

ESTUDIO DE LLAMAS OXIACETILÉNICAS USADAS EN LA PROYECCIÓN TÉRMICA

Edwin Cadavid Iglesias^{1}, Carolina Parra Velásquez¹, Fabio Vargas Galvis²*

1: Ingeniero de Materiales, Grupo de Investigaciones de Materiales y Recubrimientos Cerámicos (GIMACYR), Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

2: Doctor en Ciencias y en Ingeniería, Grupo de Investigaciones Pirometálgicas y de Materiales (GIPIMME), Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

*E-mail: edwin.cadavid@udea.edu.co

RESUMEN

En la elaboración de recubrimientos por proyección térmica con llama oxiacetilénica el conocimiento y control de las variables que modifican la llama son de gran importancia, ya que de estas depende que las partículas alcancen un estado termocinético apropiado para su correcta deposición sobre el sustrato. En este trabajo se estudió el comportamiento físico y térmico de la llama, obtenida a partir de diferentes relaciones de oxígeno y acetileno, con el fin de entender cómo modifica las características de la llama como su longitud, frecuencia del soplo y temperatura. Se utilizaron las siguientes relaciones volumétricas de acetileno:oxígeno: (1:1.4), (1:1.7), (1:2.5), (1:3.2) y (1:4.0), las cuales fueron estudiadas mediante simulaciones realizadas con el software Jets&Poudres y a través de análisis de imágenes tomadas a alta velocidad. Se observó que la llama estequiométrica cuya relación volumétrica acetileno:oxígeno es aproximadamente (1:1.7), es la que alcanza la mayor temperatura, sin embargo, las llamas oxidantes correspondientes a las relaciones (1:2.5), (1:3.2) y (1:4.0), son las que tienen la mayor longitud de la zona más caliente. Por su parte, la frecuencia del soplo de la llama aumenta con el flujo de oxígeno y se estabiliza a partir de la llama neutra.

Palabras clave: Llamas, proyección térmica, temperatura, entalpía.

STUDY OF OXYACETYLENE FLAMES USED ON THERMAL SPRAYING

ABSTRACT

The knowledge and control of parameters that modifies the flame used to manufacture coatings by oxy-fuel thermal spraying process are of great importance; to provide the particles an appropriate thermo-kinetic state achieving a correct deposition on the substrate. With the purpose of understanding the influence of the different gas ratios in the flame's temperature, frequency and length, the physical and thermal behavior of the oxyacetylene flame produced with different acetylene and oxygen ratios were studied. The acetylene-oxygen volume ratios used were (1:1.4) (1:1.7) (1:2.5) (1:3.2) and (1:4.0), which were studied by numerical simulations using the Jets&Poudres software and high-speed image analysis. It was observed that the highest temperature was reached for the flame whose volumetric acetylene:oxygen ratio is approximately (1:1.7); however, the oxidizing flames corresponding to (1:2.5), (1:3.2) and (1:4.0) ratios are those with the greatest hotter zone

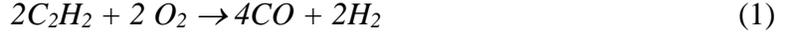
length. Meanwhile, the flame blow's frequency increases with the oxygen flow and it stabilizes from the neutral flame.

Keywords: Flames, thermal spray, temperature, enthalpy.

1. INTRODUCCIÓN

En la proyección térmica por llama (flame spray), se aprovecha la energía producida por la reacción de combustión entre un combustible y un comburente para calentar y transportar las partículas que se van a depositar sobre un sustrato. En el caso de la combustión oxiacetilénica la reacción química se da entre moléculas del hidrocarburo, en este caso acetileno (C_2H_2), y el oxígeno [1, 2].

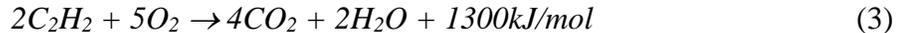
La combustión total del oxígeno con el acetileno se lleva a cabo en dos etapas. En la primera se produce una llama primaria a partir de la reacción incompleta entre cantidades equimolares de oxígeno y acetileno para formar monóxido de carbono e hidrógeno de acuerdo con la reacción de la Ecuación (1). [2]



La segunda etapa de la reacción tiene lugar cuando el hidrógeno reacciona con el oxígeno del aire que está alrededor de la llama primaria, obteniendo una llama secundaria cuyos productos son dióxido de carbono y vapor de agua de acuerdo con la reacción de la Ecuación (2).



La reacción global entonces, corresponde a la transformación completa de carbono en dióxido de carbono CO_2 y de hidrogeno en agua, de acuerdo con la reacción de la Ecuación (3).



