

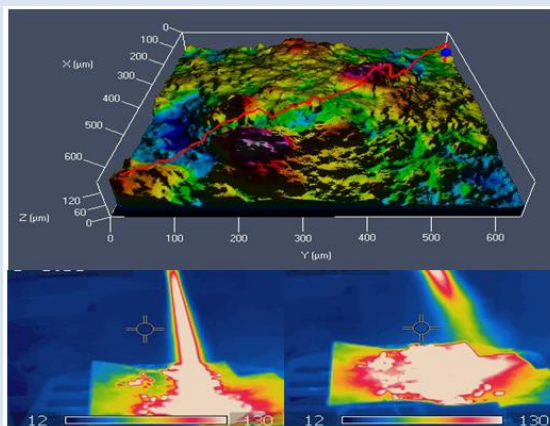
APROXIMACIÓN DEL MÉTODO TAGUCHI PARA EL ESTUDIO DE RECUBRIMIENTOS DE ÓXIDO DE CROMO APLICADOS POR PROYECCIÓN TÉRMICA A LA LLAMA

Luis Miguel Méndez¹, Jhon Jairo Olaya²

1: Estudiante de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Cra 30 N°45-03 Ed. 411 Of. 205

2: Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Cra 30 N°45-03 Ed. 407 Of. 208

*e-mail: lmendezm@unal.edu.co



RESUMEN

En este trabajo se utilizó un diseño experimental de Taguchi de arreglo ortogonal L9 con tres réplicas R1, R2 y R3, que definió la combinación de parámetros a utilizar para aplicar recubrimientos de óxido de cromo y evaluar cual combinación de parámetros es mejor en la obtención de bajos coeficientes de fricción y bajas corrientes de corrosión, con el fin de utilizar estos parámetros en la aplicación de recubrimientos que sean útiles para la recuperación de piezas de la industria naval. Los parámetros seleccionados para este estudio, corresponden a las presiones de los gases precursores: oxígeno, acetileno y aire, cada uno con tres niveles (bajo, medio y alto). Los parámetros de respuesta están en el coeficiente de fricción (CDF) y la corriente de corrosión (I_{CORR}). Estos parámetros fueron analizados a través de un análisis de varianza (ANOVA), de los datos obtenidos y de la relación S/R (Señal / Ruido). Dentro de los experimentos se lograron mínimos de los parámetros de respuesta como: $CDF=0,03613$ en el experimento E3 e $I_{CORR}=4,10E-6$ A para el experimento E7. La obtención de combinaciones optimizadas se fundamentó en el análisis de la relación S/R recomendado por el método Taguchi, del cual se establecieron las siguientes combinaciones de parámetros: presión de oxígeno en 3,65 Bar, presión del acetileno en 0,83 Bar y presión de aire en 7 psi, para obtener bajos CDF y oxígeno en 3,65 Bar, presión del acetileno en 0,55 Bar y presión de aire en 15 psi, para obtener bajas I_{CORR} . Se determinó también que el parámetro que tiene mayor influencia en los parámetros de respuesta es el acetileno.

Palabras Claves: Proyección Térmica, Óxido de Cromo, Diseño Robusto, Método Taguchi, Corrosión, Coeficiente de Fricción

APPROACHING OF TAGUCHI METHOD TO STUDY CHROMIUM OXIDE COATING APPLIED BY FLAME THERMAL SPRAY

ABSTRACT

In this article, Taguchi design of experiments L9 orthogonal array with three replica R1, R2 and R3, have been used to define the parameter combination that can be used to produce chromium oxide coatings and evaluate which parameter selection was the better to obtain low coefficient of friction and low corrosion current, with the purpose to use this parameters to produce coatings useful to recovery of naval pieces. Process parameters selected for these studies are: gases process pressure: oxygen, acetylene and air, all of them with three level (low, medium and high levels). The response parameters of flame thermal spray coating produced are coefficient of friction (COF) and corrosion current (I_{CORR}). The analyses of the raw data and Signal-to-Noise (S/N) ratio of the response parameters have been performed using analysis of variance (ANOVA). Experimental minimum results are: E3 experiment with CDF value of 0,03613 and E7 experiment with I_{CORR} value of 4,10E-6 A. The optimal process parameters are predicted on the basis of analyses of S/N ratio recommended by Taguchi method, with this obtain that a combination of parameters: 3,65 Bar pressure of oxygen, 0,83 Bar pressure of acetylene and 7 psi pressure of air, produce the lower coefficient of friction (COF) and 3,65 Bar pressure of oxygen, 0,55 Bar pressure of acetylene and 15 psi pressure of air, produce the lower corrosion current (I_{CORR}). The significant process parameter is the acetylene pressure.

Keywords: Thermal Spray, Chromium oxide, Robust Design, Taguchi Method, Corrosion, Friction coefficient

1. INTRODUCCIÓN

Los recubrimientos por proyección térmica a la llama han sido utilizados e investigados hace varias décadas y se han venido desarrollando a través de la implementación, la optimización y la experimentación de diversas técnicas de proyección [1-4], de hecho, una gran variedad de materiales han sido utilizados para recubrir a otros, dentro de estos están: metales, cerámicos, plásticos y compuestos, sobre diversos sustratos [5,6].

Aunque con el tiempo, el desarrollo de nuevas técnicas de proyección térmica ha sido importante, hoy en día se utiliza la proyección térmica a la llama en un alto porcentaje, posiblemente por el elevado capital de trabajo que se requiere en la implementación de técnicas de más alta tecnología o a los costos de la capacitación necesaria para el personal de planta y supervisores, en el uso de equipos de mayor complejidad tecnológica [2,3 y 7].

La industria naval Colombiana ha llegado a adquirir equipos de proyección térmica a la llama, dadas las expectativas de utilizar esta tecnología en la recuperación de partes, que responden a diferentes procedencias de fabricación y que en muchos casos ya están obsoletas o discontinuadas, en el caso de que aún existan los fabricantes. Con esta perspectiva, resulta importante saber cómo aplicar recubrimientos con esta técnica, para la recuperación de piezas de la industria naval, que están sometidas a ambientes corrosivos, a desgaste abrasivo y erosivo y a temperaturas elevadas, según el servicio que presten dentro de la embarcación y el ambiente al que estén sometidas, durante su desempeño.

