblemente es debido a la mezcla de señales provenientes de los dos materiales. El difractograma encontrado para el 530AS coincide con otras investigaciones hechas con acero de bajo carbono depositado mediante arco eléctrico como la de Edrisy *et al.*<sup>[20]</sup>. Por otro lado, la muestra de 560AS presentó hierro alfa BCC con cromo como solución sólida con composiciones distribuidas aleatoriamente en los planos (110) (200) (211) (220) que coincide con los resultados de Jin *et al.*<sup>[7]</sup>. Las intensidades de estas señales disminuyen con la adición del alambre 140MXC en el recubrimiento.

La figura 5 muestra en Microscopía óptica la sección transversal de las arquitecturas realizadas. Las estructuras obtenidas se diferenciaron mediante ataque químico con Nital para el 530AS y Vilella para el 560AS; de esta forma se facilita la observación de “splats” y defectos estructurales<sup>[30]</sup>. Sin embargo la

aleación 140MXC no reaccionó con los reactivos tradicionales y se aprecia en las imágenes con color blanco. En la figura 5 (a) se observa la monocapa de la aleación 140MXC; se pueden distinguir defectos superficiales e internos (áreas vistas de color negro por ausencia de material) así como microporos. Ahora bien, en las figuras (d) y (e) se presentan las monocapas simultáneas, en donde se puede apreciar la mezcla de los dos materiales depositados y una disminución apreciable de defectos, el 140MXC de color blanco y el material aleante de color negro. Finalmente en las figuras (b) y (c) se observan las monocapas del 530AS y 560AS respectivamente; ambos materiales se aprecian compactos, homogéneos, sin vacíos, óxidos de color más oscuro entre “splats” y partículas sin fundir vistas como elementos redondeados.

En la tabla I se aprecia la composición química de los recubrimientos tomada mediante sonda EDX en Microscopía electrónica de barrido (MEB). En la composición química del acero al carbono y del inoxidable en las monocapas simultáneas están presentes algunos elementos aleantes del alambre 140MXC. Esto es debido a que los elementos aleantes del 140MXC se encuentran en polvo, y por tanto se favorece la distribución aleatoria de éstos durante la pro-



**Figura 5.** Micrografías a 45X de los recubrimientos depositados: (a) recubrimiento 140MXC, (b) recubrimiento 530AS, (c) recubrimiento 560AS, (d) recubrimiento 140MXC-530 y (e) recubrimiento 140MXC-560.

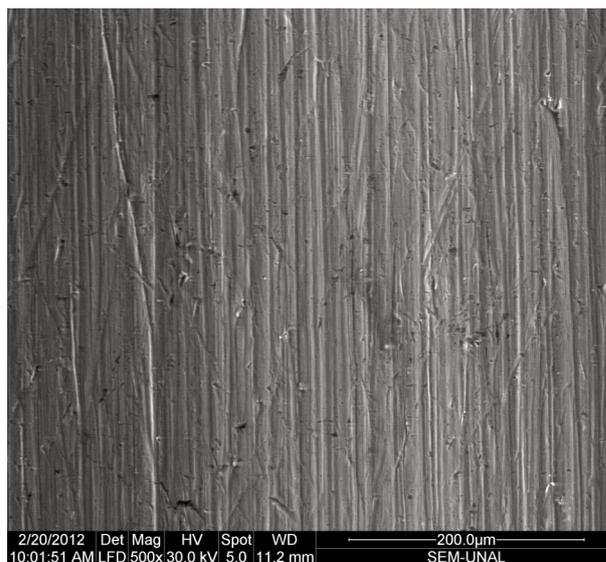
*Figure 5. Micrography at 45X of the coatings produced: (a) 140MXC coating, (b) 530AS coating, (c) 560AS coating, (d) 140MXC-530 coating and (e) 140MXC-560 coating.*

yección. En estas monocapas simultáneas fueron obtenidas mezclas de los alambres, también conocidas como pseudoaleaciones o aleaciones parciales<sup>[31 y 32]</sup>.