Conforme a lo anterior, en la llama de combustión se distinguen tres zonas:

- i) Zona de mezcla de gases: Esta zona tiene el aspecto de un cono incandescente producido por la mezcla física del oxígeno con el acetileno, sin que se presente reacción química.
- ii) Zona primaria: En la que se evidencia un cono de color azul producido por la reacción primaria de combustión, que tiene una temperatura aproximada de $3200^\circ C$, siendo la zona más caliente de la llama.
- iii) Zona secundaria: Tiene una forma de penacho producido por la reacción de hidrógeno con el oxígeno del aire alrededor de la llama primaria, ésta es la zona más fría de la llama y la menos luminosa [2].

En la Figura 1, se observa la variación de la temperatura a lo largo de la llama según las reacciones químicas que ocurren durante la combustión, así como el comportamiento térmico de las llamas producidas con diferentes relaciones de acetileno:oxígeno.

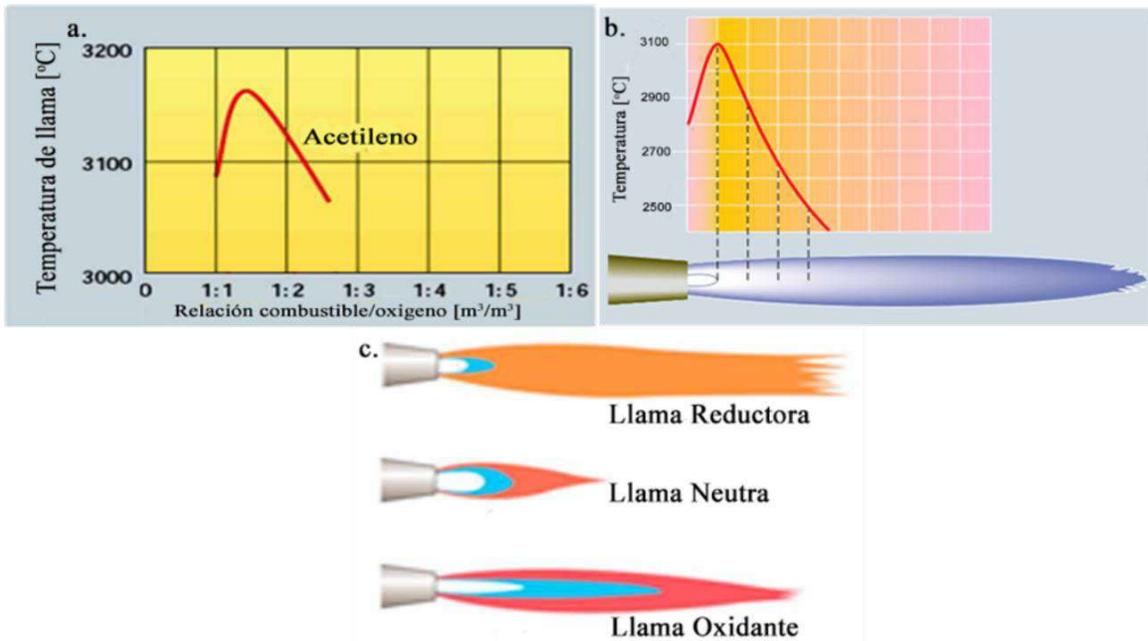


Figura 1. Comportamiento térmico de las llamas de combustión oxiacetilénica (a) Efecto de la relación acetileno:oxígeno sobre la temperatura de la llama, (b) Distribución de temperatura en las diferentes zonas una llama oxiacetilénica, (c) Longitud de las diferentes zonas de la llama según su tipo [3].

Mediante la variación de los flujos de acetileno y oxígeno, la llama se puede variar, para hacerla “neutra”, “oxidante” o “reductora”; ver Figura 1c. Se considera “neutra” cuando la reacción de combustión es producida a partir de una cantidad equimolar de combustible y comburente, lo que corresponde a una relación volumétrica de acetileno:oxígeno (1:1.7), mientras que es reductora cuando hay un exceso de combustible y se considera oxidante si por el contrario hay exceso de comburente [1].

El exceso bien sea de átomos de comburente o de combustible no participará en la reacción que da origen a la generación de calor y por el contrario su presencia en el entorno de la reacción consumirá calor, reduciendo la temperatura de la llama, razón por la cual la máxima temperatura se obtiene en la condición estequiométrica o cercana a la estequiométrica como se muestra en la Figura 1a [4]. Las curvas de temperatura en función de la relación de gases combustible:comburente son de forma parabólica y su máximo se obtiene generalmente alrededor de la relación estequiométrica entre ellos. Ajustando la relación combustible/oxígeno, hacia cualquier lado de la estequiometría, se enfriará la llama [5].

