

# Propiedades tribológicas de recubrimientos de $\text{Cr}_x\text{O}_y$ depositados mediante proyección térmica sobre latón

<sup>1a</sup>Williams Hincapie Campos, <sup>1b</sup>Jhon Jairo Olaya, <sup>2c</sup>J. E Alfonso

<sup>1</sup>Grupo de Investigación de Análisis de Fallas, Integridad y Superficies, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

<sup>2</sup>Grupo de Ciencia de Materiales y superficies, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

<sup>a</sup>wshincapiec@unal.edu.co, <sup>b</sup>jjolayaf@unal.edu.co, <sup>c</sup>jealfonsoo@unal.edu.co

## Resumen

En este trabajo se estudió la influencia del método de preparación superficial sobre propiedades tribológicas de recubrimientos de  $\text{Cr}_x\text{O}_y$  fabricados con el sistema de proyección térmica con llama sobre sustratos de latón. Las superficies de los sustratos fueron preparadas por granallado con arena, granallado metálico con partículas de alúmina y por disco abrasivo. Los análisis de composición química se realizaron mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y el análisis estructural se realizó mediante difracción de rayos X (DRX). La resistencia al desgaste abrasivo se evaluó con un sistema de tres cuerpos bajo la norma ASTM G65 y el coeficiente de fricción se determinó por medio de la prueba de bola sobre disco. La morfología de las huellas de desgaste fue caracterizada mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía laser confocal. En general, los resultados muestran que los recubrimientos depositados sobre la superficie granallada mejoraron la resistencia a la abrasión del sustrato y que los mecanismos de desgaste se producen por deformaciones plástica y abrasiva.

## Abstract

In this work was studied the influence of surface preparation on tribological properties of  $\text{Cr}_x\text{O}_y$  coatings, deposited via flame thermal spray on brass substrates. The substrate surfaces were prepared by sand blasting, shot blasting with alumina particles of metal and abrasive disc. The chemical composition analysis was performed using X-ray fluorescence (XRF) and structural analysis was performed by X-ray diffraction (XRD). The abrasive wear resistance was evaluated by a three-body system on the ASTM standard G65 and the friction coefficient was determined by the ball-on-disk test. The morphology of the wear track was characterized by scanning electron microscopy (SEM) and confocal laser microscopy. Overall, the results show that the coatings deposited on the sandblasted surface improved the abrasion resistance of the substrate and that the wear mechanisms are produced by plastic deformation and grinding.

## Palabras clave:

Proyección térmica, desgaste abrasivo, coeficiente de fricción, deformación plástica.

## Keywords:

Thermal spraying, abrasive wear, friction coefficient, plastic deformation.

## Introducción

En la actualidad la ciencia de materiales tiene como uno de sus objetivos mejorar el desempeño y rendimiento operativo de los componentes mecánicos que sufren diversos tipos de fallas en su superficie, debido a diferentes tipos de desgaste a los que están expuestos, los cuales afectan la vida útil de los componentes (Prchlik et al., 2001; Ruff, 1992). Para ayudar a prevenir este tipo de fallas existen múltiples técnicas de recuperación y protección superficial. Una de ellas, frecuentemente utilizada en la recuperación de piezas en operaciones a campo abierto y en condiciones químicamente agresivas, es la proyección térmica por llama, ya que el equipo empleado es sencillo de transportar y de operar, básicamente debido a que estos equipos no necesitan de fuentes de potencia externa. Además esta técnica de proyección es económica y con ella se pueden depositar un extenso número de materiales, entre los que se encuentran compuestos cerámicos como

por ejemplo el  $\text{Cr}_x\text{O}_y$  (González et al., 2007), material que al ser usado como recubrimiento permite la recuperación dimensional de piezas costosas y/o aumentar la vida útil de las mismas ya que las protege y les confiere nuevas propiedades. Una de las características más importante de los recubrimientos de  $\text{Cr}_x\text{O}_y$  es tener un elevado punto de fusión alrededor de (2435 °C), lo que permite aplicarlo en ambientes donde se requieren altas temperaturas, además presentan una buena resistencia a la abrasión, estas dos características combinadas permiten una gran gama de aplicaciones (Cellard et al., 2009; Kim et al., 2004). Los recubrimientos de  $\text{Cr}_x\text{O}_y$  han sido depositados por diferentes técnicas (Yang, et al., 2012), entre las que se encuentra la proyección térmica. Por ejemplo, en el trabajo de Diamante (Dimaté et al., 2011), se lograron depositar recubrimientos de óxido de cromo por proyección térmica por llama, en este trabajo se estudió la

resistencia a la corrosión de los recubrimientos, concluyendo que estos recubrimientos son una alternativa viable para ser aplicados en la industria naval. Paralelamente, en la literatura científica se encuentran trabajos donde han evaluado la resistencia al desgaste con diferentes técnicas. (Cellard et al., 2009) desarrollaron un estudio para la resistencia al desgaste del  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . En el estudio se enfocaron en comparar el tamaño del polvo entre micrómetros con nanómetros. El mecanismo de desgates fue evaluado con la norma ASTM G 133-95. Las conclusiones a las que llegaron fueron, que el  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  con granulometría entre 20-63 $\mu\text{m}$  es el que presenta menor desgaste. Además aclaran que los mecanismos que conducen a una mejora de la resistencia al desgaste siguen siendo complejos. Dando como resultado que se necesitan estudios complementarios sobre la optimización de parámetros de proyección.

El objetivo de ese trabajo es evaluar la influencia de la preparación superficial de los sustratos en la resistencia al desgaste, de los recubrimientos de óxido de cromo  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (Metaceram 25050) depositados sobre latón C46400. Los usos industriales de este tipo de latón son en el área naval, los cuales incluyen, ejes de hélices, herrajes marítimos, accesorios decorativos, sistema de transmisión, torniquetes (Derek et al., 1992). En algunos sustratos se depositó una intercapa usada comercialmente para mejorar la adherencia del sistema (Dimaté et al., 2011), llamada capa base, la cual es una aleación de Ni-11%(Al, Mo), (Proxon 21021). Tanto el recubrimiento de capa base como el de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , se sintetizaron con la técnica de proyección térmica con llama. La composición química se determinó por Fluorescencia de rayos (FRX), se tomaron patrones de difracción de rayos x (DRX) para determinar la estructura cristalina, y la morfología superficial se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Las pruebas de desgaste abrasivo se realizaron con el ensayo de tres cuerpos de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASTM G 65 método B. Los ensayos de desgaste fueron complementados mediante pruebas de desgaste adhesivo usando un sistema de bola sobre disco. Se midió la dureza con ensayos de microdureza Knoop, y se relacionó los valores de dureza con los de desgaste, para determinar los modos de falla en esta investigación (Fang et al., 1998; Gore et al., 1997).

