

Simulación de antorcha de plasma

Javier García de la Figal

Correo electrónico:jgarcia@mecanica.cujae.edu.cu

Abel Fumero Pérez

Correo electrónico:afumero@mecanica.cujae.edu.cu

René Collazo Carceller

Correo electrónico:collazo@mecanica.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

Clodomiro Alves Junior

Correo electrónico:clodomiro.jr@hotmail.com

Universidad Federal de Río Grande del Norte, UFRN, Brasil

Resumen

Se realiza un estudio de las principales características de trabajo y propiedades del plasma de argón para el posterior diseño y construcción de una antorcha de plasma y su empleo en la proyección de partículas finas. Se determinan las propiedades del plasma en función de su temperatura y presión, simulando su comportamiento dentro del principal elemento de la antorcha: la boquilla. A partir de los modelos de elementos finitos desarrollados se determinan las influencias de las características de la boquilla en el plasma obtenido, llegándose a definir los mejores parámetros de la boquilla y de la antorcha a ser diseñada y construida.

Palabras clave: plasma, modelo de elementos finitos, simulación, biomaterial

Recibido: enero 2010

Aprobado: marzo 2010

INTRODUCCIÓN

Los procesos de deposición de capas finas de polvo sobre sustratos metálicos han sido desarrollados en las últimas décadas, ante la creciente necesidad de crear, recubrimientos con buena resistencia y adherencia para varias aplicaciones. Las capas de hidroxiapatita porosa depositadas sobre sustratos metálicos están siendo ampliamente utilizadas en la construcción de prótesis médicas. Uno de los métodos empleados para su obtención es la deposición de las partículas sobre el sustrato a través de un chorro de plasma, creado por una antorcha [1-3]. El diseño y construcción de tales antorchas es un complejo problema en el cual inciden varias disciplinas de las ingenierías: [4-6]

- Electricidad de corriente directa.
- Transferencia de calor.
- Mecánica de fluidos.

La determinación de los parámetros de la antorcha para cumplir adecuadamente sus funciones de proyección de

partículas constituye una compleja tarea y es el objetivo básico de este trabajo. Para determinar sus mejores parámetros de operación se recurre a la modelación por elementos finitos del proceso de generación del plasma térmico dentro de la pieza clave de la antorcha: la boquilla o tobera, así como su movimiento y proyección dentro de la misma [1, 6]. El plasma térmico básicamente no es más que un gas ionizado, por lo que puede considerarse desde el punto de vista de su movimiento como un fluido compresible. Entonces el primer problema a resolver es la determinación de sus principales propiedades, que son altamente variables [7, 8]. Una vez determinadas sus leyes de variación se procede a la creación de modelos de elementos finitos del plasma dentro de las boquillas con diferentes dimensiones, para estudiar la influencia de los principales parámetros de estas en el plasma obtenido y sus características de proyección [9, 10]. Todo el proceso es validado a través del programa de modelación de plasma proyectado Jet Poudres, del Centro de Ciencias de

Procedimientos Cerámicos y Tratamiento de Superficies de la Universidad de Limoges, Francia [9].

MATERIALES, MÉTODOS Y MODELOS

Las propiedades investigadas del plasma fueron las siguientes:

- Densidad, DEN (ρ).
- Viscosidad dinámica, VISC (η).
- Conductividad térmica, K.
- Calor específico, C.

Dichas propiedades permiten la modelación de los efectos térmicos y de fluidos del plasma [4-6]. A partir de la información obtenida del programa Jet Poudres, fueron desarrolladas ecuaciones de las propiedades mencionadas en función de la temperatura y la presión [9, 10]. Así, por ejemplo, se obtuvo que la densidad varía según la siguiente ecuación de regresión (figura 1):

$$DEN = 34,233 1 - 5,430 9e - 5 \cdot T - 0,000 3 \cdot p + 3,057 4e - 9 \cdot T \cdot T - 4,672 4e - 11 \cdot T \cdot p + 9,050 4e - 10 \cdot p \cdot p \quad (1)$$

Válida para: $T = 293 - 14\,000\,0\text{ K}$, $p = 1,793 - 2,000\text{ atm}$.
 T : temperatura, p : presión.