De acuerdo con la reacción de la Ecuación 3, se requieren 2.5 moles de oxígeno por cada mol de acetileno para que se dé la combustión completa. Sin embargo, para producir una llama neutra, es necesario alimentar la antorcha con cantidades equimolares de oxígeno y acetileno para producir la reacción primaria, ya que el oxígeno faltante para producir la reacción secundaria se toma del aire circundante a la llama [2].

A medida que la llama se aleja de la boquilla de la antorcha, la temperatura disminuye porque la concentración de hidrógeno disponible para reaccionar con el oxígeno del aire es

más baja y en consecuencia el calor producido por esta reacción es menor. Dada la disipación de energía en esta zona de la llama, durante la proyección térmica las partículas que viajan en ella pueden perder una parte de la energía adquirida en la llama primaria, por lo que es importante controlar el tiempo de residencia de estas partículas en la llama [2].

La inyección de un exceso de oxígeno a partir de la cantidad equimolar puede producir una llama oxidante donde el largo de la zona primaria, que es la más caliente, aumenta y por lo tanto el aporte energético a las partículas que viajan en este tipo de llama tiende a ser superior que cuando lo hacen en una llama neutra debido al mayor tiempo de residencia de las partículas en la zona primaria, lo que puede favorecer el tratamiento de las partículas pero también la oxidación de su superficie. Por el contrario, la deficiencia de oxígeno puede dar como resultado una llama reductora en la que se liberan partículas de carbono y cuya longitud de la zona primaria es la más corta de todos los tipos de llama, su temperatura es más baja y en consecuencia el aporte energético a las partículas es menor [4].

Experimentalmente se ha mostrado que un aumento del 20% en volumen de oxígeno en la relación de combustible:comburente disminuye el número de partículas sin fundir y aumenta la cantidad de inclusiones de óxidos [6]. La llama más energética transfiere mayor entalpía a las partículas, sobre-fundiéndolas y favoreciendo la formación de salpicaduras cuando estas partículas impactan al sustrato, esto se ve reflejado en una mayor porosidad estructural, aumento de la rugosidad superficial y reducción de la adherencia con el sustrato [7].

La distribución de la temperatura axial y radial así como los cambios en la velocidad de los gases de la llama afectan significativamente la temperatura de las partículas y su comportamiento en vuelo, lo que influye en la calidad del recubrimiento; los gases calientes generados por la combustión implican una suma de eventos complejos que involucran fenómenos de transferencia de calor y masa en las capas límite de la partícula [8], ver Figura 2, por lo que se hace necesario ajustar las relaciones de equivalencia de los gases para obtener las condiciones físicas y la entalpía de la llama más favorable para la elaboración del recubrimiento, teniendo en cuenta factores como la distancia de proyección y el tipo de material tanto del sustrato como del polvo a depositar. Estos ajustes requieren un completo conocimiento del comportamiento de la llama.

El comportamiento termo-físico de la llama depende en gran medida de la configuración de la antorcha. En las antorchas de proyección por combustión convencionales, la combustión de combustible y oxígeno se da en la parte externa de la boquilla. En algunos diseños se alimenta un flujo de aire alrededor de la llama con el fin de evitar su expansión y con ello la pérdida de energía [5].

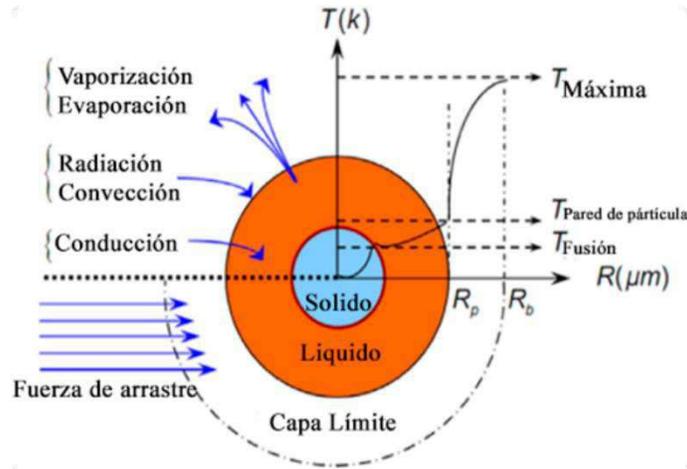


Figura 2. Acercamiento a una partícula en vuelo durante la proyección térmica, fenómenos de transferencia de masa y de calor ocurren a la vez en sus capas límite [8].

