

# Evaluación de la multicapa Ni, Al, Mo / $\text{Al}_2\text{O}_3\text{TiO}_2$ , aplicada por el proceso de rociado térmico por combustión

## Evaluation of the multilayer coating Ni, Al, Mo / $\text{Al}_2\text{O}_3\text{TiO}_2$ , applied by flame-thermal spray technique

### CÉSAR SALINAS

Ingeniero de Materiales, Universidad del Valle. Centro de Investigación de Materiales, Grupo de investigación de recubrimientos duros y superduros Universidad del Valle. csalinas@univalle.edu.co

### JOHN JAIRO CORONADO

Ingeniero Mecánico, Corporación Autónoma de Occidente, Magíster en Ingeniería Mecánica Universidad de Puerto Rico, Docente Universidad del Valle (Colombia), Escuela de Ingeniería Mecánica. johncoro@univalle.edu.co johnjairocoronado@yahoo.com

### GUILLERMO LATORRE

Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander. Funcionario Instituto Colombiano del Petróleo, ICP glatorre@ecopetrol.com

Fecha de recepción: marzo 28 de 2005

Clasificación del artículo: investigación  
Fecha de aceptación: junio 27 de 2005

**Palabras clave:** rociado térmico por combustión, multicapa, impedancia electroquímica, chorreado con arena.

**Key words:** flame-thermal spray, coating, electrochemical impedance, sand blasting.

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se evaluó el recubrimiento multicapa  $\text{Ni}_x\text{Al}_y\text{Mo}_z$  ( $x = 88,5\%$ ,  $y = 6\%$ ,  $z = 5,5\%$ ) y  $\text{Al}_2\text{O}_{3x}\text{TiO}_{2y}$  ( $x = 96\%$ ,  $y = 4\%$ ), aplicada por medio de la técnica de rociado térmico por combustión, que es usado en la industria para la protección de sellos mecánicos para bombas. Se realizaron pruebas de adherencia, cortante, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión; también se compararon tres métodos de preparación superficial, previos a la deposición de los recubrimientos: chorreado con arena, pulidora y lija. Los resultados de los ensayos indican una disminución de la resistencia a la adherencia del

3,83% y de resistencia al esfuerzo cortante de 16,81%, al aumentar el espesor de los recubrimientos de capa base de 380 a 440  $\mu\text{m}$ . La resistencia al desgaste de la capa base y de la multicapa fue mayor que la del acero inoxidable; la multicapa presentó una elevada porosidad en la capa base (15%), mientras que en la capa de acabado esta fue del 5%. Mediante el ensayo de impedancia electroquímica, se determinó que los eventuales problemas de corrosión pueden solucionarse aplicando una capa sellante. Por su parte, la preparación superficial por chorreado con arena presentó el grado de limpieza y el perfil de rugosidad requerido para depositar recubrimientos.

**ABSTRACT**

In this research paper the multilayer coating Nix Aly Moz ( $x = 88,5\%$ , and  $= 6\%$ ,  $z = 5,5\%$ ) and  $Al_2O_{3x}TiO_{2y}$  ( $x=96\%$ , and  $= 4\%$ ) was evaluated. The coating was applied by Flame-Thermal Spray technique. Adhesion, shear, wear and corrosion resistance tests were made. Three methods of previous superficial preparation to the deposition of the coverings were compared: sand blasting, polisher and sandpaper. The results show a decrease of the adhesion resistance of 3,83% and shear stress of

16,81%, when increasing the coating thickness of bases layer from 380 to 440  $\mu m$ . The wear resistance of the layer bases and from the multilayer was higher than the stainless steel. The multilayer exhibited an elevated porosity in the layer bases of 15%, whereas the finished layer was from 5%. Using the electrochemical impedance test it was determined that the corrosion problems that may appear can be solved applying a sealing layer. Furthermore, the superficial preparation by sand blasting presented the degree of cleaning and the roughness profile required to deposit coating.

\*\*\*\*\*

**1. Introducción**

En las últimas décadas el proceso de rociado térmico ha tenido amplio reconocimiento a nivel industrial, debido a los grandes avances en las técnicas de elaboración de recubrimientos, a los nuevos materiales desarrollados y a las aplicaciones propuestas (Galvis, 2001). Para obtener los resultados esperados de un recubrimiento por rociado térmico, se requiere conocer muy bien el proceso, en especial las variables que afectan sus propiedades finales y por consiguiente su desempeño en una aplicación específica (Pawlowski, 1995).

A nivel industrial se han reportado fallas prematuras de la capa base de  $Ni_x Al_y Mo_z$  y la capa de acabado  $Al_2O_{3x} TiO_{2y}$ , aplicada sobre partes para bombas mediante rociado térmico por combustión; estas fallas ocurrieron en condiciones normales de operación, para las que se supone el material de la multicapa es apto (Mcnaughton, 1992). Los recubrimientos protectores son aplicados en sellos secundarios para reducir o eliminar los daños por corrosión y fricción que puedan presentarse. Este problema es quizá uno de los tipos de corrosión más comunes en los sellos mecánicos; permite fugas por los sellos secundarios y corroe y daña el eje o camisa que están directamente debajo del sello secundario (Mcnaughton, 1992). En este trabajo se evalúan las propiedades de la multicapa, particularmente la adherencia del recubrimiento al sustrato, su

resistencia al desgaste y a la corrosión. Se prestó especial atención a la preparación del sustrato, así como a las variables propias de la deposición del recubrimiento, a fin de hacer un paralelo con la forma en que se realiza el proceso a nivel industrial.