Dentro de los recubrimientos que podrían ser utilizados con los propósitos mencionados, los recubrimientos cerámicos proveen buena resistencia al desgaste, a la corrosión, a la erosión y al calor, aunque su capacidad de adherencia sobre metales dependa del perfil de anclaje dado por la textura y rugosidad superficial y por la acomodación de la pareja sustrato – recubrimiento, en sus coeficientes de expansión térmica, como lo mencionan Saravana et al. [1] y González et al. [6]. Para entender el comportamiento de los recubrimientos ante el desgaste y a procesos de corrosión, se determinaron el coeficiente de fricción (CDF), el cual está relacionado con los fenómenos de contacto, por lo que establece las condiciones de los fenómenos de

desgaste abrasivo, mientras que la corriente de corrosión está directamente ligada con la tasa o velocidad de corrosión, que es uno de los indicadores de la resistencia de un material a la corrosión. Es por esto, que un bajo CDF y una baja I_{CORR} son importantes para las propiedades tribológicas y de resistencia a la corrosión del material con el recubrimiento aplicado [6-11].

Diferentes autores han trabajado con recubrimientos de óxido de cromo, aplicado como película delgada o gruesa, sobre una gran variedad de sustratos. Liu et al [11], trabajaron con este recubrimiento sobre acero inoxidable austenítico 316L, a través de una técnica mezclada de cromado y oxidación por plasma, con la cual lograron propiedades como la formación de óxidos con planos cristalinos preferenciales como (1 1 0), (2 0 2), (3 0 0) y (3 1 2) y una estructura de coliflor. Estos planos también son corroborados por Cellard et al [12]. Liu et al [11] quienes también encontraron propiedades como una E_{corr} de -137 mV y corrosión por picadura en potenciales entre 651 y 892mV, según sus experimentos, así como i_{corr} de 0,0132 μ A/cm². También obtuvieron coeficientes de fricción entre 0,1 y 0,6, a través de ensayos de bola sobre disco, mientras que Ahn y Kwon [13], obtuvieron coeficientes de 0,12 en una prueba recíprocante en seco.

En la búsqueda de poder aplicar recubrimientos, con un buen desempeño en las propiedades mencionadas, usar la técnica de diseño robusto de Taguchi puede permitir encontrar la influencia de algunos parámetros controlables durante el proceso, por lo que el análisis realizado sobre las presiones de los gases precursores del proceso de proyección térmica a la llama en el coeficiente de fricción superficial del recubrimiento y en la velocidad de corrosión que este permite, será útil en la construcción de un proceso adecuado para la recuperación de las piezas navales y el desempeño posterior de la misma, ya que los estudios previos en proyección térmica se enfocan en las técnicas de rociado por plasma y rociado de alta velocidad oxígeno combustible (HVOF), principalmente, sobre las que se han estudiado los efectos de la distancia de proyección y la relación aire-combustible, por lo que se vislumbró un camino para trabajar en este estudio [14].

El método de diseño robusto que propuso Taguchi en los años 60 del siglo pasado, nació como una

filosofía de calidad, para el mejoramiento de productos y procesos, cuando la misma se enfoca en las necesidades del cliente para mejorar estándares de fabricación de productos o de procesos y se lograba una mejor calidad [15]. Su enfoque está en diseñar un producto o proceso con la determinación de los niveles óptimos de los factores de diseño que produzcan el mejor desempeño de uno o más requerimientos, con la condición de que produzca el mínimo efecto del ruido, por lo que resulta ser una técnica ampliamente utilizada en diversas áreas [15]. La técnica es un proceso de múltiples etapas, el cual sigue cierta secuencia de experimentos para lograr mejorar el entendimiento del producto o proceso. Los arreglos ortogonales que utiliza, resultan ser un diseño factorial altamente fraccionado, sobre el cual se utiliza un ANOVA como técnica matemática de análisis, la cual se basa en mínimos cuadrados y la cual permitirá entender la influencia de cada factor, sobre la respuesta que se está estudiando [14,15].

El objetivo de este trabajo es determinar una combinación optimizada de parámetros del proceso: presiones de los gases precursores (oxígeno, acetileno y aire), que permitirá unas propiedades adecuadas para la recuperación geométrica y dimensional de las piezas en la industria naval, con el uso de la técnica de proyección térmica a la llama. Para llevar a cabo este estudio se prepararon cupones de material según un diseño experimental que se apoyó en las indicaciones del diseño robusto de Taguchi, con el que se orientaron los recubrimientos a experimentar (E1 a E9), con tres réplicas del experimento (R1, R2 y R3). Sobre estos recubrimientos producidos se realizó una caracterización estructural y una evaluación de la resistencia al desgaste y a la corrosión, con lo que se pudo determinar la influencia de los parámetros escogidos en las propiedades del estudio y combinaciones adecuadas para producir este tipo de aplicaciones.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Para este estudio se emplearon sustratos de bronce naval SAE 622 Tipo M (Cu 88,5%, Sn 6%, Zn 3,9%, Pb 1,1%, P, Nb, Cl, Fe y S), configurado en cupones de 25,4 mm de diámetro y 6mm de espesor. Para la producción del recubrimiento se utilizó polvo de óxido de cromo (99% óxido de cromo). La Figura 1 a) muestra el patrón de difracción de rayos

X (DRX) de los polvos de óxido de cromo y se aprecia una orientación mixta en los planos (1 0 4), (1 1 0), (2 0 2), (0 2 4), (1 1 6), (3 0 0) y (3 1 2) que hacen parte de la estructura romboédrica de acuerdo a la carta 00-038-1479. Estos resultados son coherentes con los trabajos de Cellard et al [12] y Liu et al. [11] quienes produjeron recubrimientos con óxido de cromo de composición estequiométrica Cr_2O_3 y en estructura cristalina romboédrica. El polvo presenta un tamaño promedio de partícula de 45 μm de diámetro, antes de ser proyectado y su denominación comercial es Metaceram 25050®. Se utilizó una capa intermedia que recomienda el fabricante del polvo, como capa liga, la cual se utiliza en aquellos recubrimientos que no son auto-adherentes y cuya composición reportada por el fabricante es de Ni+11%(Al, Mo) y su denominación comercial es Proxon 21021®. La Figura 1 b) presenta el espectro de DRX y se observan la fase de AlNi_3 , estructura cristalina CCC según la carta de referencia 03-065-0430 y la fase del Ni, que de acuerdo con la carta de referencia 00-004-0850, sus picos se encuentran ligeramente desplazados hacia la derecha con respecto a la fase AlNi_3 .