Con el fin de predecir la afectación térmica de una partícula en vuelo durante el proceso de proyección térmica por llama oxiacetilénica se hace uso de simulaciones numéricas por medio del software Jets&Poudres [9], este software es elaborado con base en el código computacional GENMIX, el cual fue desarrollado por Spalding y Patankar [10], y mejorado mediante el uso de propiedades termodinámicas y de transporte relacionadas a las temperaturas locales y composición de las fuentes térmicas que éste simula. El código GENMIX fue diseñado para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias parabólicas en 2D por el método de diferencias finitas, requiere un bajo costo tanto de memoria como tiempo de computación, simula flujos estables en una dirección predominante en equilibrio térmico local y sin tener en cuenta efectos de recirculación o difusión en dicha dirección, también hace uso de una red computacional autoadaptable que se alarga o contrae solo para cubrir las regiones de interés, lo cual explica el pequeño tiempo de computación requerido. El código de Jets&Poudres simula entonces flujos laminares y turbulentos de plasma o de llama por combustión, usando el clásico modelo de longitud de mezcla (mixing length).

Los modelos de proyección térmica implementados en el software Jets&Poudres para la simulación tanto de llamas de combustión como de jets de plasma tienen en cuenta diferentes parámetros geométricos de la antorcha, de los gases a utilizar en el proceso, del ambiente circundante y de los polvos a depositar, los cuales hacen parte de la información que debe ser ingresada al programa y como respuesta éste calcula la temperatura, la presión, la conductividad térmica, la entalpía y la velocidad de la llama o del jet según sea el caso, así como la temperatura, el porcentaje de fusión, el número adimensional K-Sommerfeld, entre otros de los parámetros que entrega para una partícula, lo que permite predecir la morfología del splat depositado y por lo tanto, la formación de la estructura del recubrimiento. El objetivo del software no es remplazar los resultados experimentales, sino brindar una herramienta complementaria para calcular rápidamente los parámetros de proyección térmica y presentar resultados explícitos y así obtener tendencias relacionadas con los fenómenos y las variables que se dan en este proceso [8].

El programa Jets&Poudres ha sido usado extensamente y validado en experimentos de proyección térmica con plasma. Ridha Djebali et al., realizaron proyecciones con partículas

de ZrO_2 en un plasma de Ar- H_2 , Los resultados de sus modelos son comparados con las predicciones hechas por Wan et al [11], utilizando el código LAVA y las mediciones elaboradas por Smith et al [12]. En la Figura 3 se muestra la comparación de la velocidad y la temperatura de la partícula para los diferentes modelos. Como es evidente, los resultados de las simulaciones realizadas con ambos software tienen concordancia con los datos experimentales, sin embargo, los valores calculados por Jets&Poudres son más cercanos a los medidos en laboratorio.

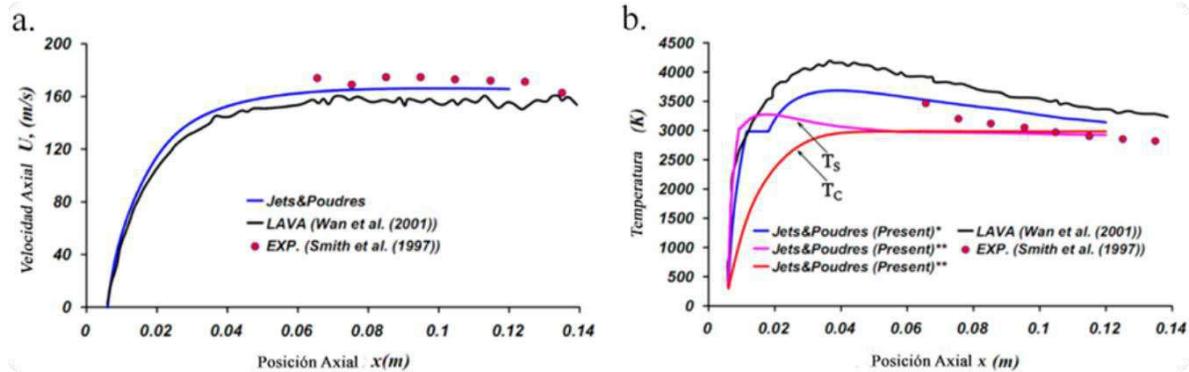


Figura 3. Velocidad axial y temperatura de partículas de ZrO_2 proyectadas versus la posición axial. Resultados obtenidos con los software LAVA, Jets&Poudres y mediciones experimentales realizadas por Smith et al. [12].

Por otro lado, autores como Bernard Pateyron et al. Validaron diferentes resultados experimentales con los de simulaciones obtenidas para analizar el comportamiento de partículas en vuelo proyectadas térmicamente por APS (atmospheric plasma spray), utilizando el software Jets&Poudres [13], y el efecto de diferentes soluciones usadas para el transporte de partículas por medio de suspensiones con la misma técnica, donde el software es usado para conocer la velocidad y temperatura del jet de plasma en diferentes puntos [14].