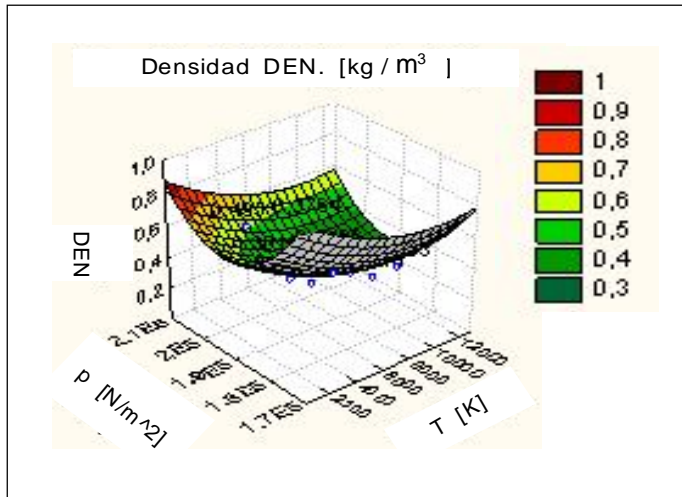


Fig. 1. Gráfico de la ecuación de regresión para densidad del plasma en función de T y p .

De igual forma fueron obtenidas funciones para las restantes propiedades del plasma: VISC, K y C . Posteriormente se determinaron las características de las boquillas de estudio, para producir los chorros de plasma capaces de proyectar partículas de hidroxiapatita. Se realizó un estudio preliminar de las mismas [1, 6], determinándose los parámetros de interés y sus rangos de variación, que serán las variables independientes del diseño de experimentos (o diseño de modelos) a desarrollar como:

- Potencia eléctrica. (12 - 55 kW).
- Diámetro de salida de la boquilla, D_{noz} . (6 - 12 mm).
- Velocidad de entrada del argón a la boquilla, V_{en} . (75 - 100 m/s).

Además del voltaje aplicado que está implícito en la potencia eléctrica. Se trabaja con un diseño factorial a 2 niveles, 2^3 que brinda la matriz de experimentos mostrada en la tabla 1, con 8 modelos a desarrollar [10].

En las figuras 2 y 3 se muestran características de los modelos creados con $D_{noz} = 6$ y 8 mm. Se emplearon elementos finitos de tipo isoparamétricos, de 4to. orden de integración, formas triangulares para adaptarse mejor a las configuraciones complejas y con capacidades de cálculo en las 3 disciplinas mencionadas [11-16]. El modelo 8, por ejemplo, posee un total de 1 012 elementos finitos. Todos con posibilidad de simultanear las 3 disciplinas de cálculo de interés, cuyas ecuaciones generales son las siguientes: [17- 21]

Electricidad de corriente directa $-\Lambda \cdot (\sigma \cdot \Delta V) = 0 \quad (2)$

Transferencia de calor

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\delta T}{\delta t} + (-K \cdot \Delta T) = -\rho \cdot C \cdot u \cdot \Delta T \quad (3)$$

Mecánica de fluidos

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\delta u}{\delta t} + \rho \cdot (u \cdot \Delta u) = \Lambda \cdot (-p \cdot I + \eta \cdot (\Delta u + (\Delta u)^T)) - (2/3 \cdot \eta)(\Delta u) \cdot I \quad (4)$$

donde:

σ : Conductividad eléctrica del plasma. (1)

u : Velocidades del fluido.

T : Temperatura.

t : Tiempo.

I : Matriz unitaria.

$$\Lambda = \left(\frac{\delta}{\delta X} + \frac{\delta}{\delta Y} + \frac{\delta}{\delta Z} \right) \text{ Operador "del" o nabra.}$$

Tabla 1 Matriz de diseño de los modelos				
Modelo no.	Potencia eléctrica [kW]	D_{noz} [mm]	V_{en} [m/s]	Voltaje [V]
1	55	12	75	100
2	55	12	100	100
3	55	6	75	100
4	55	6	100	100
5	12	12	75	47,3
6	12	12	100	47,3
7	12	6	75	47,3
8	12	6	100	47,3

