

# UNA REVISIÓN DEL SPRAY TÉRMICO COMO TÉCNICA DE DEPOSICIÓN PARA CAPAS DE BARRERAS TÉRMICAS

\* Eduardo Rondón Briceño      \*\* Freddy Fernández Rojas

\*\*\* Carlos Fernández Rojas

Recibido: 23/02/2015    Aprobado: 01/07/2015

## Resumen

Es importante conocer las técnicas de deposición de barreras térmicas ya que de ellas depende la obtención de materiales con baja conductividad térmica en la barrera. La dependencia de la conductividad térmica con la temperatura puede dividirse en cuatro regiones. En este trabajo estuvimos interesados en el estudio de las técnicas que se utilizan para la fabricación de materiales sometidos a muy altas temperaturas y donde se desea que su conductividad térmica sea baja, es decir, materiales que se encuentran en la región III y IV. En estas regiones se puede disminuir la conductividad térmica aumentando la porosidad del material. A través del estudio de las técnicas de deposición de barreras térmica, hemos encontrado que la técnica del spray térmico produce una alta porosidad en el recubrimiento, siendo el método de rociado con baja velocidad el mejor método para producir capas de  $La_2Zr_2O_7$  con mínima conductividad térmica. La técnica del spray térmico es de bajo costo y casi cualquier material puede ser rociado térmicamente, siendo así una técnica muy atractiva para aplicaciones industriales.

**Palabras clave:** Barreras térmicas, spray térmico, conductividad térmica.

---

\* *Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Núcleo Alberto Adriani, Mérida, Venezuela, Msc, erondon@ula.ve*

\*\* *Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Mérida, Venezuela, Msc, freddyf@ula.ve*

\*\*\* *Universidad Nacional Experimental del Sur del Lago, UNESUR, Departamento de Física, Mérida, Licenciado en Química, Venezuela, fernandezca@unesur.edu.ve*

## THE THERMAL SPRAY AS A DEPOSITION TECHNIQUE FOR THERMAL BARRIER COATING: A REVIEW

### Abstract

It is important to know the thermal barrier deposition techniques since materials with low thermal conductivity in the barrier can be obtained from them. The dependence of the thermal conductivity with the temperature can be divided into four regions. In this work, we were interested in the study of used techniques for the manufacture of materials with a desirable low thermal conductivity that will be exposed to high temperatures that is to say, materials found in the III and IV region. In these regions the thermal conductivity can be reduced increasing the porosity of the material. Through the study of the thermal barrier deposition techniques we found that the thermal spray produces a coat with high porosity, being the low velocity flame spray technique the best to produce coat of  $La_2Zr_2O_7$  with a minimal thermal conductivity. The thermal spray technique is low cost and almost any material can be thermally sprayed, so this can be considered a very attractive technique for industrial applications.

**Keywords:** Thermal barrier, thermal spray, thermal conductivity.

## INTRODUCCIÓN

De la teoría cinética de los gases se encuentra que la conductividad térmica depende del calor específico, la velocidad de los portadores y el camino libre medio de estos, mientras que en los sólidos se ve influenciada por factores como: La dispersión de fonones, defectos en el material, estructura cristalina, tipos de átomos presentes y porosidad del material. La dependencia de la conductividad térmica con la temperatura puede dividirse en cuatro regiones (Rondón, 2004; Fernández et al., 2006). En la región I la temperatura se incrementa rápidamente ( $\propto T^3$ ) dependiendo de las dimensiones físicas del material, el tamaño de grano y el espaciamiento entre dislocaciones. En la región II la dependencia por estos factores en la conductividad térmica se ve disminuida encontrando un pico de máxima conductividad a una temperatura  $\approx \Theta_D/20$ , donde  $\Theta_D$  es la temperatura de Debye. En la región III la conductividad térmica depende de la dispersión de fonones a través del proceso-u “umklapp” siendo  $\propto T^{-1}$ ; mientras que en la región IV la conductividad térmica alcanza valores mínimos y es debida a los fonones con camino libre medio del orden de un es-

paciamiento interatómico. Las barreras térmicas son el mejor sistema desarrollado para disminuir la conductividad térmica en materiales, y esta consiste en un sistema de capas depositadas en el material en el que se desea disminuir dicha conductividad térmica (Fernández, Rondón, Fernández, Salas y García, 2012).

Cuadro 1: Propiedades térmicas de algunos materiales utilizados como barreras térmicas con sus respectivas unidades para condiciones ideales de presión y de estructura cristalina.