## Procedimiento experimental

### Producción de los recubrimientos

Los sustratos de latón fueron limpiados con acetona para remover contaminantes de la superficie. Luego, las superficies de estas probetas se modificaron para tener tres diferentes rugosidades. Los métodos de preparación superficial fueron: disco abrasivo, granallado por arena y alúmina. Para la preparación por disco abrasivo se usó una pulidora comercial con un disco Disco flap 0,01116 x 0,00217 m con grano 60. Para el método de granallado se utilizó un equipo de granallado maca LAMEF referencia PAL4PI, la diferencia entre los procesos de granallado por alúmina y por arena fue la granulometría que fue de 500 y 100 $\mu\text{m}$ , respectivamente, el tiempo de granallado fue de entre 30 y 45 segundos, a una

distancia de 0,10m y con un ángulo perpendicular. Luego de la preparación superficial y durante la fabricación de los depósitos los sustratos se calientan en un horno eléctrico, entre 70 y 80°C, para reducir el choque térmico entre el sustrato y el depósito, mejorando así la adherencia, además ayuda a mantener la superficie limpia. En este trabajo se usaron probetas de latón circulares con un diámetro de 0,0254 m para los ensayos de bola sobre disco y probetas de 0.0634m de largo, 0,0191m de ancho y 0,0075 m de espesor para los ensayos de desgaste abrasivo. La composición química en peso atómico del sustrato usado es: 61% Cu, 38% Zn, 0.58% Sn, 0,064 Cl, 0,046 P, 0,042Ni y 0,040 Fe. Tanto los recubrimientos de capa base como los de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  fueron depositados con un equipo Castodyn DS 8000 de proyección térmica con llama. Los parámetros de proyección de la capa base fueron: presión de oxígeno 0,4MPa, presión de acetileno 0,07MPa y presión de aire comprimido 0,06MPa. Las distancias de proyección fueron de 0,150m y 0,085m para el recubrimiento y la capa base, respectivamente, que son las distancias sugeridas por el manual técnico de los materiales.

### Caracterización de los recubrimientos

La rugosidad de los sustratos se determinó usando un equipo de la marca Hommel Tesler T 500 calibrado en el estándar DIN 4777 y con un microscopio laser confocal marca Zeiss referencia LSM 700 con un poder de resolución máximo de 250nm y con un aumento máximo de 100X. La composición química de los recubrimientos se determinó con la técnica de fluorescencia de rayos x (FRX) usando un equipo Philips MagixPro PW-2440 equipado con un tubo de Rodio, trabajando a una potencia de 4kW, el análisis químico se realizó con el software IQ, haciendo 11 barridos. Se determinó la estructura cristalina por difracción de rayos x (DRX) usando un equipo X-pert Pro Panalytical operando en modo de haz rasante a 5°, con la línea monocromática  $K\alpha$  del cobre (1,540998Å) trabajando a 45kV y 40mA. Y para observar la morfología superficial se usó un microscopio electrónico de barrido FEI QUANTA 200 en alto vacío operando a un voltaje de 30kV.

La dureza de los recubrimientos se determinó mediante un equipo LECO de referencia M-400-G2 realizando el ensayo Knoop con una carga de 4,903N (500g). En el ensayo de bola sobre disco los recubrimientos se pulieron con varias lijas de carburo de silicio hasta llegar a la lija con tamaño de grano 1000, esto con el fin de homogenizar la superficie. Para este ensayo se usó un tribómetro CETR-UMT-2-110, utilizando una bola de acero para herramientas (100Cr6) con una dureza de 8,179GPa (65Rc) y un módulo elástico de 210 GPa. Los parámetros del ensayo fueron: carga de 3,2N (400 g), velocidad 10 cm/seg, duración de 600s. Para medir el volumen de la huella dejada por el ensayo de desgaste de bola sobre disco, se usó la metodología realizada por (Gee et al., 2003), usando la ecuación 1:

$$V = \frac{\pi * \text{radio de la pista de desgaste (mm)} * (\text{ancho de la pista})^3}{6 * \text{radio de la esfera(mm)}} \quad (1)$$

donde  $V$  es el volumen desplazado, el radio de la pista es de 2 mm y el radio de la esfera de 3,18mm.

La prueba de abrasión a tres cuerpos se realizó bajo la norma G65 parágrafo B, el elemento abrasivo fue arena con una granulometría de 7,707 $\mu\text{m}$  secada en un cuarto con control de temperatura por un día para disminuir la humedad. Para calcular el volumen removido se basó con el estudio hecho por (Hutchings, 1998) y las recomendaciones de (Ruff, 1992), en donde se relacionó la geometría de la huella dejada con el volumen removido.

Para calcular el índice de desgaste o la tasa específica de desgaste  $Q$ , tanto para la prueba de desgaste de bola sobre disco y abrasión a tres cuerpos, se calcula con la ecuación 2:

$$Q = \frac{V}{S * N} \quad (2)$$

donde  $V$  es el volumen removido ya sea en la prueba de desgaste de bola sobre disco o abrasión a tres cuerpos,  $S$  es la distancia recorrida en mm y  $N$  es la carga en Newtons, las unidades del índice de desgaste son ( $\text{mm}^3 * \text{mm}^{-1} * \text{N}^{-1}$ ).

La rugosidad del recubrimiento se midió con el microscopio confocal laser LSM 700 que posee laser de estado sólido de 455nm y 550nm, con potencia máxima de 2mW, resolución horizontal de 667nm y resolución vertical de 290nm. El espesor de los recubrimientos se determinó por medio de microscopía óptica y un analizador de imágenes usando las muestras preparadas en sección transversal.

