

## **EFFECTO DEL AFILADO DE LA BROCA SOBRE LA RESISTENCIA A LA PERFORACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE $Al_2O_3 - TiO_2$ ELABORADOS MEDIANTE PROYECCIÓN TÉRMICA POR PLASMA ATMOSFÉRICO**

Katherine Aristizabal<sup>1</sup>, Oscar Rojas<sup>1</sup>, Fabio Vargas<sup>2</sup>, Andrés Felipe Díaz<sup>3</sup>, Hélène Ageorges<sup>4</sup>

1: Estudiante de Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

2: Profesor Departamento de Ingeniería de Materiales y Metalúrgica, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

3: Estudiante de Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

4: Profesora Universidad de Limoges. Limoges, Francia.

\* Contacto: katrina058@gmail.com

### **RESUMEN**

Se evaluó el efecto de afilado de la broca sobre la resistencia a la perforación de recubrimientos de alúmina – óxido de titanio, obtenidos mediante proyección térmica por plasma atmosférico. Inicialmente se realizaron ensayos de perforación utilizando brocas de acero de alta resistencia (HSS) nuevas de 8,3 mm de diámetro, las cuales operaron a 360 rpm con una carga de 390N. Cada broca se afiló después de cada ensayo utilizando dos ángulos de afilado en su punta (118° y 135°) y se realizaron nuevamente ensayos de perforación a los recubrimientos, encontrándose que el ángulo con el que se obtiene la menor variación en la profundidad de perforación con respecto a los resultados obtenidos con brocas nuevas es el de 118°. Adicionalmente, se evaluó el perfil de micro-dureza Vickers sobre un corte longitudinal de este tipo de brocas, encontrando pocas variaciones en al menos 7mm medidos desde la punta y hacia su interior. Finalmente, se determinó que al realizar hasta 2 reafilados a las brocas, se obtienen pocas variaciones en las profundidades de perforación después de cada reafilado.

**Palabras Clave:** *Resistencia a la Perforación, Proyección térmica por plasma atmosférico, Recubrimientos cerámicos, Desgaste abrasivo y Dureza*

### **ABSTRACT**

The effect of the drill bit sharp on the drill depth of alumina-titania coatings manufactured by atmospheric plasma spraying was studied. The drilling tests were carried out using High Speed Steel (HSS) drill bits of 8,3 mm in diameter, the applied load and the rotational speed were 390 N and 360 rpm, respectively. In the sharp processes the point drill bit angles were set-off at 118° and 135°. The results indicate that the drill depth produced by a sharpened drill bit with an angle of 118° is similar to that generated using new drill bits. Additionally, the Vickers profile on the axial section of drill bit indicates that its micro-hardness is constant along 7 mm from its point, and then 2 sharps could be realized in each drill bit without affect its drilling ability.

**Keywords:** *Drilling resistance, Atmospheric plasma spraying, Ceramic coatings, Abrasive wear and hardness*

## **1 INTRODUCCIÓN**

Los recubrimientos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{TiO}_2$  elaborados mediante proyección térmica son ampliamente usados para proteger superficies metálicas contra el desgaste, gracias a sus propiedades de alta dureza y resistencia a la abrasión, lo que ha despertado un amplio interés por el estudio de su comportamiento tribológico bajo diferentes tipos de contacto.

Se han encontrado resultados no concluyentes y en ocasiones contradictorios con respecto a la relación entre las propiedades mecánicas medidas a partir de micro-indentación por contacto plástico (entre el indentador y este tipo de recubrimientos) y su resistencia al desgaste determinada principalmente por contacto elástico (entre el recubrimiento y una esfera) utilizando el método de esfera sobre disco. Esto se ha atribuido a que por medio del ensayo de esfera sobre disco se induce en los recubrimientos esfuerzos principalmente compresivos y bajo estas condiciones la porosidad, las grietas y otros defectos que reducen sus propiedades mecánicas pueden tener un efecto insignificante sobre la resistencia al desgaste de estos materiales [1].