2.2 Equipos y pruebas

La composición química se determinó mediante fluorescencia de Rayos X (FRX) con un equipo marca Philips modelo MagixPro 2440, equipado con tubo de rodio a una potencia máxima de 4 KW y sensibilidad de 200 ppm, haciendo 11 barridos, para determinar la composición química del recubrimiento. La caracterización microestructural se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) en un equipo Panalytical X'Pert PRO MPD con Cu K_α de 1,540998 Å, trabajando a 45 KV y 40 mA, con un rango de barrido entre 5° y 80° (para los polvos) y entre 5° y 120° (para los recubrimientos), con paso de 0,02° en modo continuo, en la configuración Bragg Brentano. Para establecer la morfología del recubrimiento, se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) FEI QUANTA 200, con emisión por filamento de tungsteno y a 25 KV, analizando las imágenes producidas con electrones secundarios, con el mismo equipo se realizaron análisis de composición química elemental mediante espectroscopía de energía dispersiva (EED). Los ensayos de desgaste se realizaron con la técnica de bola sobre disco, con un Tribómetro marca Bruker modelo CETR-Apex usando una carga de 400 g a

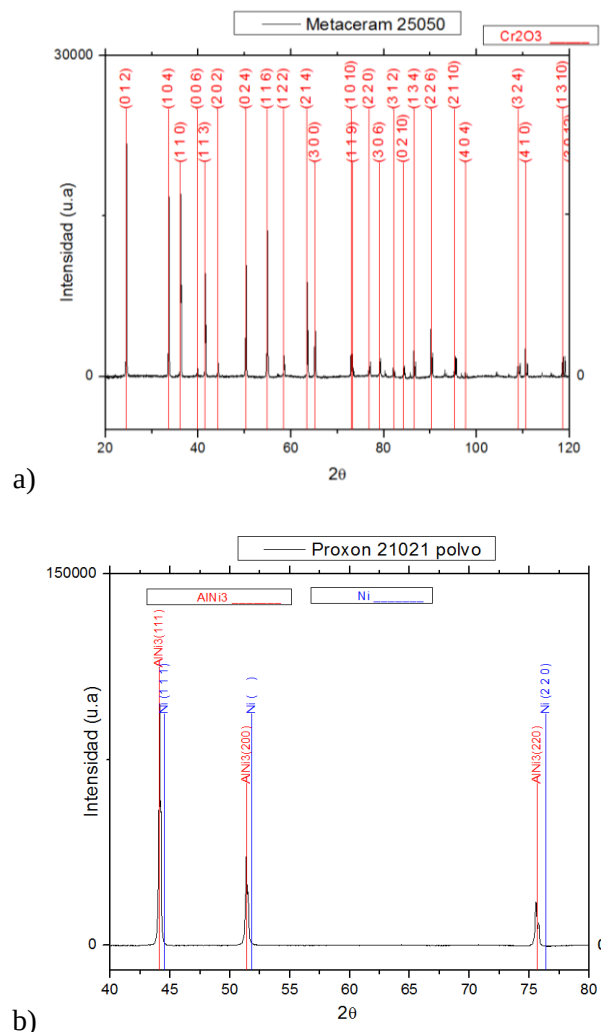


Figura 1. a) Difracción de Rayos X obtenida del polvo de óxido de cromo comercial, denominado Metaceram 25050® y b) del polvo de la capa liga, denominado Proxon 21021®.

una velocidad de rotación de 800 r.p.m. durante 8 minutos. Las pruebas de corrosión se realizaron mediante la técnica de polarización potenciodinámica con un potencióstato GAMRY 600 utilizando platino como contra-electrodo y calomel saturado (SCE) como electrodo de referencia, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM G5. Se usó un área de trabajo de 0,178 cm² que estuvo en contacto con un electrolito de NaCl al 3,5%. Las pruebas se realizaron con un barrido entre -0,3 y 0,4 V con respecto al potencial de reposo y con una variación de 0,5 mV/s, para la medición de la corriente de corrosión (I_{CORR}) y el potencial de corrosión (E_{CORR}). Las huellas de desgaste, del ensayo de bola sobre disco fueron analizadas mediante microscopía láser confocal

(MLC), con un equipo marca Zeiss referencia LSM 700, para establecer la morfología superficial del material depositado y los efectos de la fricción por contacto y posterior abrasión del material, durante el ensayo. Este equipo trabaja con un láser de estado sólido de 455 nm y 550 nm, con una potencia máxima de 2mW, resolución horizontal de 667 nm y resolución vertical de 290 nm. Con este equipo se calculó el parámetro de rugosidad promedio superficial (RSa) que corresponde a la altura promedio de todos los picos de la superficie examinada con láser.

2.3 Determinación de factores y sus niveles

Las variables independientes escogidas para este estudio fueron las presiones de los gases precursores (oxígeno, acetileno y aire), los cuales responden al fenómeno de combustión, aceleración de partículas, transferencia de energía y protección del proceso. Las variables dependientes para observación y estudio fueron el coeficiente de fricción y la densidad de corriente de corrosión. Se determinó que para evaluar las tendencias de manera confiable, los parámetros experimentales o variables independientes, tendrían tres niveles, los cuales se derivan de los valores recomendados por el fabricante para la aplicación de estos recubrimientos. La Tabla N°1 presenta los niveles de los factores y la Tabla N°2 muestra las condiciones recomendadas por el fabricante.

Con estos parámetros y niveles, se determinó trabajar con un arreglo ortogonal L9 y en la Tabla N°3 se presenta la combinación de experimentos en este diseño.

Para poder aplicar estos recubrimientos según el diseño experimental, se preparó el perfil de anclaje sobre el material en blanco, el cual tenía una rugosidad dada por el mecanizado con que se prepararon las probetas de $R_a = 4,5 \mu\text{m}$, ($R_z = 19,44 \mu\text{m}$ y $R_t = 21,08 \mu\text{m}$), las cuales fueron determinadas con un rugosímetro Hommel portátil. El perfil se modificó a través de una limpieza y un granallado con alúmina gruesa, según la experiencia, posterior a esto se revisó la rugosidad, la cual estaba en $R_a = 8,34 \mu\text{m}$, ($R_z = 50,54 \mu\text{m}$ y $R_t = 58,66 \mu\text{m}$). Posteriormente se aplicó la capa de liga, con un espesor entre 150 y 200 μm , lograda con 2 pasadas de deposición y según los parámetros recomendados de la Tabla N° 4, Castolin-Eutectic [16], obteniéndose una rugosidad de $R_a = 8,26 \mu\text{m}$,

(Rz=48,26 μ m y Rt=69,14 μ m). Esta capa liga es una aleación principalmente de níquel, que tiene un punto de fusión más bajo que el cerámico que se

depositará en los recubrimientos de esta investigación.

Tabla 1. Factores o parámetros y sus niveles para el diseño experimental.

Presión de Oxígeno [Bar]			Presión de Acetileno [Bar]			Presión de Aire Comprimido [PSI]		
Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
3,65	4	4,46	0,55	0,7	0,83	7	10	15

Tabla 2. Parámetros recomendados para la aplicación del polvo cerámico, según el fabricante.