**2. Desarrollo experimental****2.1 Caracterización del sustrato**

El material utilizado para realizar las aplicaciones del recubrimiento fue un acero AISI 1020, con la siguiente composición química: C: 0,22%; Si: 0,20%; Mn: 0,55%; P: 0,026%; S: 0,004%; esta composición química se obtuvo por la técnica de espectroscopia de emisión atómica. Previo a la preparación superficial, se hizo el mecanizado de las probetas, a fin de obtener las dimensiones finales para cada uno de los ensayos.

**2.2 Limpieza superficial y perfil de rugosidad**

Para la limpieza y generación del perfil de rugosidad del sustrato se efectuó la preparación superficial de las probetas, tomando como referencia la recomendación de la American Welding Society (AWS), que sugiere llevar hasta grado metal blanco los sustratos. La norma AWS indica, además, que para este fin la rugosidad del sustrato debe oscilar entre 2,5  $\mu m$  y 13  $\mu m$ . En la tabla 1 se presentan los datos de rugosidad obtenidos para los diferentes

métodos de preparación superficial. Para la determinación del perfil de rugosidad de la pieza se utilizó el Perfilómetro Ambios XP2. Para garantizar la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados se realizó una calibración del equipo, previa a la toma de los datos, de acuerdo con la norma técnica ASTM 4417-84.

**Tabla 1.** Datos promedio de rugosidad ( $\mu\text{m}$ )

Método de preparación superficial	Perfil de rugosidad promedio Ra (micras)	Coefficiente de variación
Arena A1 (Sb1)	2,0	3,51
Arena A2 (Sb2)	4,73	3,71
Pulidora	3,1	5,27
Lija	1,4	17,5

Se emplearon dos tipos de arena: A1 (sb1) y A2 (sb2) (norma técnica ASTM E11- 87). La arena A1 (sb1) presentó un diámetro de partícula aproximada de 250  $\mu\text{m}$ , y la A2 (sb2) un diámetro de partícula aproximado de 400  $\mu\text{m}$ . El procedimiento de limpieza superficial se realizó controlando todas las variables directas del proceso (limpieza del equipo, diámetro de boquilla, distancia, ángulo de incidencia del chorro, tiempo de incidencia, presión del aire y procedimiento del operario).

La limpieza de probetas se realizó con una pulidora de disco de carburo de silicio y una lija para agua de carburo de silicio referencia 180, de Abracol, ambas sin contaminación, para comparar el perfil de rugosidad generado mediante otros métodos de preparación superficial usados comúnmente en el entorno colombiano.

Los resultados obtenidos con la preparación superficial de probetas con pulidora se encuentran dentro del rango sugerido por la AWS, pero el coeficiente de variación del ensayo es mayor del 5%; para las probetas preparadas superficialmente con lija la variación es del 17,5%. Considerando la magnitud de la variación del perfil de rugosidad, se decidió no trabajar con estos métodos de preparación superficial, pues la reproducibilidad de sus resultados no

es confiable y, además, los parámetros de procedimiento no son fácilmente controlables.

Con los datos obtenidos de las probetas preparadas con la arena A2 (Sb2) puede descartarse el perfil de rugosidad obtenido mediante la arena A1 (Sb1), puesto que se encuentra fuera del rango sugerido por la AWS. Para efectos comparativos de limpieza superficial y generación del perfil de rugosidad, en este trabajo se realizó la deposición de recubrimientos sobre probetas preparadas por chorreado con arena, cuyos granos tienen dos granulometrías diferentes A1 (Sb1) y A2 (Sb2), para comprobar la incidencia del perfil de rugosidad con respecto a las propiedades mecánicas del recubrimiento.

### 2.3 Ensayos de resistencia a la adherencia

Los ensayos fueron realizados en condiciones ambientales normales (25 °C y una atmósfera). Las mordazas requeridas para el ensayo de adherencia se construyeron de acuerdo con la norma técnica ASTM C633-01. Luego se comprobó la adherencia del recubrimiento al sustrato de los perfiles de rugosidad generados por los dos tipos de arena; el número de muestras para llevar a cabo este ensayo fue el sugerido en la norma técnica antes citada.