Se han realizado algunos estudios con el fin de correlacionar las propiedades mecánicas de los materiales con su resistencia a la perforación. G. Mauvoisin et al. mostraron que la resistencia a la perforación de aceros tratados térmicamente depende principalmente de su dureza, tenacidad, ductilidad y microestructura [2-4]. F. Vargas et al. estudiaron la resistencia a la perforación de recubrimientos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –13% en peso de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –45% $\text{TiO}_2$  elaborados por APS (del inglés proyección térmica por plasma atmosférico) y por FS (proyección térmica por llama); encontrando que la resistencia a la perforación de los recubrimientos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –13% $\text{TiO}_2$  es mayor que la de los de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –45% $\text{TiO}_2$  debido a la presencia de  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  que es una fase más dura que los titanatos de aluminio que conforman los recubrimientos con 45 % de  $\text{TiO}_2$ , y que los recubrimientos elaborados por APS poseen una resistencia a la perforación mayor que los elaborados por FS debido a su estructura mucho más compacta y por ende de mayor resistencia mecánica [1, 5]. C. Palacio et al. estudiaron el efecto de algunos parámetros en la prueba de perforación sobre la resistencia a la perforación de recubrimientos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – $\text{TiO}_2$  elaborados por APS; encontrando que la profundidad de perforación depende del diámetro de la broca y de la carga aplicada (a menor diámetro de broca y mayor carga aplicada, hay mayor profundidad de perforación) [6].

De acuerdo con lo anterior un método alternativo para medir la resistencia al desgaste a partir de la perforación mecánica de su superficie ha sido propuesto [5, 6]. En este método el recubrimiento es puesto en contacto plástico (similar al producido por micro-indentación Vickers) con la punta de una broca de acero rápido que rota a una velocidad constante y bajo el efecto de una carga determinada. Los resultados obtenidos muestran una buena correlación entre las propiedades mecánicas del recubrimiento y su resistencia al desgaste, la cual es inversamente proporcional a la profundidad de perforación. Con el fin de reducir el efecto del desgaste de la broca sobre los resultados obtenidos, se venía utilizando una broca nueva para cada ensayo, no obstante, dada la cantidad de brocas que se tenían que desechar después de cada ensayo, se decidió estudiar el efecto del afilado de la broca, realizado con un afilador de brocas Doctor Drill 750X, sobre la resistencia a la perforación de estos recubrimientos, con el fin de determinar si los

resultados varían con la cantidad de re afilados y proporcionar resultados que propicien el uso repetido de las brocas y así ahorrar costos y contribuir con el medio ambiente.

## 2 METODOLOGÍA

Se trabajó con recubrimientos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -45% $\text{TiO}_2$  elaborados mediante proyección térmica por plasma atmosférico a partir de polvos con dos distribuciones granulométricas para cada composición química. Una de ellas varía entre 5 y 30 micrómetros y la otra entre 15 y 45 micrómetros. El plasma térmico utilizado para la elaboración de estos recubrimientos fue obtenido con una mezcla de argón/hidrogeno cuyo flujo fue de 45/15 L/min. La intensidad de corriente utilizada estuvo en el rango entre 400 a 600 amperios, con una tensión resultante entre 54 y 61 voltios. Antes de la proyección los sustratos de acero al carbono AISI 1040 fueron preparados superficialmente con un chorro de partículas abrasivas a alta presión y limpiados por ultrasonido en un baño de alcohol, con el fin de proporcionar la rugosidad y limpieza necesarias para tener un buen anclaje del recubrimiento. Posteriormente, los sustratos fueron precalentados a 300 °C utilizando el jet de plasma, seguidamente se proyectó un flujo de aproximadamente 30 g/min de cada uno de los polvos, utilizando como gas de arrastre una corriente de nitrógeno que varía entre 5 y 7 L/min. La distancia del sustrato a la antorcha fue de 100mm.

La composición química de los polvos utilizados como materia prima para la elaboración de los recubrimientos fue determinada mediante Fluorescencia de Rayos X por Longitud de Onda Dispersiva utilizando un equipo ARL OPTIM'X-211, mientras que su distribución de tamaño de partícula fue medida por Difracción Láser empleando el equipo Máster Sizer 2000. Las fases presentes en los recubrimientos fueron identificadas mediante Difracción de Rayos X (DRX) utilizando el equipo Panalitycal X'Pert Pro MPD y la base de datos X'Pert HighScore, mientras que la microdureza superficial de cada una de las muestras elaboradas fue determinada por micro-indentación Vickers aplicando una carga de 300 gramos durante 15 segundos y teniendo en cuenta los lineamientos de la norma ASTM C1327-08 [7]. Previo a la realización de los ensayos de micro-indentación Vickers y de perforación, la superficie de los recubrimientos fue pulida hasta tener una rugosidad media (Ra) superficial inferior a 0,2 micrómetros.