Presión de Oxígeno [Bar]	Presión de Acetileno [Bar]	Presión de aire comprimido [Psi]	Módulo del sistema de proyección (SSM)	Distancia de proyección [mm]
4	0,7	7 -15	SSM 30	63 a 76

La presión de oxígeno se ajusta cuando está instalado el módulo que se utilizara, a través del uso de un manómetro calibrado al módulo utilizado. El módulo SSM 30 mejora la potencia calorífica del equipo y es recomendado para el depósito de recubrimientos cerámicos.

Tabla 3. Diseño de los experimentos realizados.

Presiones de los Gases Precursores [PSI]				
Experimento	Código	Oxígeno	Acetileno	Aire Comprimido
1	1 1 1	53	8	7
2	1 2 2	53	10	10
3	1 3 3	53	12	15
4	2 1 2	60	8	10
5	2 2 3	60	10	15
6	2 3 1	60	12	7
7	3 1 3	65	8	15
8	3 2 1	65	10	7
9	3 3 2	65	12	10

Tabla 4. Parámetros recomendados para la aplicación del polvo de la capa liga, según el fabricante [16].

Presión de Oxígeno [Bar]	Presión de Acetileno [Bar]	Presión de aire comprimido [PSI]	Módulo del sistema de proyección (SSM)	Distancia de proyección [mm]
4	0.7	7-15	SSM 10	150

La presión de oxígeno se ajusta después, cuando está instalado el módulo que se utilizara, a través del uso de un manómetro de succión calibrado al módulo utilizado. El módulo SSM 10 es recomendado para el depósito de recubrimientos metálicos o fusibles.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización estructural y química

La Figura 2 presenta los patrones de DRX para los diferentes recubrimientos depositados. Las señales corresponden a la estructura romboédrica del recubrimiento de óxido de cromo, la fase CCC del níquel y la fase CCC del compuesto AlNi_3 de la capa liga y la fase CCC del cobre del sustrato. Esta

figura además se corrobora con lo presentado en la Figura N°1, donde se muestran los análisis de los polvos utilizados para los recubrimientos y la capa liga y aunque no se presenta en la Figura N°1, el pico en $92,947^\circ$ coincide con un pico de la carta 00-004-0850 de Ni CCC, que estaba fuera del rango de la gráfica en la Figura N°1 b) y que en el recubrimiento se corre en 2θ por los esfuerzos residuales resultantes del proceso.

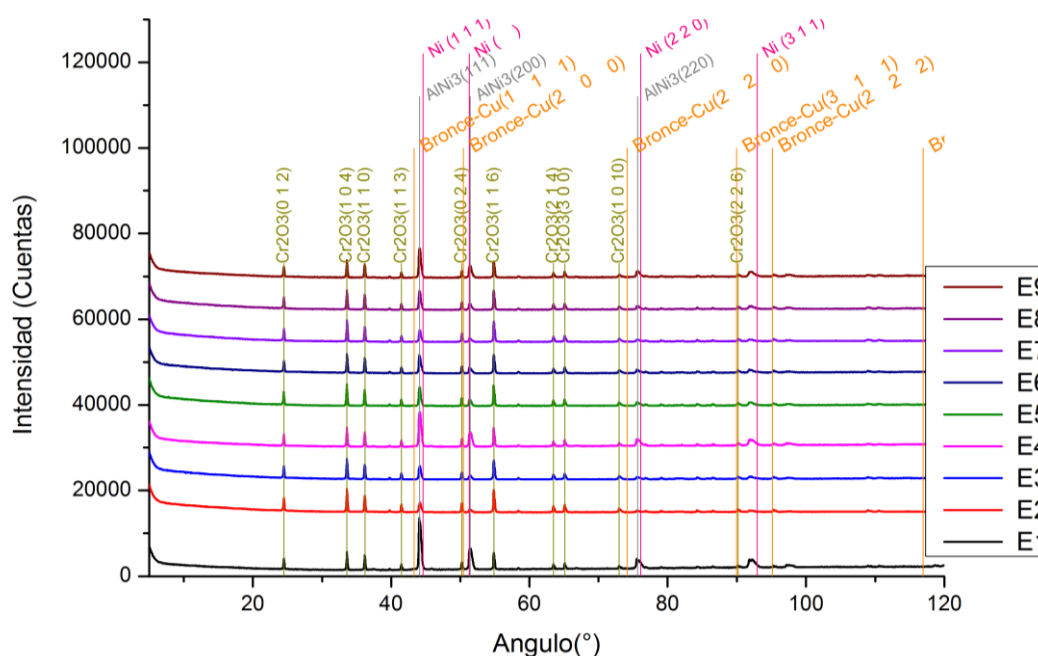


Figura 2. Difracción de rayos X obtenida para los diferentes experimentos llevados a cabo, con el recubrimiento de óxido de cromo, con capa liga, sobre bronce naval.

Los resultados de FRX mostraron que los elementos en mayor proporción fueron el Cr del recubrimiento que varía desde un 46,73% hasta un 70,74%, el Ni de la capa liga desde un 18,504% hasta un 60,964%, principalmente. También se encontraron porcentajes bajos de Mo y Al de la capa liga y Cu y Sn, que provienen del sustrato. Algunos de los recubrimientos evidencian mayor proporción de Cr lo que está relacionado con un mayor espesor de la capa, o lo que responde a los diferentes parámetros utilizados para la llama de la antorcha de acuerdo al diseño de experimentos utilizado. Los recubrimientos experimentales que tuvieron mayor proporción de Cr fueron en orden: E2, E3, E7 y E6.

La Figura N°3 a), presenta las fotomicrografías del recubrimiento E4, mediante MEB con electrones

retrodispersados, en donde se puede apreciar una región compacta con pocos defectos, que está relacionada con una composición química de cromo homogénea en el recubrimiento. En la Figura N°3 b), se observa la imagen del recubrimiento E4, mediante MEB con electrones secundarios, en la cual se hace un análisis de EED puntual, en el que se observa al cromo como elemento de mayor proporción con un 75,8%, acompañado de oxígeno con 14,6%, provenientes del recubrimiento, níquel con 7,1%, que revela la presencia de la capa ligante y carbono con 2,3% generado en la combustión del acetileno.