## Resultados y discusión

### Caracterización microestructural

En la tabla 1 se indica la nomenclatura usada para clasificar los métodos de preparación de las muestras con y sin capa base y los valores de las rugosidades medidas con el rugosímetro y el microscopio confocal, además los espesores medidos con el analizador de imágenes en las probetas cortadas transversalmente. Los valores obtenidos permiten establecer que existen diferentes valores de rugosidad del sustrato debido a la deformación plástica a que fue sometido con el método de preparación. El grado de deformación plástica es una medida de la respuesta de la transferencia del momento entre

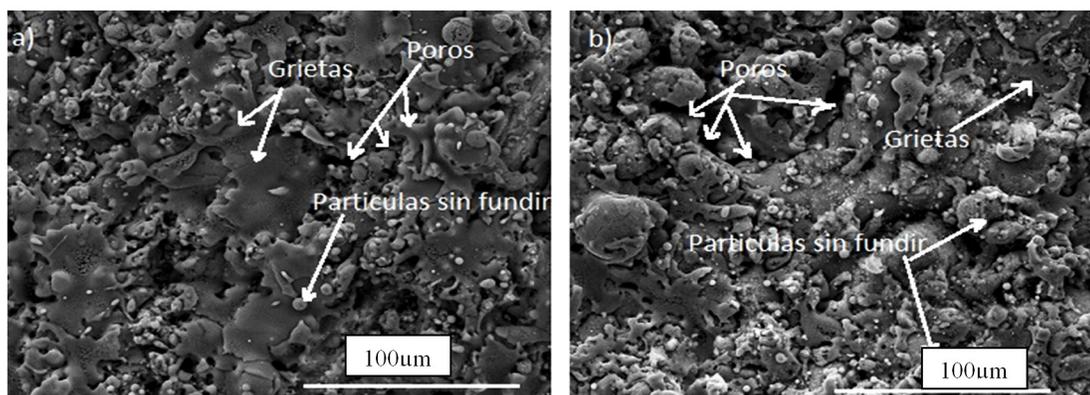
la arena o alúmina proyectada y la superficie del sustrato. En el método de preparación mediante disco abrasivo, el disco deforma la pieza arrancando viruta generando los surcos, donde posteriormente el material proyectado se anclara. La mayor rugosidad se obtuvo en los sustratos preparados por granalla con alúmina. Esto es debido a un aumento de surcos por deformación plástica en el sustrato debido a la alta diferencia de durezas que existe entre la aleación de cobre y las partículas de alúmina. De acuerdo a (Mäkinen et al., 2007) el método de preparación puede afectar la rugosidad y la adherencia (Fukanuma, et al., 2004; Wang et al., 2005).

**Tabla 1.** Nomenclatura de las muestras, y valores de rugosidades y espesores de los sustratos, y recubrimientos producidos.

| Método de Preparación  | Capa base | Nomenclatura | Rugosidad del sustrato $\mu\text{m}$ | Rugosidad recubrimiento $\mu\text{m}$ | Espesor $\mu\text{m}$ |
|------------------------|-----------|--------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Disco abrasivo         | No        | BP           | 4,16( $\pm$ 0,2)                     | 38,94( $\pm$ 1,54)                    | 198,44( $\pm$ 10,15)  |
| Disco abrasivo         | Si        | BBP          | 4,16( $\pm$ 0,2)                     | 86,59 ( $\pm$ 4,22)                   | 296,88( $\pm$ 50,5)   |
| Granallado por arena   | No        | BA           | 4,44( $\pm$ 0,2)                     | 33,59( $\pm$ 1,50)                    | 190,37( $\pm$ 15,15)  |
| Granallado por arena   | Si        | BBA          | 4,44( $\pm$ 0,2)                     | 71,00( $\pm$ 4,37)                    | 293,50( $\pm$ 40,50)  |
| Granallado por alúmina | No        | BG           | 7,56( $\pm$ 0,4)                     | 36,38( $\pm$ 2,35)                    | 190,30( $\pm$ 10,15)  |
| Granallado por alúmina | Si        | BBG          | 7,56( $\pm$ 0,4)                     | 80,05( $\pm$ 4,33)                    | 295,35( $\pm$ 30,13)  |

Las diferencias que se aprecian entre las rugosidades de los recubrimientos con y sin capa adherente, se debe a que en el caso de los recubrimientos sin capa adherente el Metaceram 25050 llegó semi-fundido y fluyó llenando los espacios de la superficie. En el caso de los recubrimientos con capa adherente, ésta fue la que fluyó sobre el sustrato, mientras que el Metaceram se esparció sobre la superficie recubierta con capa adherente, la cual definió la rugosidad.

En las figuras 1a y 1b, se presentan las morfologías obtenidas por MEB de los recubrimientos de Metaceram 25050 con y sin capa adherente, respectivamente. En general se observa que éstos presentan una distribución uniforme de las hojuelas que los constituyen. En los recubrimientos con capa adherente se puede observar que cambia la textura de la su-



**Figura 1.** Micrografía por microscopio de barrido de los recubrimientos (a) BP (b) BBP.

perficie, ya que hay una mayor presencia de partículas sin fundir, lo cual deja una mayor rugosidad en estas muestras. También se aprecian grietas en los recubrimientos posiblemente debido a la contracción de las partículas en el momento de solidificarse, presentándose en mayor medida en el recubrimiento BP, la causa puede deberse a la diferencia de coeficientes de dilatación. Finalmente se puede ver la presencia de algunos poros, que son defectos típicos de este tipo de recubrimientos. Por otro lado, los recubrimientos BBP, preparados para el ensayo de bola sobre disco, se desprendieron al momento de hacer el depósito. Lo que no sucedió en las muestras preparadas para el ensayo de abrasión a tres cuerpos: esto permite establecer que el área de proyección es determinante en esta técnica.

