

MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD ESTRUCTURAL DE RECUBRIMIENTOS DE NiCrBSiFe ELABORADOS MEDIANTE PROYECCIÓN TÉRMICA OXIACETILÉNICA A PARTIR DEL CONTROL DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DEL PROCESO



E. Restrepo^{1*}, *R. Cardona*², *S. Carvajal*³, *J. D. Carvajal*³, *F. Vargas*⁴

¹ Ph. D. Profesor Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

² Ingeniero de Materiales. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

³ Ingeniero Mecánico. Bonem S.A., Medellín, Colombia

⁴ Ph. D. Profesor Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

*edward.restrepo@udea.edu.co

PALABRAS CLAVE	RESUMEN
Proyección térmica oxiacetilénica, estructura de los recubrimientos, flujo de polvo	En este trabajo se estudió el efecto del tipo de llama oxiacetilénica, del flujo de polvo proyectado y de la velocidad relativa entre la antorcha y los sustratos, sobre la calidad estructural de recubrimientos de NiCrBSiFe, depositados sobre acero al boro, utilizando una antorcha Eutectic-Castolin Castodyn 8000™, mediante dos procesos, uno de manera manual, controlando solo el flujo de gases y la alimentación de polvos, y otro automatizado, modificando el diseño original de la antorcha. Los resultados dan cuenta de la importancia del control del flujo de polvo proyectado como principal variable del proceso, así como de la contribución de la baja velocidad relativa entre la antorcha y el sustrato, para elaboración de recubrimientos con una estructura compacta.

IMPROVEMENT OF THE STRUCTURAL QUALITY OF NiCrBSiFe COATINGS ELABORATED BY OXY-ACETYLENE FLAME SPRAYING FROM CONTROL OF THE MAIN PROCESS PARAMETERS

KEYWORDS	ABSTRACT
Flame spraying process, structure of coatings, feedstock powder flow	In this paper the effect of the oxy acetylene flame type, the feedstock powder flow and the relative velocity between the torch and the substrates, on the structural quality of NiCrBSiFe coatings, deposited on boron steel, using a Eutectic-Castolin torch Castodyn 8000™, by two processes, one manually, controlling only the gas flow and powder feed, and the other automated, modifying the original torch design. The results show the importance of the control of the feedstock flow powder as the main parameter of the process, as well, as the contribution of the low relative speed between the torch and the substrate, for the thermally sprayed coatings with a compact structure.



1. INTRODUCCIÓN

La proyección térmica fue inventada por Max Ulrich Schopp en 1909, para depositar recubrimientos metálicos utilizando como fuente de calor una llama producida por la combustión de una mezcla de oxígeno y acetileno, desde entonces, se han tenido grandes avances en cuanto a: i) el proceso de elaboración del recubrimiento, especialmente en lo que respecta a la fuente de calor utilizada para fundir el material, ii) los materiales del recubrimiento y los que pueden ser recubiertos, y iii) las aplicaciones que pueden tener los recubrimientos elaborados [1-3].

Independientemente de la fuente de calor utilizada para fundir el material (combustión, arco eléctrico o plasma), el proceso de proyección térmica consiste en calentar las partículas a depositar hasta fundirlas total o parcialmente, y simultáneamente propulsarlas sobre el sustrato a una velocidad lo suficientemente alta para producir una capa mediante el apilamiento sucesivo de ellas.

Es así como, la formación de la estructura del recubrimiento se da en dos etapas, en la primera de ellas, las partículas completamente o parcialmente líquidas impactan con el sustrato y se aplanan, formando una especie de discos (splats) que pueden llegar a tener alto factor de empaquetamiento. En la segunda etapa, se produce la solidificación y el enfriamiento de la estructura previamente conformada por el apilamiento de las partículas [2-5].

Por lo tanto, la calidad estructural de los recubrimientos depende de la energía térmica y cinética suministrada a las partículas, y con ello del grado de fusión y de apilamiento que

ellas alcancen, lo cual se puede controlar a partir de: i) la energía producida por la fuente de calor, ii) la cantidad de partículas entre las cuales se distribuye la energía térmica aplicada, iii) la distancia de proyección y la velocidad que alcanzan las partículas proyectadas, lo que determina el tiempo de residencia de las partículas en la fuente de calor, iv) la velocidad relativa entre la antorcha que deposita las partículas y el sustrato, entre otras [2,3].