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se utilizó el software Jets&Poudres para determinar los perfiles térmicos de llamas oxiacetilénicas producidas con mezclas de diferentes relaciones volumétricas de combustible:comburente, para así tener un mejor entendimiento de la afectación térmica que pueden experimentar las partículas de diferentes materiales cuando son depositadas mediante proyección térmica utilizando este tipo de llamas.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este trabajo se utilizó una antorcha Eutectic Castolin Terodyn 2000 que cuenta con una recámara en la que los gases combustibles (C_2H_2) y comburente (O_2), se mezclan previamente para luego ser inyectados a través de una boquilla RL210 que cuenta con 14 orificios por los que es expulsada la mezcla de gases y 14 orificios dispuestos circularmente y por los cuales es expulsado el material a proyectar en forma de polvo, ver Figura 4.

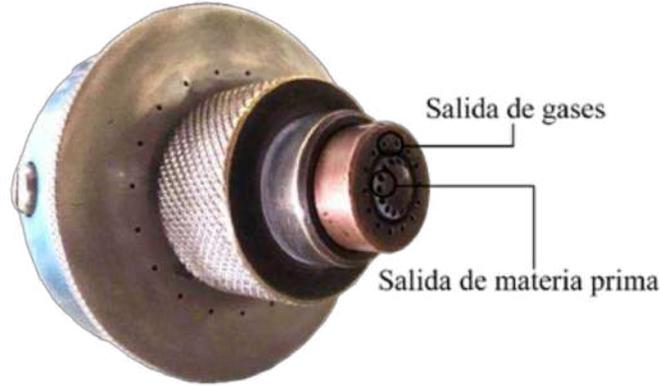


Figura 4. Boquilla RL210 de la antorcha Terodyn 2000TM.

Con el fin de conocer el comportamiento termo-físico de las llamas oxiacetilénicas producidas con la antorcha TeroDyn 2000, se realizó análisis de las imágenes tomadas a las llamas obtenidas con diferentes relaciones volumétricas de acetileno y oxígeno mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Relación volumétrica de Acetileno y oxígeno usada para el estudio del comportamiento de las llamas.

C_2H_2 [L/min]	O_2 [L/min]	Relación de gases
22	31	1:1.4
	37	1:1.7
	55	1:2.5
	70	1:3.2
	88	1:4.0

Las imágenes fueron tomadas con una cámara Nikon D5300 con ISO 100, con un tiempo de exposición de 1/25 de segundo y por medio de un software de edición se logró discernir las diferentes partes de la llama y la longitud de las mismas.

Teniendo en cuenta que el flujo de los gases alimentados no es continuo y que por lo tanto, la llama producida a partir de ellos es fluctuante, se midió la frecuencia de soplo de cada una de estas llamas a partir de imágenes de video de alta definición con una cámara Hpx 250 Panasonic, cuya resolución es de 1440x1080 pixeles por pulgada y su capacidad de adquisición es de 60 cuadros por segundo. Se analizaron patrones de repetición en las llamas a diferentes tiempos con el fin de identificar el periodo de las mismas y con ello determinar la frecuencia.

También se realizaron simulaciones numéricas con el software Jets&Poudres con el fin de obtener perfiles de temperatura de las llamas oxiacetilénicas con diferentes proporciones volumétricas de los gases combustible y comburente. Este software permite identificar por medio de un mapa de colores la temperatura de la llama a lo largo del eje axial y radial (ver Figura 5), teniendo en cuenta el efecto de la geometría de la boquilla de la antorcha, de los gases que no están involucrados en la combustión (tales como los usados para confinar la llama) y la proporción de los gases de combustión.