### Análisis químico y estructural

En la tabla 2 se muestra la composición química por FRX de los elementos más representativos de las muestras. Los resultados muestran un contenido de cromo más alto en los recubrimientos con capa base que aquellos sin capa base. Esto debido a que posiblemente la capa base permitió que un mayor número de partículas del recubrimiento de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  se anclaran a la superficie del sustrato. Se puede ver que el valor del Cu en la muestra BG es de 15% y en la muestra en polvo es de 0,74%, la diferencia en la composición se debe a que la fluorescencia de rayos X provienen tanto del sustrato como del recubrimiento.

Tabla 2. Composición química de diferentes muestras

| Elemento<br>Muestra | Cr<br>(%wt) | Cu<br>(%wt) | Pb<br>(%wt) | Sn<br>(%wt) |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Polvo               | 97,92       | 0,74        | 0,30        | 0,09        |
| BG                  | 80,33       | 15          | 1,52        | 1,54        |
| BBG                 | 92,44       | 0,054       | -----       | 0,22        |

En la figura 2a), se aprecian los picos principales del  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  obtenidos por difracción de rayos x, para la muestra en polvo el recubrimiento BG, y el recubrimiento BBG. La indexación se realizó con la carta JCPDS 00-38-1479, que coincide con la carta usada en otras investigaciones (Chris-

toph et al., 2007; Gang et al., 2012; Wang et al., 2008). El  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  tiene la estructura del corindón (Hexagonal Compacta), que pertenece al grupo espacial R-3c. Y los parámetros de red calculados son  $a = 4,96\text{Å}$ ,  $c = 13,59\text{Å}$ ,  $c/a = 2,74$ . Esta estructura cristalina presenta átomos de oxígeno en una celda unitaria hexagonal compacta (HCP) y los átomos de cromo ocupan dos terceras partes de los sitios octaédricos. En este tipo de estructura, hay tantas posiciones intersticiales octaédricas como átomos en la celda unidad. No obstante, debido a que el cromo tiene una valencia +3 y el oxígeno -2, sólo puede haber dos iones  $\text{Cr}^{3+}$  por cada tres iones  $\text{O}^{2-}$  para mantener la neutralidad eléctrica. Por esto, los iones de cromo pueden ocupar sólo dos tercios de las posiciones octaédricas de la red HCP, ocasionando una cierta distorsión de esta estructura.

En la figura 2b) se muestra el pico en la posición  $2\theta=33,65^\circ$  que corresponde al plano (1 0 4) del recubrimiento, se puede observar que existe un corrimiento del pico del recubrimiento BG respecto a la muestra en polvo. Esto se puede deber a dos razones; la primera a la presencia de esfuerzos residuales, y la segunda a un error instrumental. Para determinar la causa del corrimiento, se usa la metodología descrita por Cullity y colaboradores (Cullity et al., 2001), quienes calculan la deformación unitaria a partir de la ecuación 3. Si el resultado es menor a 0,1%, el corrimiento es debido a un error experimental, en caso de que el valor sea mayor a 0,1% el corrimiento se debe a la presencia de un esfuerzo residual que puede ser a tensión o a compresión, dependiendo del signo del resultado.

$$\varepsilon = \frac{d_n - d_0}{d_0} \times 100\% \quad (3)$$

En la ecuación 3  $d_0$  es la distancia interplanar para el material en polvo y  $d_n$  es la distancia interplanar para el recubrimiento, si  $d_n > d_0$  el esfuerzo es por tensión y si  $d_n < d_0$  el esfuerzo es por compresión. La distancia interplanar se calcula por medio de la ley de Bragg. Los valores calculados son  $d_0 = 2,662 \text{Å}$  y  $d_n = 2,666 \text{Å}$ . Con estos valores el resultado

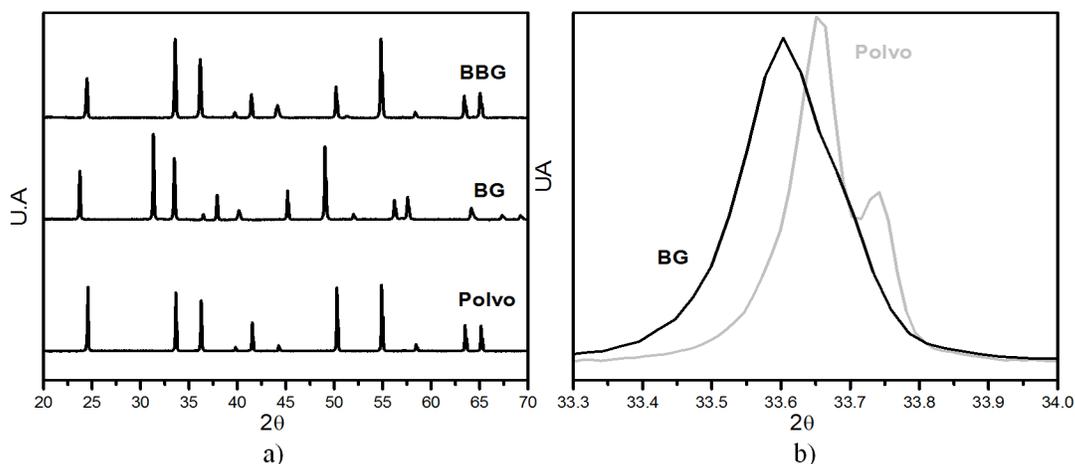


Figura 2. a) Difracción de rayos x para muestras en polvo, BG y BBG. b) Corrimiento de pico BG

fue  $\varepsilon=0.139\%$ , valor que indica la existencia de esfuerzos residuales de tensión. Resultado que difiere con el estudio de (Yang et al., 2012), quienes obtuvieron esfuerzos a compresión.

### Propiedades mecánicas

En la tabla 3, se muestra la relación de la dureza con el tamaño de grano que se calculó con la fórmula de Debye-Scherrer (Íbrahim et al., 2010). Estos resultados permiten establecer que, dependiendo del método de preparación de la superficie del sustrato, los recubrimientos tienen diferentes valores de dureza: los preparados con capa base tienen valores inferiores a la dureza del sustrato, los recubrimientos BP y BA, presentaron durezas con un 64 y 113% mayores a las del sustrato, respectivamente. Es importante resaltar que en todos los recubrimientos no se aprecia que se cumpla con la relación Hall-Petch, es decir que exista una relación entre el tamaño de grano y la dureza, (Schjötz, 2001).