La tabla II muestra los resultados de dureza y del ensayo de desgaste con arena seca y rueda de caucho, sobre los recubrimientos producidos. En general, se puede observar que la dureza es directamente proporcional a las tasas de desgaste. La mejor resistencia al desgaste se observó en los recubrimientos depositados con el alambre 140MXC. También se observa que en las monocapas 140MXC - 530AS y 140MXC - 560AS el desgaste es menor que en los recubrimientos monocapa 530AS y 560AS en proporción de cuatro y dos veces respectivamente. Por otro lado, los valores de dureza experimentales concuerdan bien con los obtenidos en la literatura, por ejemplo en el recubrimiento 140MXC que posiblemente está formado por diferentes compuestos duros, como CrC con dureza de 9 a 12 GPa<sup>[33]</sup>, Fe7Mo6 con dureza de 8 GPa<sup>[34]</sup>, el FeNb con dureza de 10 a 14 GPa<sup>[35]</sup>, el FeW con dureza de 13 GPa<sup>[36]</sup> o FeB con dureza de 900 a 1.200 GPa<sup>[37]</sup>.

En la figura 6 se presenta la imagen MEB de la superficie desgastada del sustrato AISI/SAE 4340. Se pueden ver rayas paralelas propias del deslizamiento como mecanismo de fallo. Los valores de desgaste y el modo de fallo de este acero están de acuerdo con resultados obtenidos por Hawk y Tylczak<sup>[11 y 12]</sup>, quienes obtuvieron valores de desgaste de  $3,964 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  y  $3,846 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  respectivamente.

En la figura 7 se observa la micrografía MEB del modo de fallo generado sobre la superficie del recubrimiento 140MXC. Se aprecia delaminación y par-



**Figura 6.** Micrografía MEB del desgaste sobre el AISI/SAE 4340. Se observa arado como modo de fallo generalizado.

*Figure 6. SEM images of wear at the AISI/SAE 4340, observing grooving as failure mode.*

tículas aleatoriamente distribuidas con poco desgaste, debido posiblemente a la formación de algún carburo con mayor dureza que los alrededores; en éstos por ser más blandos se generó una mayor velocidad de deslizamiento como modo de fallo.

La figura 8 muestra la huella de desgaste de arado sobre el recubrimiento 560AS.

**Tabla I.** Composición química de la aleación 140MXC y aceros tradicionales 530AS y 560AS producidos en monocapas (M) y monocapas simultáneas (MS). Composiciones tomadas mediante sonda EDX en la superficie del recubrimiento

*Table I. Chemical composition of the 140MXC and steels 530AS and 560AS produced at single layers (S) and simultaneous layers (SL)*

Material de alambre	Recubrimiento	Porcentaje en peso						
		Fe	C	Cr	Mn	W	Mo	Nb
140MXC	M	55 - 61	0 - 3,3	14 - 16		9,7 - 15,3	2,3	3,8 - 5,5
530AS	M	84,6 - 86	0,18 - 0,6		0,7 - 2			
560AS	M	80,4		14,5 - 15,3				
140MXC	MS	54,1 - 63	0 - 3,4	12 - 15,3		13 - 15,3	2,3 - 3,2	3,8 - 5
530AS	MS	80 - 86	0 - 0,14	0 - 2	0,7			0,5
140MXC	MS	70		15 - 18		5 - 12	1,2	2,8
560AS	MS	81 - 82		13 - 14				0,3

**Tabla II.** Resultados de desgaste: monocapas simples (M) y monocapas simultáneas (MS)

*Table II. Wear results of single layers (S) and simultaneous (SL)*

Muestra	Recubrimiento	K (mm <sup>3</sup> /Nm)	Dureza (GPa)
M	140MXC	1,8755 x10 <sup>-4</sup>	8,50 - 10,35
MS	140MXC - 530ASAS	3,3375 x10 <sup>-4</sup>	2,79 - 10,35
MS	140MXC - 560AS	4,07234x10 <sup>-4</sup>	4,31 - 10,31
----	AISI/SAE 4340	4,45435x10 <sup>-4</sup>	3,50 - 5,00
M	560AS	7,41502x10 <sup>-4</sup>	3,50 - 5,00
M	530AS	13,63801x10 <sup>-4</sup>	2,50 - 3,10