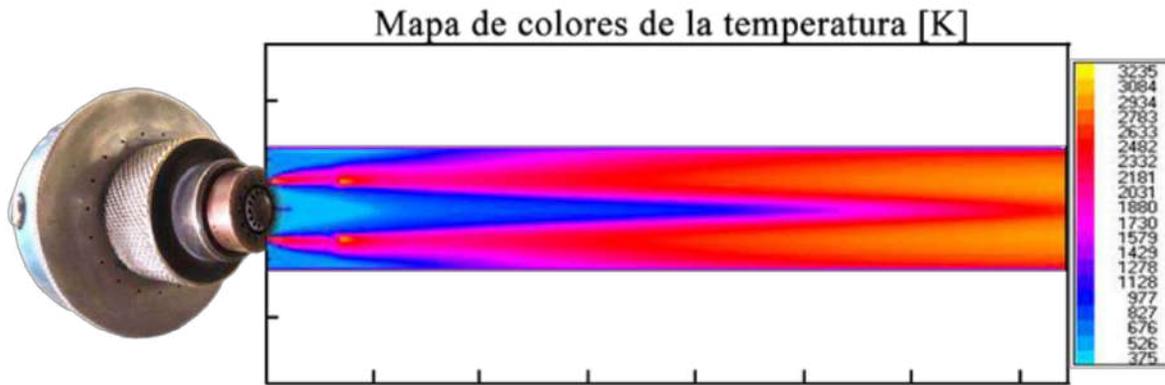


Figura 5. Simulación de una llama oxiacetilénica producida con una boquilla RL 210 de la antorcha Terodyn 2000, obtenida a partir de simulación numérica con en el software Jets&poudres.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Las medidas de la longitud de las diferentes zonas de la llama permitieron establecer que las llamas altamente oxidantes (con relación volumétrica acetileno:oxígeno de 1:3.2 y 1:4.0) tiene una zona caliente o de reacción primaria mucho más larga que la de una llama reductora, por lo que las partículas tendrían un mayor tiempo de residencia en la zona más caliente de la llama. En la Figura 6, se muestran las llamas oxiacetilénicas producidas a partir de diferentes relaciones de acetileno:oxígeno y en la Figura 7 se representan las longitudes de cada una de las zonas de las llamas producidas con diferentes relaciones volumétricas de combustible:comburente.

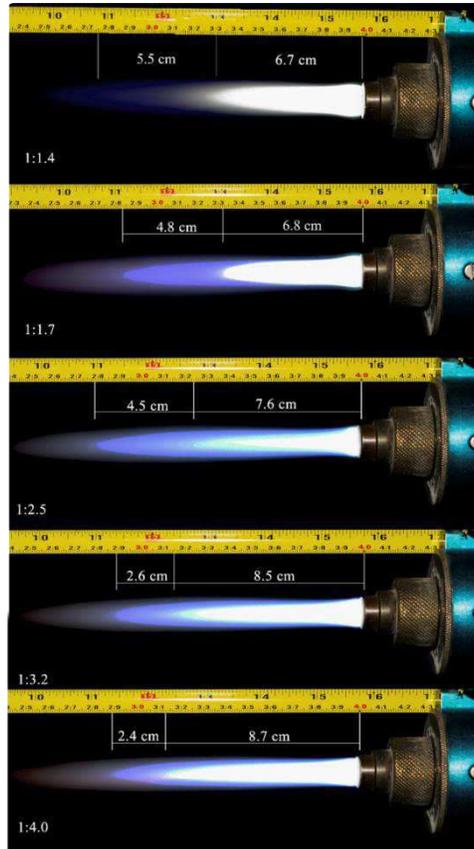


Figura 6. Longitud de llamas oxiacetilénicas producidas a partir de diferentes relaciones volumétricas de acetileno:oxígeno.

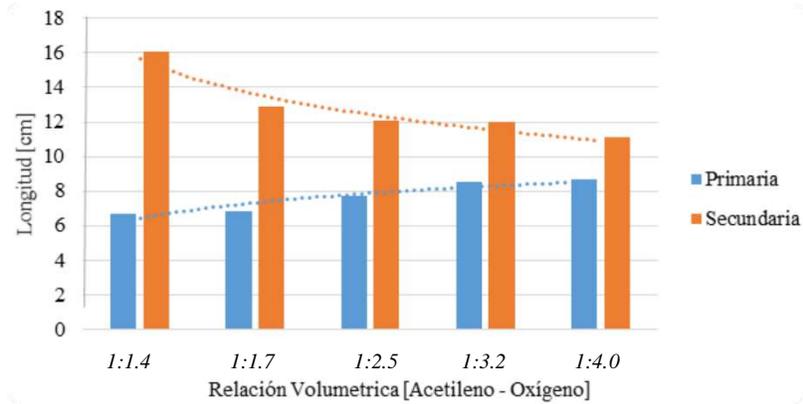


Figura 7. Longitud de las zonas de la llama para diferentes relaciones volumétricas de acetileno:oxígeno.

Por su parte, los perfiles de temperatura calculados a lo largo del eje axial para diferentes proporciones volumétricas de acetileno y oxígeno se presentan en la Figura 8.

