

ANÁLISIS MECÁNICO Y TRIBOLÓGICO DE LOS RECUBRIMIENTOS Fe-Cr-Ni-C Y Ni-Al-Mo

MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL ANALYSIS OF Fe-Cr-Ni-C AND Ni-Al-Mo COATINGS

JORGE E. MUÑOZ

Ingeniero Mecánico, Universidad del Valle. jorgemu181@hotmail.com

JOHN J. CORONADO

*Profesor Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Mecánica
Estudiante de Doctorado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de São Paulo, Brasil. johncoro@univalle.edu.co*

Recibido para revisar enero 15 de 2007, aceptado mayo 02 de 2007, versión final mayo 09 de 2007

RESUMEN: En este trabajo de investigación se evaluaron dos recubrimientos aplicados por medio de la técnica de rociado térmico por combustión, la aleación: Ni=89%, Al = 5,5%, Mo=5,5% y la aleación Fe=81,8%, Cr=16%, Ni=2%, C=0,2. La preparación superficial de las probetas se realizó usando chorro de arena. Se realizaron pruebas de resistencia al cortante, adherencia, desgaste abrasivo, desgaste por deslizamiento y flexión en cuatro puntos. El recubrimiento Fe-Cr-Ni-C presentó menor pérdida de masa, tanto para desgaste abrasivo como para el desgaste por deslizamiento. La multicapa presentó una mayor porosidad en el recubrimiento Ni-Al-Mo usado como capa base y la capa exterior de Fe-Cr-Ni-C presentó mayor cantidad de partículas no fundidas y óxidos. La falla ocurrida en el ensayo de adherencia para las probetas con recubrimiento multicapa fue de característica adhesiva y cohesiva. El esfuerzo en el que se presenta la fisura por flexión en el recubrimiento multicapa disminuyó con el aumento del espesor.

PALABRAS CLAVE: Rociado Térmico, Desgaste, Recubrimiento.

ABSTRACT: In this paper the coatings Ni=89%, Al = 5,5%, Mo=5,5% and Fe=81,8%, Cr=16%, Ni=2%, C=0,2% were evaluated. The coatings were applied by flame-thermal spray technique. The superficial preparation method was sand blasting. Adhesion, shear, abrasive wear, sliding wear and bending tests were made. The coating Fe-Cr-Ni-C presented minor mass loss, as much for abrasive wear as for the sliding wear. The multilayer presented a greater porosity in the base layer (Ni-Al-Mo) than in the outer layer (Fe-Cr-Ni-C), the last one presented greater amount of nonfused particles and oxides. The failure presented in the adhesion test for the samples with multilayer coating was of adhesive and cohesive characteristic. The stress in which the cracks appear by bending moment in the multilayer coatings diminished with the increase of the thickness.

KEY WORDS: Thermal Spray, Wear, Coating.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de rociado térmico presentan gran versatilidad en la deposición de recubrimientos, siendo los mismos usados para protección de componentes contra desgaste abrasivo, adhesivo, erosivo, fatiga superficial y corrosión, además de funcionar como barrera térmica [1-3]. El rociado térmico es un nombre dado a un grupo de procesos usados para la deposición de revestimientos metálicos o no metálicos en varios tipos de sustratos que incluyen desde aceros hasta plásticos [4]. El material de revestimiento puede estar en forma de polvo, barra, cordón o alambre [5].

Para la deposición de los recubrimientos se utilizan pistolas, que generan la cantidad de calor necesaria para fundir el material y acelerarlo hacia el sustrato por medio de gas comprimido, luego las partículas chocan contra la superficie formando capas delgadas que se conforman y adhieren a las irregularidades de la superficie. En la Figura 1 se presenta un esquema de la estructura característica de un recubrimiento por rociado térmico típicamente conformado por el sustrato, partículas fundidas, partículas no fundidas, óxidos y poros.

