

# ACELERACIÓN DE LAS GOTAS DURANTE SU VUELO EN EL INTERIOR DE LA CÁMARA DE MEZCLADO

Tovar-Tetuán, José de Jesús (1); Minchaca-Mojica, Jesús Isaac (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jdj.tovartetuan@ugto.mx]

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

## Resumen

En el presente estudio se analizó el efecto del coeficiente de arrastre en el movimiento de las gotas en el interior de una boquilla neumática usada en el proceso de enfriamiento secundario del acero. Este estudio se llevó a cabo partiendo de las bases de un estudio hidrodinámico previo de la velocidad de las gotas formadas en el interior de la boquilla implementando un código de resolución numérica utilizando Matlab para la solución de las ecuaciones de movimiento y trayectoria de las gotas individuales y el cálculo del coeficiente de arrastre particularmente de cuatro distintas referencias. Se obtuvieron perfiles de velocidad en función de su diámetro para una condición de operación en particular analizando distintos cálculos del coeficiente de arrastre; de esta manera se determinó la variación en el perfil de velocidad de salida de las gotas con distintos diámetros en el interior de la boquilla. Los resultados muestran que la principal diferencia se centra en el régimen intermedio de movimiento.

## Abstract

In the present study the effect of drag coefficient on the motion of individual droplets inside the mixing chamber of a pneumatic nozzle as those used in secondary cooling of steel process was analyzed. This study was carried out on the basis of a previous hydrodynamic study of the velocity of droplets formed inside the nozzle by implementing a numerical code with Matlab to solve the equations of motion and trajectory of individual droplets and the calculation of drag coefficient, particularly from four different references. Droplet-velocity profiles as a function of droplet-diameter for a particular operating condition were obtained analyzing different calculations of drag coefficient; this allowed determining the variation in the velocity profile of droplets at the nozzle exit with different diameters inside de nozzle. Results show that the main difference is in the intermediate regime of motion.

### Palabras Clave

Coefficiente de arrastre; Gotas; Atomización; Perfil de Velocidad

## INTRODUCCIÓN

### Antecedentes

Siempre que hay movimiento relativo entre una partícula y el fluido que la rodea, se tendrá una fuerza de arrastre entre la partícula y el fluido; este arrastre provocará un movimiento de la partícula en dirección de la velocidad del fluido. Para algunos cuerpos sólidos hay también una fuerza de sustentación que es perpendicular a la dirección de la velocidad. Para partículas en caída libre, estas fuerzas de sustentación no suelen ser importantes. Sin embargo, incluso las partículas esféricas sufren estas fuerzas de sustentación en flujos viscosos cerca de las superficies sólidas. Una partícula cayendo bajo la acción de la gravedad se acelerará hasta que la fuerza de arrastre equilibre la fuerza gravitacional, después de lo cual cae a la velocidad límite o velocidad de asentamiento. La velocidad de las partículas en estas circunstancias puede sufrir fluctuaciones debido al desprendimiento de vórtices, entre otros factores. La fuerza de arrastre sobre una partícula fija en el espacio con el fluido moviéndose alrededor es menor que la fuerza de arrastre sobre una partícula en caída libre en un flujo estacionario con la misma velocidad relativa [1].

Lo anterior sienta las bases del movimiento de las gotas que se forman en el interior de una boquilla neumática, como las utilizadas en el enfriamiento secundario del acero, las cuales producen chorros de niebla (Air-Mists Jets). En estos sistemas, la velocidad con que llega la gota al orificio de salida de una boquilla neumática usada en el proceso de enfriamiento secundario del acero justo antes de ser expulsada a la zona de chorro libre, de acuerdo a un estudio hidrodinámico previo [2], depende principalmente de dos factores: el tamaño de la gota y la velocidad superficial del aire. El tamaño de la gota va directamente relacionado con el coeficiente de arrastre, ya que a menor diámetro se tiene una mayor área de contacto y de esta manera el aire puede transferirle con mayor facilidad su momentum provocando así una mayor aceleración de la gota.