Todo lo anterior, afecta el grado de apilamiento que alcanzan las partículas entre ellas y además, determina las transformaciones de fases que puedan tener; por lo que, las propiedades del recubrimiento obtenido no solo dependen de la energía térmica y cinética involucrada en el proceso, sino que también de las condiciones de solidificación y enfriamiento de las partículas depositadas [2, 3,5].

Así mismo, la integridad de la interfaz sustrato-recubrimiento y con ello el grado de adhesión de la capa depositada, dependerá de la limpieza, de la rugosidad y del grado de precalentamiento del sustrato en el momento del impacto de las partículas [5,6].

De otra parte, es importante indicar que los recubrimientos base níquel depositados mediante proyección térmica, son ampliamente usados para proteger sustratos expuestos a condiciones de desgaste abrasivo [5-11], bajo las cuales se producen altos esfuerzos, y por lo tanto, se requiere que ellos tengan la integridad estructural y las propiedades mecánicas suficientes para soportarlos.

Entre los procesos de proyección térmica se destaca el que utiliza el calor producido por la



combustión oxiacetilénica, gracias a su bajo costo y alta versatilidad, sin embargo, la energía proporcionada por la llama a las partículas, puede no ser suficiente para obtener recubrimientos con baja porosidad y muy buena adhesión con el sustrato [8,10,12].

Por lo anterior, se hace indispensable un control detallado de algunas variables del proceso, con el fin de favorecer la fusión de las partículas y con ello su unión con el sustrato y el empaquetamiento entre ellas.

En este trabajo se evaluó el efecto de: i) la energía suministrada por diferentes llamas oxiacetilénicas, ii) la cantidad de partículas alimentadas a la llama y iii) la velocidad relativa entre la antorcha y el sustrato; sobre la homogeneidad estructural de los recubrimientos obtenidos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para elaborar los recubrimientos se utilizó como material de partida una aleación en polvo base níquel comercializada por Eutectic-Castolin, referencia comercial 5304 SFTM, cuya morfología y distribución de tamaño de partícula fueron determinadas mediante microscopía electrónica de barrido, utilizando un equipo JEOL JSM-6490LV provisto de un detector de espectroscopía por dispersión de energía de rayos X, y mediante difracción láser con un difractómetro Malvern referencia Master Sizer 2000.

La composición química de los polvos fue determinada mediante espectrometría de emisión óptica, utilizando un equipo Oxford Foundry-Master Pro.

El análisis morfológico de las partículas se

realizó tanto a la superficie, como a la sección transversal de ellas; para esto último las partículas fueron embebidas en resina, cortadas con un equipo Buehler Isomet 1000, y pulidas con papel abrasivo y pasta de diamante de 3 y 1 μm .

Con el fin de evaluar el efecto del control de algunos parámetros del proceso de proyección térmica oxiacetilénica sobre la calidad estructural de los recubrimientos, se llevaron a cabo dos procesos, uno manual y otro mediante el movimiento controlado (automatizado) de la antorcha.

El proceso ejecutado de manera manual se llevó a cabo utilizando solamente los medios de control del flujo de gases y de la alimentación de polvos de que dispone la antorcha Eutectic-Castolin, referencia Castodyn 8000TM, y el segundo utilizando los controles electromecánicos de que dispone la cámara Areste 1 fabricada por el Grupo GIPIMME de la Universidad de Antioquia, dentro de la cual se instaló la antorcha Castodyn 8000TM. Este último proceso requirió la modificación del diseño original de la antorcha como se describirá más adelante.

El recubrimiento depositado de forma manual se tomó como referencia, esto para contrastar las mejoras evidenciadas a partir de aquel obtenido mediante el movimiento automatizado.

Previo a la elaboración de los recubrimientos y con el fin de favorecer la adhesión de las partículas proyectadas, los sustratos de acero al boro fueron preparados utilizando un chorro abrasivo de partículas metálicas o corindón a alta presión, según el proceso de elaboración.



Para el caso del proceso llevado a cabo de forma manual, se utilizaron partículas de granalla metálica cuya distribución de tamaño se encuentra entre 0,85 y 1,1 mm, alcanzando una rugosidad aritmética media (Ra) de $5,2 \pm 0,2 \mu\text{m}$.

Por su parte, para la elaboración de los recubrimientos utilizando la cámara Areste 1, los sustratos fueron preparados utilizando partículas de corindón cuya distribución de tamaño se encuentra entre 0,67 y 3,5 mm, alcanzando una rugosidad aritmética media (Ra) entre $7,6 \pm 0,9 \mu\text{m}$. A continuación, se describen los principales parámetros utilizados para la elaboración de cada uno de los recubrimientos:

2.1 Elaboración de los recubrimientos de forma manual

Con el fin de controlar la cantidad de gases a alimentar al proceso de proyección térmica por llama oxiacetilénica, la antorcha Castodyn 8000TM posee una válvula que permite regular progresivamente el flujo de acetileno que será suministrado a la cámara de mezcla de gases, y posteriormente a la boquilla donde se producirá la combustión.