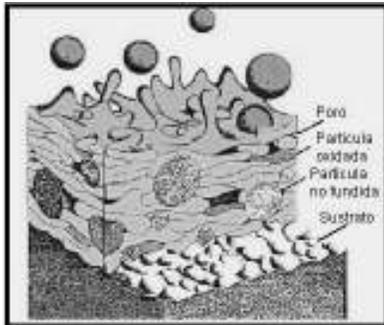


Figura 1. Esquema de un recubrimiento por rociado térmico, adaptada de [6].

Figure 1. Representation of coating by thermal spray, adapted of [6].

La microestructura y propiedades del recubrimiento dependen del proceso de solidificación y sinterización de las partículas. El criterio básico en el proceso de rociado térmico es que las partículas rociadas estén completamente fundidas, cosa que no sucede del todo en la práctica, como consecuencia partículas en estado semifundido y sin fundir se presentan en la estructura del recubrimiento, generándose defectos. Los recubrimientos depositados por rociado térmico tienden a presentar cierta porosidad debida a celdillas de aire atrapadas en la estructura del recubrimiento. Un recubrimiento que presente fallas en el proceso de proyección puede presentar varios problemas en su microestructura como: defectos de adherencia, defectos de coherencia, grietas dentro de las láminas y poros.

El rociado térmico que utiliza el calor generado por una reacción química es conocido como combustión por gas (rociado por llama). El proceso de rociado térmico por aplicación de polvo consiste en la alimentación continua de polvo mediante un alimentador que introduce el material en una cámara de combustión de oxígeno-gas combustible, en el cual la mezcla de combustible funde el material y mediante aire comprimido es disparado a alta velocidad sobre la superficie del sustrato en forma pulverizada. Los equipos de rociado térmico por combustión de gases son de bajo costo, fáciles de instalar y adaptar a la aplicación de diferentes materiales.

El material fundido es proyectado sobre el sustrato en estado plástico con una alta energía cinética y térmica, haciendo que el material se adhiera a éste con una fuerza que depende del

el material a rociar, la preparación superficial y la temperatura durante el proceso de deposición. La preparación del sustrato previa a la deposición del recubrimiento es requerida para todo proceso de rociado térmico, debido a que se debe eliminar toda contaminación que pueda impedir la adherencia del recubrimiento, además de generar un perfil de rugosidad característico sobre la superficie del sustrato para aumentar la adherencia del recubrimiento y el área efectiva superficial.

Muchos componentes mecánicos presentan desgaste abrasivo o por deslizamiento [7], resultando en mal funcionamiento de máquinas. Estos componentes se cambian con un alto costo de mantenimiento, o se pueden recuperar a las dimensiones iniciales usando recubrimientos. Por tal motivo, en este artículo se caracterizaron los recubrimientos Ni-Al-Mo / Fe-Cr-Ni-C; depositados por el proceso de rociado térmico por combustión sobre el acero AISI 1045, para conocer su comportamiento mecánico y tribológico.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Preparación Superficial

Las probetas antes de ser recubiertas fueron sometidas a un método de limpieza y generación de perfil de rugosidad. El método de preparación superficial utilizado fue chorreado con arena (*sand blasting*) que proporciona el grado de limpieza y mejor perfil de rugosidad requerido para depositar recubrimientos por rociado térmico, comparado con los resultados de preparación con pulidora y lija [8]. La rugosidad fue medida utilizando un rugosímetro Mitutoyo SJ 201P con una longitud de muestreo de 6mm. La *American Welding Society* (AWS) indica que la rugosidad adecuada de las superficies para recubrimientos por rociado térmico se encuentra entre $2.5\mu\text{m}$ y $13\mu\text{m}$ Ra.

Tabla 1. Rugosidad superficial obtenida con el chorro de arena.

Table 1. Surface roughness obtained by sand blasting.