### Justificación

En este estudio se realiza la determinación del coeficiente de arrastre para distintas gotas en el interior de una boquilla neumática empleada en el enfriamiento secundario del acero considerando que permanecen esféricas en su trayectoria siguiendo la relación de arrastre para una esfera rígida. Se analiza la condición de operación de flujo de agua  $W = 0.10 \text{ L/s}$  y  $p_a = 205 \text{ kPa}$  de presión de aire en el interior de la boquilla para la cual la velocidad superficial del aire es de  $85.07 \text{ m/s}$ ; mediante la implementación de un código de resolución numérica utilizando el software Matlab. La importancia de los resultados obtenidos con el presente estudio es que permitirán el refinamiento de un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) desarrollado para el análisis de este tipo de sistemas [2] que permite el análisis para encontrar las mejores condiciones de operación en planta, dependiendo del tipo de acero que se esté produciendo, sin el costo que implicaría la experimentación en laboratorio o en planta para este fin.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente estudio se considera la boquilla neumática CJ-1/2-6.5-90-SS utilizada en el proceso de enfriamiento secundario del acero. En el interior de la cámara de mezclado se considera que las gotas se aceleran en la dirección axial de la boquilla desde la superficie deflectora ubicada en la posición inicial, donde las gotas tienen una velocidad igual a cero, y que son aceleradas a lo largo del tubo de mezclado hasta llegar al orificio de salida de la boquilla ubicado a  $0.25 \text{ m}$  de la superficie deflectora. La velocidad que alcanzan las gotas en este punto dependerá de su tamaño (considerando aquí la importancia del cálculo del coeficiente de arrastre) y de la velocidad superficial del aire. Las Ecs. (1) y (2) describen el movimiento y trayectoria de las gotas individuales [2]:

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

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

El coeficiente de arrastre para partículas esféricas es una función del número de Reynolds de la gota. Para el cálculo del coeficiente de arrastre se consultaron distintas fuentes y de acuerdo a las consideraciones expuestas en cada una de ellas, se describen a continuación:

1ra referencia [2]:

Región de la Ley de Stokes ( $Re_d < 2$ )

$$C_D = \frac{24}{Re_d} \quad (3)$$

Región Intermedia ( $2 \leq Re_d \leq 500$ )

$$C_D = \frac{10}{\sqrt{Re_d}} \quad (4)$$

Región de la Ley de Newton ( $500 \leq Re_d \leq 2 \times 10^5$ )

$$C_D = 0.44 \quad (5)$$

2da referencia [1]:

Región de la Ley de Stokes para bajos números de Reynolds ( $Re_d < 0.1$ )

$$C_D = \frac{24}{Re_d} \quad (6)$$

Régimen Intermedio ( $0.1 < Re_d < 1000$ ); se estima el coeficiente de arrastre con error del 6 por 100 como:

$$C_D = \left(\frac{24}{Re_d}\right) (1 + 0.14 Re_d^{0.70}) \quad (7)$$

En el régimen de la Ley de Newton ( $1000 < Re_d < 350000$ ); con error máximo del 13 por 100:

$$C_D = 0.445 \quad (8)$$

3ra referencia [3,4]:

De acuerdo a un análisis de trayectoria de gotas esféricas asumiendo que tienen una densidad y diámetro pequeño en comparación con la escala de longitud de flujo.

Región de Stokes ( $Re_d < 1$ )

$$C_D = \frac{24}{Re_d} \quad (9)$$

Región intermedia ( $1 < Re_d < 1000$ )

$$C_D = \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}) \quad (10)$$

Región de la Ley de Newton ( $Re_d > 1000$ )

$$C_D = 0.44 \quad (11)$$

4ta referencia [5]:

La amplia necesidad para la estimación más precisa del coeficiente de arrastre en la región de  $Re_d < 2 \times 10^5$  ha dado hincapié a la aparición de fórmulas empíricas. El cálculo del coeficiente de arrastre que se muestra en la Ec. (12) se esfuerza no solamente para un mayor ajuste de los datos experimentales sino también para considerar una amplia gama de Reynolds a la que pueda ser aplicable considerando que dicha fórmula se construyó sobre la base de la Ley de Stokes:

$$C_D = \frac{24}{Re_d} (1 + 0.173 Re_d^{0.657}) + \frac{0.413}{1 + 16,300 Re_d^{-1.09}} \quad (12)$$