Materiales	Conductividad ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )	Difusividad térmica ( $m^2s^{-1}$ )	Punto de fusión (K)
<i>ZrO<sub>2</sub></i>	2.17 (1273K)	$0,43x10^{-6}$	2973
3YSZ	2.12 (1273K)	$0,58x10^{-6}$	2973
Mullite	3.3 (1400K)	—————	2123
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	5.8(1400K)	$0,47x10^{-6}$	2323
<i>CeO<sub>2</sub></i>	2.77(1273K)	$0,86x10^{-6}$	2873
<i>La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub></i>	1.56(1273K)	$0,54x10^{-6}$	2573
<i>BaZrO<sub>3</sub></i>	3.42(1273K)	$1,25x10^{-6}$	2963
<i>TiO<sub>2</sub></i>	3.3(1400K)	$0,52x10^{-6}$	2098
<i>LaPO<sub>4</sub></i>	1.8(973K)	—————	2343
<i>Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub></i>	1.14	—————	—————
<i>ThO<sub>2</sub></i>	0.98	—————	—————
Diamante	600	$400x10^{-6}$	3925
Aleación de Cu	300	$100x10^{-6}$	1083

Conocer los valores de la conductividad térmica y difusividad térmica de un material es relevante ya que a través de ellas podemos saber si un material puede ser utilizado como aislante térmico o no, y que tan rápido este puede enfriarse (Cuadro 1). Estos parámetros son de gran relevancia para la selección de los materiales que serán utilizados como barreras térmicas, así como también el análisis de las técnicas utilizadas en la deposición de las barreras, ya que estas técnicas nos permitirán un mejor entendimiento del mecanismo interno en el proceso pre-deposición así como de la estructura generada por las diferentes técnicas de generación de barreras térmicas.

## MÉTODOS DE DEPOSICIÓN

Existen varios métodos para depositar barreras térmicas y en general todos ellos se fundamentan en el método usado para incrementar la temperatura del material a depositar a un valor muy cercano o igual a su temperatura de fusión. Entre las técnicas más comunes podemos mencionar el Electron Beam Physical Vapor Deposition (EB-PVD) y el Air Plasma Spray (APS) o spray térmico.

En el método Electron Beam Physical Vapor Deposition (EB-PVD) se hace incidir un haz de electrones sobre la superficie del material que se desea depositar, se evapora el óxido, dirigiendo el vapor sobre el sustrato precalentado (Figura 1). A través de este método de deposición se crea una estructura granular columnar con porosidad multiescalar que provee tolerancia a la tensión y también reduce la conductividad térmica (Rondón, 2004). En este método el material es vaporizado usando un haz de electrones, el vapor entra en un gas portador y el material vaporizado llega al sustrato, el gas portador es inerte evitando de esta forma contaminación en la película, este gas se expande a diferentes velocidades, dependiendo del inyector, llegando a la cámara. La variación de la presión en la cámara influye en la estructura de los poros. Con este método se logran películas más densas y homogéneas estructuralmente con amplia aplicación en la fabricación de dispositivos eléctricos.

En el método Air Plasma Spray(APS) el material que se va a utilizar como recubridor es colocado dentro de un dispositivo, el cual calienta los materiales a un estado plástico o fundido, luego es acelerado por un gas comprimido hacia el sustrato. Las partículas golpean la superficie y se aplanan, formando delgadas placas que se conforman y adhieren a las irregularidades de la superficie preparada (Figura 2). Existe todo un amplio espectro de posibilidades estructurales y densidades que se logran con esta técnica de deposición, sin embargo, los parámetros del proceso se pueden optimizar para la aplicación de interés. En la siguiente sección desarrollaremos con mayor detalle los aspectos fundamentales y la física involucrada en el spray térmico.

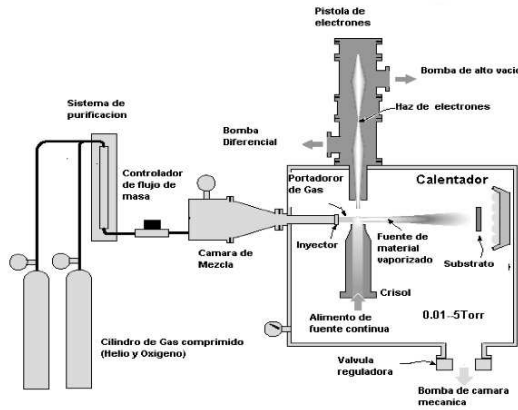


Figura 1: Ilustración esquemática del sistema de proceso de Electrón Beam Physical Vapor Deposition (Hass, 2001).

## SPRAY TÉRMICO

¿Qué es el rociado térmico?. Es un proceso de recubrimiento que permite depositar capas de un material en condiciones de fusión o semifusión, sobre una superficie; mejorando así el funcionamiento de la misma.

