

INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE SOBRE EL VUELO Y ACELERACIÓN DE GOTAS DESDE SU GENERACIÓN

Aguilar-Durón, Erika Daniela (1); Minchaca-Mojica, Jesús Isaac (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | [erikaduron925@gmail.com]

2 [Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | [jminchaca@ugto.mx]

Resumen

En el presente trabajo se estudió la dependencia de la aceleración de las gotas con el coeficiente de arrastre en la ecuación que define su movimiento cuando son generadas en el interior de una boquilla neumática que son utilizadas para el enfriamiento del acero producido por colada continua, específicamente en la zona de enfriamiento secundario. Se estudiaron distintas definiciones del coeficiente de arrastre y los parámetros involucrados se calcularon de manera correspondiente. Como resultados, entre otros, se obtuvieron los perfiles de velocidad en el interior de las boquillas y la relación tamaño de la gota-velocidad de la gota en el orificio de salida de la boquilla también fue obtenida. Los resultados obtenidos adquieren importancia por su relevancia en el refinamiento de modelos computacionales que son utilizados para la predicción del movimiento de los sistemas de nieblas y su posterior uso en el planteamiento de estrategias de enfriamiento que permitan incrementar la productividad de la planta, manteniendo la calidad del acero que es producido.

Abstract

In this work the dependency of the droplet acceleration on the drag coefficient in the motion equation when the droplets are generated inside a pneumatic nozzle as those used in the secondary cooling of continuous casting process of steel was studied. Different drag coefficient definitions were studied and the involved parameters were calculated correspondingly. Among other results, droplet velocity inside the mixing chamber and the drop-velocity of droplets located in the nozzle exit orifice were obtained. These results are of relevant importance since they are useful in the refinement of computational models that are used to predict the dynamics of air-mists systems and their use in the establishment of cooling strategies that allow increasing the productivity of the plant keeping the quality of the produced steel.

Palabras Clave

Velocidad de salida; velocidad terminal; atomización; enfriamiento de acero; enfriamiento secundario

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

En la industria acerera, el enfriamiento del acero resulta una etapa crítica para incrementar su producción. Así, el control de esta etapa dentro del proceso de colada continua CSP ha permitido fabricar grandes cantidades de productos terminados que satisfacen en calidad y competitividad, las necesidades locales y globales, además reduce costos e incrementa la productividad [1].

En la etapa de enfriamiento, la zona de enfriamiento secundario resulta de gran interés pues el adecuado control de ella permitirá mejorar el proceso. En el enfriamiento secundario, la técnica más utilizada es impactar rocíos y nieblas de agua sobre la superficie caliente del acero, con el objetivo de enfriarlo y los dispositivos utilizados para ello reciben el nombre de boquillas que pueden ser neumáticas (utilizan agua y aire) o hidráulicas (utilizan solo agua). Las boquillas neumáticas son las que más se utilizan debido a su elevada capacidad de remoción de calor, sin embargo, para que el proceso funcione idealmente, se necesita tener una transferencia de calor homogénea en la superficie; en la práctica esto no se puede lograr, debido a que las boquillas utilizadas generan rocíos y nieblas con características hidrodinámicas que impiden llegar a esta idealidad, tales características son la distribución de tamaños y velocidades de las gotas que los conforman, además de la zona donde impactan sobre la superficie, entre otras.

Uno de los factores que influyen directamente al enfriamiento que se va a tener desde la superficie del acero es la velocidad con la que impactan las gotas sobre esta. A su vez, esta velocidad de impacto está fuertemente relacionada con la velocidad que tienen las gotas cuando salen del orificio de la boquilla y por lo tanto con la velocidad que adquieren dentro de la cámara de mezclado, desde que se originan en el deflector hasta que llegan a dicho orificio de salida.