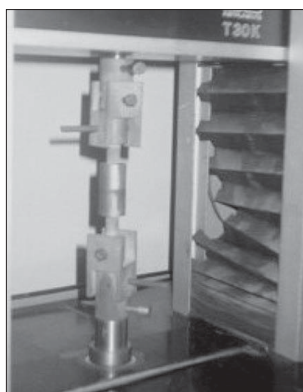
Después de la aplicación del recubrimiento se hizo la unión de las muestras, empleando un adhesivo<sup>1</sup>, con una resistencia a la tracción de 380 kg/cm<sup>2</sup>. Para asegurar la unión de las probetas con el adhesivo se aplicó una carga constante de 1.000 gr; luego se realizó el montaje de las mordazas en la máquina universal de ensayos (véase figura 1). La velocidad aplicada durante el ensayo fue de 0,78 mm/min.

En las figuras 2 y 3 se presentan los resultados del ensayo de adherencia de capa base para limpieza con diferentes tipos de arena y espesores.

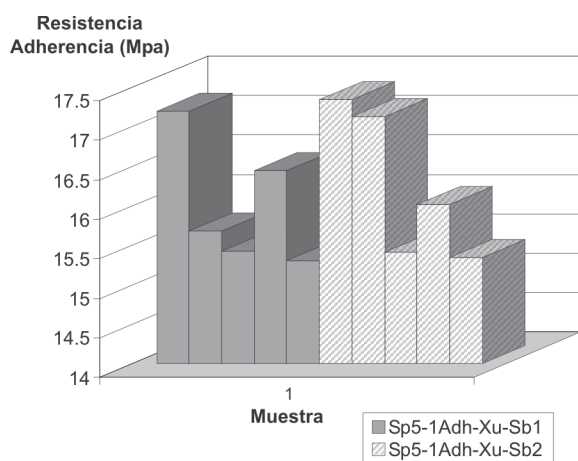
Para obtener conclusiones más precisas acerca de la resistencia a la adherencia de la multicapa de acuerdo con la preparación superficial utilizada,

<sup>1</sup> Producto 319 Loctite.

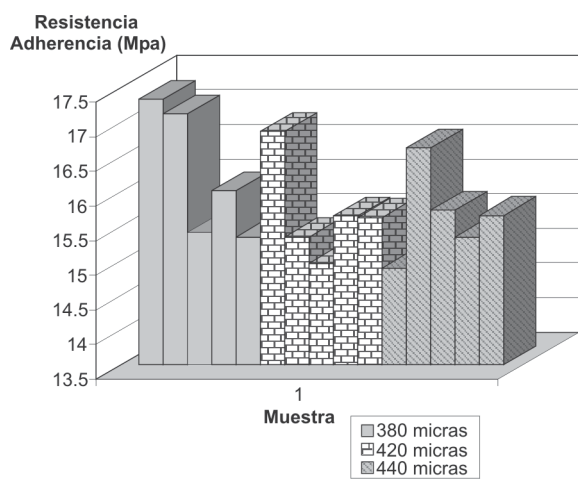
**Figura 1.** Mordazas para ensayo de resistencia a la adherencia



**Figura 2.** Variación de la resistencia a la adherencia de la capa base con espesor de 380 µm

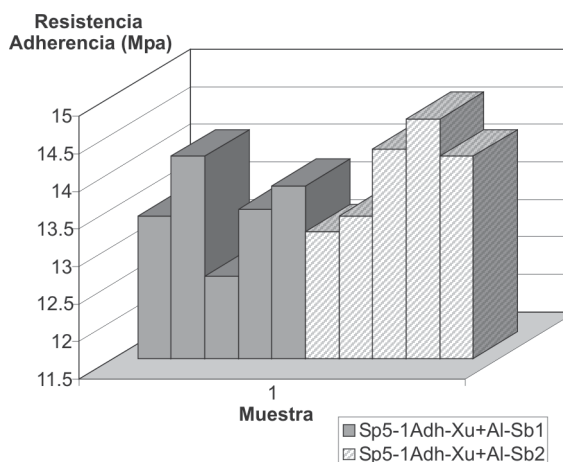


**Figura 3.** Variación de la resistencia a la adherencia de capa base para diferentes espesores



se realizó la deposición de recubrimientos multicapa de 380 µm con preparación superficial A1 (Sb1) y A2 (Sb2). Los resultados aparecen en la figura 4.

**Figura 4.** Variación de la resistencia a la adherencia de multicapa con espesor de capa 380 µm



#### 2.4 Ensayo de resistencia al esfuerzo cortante

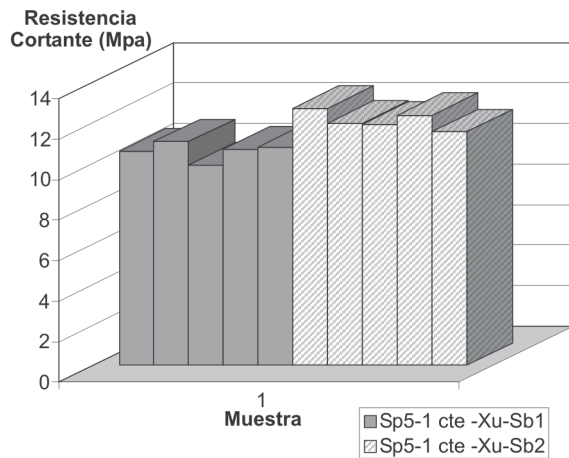
La resistencia al esfuerzo cortante se determina de acuerdo con el grado de perfil de rugosidad del sustrato, golpeando con arena de dos granulometrías diferentes A1 (Sb1) y A2 (Sb2). La unión de las muestras se hizo por medio del adhesivo producto 319 Loctite, utilizado en el ensayo de adherencia, el cual presenta una resistencia a la aplicación de un esfuerzo cortante de 210 kg/cm<sup>2</sup>. Para asegurar la unión, se aplicó una carga constante de 1.000 g. Las mordazas requeridas para el ensayo de resistencia al esfuerzo cortante fueron construidas de acuerdo con las especificaciones de la norma técnica ASTM F1044-87. El montaje de las mordazas en la máquina universal de ensayos se muestra en la figura 5; este ensayo se realizó a una velocidad de 0,78 mm/min.