Se pueden observar defectos de diámetro promedio de 50 µm, los cuales posiblemente se generaron por el desprendimiento de partículas sin fundir durante el ensayo de desgaste. Por su parte la figura 9 muestra la topografía de fallo de la superficie del recubrimiento 530AS, en donde se observan pequeños surcos de arado, deformación e indicios de indentación, eventos propios de la rodadura como modo de fallo sobre materiales blandos. La indentación profunda y deformación plástica es causada por una elevada presión de contacto generada por la aguda geometría de los cristales de arena, que transmiten la fuerza de con-

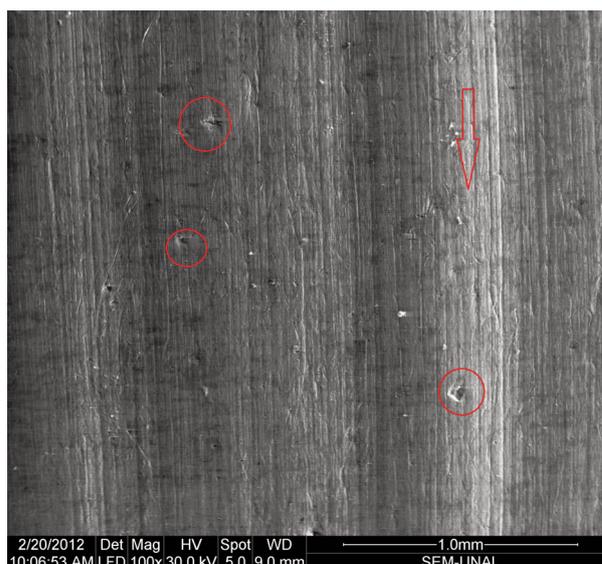
tacto normal entre la rueda de caucho y el recubrimiento ensayado.

En general se observa que el mecanismo de fallo cambia progresivamente desde arado en el AISI 4340 hasta rodadura en el recubrimiento 530AS. El cambio en el modo de fallo está acompañado de la disminución de la dureza. Sin embargo no es posible establecer que la dureza es el único factor que afecta las tasas de desgaste debido a las diferentes microestructuras y composiciones químicas que se producen en estos materiales. Otros factores que pueden influenciar el modo de fallo son: presencia y cantidad de impurezas, tratamiento térmico, porcentaje de porosidad, adhesión y porcentaje de óxidos entre otras propiedades de recubrimientos y materiales masivos.



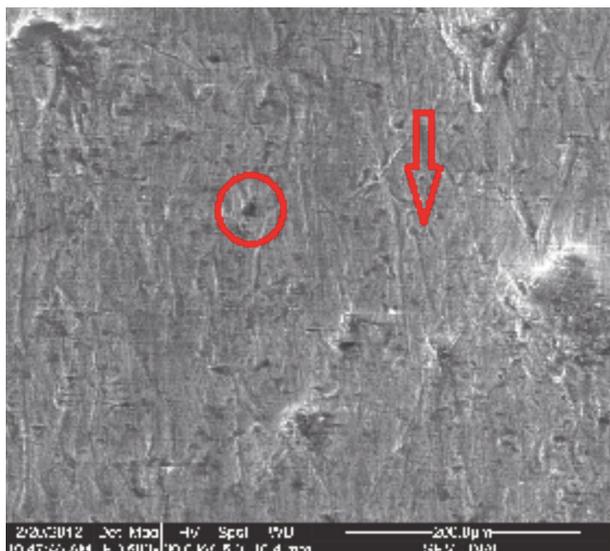
**Figura 7.** Micrografía MEB de la superficie de desgaste de la aleación 140MXC. Se observa delaminación y partículas sin desgastar, alrededor de ellas arado como modo de fallo.