Dentro de la cámara de mezclado, la aceleración que van a tener las gotas presentes dependerá de la cantidad de momentum que el aire dentro de esta cámara le va a transferir a las gotas. El resultado de esta transferencia se ve reflejado en un incremento en la velocidad durante su vuelo en el interior de la boquilla. Las ecuaciones (1) y (2) describen el movimiento y trayectoria de las gotas:

$$\frac{du_{i,d}}{dt} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho}{\rho_d d_d} |U_i - u_{i,d}| (U_i - u_{i,d}) + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_d}\right) g_i \quad (1)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = u_{i,d} \quad (2)$$

En la ecuación (1), C_D es el coeficiente de arrastre que se define como la relación de la fuerza sobre la gota y la presión dinámica del fluido causada por la proyección de las partículas del fluido sobre la superficie en un tiempo [4]. El coeficiente de arrastre se ve afectado principalmente por la viscosidad del fluido, el tamaño de la gota, la velocidad y un número de Reynolds (Re) correspondiente. [8]

Los rangos para el número de Reynolds que se reportan en las bibliografías encontradas son variados, pero existen tres regiones clásicas para el cálculo de C_D :

1. Región de Stokes; $Re \leq 2$ [3], [6], [10] y [11]
2. Región intermedia; $2 \leq Re \leq 500$ [3]
3. Región Newton; $500 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ [3] y [4]

En el presente trabajo se realizó el estudio hidrodinámico de la velocidad de las gotas formadas en el interior de boquillas neumáticas (a medida que se desplazan dentro de la cámara de mezclado) usadas en el enfriamiento secundario del acero mediante la resolución de las ecuaciones que describen el movimiento y la trayectoria de las gotas presentes y su dependencia con el coeficiente de arrastre.

Justificación

Es importante estudiar la aceleración de las gotas dentro de la cámara de mezclado ya que de ella

depende la velocidad que estas gotas tendrán a la salida de la boquilla y esta velocidad tiene un efecto sobre la transferencia de calor desde la superficie del acero, al ser la que permitirá a las gotas penetrar la capa de vapor formada sobre los planchones de acero durante su enfriamiento. El estudio de la velocidad de las gotas generadas bajo condiciones de operación industrial ayudará a establecer estrategias de enfriamiento para tener un sistema donde la placa de acero sea enfriada lo más homogénea posible influenciando de manera positiva sobre la calidad del acero que se produce, evitando la aparición de agrietamientos o abombamientos del planchón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la resolución de las ecuaciones de movimiento se implementó un código numérico en el software MatLab. Se utilizó el método de Euler de segundo grado utilizando un tamaño de paso de 1×10^{-5} s, el cual fue determinado en un análisis de sensibilidad previo al presente trabajo [10].

Para la resolución de las ecuaciones, se requiere de la velocidad superficial del aire, U_i , que depende de las condiciones de operación de la boquilla. Para el presente trabajo, la condición estudiada es $W = 0.50$ L/s, $p_a = 205$ kPa y a estas condiciones la velocidad superficial del aire ha sido calculada para ser $U_i = 61.09$ m/s [10].

Se considera la boquilla neumática CJ-1/2-6.5-90 utilizada en el enfriamiento secundario del acero, por ser ésta una de las que tiene mayor carga de enfriamiento.

Se considera que la aceleración de las gotas ocurre en la dirección axial de la boquilla desde su generación en el deflector (donde $u_i = 0$ m/s) hasta llegar al orificio de salida situado a 0.25 m de la superficie deflectora.

En el presente estudio se analizó la dependencia de la velocidad de las gotas con el coeficiente de arrastre reportado por distintos trabajos. Se hizo una búsqueda bibliográfica exhaustiva de coeficientes de arrastre y de las consideraciones por cada autor y mediante su implementación en el código de resolución numérica se obtuvieron los perfiles de velocidad dentro de la cámara de

mezclado y a la salida de la boquilla, manteniendo constante la velocidad superficial del aire.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El código implementado permite obtener datos de la evolución de la velocidad de la gota dentro de la cámara de mezclado, como son la velocidad, tiempo de vuelo y el número de Re en cada posición. Con esto, se puede determinar el valor del coeficiente de arrastre que corresponda y el régimen en que se encuentra la gota, para todas las fuentes consultadas.