Las figuras 6 y 7 muestran los resultados del ensayo de resistencia al esfuerzo cortante de la capa base para limpieza con diferentes tipos de arena y espesores; la figura 8 muestra los resultados del ensayo de resistencia al esfuerzo cortante de la multicapa.

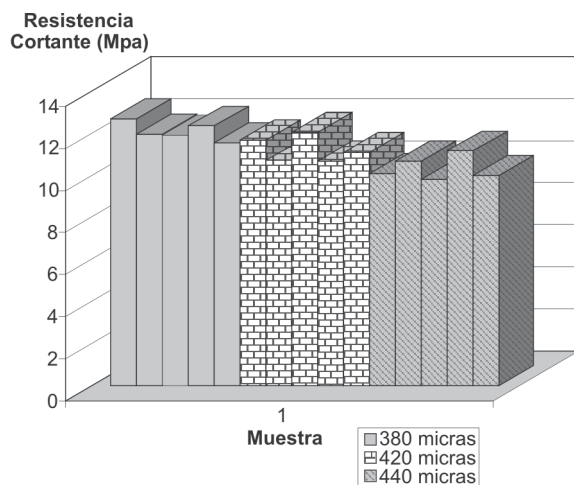
**Figura 5.** Mordazas para ensayo de resistencia al esfuerzo cortante



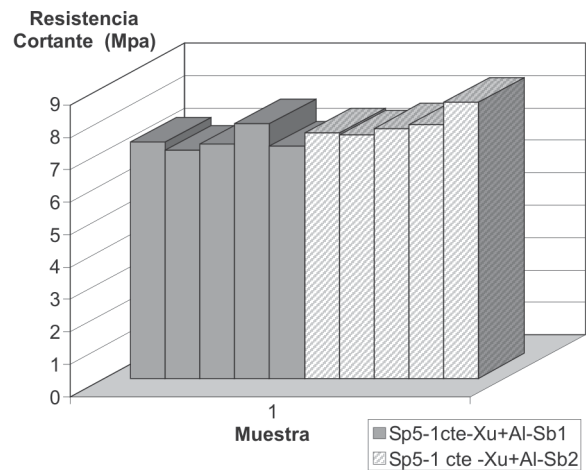
**Figura 6.** Variación de la resistencia al esfuerzo cortante de la capa base con espesor 380 µm



**Figura 7.** Variación de la resistencia al esfuerzo cortante de capa base para diferentes espesores



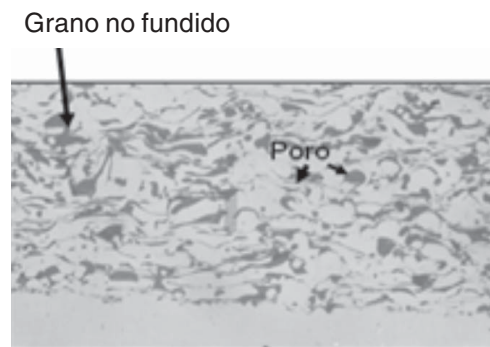
**Figura 8.** Variación de la resistencia cortante de multicapa con espesor 380 µm



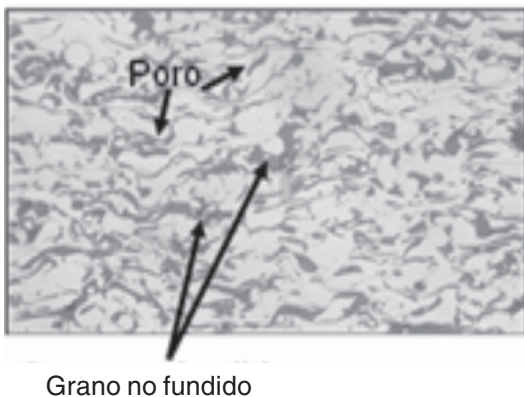
### 2.5 Análisis metalográfico

Para hacer este análisis se seleccionaron muestras en dirección transversal a la superficie del recubrimiento (norma técnica ASTM 1092-03); inicialmente, el análisis se efectuó para diferentes espesores de capa base y luego con capa de acabado. Las muestras fueron tomadas, pulidas, atacadas y posteriormente observadas en un microscopio Olympus PME3 a 200X. Las figuras 9, 10 y 11 muestran las metalografías de la capa base para diferentes espesores; las figuras 12, 13 y 14 presentan el análisis metalográfico de multicapa para diferentes espesores.