Así mismo, el ducto que transporta el oxígeno tiene una bifurcación mediante la cual se divide la cantidad de comburente; una parte de él es transportado hacia la cámara de mezcla de gases, y la otra parte se utiliza para crear el efecto Venturi que se encarga de succionar los polvos hacia la boquilla donde serán calentados por la llama, ver Figura 1.

Desafortunadamente este equipo no dispone de los flujómetros necesarios para medir la cantidad de gas alimentado (oxígeno y

acetileno). Adicionalmente, de la cantidad de oxígeno que se introduce en la antorcha no se conoce la proporción que se deriva para arrastrar los polvos a proyectar, y por consiguiente, tampoco se sabe qué proporción es llevada hacia la cámara donde se mezclan los gases antes de hacer la combustión al salir por la boquilla.

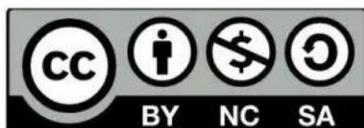
Además, para regular la cantidad de oxígeno que produce el efecto Venturi se utilizó el tornillo #10 que hace parte del kit de la antorcha, y se fijó la válvula de control progresivo de alimentación de polvo en el #4, con lo cual se obtuvo un flujo de material de $55,7 \pm 4,5 \text{ g/min}$.



Figura 1. Componentes de la antorcha Eutectic-Castolin Castodyn 8000TM.

Lo anterior hace difícil conocer la cantidad total de gases alimentada para la combustión y la proporción acetileno:oxígeno, así como el control del oxígeno que se encarga de arrastrar los polvos hacia la boquilla y por lo tanto, no se puede controlar de manera precisa el flujo de polvos proyectados.

A pesar de lo anterior, se elaboró un recubrimiento alimentando el acetileno a una presión de 68,9 kPa y el oxígeno a 427,5 kPa, y se graduó progresivamente la cantidad de acetileno hasta obtener una llama que por sus características físicas se asemeje a la llama



neutra [13].

Por su parte, la distancia de proyección fue sostenida entre 13 y 19 cm, con una velocidad relativa entre la antorcha y el sustrato que no pudo ser medida ni controlada por ser un proceso manual. Para la elaboración de este recubrimiento no se utilizó el Rotojet que se encarga de acelerar las partículas en la llama para que impacten al sustrato con alta energía cinética. El recubrimiento elaborado bajo estas condiciones se denominó M0.

2.2 Elaboración de recubrimientos usando la cámara Areste 1

Antes de instalar la antorcha Castodyn 8000TM en la cámara Areste 1, se extrajo el tornillo que regula el paso de oxígeno con el cual se produce el efecto Venturi, ver Figura 2(a), y se selló con un tapón de caucho la bifurcación a través de la cual se transporta dicho flujo de oxígeno para alimentar las partículas hacia la boquilla, ver Figura 2(b).

Lo anterior permite que todo el oxígeno alimentado sea direccionado a la cámara de mezcla de gases, lo que facilita la medida y el control del flujo de comburente que participa en la combustión y además, elimina el sistema de alimentación de polvos por efecto Venturi combinado con la fuerza de gravedad, cuyo control es muy ineficiente, dado que la magnitud de la fuerza de gravedad que actúa sobre las partículas, cambia a medida que la antorcha debe cambiar la dirección según la geometría del sustrato a recubrir.

Luego de la modificación realizada a la antorcha, se pudo establecer que el flujo máximo de gases de combustión de este equipo es cercano a 60 l/min, siendo el flujo

máximo de acetileno que puede ser suministrado cercano a 20 l/min.



Figura 2. Modificaciones al diseño original de la antorcha Castodyn 8000TM. (a) Extracción de tornillo regulador de oxígeno. (b) Sellamiento del ducto de oxígeno que produce el efecto Venturi. (c) Conexión del sistema de alimentación externo de polvos. (d) Sellamiento del ducto original de alimentación de polvos.

Además, se extrajo el tornillo que regula el paso de oxígeno con el cual se producía el efecto Venturi. En este lugar se introdujo un conector de acople rápido, ver Figura 2(c), que permite la conexión de una manguera de polietileno que se encarga de transportar los polvos desde un alimentador externo, que en este caso fue de vasija vibrante marca Tumac CHTB10TM, controlada por un sistema de electro-imán.

