



ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE PROYECCIÓN TÉRMICA DE POLVOS CERÁMICOS, A PARTIR DE SIMULACIONES NUMÉRICAS

J. Arango^{*1}, *C. Palacio*²

¹ Universidad EAFIT. Medellín, Colombia
^{*} jarang71@eafit.edu.co

PALABRAS CLAVE	RESUMEN
Jets et Poudres, Proyección Térmica por Plasma Atmosférico, simulación numérica, Circona Estabilizada con Itria.	La técnica de proyección térmica vía plasma APS (Atmospheric Plasma Spraying) es un proceso altamente desarrollado con gran cantidad de aplicaciones en la industria y debido a este desarrollo existen herramientas computacionales complementarias que permiten la predicción y modelación de esta clase de procesos. Durante este estudio fue utilizado el software "Jets et Poudres" para simular numéricamente un proceso de proyección con el fin de realizar recubrimientos para barreras térmicas de circona estabilizada con itria ($ZrO_2 - Y_2O_3$ 8 wt.%) (YSZ). Los resultados de las simulaciones se compararon con los obtenidos experimentalmente utilizando un sistema de sensores (Accuraspray G3C) y con los de la caracterización microestructural de los recubrimientos obtenidos en este proceso. Como resultado se lograron establecer con certeza los parámetros de entrada no directos del software (modelo de turbulencia, eficiencia térmica y tipo de barrera de aire) que permiten predecir el comportamiento de un proceso de proyección que se realice con una antorcha SinplexPro de Oerlikon Metco.

STUDY OF THE THERMAL SPRAYING PARAMETERS OF CERAMIC POWDERS USING NUMERICAL SIMULATIONS

KEYWORDS	ABSTRACT
Jets et Poudres, Atmospheric Plasma Spraying Process (APS), Numerical Simulation, Yttria Stabilized Circona (YSZ).	Plasma spraying process or APS (Atmospheric Plasma Spray) is a highly developed process widely used in the industry. Complementary computing tools allow the prediction and modeling of this kind of processes. On this study, a simulation to manufacture a yttria-stabilized zirconia ($ZrO_2 - Y_2O_3$ 8 wt.% (YSZ)) for thermal barrier coatings by means of plasma spray process, was carried out using the "Jets and Powders" software. The results obtained were compared with both, experimental data from the Accuraspray G3C sensors system and microstructural characterizations of the manufactured coatings. As a result, it was possible to establish the parameters, of non-direct inputs of the software (turbulence model, thermal efficiency, and type of air barrier), that allow predicting the behavior of a plasma spraying process performed with a Oerlikon-Metco SinplexPro torch.



1. INTRODUCCIÓN

La proyección térmica comprende un grupo de técnicas en donde materiales metálicos o no-metálicos son depositados de manera fundida o semi fundida para formar un recubrimiento. Dentro de estas se encuentra la técnica de proyección térmica vía plasma APS (Atmospheric Plasma Spray) en la cual se proyecta el material por medio de un flujo de gas o mezcla de gases que está sometido a descargas eléctricas continuas lo que da lugar a la generación del jet de plasma [1-2].

En esta clase de procesos se involucran una gran variedad de fenómenos físicos los cuales se pueden predecir y modelar por medio de herramientas computacionales que permiten establecer las condiciones del flujo de gases, temperatura del jet y de las partículas proyectadas, concentración de portadores de carga (iones y electrones) en la descarga, condiciones de partículas en vuelo y los campos electromagnéticos asociados al sistema. Autores como: S. Semenov y T.H. Van Steenkiste, realizaron simulaciones del comportamiento del jet característico de estos procesos, con ayuda de herramientas computacionales complementarias [3-4]. Igualmente, Y. P. Wan, M. Pasandideh-Fard y Huimin Liu han logrado simular el comportamiento termocinético de las partículas en vuelo durante procesos de proyección térmica. [5-7].

Particularmente, una de las herramientas computacionales más útil ha sido el software “*Jets et Poudres*” (J&P), desarrollado sobre el código Genmix, el cual fue mejorado con el uso de propiedades térmicas y de transporte estrechamente relacionadas con la temperatura y la composición de los materiales a simular [8]. En la literatura se pueden encontrar

autores como V. Grigaitiene, M Ferrer, F Vargas y H. Copete que utilizan este software como una de las herramientas complementarias al proceso de proyección. Sin embargo, V. Grigaitiene es el único de estos autores que utiliza J&P para simular un proceso de proyección por plasma [9], ya que M Ferrer, F Vargas y H. Copete lo utilizan para simular procesos de proyección por llama oxiacetilénica [10-11]. Estos aportes resultan significativos dada la baja producción bibliográfica en referencia a este software como herramienta de apoyo para el proceso experimental de proyección térmica.

Una de las grandes ventajas de este software es que permite calcular rápidamente los parámetros de la proyección térmica (plasma o combustión), presentar resultados sintéticos y explícitos sobre la velocidad, la temperatura, el porcentaje de fusión y el parámetro k de Sommerfeld de las partículas en vuelo durante el proceso, así como dar información de las tendencias y órdenes de magnitud de los fenómenos y pronosticar un resultado muy cercano al experimental mientras se conozcan con precisión los parámetros de entrada [12].

Conocer con certeza dichos parámetros no es una tarea simple, y es lo que motivó el presente estudio, que tiene el fin de establecer los parámetros de entrada necesarios para ejecutar la simulación de un proceso de proyección térmica por plasma realizado con una antorcha de referencia Oerlikon-Metco SimplexPro. Para ello se apoyó con la obtención de datos experimentales con el sistema de sensores (Accuraspray G3C), y se realizó un diseño de experimentos para determinar la respuesta de las variables del proceso y posteriormente conducir una validación experimental respecto a la calidad de los recubrimientos generados.