Rugosidad promedio Ra (μm)	Desv. estándar	% Coef. De variación
3.245	0.1072	3.31

2.2 Materiales y Equipos

El material utilizado como sustrato fue el acero AISI 1045. Los materiales para el proceso de deposición estaban en forma de polvo. La composición química del material A es: 5,5 % de Al, 5,5 % de Mo y 89 % de Ni. La composición química del material B es: 0,2 % de C, 2 % de Ni, 16 % de Cr y 81,8 % de Fe.

La deposición del material A no requiere material base para éste se adhiera al sustrato en el que es depositado, es recomendado por el fabricante como un recubrimiento con una alta adherencia y una excelente resistencia a la abrasión. El material B necesita de una capa base en la superficie del sustrato donde es depositado. Para depositar este recubrimiento se utiliza como capa base el recubrimiento A. El recubrimiento B es recomendado por el fabricante como un recubrimiento con alta resistencia al desgaste abrasivo y al impacto.

El equipo utilizado para realizar el proceso de deposición de recubrimientos fue el TeroDyn 2000. Para la deposición de los recubrimientos las probetas fueron precalentadas en la superficie a recubrir hasta una temperatura de 90°C utilizando llama. Una vez la temperatura de la probeta estaba en este valor se procedió a depositar el recubrimiento, garantizando que la temperatura durante la deposición del recubrimiento no sobrepasara de 260°C.

2.3 Ensayo de Desgaste Abrasivo

En la Figura 2 se presenta una fotografía de la máquina de desgaste abrasivo a tres cuerpos [9] con sus partes principales en la cual se realizaron los ensayos bajo la norma ASTM G-65. Este ensayo fue realizado a probetas recubiertas con los dos diferentes materiales de recubrimiento A y B, además de probetas de acero AISI 1045 sin recubrimiento. El total de probetas utilizadas para el ensayo fue de 15 (5 material A, 5 material B y 5 de acero AISI 1045).

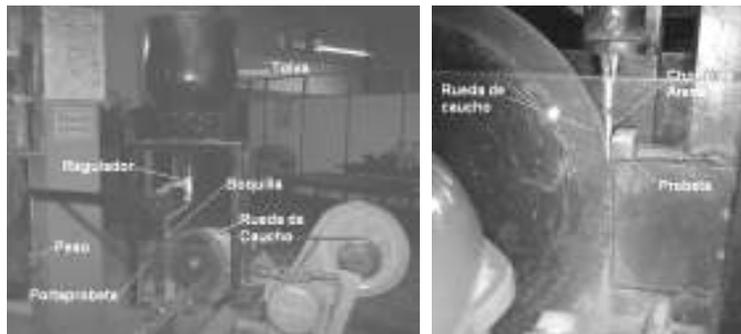


Figura 2. Fotografía de la máquina de desgaste abrasivo.

Figure 2. Tribometer of abrasive wear.

Durante la realización de los ensayos es importante mantener los diferentes parámetros controlados, especialmente el flujo de arena que debe ser continuo y tener la forma de una cortina uniforme a lo ancho de la rueda de caucho y descender en medio de la probeta y la rueda. El procedimiento B de la norma ASTM-G65 fue elegido para caracterizar los recubrimientos como es recomendado por Pawlowski [10]. En la Figura 3 se presenta el volumen perdido durante el ensayo por los tres materiales. El sustrato (acero AISI 1045) presentó menor pérdida de volumen que los recubrimientos A y B. El recubrimiento B presentó menor pérdida de volumen que el recubrimiento A.

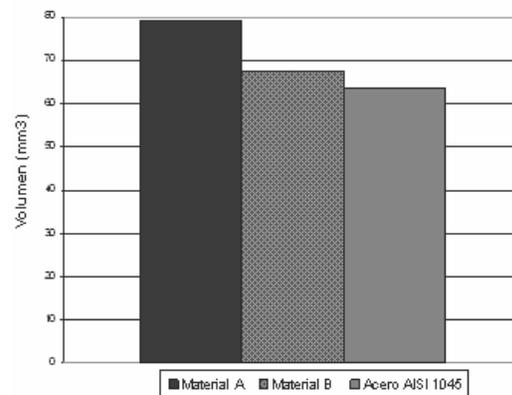


Figura 3. Volumen perdido por los materiales, en prueba de desgaste abrasivo.