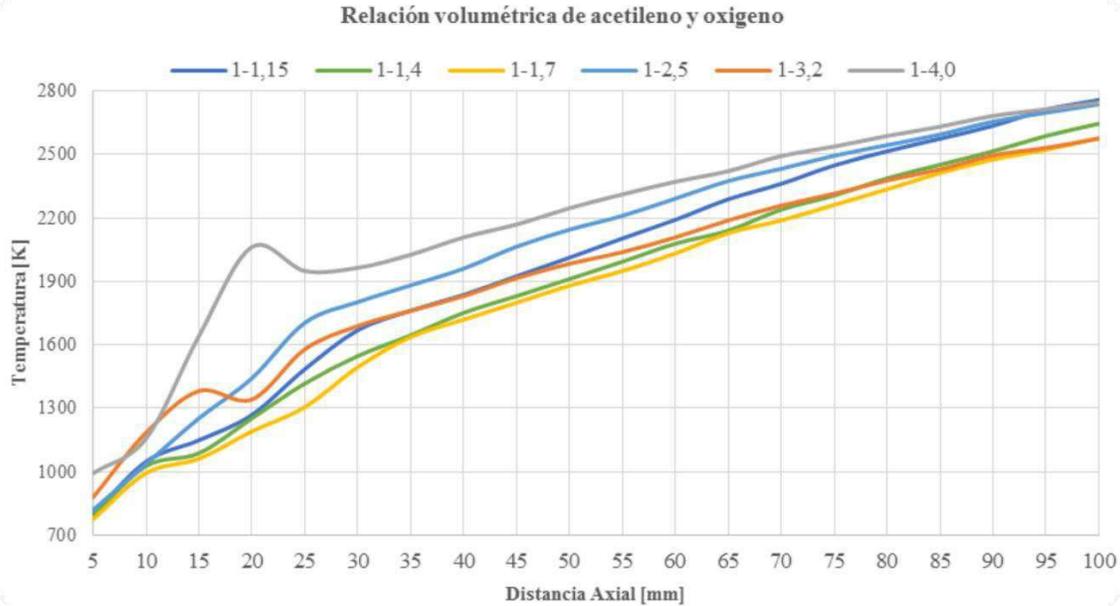


Figura 8. Perfil de temperatura de llamas oxiacetilénicas para diferentes relaciones volumétricas de acetileno y oxígeno.

Como fue indicado anteriormente, la llama oxiacetilénica que alcanza la mayor temperatura es la producida a partir de una mezcla estequiométrica de combustible:comburente, cuya relación volumétrica es de aproximadamente 1:1.7, no obstante, el perfil de mayor temperatura a lo largo de la distancia de proyección evaluada se logra con la llama oxidante producida con 4 volúmenes de oxígeno por cada volumen de acetileno alimentado a la reacción, esto es producto de la mayor longitud de la zona de reacción primaria que se produce en este tipo de llama y que es la más caliente de la reacción. Ver Figura 8.

Respecto a la frecuencia del soplo de las llamas, se encontró que aumenta con la relación de oxígeno en la llama y se estabiliza a partir de una relación acetileno:oxígeno de 1:1.7; el cálculo de ésta se hace con base en patrones observados en la llama a través del tiempo, ver Figura 9. Un incremento en la frecuencia implica un aumento en la turbulencia de la llama, esto puede influir en el transporte de las partículas hacia el sustrato y su permanencia dentro de la llama, efecto que puede contrarrestarse con el uso de un gas de confinamiento o “shielding gas”, que se inyecta a través de un rotojet.

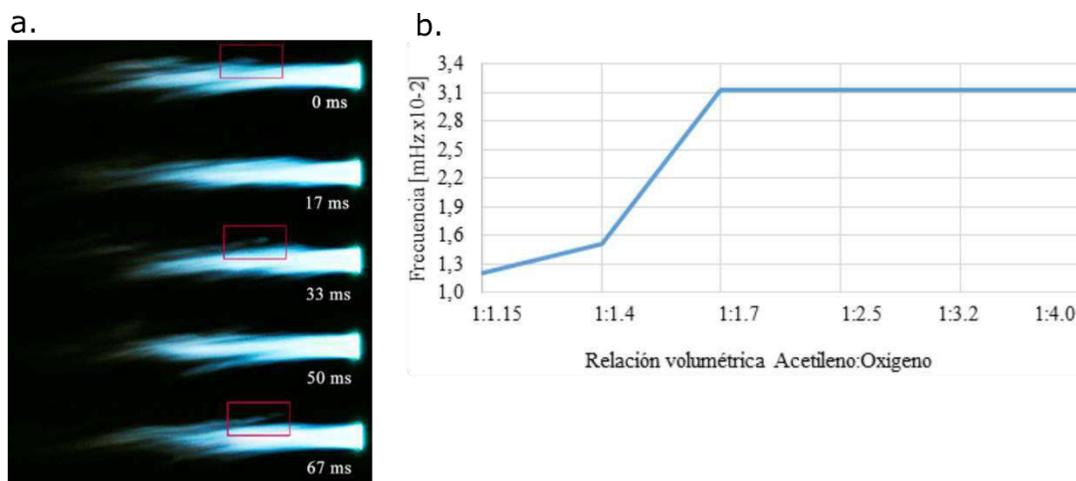


Figura 9. Periodo y frecuencia de llamas oxiacetilénicas (a) Fotogramas obtenidos por análisis de imágenes para una llama oxiacetilénica de relación volumétrica 1:3.2. (b) Efecto de la relación combustible:comburente sobre la frecuencia de soplo.