2. MATERIALES Y MÉTODOS

Usualmente los recubrimientos utilizados como barreras térmicas, consisten de una capa de anclaje interna depositada directamente sobre el sustrato a partir de un material del tipo MCrAlY (donde M representa un metal como Fe, Ni, Co o aleaciones como NiCo) y una capa externa o superior elaborada con el material cerámico, en este caso circona estabilizada con 8 % en peso de itria (YSZ por sus siglas en inglés de “Yttria-stabilized Zirconia”). Ambas capas pueden ser depositadas mediante el proceso de proyección térmica por plasma [13]. Este estudio comprende únicamente el análisis termocinético y microestructural de la capa cerámica externa.

Durante este estudio se realizaron dos etapas correlacionadas:

- La primera etapa comprende la ejecución de las proyecciones preliminares para la elaboración de los primeros recubrimientos, la medición experimental de parámetros de las partículas en vuelo durante las proyecciones, la realización de las modelaciones computacionales de cada proceso y la caracterización microestructural de los recubrimientos generados para identificar los parámetros óptimos de simulación.
- La segunda etapa es producto de un refinamiento del proceso, que inicia desde la identificación de los aspectos claves en los parámetros de simulación y su correlación con los de proyección. A partir de esto, se refinan los cálculos y se reproducen las condiciones óptimas, tanto de las proyecciones como de las simulaciones. Esto permitirá valorar la calidad de los recubrimientos obtenidos y

su relación con el comportamiento de las partículas durante el proceso de proyección térmica y establecer las condiciones de proyección más adecuadas según el tipo de antorcha, la naturaleza de las partículas empleadas y los recubrimientos elaborados. En este refinamiento de parámetros se identifica la necesidad de incorporar un proceso de tamizado del polvo en estudio, la ejecución de nuevas proyecciones, la medición experimental del comportamiento durante dichas proyecciones de las partículas clasificadas y realizar las caracterizaciones microestructurales de los nuevos recubrimientos generados.

La caracterización micro estructural de todos los recubrimientos se llevó a cabo sobre su sección transversal utilizando un microscopio electrónico de barrido de referencia Phenom G2 pro.

2.1. Materiales

El tratamiento termocinético de las partículas dentro del jet de plasma, al igual que las simulaciones computacionales del proceso dependen de sus propiedades térmicas y de las características fisicoquímicas del material a proyectar (densidad, granulometría, morfología, composición química, conductividad térmica, calor específico, entre otras), las cuales están dadas por el proceso de fabricación del polvo.

El material utilizado en las proyecciones corresponde a un polvo esférico y hueco (HOSP por sus siglas en inglés de Hollow Spherical Powder), de YSZ obtenido mediante aglomeración de partículas nanométricas y posterior sinterización, el cual es fabricado por Oerlikon Metco, bajo la referencia Metco



204NS-G cuyas propiedades térmicas se presentan en la Tabla 1.

La morfología de las partículas fue determinada mediante imágenes tomadas en un microscopio electrónico de barrido (SEM), de referencia Zeiss Evo 10. Este polvo presenta una morfología esférica y las partículas son huecas, portando en su interior partículas micrométricas de menor tamaño, así como partículas submicrométricas, tal y como se puede observar en la Figura 1.

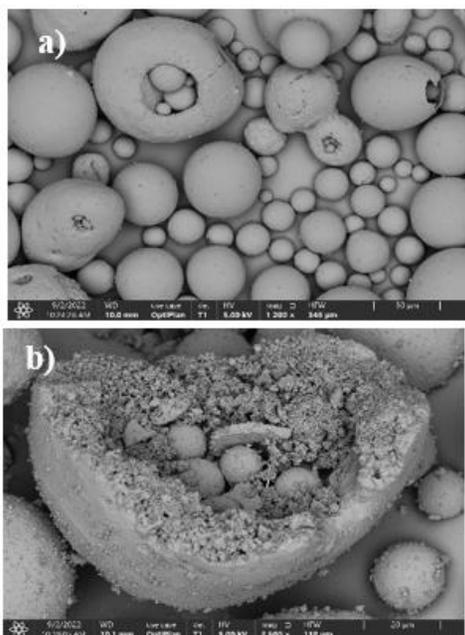


Figura 1. Morfología de las partículas del polvo Oerlikon Metco 204 NS-G. a) 1200X. b) 3500X.

La distribución granulométrica del polvo utilizado corresponde a partículas

micrométricas en la cual el tamaño de las partículas se encuentra entre 21,7 μm (d_{10}) y 94,2 μm (d_{90}) y el (d_{50}) corresponde a 53,3 μm .

Los sustratos utilizados para el estudio fueron de acero inoxidable (AISI 304) con un diámetro de 25 mm (1") y de un espesor de 5 mm.

2.2. Primera etapa

La fase inicial del estudio abarcó la elaboración de los recubrimientos, siguiendo los parámetros y condiciones de proyección predefinidos por restricciones experimentales. Luego, se llevó a cabo un proceso de determinación experimental para comprender el comportamiento de las partículas en vuelo durante la proyección. Por último, se emplearon métodos específicos que orientaron la generación de simulaciones con el propósito de profundizar en el fenómeno estudiado.

2.2.1. Parámetros de proyección:

Para la elaboración de los recubrimientos, como se mencionó anteriormente, es necesario el uso de dos capas de material: la capa de anclaje de NiCoCrAlY y la capa exterior de YSZ. Para cada capa se utilizan parámetros y condiciones de proyección diferentes.

Tabla 1. Propiedades térmicas y físicas de la circona estabilizada con 8 wt.% de itria (YSZ)[14]–[17].