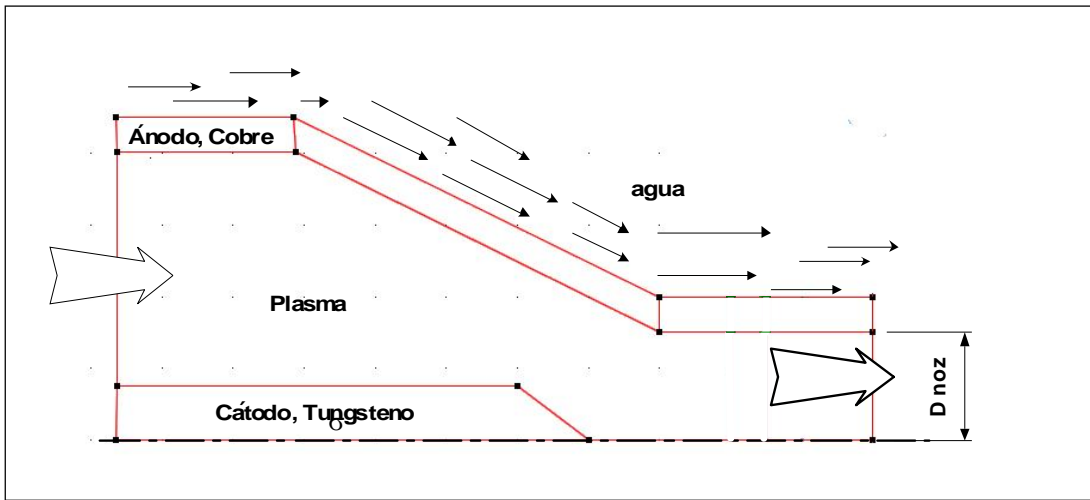


Fig. 2. Modelos de boquillas con $D_{noz} = 6 \text{ mm}$.

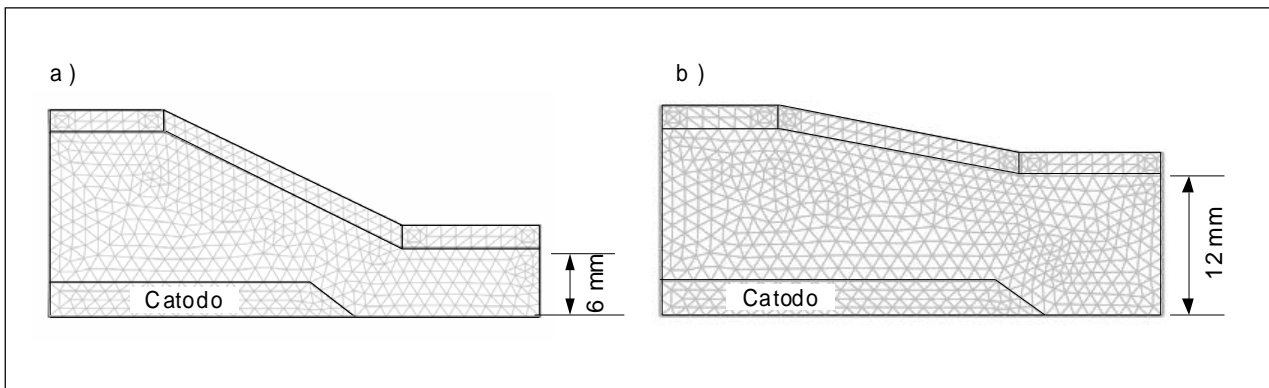


Fig. 3. Modelos de elementos finitos: a) Modelo 8; b) Modelo 6.

De todas las propiedades del plasma necesarias la conductividad eléctrica σ , se obtuvo por comparación con los resultados de proyección de plasma calculados mediante el programa Jet Poudres, siendo σ el parámetro utilizado para ajustar los resultados de los modelos desarrollados con los del programa Jet Poudres. De esta forma se validaron los resultados de los modelos de elementos finitos construidos.

A continuación se procedió a resolver los 8 modelos desarrollados, ajustando los valores obtenidos con los brindados por el programa Jet Poudres, a través del ajuste del parámetro. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de las corridas realizadas.

donde:

T_{exit} : Temperatura del plasma en eje y a la salida de la boquilla.

$V_{m\acute{a}x}$: Velocidad máxima del plasma a la salida.

σ : Conductividad eléctrica del plasma.

$T_{C\acute{a}t\acute{o}d\acute{o}}$: Temperatura máxima del ánodo de tungsteno.

Pot. Calórico: Potencia calórica creada en el plasma por la corriente eléctrica.