Para la resolución numérica de las ecuaciones se implementó un código en el software comercial Matlab con un estudio hidrodinámico previo considerando todas las referencias empleadas en las que el coeficiente de arrastre varía en función del número de Reynolds; se considera también que las gotas de líquido permanecen esféricas siguiendo la relación de arrastre, observando de esta manera que la similitud entre la curva de arrastre y del sistema estudiado en particular presenta un distinto comportamiento a Reynolds mayores a  $10^3$ ; valores de Reynolds que no se presentan para las condiciones analizadas en el presente estudio. De este modo las consideraciones empleadas se justifican y se

hacen los cálculos para las condiciones de operación ya mencionadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Imagen 1 muestra los perfiles de velocidad de las gotas calculados con el coeficiente de arrastre de [1], para la condición de operación estudiada. Perfiles similares se obtuvieron para todas las referencias analizadas.

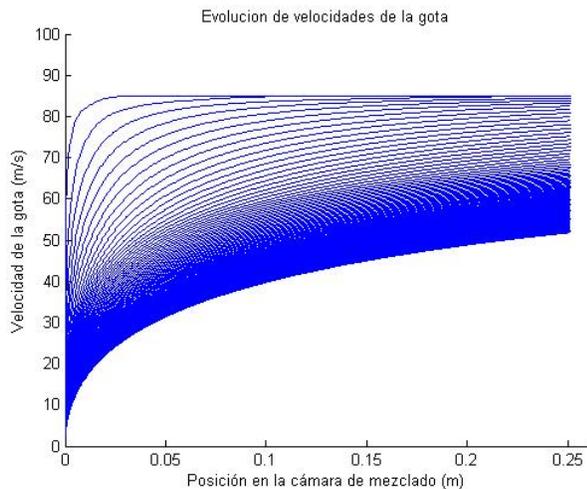


IMAGEN 1: Perfiles de velocidad para todas las gotas analizadas.

A partir de los datos obtenidos de las gráficas como la de la Figura 1 se puede determinar la velocidad con la que las gotas llegan al orificio de la boquilla, ubicado a 0.25 m.; de esta manera se obtienen los perfiles de velocidad a la salida de la boquilla para cada una de las referencias utilizadas. Los resultados se muestran en la Figura 2, donde se puede observar el comportamiento de todas las gotas para cada una de las referencias empleadas. La Imagen 2 muestra como la región intermedia es la que presenta mayor variación en el perfil de velocidad; así como una variación en la región de la Ley de Newton. Con esto se obtiene que el coeficiente de arrastre de las distintas referencias empleadas a valores de Reynolds altos y diámetros pequeños no tiene variación alguna puesto que las gotas rápidamente alcanzan la velocidad superficial del aire. Caso contrario ocurre con gotas de diámetros mayores en los que la variación es significativa, así como en la transición de la región de Stokes a la región de la

Ley de Newton donde se tienen las principales variaciones dado que el coeficiente de arrastre tiene un papel más importante al tratarse de gotas con un diámetro ya considerable.

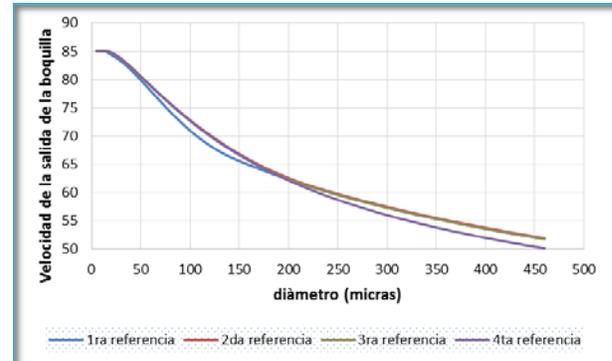


IMAGEN 2: Perfiles de velocidad de salida de las gotas en el orificio de salida para las cuatro referencias empleadas en el cálculo del coeficiente de arrastre.