¿Por qué utilizar el rociado térmico?. Las capas que son depositadas con este método proporcionan protección contra la corrosión, oxidación y al desgaste de muchos tipos, tales como: La abrasión, la adherencia, fricción y erosión (Marulanda, Zapata y Isaza, 2007). Las barreras térmicas pueden ser utilizadas para circuitos eléctricos, sellos mecánicos y para propósitos decorativos (Nusair y Lu, 2009).

Casi cualquier tipo de material pueden ser rociados térmicamente, el proceso de rociado térmico es fácil de usar, tiene poco costo de operación y atributos que beneficia las aplicaciones en la mayoría de las industrias, tienen bajo costo en el funcionamiento de las maquinas e incremento en la vida de los componentes. Hay muchos tipos de procesos de rociado térmico, sin embargo, básicamente se puede decir que estos sirven para depositar materiales metálicos y no metálicos en un estado fundido o semi fundido.

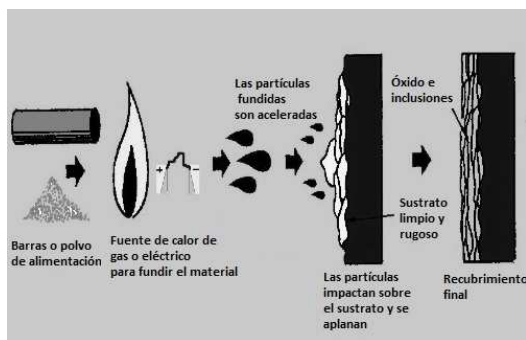


Figura 2: Descripción del método de rociado térmico, y microestructura depositada sobre el sustrato (Rondón, 2004).

### Descripción de la técnica del spray térmico

El material que se va a utilizar como recubridor es colocado dentro de un dispositivo, el cual calienta los materiales a un estado plástico o fundido, luego es acelerado por un gas comprimido hacia el sustrato. Las partículas golpean la superficie y se aplanan formando delgadas placas que conforman y adhieren las irregularidades de la superficie preparada (Figura 2).

Como las partículas fundidas rociadas llegan al sustrato, ellas se enfrían y se aplanan disminuyendo su espesor, de esta manera se construyen placas por placas una estructura laminar formándose un recubrimiento o depósito del material que ha sido rociado.

### Microestructura del recubrimiento depositado usando la técnica del spray térmico

La microestructura del recubrimiento depositada con el método del spray térmico, tiene característica laminar o de placas (Osorio, Hernández-Ortíz y Toro, 2014). La estructura es creada cuando las partículas esféricas fundidas son aceleradas, impactando sobre la superficie, solidificándose y fijándose sobre el sustrato. Las partículas esféricas fundidas, al momento del impacto se aplanan hacia afuera en láminas alargadas. Estas laminillas forman los contornos ondulados, de las partículas rociadas. Los diferentes niveles de porosidad y

la cantidad de óxido incluido en la capa final, son una función de la velocidad de las partículas fundidas y el medio ambiente, aire o inerte, que es usado. Las capas son típicamente enlazadas al sustrato por enclaves mecánicos (debido a la superficie rugosa). Este enlace es frecuentemente llamado fuerte enlace adhesivo mientras que la adhesión partícula a partícula es llamado enlace cohesivo, estos enlaces son los que darán las características físicas y propiedades mecánicas de las capas de barreras térmicas (Osorio et al., 2013).

### Tipos de procesos de rociado térmico

La variación del proceso de rociado térmico lo hacen los materiales que alimentan el rociado, el método de calentamiento y el método de propulsión de los materiales al sustrato. En el Cuadro 2 se muestra algunos tipos de procesos de rociado térmico. Dependiendo del método utilizado, las partículas serán más o menos aceleradas y se tendrá preferencia en la utilización de uno u otro material.

Cuadro 2: Tipos de proceso de spray térmico.

Fuente de calor: Combustión	Fuente de calor: Eléctrico
Rociado con llama a baja velocidad (Low velocity flame spray) (LVFS)	Rociador de plasma ( Plasma Spraying)
Rociado con llama a alta velocidad (High Velocity Oxy Full) (HVOF)	Arco de alambre(Wire Arc)
Detonación(D-Gun)	Rociado de plasma por inducción (Induction Plasma Spraying)
	Rociado en frío(Cold Spraying)

**Fuente de calentamiento: Combustión.** En estos dispositivos se usa la energía liberada en la combustión, usando gases como propano o hidrógeno, de tal modo de producir un aumento en la temperatura del material a rociar, así como la velocidad de las micropartículas.