Tabla 2
Resultados principales de las corridas

	T_{exit} [K]	$V_{m\acute{a}x}$ [m/s]	Potencia calórica [kW]	σ [$1/m \cdot \Omega$]	$T_{c\acute{a}t\acute{o}d\acute{o}}$ [K]
1	13 900	265	35,414	52	13 300
2	13 550	273	35,414	52	10 650
3	10 588	1 023,7	31,544	52,5	9 100
4	12 169	1 167	31,243	52	8 700
5	7 874	210	8,900	52	4 680
6	7 900	269,22	8,900	52	4 665
7	9 400	927	6,586	49	3 970
8	8 450	1 149	6,950	52	3 920

La eficiencia entre la potencia eléctrica y la calórica se consideró del 57 % [4, 7, 8, 9, 20]. En la tabla 3 se muestran las diferencias en forma de errores relativos, de los valores calculados de la temperatura y velocidad del plasma, respecto a los obtenidos por el programa Jet Poudres. En las figuras 4 -7 se muestran gráficos y diagramas de los resultados obtenidos. De esta forma se crearon los 8 modelos de interés, se procedió a su solución y validación, pudiendo pasarse al análisis de la influencia de los principales parámetros de la boquilla en las características del plasma obtenido a su salida.

Tabla 3
Diferencias (error %) entre los resultados de corridas respecto a los obtenidos por el programa Jet Poudres

Modelo	T exit	Pot. Calórica
1	0,65	11,1
2	2,3	11,1
3	2,1	11,1
4	7,2	11,6
5	2,7	5,2
6	3,8	5,2
7	0,0	3,2
8	6,2	1,44

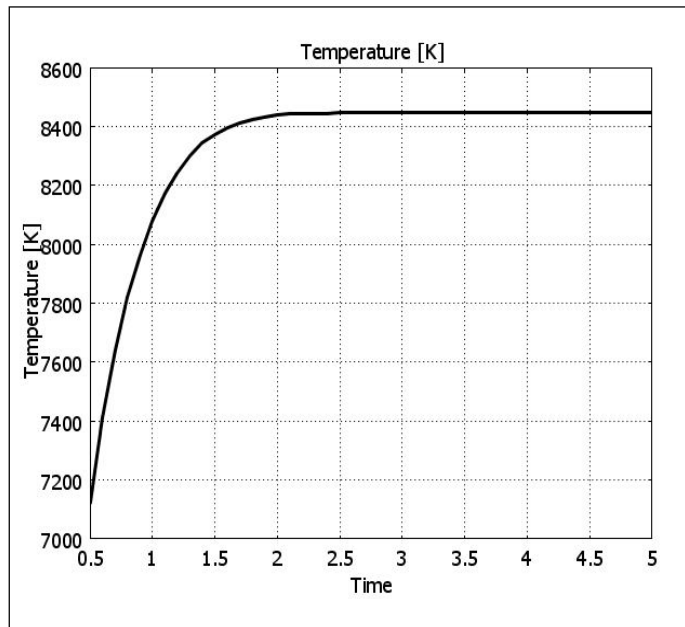


Fig. 4. Temperatura del plasma en el eje y a la salida de la boquilla. Modelo 8.

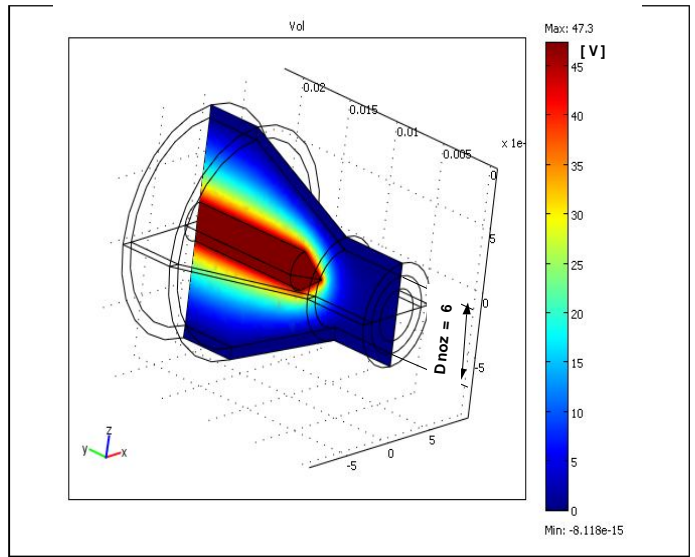


Fig. 5. Distribución del voltaje (V) en una sección del modelo 8 para $t = 5$ s.