Tabla 3. Relación entre tamaño de grano y dureza de los sustratos

| Muestra  | Tamaño de grano nm     | Dureza MPa            |
|----------|------------------------|-----------------------|
| Sustrato | -----                  | 1608( $\pm 41$ )      |
| Polvo    | 268,60( $\pm 9,69$ )   | 8179*                 |
| BP       | 106,15 ( $\pm 12,73$ ) | 2638 ( $\pm 216,89$ ) |
| BBP      | 135,90( $\pm 15,34$ )  | 1510( $\pm 121,09$ )  |
| BA       | 138,26( $\pm 13,57$ )  | 3432 ( $\pm 304,11$ ) |
| BBA      | 124,38( $\pm 11,85$ )  | 1510( $\pm 103,39$ )  |
| BG       | 143,02( $\pm 10,60$ )  | 745,51( $\pm 16,09$ ) |
| BBG      | 141,93( $\pm 9,68$ )   | 1216( $\pm 38,25$ )   |

\* valor teórico

En otros estudios determinaron una relación entre la porosidad de los recubrimientos y la dureza. En el estudio de (Sarikaya, 2005), ellos proyectaron sobre sustratos de acero y al medir la dureza y contrastarla con la rugosidad del sustrato llegaron a la conclusión que a mayor rugosidad menor dureza; lo que incrementa la porosidad, en consecuencia existe un decremento de la dureza. En este trabajo no se observó este comportamiento, posiblemente debido a que el sustrato al ser de latón tiene una mayor ductilidad que el acero lo que produce que el sustrato ceda mecánicamente en el momento del depósito y la superficie sufre modificaciones.

### Pruebas de desgaste por abrasión

En la tabla 4, se muestra el tasa de desgaste Q medido a través del volumen desplazado, tomando como referencia el estudio de (Hutchings, 1998), y las indicaciones de la Ruff (1992), donde relacionaron el tamaño de la huella con la geometría de la huella dejada. Paralelamente, para poder analizar la tabla 4, se necesita determinar el proceso o modo de desgaste presente en la prueba de abrasión. Para esto se siguió la metodología implementada por (Fang et al., 1998; Gore et al., 1997), quienes trazaron una gráfica con los datos de dureza en el eje x y los de volumen desplazado en el eje y. Cuando hay una alta contribución de desgaste abrasivo

vo la curva muestra una forma de S variando con la dureza, sin embargo cuando no presenta esta forma el proceso de desgaste presente es adhesivo. En la figura 4, se muestra la gráfica donde se relaciona la dureza con el volumen desplazado y se aprecia que tiende a formar una S, confirmando que el desgaste presente fue abrasivo. El índice de desgaste fue menor en todas las muestras de modo que para este tipo de ensayo los recubrimientos servirían para aumentar la vida útil de los sustratos.

Tabla 4. Volumen y tasa de desgaste prueba de abrasión a tres cuerpos

| Muestra  | Volumen desplazado (mm <sup>3</sup> ) | Q (mm <sup>3</sup> *mm <sup>-1</sup> *N <sup>-1</sup> ) |
|----------|---------------------------------------|---|
| Sustrato | 186,96( $\pm 15,74$ )                 | 1,00x10 <sup>-6</sup>                                   |
| BP       | 142,62( $\pm 29,97$ )                 | 7,63x10 <sup>-7</sup>                                   |
| BBP      | 147,01( $\pm 21,51$ )                 | 7,87x10 <sup>-7</sup>                                   |
| BG       | 182,05( $\pm 20,71$ )                 | 9,75x10 <sup>-7</sup>                                   |
| BBG      | 39,69( $\pm 19,60$ )                  | 2,12x10 <sup>-7</sup>                                   |

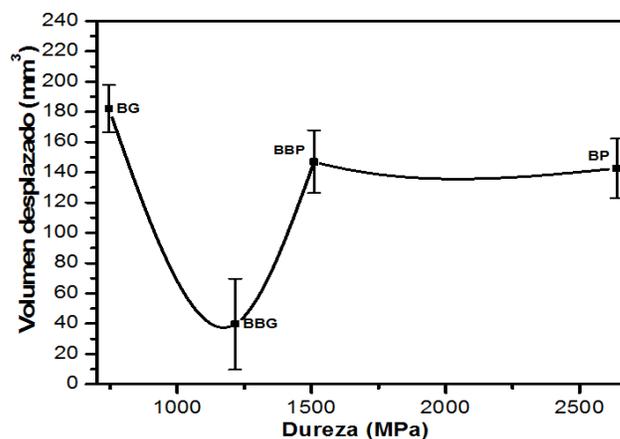


Figura 4. Gráfica de Dureza contra volumen desplazado

En la figura 5, se muestra la imagen MEB de la huella de desgaste por el ensayo de abrasión para las probetas BP y BG. En general se aprecian surcos o ranuras que de acuerdo con (Gore et al., 1997), a mayor distancia entre los surcos de la huella en la superficie, el material es más blando; en cambio, una menor distancia entre los surcos, implica alta contribución del mecanismo de desgaste por abrasión, generando un "arado".

Se puede apreciar en la figura 5, que las huellas del recubrimiento BP están más juntas entre sí, comparadas con las huellas del recubrimiento BG. Relacionando estos resultados con los expuestos en la figura 3, los recubrimientos que presentaron menor dureza muestran la presencia del desgaste abrasivo debido a que puede ser deformados plásticamente, es decir presentar las huellas de desgaste se encuentran más separadas. Al contrario cuando la dureza del recubrimiento es mayor, y debido a su estructura cristalina la cual tiene tres sistemas de deslizamiento, dificultan los mecanismos de deformarse plásticamente que favorecer huellas más juntas entre sí.