Figure 3. Volume loss for materials in abrasive wear test.

2.4 Ensayo de Desgaste por Deslizamiento

En la Figura 4 se presenta una fotografía del tribómetro de desgaste por deslizamiento bajo la norma ASTM G-77, constituido por un anillo de acero AISI 1045 recubierto con materiales A y B en contacto con un bloque de bronce SAE 67, los cuales fueron sumergidos en aceite asfáltico. La temperatura del aceite y del bloque fue medida por medio de termocuplas. La velocidad de rotación del anillo fue controlada por medio del regulador de frecuencia. La fuente de voltaje recibe las señales de las celdas de carga y luego éstas son tomadas por el sistema de adquisición de datos.



Figura 4. Fotografía del tribómetro del desgaste por deslizamiento.

Figure 4. Tribometer of sliding wear.

Durante la realización del ensayo se controlaron las siguientes variables: temperatura del lubricante, velocidad de rotación del anillo, distancia recorrida y carga aplicada. Las variables de respuesta del ensayo fueron: coeficiente de fricción y pérdida de masa. En la tabla 2 se reportan los parámetros de operación bajo los cuales se realizaron las pruebas y en la Tabla 3 se reportan la geometría, dureza y rugosidad superficial de los materiales ensayados.

Tabla 2. Parámetros de operación.

Table 2. Operation parameters.

Velocidad de deslizamiento (m/s)	0.132
Distancia de prueba (rev)	5400
Temperatura de trabajo (°C)	51
Presión nominal (MPa)	8.14

Fueron realizados tres ensayos para cada material de anillo, correspondientes al número de probetas permitido por la norma para obtener un valor medio representativo del ensayo, teniendo en cuenta el coeficiente de variación de éste. En las Tablas 4 y 5 se reportan los datos de pérdida de masa de los recubrimientos y los bloques de bronce. El par bronce-recubrimiento B presentó menor pérdida de masa, tanto del anillo como del bloque.

Tabla 3. Geometría, dureza y rugosidad superficial de las probetas.

Table 3. Geometry, hardness and superficial roughness of the samples.

Elemento	Material	Dimensiones (mm)	Dureza (BHN)	Rugosidad Ra (μm)
Anillo	Recubrimiento A	Diámetro: 35.00 Longitud: 8.80	171	0.265
	Recubrimiento B		200	0.284
Bronce	SAE 67	6.35 x 14.00 x 15.75	65	0.165

Tabla 4. Pérdida de masa en bloques de bronce.

Table 4. Mass loss in bronzes.

Material de recubrimiento del anillo	Masa perdida promedio por bloque (g)	Desviación estándar	% Coeficiente de variación
A	0.00717	0.000404	5.63
B	0.00317	0.000125	3.95

Tabla 5. Perdida de masa en recubrimientos (anillo).
Table 5. Mass loss in coatings (ring).

Material de recubrimiento del anillo	Masa perdida promedio por anillo (g)	Desviación estándar	% Coeficiente de variación
A	0.001866	0.0000577	3.09
B	0.001266	0.0000577	4.56

Para calcular el coeficiente de fricción dinámico entre el bronce y los materiales A y B, presentados en la Tabla 6, se utilizaron los datos obtenidos durante el ensayo entre 4500 y 5400 revoluciones, rango recomendado por la norma debido a que el bloque ha asentado en el

anillo y los datos registrados se han estabilizado. En este análisis se encuentra un menor coeficiente de fricción entre el par bronce-recubrimiento A.

Tabla 6. Coeficiente de fricción entre bronce SAE 67 y recubrimientos.
Figure 6. Friction coefficient between bronzes and coatings.