Para entender el comportamiento que tienen las distintas gotas en cada una de las regiones se graficó el perfil de velocidades como función de la posición de cada gota en el interior de la cámara de mezclado hasta llegar al orificio de salida de la boquilla, para cada una de las referencias utilizadas para el cálculo del coeficiente de arrastre. Lo anterior con la finalidad de tener una muestra en particular de cada región comprendida y ver el papel fundamental que tiene el diámetro en el cálculo del coeficiente de arrastre. La Imagen 3 muestra estos resultados. Perfiles de comportamientos similares se obtuvieron para las demás referencias utilizadas.



IMAGEN 3: Perfiles de velocidad de las gotas dentro de la cámara de mezclado para la 1er referencia en el cálculo del coeficiente de arrastre.

## CONCLUSIONES

Con el presente estudio se pudo realizar el cálculo del coeficiente de arrastre, así como el efecto del mismo, en el interior de una cámara de mezclado de una boquilla neumática, tomando en cuenta distintas referencias y consideraciones sustentadas analizando el comportamiento de gotas de distinto diámetro en cada posición del interior de la cámara de mezclado a una condición de operación ya establecida.

El coeficiente de arrastre empleado en la ecuación (4) provoca una variación de 2.418% con respecto al perfil de velocidad utilizado en la ecuación (12) para el cálculo del coeficiente de arrastre, esto para una región intermedia apreciada gráficamente. Mientras que para la región de Newton la variación es de 2.8889% con respecto al perfil de velocidad; con ambas referencias y ambas regiones fue donde pudo observarse la mayor variación posible.

La 4ta referencia solo varía en la región de Newton con respecto a la 3er referencia; puesto que en las regiones de Stokes e Intermedia la similitud es muy alta, con la misma variación de 2.8889% con respecto al perfil de velocidad para el cálculo del coeficiente de arrastre.

Del mismo modo, la 1er referencia solo varía en la región intermedia con respecto a la 3er referencia con un error relativo de 2.418% con respecto al perfil de velocidad; observando una gran similitud en el comportamiento para la región de Newton y región de Stokes entre ambas. El perfil de velocidad que se obtuvo en los distintos cálculos del coeficiente de arrastre sigue la misma tendencia, es decir, no hay una variación muy significativa en su trayectoria para gotas de cualquier diámetro consideradas dentro de la cámara de mezclado.

De acuerdo a lo establecido y a un análisis de la trayectoria de estas gotas en distintas regiones, se determinó una diferencia máxima de 3.363% con respecto a la velocidad con la que saldría de la boquilla, siendo para este caso en particular una gota del mayor diámetro posible para el sistema estudiado (455 $\mu$ m). Se observa que en el cálculo del coeficiente de arrastre empleando la 4ta referencia se obtienen las velocidades más bajas en el interior de la cámara de mezclado, aunque es una diferencia relativamente pequeña, como se

especificó anteriormente, es 3.363% menor con respecto a las referencias tomadas. Cabe destacar que a velocidades mayores hay una similitud muy marcada, destacando así que la diferencia se centra en la región Intermedia.

## REFERENCIAS

- [1] James N. Tilton, PhD., P.E "PERRY S CHEMICAL ENGINEERS HANDBOOK, vol. 1; 2012; edit. McGraw-Hill; cap. 6; pág. (64-70).
- [2] Minchaca M., J.I. et al. (2012). An Experimental and Computational Study of the Fluid Dynamics of Dense Cooling Air-Mists. En Woo Oh W. (Ed.), *Advanced Fluid Dynamics* (pp. 1-20). InTech Publisher.
- [3] Dehghani, S.R., Saidi, M.H., Mozafari, A.A., Soleimani, F., 2013. Particle dispersion dependency on the entrance position in bidirectional flow. *Part. Sci. Technol.* 31, 576–584.
- [4] Dehghani, S.R., Saidi, M.H., Mozafari, A.A., Ghafourian, A., 2009. Particle trajectory in a bidirectional vortex flow. *Part. Sci. Technol.* 27, 16–34.
- [5] Turton R, Levenspiel O. A short note on the drag correlation for spheres. *Powder Technol* 1986;47(1):83–6.