La Figura N° 4 presenta la morfología superficial de los recubrimientos E5, E3, E9 y E7, obtenida por MEB. De estas imágenes se puede observar una

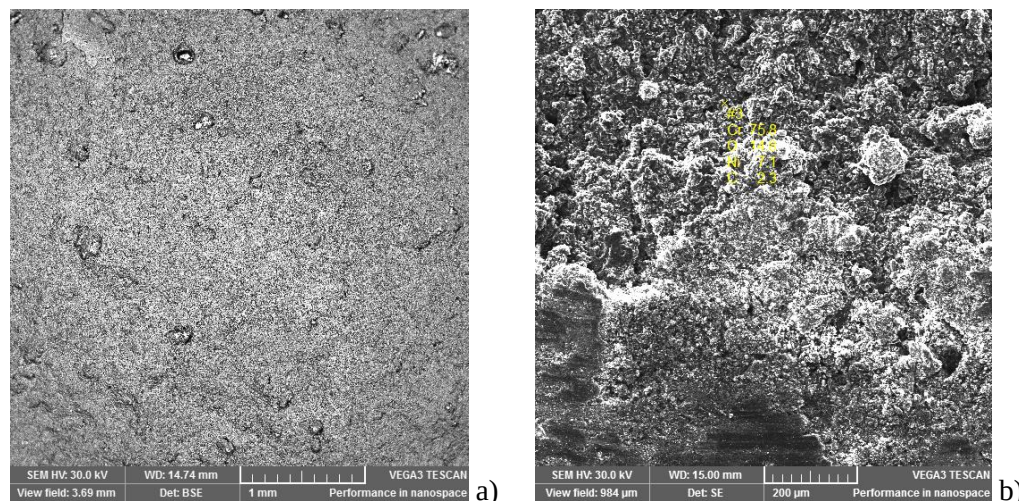


Figura 3. Fotomicrografías obtenidas a) Por Microscopía Electrónica de Barrido, con electrones retrodispersados 30 KV en modo de profundidad de campo. b) Por Microscopía Electrónica de Barrido, con electrones secundarios y análisis EED.

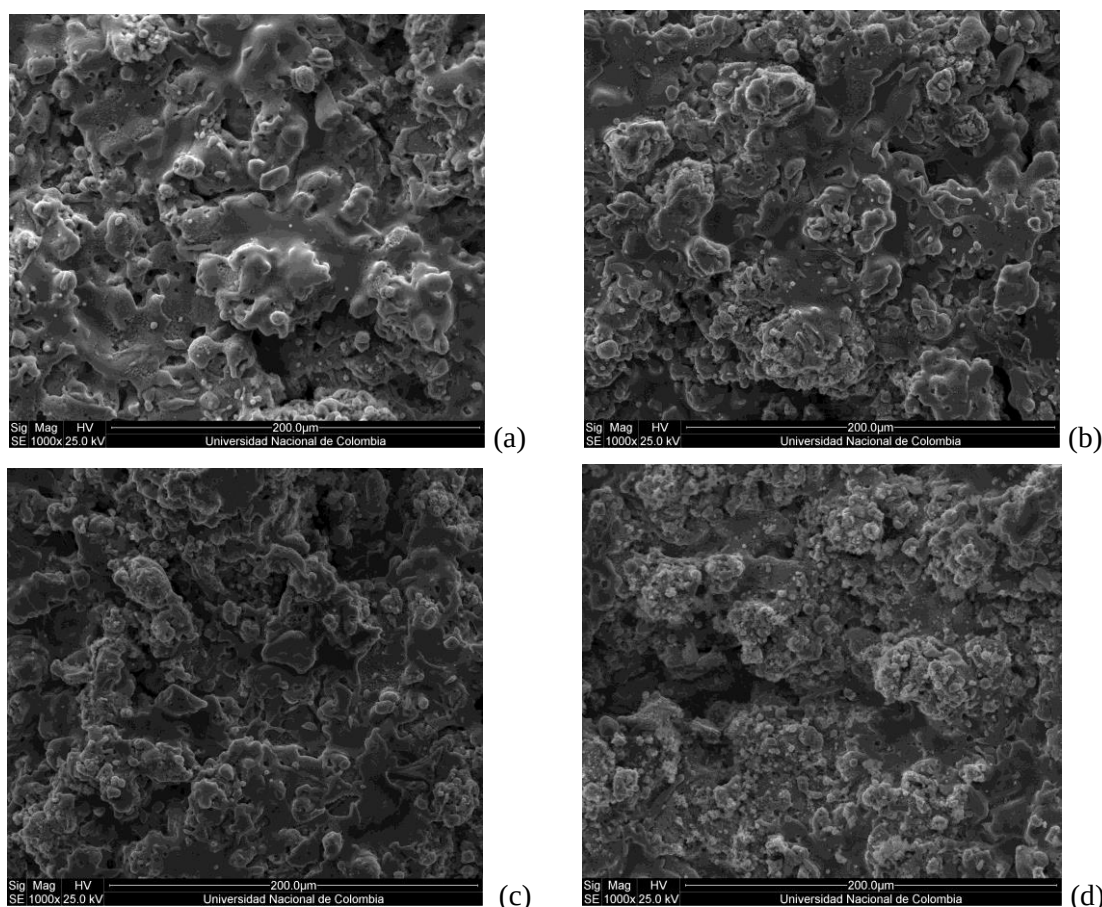


Figura 4. Fotomicrografías obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido del recubrimiento del experimento (a) E3 (CDF bajo) (b) E5 (CDF alto) (c) E7 (I_{CORR} bajo) y (d) E9 (I_{CORR} alto), con el recubrimiento de óxido de cromo, sobre capa liga. Imágenes logradas con electrones secundarios, con 25 KV y 1000X.

morfología lenticular, con las partículas de óxido de cromo compactas y deformadas que se han embebido desde la capa liga hasta la superficie del recubrimiento. Estas partículas en forma dispersa se depositaron con una temperatura inferior a la de fusión que no permite una importante difusión superficial de los átomos depositados. También se pueden observar algunas zonas con porosidad que se forman por la formación lenticular y las condiciones de depósito de las partículas de la capa liga y del óxido de cromo, que han producido una acumulación aleatoria de este defecto. Con la

variación en los flujos de los gases precursores se cambian las temperaturas en la llama generando en los recubrimientos producidos cambios importantes en la concentración de las partículas embebidas, porosidad y óxidos.

3.2 Caracterización de las propiedades de respuesta

La Tabla N° 5 presenta los resultados experimentales de las pruebas realizadas según el diseño experimental de Taguchi, de las propiedades de respuesta CDF, I_{CORR} y RSa.

Tabla 5. Resultados experimentales de las propiedades de respuesta CDF e I_{CORR} , promedio con desviación estandar. Se presentan también los valores de rugosidad RSa promedio del recubrimiento depositado.