Para realizar los ensayos de perforación se emplearon brocas de acero de alta velocidad y alta resistencia (HSS de sus siglas en inglés High Speed Steel) de 8,3 mm de diámetro, así como un taladro de banco dotado con un sistema neumático para controlar la carga aplicada, el cual fue calibrado periódicamente utilizando un resorte del cual se conoce su constante elástica y a partir de la deformación producida a una presión determinada se verificó que la fuerza aplicada al mandril se mantuviera constante en todos los ensayos, para lo cual se aplicó la Ley de Hooke. Para eliminar el efecto del tercer cuerpo (desechos producidos durante las perforaciones), se empleó un jet de aire con una presión de 0,41MPa. Además se le adaptó un comparador de carátula cuya sensibilidad es de 1 micrómetro, con el fin de captar la profundidad de perforación en tiempo real.

Las profundidades de perforación fueron medidas en una mesa nivelada, utilizando un comparador de carátula Mitutoyo IP65 cuya sensibilidad es de un micrómetro y posee una punta

fina con radio de curvatura de 0,1 micrómetro, con el fin de hacer un barrido en la superficie del agujero y reportar el promedio de las mayores profundidades medidas.

El afilado de cada broca se realizó manteniendo un ángulo de 118° y 135° en su punta (que son los ángulos que frecuentemente tiene las brocas nuevas) , empleando una rueda abrasiva de grano #180 y desbastando lo suficiente para eliminar la superficie deteriorada durante su uso en una perforación previa.

### 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 Caracterización de las materias primas

Se presenta la Tabla 1 con la composición química y la distribución del tamaño de partícula de los polvos empleados para la elaboración de los recubrimientos.

**Tabla 1.** Características físico-químicas de los polvos de partida.

Referencia	Materia prima	Código recubrimiento	Composición química (wt. %)*			Distribución de tamaño de partícula (um)**	
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Otros	d10	d90
AT - 13	SG-106 <sup>TM</sup>	A <sub>g</sub> 1026	83,9 ± 0,2	15,3 ± 0,2	0,8	13	41,2
	SG-107 <sup>TM</sup>	A <sub>f</sub> 1014	84,7 ± 0,2	14,3 ± 0,2	1	6,3	22,1
AT -45	SG-108 <sup>TM</sup>	B <sub>g</sub> 904	50,3 ± 0,2	47,7 ± 0,2	2	15,9	39,8
	SG-109 <sup>TM</sup>	B <sub>f</sub> 875	55,2 ± 0,2	43,1 ± 0,2	1,7	8,8	22,3

\* Obtenido por Fluorescencia de Rayos X

\*\* Obtenidos por Difracción Láser

#### 3.2 Caracterización de los recubrimientos

Con el fin de identificar cada una de las muestras de los recubrimientos estudiados se codificaron utilizando dos letras y un número (ver Tabla 1), la primera de ellas (A y B) para describir la composición química de los recubrimientos, siendo A los de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- 13% en peso de TiO<sub>2</sub> y B los de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- 45% en peso de TiO<sub>2</sub>, y la segunda (g y f en subíndice) para describir la distribución granulométrica de los polvos de partida, siendo g la correspondiente a los polvos gruesos y f a los polvos finos. Por último, el número corresponde al espesor del recubrimiento, dado en micrómetros.

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis de fases realizado por DRX y complementado con el método de Rietveld para cuantificar las fases que constituyen los recubrimientos, así como su respectiva microdureza.

**Tabla 2.** Porcentaje de fases y microdureza de los recubrimientos elaborados

Referencia	Código recubrimiento	Análisis de fases		HV <sub>3,25</sub> N (GPa)
		Fases	[%Peso]	
AT - 13	A <sub>g</sub> 1026	α- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,2 ± 0,6	11,2 ± 1,2
		γ- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	92,8 ± 6,2	
	A <sub>f</sub> 1014	α- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9 ± 0,3	12,0 ± 1,2
		γ- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,1 ± 0,9	
AT - 45	B <sub>g</sub> 904	Al <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	28,9 ± 2,7	8,9 ± 0,9
		Al <sub>6</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>13</sub>	71,1 ± 3,6	
	B <sub>f</sub> 875	Al <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	55,2 ± 6,6	8,9 ± 0,6
		Al <sub>6</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>13</sub>	44,8 ± 2,2	

En las muestras A<sub>g</sub>1026 y A<sub>f</sub>1014 no se detectaron fases asociadas al TiO<sub>2</sub> posiblemente a causa de la solubilización de este compuesto en la estructura de la Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-γ, este tipo de comportamientos ya habían sido reportados en trabajos previos realizados por otros autores [8, 9].