Calor Específico sólido [J/kgK]	Densidad de Masa [kg/m^3]	Conductividad térmica [$\text{J}/(\text{msK})$]	Punto de fusión [K]	Calor latente de fusión [J/kg]	Masa molar [g/mol]
460	5938	1,26	2800	812400	131,429



El dispositivo para fabricar estos recubrimientos consiste en una antorcha SinplexPro de Oerlikon Metco. Los polvos se introducen en el jet de plasma utilizando un inyector de 1,8 mm de diámetro interno alimentado por un distribuidor volumétrico de referencia Twin 140 de Oerlikon Metco. El inyector está ubicado corriente arriba (inyección externa) de la salida de la boquilla. Las muestras se disponen en un soporte de muestra rectangular que puede recibir hasta seis de ellas. El porta muestras es estático y quien realiza los movimientos relativos es la antorcha. Los parámetros de proyección se muestran en la Tabla 2.

El estudio del estado termocinético de las partículas en vuelo durante las proyecciones se llevó a cabo con una herramienta complementaria del proceso: el Accuraspray G3C que permite estimar la velocidad de las partículas y da órdenes de magnitud de la temperatura. El sensor se ubicó en el eje X a 105 mm de la boquilla de la antorcha y en el eje Y a 300 mm, para poder obtener el comportamiento de las partículas exactamente a la distancia de proyección. Para este estudio, se dan dos momentos de mediciones para cada proyección de polvo cerámico: i) antes de proyectar y ii) después de proyectar sin presencia de sustrato y con la antorcha estática, cuando el flujo de partículas es máximo y estable.

2.2.2. *Proceso experimental para el diagnóstico de partículas en vuelo:*

Tabla 2. Parámetros de proyección para la capa externa a partir del polvo Oerlikon Metco 204NS-G.

Variable		Valor
Tipo de Antorcha		<i>SinplexPro Oerlikon Metco</i>
Diámetro de la boquilla		9 mm
Inyección de polvo	Tipo	Externa, perpendicular al eje de la antorcha
	Tasa	1,2 kg/h
	Diámetro del inyector	1,8 mm
Distancia de proyección		105 mm
Voltaje		500 A
Energía	Intensidad de corriente eléctrica	96 V
	Potencia Eléctrica	48 kW
Mezcla de gases		Ar + H ₂
Composición de la mezcla		88 - 12% Vol. 50 l/min – 7 l/min

2.2.3. *Modelación computacional del comportamiento de las partículas en vuelo:*

Para realizar el diagnóstico teórico del estado de las partículas en vuelo dentro del jet de plasma se realizaron una serie de

modelaciones computacionales con ayuda del software Jets et Poudres.

Los parámetros de entrada para realizar una simulación del proceso de proyección son: el tipo de modelo de turbulencia, la composición y flujos de los gases formadores del plasma, la composición de la atmósfera que rodea el



fenómeno, la distancia de proyección, las medidas de la boquilla de la antorcha, la potencia eléctrica, la eficiencia térmica de la antorcha o potencia efectiva y los parámetros del polvo [8, 18-19]. De estas 8 variables del proceso 5 de ellas eran conocidas: la composición y flujos de los gases formadores del plasma, la distancia de proyección (la cual es fija debido a restricciones experimentales), las dimensiones de la boquilla de la antorcha y la ubicación del jet de aire de enfriamiento, la potencia eléctrica y los parámetros del polvo. Las 3 restantes, podían variar entre dos o más opciones, así:

- El tipo de modelo de turbulencia: usualmente varía entre el de longitud de mezcla y el de $k-\epsilon$.
- La composición de la atmósfera circundante: esto se refiere a que el jet de plasma y su temperatura pueden estar o no confinados dentro de un flujo constante de aire, es decir, que se puede o no generar un cono de temperatura alrededor del jet. Esto se traduce como Shield o No Shield (barrera o no barrera).
- La eficiencia térmica de la antorcha o potencia efectiva, que se define como la cantidad de potencia eléctrica que la antorcha convierte en calor, se varió entre el 85 % y 95 % de potencia efectiva.

Para realizar las simulaciones del proceso de proyección térmica se utilizó un diseño de experimentos que permitió establecer con certeza los parámetros de entrada del software.

La Tabla 3 presenta la clasificación de parámetros requeridos para realizar una simulación; identificándolos como entradas conocidas y desconocidas que permiten seleccionar los parámetros variables y fijos del

diseño de experimentos. Se establecen entonces como variables de respuesta del software (datos de salida) la velocidad, temperatura, porcentaje de fusión de las partículas en vuelo y el K de Sommerfeld.

Teniendo en cuenta la granulometría del polvo Metco 204NS-G y que una de las condiciones de entrada del software es el tamaño de partícula específico, se hizo necesario utilizar la metodología de diseño de experimentos en 3 pasos para guiar la obtención de las simulaciones necesarias en este estudio. El primer paso es para las partículas más pequeñas (21,7 μm), el segundo es para las partículas de un tamaño intermedio (53,3 μm) y el tercero es para las partículas más grandes (94,2 μm). Lo anterior permite cubrir el rango de tamaño del polvo y facilita la aproximación al comportamiento de cada grupo de tamaños (las partículas grandes, las intermedias y las más pequeñas).

2.3. Segunda etapa

La segunda etapa del estudio consistió en la clasificación del polvo Metco 204NS-G utilizado, seguida del análisis de los grupos de partículas retenidos en cada tamiz, la elaboración de los recubrimientos con cada uno de dichos grupos, y por último, el proceso para la determinación experimental del comportamiento de las partículas en vuelo.

2.3.1. Material de proyección:

Las simulaciones fueron realizadas a partir del polvo clasificado por tamizado en tres rangos de tamaños, así:

- Fracción de partículas grandes: el tamaño de las partículas se encuentra entre 30,5 μm



- (d_{10}) y $110,3 \mu\text{m}$ (d_{90}), con un tamaño intermedio de $62,2 \mu\text{m}$ (d_{50}).
- Fracción de partículas medianas: el tamaño de las partículas se encuentra entre $25,9 \mu\text{m}$ (d_{10}) y $69,9 \mu\text{m}$ (d_{90}), con un tamaño intermedio de $43,3 \mu\text{m}$ (d_{50}).
- Fracción de partículas pequeñas: el tamaño de las partículas se encuentra entre $15,8 \mu\text{m}$ (d_{10}) y $37,9 \mu\text{m}$ (d_{90}) y el tamaño intermedio corresponde a $24,3 \mu\text{m}$ (d_{50}).