Exp.	Código	CDF		RSa[μm]		I_{CORR} [A]	
		PROM	DESV	PROM	PROM	DESV	
E1	1 1 1	0,04023	0,032876	37,874	4,6e-6	1,56e-6	
E2	1 2 2	0,05688	0,037663	37,738	7,1e-6	1,97e-6	
E3	1 3 3	0,03613	0,02573	31,6065	7,4e-6	1,80e-6	
E4	2 1 2	0,05169	0,034896	36,290	5,3e-6	1,57e-6	
E5	2 2 3	0,1558	0,029746	37,6135	5,9e-6	4,07e-7	
E6	2 3 1	0,05594	0,040056	33,208	9,1e-6	8,93e-6	
E7	3 1 3	0,05954	0,032563	33,9365	4,1e-6	1,85e-6	
E8	3 2 1	0,06378	0,043066	36,744	2,4e-5	1,79e-5	
E9	3 3 2	0,05482	0,0356	34,423	3,0e-5	4,56e-5	

Los resultados de corriente de corrosión resultan del análisis de las curvas de polarización con la técnica de extrapolación por Tafel. Algunas de estas gráficas se presentan en la Figura N°5 en donde se aprecian las densidades de corrosión desde $4,1 \text{ E-6}$ a $3,0 \text{ E-5 A/cm}^2$ y las menores densidades de corrosión promedio en la muestra E7 ($4,1 \text{ E-6 A/cm}^2$). Como podemos ver en la Tabla N°5, el valor mínimo promedio de I_{CORR} está en el rango de E7, aunque también se encontró el valor mínimo de I_{CORR} de $1,95 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ para la combinación experimental E6-R3, con un E_{CORR} de $-231,5 \text{ mV}$.

Respecto a las pruebas de bola sobre disco resulta particular que los recubrimientos logrados con mayor acetileno y menor oxígeno tengan menores valores de CDF con valores del orden de 0,03613 en promedio. La Figura N°6 muestra las imágenes MLC de las huellas de desgaste. Se puede observar que las partículas en el fenómeno de contacto se fueron separando y rodando en la intercara entre la

bola y el recubrimiento, produciendo un fenómeno de deformación plástica por la rodadura de las partículas bajo la carga leve que se impuso en el ensayo, se evidenció un fenómeno de aplastamiento en la zona de contacto, la cual se observa más plana en el plano de corte mostrado, debajo de la imagen 3D. En la Figura N°6, también se muestra que el recubrimiento tiene una variación superficial muy alta, ya que se hicieron contactos parciales de la bola, lo que hizo que la huella no fuera uniforme y continúa durante todo el trayecto que realizó y que se repite durante el ensayo. Ahora bien, en la Tabla N° 5 también se aprecian los valores de rugosidad promedio RSa, los cuales varían desde 31 a $37 \mu m$. Se aprecia que los menores valores de rugosidad ($31,6065 \mu m$) se relacionan bien con el recubrimiento depositado con el menor valor del coeficiente de fricción (muestra E3). Generalmente el coeficiente de fricción y las tasas de desgaste aumentan en presencia de superficies rugosas

debido a que las puntas de las crestas se convierten en concentradores de esfuerzos y se disminuye el

área de contacto de los dos materiales.

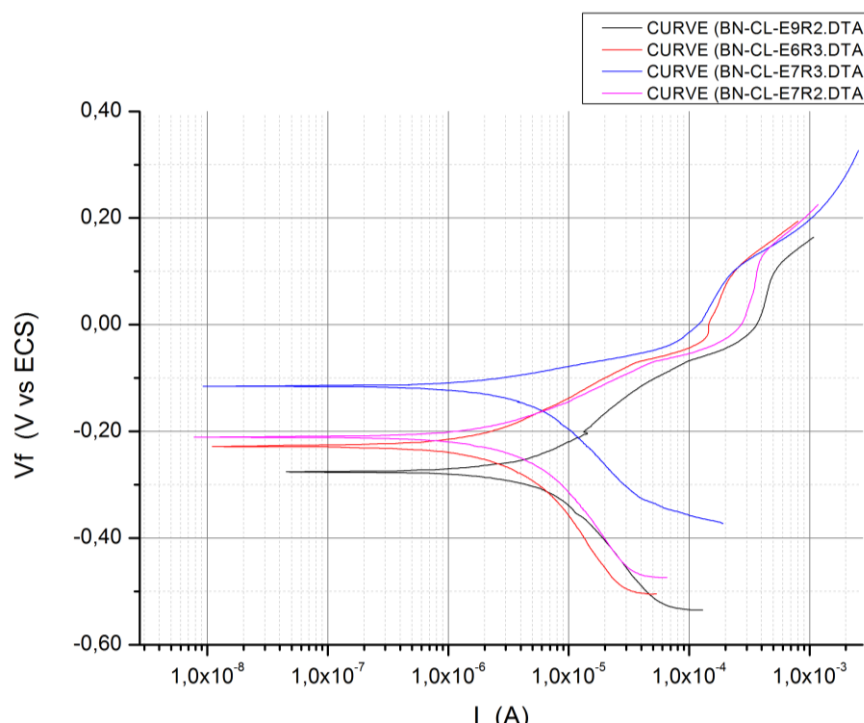


Figura 5. Gráficas de las pruebas de polarización sobre el recubrimiento de los experimentos E9 (MAX), E6, E7 y E7; (E7 mínimo promedio).

3.3 Análisis de resultados por el método de Taguchi

Para desarrollar el análisis de resultados por el método de Taguchi, se realizó el cálculo de la relación S/R, la cual determina el carácter de la desviación, se puede establecer cual tiene una mayor relación, ya que ésta indica menos influencia del ruido en la señal de respuesta. Para la respuesta en sí, sea la de CDF o I_{CORR} se determinó que la mejor respuesta es la de menor valor, ya que se desea obtener el mínimo coeficiente de fricción o la mínima velocidad de corrosión, (que está asociada a la corriente de corrosión: I_{CORR}), como el mejor desempeño del recubrimiento. Las respuestas obtenidas según los experimentos planteados y con los cálculos del método, se presentan en la Tabla N° 6.

Aunque la categoría de calidad sea el CDF o la I_{CORR} , el mayor valor de la relación S/R corresponde a la mejor calidad de la característica, resultando ser el nivel óptimo. Revisando los resultados de la

Tabla N°6, se observa que el experimento 3 es el nivel máximo para CDF, con una relación S/R=28,8264, el cual produce también el menor valor de CDF=0,03613. De esta misma forma, obtenemos para I_{CORR} , que el experimento 7 es el del nivel máximo, con una relación S/R=107,1948, el cual produce el menor valor de la I_{CORR} =4,10E-6 A. De esta misma forma, podríamos decir que el experimento 1 tiene la tendencia mezclada de buscar a la vez el menor CDF y la menor I_{CORR} , con valores altos de la relación S/R.

El resultado de los cálculos en búsqueda de obtener el efecto de cada uno de los factores sobre la relación S/R, se puede observar en las Tablas N°7 y N°8, donde se presenta el promedio de la relación, según el nivel de cada factor. De esta Tabla podemos mencionar que de acuerdo con la diferencia entre el máximo y el mínimo del promedio de la relación S/R según el nivel, estará la influencia de cada factor en la relación S/R.