Recubrimiento	Coeficiente de fricción promedio	Desviación estándar	% coeficiente de variación
A	0.04559	0.00196	4.30
B	0.05646	0.00207	3.66

2.5 Ensayo de Adherencia por Tracción

Este ensayo se realizó utilizando una máquina de tracción universal LLOYD *Instruments* T30K. Para realizar el ensayo, las probetas se sujetaron con mordazas sugeridas por la norma ASTM C 633. En la tabla 7 se reportan los datos de resistencia a la adherencia calculada para el recubrimiento A, el espesor del recubrimiento utilizado para este ensayo fue de 0.5 mm.

Tabla 7. Resistencia media a la adherencia del recubrimiento A.

Table 7. Adhesion resistance of coating A.

Media (Mpa)	19.538
Desv. estándar	1.049
% coef. Variación	5.37

La falla para las probetas con recubrimiento A en este ensayo es de característica cohesiva, de esta manera el esfuerzo promedio corresponde a la cohesión del recubrimiento. Este tipo de falla se puede observar en la Figura 5.



Figura 5. Macrografía de las probetas donde se indica la falla cohesiva en recubrimiento A.

Figure 5. Samples indicating cohesive failure in coating A.

En la Tabla 8 se reportan los datos de resistencia a la adherencia calculados para el recubrimiento multicapa, el espesor del recubrimiento A fue de 0.1 mm (capa base) y el recubrimiento B fue de 0.5 mm (capa exterior).

Tabla 8. Resistencia media a la adherencia del recubrimiento multicapa.

Table 8. Adhesion resistance of multilayer coating.

Media (Mpa)	15.97
Desv. Estándar	0.616
% coef. Variación	3.86

La falla ocurrida en el ensayo para las probetas con recubrimiento multicapa fue de característica adhesiva y cohesiva. La falla por

adhesión ocurre entre las intercaras del recubrimiento A y el recubrimiento B. La falla cohesiva ocurre en el recubrimiento B. En la Figura 6 se puede observar una de las probetas con recubrimiento multicapa sometidas al ensayo, en ésta se señalan las áreas donde se presentan los dos diferentes tipos de falla.



Figura 6. Macrografía de las probetas donde se indica la falla en el recubrimiento multicapa.
Figure 6. Samples indicating failure of multilayer coating.

2.6 Ensayo de Resistencia al Cortante

Este ensayo se realizó en la máquina de tracción universal LLOYP *Instruments* T30K bajo la norma ASTM F 1044. En la Tabla 9 se reporta el esfuerzo cortante de falla para el recubrimiento multicapa.

Tabla 9. Esfuerzo cortante de falla en recubrimiento multicapa.

Table 9. Shear stress in multilayer coating.

Media	28.235
Desv. Estándar	0.460
% coef. Variación	1.63

La falla se presentó principalmente en la intercara entre el recubrimiento A y B. En la Figura 7 se observa el área de falla y también la porción de área menor donde ocurre falla a través del espesor del recubrimiento A. El espesor del recubrimiento utilizado fue de 0.6mm (0.1mm de recubrimiento A y 0.5mm de recubrimiento B).

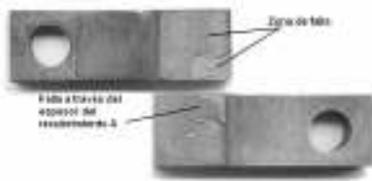


Figura 7. Macrografía de las probetas donde se indica la falla en el recubrimiento multicapa.
Figure 7. Samples indicating failure of multilayer coating.

2.7 Ensayo de Flexión en Cuatro Puntos

Este ensayo se realizó en la máquina de tracción universal LLOYP *Instruments* T30K, en la Figura 8 se ilustra el montaje de la probeta para el ensayo. Se evaluaron diferentes espesores de recubrimiento, con el objetivo de observar la variación con espesor, de la resistencia a flexión. En la Figura 9 se reporta la variación del esfuerzo en que se forma la fisura en el recubrimiento multicapa, este esfuerzo disminuye con el aumento del espesor de éste.