Minchaca et al. [3] abordan un régimen de $Re < 2$ en la región de Stokes y presentan una ecuación donde la variación del coeficiente es inversamente proporcional al número de Reynolds; en comparación con Turton y Levenspiel [2], el régimen es exactamente el mismo pero la ecuación para el coeficiente es completamente contraria y predice una relación proporcional entre Re y C_D . Este último autor señala que se linealizó el término de inercia en la ecuación de Navier-Stokes con lo que el propio autor argumenta que se puede predecir una ecuación más exacta para este rango.

Analizando la Gráfica 1, se puede apreciar que el comportamiento de una gota dentro de la cámara de mezclado depende fuertemente del coeficiente de arrastre. La velocidad calculada con los coeficientes de Turton y Levenspiel [2], Deghani [5], al igual que Schiller y Naumann [18] y Cliff y Gauvin [20] resulta ser similar y esto se observa en los perfiles de la Gráfica 1.

El comportamiento de la gota dentro de la cámara de mezclado es idéntico si se compara con el coeficiente de Brown y Lawler [13] y Poniaev S.A. [17], en la Gráfica 1 se puede percibir que se traslapan los perfiles de velocidad. Se puede observar también que ninguna de las gotas de $155 \mu\text{m}$ alcanza la velocidad del aire, pero que con el coeficiente de arrastre reportado por Cheng [7] se obtiene una velocidad que difiere aproximadamente 20% con respecto a la calculada con el coeficiente reportado por Minchaca et al. [3]. Aunado a este análisis, se observa que se obtiene también una velocidad mayor en casi el 70% reportada por Monallisa [21] con respecto a

Pantokratoras [15]. Es importante mencionar que, si bien algunos autores señalan la presencia de los mismos regímenes de movimiento, difieren en el valor del Reynolds dentro de los cuáles ubican dichos regímenes.

Turton y Levenspiel [2] propusieron una única correlación aplicable a la gama completa de números de Reynolds y simplificaron considerablemente el cálculo del coeficiente de arrastre de una sola partícula [4]. Analizando los datos arrojados por el programa podemos observar en la Gráfica 2 que la velocidad con la que decae la gota a la salida de la boquilla para esta referencia es similar o casi igual a la velocidad que arroja el sistema para el C_D de Minchaca et al. [3]. Otra observación notoria sobre la Gráfica 2 es que el comportamiento más lineal se aprecia en la velocidad que arrojó el perfil por Monallisa [21], quiere decir entonces que la velocidad con la que la gota se desarrolló utilizando el coeficiente de arrastre reportado en este trabajo mostró un comportamiento gradual. La Gráfica 2 también expresa la similitud que existe en el comportamiento de los perfiles a la salida de la boquilla reportados en Minchaca et al. [3], Turton y Levenspiel [2a], [2b] y Dehghani [5], en donde se superponen las velocidades. Pasa lo mismo con las velocidades calculadas con el coeficiente de arrastre reportado por Cheng [8a], Brown y Lawler [13], Schiller y Naumann [18] y Clift y Gauvin [20].

La Tabla 1 muestra el tiempo en que una gota de $5\mu\text{m}$ alcanzó la velocidad terminal (es decir, la velocidad que tiene el aire) y la posición en que alcanzó esta velocidad. Para Turton y Levenspiel [2a] se analiza que el tiempo es corto y la distancia igual al recorrer dicha velocidad. El tiempo reportado para esta fuente se compara con un tiempo casi idéntico, en donde varias fuentes reportan el mismo tiempo de vuelo de la gota, pero distancias diferentes, estas son Turton y Levenspiel [2b], Dehghani [5] y Cheng [8a]. Se hizo una comparación también entre seis fuentes diferentes que arrojaron perfiles de velocidad distintos implementando coeficientes de arrastre disímiles, los tiempos son exactamente iguales pero la distancia con la que la gota alcanza la velocidad deseada varía en $1\mu\text{m}$. Los autores que reportan esto son Clift et al. [6], Brown y Lawler [13], Poniaev S.A. [17], Schiller y Naumann [18], White [19] y Clift y Gauvin [20]. Los tiempos más lentos donde se identifica claramente que las

distancias son más grandes, es decir, donde la gota tuvo mayor resistencia al aire utilizando el coeficiente reportado en Minchaca et al. [3] y Pantokratoras A. [15a, b]