*Figure 7. SEM Picture of wear surface of 140MXC, observing delamination and no wear particles around them grooving as a failure mode.*



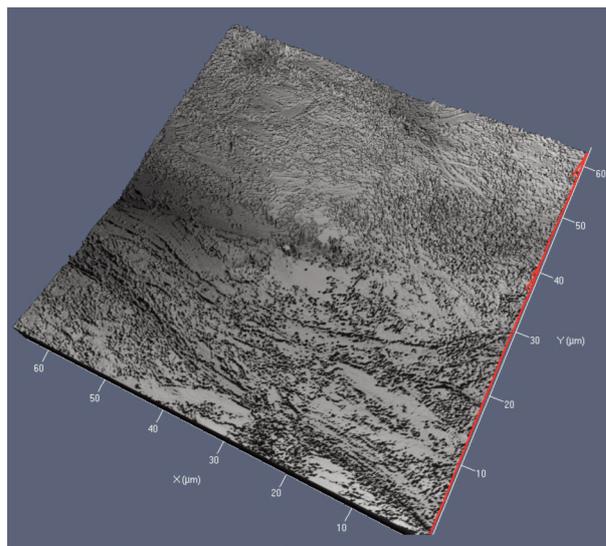
**Figura 8.** Micrografía MEB de la superficie de desgaste del recubrimiento 560AS.

*Figure 8. SEM images of wear surface of 560AS coating.*



**Figura 9.** Micrografía MEB de la superficie del recubrimiento 530AS después del ensayo de desgaste.

*Figure 9. SEM images of wear surface of 530AS after wear test.*



**Figura 10.** Micrografías con Microscopía láser confocal en 1.000X de monocapa simultánea 140MXC - 530AS.

*Figure 10. Laser confocal microscopy at 1000X of 140MXC - 530AS simultaneous layer.*

En la figura 10 se aprecia la imagen con Microscopía láser confocal de los recubrimientos 140MXC - 530AS. Se aprecia modo de fallo similar al encontrado sobre las monocapas de 140MXC, desgaste predominantemente por arado alrededor de partículas con menor desgaste y zonas reducidas con marcas de rodadura como modo mixto de fallo, esto debido posiblemente al grado de mezcla o pseudoaleación alcanzado.

#### 4. CONCLUSIONES

Se han realizado recubrimientos a base de aceros, mediante mezclas de aleaciones comerciales de 140MXC, 530AS y 560AS. A continuación se presentan las principales conclusiones de este trabajo:

- Se encontró la mejor resistencia al desgaste en los recubrimientos 140MXC, posiblemente debido a sus altos valores de dureza; sobre estos recubrimientos fue generado el arado como modo de fallo.
- Los recubrimientos de 530AS se caracterizaron por presentar las más altas tasas de desgaste, lo cual es coherente con las bajas propiedades mecánicas del material. Sobre la superficie desgastada de estos recubrimientos se observa la formación de rodadura como modo de desgaste.

En los recubrimientos disimiles (140MXC - 530AS y 140MXC - 560AS) se mejoró la resistencia al desgaste de los recubrimientos de acero de bajo carbono e inoxidable, esto debido posiblemente a la formación de pseudoaleaciones que mejoran las propiedades mecánicas de los aceros y se favorece el arado como modo de fallo.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias por el apoyo económico en el marco del proyecto “Resistencia a la corrosión y al desgaste de recubrimientos para aplicaciones en la industria naval aplicados por la técnica de proyección térmica”, Contrato 728.