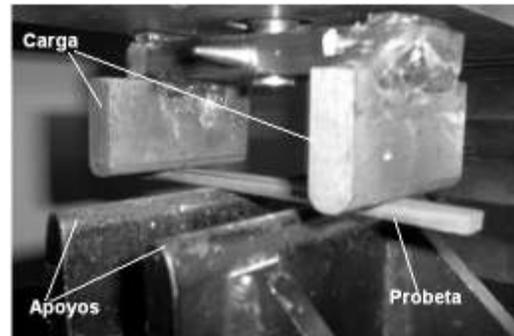


Figura 8. Montaje de ensayo de flexión en cuatro puntos.
Figure 8. Four-points bending test.

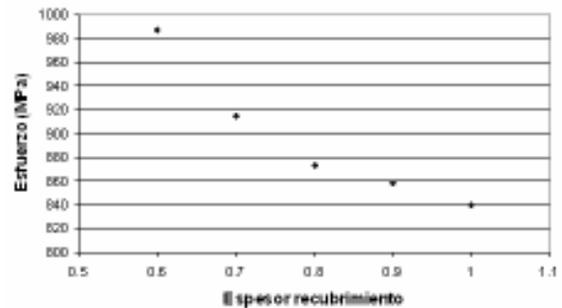


Figura 9. Esfuerzos en que se presenta fisura en recubrimiento multicapa.
Figure 9. Stress for crack formation in multilayer coating.

2.8 Microestructura de los Recubrimientos

El análisis de las capas depositadas se realizó en la sección transversal de los recubrimientos usando un microscopio electrónico de barrido (SEM). En la figura 10 se observa el perfil del sustrato (parte inferior), la capa de recubrimiento A (parte media) y el recubrimiento B (parte superior).

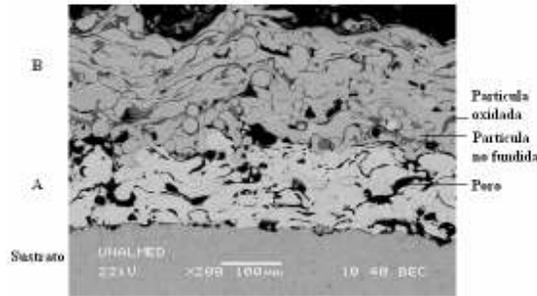


Figura 10. SEM de las capas depositadas sobre el sustrato.

Figure 10. SEM of coatings and substrate.

La microestructura de la sección transversal del recubrimiento B presentó una mezcla heterogénea de partículas metálicas con estructura laminar, óxidos de hierro de color gris, poros de color negro y partículas no fundidas. El recubrimiento A presentó óxidos de aluminio y una menor cantidad de partículas no fundidas, pero la porosidad fue mayor.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El acero AISI 1045 a pesar de presentar menor dureza que los recubrimientos presentó una mayor resistencia al desgaste abrasivo, este comportamiento puede estar influenciado por la porosidad de los recubrimientos que contribuye negativamente a la resistencia al desgaste abrasivo. Existen otros procesos que presentan menos defectos como: *High-velocity Oxygen Fuel* (HVOF), pero son más costosos [11,12]. El recubrimiento B presentó mayor resistencia al desgaste abrasivo y al deslizamiento que el recubrimiento A, probablemente por presentar menos defectos y mayor dureza. El recubrimiento A presentó una resistencia a la adherencia de 19.54 MPa y la falla fue cohesiva, es decir, con falla en la intercara sustrato revestimiento. La multicapa presentó una resistencia a la adherencia menor (15.97 MPa) y presentó falla tanto adhesiva, como cohesiva, es decir, la falla se presentó en la intercara de los recubrimientos y dentro del recubrimiento B. El esfuerzo en el que se presenta la fisura por flexión en el recubrimiento multicapa disminuyó con el aumento del espesor, de esta forma se puede seleccionar un determinado espesor de recubrimiento, de acuerdo, al esfuerzo de operación de un componente mecánico o

estructural bajo las condiciones estudiadas. El recubrimiento B posee una porosidad relativamente baja comparado con el recubrimiento A, esto puede presentarse debido que el recubrimiento B tiene una distribución más laminar que deja menor posibilidad de formación de poros.