Tabla 3. *Parámetros de entrada del software “Jets et Poudres” necesarios para realizar una simulación*
7 parámetros del software J&P necesarios para realizar una simulación

Conocidos		Desconocidos	
1	Composición y flujo de la mezcla de gases	6	Tipo de modelo de turbulencia
2	Distancia de proyección (fija debido a restricciones experimentales)	7	Eficiencia térmica
3	Propiedades de la antorcha	8	Composición de la atmósfera
4	Potencia eléctrica		
5	Parámetros del polvo		

2.3.2. *Parámetros de proyección:*

Se realizaron tres proyecciones cada una con una de las fracciones de polvo tamizado. Los parámetros de proyección se muestran en la Tabla 2.

2.3.3. *Proceso experimental para el diagnóstico de partículas en vuelo:*

Este proceso se realizó según lo descrito en el apartado 2.3.2. El objetivo es establecer el diagnóstico para cada una de las proyecciones realizadas en la segunda etapa (tres en total).

Los resultados obtenidos se presentan en dos etapas, cada una acorde con las dos etapas de la metodología.

3.1. Resultados primera etapa

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la fase inicial del estudio. Estos abarcan las mediciones experimentales del comportamiento de las partículas en vuelo, los hallazgos derivados de las simulaciones computacionales y las características microestructurales identificadas en los recubrimientos obtenidos.

3.1.1. *Resultados de las mediciones experimentales de la primera etapa:*

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS



Los resultados de las mediciones experimentales de la velocidad y temperatura de las partículas en vuelo se muestran en la Tabla 4 donde se observa que las partículas alcanzan velocidades cercanas a los 220 m/s y temperaturas cercanas al punto de fusión del material.

Tabla 4. Resultados de la medición experimental del comportamiento de las partículas en vuelo.

Capa	Velocidad de partículas [m/s]	Temperatura de partículas [K]
YSZ	220,2 ± 8,6	2892,2 ± 27,4

3.1.2. Resultados de las simulaciones computacionales:

Los resultados de las simulaciones computacionales para las condiciones de proyección de cada uno de los tamaños de partícula se muestran en la Tabla 5 para partículas de 21 μm y en la Tabla 6 para las partículas de 53 μm.

Tabla 5. Resultados de las simulaciones computacionales para las partículas del $d_{(10)}$ de 21,7 μm para las condiciones de proyección de capa de YSZ.

#	Factores y niveles			Variables de respuesta			
	Eficiencia Térmica [%]	Barrera	Modelo de turbulencia	Temperatura [K]	Velocidad [m/s]	% Fusión	K-Sommerfeld
1	85% (+)	No (+)	Mixing Length (+)	2725	248,45	100	832,43
2	95% (-)	No (+)	Mixing Length (+)	2746	250,6	100	839,43
3	85% (+)	Sí (-)	Mixing Length (+)	8920	550,1	100	4327,98
4	95% (-)	Sí (-)	Mixing Length (+)	9041	563,37	100	4466
5	85% (+)	No (+)	k-ε (-)	7461	506,5	100	3170,16
6	95% (-)	No (+)	k-ε (-)	7427	522,9	100	3301
7	85% (+)	Sí (-)	k-ε (-)	9960	547,39	100	4679,4
8	95% (-)	Sí (-)	k-ε (-)	10056	561,36	100	4873,91

Como se muestra en la tabla anterior solo los resultados de las simulaciones identificadas como #1 y #2, son acordes con los resultados experimentales del proceso (vistos en la Tabla 4), en lo que respecta al comportamiento de las partículas en vuelo (Temperatura y velocidad). Esto lleva a inferir que únicamente los experimentos 1 y 2 de las simulaciones presentan resultados coherentes para cada matriz de experimentos.

El número de Sommerfeld (k) debe encontrarse en un valor entre 3 y 57,7 [11], [20], sin embargo, los resultados obtenidos de este valor con ayuda de las simulaciones son

muy superiores a dicho rango lo que puede anticipar la identificación de defectos microestructurales en la superficie como salpicaduras cuando las partículas fundidas se apilan en el sustrato como fue planteado por C. Escure, M. Vardelle y P. Fauchais [21].

Los resultados de la Tabla 6 muestran, nuevamente, que las simulaciones 1 y 2 son las únicas que presentan resultados coherentes con la velocidad y temperatura de las partículas en vuelo y, por consiguiente, con los datos experimentales (Tabla 4).



Tabla 6. Resultados de las simulaciones computacionales para las partículas del $d_{(50)}$ de 53 μm para las condiciones de proyección de capa de YSZ.