**Rociado con llama a baja velocidad (LVFS).** El material utilizado para la deposición se encuentra en forma de cilindro, polvo o alambre. La llama normalmente es de oxígeno de acetileno, por las altas temperaturas que este permite, otros gases combustibles tales

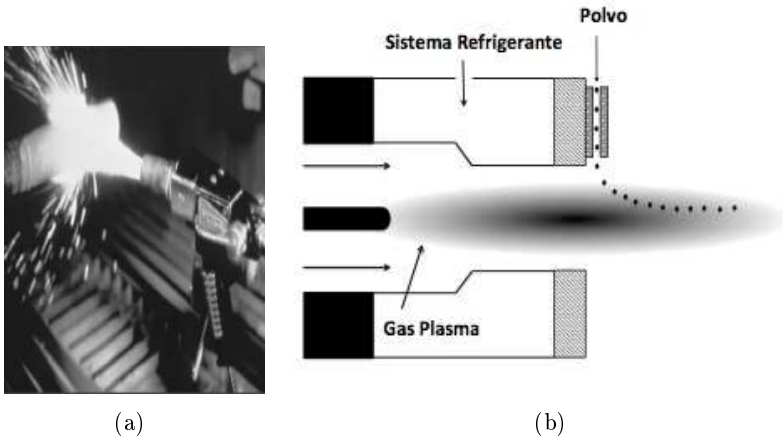


Figura 3: (a) Fotografía de un dispositivo LVFS (Equipo de Sulzter Metco), low velocity flame spray, donde la fuente de calentamiento de las partículas es generada por combustión y el rociado es de baja velocidad. (b) Esquema de proceso de calentamiento usando como fuente de calentamiento un combustible (Herbert et al., 2000).

como: propano, gas natural, hidrogeno o metil-acetileno, también pueden ser utilizados. Comparado con otros métodos de recubrimiento, la energía cinética de las partículas y las temperaturas son más bajas, la velocidad de las partículas alcanzan unos 50 m/s (Herbert, Sanjay y McCune, 2000) (Cuadro 3) produciendo más poros, capas con más baja densidad y una baja adherencia. Esta técnica es usada en metales y materiales con bajo punto de fusión (Spinhirne, Hirschfeld, Hall y McCloskey, 2009). En la Figura 3 podemos ver un dispositivo que utiliza este método.

En esta técnica, el oxígeno aspira el polvo de un depósito e inyecta este dentro de la flama de oxígeno, figura 3(b), el gas inerte presurizado lleva el polvo dentro de la flama. En este tipo de dispositivos el gas inerte o presurizado incrementa la velocidad de las partículas, para aumentar la adherencia y la densidad del recubrimiento, mientras se enfría el sustrato.

La utilización de gas inerte sirve para ayudar a reducir la oxidación



Cuadro 3: Característica de varios procesos de spray térmico y sus materiales característicos.

Tipo de spray	Tipo de Alimentador	Temperatura de la llama	Velocidad de las partículas (m/s)	Materiales	Microestructura	Aplicaciones
Combustión	Alambre/Polvo	3000°C	40-100	Metales, polímeros, cerámicas	Relativamente alta porosidad y oxidación	Recuperación, Protección a la corrosión
HVOF	Polvo	3000°C	400-800	Metales y cerámicas de bajo punto de fusión	Alta densidad, buena adherencia y tensión compresiva	Protección al desgaste
Plasma	Polvo o alambre	(5000 – 25000)°C	80-300	Metales y cerámicas	Porosidad en depósitos cerámicos	Barreras térmicas, aislador
Cold spray	Polvo	Temperatura ambiente	400-800	Metales	Tensión compresiva	Conductor

de las partículas y el sustrato. Cuando el material que alimenta el rociado es un alambre o un cilindro, se empuja el material a través del dispositivo dentro de la flama de combustión para fundirlo. El gas comprimido, usualmente aire, fluye alrededor de la flama atomizando el material, ya que este funde la punta del alambre o el cilindro, propulsando el material fundido o semifundido sobre el sustrato. La técnica del rociado de flama de polvo puede ser usado para depositar cualquier material con punto de fusión por debajo de los ( $4000^{\circ}F - 5000^{\circ}F$ ) o ( $2204^{\circ}C - 2760^{\circ}C$ ). En la técnica de rociado de flama de alambre puede usarse cualquier material alimentador, usualmente metales y materiales cerámicos con bajo punto de fusión.

**Rociado con llama a alta velocidad (HVOF).** Las partículas de polvo, de  $10\mu m$  a  $40\mu m$  de diámetro (Herbert et al., 2000), se alimentan axialmente dentro del inyector (Figura. 4b).