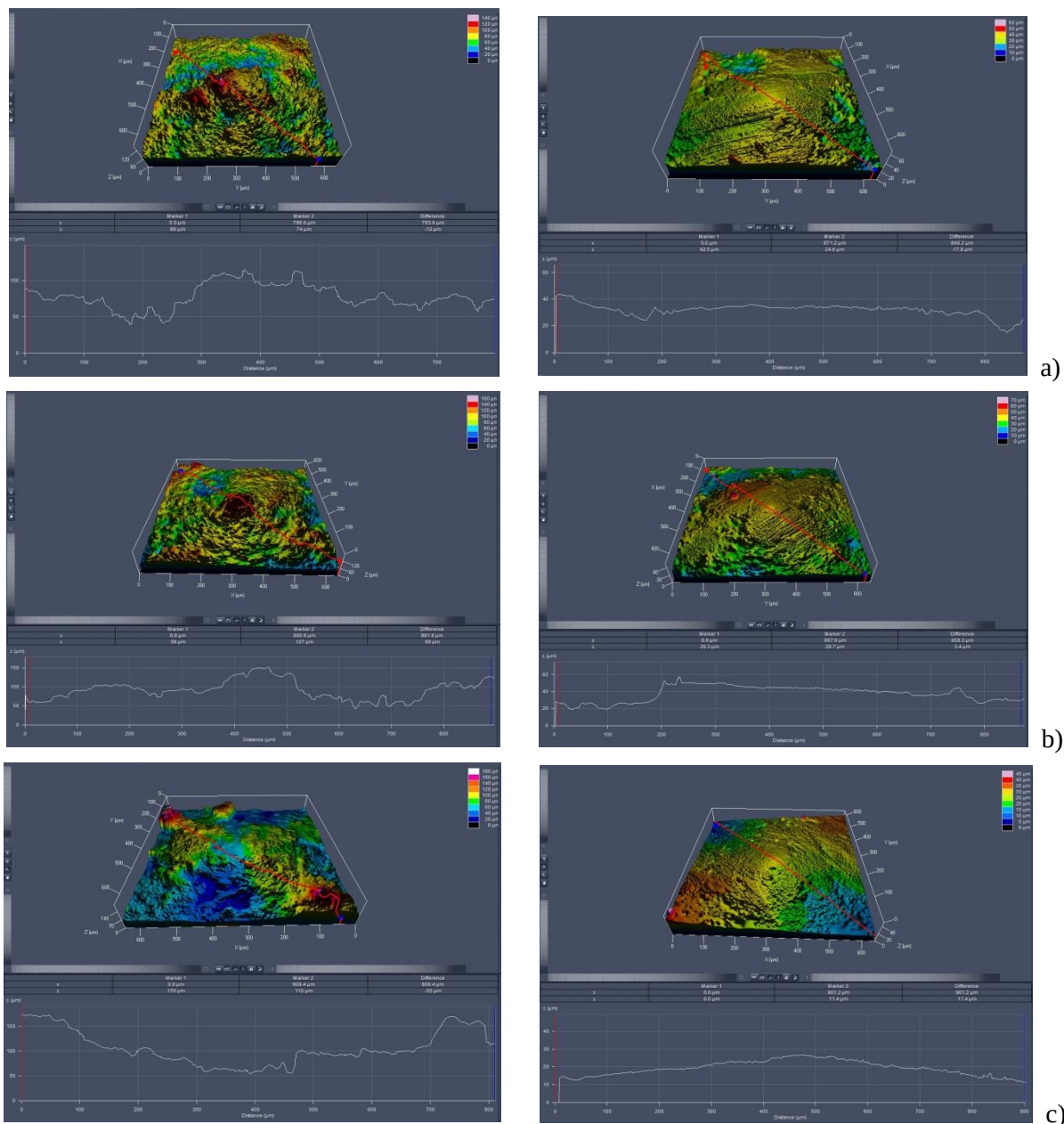


Figura 6. Imágenes por Microscopía Laser Confocal obtenidas sobre el recubrimiento del experimento a) E1, con las huellas de los ensayos de desgaste POD realizados, a la derecha b) E3, con las huellas de los ensayos de desgaste POD realizados, a la derecha c) E7, con las huellas de los ensayos de desgaste POD realizados, a la derecha

De las Tablas N°7 y N°8, podemos decir entonces que el factor de la presión de acetileno es el que tiene mayor influencia en el valor óptimo del CDF obtenido del recubrimiento y en el óptimo de la I_{CORR} , seguido de la presión de oxígeno, como factor de influencia. Los valores promedio también nos permiten encontrar una combinación de parámetros que será optimizada, respecto a los niveles de los factores analizados en este trabajo. Corresponde al valor máximo por fila que encontremos en el

promedio de la respuesta S/R, que está asociado a cada factor. Por lo que de la Tabla N°7 podemos encontrar que el óptimo Nivel de oxígeno es el Nivel 1, el del acetileno, el nivel 3 y el del aire, el nivel 1, con lo que se obtiene la combinación de parámetros con código 1 3 1. De la Tabla N°7, podemos observar que esta combinación no fue utilizada durante las pruebas realizadas, dado esto por el fraccionamiento que el método Taguchi hace del diseño Factorial del experimento, pero el

método nos predice que redundará en el mejor desempeño de la característica explorada CDF, con los niveles de los factores utilizados, cuando se llevan a los niveles establecidos según el código

experimental 1 3 1 o nivel bajo de la presión de oxígeno, nivel alto de la presión del acetileno y nivel bajo de presión de aire.

Tabla 6. Resultados experimentales y relación S/R, para el Coeficiente de fricción (CDF) y para la Corriente de Corrosión (I_{CORR}).

Exp.	Código	Oxígeno	Acetileno	Aire Comprimido	CDF	S/R_{CDF}	I_{CORR} [A]	$S/R_{I_{CORR}}$
1	1 1 1	53	8	7	0,04023	27,8134	4,6e-6	106,401
2	1 2 2	53	10	10	0,05688	24,5643	7,1e-6	102,789
3	1 3 3	53	12	15	0,03613	28,8264	7,4e-6	102,415
4	2 1 2	60	8	10	0,05169	25,6139	5,3e-6	105,239
5	2 2 3	60	10	15	0,1558	12,8353	5,9e-6	104,507
6	2 3 1	60	12	7	0,05594	24,9219	9,1e-6	98,6387
7	3 1 3	65	8	15	0,05954	24,2331	4,1e-6	107,195
8	3 2 1	65	10	7	0,06378	23,4965	2,4e-5	91,0369
9	3 3 2	65	12	10	0,05482	25,1221	3,0e-5	86,3941

Tabla 7. Respuesta S/R para Coeficiente de Fricción (CDF).