#	Temperatura (K)	Velocidad (m/s)	% Fusión	K-Sommerfeld
1	2800	150	24,8	951,30
2	2800	152,53	28,1	953,36
3	5838	290,66	100	4567,67
4	6004	307,57	100	5062,34
5	5485	272,51	100	3769,09
6	5598	282,23	100	4000,14
7	6563	292,37	100	5048,60
8	6630	299,56	100	5243,35

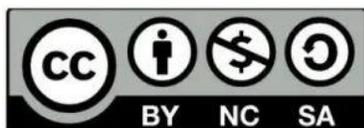
En el caso de las partículas de 53 μm (medianas) estas simulaciones arrojan como resultado que las partículas alcanzan a llegar al sustrato con una velocidad muy baja, un porcentaje de fusión muy bajo y; exactamente la temperatura de fusión; este comportamiento se debe a su mayor tamaño con respecto al grupo anteriormente presentado. Al ser partículas de un tamaño relativamente alto, no alcanzan una gran velocidad dentro del jet

Los resultados obtenidos en las simulaciones de las partículas de 94 μm (grandes) presentan un problema dentro del análisis porque bajo ninguna de las condiciones establecidas de simulación las partículas alcanzan a llegar al sustrato por lo que se prevé salgan del jet en algún punto de su trayectoria. Este comportamiento se da probablemente debido a una menor velocidad de las partículas derivada de su tamaño mayor respecto a los dos grupos iniciales. Al ser objetos suspendidos en un gas necesitan una velocidad específica para mantenerse en vuelo el tiempo suficiente para alcanzar el sustrato (tiempo de residencia), pero debido a su tamaño la energía proporcionada por el jet y la transferencia de momento no son

suficientes para alcanzar esta velocidad mínima y probablemente por esta razón las partículas desaparecen de la trayectoria del flujo en las simulaciones.

Si bien fue planteado un diseño de experimentos para establecer el valor o condición de las variables que dentro del proceso eran desconocidas (eficiencia térmica, aplicación de la barrera y modelo de turbulencia, Tabla 3), luego de analizar los resultados obtenidos y comparando con las simulaciones 1 y 2 de cada matriz de experimentos se observan resultados coherentes que permiten afirmar que los parámetros de entrada desconocidos del proceso y necesarios para realizar una simulación utilizando una antorcha Oerlikon Metco SinplexPro son:

- Eficiencia térmica con valor entre el 85 % y 95 %. No es necesario un valor exacto debido a que la variación de este parámetro no tiene ningún efecto significativo sobre las variables de respuesta (velocidad, temperatura, porcentaje de fusión).
- Barrera: No es necesario establecer una barrera que confine la temperatura del jet. Los resultados obtenidos con respecto a la temperatura cuando el efecto de barrera es aplicado sobre las simulaciones son incoherentes físicamente, ya que a temperaturas tan elevadas el material ya se encuentra en fase de vapor y por lo tanto, se estima que ninguna capa de recubrimiento es viable.
- Modelo de turbulencia: modelo de longitud de mezcla (Mixing Length). Los resultados obtenidos al realizar simulaciones con este modelo de turbulencia generan resultados coherentes en cuanto a velocidad y temperatura de las



partículas, al contrario que las simulaciones realizadas con el modelo $k - \epsilon$ que arrojan resultados inviables físicamente, ya que las temperaturas registradas superan la temperatura de fusión y la temperatura de ebullición del material lo que no concuerda con los resultados de las mediciones experimentales obtenidos.

3.1.3. Análisis microestructural de los recubrimientos generados en la primera etapa:

En este análisis se logran observar en la superficie de los recubrimientos generados una gran cantidad de pequeños splats los cuales corresponden a partículas de tamaños muy pequeños o a salpicaduras de partículas un poco más grandes lo que podría explicar el K de Sommerfeld desproporcionado que se obtiene en las simulaciones. Estas formaciones se pueden observar en las Figura 2 y Figura 3.

Al realizar el análisis de los resultados correspondientes a la primera etapa de estudio se plantean dos hipótesis derivadas de estos:

- El recubrimiento, posiblemente, solo se forma con partículas de tamaño menor a $50 \mu\text{m}$ y las partículas más grandes no contribuyen en la formación de este y por lo tanto, hay una pérdida importante de material al no estar usando la mitad de la distribución de tamaño del polvo.
- La presencia de gran cantidad de pequeñas salpicaduras puede explicar el K de Sommerfeld tan alto obtenido al realizar las simulaciones, ya que, como se mencionó anteriormente, para que se

forme un splat el valor del K de Sommerfeld debe encontrarse entre 3 y 57,7.

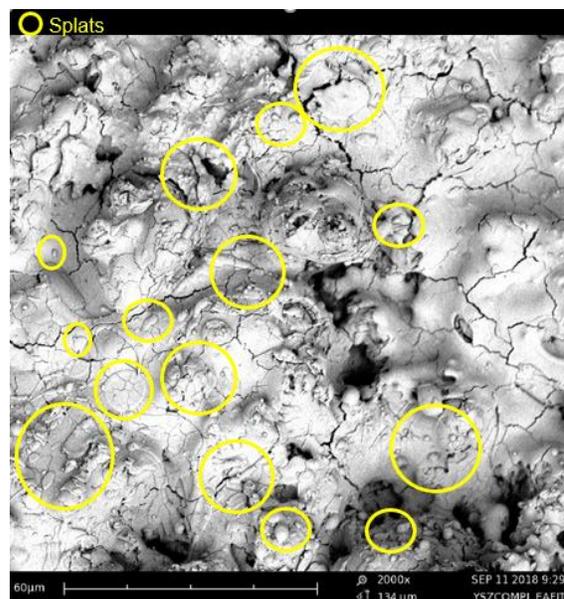


Figura 2. Microestructura evaluada por medio de SEM a 2000X en la superficie de los recubrimientos elaborados.

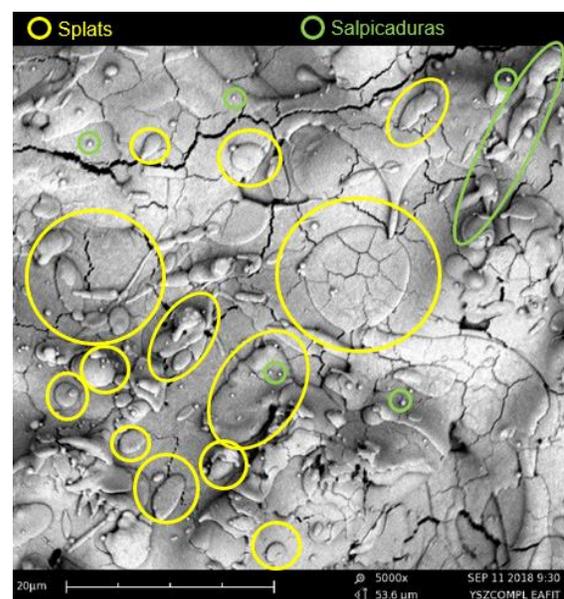


Figura 3. Microestructura evaluada por medio de SEM a 5000X en la superficie de los recubrimientos elaborados.