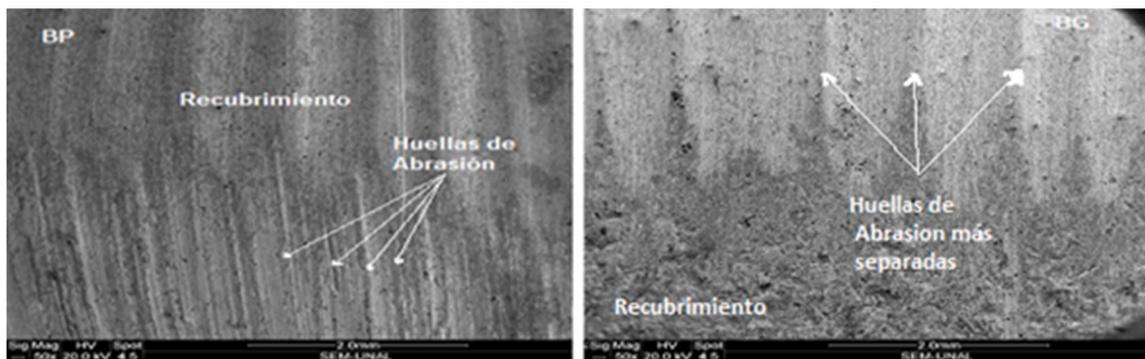


Figura 5. Micrografías MEB de las huellas del desgaste abrasivo a tres cuerpos

Por otro lado, (Nohava, 2009) mostró que este ensayo se puede usar para predecir la adhesión y/o cohesión del recubrimiento. Concluyo que a menor volumen removido, menor falla por cohesión/adhesión, de manera tal que el recubrimiento BG posiblemente tiene mejor adherencia/cohesión. Paralelamente (Wang et al., 2005) reportó que a mayor rugosidad del sustrato mejor es la adherencia del depósito.

### Prueba de desgaste por bola sobre disco

En la tabla 5, se consignan los resultados del ancho de huella (b), volumen desplazado (V), y el índice de desgaste (Q) para esta prueba. Se aprecia que los recubrimientos con capa base presentaron menores tasas de desgaste que el sustrato.

En la figura 6, se muestran las micrografías MEB de las huellas de desgaste del ensayo de bola sobre disco, de diferentes muestras. Se puede apreciar la existencia de regiones con un color gris medio que se señalan en la figura con los recuadros. En estas zonas los “splats” se aplanan como resultado de la deformación plástica durante el ensayo y se extruyen en la dirección de deslizamiento lo que implica deformación plástica y desgaste adhesivo. Las muestras que presentaron este proceso de desgaste en mayor medida fueron las probetas BG y BBP. Otro tipo de desgaste que se presentó fue la abrasión por el proceso de arado, en la figura se denota con los rombos. Esto se debe a que el recubrimiento desprende partículas o “splats” las cuales no se remueven y quedan embebidas en el recubrimiento, generando así un desgaste abrasivo a tres cuerpos, las huellas de los recubrimientos que presentaron este proceso de desgaste son similares a las mi-

crografías obtenidas por (Li et al., 1997), quien estudio las propiedades tribológicas de diferentes aleaciones de bronce al aluminio con este ensayo, y reportó que el desgaste es debido a partículas desprendidas que generaron abrasión a tres cuerpos. Cuanto mayor es el tamaño de los granos abrasivos, más grave es el desgaste abrasivo. Las probetas que presentaron este tipo de desgaste fueron BP, lo cual indica que el recubrimiento se desprendió.

Por último, también se puede apreciar en la figura 6, regiones de color gris oscuro resaltados en círculos, en estas zonas el mecanismo de desgaste fue oxidación. Esto se debe al calentamiento local que sucede en el ensayo, el cual eleva la temperatura en el punto de contacto permitiendo que actúen un proceso de oxidación, en otras palabras en este tipo de desgaste el mecanismo de desgaste no fue por un factor físico, sino por un factor medioambiental con el respectivo aumento de temperatura, debido a la fricción, generando un degradamiento del recubrimiento en estas zonas. Las probetas que muestran en mayor medida estas zonas son BBG y BBP. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por (Edrisy et al., 2001), quienes recubrieron sustratos de aleaciones de aluminio 319 con acero en polvo mediante la técnica de proyección térmica por plasma. En este trabajo se hicieron pruebas de desgaste por bola sobre disco y se observaron las mismas zonas de tonalidad gris oscuro. Mediante análisis de EDS de estas regiones determinaron que estas regiones estaban formadas principalmente por hierro y oxígeno.

En la figura 7, se muestran las imágenes tomadas por microscopía confocal de las huellas de desgaste dejadas por este

Tabla 5. Resultado del ancho de huella, volumen desplazado, tasa de desgaste y COF

| Muestra  | Ancho huella b (μm) | Volumen V (mm <sup>3</sup> ) | Q (mm <sup>3</sup> *mm <sup>-1</sup> *N <sup>-1</sup> ) | Coefficiente de fricción |
|----------|---------------------|------------------------------|---|--------------------------|
| Sustrato | 670,67 (±6,98)      | 0,10(±0,06)                  | 4,23(±0,27) ×10 <sup>-7</sup>                           | 0,138(±0,006)            |
| BP       | 1303,33(±40,55)     | 0,73(±2,70)                  | 3,12(±11,7) ×10 <sup>-6</sup>                           | 0,123(±0,027)            |
| BBP      | 670,00(±33,29)      | 0,10(±0,33)                  | 4,28(±1,41) ×10 <sup>-7</sup>                           | 0,158(±0,040)            |
| BA       | 1006,67(±13,33)     | 0,33(±0,41)                  | 1,43(±1,75) ×10 <sup>-6</sup>                           | 0,140(±0,025)            |
| BBA      | 428,00(±12,29)      | 0,02(±0,03)                  | 1,10(±0,13) ×10 <sup>-7</sup>                           | 0,131(±0,045)            |
| BG       | 970,00(± 23,09)     | 0,03(±0,65)                  | 1,28(±2,78) ×10 <sup>-6</sup>                           | 0,151(±0,051)            |
| BBG      | 541,33(± 38,48)     | 0,05(±0,17)                  | 2,29(±0,33) ×10 <sup>-7</sup>                           | 0,123(±0,036)            |