Finalmente se selló el ducto por donde se alimentaba el polvo mediante el efecto Venturi asistido por la fuerza de gravedad, ver Figura 2(d), para evitar fugas del polvo transportado por el nuevo sistema de alimentación. La implementación de un sistema de alimentación de polvos externo permite un mejor control del flujo de material alimentado.



Es muy importante indicar que, por las modificaciones realizadas a la antorcha, el oxígeno que originalmente era alimentado para formar el efecto Venturi, ya no pasará por allí, en su remplazo se adiciona nitrógeno para arrastrar los polvos desde el alimentador externo hacia la boquilla.

Lo anterior ha provocado que cuando se enciende la antorcha alimentando altos flujos de oxígeno y acetileno para producir la llama de combustión, se produzca un retroceso de la llama por el ducto de suministro del polvo, esto ante la ausencia de un gas que pueda contrarrestarlo, ver Figura 3. Por tal razón, es indispensable que a partir de las modificaciones del diseño original de la antorcha, se alimente el nitrógeno utilizado como gas de arrastre de las partículas, antes de alimentar el oxígeno y el acetileno que dan origen a la combustión.



Figura 3. Retroceso de llama producido por el Ducto de suministro de polvos.

Una vez modificado el diseño original de la antorcha, ésta se instaló en la cámara Areste 1, con lo cual queda conectada al alimentador externo de polvos y al flujómetro para el nitrógeno que se encarga de arrastrar las partículas hacia la boquilla de la antorcha, así como, a los flujómetros del oxígeno y del acetileno que se encargan de producir la combustión que da origen a la llama, y a los dispositivos electromecánicos que permiten

el control de la velocidad relativa entre la antorcha y el sustrato, ver Figura 4.

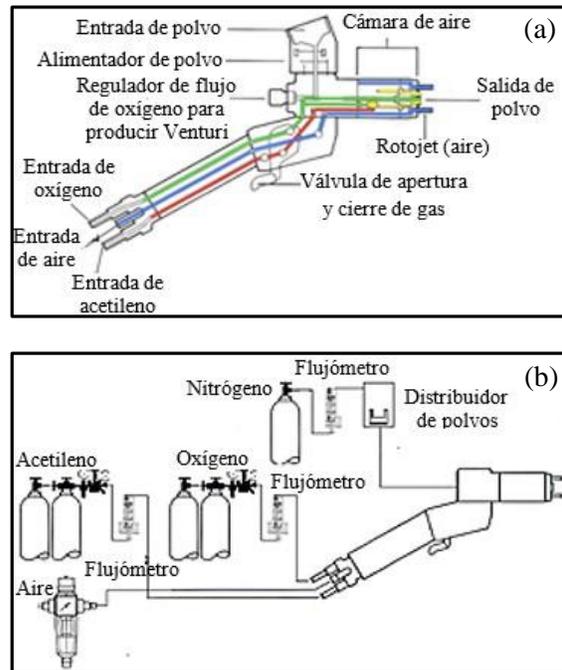


Figura 4. Esquema de la antorcha Castodyn 8000TM. (a) Diseño original. (b) Después de la modificación del diseño original.

Con los sistemas de control de las principales variables del proceso de proyección térmica oxiacetilénica instalados a la antorcha Eutectic-Castolin Castodyn 8000TM, se procedió a la elaboración de los recubrimientos de acuerdo con los parámetros mostrados en la Tabla 1.

Algunos parámetros del proceso fueron preestablecidos de acuerdo con resultados de los ensayos preliminares y por lo tanto, considerados como constantes, ellos son: i) la temperatura de precalentamiento del sustrato entre 250 y 300 °C, ii) la distancia de proyección en 9 cm, iii) la presión y el flujo del nitrógeno usado para arrastrar los polvos



(275,8 kPa y 17 l/min), iv) la presión de aire del Rotojet (206,8 kPa). Las muestras elaboradas fueron codificadas como M1, M2 y M3.

Tabla 1. Parámetros del proceso de proyección térmica oxiacetilénica utilizados para elaborar los recubrimientos en la cámara Areste 1.