3.2. Resultados segunda etapa

Luego de clasificar el polvo en tres fracciones de tamaño de partícula, se realizan nuevas proyecciones que permiten evaluar las hipótesis derivadas de los resultados obtenidos en la primera etapa.

3.2.1. Resultados de las mediciones experimentales de la segunda etapa:

En la Tabla 7 se muestran los resultados de las mediciones experimentales de velocidad y temperatura de las partículas. En esta se observa que las partículas de menor tamaño son las que logran la mayor velocidad de vuelo, lo cual se explica por su facilidad de movimiento debido a su peso liviano y tamaños reducidos; por esta misma relación peso/tamaño se deduce que la velocidad de vuelo más baja corresponde a las partículas del mayor tamaño.

Tabla 7. Resultados experimentales de la medición de las partículas en vuelo para la segunda etapa.

Distribución de tamaño	Grandes	Medianas	Pequeñas
Velocidad de partículas [m/s]	188,3 ± 2,5	207,9 ± 3,9	230,1 ± 6,8
Temperatura de partículas [K]	2800,5 ± 12,9	2808,1 ± 24,8	2739,1 ± 24,8

En este caso, la temperatura de las partículas exhibe un comportamiento homogéneo en cada tamaño de partículas. Con estos resultados se puede confirmar que la gran mayoría de partículas proyectadas llegan totalmente fundidas al sustrato.

En relación con las simulaciones realizadas, a pesar de que se prevé que las partículas grandes no llegan al sustrato, sí se evidencia

la formación de recubrimiento y se obtienen datos en las mediciones experimentales para las mismas, lo cual es explicable por medio del análisis de la microestructura de los recubrimientos generados.

3.2.2. Resultados del análisis microestructural de los recubrimientos elaborados

Para los recubrimientos elaborados con cada una de las distribuciones de polvo proyectadas se realizó un análisis microestructural con el fin de explicar los resultados obtenidos en la medición experimental de las partículas en vuelo.

Para la distribución de tamaño de las partículas grandes los resultados de las simulaciones muestran que estas no tienen la capacidad para ser generadoras de recubrimientos. Sin embargo, en este análisis de la microestructura se observa (Figura 4) la presencia de una gran cantidad de *splats* muy pequeños, pero no salpicaduras lo que indica que probablemente la razón por la cual el recubrimiento se está formando es por el aporte de las partículas pequeñas que se encuentran alojadas en el hueco interior de las partículas grandes. La formación de *splats* de tamaños tan pequeños en la microestructura de todos los recubrimientos indica que durante el vuelo hacia el sustrato, y debido a la temperatura que alcanzan las partículas, estas se desintegran y permiten la salida de las partículas más pequeñas presentes en su interior.

Estos resultados llevan a refutar la primera hipótesis derivada de los resultados de la primera etapa que planteaba que los recubrimientos únicamente se formaban con partículas menores a 50 µm. Como se puede



observar en la microestructura de la superficie de los recubrimientos, las partículas más grandes (mayores a $50\ \mu\text{m}$) se desintegran y permiten que las partículas pequeñas, que las conforman, sean las que lleguen al sustrato.

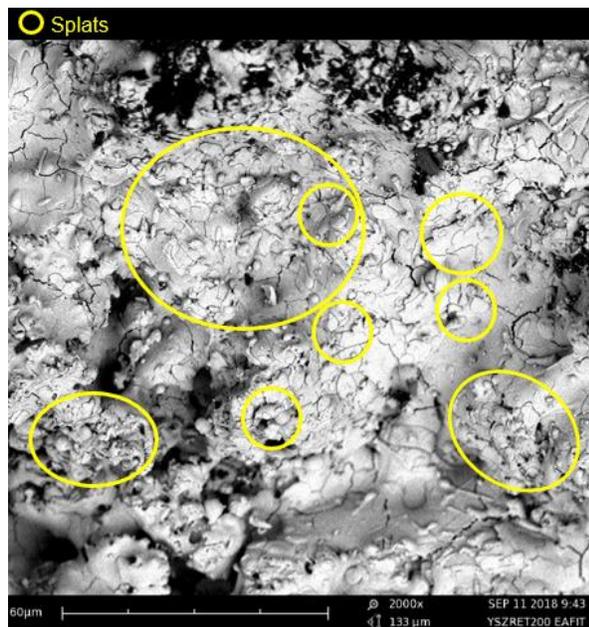


Figura 4. Microestructura del recubrimiento generado con la distribución de tamaño de partículas grandes observado a 2000X.

Para la distribución de tamaño de las partículas medianas su microestructura muestra la presencia de *splats* de partículas grandes los cuales poseen pequeños grumos o montículos dentro de ellos que corresponden a las partículas más pequeñas de las cuales ellos se componen (Figura 5). Esta formación evidencia la morfología de las partículas y apoya la hipótesis de que las partículas más grandes se desintegran y llegan al sustrato en forma de partículas más pequeñas.

Estas formaciones empiezan a observarse en las proyecciones de polvos de este tamaño, debido a que las partículas más livianas experimentan un régimen termocinético diferente el cual les permite pasar por el jet

sin desagregarse y sin fundirse completamente en su interior.