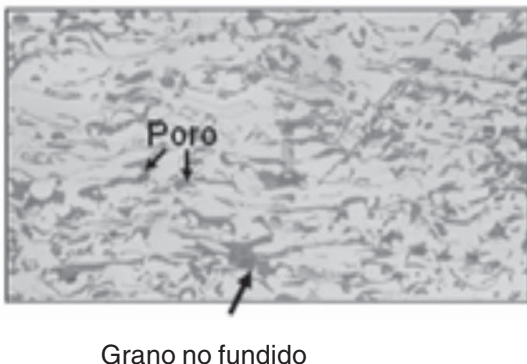
**Figura 9.** Micrografía recubrimiento de capa base 380 µm, 200X



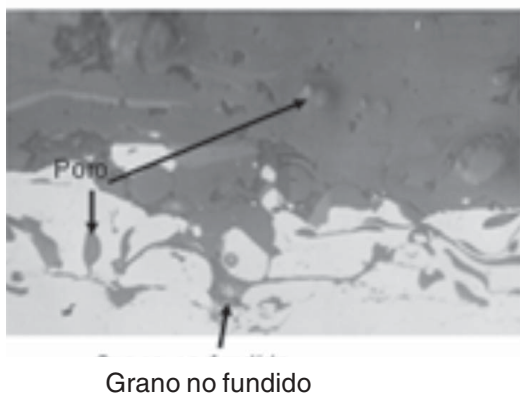
**Figura 10.** Micrografía recubrimiento de capa base 420µm, 200X



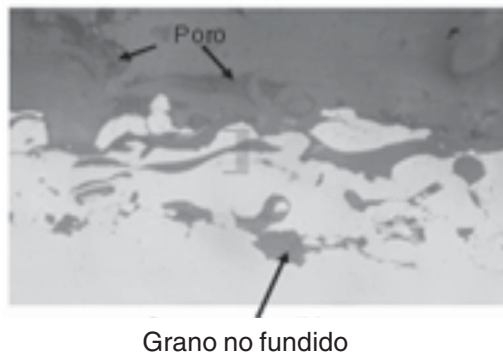
**Figura 11.** Micrografía recubrimiento de capa base 440 µm, 200X



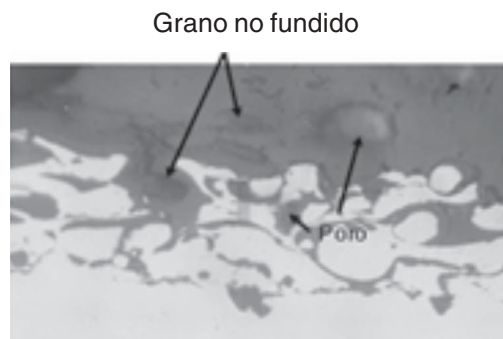
**Figura 12.** Micrografía en borde de probeta recubrimiento multicapa 250 µm, 200X



**Figura 13.** Micrografía interfase recubrimiento multicapa, 300 µm, 200X



**Figura 14.** Micrografía interfase recubrimiento multicapa, 380 µm, 200X



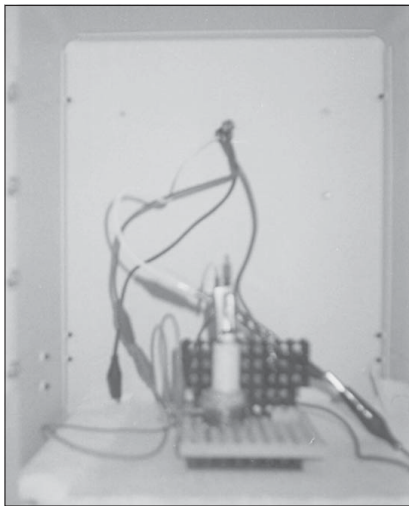
El porcentaje de porosidad para diferentes espesores de capa base fue determinado de acuerdo con lo expuesto en la norma técnica ASTM 2109-01; las probetas fueron cortadas y preparadas según las sugerencias de la norma ASTM 1092-03; la selección del espesor máximo se definió con base en los resultados obtenidos mediante la porosidad del recubrimiento.

### **2.6 Evaluación de la resistencia a la corrosión por la técnica espectroscopía de impedancia electroquímica**

La técnica de impedancia utilizada en la corrida de las pruebas fue de tres electrodos. Los datos obtenidos son confiables y pueden ser tomados en cualquier momento durante el tiempo que el sistema sea expuesto a determinado ambiente; además, el valor de la permeabilidad del recubrimiento calculada

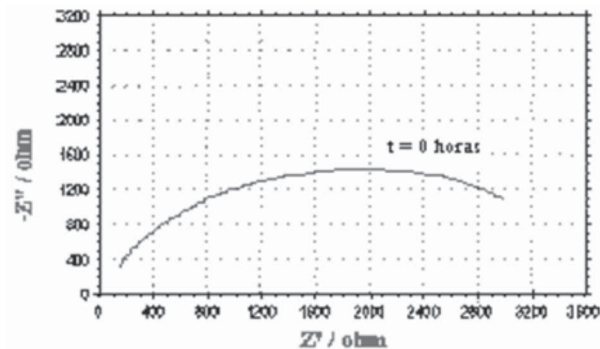
a partir de la capacitancia es acertado mediante este método. Para la evaluación de las impedancias se diseñó una celda electroquímica de tres electrodos, con un área efectiva para el electrodo de trabajo de 1,26 cm<sup>2</sup>. Para la determinación de la impedancia se empleó una celda electroquímica, mostrada en la figura 15.