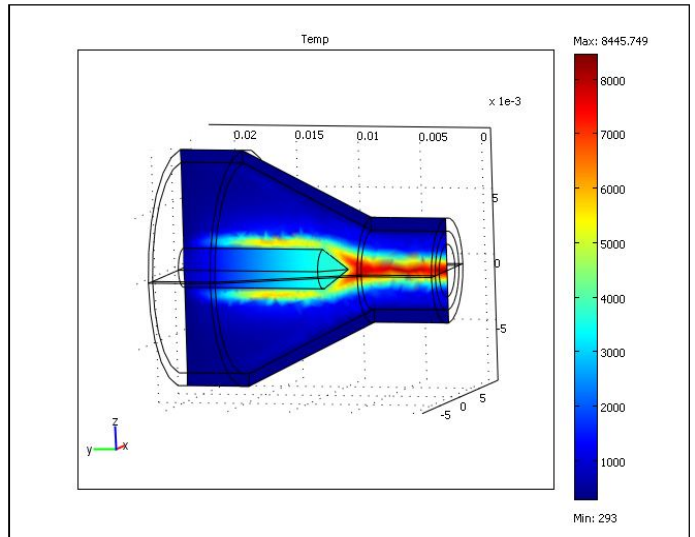


Fig. 6. Distribución de la temperatura (K) en una sección del modelo 8 para $t = 5$ s.

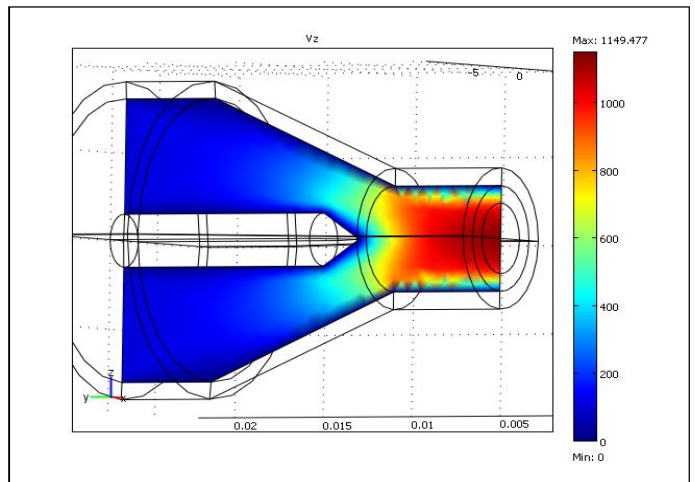


Fig. 7. Distribución de la velocidad del plasma (m/s) en una sección del modelo 8 para $t = 5$ s.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los resultados de las corridas realizadas de los 8 modelos construidos y solucionados, mostrados en la tabla 2, puede analizarse la incidencia de los parámetros de la boquilla en el plasma obtenido: y así establecer los tipos de boquillas más adecuados para la función de crear y proyectar plasma capaz de transportar partículas de hidroxiapatita sobre sustratos metálicos. De la tabla 2 pueden realizarse los siguientes análisis:

El incremento de la *velocidad de entrada* del gas *Ven* (aumento en un cuarto) incrementa las velocidades de salida del plasma, aunque en una menor proporción que aquella, en todas las variantes corridas; como es de esperar en un sistema de tobera, trabajando con fluido compresible [11, 12, 19]. Su efecto en las temperaturas de salida del plasma y del cátodo son aumentarlas en muy pequeña medida, o sea, en menor proporción. Esto se debe a que las temperaturas alcanzadas por el plasma están dadas principalmente por los efectos eléctricos que lo producen, mientras sus velocidades solo inciden a través de la influencia que pueden ejercer al cambiar algunas de las propiedades del plasma.

Por tanto, para cambiar las temperaturas, *Ven* no es un buen parámetro controlador. No así para las velocidades de salida del plasma, en que *es el que más eficientemente controla a estas velocidades*.

El incremento del *diámetro* de salida de la boquilla (*Dnoz*, duplicado) hace decrecer ligeramente las temperaturas tanto a la salida de la boquilla como en el cátodo. Su efecto en las velocidades de salida es decrecerlas, pero ligeramente también, contrario a lo esperado en que se hubiera predicho una mayor incidencia y cambio. Esto parece estar dado por los cambios que se producen en otras de las propiedades del plasma dentro de la boquilla, tal como la densidad que se reduce drásticamente hacia la salida. *No es un buen parámetro por tanto, para controlar las características principales de la antorcha*.