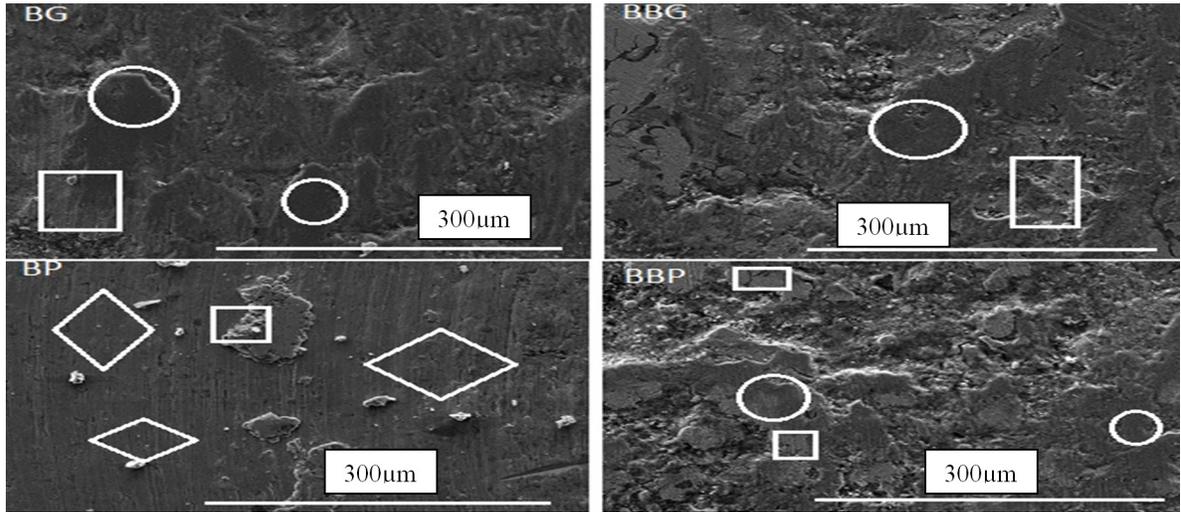


Figura 6. Micrografía ensayo bola sobre disco.

ensayo. Se aprecia la clara diferencia entre las imágenes de los recubrimientos de las probetas BP y BG, lo cual indica que existió un mecanismo de desgaste diferente para cada probeta, en uno existió un proceso de “arado” y en el otro un proceso de oxidación. La probeta BP presenta surcos por donde el recubrimiento se desprendió, debido a su baja adherencia al sustrato. El material desprendido generó abrasión a tres cuerpos entre el sustrato, la esfera y el recubrimiento desprendido. La línea de la rugosidad (línea roja) tiene más picos y valles en la probeta BP, lo que indica que este recubrimiento presentó un proceso de desgaste por abrasión. En los recubrimientos BG se presentó un desgaste adhesivo, muy probablemente debido a que el recubrimiento se deformó plásticamente en dirección del ensayo.

Como se mencionó, los procesos de desgastes adhesivo y abrasivo de los recubrimientos están muy influenciados a la estructura cristalográfica del recubrimiento, ya que ésta determina los sistemas de deslizamiento (Shackelford, 2005), los cuales están determinados por la combinación de planos

y direcciones cristalográficas del movimiento de dislocaciones. Los recubrimientos al tener una estructura HCP presentan tres sistemas de deslizamiento, lo que explica que estos recubrimientos presenten principalmente desgaste abrasivo.

### Conclusiones

En este trabajo se proyectó  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  con y sin una capa base sobre sustratos de latón preparados superficialmente por medio de granallado metálico, granallado por arena y disco abrasivo y se determinó que el comportamiento al desgaste, por la prueba de abrasión a tres cuerpos y bola sobre disco, presentando en mayor medida un desgaste abrasivo. Al relacionar la dureza con la rugosidad del recubrimiento, se evidenció que no existe una tendencia definida, sin embargo, los recubrimientos con capa base tuvieron una tendencia en la que, a mayor rugosidad menor dureza. Se determinó que el método de preparación superficial de la muestra afecta su pérdida de volumen. Los resultados de la prueba de abrasión y desgaste muestran que el depósito de la capa base disminuye el coeficiente de desgaste. Por último, el estudio permitió establecer

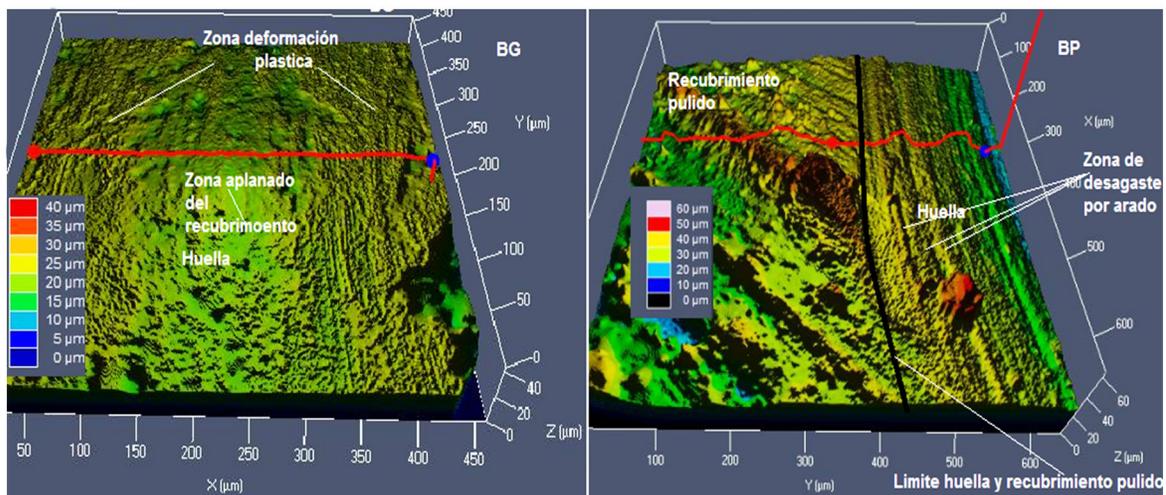


Figura 7. Imágenes de microscopía Confocal de la huella de desgaste del ensayo de bola contra disco

que la capa base, influye en el comportamiento del desgaste ya que las probetas recubiertas con esta capa se deformaron plásticamente.