### 3.3 Medida de la dureza de la punta de la broca

La micro-dureza de la broca tanto en la punta como en el vástago fue determinada a partir de 20 micro-indentaciones Vickers realizadas en cada una de esta zonas de análisis, aplicando una carga de 300g durante 15 segundos. Adicionalmente se realizaron mediciones bajo estas mismas condiciones en la punta de algunas brocas después de haber sido utilizadas en ensayos de perforación, con el fin de determinar si existe algún cambio en su dureza que pueda afectar su comportamiento o su capacidad de perforar, para lo cual se realizaron indentaciones desde la punta hacia el interior y de izquierda a derecha de forma que se pudiera detectar un posible cambio de dureza debido a la deformación. Los resultados obtenidos son presentados en la *Tabla 3*.

**Tabla 3.** Resultados de las medidas de dureza realizadas a las brocas.

Condición de la broca	Zona de ensayo	Valores promedios de Dureza Vickers
<b><u>Nueva</u></b>	Vástago de la broca	161±4
	A 200 μm de la punta	647±3
<b><u>Usada</u></b>	A 200 μm de la punta	670±4
	A 1700 μm de la punta	645±5
	A 3200 μm de la punta	644±4
	A 4700 μm de la punta	645±3
	A 6200 μm de la punta	649±4
	A 7700 μm de la punta	< 600

De acuerdo con los resultados anteriores se pudo establecer que en los primeros 7.7 mm a partir de la punta de la broca no existen cambios significativos en la microdureza, tampoco hay cambios a causa de las condiciones a las que es sometida esta herramienta durante el ensayo de perforación.

### 3.4 Evaluación del efecto del afilado de la broca

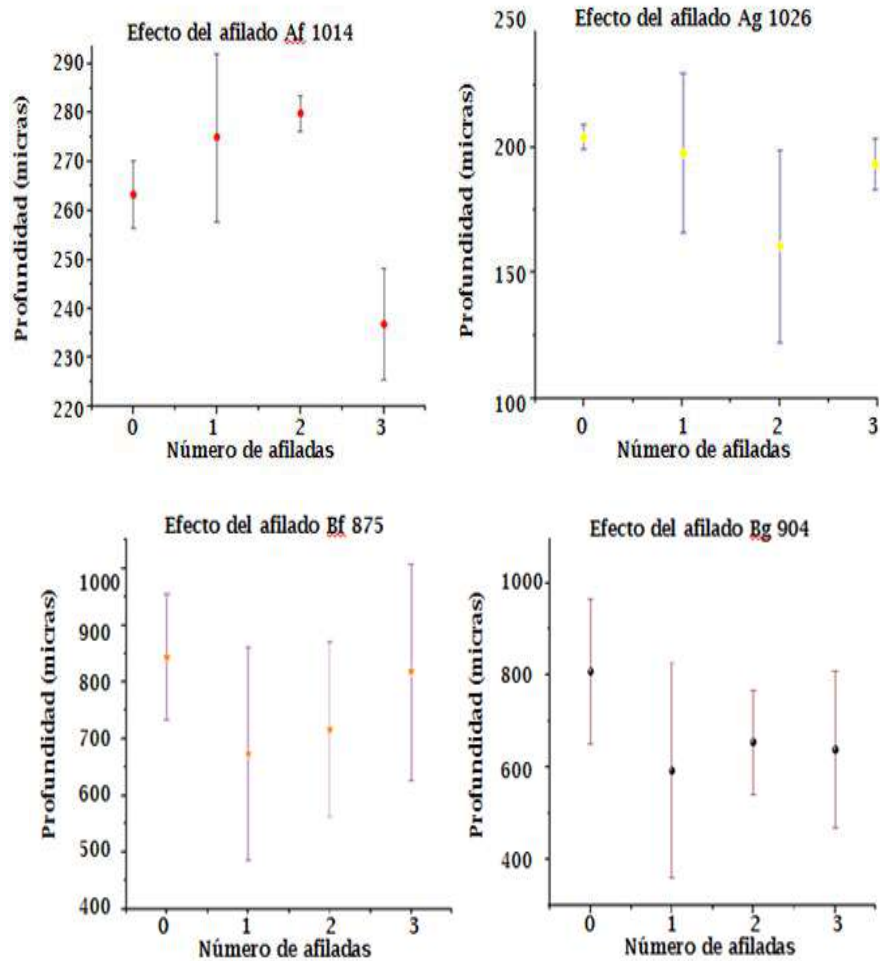
A partir de los resultados de los ensayos preliminares realizados con brocas afiladas con un ángulo en la punta de 118° y 135°, se decidió realizar los ensayos definitivos con aquellas afiladas a 118°, ya que los resultados de profundidad de perforación en los recubrimientos presentaron mayor concordancia con los de las brocas nuevas.