CONCLUSIONES

Todas estas variaciones nos indican que las consideraciones para los regímenes que cada autor considera son importantes y algo en lo que coinciden casi todos es que a medida que la gota aumenta de diámetro, aumenta la resistencia a la aceleración del aire dentro de la cámara, provocando que la velocidad de salida en el orificio de la boquilla dependa del tamaño de cada gota, haciendo que se tenga un sistema de enfriamiento en donde no se logra la homogeneidad de la transferencia de calor en la superficie del acero.

Las fuentes que no arrojaron perfiles de velocidad en el software implementado quedan como trabajo futuro, pues se necesita un análisis más detallado para el coeficiente de arrastre que estos autores reportan, siendo éstas Cheng [8b], Hongli [11], Flemmer y Banks [12] y Morais et al. [14]. Cabe mencionar que este último autor coincidió con la ecuación de coeficiente de arrastre de una gota reportado en Taamneh y Bataineh [16] y Monallisa [21]; es interesante este análisis ya que, al tener estas similitudes, se puede predecir que dicho coeficiente puede ser más preciso para un sistema particular.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi asesor J.I. Minchaca que logró despertar en mí, las ganas de aprender e investigar sobre este trabajo, en segundo lugar, a mi familia por el apoyo otorgado durante la realización del proyecto y a mi abuela Julia que sé, estaría orgullosa de mí.

REFERENCIAS

- [1] Romo Castañeda Julio César (2009). Estudio de la formación de especies mineralógicas en el molde de colada continua de planchón delgado de acero. Tesis de Maestría. IPN
- [2]. Turton R, Levenspiel O. A short note on the correlation for spheres. *Powder Technol* 1986-, 47 (1):83-6.
- [3] Minchaca M, J.I. et al. (2010). Fluid Dynamics of Thin Steel Slab Continuous Casting Secondary Cooling Zone Air Mist. *Advanced Fluid Dynamics, Proc. of ILASS 2010, Cincinnati, OH, USA.*
- [4] Wen-Ching Yang. (2003). *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle System*. United States Of America: Marcel Dekker, Inc.
- [5] Dehghani S.R. et al. Droplet trajectories of wave-impact sea spray on a marine vessel. *Cold Region Science and Technology*, 12,2016, pp.1-9
- [6] Clift R., Grace J.R., Weber E. (1978) *Bubbles, Drops and Particles*. United States Of America: Academic Press.

[7] Cheng N.S. (2013) Calculation of Drag Coefficient for Arrays of Emergent Circular Cylinders with Pseudofluid Model. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 139, Issue 6.

[8] Cheng N. S. Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles. Powder Technol 2009; 189:395-8.

[9] Cao D., Song L., Li J., Zhou Y. Determining the drag coefficient of a cylinder perpendicular to water Flow by numerical simulation and field measurement. Ocean Engineering, 85, 2014, Pp. 93-99

[10] Minchaca M., J.I. (2012). Estudio de las Características Fluidinámicas de Nieblas de Agua usadas en la Colada Continua del Acero. Tesis de Doctorado. CINVESTAV-IPN.

[11] Hongli Y., et al. General formulas for drag coefficient and settling velocity of sphere based on theoretical law. International Journal of Mining Science and Technology, 25,1025 Pp.219-223.

[12] Flemmer RLC, Banks Cl. On the drag coefficient of a sphere. Powder Technol 1986; 48(3):217-21.

[13] Brown PP., Lawler DF. Sphere drag and settling velocity revisited. J. Environ Eng-ASCE 2003; 129(3):222-31

[14] Morais, J.E.; Costa, M.J.; Moreira, M.F.; Barbosa, T.M. Comparison of young swimmer's active drag coefficient using three methods to compute trunk transverse surface area Motricidade, vol. 8, núm. 1, 2012, pp. 19-25.