Parámetros del procesos		Código de la muestra		
		M1	M2	M3
Flujo de gases de combustión [l/min]	C ₂ H ₂	19,3	19,3	16,5
	O ₂	31,7	39,1	41,3
Flujo total de gases de combustión [l/min]	C ₂ H ₂ +O ₂	51	58,4	57,8
Presión de gases de combustión [kPa]	C ₂ H ₂	89,6	82,7	
	O ₂	358,5	427,4	
Relación volumétrica de gases	C ₂ H ₂ /O ₂	1:1,6	1:2,0	1:2,5
Tipo de llama		Neutra	Oxidante	
Flujo de gas alimentador de polvo [l/min]			17	
Presión de gas alimentador de polvo de [kPa]	N ₂		275,8	
Flujo de polvo [g/min]		21±5	25±7	34±11
Distancia de proyección (cm)			9	
Presión de aire del Rotojet [kPa]			206,8	
Temperatura de precalentamiento del sustrato		300	260	287
Velocidad antorcha [cm/s]		0,36	0,51	
Velocidad portamuestras [cm/s]		35,7	46,3	

Los recubrimientos obtenidos fueron embebidos en resina epóxica, cortados y pulidos de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM E 1920-03 (2014), y la estructura de su sección transversal fue analizada utilizando microscopía óptica en un microscopio Nikon eclipse MA100 de luz reflejada y platina invertida.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización de los polvos de partida

Los resultados del análisis de composición química realizado a los polvos utilizados para la elaboración de los recubrimientos son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del análisis químico realizado al polvo de partida y valores nominales de materiales de referencia.

Elemento	Porcentaje en peso		
	Polvo Eutectic-Castolin-5304 SF TM	Deloro 50 ¹	Deloro 60 ¹
Cr	13,70 ± 0,16	11	15,5
B	3,34 ± 0,15	2,4	3,5
Fe	3,09 ± 0,09	3,0	4,0
Si	3,39 ± 0,09	4,0	4,3
Mo	0,56 ± 0,03	--	--
P	0,54 ± 0,03	--	--
Mn	0,05 ± 0,00	--	--
Cu	0,79 ± 0,04	--	--
V	0,10 ± 0,00	--	--
C	0,40 ± 0,00	0,4	0,8
Al	0,08 ± 0,01	--	--
Ni		Balance	

¹ Composición química nominal de polvos para proyección y fusión [6].

Es evidente que este material corresponde a una aleación NiCrBSiFe, la cual en el contexto de la proyección térmica hace parte del grupo de las aleaciones auto-fundentes (en inglés, Self Fluxing Alloys), y se caracterizan porque las partículas depositadas pueden ser completamente fundidas mediante un calentamiento posterior a la proyección, dando al recubrimiento una estructura densa (casi libre de poros), y con buena adherencia al sustrato, gracias a que en la mayoría de los casos este tipo de unión es metalúrgica



(similar a la obtenida a partir de procesos de soldadura) [6,14-16].

Las aleaciones auto-fundentes están constituidas principalmente por níquel o cobalto, y tienen cantidades superiores al 1,5% en peso de boro y silicio, bien sea por separado, o mediante combinación de estos dos elementos.

El boro es un potente endurecedor de las aleaciones base níquel, y combinado con el silicio, actúan como fundentes reduciendo la temperatura de fusión del material en varios cientos de grados, gracias a la formación de un punto eutéctico, de allí la denominación de autofundentes. Además, estos dos elementos de aleación reducen la oxidación del níquel, del cromo y del hierro, mejorando la mojabilidad y la fluidez de la capa depositada, y con ello la homogeneidad de la estructura del recubrimiento [6].

Por su parte, el análisis morfológico realizado sobre la superficie de las partículas permitió establecer que ellas tienen una forma redondeada casi completamente esférica, ver Figura 5(a), lo que favorece la densificación del recubrimiento, ya que el empaquetamiento de las partículas que constituyen su estructura es mucho mayor cuando la capa se forma a partir del apilamiento de gotas o partículas esféricas.

Adicionalmente, el análisis de la sección transversal de las partículas permitió establecer que éstas poseen en su interior algunos insertos, ver Figura 5(b) cuyo tamaño es de $2,49 \pm 0,24 \mu\text{m}$.

Según el análisis de espectroscopia por dispersión de energía de rayos X, las partículas están constituidas

aproximadamente por un 42,39% en peso de Cr, 31,98 % de C, 22,31% de Ni, 2,5% de Fe y 0,82% de Si, mientras que, la matriz en la cual se encuentran estos insertos está constituida por 58,11 % en peso de Ni, 32,84% de C, 5,99% de Cr y 3,06% de Fe, lo que indica que estos insertos corresponden a carburos de cromo.