#### REFERENCIAS

- [1] S. Deshpand, S. Sampath y H. Zhang, *Surf. Coat. Tech.* 200 (2006) 5.395-5.406.
- [2] A. Newbery y P. Newbery Grant, *J. Mater. Process. Tech.* 178 (2006) 259-269.
- [3] A. Rabiei, *Mater. Sci. Eng.* 269 (1999) 152-165.
- [4] J. Davis, *Handbook of thermal spray technology*, ASM International, EE.UU., 2004, p. 329.

- [5] J. Davis, *Handbook Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, Vol. 1, ASM International, EE.UU., 1990, p. 2.251.
- [6] Praxair Surface y Tafa Incorporated Praxair and Tafa 140 MXC tm Nano composite Wire, 2006, p. 1.
- [7] G. Jin, *Surf. Coat. Tech.* 201 (2007) 5.261-5.263.
- [8] A. Edrisy, *Surf. Coat. Tech.* 146-147 (2001) 571-577.
- [9] A. Edrisy y A. Alpas, *Thin Solid Films* 420-421 (2002) 338-344.
- [10] *G65 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*, ASTM, 2010, p. 12.
- [11] J. Tylczak, *Wear* 225-229 (1999) 10.
- [12] J. Hawk, *Wear* 225-229 (1999) 1.031-1.042.
- [13] R. Trezona, D. Allsopp y I. Hutchings, *Wear* 225-229 (1999) 205-215.
- [14] S. McCartney, *Wear* 267 (2008) 9.
- [15] K. Al-Rubaie, H. Goldenstein y J. Biasoli de Mello, *Wear* 225-229 (1999) 163-173.
- [16] M. Jones, *Wear* 251 (2001) 1.009-1.016.
- [17] A. Horlock, *Mater. Sci. Eng.* 336 (2002) 88-98.
- [18] L. Bourithis y G. Papadimitriou, *Wear* 258 (2005) 1.775-1.786.
- [19] G. Gore, *Wear* 203-204 (1997) 544-563.
- [20] A. Edrisy, *Wear* 251 (2001) 1.023-1.033.
- [21] A. Edrisy, *Tribology and Interface Engineering Series* 41 (2003) 5.
- [22] C. Eutectic, Technical data ARC 530 Wire, 2008, p. 1.
- [23] C. Eutectic, Technical data ARC 560 Wire (2007), p. 1.
- [24] M. Mellali, *J. Therm. Spray Techn.* 6 (1997) 217-227.
- [25] Y. Wang Y, C. Li, y A. Ohmori, *Thin Solid Films* 485 (2005) 141-147.
- [26] K. Patel, *Surf. Coat. Tech.* 204 (2010) 3.567-3.572.
- [27] M. Bautista, *Rev. Instituto Colombiano de Geología y minería -INGEOMINAS Bogotá*, (2010) 2.
- [28] ASTM C 778 - 06 Standard Specification for standard sand ASTM, 2006, p. 4.
- [29] L. Dimaté, J. Olaya, E. López Covaleda y J. Morales, *Rev. Escuela Colombiana de Ingeniería Colombia* 79 (2011) 7-14.
- [30] ASTM E407 - 07 Standard practice for microetching Metals and Alloys ASTM, 2007, p. 23.
- [31] B. Shaw, A. Leimkuhler y P. Moran, *Testing of metallic and inorganic coatings*, vol. 947, Eds. B. William, A. George, Pennsylvania, EE.UU., 1987, pp. 246-264.
- [32] V. Pokhmurs'kyi y I Dovichnyk, *Mater. Sci.* 38 (2002) 3.
- [33] V. Protsenko, *Int. J. Refrac. Met. H. Mater.* 31 (2012) 281-283.
- [34] T. Murakami, *Tribol. Int.* 43 (2010) 2.183-2.189.
- [35] J. Yang, *J. Alloy Compd.* 242 (1996) 153-156.
- [36] N. Tsyntsaru, *Surf. Coat. Tech.* 203 (2009) 3.136-3.141.
- [37] A. Lovas, L. Kiss y F. Sommer, *J. Non-Cryst. Solids* 192-193 (1995) 608-611.