El incremento de la *potencia* (más del cuádruple) produce significativos incrementos en las temperaturas, tanto a la salida del plasma como en el ánodo. Lo que se corresponde con ser la fuente directa de generación del plasma. Su efecto en las velocidades de salida es insignificante. *Es por tanto un buen parámetro, para controlar la temperatura del plasma pero no su velocidad de salida*.

Con solo 12 kW de potencia eléctrica, sin embargo, se obtienen temperaturas y velocidades que son interesantes para el proceso de proyección de partículas en chorro de plasma, mayores a los 7 500 K, objetivo de esta antorcha [1, 6, 7, 9].

El valor de la conductividad eléctrica del plasma fue tomada en el trabajo como constante en cada modelo desarrollado y variando en un rango estrecho entre los modelos, con valores entre 49 - 52,5, $[1/m \cdot \Omega]$. Ver tabla 2.

La estabilización de las propiedades y características del plasma dentro de la boquilla ocurre rápidamente, en 2 - 6 s (figura 4 para las temperaturas), lo que se corresponde con lo observado en los experimentos realizados por los autores [1].

Las temperaturas obtenidas en el cátodo de tungsteno pueden ser muy elevadas (hasta 13 300 K) al emplearse las mayores potencias. Para 12 kW se alcanzan unos 3 500 K. En todos los casos analizados están por debajo de las máximas del plasma, lo que indica la buena eficiencia térmica de las boquillas propuestas.

Las temperaturas del ánodo de cobre están por debajo de los 800 K en todas las variantes analizadas.

Con el aumento del diámetro de salida *Dnoz* se hace necesario aumentar la profundidad del ánodo dentro de la boquilla (figura 3b), para lograr los valores de temperaturas del plasma adecuados mostrados en los modelos 1, 2, 5 y 6 de la tabla 2, con *Dnoz* = 12 mm.

CONCLUSIONES

Puede concluirse que se ha resuelto el complejo problema de simular la generación y proyección de plasma térmico de argón por medio de una antorcha, a través de modelos de elementos finitos con la información disponible. De los modelos desarrollados y corridos se deduce que las características más adecuadas de la boquilla para la proyección de partículas de hidroxiapatita, son las correspondientes al modelo 8, en las tablas 1 y 2, con el cual se obtienen las mayores velocidades del plasma a la salida y temperaturas por encima de los 8 000 K, con un mínimo de consumo de energía eléctrica. Se trata de la boquilla con: *Dnoz* = 6 mm; *Ven* = 100 m/s; Voltaje = 47,3 V y Pot. eléctrica = 12 kW.

Los parámetros más eficientes de las boquillas para producir cambios en las características del plasma creado son:

a) La potencia eléctrica para variar la temperatura del plasma. A mayor potencia aplicada, mayor es la temperatura obtenida, como es de esperar. Es el parámetro que determina la potencia calórica desarrollada en el plasma. Sin embargo, para aumentar la temperatura se requieren grandes aumentos de la potencia eléctrica aplicada, pues la temperatura se incrementa en mucha menor proporción que el aumento de potencia.

b) El diámetro de salida de la boquilla para variar la velocidad del plasma.

c) La velocidad de entrada del argón incide en la velocidad de salida y en las temperaturas, pero en muy pequeña medida, por lo que no es un indicador de peso en las variaciones de temperaturas y velocidades de salida del plasma.

Las temperaturas máximas del ánodo de cobre están por debajo de los 800 K, bien inferiores a su temperatura de fusión. En el cátodo se tienen temperaturas muy elevadas, de ahí la necesidad del empleo de materiales altamente resistente térmicamente, como el tungsteno.

Es posible trabajar en los modelos con valores constantes de la conductividad eléctrica del plasma σ , parámetro difícil de determinar, a pesar de ser también dependiente de la temperatura y presión. En este trabajo se utilizó una σ promedio para cada modelo, que considera la fuente de corriente adicional que se genera durante la creación del plasma. Los valores considerados en este trabajo están en un rango estrecho: $\sigma = 49 - 52,5$.