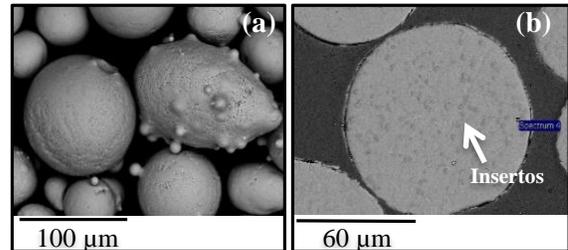


Figura 5. Morfología de las partículas utilizadas para elaborar los recubrimientos. (a) Morfología de la superficie. (b) Morfología de la sección transversal.

3.2 Recubrimientos

La estructura de la sección transversal de los recubrimientos elaborados es mostrada en la Figura 6. En general los recubrimientos metálicos depositados mediante proyección térmica poseen una estructura laminar, en la cual suelen estar presentes partículas parcialmente fundidas (que tienden a tener una forma esférica), óxidos y poros. Estos últimos producidos principalmente por la falta de continuidad en el apilamiento de las diferentes constituyentes estructurales [2,3].

En la Figura 6 (a) es evidente que el recubrimiento M0 elaborado manualmente a partir de una llama oxiacetilénica neutra, ajustada visualmente y sin conocimiento del flujo total de acetileno y de oxígeno alimentado a la combustión, fue conformado principalmente por el apilamiento de partículas parcialmente fundidas que lograron



bajo nivel de empaquetamiento y por lo tanto, la cantidad de poros o vacíos entre los diferentes constituyentes estructurales es excesivamente alto.

Por su parte, la estructura del recubrimiento M1, elaborado con una llama neutra con relación volumétrica de acetileno:oxígeno de 1:1,6 ajustada a partir de los flujómetros de la cámara Areste 1, es altamente laminar, contiene una cantidad de partículas parcialmente fundidas (aquellas de geometría esférica) significativamente inferior a las del recubrimiento M0, y el grado de empaquetamiento de las láminas es sustancialmente superior al de esta última muestra, por lo que el contenido de poros por fallas de apilamiento de los constituyentes estructurales es altamente inferior al de la muestra M0, ver Figura 6(b).

La razón por la cual la estructura de los recubrimientos M0 y M1 es tan diferente entre sí, a pesar de que los dos fueron elaborados utilizando una llama neutra, puede estar asociada principalmente a la cantidad de material alimentado.

A pesar de que se desconocen los flujos de oxígeno y de acetileno usados para producir la llama con la que se depositó la muestra M0, se sabe que la llama con la que se elaboró el recubrimiento M1 contiene la máxima cantidad de acetileno que admite la antorcha Catodyn 8000™.

Además, la cantidad del combustible usado para producir la llama con la que se depositó el recubrimiento M0, debió contener la misma cantidad o menos de acetileno, y por consiguiente, como la llama fue neutra la relación volumétrica de acetileno:oxígeno debió ser cercana a 1:1,6.

De acuerdo a lo anterior, la cantidad de oxígeno utilizado como comburente debió ser similar o inferior al usado para la llama con la que se elaboró el recubrimiento M1; es decir, que el flujo volumétrico total de gases de combustión (acetileno+oxígeno) utilizado para elaborar la muestra M0, debió ser similar o inferior al empleado para depositar el recubrimiento M1.

Lo anterior indicaría que, la energía térmica producida por la combustión usada para elaborar la muestra M0, debió ser semejante o inferior a la empleada para depositar el recubrimiento M1. No obstante, el flujo de polvo empleado para elaborar el recubrimiento M0 fue $55,7 \pm 4,5$ g/min, mientras que el utilizado para elaborar la muestra M1 fue de 21 ± 5 g/min, ver Tabla 1.

Según lo anterior, en el mejor de los casos la energía de la llama utilizada para elaborar el recubrimiento M0, sería similar a la empleada para depositar el recubrimiento M1, y ésta debe ser distribuida para fundir más de 2,5 veces la masa del polvo alimentado al proceso en el cual se elaboró el recubrimiento M1, lo que explica la excesiva cantidad de partículas parcialmente fundidas en la muestra M0, y con ello la alta cantidad de poros o vacíos en su estructura.

Así mismo, la ausencia del Rotojet sumado a la amplia distancia de proyección en el proceso a través del cual se elaboró el recubrimiento M0, hace que la energía cinética que alcanzan las partículas al momento del impacto con el sustrato sea baja, y que por lo tanto, su aplanamiento sea deficiente, lo que favorece las fallas de apilamiento entre los constituyentes estructurales promoviendo aún más la formación de poros o vacíos.