Las partículas son llevadas a un gas de combustión de alta presión. Los gases se expanden rápidamente a través de un inyector restringido, cuando se realiza la combustión con oxígeno se aceleran las partículas fundidas a velocidades supersónicas, ver cuadro 3. En esta técnica se puede utilizar como combustible kerosene, propileno, propano, hidrógeno y oxígeno a baja presión. La energía cinética de las partículas es muy alta y el rendimiento de la energía térmica es controlada, produciendo capas de baja porosidad y por lo tanto una alta



(a)



(b)

Figura 4: (a) Fotografía de una pistola de HVOF (Equipo de Kennametal Stellite). (b) Esquema de una fuente de spray de HVOF (Herbert et al., 2000).

densidad, con alta adherencia, buen acabado de la superficie rociada y bajo stress residual (Stokes, 2008). La alta aceleración del gas incrementa la densidad del recubrimiento, la adherencia y bajo contenido en óxido (Chen, Wu, Marple, Nagy y Patnaik, 2008).

**Fuente de calentamiento: Eléctrico.** En estos dispositivos se usa una diferencia de potencial entre dos placas paralelas para aumentar la temperatura y la velocidad de las partículas del material a rociar.

**Proceso de rociado con plasma:** Fundamentalmente usa microondas, campos acoplados por inducción y voltaje AC o DC como fuente de energía para plasmas térmicos. El material es inyectado en la forma de polvo dentro de la flama de un plasma a alta temperatura donde este es calentado rápidamente y acelerado (Figura 5). El material caliente impacta sobre la superficie del sustrato y rápidamente

se enfría formando una capa. El alto grado de fusión y la relativa alta velocidad de las partículas proveen al recubrimiento una alta densidad y un fuerte enlace. Controlando la atmósfera del rociado de plasma, usando en la cámara gas inerte, reducimos la cantidad de óxido y mejoramos la densidad del recubrimiento. Cuando el proceso de rociado de plasma es a baja presión se producen recubrimientos limpios libre de óxido.

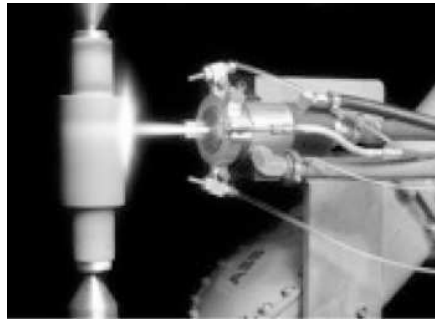


Figura 5: Muestra de la flama producida utilizando una fuente de calentamiento eléctrico (Equipo de Progressive Surface).

El dispositivo de rociado de plasma comprende un ánodo de cobre y un cátodo de tungsteno (Figura 6). Ambos son enfriados con un sistema refrigerante. A través del ánodo y el cátodo fluye gas el cual puede ser de argón, nitrógeno, hidrogeno y helio, este sistema funciona como un inyector. Inicialmente se produce una descarga con alto voltaje que causa la ionización del gas producida por un voltaje DC el cual se forma entre el cátodo y el ánodo. La resistencia al calentamiento causa que el gas alcance temperaturas extremas disociando e ionizando a forma de plasma. El gas gira en un vórtice y sale fuera del extremo del ánodo. El voltaje eléctrico del cátodo al ánodo completa el circuito formando una flama de plasma que sale rotando debido al momentum que tiene en el vórtice el gas plasma. La temperatura del plasma al momento en que sale lleva una temperatura de  $25000^{\circ}\text{C}$  (Herberts y cols, 2000). Para una fuente directa, que opera a 40 kW (Herberts y cols, 2000). La temperatura del plasma cae rápidamente al salir del ánodo por esto el polvo es colocado en el punto más calien-

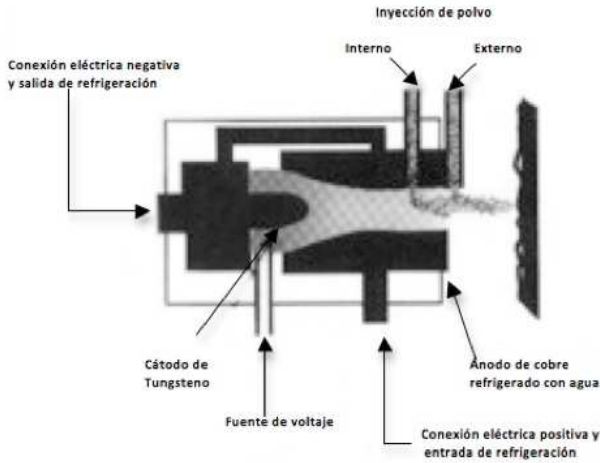


Figura 6: Esquema detallado de una fuente de plasma spray térmico, con una fuente de calentamiento eléctrico (Herberts y cols, 2000).