### Agradecimientos

Los autores de este trabajo expresan su agradecimiento a Colciencias por el apoyo ofrecido mediante el proyecto 201010017860 RESISTENCIA A LA CORROSION Y AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS PARA APLICACIONES EN LA INDUSTRIA NAVAL APLICADOS POR LA TECNICA DE PROYECCION TERMICA, a Cotecmar por el apoyo técnico y a Proymet Ltda por prestar las instalaciones para hacer los recubrimientos.

### Referencias

A. Cellard V, Garnier. G, Fantozzi. G, Baret. P, Fort., “Wear resistance of chromium oxide nanostructured coatings”, Cer Int, 2009, volumen 35, marzo, pp. 913–916.

A.W. Ruff, *Wear Measurement Friction, Lubrication, and Wear Technology*, ASM, Handbook Vol. 18, EE.UU, 1992, pp 687-702.

B.D. Cullity, S. R. Stock., *ELEMENTS OF X-RAY DIFFRACTION*, Prentice Hall 3ra Ed. EE.UU, 2001, pp. 447-450.

Carl Christoph S, Sabine Saaro, Lutz-Michael Berger, Jiri Dubsky, Karel Neufuss, Mathias Herrmann. “Dependence of the Stabilization of  $\alpha$ -Alumina on the Spray Process”, J. Therm Spray Techno., 2007 volumen 16, diciembre, pp. 822-830.

D.W. Kim, S.I. Shin, J.D. Lee, S.G. Oh., “Preparation of chromia nanoparticles by precipitation–gelation reaction”, Mat Let, 2004, volumen 58, mayo, pp. 1894–1898.

Derek E. Tyler, and William T. Black, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM Handbook Vol. 2. EE.UU, 1992, pp 765.

Edrisy, T. Perry, Y.T. Cheng, A.T. Alpas., “Wear of thermal spray deposited low carbon steel coatings on aluminum alloys”, Wear, 2001, volumen 251, octubre, pp., 1023–1033.

G.J. Gore, J.D. Gates., “Effect of hardness on three very different forms of wear”, Wear, 1997, volumen, 203-204, marzo, pp.544-563.

H. Fukanuma, N. Ohno. *A study of adhesive strength of cold spray coatings Thermal spray 2004: advances in technology and applications*: proceedings of the 2004 international thermal spray conference. ASM International, Osaka 2004, pp 329-334.

H. Mäkinen, J. Lagerbom, P. Vuoristo. *Thermal spray. Global Coatings Solutions*, ASM International, Ohio, 2007, pp. 31-36.

I.M Hutchings., “Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach” Trib. Int 1998, volumen 31, enero, pp. 5-15.

İbrahim Y. Erdogan. ö. Gü llü. “Silicon MIS diodes with Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofilm: Optical, morphological/structural and electronic transport properties” Appl Surf Sci 2010, volumen 256, abril, pp. 4185–4191.

J. Schiøtz. *SIMULATIONS OF NANOCRYSTALLINE METALS AT THE ATOMIC SCALE WHAT CAN WE DO? WHAT CAN WE TRUST*, Denmark 2001.

James F.Shackelford. *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*, PEARSON 6a ed. Madrid, 2005, pp., 203 -207.

Jinwen Wang, Arunava Gupta, Tonya M. Klein., “Plasma enhanced chemical vapor deposition of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films using chromium hexacarbonyl (Cr(CO)<sub>6</sub>) precursor”, Thin Solid Films 2008, volumen 516, septiembre 7366-7372.

Jiri Nohava. “Characterization of thermal spray coatings by instrumented indentation and scratch testing: Part I” CSM Instr Adv. Mech. Surf. Test. 2009, pp., 1-4.

Kai Yang, Xiaming Zhou, Huayu Zhao, Shunyan Tao. “Microstructure and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings produced by atmospheric plasma spraying”. Surface & Coatings Technology 2012, volume 206. pp. 2629–2637.

Kai Yang, Xiaming Zhou, Huayu Zhao, Shunyan Tao., “Microstructure and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings produced by atmospheric plasma spraying”, Surf and Coat Tech 2011 volumen 206, diciembre, pp. 1362–1371.

L. Prehlik, S. Sampath, J. Gutleber, G. Bancke, A.W. Ruff, “Friction and wear properties of WC-Co and Mo-Mo<sub>2</sub>C based functionally graded materials”, Wear, 2001, volume, 249, diciembre, pp 1103 –1115.

Laura M Dimaté C. *Resistencia a la corrosión en recubrimientos comerciales 25050 y Proxon 21071 producidos con el sistema de proyección térmica por llama*, Tesis Msc, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2011.

Liang Fang, Qingde Zhou, Qingchun Li., “An experimental simulation of cutting wear in three-body abrasion”, Wear, 1998, volumen, 219, septiembre, pp. 188-184.

M.G. Gee. A. Gant. I. Hutchings. R. Bethke. K. Schiffman. K. Van Acker. S. Poulat. Y. Gachon. J. von Stebut., “Stepwise erosion as a method for determining the mechanisms of wear in gas borne particulate erosion”, Wear, 2003, volumen 255, Agosto-septiembre, pp. 44-54.

Ozkan Sarikaya., “*Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process*”, Surf and Coat Tech., 2005, volumen 190, enero, pp. 388–393.

R. Gonzalez, M. Cadenas, R. Fernandez, J.L. Cortizo, E. Rodriguez , “*Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser*”, Wear, 2007, volumen 262, febrero, pp. 301–307.

Tie-Gang Wang, Dawoon, Jeong, Yanmei Liu, Qimin Wang, Srinivasan Iyengar, Solveig Melin, Kwang Ho Kim, “*Study on nanocrystalline  $Cr_2O_3$  films deposited by arc ion plating: II. Mechanical and tribological properties*”, Surf and Coat Tech., 2012, volumen 20, enero, pp. 2638–2644.

Y.-Y. Wang. C.-J. Li. A. Ohmori, “*Influence of substrate roughness on the bonding mechanisms of high velocity oxy-fuel sprayed coatings*”, Thin Solid Film 2005, volumen 485, agosto, pp. 141-147.

Yuanyuan Li, Tungwai Leo Ngai, Wei Xia., “*Mechanical, friction and wear behaviors of a novel high-strength wear-resisting aluminum bronze*”, Wear, 1996, volumen 197, septiembre, pp., 130-136.