**Figura 15.** Diagrama de la celda de impedancia electroquímica

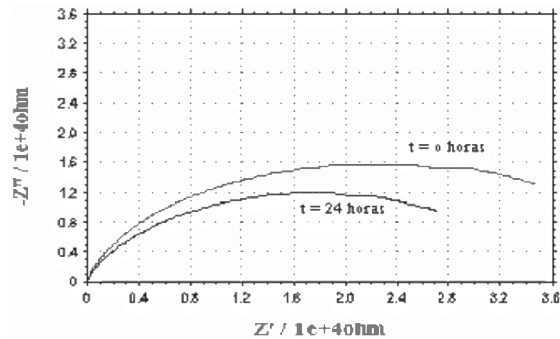


Cada corrida fue realizada simultáneamente con inspección visual y calibración del equipo, de acuerdo con la norma ASTM G3-89. El electrolito consistió en una solución de NaCl al 3% en peso y los electrodos referencia de plata-cloruro de plata y el contra electrodo de acero inoxidable 304. Dado que la corriente a medir era muy pequeña, se tuvieron en cuenta los cuidados para la protección electromagnética empleando una Jaula de Faraday. Los parámetros de prueba fueron los siguientes: frecuencia inicial: 0,01 Hz, frecuencia final: 10 Hz, puntos por década: 12, amplitud de la señal: 30 m. La figura 16 muestra la gráfica de espectroscopía de impedancia electroquímica para la capa base; la figura 17 muestra la gráfica de espectroscopía de impedancia electroquímica de la multicapa, en dos tiempos diferentes.

**Figura 16.** Espectroscopía de impedancia electroquímica del sistema capa base



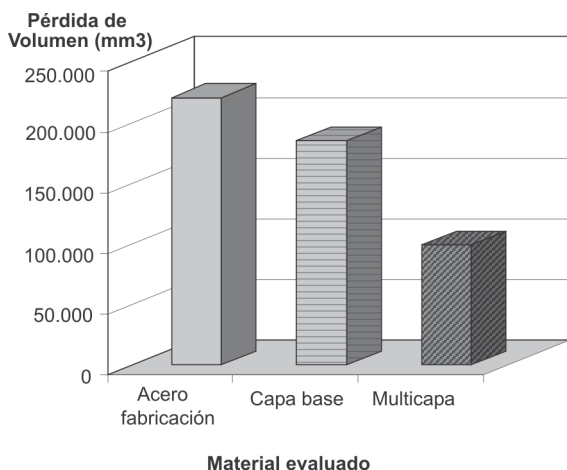
**Figura 17.** Espectroscopía de impedancia electroquímica del sistema multicapa



### 2.7 Evaluación de la resistencia al desgaste

Se efectuó una comparación de la pérdida de volumen (norma ASTM G65-00) de las capas depositadas y del acero inoxidable, el cual se utiliza como material base de las bombas. Previamente se procedió a realizar la caracterización y preparación de la arena de trabajo para el ensayo, siguiendo la recomendación de la norma AFS 50/70. El procedimiento elegido para caracterizar el recubrimiento es el B (Pawlowski, 1995), que es un ensayo adecuado para materiales resistentes al desgaste; éste se efectuó bajo los siguientes parámetros del ensayo: distancia recorrida por el disco abrasivo: 1.436 m; número de revoluciones: 2.022,5 rpm; carga aplicada: 3.790 kg. La figura 18 muestra la pérdida de volumen de las capas depositadas y del acero inoxidable 304.

**Figura 18.** Relación de pérdida de volumen



### 3. Análisis de resultados

La tabla 2 muestra los resultados del ensayo de adherencia para diferentes espesores de la capa base. Se presentó un incremento de 0,24 Mpa en la adherencia de las probetas preparadas superficialmente con arena A2 (Sb2), en comparación con la A1 (Sb1); igualmente se presentó una diferencia de resistencia de 0,56 Mpa entre las capas de 380 y 420  $\mu\text{m}$  (disminución del 3,56%), y una diferencia de 0,6 Mpa entre las capas de 380  $\mu\text{m}$  y 440  $\mu\text{m}$ , que representa una disminución de resistencia del 3,83%.