te de la llama. Las partículas de polvo, de aproximadamente  $40\mu\text{m}$  de diámetro, son aceleradas y fundidas obteniendo una velocidad de  $100 - 300 \text{ m/s}$  (Herberts y cols, 2000). Desplazándose al sustrato donde impactan y rápidamente se solidifican  $106 \text{ K/s}$ . El plasma spray es usado para formar depósitos de espesor  $> 2\mu\text{m}$  (comúnmente en el rango de  $50\mu\text{m}$ ). Puede ser utilizado un amplio rango de materiales como níquel, aleaciones de hierro, cerámicas tales como óxidos de aluminio y cerámicas basados en zirconio. El polvo es rápidamente calentado y acelerado rociado a una distancia en el orden de 25 a 150 mm.

**Rociado de arco de alambre.** El material fundido es continuamente atomizado por aire comprimido. Utiliza un voltaje eléctrico DC, fundiendo directamente el aislante del alambre del electrodo. Al consumirse el aislante, el alambre del electrodo avanza a un punto donde la diferencia de potencial aplicada a través del alambre inicia un voltaje que funde la punta del alambre en un gas atomizador. Fundamentalmente el gas de argón es utilizado para atomizar el material fundido y acelerar las partículas hasta el sustrato. Las partículas gene-

radas por la mayoría de los procesos de rociado de voltaje de alambre tienden a ser más grandes y más irregulares en comparación con los procesos de rociado térmico alimentado con polvo. Generalmente la baja presión en el aire atomizado, resulta en un perfil de capa rugosa, mientras que la alta presión produce una textura en la superficie suave y con finas capas. El óxido puede ser reducido al utilizar como gas atomizador nitrógeno, helio o argón.

**Proceso de rociado frío.** En este proceso las partículas de polvo inyectadas dentro de un chorro supersónico de gas comprimido impactan sobre la superficie del sustrato con suficiente energía causando deformaciones plásticas (Figura 7). Es una nueva tecnología de “spray” que puede rápidamente depositar materiales cerca de la temperatura ambiente, sin tener que calentar el material sustancialmente. El rociado en frío ofrece distintas ventajas para algunas aplicaciones como: poca o ninguna oxidación, ningún cambio de fase durante la deposición, alta conductividad eléctrica y térmica y poco stress residual.

## PARÁMETROS FÍSICOS

### Energía de adhesión

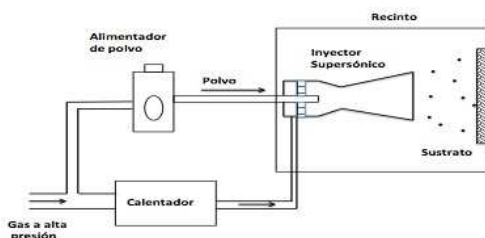
La adhesión es la propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares. Los mecanismos de adhesión depósito-substrato pueden ser clasificados en tres principales categorías: Unión mecánica: una partícula fundida golpea contra una superficie rugosa, entonces, el entrelazamiento mecánico entre las asperezas del depósito y del sustrato conducirá a una adherencia mecánica.

**Unión metalúrgica:** consecuencia de la formación de una zona de interdifusión o un compuesto intermedio entre el material proyectado y el sustrato.

**Unión física:** debida a la acción de las fuerzas de Van der Waals entre depósito y sustrato. La energía de adherencia en un recubrimiento va a depender de la energía térmica y cinética dada a las



(a)



(b)

Figura 7: (a) Fotografía de un dispositivo para el rociado en frío (Equipo de Cold Gas Technology GmbH). (b) Esquema de una fuente de rociado en frío (Herberts y cols, 2000).

partículas a través de la ecuación (1)

$$\gamma = f(v^2 + T) \tag{1}$$

Donde  $v$  es la velocidad de las partículas,  $f$  es una constante de proporcionalidad y  $T$  es la temperatura de las mismas.

En la Figura 8 hemos graficado la ecuación (1) como un mapa de contorno, en donde se muestra la adherencia dependiente de la técnica que usemos, observándose que la técnica cold spray presenta una mayor adherencia al sustrato, sin embargo, debido a que se realiza a temperaturas ambiente amerita de velocidades muy grande (Cuadro 3) para así poder enclavar las partículas, sin embargo, se puede observar que es posible obtener resultados similares usando la técnica

HVOF con temperaturas superiores a la ambiente y pudiendo así dar a las partículas velocidades inferiores a la técnica cold spray.