REFERENCIAS

1. **FUMERO, A.** et al. Recubrimientos de HA de producción nacional obtenidos por plasma atmosférico, Estudio preliminar. *En 14 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. La Habana, Cuba, Dic. 2008.
2. **FAUCHAIS, P.** et al. "Knowledge Concerning Splat Formation: An Invited Review". *Journal of Thermal Spray Technology*. 2004., vol. 13, nº 3.
3. **NAKAMUR, T.** et al. "Effects of Pores on Mechanical Properties of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings". *Journal of American Ceramic Society*. 2000. vol. 83, nº 3, p. 578 – 584.
4. **ANGELES, P.J.P.** et al. *Estudo de tochas de plasma através da teoria da similaridade. Dissertação de Mestrado*. Campinas. IF - Unicamp. 2003.
5. **BIANCHINI, R. C.** *Modelagem e simulação de procesos a plasma para tratamento de organos clorados. Dissertação de Mestrado*. IF- USP. Sao Paulo. 2000.
6. **HONG, S. H.** et al. *Thermal Plasma Modeling on Design of Plasma Torches for Industrial Applications*. 2002. *Invited Talk at 2002 KPS/DPP Fall Meeting*.
7. **FELIPINI, C. L.** *Nocoes de Plasma Térmico e suas Principias Aplicacoes. Teses de Doutorado. Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas*. USJT, Brasil, 2004.
8. **ECKERT, E. R. G. and PFENDER, E.** *Advanced in Plasma Heat Transfer*. University of Minnesota. 1967.
9. *Software Jet Poudres. del Centro de Ciencias de Procedimientos Cerámicos y Tratamiento de Superficies*. Universidad de Limoges, Francia.
10. **MONGTOMERY, C.** *Diseño y Analisis de Experimentos*. Grupo Ed. Iberoamericano. Mexico DF: 1991.
11. **HAUKE, G.** "Simple stabilizing matrices for the computation of compressible flows in primitive variables". *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.* 2001. vol. 190, p. 6881–6893.
12. **SOULAÏMANI, A. and FORTIN, M.** "Finite element solution of compressible viscous flows using conservative variables". *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.* 2001, vol. 118.
13. **FRANK, P.** et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.
14. **CAMERON, A.D.** et al. *NAFEMS Benchmark Tests for Thermal Analysis Editado por: Glasgow, N. L.* 1986.
15. **GARCÍA DE LA FIGAL, J.** *Modelación por Elementos Finitos*. La Habana, Cuba. : Facultad de Ingeniería Mecánica, Cujae, 2005.
16. **MACKERLE, J.** *Coatings and Surface Modification Technologies: a Finite Element Bibliography (1995–2005)*. Institute of Physics Publishing. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, August 2005.
17. *AC/DC Module. User's Guide. Comsol 3.5 Software*. COMSOL Ltd. UH Innovation Centre College, Lane Hatfield Hertfordshire. AL10 9AB.
18. *Multiphysics Module. User's Guide. Comsol 3.5 Software*. COMSOL Ltd. UH Innovation Centre College. Lane Hatfield Hertfordshire. AL10 9AB.
19. *Multiphysics Module. Modeling Guide. Comsol 3.5 Software*. COMSOL Ltd. UH Innovation Centre College. Lane Hatfield Hertfordshire. AL10 9AB.
20. *Heat Transfer Module. User's Guide. Comsol 3.5 Software*. COMSOL Ltd. UH Innovation Centre College. Lane Hatfield Hertfordshire. AL10 9AB.
21. **BOULOS, M. I.** "Thermal Plasma Processing". *IEEE: Transactions on Plasma Science*. December 1991. vol. 19, nº 6.

AUTORES

Javier García de la Figal

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

Abel Fumero Pérez

Ingeniero Mecánico, Máster en Ingeniería Mecánica, Profesor Auxiliar, Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

René Collazo Carceller

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

Clodomiro Alves Junior

Doctor, Laboratorio de Plasma, Universidad Federal de Río Grande del Norte, UFRN, Brasil

Simulation of Plasma Torche

Abstract

The work is a study about main work features and properties of plasma of argon for designing and building plasma torches, to be employed in the projection of fine particles. The plasma properties in feature of their temperature and pressure are determinate and their behaviors inside the main element of the torche: the nozzle, is simulated. The influence of nozzles characteristics in the obtained plasma is determined, from finite elements models developed, being ended up defining the best nozzle parameters to be designed and built.

Key words: plasma, finite elements method, simulation, biomaterial