4. CONCLUSIONES

El recubrimiento B presentó una mayor resistencia al desgaste abrasivo comparado con el recubrimiento A, pero el acero AISI 1045 presentó una mayor resistencia que el recubrimiento B.

El coeficiente de fricción que se presenta entre el bloque de bronce SAE 67 y el anillo con recubrimiento B es mayor que el que se presenta con el recubrimiento A, aunque el mayor desgaste del bloque ocurre con el anillo recubierto con material A.

En el ensayo de adherencia el recubrimiento de capa base A, presentó falla cohesiva. La multicapa presentó falla cohesiva y adhesiva.

En el ensayo de flexión del recubrimiento multicapa, la resistencia disminuye 17.5% al pasar de un espesor de 0,6 a 1mm.

El recubrimiento B presentó una porosidad relativamente baja comparado con el recubrimiento A, pero mayor cantidad de partículas no fundidas y oxidadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de COLCIENCIAS, el Ingenio Manuelita, Juan Diego Pardo de la Compañía Sager S.A. Federico Sequeda de la Universidad del Valle y a Alejandro Toro de la Universidad Nacional de Medellín. A todos ellos muchas gracias por fomentar la investigación en Colombia.

REFERENCIAS

[1] LUGSCHEIDER, E., ESCHNAUER, H., MULLER, U., AND WEBER, TH. Thermal

spray technology, Powder Metallurgy International; 23, 33-39, 1991.

[2] SMITH, R.W., AND NOVAK, R. Advanced and applications in U.S. thermal spraying technology, Powder Metallurgy International; 23, 147-154, 1991.

[3] CLARKE, D.R. AND PHILLPOT, S.R. Thermal barrier coating materials, Materials Today, June, 22-29, 2005.

[4] MARANHO, O. Aspersao térmica de ferro fundido branco multicomponente [PhD Tese], Sao Paulo: Universidade de Sao Paulo, Brasil, 2006.

[5] AMERICAN WELDING SOCIETY. Thermal spraying: practice, theory, and application, Miami, 1985.

[6] AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. Handbook of thermal spray technology, Ohio: ed. J.R. Davis, 2004.

[7] HUTCHINGS, I.M. Tribology: Friction and wear of engineering materials, Cambridge, 1992.

[8] SALINAS C., J.J. CORONADO., G. LATORRE. Evaluación de la Multicapa Ni, Al, Mo / Al₂O₃, TiO₂ Aplicada por el Proceso de Rociado Térmico por Combustión, Tecnura, 16, 15-25, 2005.

[9] MISRA, A., FINNIE, I. A classification of three-body abrasive wear and design of a new tester, Wear, 60, 111-121, 1980.

[10] PAWLOWSKI, L. The science and engineering of thermal spray coatings, John Wiley & Sons, England, 1995.

[11] PADILLA, K., VELÁSQUEZ, A., BERRÍOS, J.A., PUCHI-CABRERA, E.S. Fatigue Behavior of a 4140 Steel Coated with a NiMoAl Deposit Applied by HVOF Thermal Spray, Surface and Coating Technology, 150, 151-162, 2002.

[12] HERNÁNDEZ, F., OLIVEIRA, J.A., BERRÍOS, C., VILLALOBOS, A., PERTUZ, E.S., PUCHI-CABRERA, E.S. Fatigue Properties of a 4340 Steel Coated with a Colmonoy 88 Deposit Applied by High-velocity Oxygen Fuel, Surface and Coating Technology, 133, 68-77, 2000.