4. CONCLUSIONES

Uno de los factores determinantes en la proyección térmica para obtener recubrimientos homogéneos, con características estructurales y propiedades físicas, mecánicas y químicas óptimas, es la llama utilizada para fundir las partículas; cuya capacidad de cumplir con este propósito depende de su temperatura, longitud y frecuencia, las cuales se pueden controlar a partir de la relación de gases combustible:comburente.

La longitud de la zona primaria (que es la más caliente de la llama) aumenta con el volumen de oxígeno suministrado, lo que incrementa el perfil de temperatura de la llama.

La frecuencia del soplo de las llamas aumenta con la relación de oxígeno en la llama y a partir de una relación acetileno:oxígeno de 1:1.7 se estabiliza en el punto máximo. Cuando la frecuencia aumenta, aumenta la turbulencia y por ende se ve afectado el transporte de las partículas, por esto se recomienda el uso de un gas de confinamiento para asegurar la permanencia de las partículas durante todo el trayecto de la llama.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Estrategia de Sostenibilidad 2014-2015 de la Universidad de Antioquia por el apoyo a este trabajo.

6. REFERENCIAS

- [1] Fauchais, P. L., Heberlein, J. V. R., Boulos, M. I., *Thermal Spray Fundamentals*, Springer US, Boston, MA, 2014.
- [2] Vargas, F., *Élaboration De Couches Céramiques Épaisses A Structures Micrométriques Et Nanométriques Par Projections Thermiques Pour Des Applications Tribologiques*, Université de Limoges, Universidad de Antioquia, 2010.
- [3] Linde catalogue, “Acetylene ... there is no better fuel gas for oxy-fuel gas processes”, Linde AG.
- [4] Soto, D., Parra, C., López, M. E., *et al.*, “Elaboración de recubrimientos base cobre sobre un sustrato de porcelana mediante proyección térmica con llama oxiacetilénica”,

Tecno Lógicas, vol. 18, no. 35, pp. 83–91, 2015.

[5] Davis, J. R., *Handbook of Thermal Spray Technology*, USA, 2004.

[6] Redjda, O., Zaid, B., Tabti, M. S., *et al.*, “Characterization of thermal flame sprayed coatings prepared from fecr mechanically milled powder”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 5, pp. 779–790, 2013.

[7] Correa, R., Monsalve, M., López, E., *et al.*, “Influencia de los parámetros de deposición en la porosidad y adherencia de recubrimientos de biovidrios del sistema 31SiO₂-11P₂O₅-51CaO -7MgO elaborados mediante proyección térmica por combustión oxiacetilénica,” *Revista Latinoamericana de Materiales y Metalurgia*, vol. 33, no. 1, pp. 92–99, 2013.

[8] Djebali, R., Pateyron, B., ElGanaoui, M., “Scrutiny of plasma spraying complexities with case study on the optimized conditions toward coating process control”, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 6, pp. 171–181, 2015.

[9] Pateyron, B., "JETS&POUDRES" AND "T&TWINNER" [Online], Available: <http://www.unilim.fr/spcts>, [Accessed: 06-Jul-2016].

[10] Delluc, G., Mariaux, G., Vardelle, “A numerical tool for plasma spraying. part i: modelling of plasma jet and particle behaviour”, *Sciences des Procédés Céramiques et Traitements de Surface*, pp. 1–6, 2003.

[11] Wan, Y. P., Gupta, V., Deng, Q., *et al.*, “Modeling and visualization of plasma spraying of functionally graded materials and its application to the optimization of spray conditions”, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 382–389, 2001.

[12] Dussoubs, B., Fauchais, P., Vardelle, A., Vardelle, M., Themelis, N. J., & Berndt, C. C., “Thermal spray: A united forum for scientific and technological advances”, *ASM Int. Mater. Park. Ohio, USA*, 1997.

[13] Djebali, R., Pateyron, B., El Ganaoui, M., “A lattice boltzmann based investigation of powder in-flight characteristics during aps process, part ii: effects of parameter dispersions at powder injection”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 220, pp. 157–163, 2013.

[14] Pateyron, B., Calve, N., Pawłowski, L., “Influence of water and ethanol on transport properties of the jets used in suspension plasma spraying”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 220, pp. 257–260, 2013.