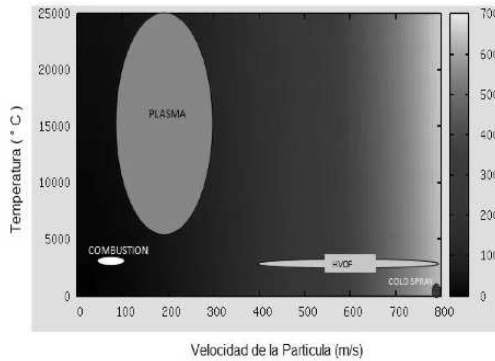


Figura 8: Mapa de contorno de la energía de adhesión en función de la temperatura y de la velocidad de la partícula.

## Porosidad

La porosidad de un material es una medida de los espacios vacíos en el mismo, y matemáticamente puede ser expresada a través de la ecuación (2) y (3).

$$P = \frac{V_{Vacio}}{V_{Total}} \quad (2)$$

Donde  $V_{Vacio}$  es el volumen de los espacios vacíos y  $V_{Total}$  es el volumen total.

Para un material no homogéneo la medida de porosidad puede ser calculada a través de la ecuación (3)

$$P = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m} \quad (3)$$

Donde  $\rho_m$  es la densidad del material y  $\rho_a$  es la densidad promedio de las distintas regiones no homogéneas del recubrimiento.

Todos los recubrimientos producidos por el método del spray térmico producen porosidad y esta es inversamente proporcional a la

energía del impacto y a la temperatura que tengan las partículas (ecuación 4) (Simunovic, 2010). La porosidad a su vez produce cambios en la conductividad térmica del recubrimiento (ecuación 5), encontrando que a mayor porosidad del sustrato menor conductividad térmica (Zhang, Xu, Xuan, Wang y Wu, 2009).

$$P \propto v^{-1}T \tag{4}$$

En el Cuadro 4 mostramos la temperatura y la porosidad producida por tres métodos de deposición, resumida en la Figura 9.

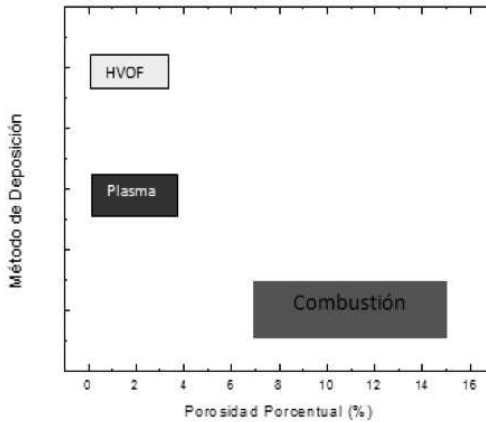


Figura 9: Porosidad del recubrimiento dependiendo de la técnica utilizada para recubrir.

$$K_{Eff} = K(1 - cP - dP^2 - \dots) \tag{5}$$

Donde K es la conductividad térmica del material sin porosidad, mientras que c y d son constantes que dependen de la distribución de los poros.

## RESULTADOS

Hemos hecho un análisis de los procesos físicos envueltos en distintos procesos de deposición para el spray térmico, cada uno de estos



Cuadro 4: Características de algunos procesos del spray térmico

Tipo de Spray	Temperatura (°C)	Porosidad (%)
Combustión	3000	7-15
Plasma	5000-25000	0.5-3
HVOF	3000	0.5-2

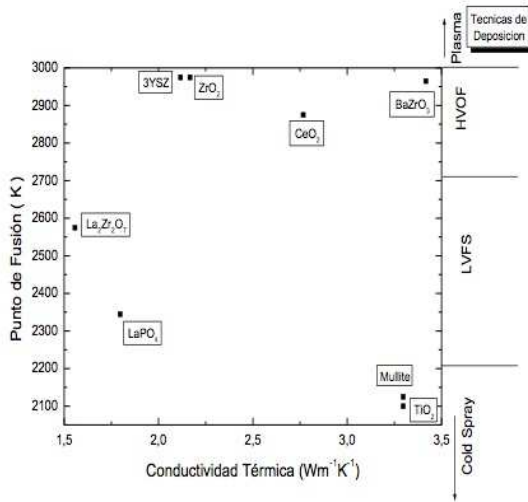


Figura 10: Punto de fusión como función de la conductividad térmica para distintos materiales, en donde se muestra el régimen de temperatura válido para determinada técnica de deposición.