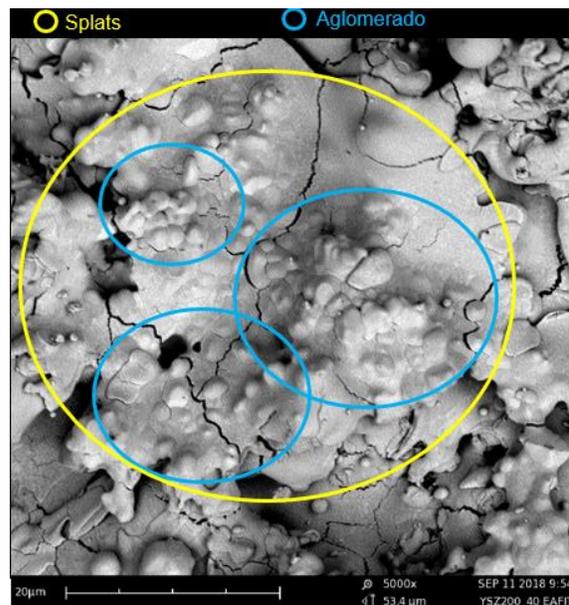


Figura 5. Microestructura del recubrimiento generado con la distribución de tamaño de partículas medianas observado a 5000X.

Para la distribución de tamaño de las partículas pequeñas su microestructura está constituida por algunos *splats*, como se presenta en la Figura 6, causados por la desaglomeración de partículas y por las partículas no desagregadas. También se observan algunas salpicaduras causadas por el impacto de las partículas con una alta energía cinética, lo que permite explicar los valores del K de Sommerfeld tan altos que se obtienen en las simulaciones. Igualmente se puede observar que se generan aglomerados correspondientes a la morfología de las partículas y que estos son de tamaños correspondientes a los tamaños de partícula presentes en este polvo.



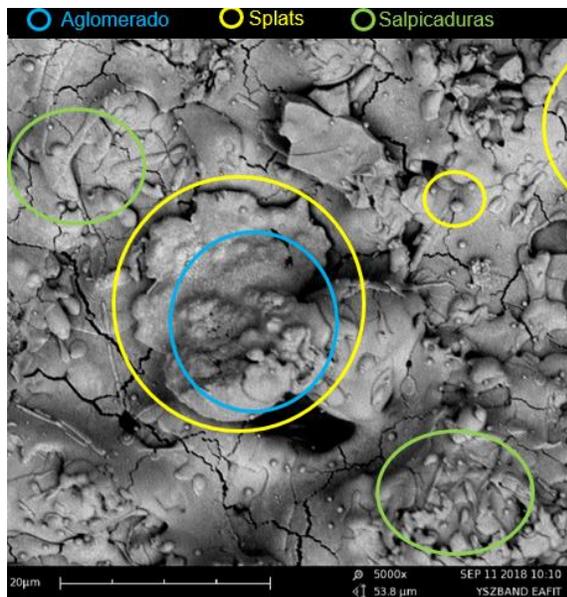


Figura 6. Microestructura del recubrimiento generada con la distribución de tamaño de partículas pequeñas observado a 5000X.

Una vez caracterizada la microestructura de todos los recubrimientos generados es posible afirmar que:

- La distribución de tamaño del polvo Metco 204NS-G es efectiva en su totalidad ya que por su morfología las partículas pueden desintegrarse y alcanzar a llegar al sustrato en forma de muchas partículas pequeñas de las cuales están compuestas, al contrario de lo propuesto en la hipótesis inicial de la primera etapa.
- El K de Sommerfeld resultante de las simulaciones es coherente con los resultados de la caracterización microestructural porque se puede observar la presencia de gran cantidad de salpicaduras y splats mal formados que se generaran durante el proceso.
- El software “Jets et Poudres” anticipa muy bien el comportamiento de las partículas en vuelo cuando éstas son totalmente

sólidas, pero presenta limitaciones cuando las partículas están formadas de partículas más pequeñas, lo cual se evidenció con los resultados obtenidos.

4. CONCLUSIONES

1. Para realizar simulaciones con el software “Jets et Poudres” de un proceso de proyección térmica que emplee una antorcha Oerlikon Metco SinplexPro, los parámetros de entrada desconocidos del proceso son:

- La eficiencia térmica de la antorcha.
- El modelo de turbulencia.
- La composición de la atmósfera circundante.

2. Durante este estudio se identificó que las condiciones de estos parámetros son:

- La eficiencia térmica con valores entre el 85 % y 95 % logra predecir adecuadamente el comportamiento, por lo cual se puede inferir que no es necesario un valor exacto debido a que la variación de los resultados con uno u otro valor no es relevante matemáticamente.
- El modelo de turbulencia que mejor simula el jet de plasma de este estudio es el modelo de longitud de mezcla (Mixing Length), ya que es el que mejor describe el perfil de temperatura generado con esta clase de antorchas.
- La aplicación de barrera de confinamiento no es necesaria debido a que los resultados de las velocidades y temperaturas registrados no evidencian



ningún sentido físico y se alejan de la realidad por cuanto la antorcha empleada no contó con un flujo de aire externo que mantuviera confinada la temperatura dentro de un rango durante la fabricación de los recubrimientos.

3. El software “Jets et Poudres” no tiene en cuenta que las partículas pueden ser porosas o estar compuestas por la acumulación de pequeñas partículas y es probable que por esta razón los resultados de las simulaciones realizadas en este estudio no sean acordes con el comportamiento de las partículas experimentalmente observado para tamaños superiores a 45 μm . Sin embargo, para partículas por debajo de este tamaño, el software logra predecir adecuadamente el comportamiento de las mismas, ya que, comparando los resultados de las simulaciones frente a los resultados de las mediciones experimentales y las caracterizaciones realizadas sobre los recubrimientos, se identifica buena concordancia entre ellos, específicamente para los valores de temperatura y velocidad.