Por su parte, en las muestras M2 y M3 elaboradas con una relación volumétrica acetileno:oxígeno de 1:2,0 y 1:2.5 respectivamente, se observó un crecimiento progresivo de la cantidad de partículas parcialmente fundidas en la estructura de los recubrimientos, las cuales obstaculizan el apilamiento de los diferentes constituyentes estructurales, favoreciendo así la formación de porosidades ver Figuras 6(c) y 6(d).

El aumento en la cantidad de partículas parcialmente fundidas en la estructura de los recubrimientos, estaría asociado principalmente a la cantidad de polvo alimentado a la llama (25 ± 7 g/min para M2 y 34 ± 11 g/min para M3).

Además, entre los tipos de llamas oxiacetilénicas la que alcanza la mayor temperatura localizada es la neutra con aproximadamente $3160\text{ }^\circ\text{C}$ a una relación volumétrica de acetileno:oxígeno de 1:1,6, y el aumento en la cantidad de oxígeno hasta una relación de 1:2,0 y 1:2.5 reduce esta temperatura en 20 y $90\text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente [3,13].

Así mismo, a medida que se incrementa la cantidad de oxígeno, la zona primaria de la llama (que es la que contiene la mayor cantidad de energía) se hace más larga, dando mayor tiempo de residencia a las partículas en ella, lo que favorece su fusión [13].

Lo anterior podría ser la razón por la que las láminas que se observan en la estructura de los recubrimientos M2 y M3 poseen un buen grado de aplanamiento, y por lo tanto, de compactación, ver Figuras 6(c) y 6(d) respectivamente.

Además, la menor velocidad tanto de la

antorcha como del portamuestras utilizada para depositar el recubrimiento M1, favorece el empaquetamiento de la cantidad limitada de partículas que fueron proyectadas, por lo que la porosidad de la estructura de esta muestra es menor que la de las otras probetas.

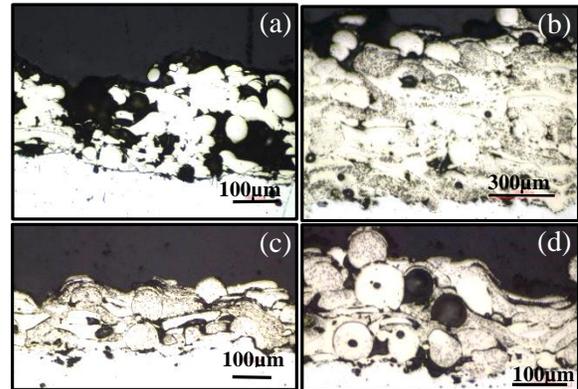


Figura 6. Estructura de la sección transversal de los recubrimientos. (a) Muestra M0. (b) Muestra M1. (c) Muestra M2. (d) Muestra M3.

Finalmente, en el interior de las láminas y de las partículas parcialmente fundidas que hacen parte de la estructura de los recubrimientos depositados, tanto con la llama neutra como con llama oxidante, se evidenciaron los carburos de cromo presentes en forma de insertos en los polvos de partida, lo que indicaría que el tiempo de residencia de las partículas en la llama no es suficiente para lograr una disolución de dichos carburos en las llamas ricas en oxígeno.

4. CONCLUSIONES

Se elaboraron recubrimientos de una aleación de NiCrBSiFe sobre sustratos de acero al boro, utilizando proyección térmica oxiacetilénica con una antorcha Eutectic-Castolin Castodyn 8000TM, a partir de dos procesos, uno manual y otro mediante el movimiento controlado utilizando la cámara



Areste 1.

Aunque la llama oxiacetilénica neutra alcanza una mayor temperatura que las llamas oxidantes, la zona de la llama de mayor energía se hace más larga a medida que aumenta la cantidad de oxígeno en la combustión, por lo que cualquiera de los dos tipos de llama tiene la energía suficiente para fundir la aleación de NiCrBSiFe.

El exceso en la cantidad de oxígeno alimentado a la combustión, podría favorecer durante la proyección térmica, la descomposición de los carburos de cromo presentes en los polvos de partida. No obstante, el tiempo de residencia de las partículas en la llama no fue suficiente para que este fenómeno fuese evidente.

Los resultados obtenidos permitieron establecer que esta antorcha tiene una capacidad limitada de flujo de gases de combustión (aproximadamente 60 l/min, de los cuales la máxima cantidad de acetileno que puede ser alimentada es 20 l/min), y por lo tanto, la cantidad de polvo que puede ser alimentado a la llama para obtener recubrimientos con baja cantidad de partículas parcialmente fundidas con baja porosidad, es limitada.