procesos muestran distintos comportamientos y son aplicables para regímenes de temperaturas diferentes. En la Figura 10 se ha graficado el punto de fusión como una función de la conductividad térmica para materiales que son usados frecuentemente como barreras térmicas. Se observa que en materiales como el *3YSZ* y el *ZrO<sub>3</sub>*, los cuales presentan un alto punto de fusión, no es recomendable utilizar el método del spray térmico debido a que la única técnica posible para el régimen de temperatura de fusión que presenta estos materiales es el HVOF, técnica que produce una baja porosidad en las capas y por ende una mayor conductividad. Por otra parte podemos observar que para el *La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>* su punto de fusión se encuentra en el régimen de tempe-

raturas favorable a la técnica LVFS. Esta técnica produce una alta porosidad, obteniendo de esta forma una baja conductividad térmica en las capas.

## CONCLUSIONES

La microestructura del sistema de barreras térmicas depende del método de deposición del material. Los métodos de deposición que hemos estudiado presentan diferentes características en términos de la velocidad de las partículas a depositar, así como también diferencias en el calentamiento, y por ende en la temperatura de las mismas. La velocidad de las partículas y la temperatura alcanzada para fundir estas, depende directamente del mecanismo utilizado en la propulsión de las partículas a depositar y estas son diferentes según la fuente utilizada, las cuales pueden ser fuente de calentamiento por combustión o fuente de calentamiento eléctrico, también depende de la forma en que se suministre el material a depositar, como son por polvo o alambre. Hemos comparado los diferentes métodos de deposición del spray térmico (Cuadro 3) encontrando que el método de combustión LVFS produce capas de alta porosidad y baja densidad obteniendo de esta forma capas con baja conductividad térmica. El método LVFS puede ser utilizado para materiales con punto de fusión que se encuentre en el orden de los  $2204^{\circ}C$  y los  $2760^{\circ}C$ . A través de la Figura 10 mostramos que el mejor material a utilizar en el método LVFS es el  $La_2Zr_2O_7$ , el mismo presenta muy baja conductividad térmica y su punto de fusión es de  $2573^{\circ}C$  entrando de esta forma en el rango de temperatura alcanzada por el método LVFS. Una de las dificultades es que dicho método presenta una baja adherencia en el sustrato disminuyendo de esta forma el tiempo de vida del recubrimiento, sin embargo es común la utilización de una capa interna de alúmina para el mejoramiento de la adherencia del material al sustrato (Fernández et al., 2006).

## Referencias

Chen, W., Wu, X., Marple, B., Nagy, D. y Patnaik, P. (2008). Tgo

- growth behavior in tbc's with aps and hvof bond coats. *Surface and Coating Technology*, 202(12), 2677-2683.
- Fernández, F., Rondón, E., Fernández, C., Salas, K. y García, V. (2012). Barreras térmicas y nuevos materiales. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela*, 27(1), 100-108.
- Fernández, F., Rondón, E., Franczy, S., Salas, K., García, V. y Briceño, M. (2006). Conductividad térmica a altas temperaturas. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela*, 21(2), 21-27.
- Herbert, H., Sanjay, S. y McCune, R. (2000). Thermal spray: Current status and future trends. *Materials Research Society Bulletin*, 25(7), 17-25.
- Marulanda, J., Zapata, A. y Isaza, E. (2007). Protección contra la corrosión por medio del rociado térmico. *Scientia Et Technica*, 1(34), 237-243.
- Nusair, K. y Lu, J. (2009). Manipulation of air plasma spraying parameters for the production of ceramic coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5), 2508-2514.
- Osorio, J., Hernández-Ortíz, J. y Toro, A. (2014). Microstructure characterization of thermal barrier coating systems after controlled exposure to a high temperature. *Ceramics International*, 40(3), 4663-4671.
- Osorio, J., Maya, D., Barrios, A., Lopera, A., Jiménez, F., Meza, J., ... Toro, A. (2013). Correlations between microstructure and mechanical properties of air plasma-sprayed thermal barrier coatings exposed to a high temperature. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(12), 3901-3907.
- Rondón, E. (2004). *Barreras térmicas y nuevos materiales*. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela.
- Spinhirne, N., Hirschfeld, D., Hall, A. y McCloskey, J. (2009). The development and characterization of novel yttria-stabilized zirconia coatings deposited by very low pressure plasma spray. En *Proceedings of the international spray conference* (p. 50-55).
- Zhang, X., Xu, B., Xuan, F., Wang, H. y Wu, Y. (2009). Micros-

tructural and porosity variations in the plasma-sprayed ni-alloy coatings prepared at different spraying powers. *Journal of Alloys and Compounds*, 145-151.