[15] Pantokratoras A. A Note on the Drag Coefficient of Steady Flow of Non-Newtonian, Power-Law Fluids across Unbounded Two-Dimensional Bodies at Low Reynolds Numbers. Fluids 2017, 2, 5. MDPI.

[16] Taamneh Y.; Bataineh K.M. Drag and Separation Flow Past Solid Sphere with Porous Shell at Moderate Reynolds Number. Transp Porous Med (2011) 90:869–881

[17] Poniaev S.A et al. Drag coefficient of solid micro-sphere between parallel plates. Journal of Physics: Conference Series 769 (2016).

[18] Schiller L and Naumann A 1933 Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung Z. Ver. Dtsch. Ing 77 318–20

[19] White F 2010 Fluid Mechanics 862

[20] Clift R and Gauvin W H 1971 Motion of entrained particles in gas streams Can. J. Chem. Eng. 49 439–48

[21] Mallick Monalisa (2014) Variation of drag coefficient on rough cylindrical bodies. Master of Technology In Civil Engineering. National Institute of Technology Rourkela.

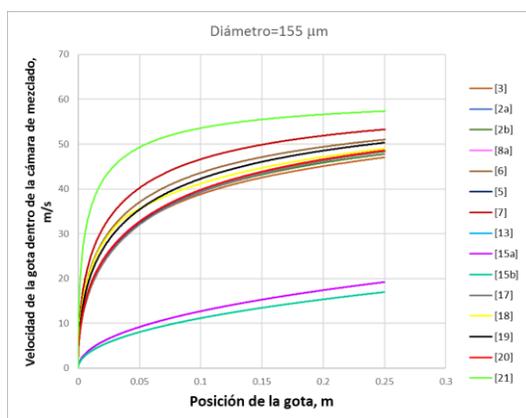


IMAGEN 1: Velocidad de una gota de 155 μm con respecto a su posición dentro de la cámara de mezclado.

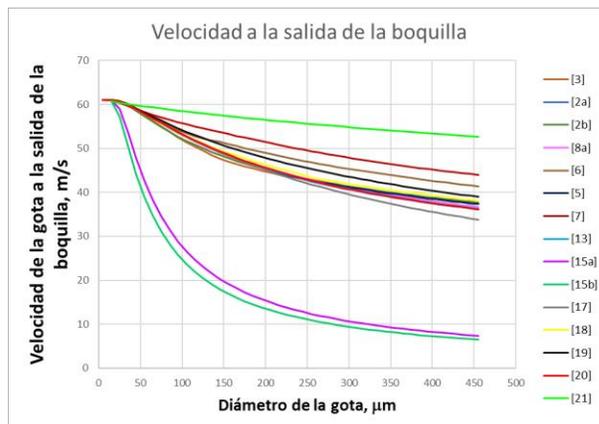


IMAGEN 2. Velocidad terminal de la gota a la salida de la cámara de mezclado.

Tabla 1: Posición y tiempo en que una gota de 5 μm de diámetro alcanza la velocidad terminal de 61.09 m/s, para distintas referencias de coeficiente de arrastre

No.	Tiempo (s)	Posición (m)	Referencia
1	0.000750	0.043441	[3]
2	0.000650	0.037837	[2a]
3	0.000670	0.038810	[2b]
4	0.000670	0.039060	[8a]
5	0.000660	0.038444	[6]
6	0.000670	0.039002	[5]
7	0.002400	0.144045	[7]
8	-----	-----	[8b]
9	-----	-----	[11]
10	-----	-----	[12]
11	0.000660	0.038377	[13]
12	-----	-----	[14], [16] y [21]
13	0.001740	0.102085	[15a]
14	0.001900	0.110489	[15b]
15	0.000660	0.038397	[17]
16	0.000660	0.038398	[18]
17	0.000660	0.038473	[19]
18	0.000660	0.038398	[20]
19	*	*	[21]

*No alcanzó la velocidad de 61.09 m/s