Factor	S/R Promedio [dB]			
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Max-min
Oxígeno	27,0680	21,1237	24,2839	5,9443
Acetileno	25,8868	20,2987	26,2901	5,9914
Aire comprimido	25,4106	25,1001	21,9649	3,4457

Tabla 8. Respuesta S/R para Corriente de corrosión (I_{CORR}).

Factor	S/R Promedio [dB]			
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Max-min
Oxígeno	103,8681	102,7949	94,8753	8,9928
Acetileno	106,2781	99,4443	95,8158	10,4623
Aire comprimido	98,6921	98,1406	104,7055	6,5649

Para la característica de I_{CORR} , se realiza el mismo análisis y se obtiene que el óptimo nivel de oxígeno es el nivel 1, el del acetileno, el nivel 1 y el del aire, el nivel 3, con lo que se obtiene la combinación de parámetros con código 1 1 3. De la Tabla N°6, podemos darnos cuenta que esta combinación tampoco fue utilizada durante las pruebas realizadas y nuevamente el método nos predice que redundará en el mejor desempeño de la característica explorada I_{CORR} , con los niveles de los factores utilizados, cuando se llevan a los niveles establecidos según el código experimental 1 1 3 o nivel bajo de la presión

de oxígeno, nivel bajo de la presión del acetileno y nivel alto de presión de aire.

Otra capacidad que ofrece el método Taguchi, está en determinar si existe interacción de los factores utilizados en el experimento realizado, lo que nos puede determinar si se necesita experimentación adicional para lograr mejores resultados en el diseño de experimentos, así como el valor de la propiedad al realizar el cálculo del valor de la misma para ese óptimo con la combinación de parámetros encontrada. Después de realizar el análisis de interacción se encontró que existe interacción entre

todos los factores, por lo que no se puede predecir el valor final de ninguna de las propiedades optimas encontradas por combinación de parámetros, con el análisis que se hizo por Taguchi. Sabemos que las combinaciones aquí determinadas producirán la mejor respuesta CDF o I_{CORR} , pero no podemos predecir el valor que asumirán, tan solo que serán menores que $CDF < 0,03613$ o de $I_{CORR} < 4,10E-6$ A.

4. CONCLUSIONES

Se produjeron recubrimientos de óxido de cromo sobre sustratos de bronce utilizando la técnica de proyección térmica con llama en frío, se varían las presiones de gases siguiendo las recomendaciones de un diseño de experimentos Taguchi de arreglo ortogonal L9.

En los recubrimientos producidos, el experimento 3 logró el nivel máximo de la relación $S/R=28,8264$ para el coeficiente de fricción, el cual produce el menor valor de $CDF=0,03613$. Por otro lado, los recubrimientos producidos en el experimento 7 se destacan por tener el nivel máximo de la relación $S/R=107,1948$ para la densidad de corriente de corrosión, el cual produce el menor valor de la $I_{CORR}=4,10E-6A$.

Con el análisis de influencia de factores desarrollado dentro del método Taguchi, podemos asegurar que el mejor desempeño de la característica CDF, con los niveles de los factores utilizados en el experimento, cuando se llevan a los niveles establecidos según el código experimental 1 3 1 o presión de oxígeno en 3,65 Bar, presión del acetileno en 0,83 Bar y presión de aire en 7 psi, producirán un recubrimiento que tendrá un CDF mucho menor que el definido por el experimento 3. Ahora bien bajos valores de I_{CORR} se apreciaron cuando se alcanzan los niveles establecidos según el código experimental 1 1 3 o presión de oxígeno en 3,65 Bar, presión del acetileno en 0,55 Bar y presión de aire en 15 psi, que producirán un recubrimiento que tendrá un valor de I_{CORR} mucho menor que el definido por el experimento 7. La teoría soporte de Taguchi indica que aunque estas combinaciones de factores no fueron de experimentos realizados, producirá el óptimo buscado para cada propiedad de respuesta analizada.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a COTECMAR, por el apoyo recibido con los equipos

y las instalaciones, a COLCIENCIAS a través del proyecto Resistencia a la corrosión y al desgaste de recubrimientos para aplicaciones en la industria naval aplicados por la técnica de proyección térmica, con código 1101-502-27024 y a los laboratorios y operarios de la Unidad de materiales y procesos y a los laboratorios de Física de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, por el apoyo recibido para los diversos análisis y experimentación realizada.

6. REFERENCIAS

- [1]. Saravanan P, Selvarajan V, Srinivasa R. D, Joshi S, Sundararajan G. Mater. Manuf. Process, 2000; 15 (1): 139-153.
- [2]. Shamim T, Xia C, Mohanty P. Int. J. Therm. Sci. 2007; 46: 755-767.
- [3]. Mostaghimi J, Chandra S, Ghafouri-Azar R, Dolatabadi A. Surf. Coat. Tech., 2003; 163-164: 1-11.
- [4]. Chien T, Jean M, Lu M, Huang W. J. Chin. Inst. Journal Ind. eng., 2010; 27(2): 90-102.
- [5]. Ouyang J, Sasaki S. Wear, 2001; 249:56-67.
- [6]. González A, Henao J, Díaz A, López E, Vargas F. Rev. Latinam. Metal. Mater, 2012; 33 (2): 272-281.
- [7]. Gök M, Küçük Y, Gencel O, Koç V, Brostow W. Mech. Adv. Mater. Struc., 2011; 18: 389-395.
- [8]. Rao R, Das S: Mater. Design, 2010; 31: 3227-3233.
- [9]. Li C, Zhao H, Takahashi T, Matsumura M. Mat. Sci. Eng. A - Struct, 2001; 308: 268-276.
- [10]. Li C, Zhao H, Matsumura M, Takahashi T, Asahara M, Yamaguchi H. Surf. Coat. Tech., 2000; 124: 53-60.
- [11]. Liu H, Tao J, Xu J, Chen Z, Gao O. Surf. Coat. Tech., 2009; 204: 28-36.
- [12]. Cellard A, Zenati R, Garnier V, Fantozzi G, Baret G. J. Eur. Ceram. Soc., 2007; 27: 1017-1021.
- [13]. Ahn H-S, Kwon O-K. Wear, 1999; 225-229: 814-824.
- [14]. Goyal T, Singh R, Sidhu T. Mater. Manuf. Process, 2012; 27: 185-192.
- [15]. Phadke M S, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall (USA). AT&T Bell Laboratories. 1989. Cap. 1-4.
- [16]. Manual de Funcionamiento y Piezas de repuesto. CastoDyn DS 8000. Castolin-Eutectic. 2011.