De acuerdo a lo anterior, es indispensable implementar en la antorcha Castodyn 8000TM un sistema de alimentación externo, que permita medir y controlar la masa de las partículas proyectadas, con el fin de obtener recubrimientos con una estructura compacta.

La implementación del sistema de alimentación externo puede generar el retroceso de llama por el sistema de alimentación de polvos, poniendo en riesgo la

seguridad de los equipos, de los operarios y las instalaciones físicas, por lo que, se deben implementar acciones para contrarrestar dicho riesgo, entre ellas introducir un gas inerte como el nitrógeno por el ducto de alimentación de polvos, antes y durante la combustión del oxígeno y del acetileno.

Finalmente, dado el flujo limitado de polvos que pueden ser proyectados con esta antorcha, se requiere que su velocidad relativa respecto al sustrato sea lo suficientemente baja como para que las partículas proyectadas alcancen a empaquetarse bien, esto a medida que son depositadas sobre el sustrato.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al proyecto de beneficios tributarios 69067 presentado a Colciencias por la empresa Bonem, y por la beca doctoral de Colciencias # 727 de 2015 otorgada a Edward Restrepo.

6. REFERENCIAS

- [1] Siegmann, S., Abert, C., “100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop”. *Surface & Coatings Technology*. vol. 220, pp. 3-13. 2013.
- [2] Pawlowski, L., *The Science and Engineering of thermal spray coatings*. John Wiley and Sons, 2nd Edition, 2008.
- [3] Fauchais, P. L., Heberlein, J. V. R., Boulos, M. I., *Thermal Spray Fundamentals*, Springer, 2014.
- [4] Vyšohlíd, M., Kroupa, F., “Quenching



stresses in thermal sprayed cylindrical coatings and free-standing tubes”, *Materials Science and Engineering: A*. vol. 283, no. 1-2, pp. 111–121. 2000.

[5] Ferrer, M., Vargas, F., Moreno, C., Peña, G., “Effect of temperature and substrate roughness on the adhesion of coatings of Ni alloy deposited by flame spray”, *Rev. LatinAm. Metal. Mat.* vol. 37, no. 2, pp 219-227. 2017.

[6] Davis, J. R., *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International, 2004.

[7] Rhys-Jones, T. N., “The use of thermally sprayed coatings for compressor and turbine applications in aero engines”, *Surface and Coatings Technology*. vol. 42, no. 1, pp. 1-11, 1990.

[8] González, R., García, M. A., Peñuelas, I., Cadenas, M., Fernández, M., Hernández, A., Felgueroso, B. D., “Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes”, *Wear*. vol. 263, no. 1–6, pp. 619-624. 2007.

[9] Shieh, Y. H., Wang, J. T., Shih, H. C., Wu, S. T., “Alloying and post-heat-treatment of thermal-sprayed coatings of self-fluxing alloys”, *Surface and Coatings Technology*. vol. 58, pp. 73—77. 1993.

[10] Kim, H. J., Hwang, S. Y., Lee, C. H., Juvanon. P., “Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based coatings”, *Surface and Coatings Technology*. vol. 172, no. 2-3, pp. 262–269. 2003.

[11] Amokrane, B. M., Abdelhamid, S., Youcef, M., *et. al*, “Microstructural and Mechanical Properties of Ni-Base Thermal Spray Coatings Deposited by Flame Spraying”. *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 42, no. 932. 2011.

[12] Rodríguez, J., Martín, A., Fernández, R., “An experimental study of the wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings”. *Wear*, vol. 255, no. 7–12, pp. 950-955. 2003.

[13] Cadavid, E., Parra, C., Vargas, F., “Estudio de llamas oxiacetilénicas usadas en la proyección térmica”. *Revista Colombiana de Materiales*, no 9, pp. 15-26. 2016

[14] Vieiraa, L. F. S., Voorwaldb, H. J. C., Cioffib, M. O. H., “Fatigue performance of AISI 4340 steel Ni-Cr-B-Si-Fe HVOF thermal spray coated”, *Procedia Engineering*. vol. 114, pp. 606 – 612. 2015.

[15] Darama, P., Banjongprasert, C., “The Influence of post treatments on the microstructure and corrosion behavior of thermally sprayed NiCrMoAl alloy coating”. *Surface and Coatings Technology. In Press, Journal Pre-proof*, 2019. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125166.

[16] Houdková, Š., Smazalová, E., Vostřák, M., Schubert, J., “Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies”, *Surface and Coatings Technology*. vol. 253, pp. 14 -26. 2014.