**Tabla 2.** Resultados del ensayo de resistencia adherencia para diferentes espesores de capa base

Método de preparación superficial	Espesor (micras)	Resistencia adherencia promedio (Mpa)	Coefficiente de variación (%)
Arena A1 (Sb1)	380	16,01Mpa	5,0
Arena A2 (Sb2)	380	16,25 Mpa	5,0
Arena A2 (Sb2)	420	15,69 Mpa	4,9
Arena A2 (Sb2)	440	15,65 Mpa	4,7

La tabla 3 muestra los resultados del ensayo de adherencia para la multicapa, donde se presentó una diferencia de resistencia a la adherencia de 0,46 Mpa. La variación del ensayo realizado aumenta la confiabilidad de los resultados.

**Tabla 3.** Resultados de ensayo de resistencia adherencia multicapa

Método de preparación superficial	Espesor (micras)	Resistencia adherencia promedio (Mpa)	Coefficiente de variación (%)
Arena A1 (Sb1)	380	13,5Mpa	4,9
Arena A2 (Sb2)	380	13,96 Mpa	4,6

La tabla 4 muestra los resultados del ensayo de resistencia al esfuerzo cortante de la capa base. Se presentó una diferencia de resistencia 0,85 Mpa entre las capas de 380 y 420  $\mu\text{m}$  (disminución del 7,56%). Además, existe una diferencia de 1,74 Mpa entre las capas de 380 y 440  $\mu\text{m}$  (una disminución de resistencia del 16,81%). Esto significa que a medida que se incrementa el espesor, la resistencia al esfuerzo cortante disminuye. La tabla 5 muestra los resultados del ensayo de resistencia al esfuerzo cortante para la multicapa; puede determinarse que las mayores resistencias al cortante de los recubrimientos base y multicapa se obtuvieron mediante la preparación superficial con la arena A2 (Sb2). La variación del ensayo realizado permite tener confiabilidad en los resultados.

**Tabla 4.** Resultados de ensayo de resistencia al esfuerzo cortante capa base a diferentes espesores

Método de preparación superficial	Espesor (micras)	Resistencia esfuerzo cortante	Coefficiente de variación (%)
Arena A1 (Sb1)	380	10,60 Mpa	4,6
Arena A2 (Sb2)	380	12,09 Mpa	3,9
Arena A2 (Sb2)	420	11,24 Mpa	5,0
Arena A2 (Sb2)	440	10,35 Mpa	5,5

**Tabla 5.** Resultados de ensayo de resistencia esfuerzo cortante de multicapa

Método de preparación superficial	Espesor (micras)	Resistencia esfuerzo cortante	Coefficiente de variación (%)
Arena A1 (Sb1)	380	7,31 Mpa	5,0
Arena A2 (Sb2)	380	7,81 Mpa	5,0



De acuerdo con estos resultados se decidió tratar superficialmente las probetas de los ensayos de desgaste abrasivo, impedancia electroquímica, metalografía y estimación de porosidad. Con la arena A2 (Sb2) se presentó la mayor resistencia a adherencia y resistencia al esfuerzo cortante; el entrelazado mecánico entre las asperezas del depósito y del sustrato condujo a un aumento de la adherencia mecánica.

Las micrografías del recubrimiento de la capa base, la multicapa y la interfase entre éstas, revelaron una microestructura compuesta por granos no fundidos, óxidos y poros. Estos defectos disminuyen la adherencia entre la capa base y la capa de acabado.

Para recubrimientos de capa base de diferentes espesores (380, 420 y 440  $\mu\text{m}$ ) el porcentaje de porosidad es del 15%; en consecuencia, puede afirmarse que este último no varía en función del incremento del espesor. Partiendo de este hallazgo se depositaron recubrimientos multicapa de 380  $\mu\text{m}$ ; así se determinó que estos presentaban un porcentaje de porosidad del 5% en la capa de acabado. El porcentaje de porosidad de los recubrimientos aplicados por rociado térmico por combustión, es del orden de 7 al 15% debido a la velocidad de deposición de las partículas y al combustible utilizado (Pawlowski, 1995).

En la figura 16 se observa el espectro de Nyquist efectuado al recubrimiento de capa base. Para conocer el valor de resistencia a la transferencia de carga, los datos tuvieron que extrapolarse a valores de frecuencias menores. Los valores calculados para el circuito equivalente a un tiempo cero (inmediatamente después de sumergida la muestra en el electrolito), fueron: Re: 1,67  $\Omega$ ; Rtc: 3.798  $\Omega$ ; C: 52,47  $\mu\text{F}$ . El valor de la capacitancia es muy alto; se presenta en función de la gran porosidad y el elevado porcentaje de agua que migra hacia el interior del recubrimiento, inmediatamente después de sumergir el recubrimiento en el electrolito.

En la figura 17 se observa el espectro de Nyquist para el sistema multicapa a diferentes tiempos de exposición, así:

$t = 0$  horas, Re: 1,67  $\Omega$ , Rtc: 43.998,33  $\Omega$  y la C: 16,22  $\mu\text{F}$ .

$t = 24$  horas, Rtc: 35.798,34  $\Omega$  y la C: 21,80  $\mu\text{F}$ , Re: 1,67  $\Omega$ .