5. AGRADECIMIENTOS

"Queremos expresar nuestro agradecimiento al Ministerio de Ciencias, Tecnología e Innovación – MinCiencias, por el apoyo financiero concedido al proyecto de investigación 70609 en el marco de la propuesta de programa 1118-852-70260 bajo el contrato 8074-157-2021 de 2021 que permitió la realización de esta investigación y por su misión institucional que aporta cada día al crecimiento científico y tecnológico de la sociedad colombiana. Además, agradecemos a la Universidad EAFIT,

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y Universidad de Antioquia por su colaboración, así como a Empresas Públicas de Medellín (EPM) por su apoyo técnico, académico y estratégico."

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fauchais, P. L., Heberlein, J. V. R., Boulos, M. I., *Thermal Spray Fundamentals*, 2014.
- [2] Pawlowski, L., *The science and engineering of thermal spray coatings*, Wiley, 2nd Edition, 2008.
- [3] Semenov, S., Cetegen, B., "Spectroscopic temperature measurements in direct current arc plasma jets used in thermal spray processing of materials," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 326–336, 2001.
- [4] Van Steenkiste, T. H., *et al.*, "Kinetic spray coatings," *Surf Coat Technol*, vol. 111, no. 1, pp. 62–71, 1999.
- [5] Wan, Y. P., Prasad, V., Wang, G. X., Sampath, S., Fincke, J. R., "Model and Powder Particle Heating, Melting, Resolidification, and Evaporation in Plasma Spraying Processes," *J Heat Transfer*, vol. 121, no. 3, p. 691, 2008..
- [6] Pasandideh-Fard, M., Pershin, V., Chandra, S., Mostaghimi, J., "Splat shapes in a thermal spray coating process: Simulations and experiments," *Journal of Thermal*



Spray Technology, vol. 11, no. 2, pp. 206–217, 2002.

[7] Liu, H., Lavernia, E. J., Rangel, R. H., “Numerical simulation of substrate impact and freezing of droplets in plasma spray processes,” *J Phys D Appl Phys*, vol. 26, no. 11, pp. 1900–1908, 1993.

[8] Delluc, G., Ageorges, H., Pateyron, B., Fauchais, P., “Fast modelling of plasma jet and particle behaviours in spray conditions,” *High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes)*, vol. 9, no. 2, pp. 211–226, 2005.

[9] Grigaitiene, V., Valinčius, V., Keželis, R., “Measurement and numerical simulation of two-phase plasma flow in plasma spray process,” *Lithuanian Journal of Physics*, vol. 49, no. 1, pp. 91–96, 2009.

[10] Ferrer, M., Vargas, F., Pena, G., “Optimization of the parameters for obtaining zirconia-alumina coatings, made by flame spraying from results of numerical simulation,” *J Phys Conf Ser*, vol. 935, no. 1, 2017.

[11] Copete, H., Vargas, F., López, E., Gómez, J., Ríos, T., “Improvement of the adhesion on Hydroxyapatite coatings produced by oxyfuel thermal spray from results of numerical simulation Mejoramiento de la adherencia en recubrimientos de Hidroxiapatita elaborados mediante proyección térmica oxiacetilénica, a partir,” *Dyna (Medellin)*, vol. 81, no. 184, pp. 1–2, 2014.

[12] Ben Ettouil, F., Pateyron, B., Ageorges, H., El Ganaoui, M., Fauchais, P., Mazhorova, O., “Fast modeling of phase changes in a particle injected within a d.c plasma jet,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 16, no. 5–6, pp. 744–750, 2007.

[13] Oerlikon-Metco, “Material Product Data Sheet Nickel Cobalt Chromium Aluminum [Tantalum, Hafnium, Silicon] Yttrium (NiCoCrAl [Ta, HfSi] Y) Thermal Spray Powders.” pp. 2–6, 2018.

[14] Spišiak, J., Hartmanová, M., Knab, G. G., Krcho, S., “Thermal properties of yttria-stabilized zirconia (YSZ),” *J Eur Ceram Soc*, vol. 11, no. 6, pp. 509–514, 1993.

[15] Oerlikon-Metco, “Material Product Data Sheet High Yttria Percentage Stabilized Zirconia Agglomerated and Plasma-Densified Thermal Spray Powders,” pp. 1–3, 2017.

[16] Zambrano, D. F., *et al.*, “Thermal properties and phase stability of Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) coating deposited by Air Plasma Spray onto a Ni-base superalloy,” *Ceram Int*, vol. 44, no. 4, pp. 3625–3635, 2018.

[17] Zhu, L., Zhang, N., Coddet, C., Bolot, R., Liao, H., “Thermal Shock Properties of Yttria-Stabilized Zirconia Coatings Deposited Using Low-Energy Very Low Pressure Plasma Spraying,” *Surface Review and*



Letters, vol. 22, no. 05, p. 1550061, 2015.

[18] Delluc, G., Mariaux, G., Vardelle, A., Fauchais, P., Pateyron, B., “A Numerical Tool for Plasma Spraying Part I: Modelling of Plasma Jet and Particle Behaviour,” *16th International Symposium on Plasma Chemistry*, pp. 1–6, 2003.

[19] Delluc, G., Mariaux, G., Vardelle, A., “A numerical tool for plasma spraying. Part II: Model of statistic distribution of alumina multi particle powder,” *Proceedings of the 16th International Symposium on Plasma Chemistry*, no. June, pp. 1–6, 2003.

[20] Escure, C., Vardelle, M., Fauchais, P., “Experimental and Theoretical Study of the Impact of Alumina Droplets on Cold and Hot Substrates,” *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 23, no. 2, pp. 185–221, 2003.

[21] Escure, C., Vardelle, M., Fauchais, P., “Experimental and Theoretical Study of the Impact of Alumina Droplets on Cold and Hot Substrates,” *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 23, no. 2, 2003.