En la Tabla 4 se presentan los datos obtenidos al realizar los ensayos de perforación sobre diferentes recubrimientos, realizando 3 re-afilados a las brocas con un ángulo de 118°.

**Tabla 4.** Comparación de las profundidades de perforación empleando brocas nuevas y con varios afilados.

Código	Profundidad de perforación (micras)			
	Broca nueva	Primer afilado	Segundo afilado	Tercer afilado
<b>B<sub>f</sub>875</b>	844 ± 112	673 ± 188	716 ± 154,28	817 ± 190
<b>A<sub>g</sub>1026</b>	204 ± 5	198 ± 32	160 ± 38	193 ± 10
<b>B<sub>g</sub>904</b>	806 ± 157	592 ± 233	653 ± 114	637 ± 170
<b>A<sub>f</sub>1014</b>	263 ± 7	275 ± 17	280 ± 4	237 ± 11

Como se observa en la Tabla 4, se presentan menores desviaciones estándar en la perforación de los recubrimientos de tipo AT-13 que en los de tipo AT-45 para las diferentes veces que se afiló la punta de la broca, lo que es debido a que en estos últimos recubrimientos la resistencia a la perforación es mucho menor, por lo que deterioran menos la punta de la broca durante el ensayo, haciendo que su capacidad para cortar se mantenga y que por lo tanto la resistencia a la perforación sea muy sensible a variaciones en el recubrimiento. Además si se tienen en cuenta los valores de desviación estándar, se observa que los datos de profundidad de perforación para un mismo recubrimiento se traslapan (ver Figura 1), excepto en el tercer afilado de la broca utilizada para perforar la muestra Af1014, en la que se presentó una ligera disminución en su capacidad para perforar, lo que se puede atribuir al hecho de que la broca se desgasta más durante cada ensayo con éste recubrimiento dada su alta dureza, por lo que se requiere un mayor desbaste de su punta en cada afilado, haciendo que posiblemente se haya superado la longitud de la broca en la que su micro-dureza es constante.



**Figura 1.** Efecto del número de afilados de la broca sobre su capacidad de perforar cada recubrimiento.

### 3 CONCLUSIONES

Con respecto al efecto del afilado de la broca sobre la resistencia a la perforación de los recubrimientos, se encontró que la longitud que se puede desbistar a esta herramienta no debe superar la zona en la que su dureza es casi constante (7 mm a partir de la punta para el tipo de brocas utilizadas en este estudio). Por lo tanto, para las brocas evaluadas se pueden realizar al menos 2 re-afilados sin que existan variaciones significativas en los resultados de la resistencia a la perforación de los recubrimientos.

### 4 AGRADECIMIENTOS

Al CODI por la financiación del proyecto FIT12-1-01 y el proyecto PR12-2-01 a través del Fondo de apoyo de los trabajos de grado de pregrado, así como a Bienestar universitario y al fondo de la facultad de ingeniería de la Universidad de Antioquia por la financiación para la inscripción al congreso.

## **5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Vargas Galvis Fabio et al. “Mechanical and tribological performance of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  coatings elaborated by flame and plasma spraying”. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, No 4, pp. 1132-1136, 2010.
2. Mauvoisin G., Chagneau F. “Quantitative measurement of the hardness profile on carbonitriding steel by the hole drilling method”, *Measurement* 25, pp. 291–298, 1999.
3. Mauvoisin G., Chagneau F. De l'analyse de la résistance interne par perçage à la détermination du profil de dureté des aciers traités en surface. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Mécanique des solides et des structures*, Paris t. 327, Série II b, pp. 19-24, 1999.
4. Mauvoisin G., et al. Influence of material properties on the drilling thrust to hardness ratio. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43, pp. 825–832, 2003.
5. Vargas Fabio. *Élaboration de couches céramiques épaisses à structures micrométriques et nanométriques par projections thermiques pour des applications tribologiques*. Tesis doctoral, Université de Limoges, 2010.
6. Palacio Claudia, et al. Effect of the mechanical properties on drilling resistance of  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$  coatings elaborated by atmospheric plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 220, pp. 144-148, 2013.
7. ASTM C1327 - 08 Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics.
8. F. Vargas et al. “Mechanical and tribological performance of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  coatings elaborated by flame and plasma spraying”. *Surface and Coatings Technology*, 205, pp. 1132–1136, 2010.
9. R. Yilmaz, A.O. Kurt, A. Demir, Z. Tatli, “Effect of  $\text{TiO}_2$  on the mechanical properties of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{TiO}_2$  plasma sprayed coating”, *J. Eur. Ceram. Soc.* 27, 1319, 2007.