Inicialmente la capacitancia del recubrimiento es baja y luego se incrementa, debido a la tendencia del recubrimiento a absorber agua. En el caso analizado, el cálculo de la permeabilidad al agua del recubrimiento multicapa señala que en un tiempo de 24 horas, el porcentaje de permeabilidad es del 6,74%. Así, el sistema presenta una elevada permeabilidad al paso del vapor de agua, propia de su porosidad.

De acuerdo con los resultados de volumen perdido del ensayo, la multicapa presentó la mayor resistencia al desgaste en comparación con el acero inoxidable (véase tabla 6). La capa base presenta mejor resistencia al desgaste que el acero inoxidable; esta característica es importante en caso de presentarse un fenómeno de desgaste abrasivo.

**Tabla 6.** Relación de pérdida de volumen para los materiales evaluados

Material evaluado	Promedio pérdida de volumen ( $\text{mm}^3$ )	Coefficiente de variación (%)
Inoxidable 304	219,754	3,2
Capa base	184,218	2,11
Multicapa	98,88	3,01

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

- La preparación superficial por chorreado con arena (*sand blasting*) presentó el grado de limpieza y el perfil de rugosidad requerido para depositar recubrimientos por rociado térmico. Comparado con los resultados de preparación con pulidora y lija, el chorreado con arena resultó ser el método de preparación superficial más adecuado; con esta técnica se puede tener un control riguroso de los parámetros del proceso.

- El perfil de rugosidad y grado de limpieza óptimos para hacer recubrimientos por rociado térmico se alcanzaron en las probetas preparadas superficialmente con la arena A2 (Sb2). Las probetas preparadas por medio de este tipo de arena, presentaron los mayores valores de resistencia a la adherencia y resistencia al esfuerzo cortante de la capa base y la multicapa, debido al grado de homogeneidad de la rugosidad obtenida.
- Cuando se aumentó el espesor de capa base de la multicapa de 380 a 440  $\mu\text{m}$ , se presentó una disminución de la resistencia a la adherencia del 3,83% y la resistencia al esfuerzo cortante disminuyó el 16,81%. La capa base presentó un 15% de porosidad, mientras que la capa de acabado un 5%; esta situación incide notoria y negativamente en las propiedades mecánicas y en la resistencia a la corrosión del recubrimiento.
- Mediante micrografías a diferentes espesores, se reveló que la capa base generalmente presenta granos no fundidos, poros y óxidos; en la capa de acabado predominaron los granos no fundidos y poros.
- Debido a la alta porosidad encontrada y los resultados obtenidos en el ensayo de impedancia, el recubrimiento presenta muy baja resistencia

a la corrosión y por tanto un elevado porcentaje de permeabilidad al vapor de agua. Por tanto el recubrimiento no es adecuado para su utilización en sellos mecánicos de bombas, circunstancia en la cual se requiere resistencia a la corrosión.

- La resistencia al desgaste de la capa base y de la multicapa es mayor que la del acero inoxidable 304, que es el material utilizado en sellos mecánicos de bombas.
- Se recomienda evaluar diferentes sellantes aplicados sobre la multicapa de Ni (88,5%) Al (6%) Mo (5,5%) /  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (96%)  $\text{TiO}_2$  (4%), para verificar con cual de ellos se disminuye la tasa de transferencia de iones hacia el interior del recubrimiento.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Walter Torres, Decano de la Facultad de Química de la Universidad del Valle, por su apoyo y recomendaciones en los ensayos electroquímicos. Además se agradece a Juan Diego Pardo, de la compañía Sager S.A., por la colaboración durante el proyecto. Finalmente, se agradece a Federico Sequeda, director del Centro de Investigación de Materiales (CIM) de la Universidad del Valle, por la capacitación sobre el manejo de equipos de tribología y análisis de superficies.

---

**Referencias bibliográficas**

---

- [1] GALVIS F., LATORRE G., (2001). *Evaluación de la calidad de recubrimientos aplicados mediante rociado térmico*, ECOPETROL, Instituto Colombiano de Petróleo
- [2] PAWLOWSKI L. (1995). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, John Wiley & Sons, England.
- [3] MCNAUGHTON K. J. (1992). *Bombas*, Mc Graw Hill, México, pp. 327-335
- [4] AMERICAN WELDING SOCIETY, (1985). *Thermal Spraying Practice, Theory and Application*. International Standard Book Number: 0-87171-246-6, Miami Florida, United States of America.
- [5] ASTM D 4417-84. Standard Test Method for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel.
- [6] ASTM E11- 87. Standard Specification for Wire-cloth Sieves for Testing Purposes.
- [7] ASTM C633-01. Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Flame Sprayed Coatings.
- [8] ASTM F1044-87. Standard Test Method for Shear Testing of Porous Metal Coatings.
- [9] ASTM E 1092-03. Standard Guide for Metallographic Preparation of Thermal Spray Coatings.
- [10] ASTM E 2109-01. Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings.
- [11] ASTM G3-89. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.
- [12] ASTM G65-00. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand Rubber Wheel Apparatus.