

Análisis Numérico de la Evolución de la Velocidad de las Gotas en el Interior de una Boquilla Neumática

Aranda Ramírez Ana Karen [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: [karenaranda_05@hotmail.com]

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

Resumen

Un método utilizado en la industria metalúrgica para el enfriamiento secundario del acero colado es la aplicación de rocíos de agua o chorros de niebla mediante boquillas hidráulicas o neumáticas para la remoción de calor. Para que un sistema de enfriamiento garantice una buena calidad del material se requiere que la extracción de calor desde la superficie del acero sea lo más homogénea e intensa posible. En este trabajo se realizó el estudio hidrodinámico de la velocidad de las gotas formadas en el interior de boquillas neumáticas usadas en el enfriamiento secundario del acero. Este estudio se llevó a cabo mediante la implementación de un código de resolución numérica utilizando Matlab, para la solución de las ecuaciones de movimiento de gotas individuales. Se obtuvieron perfiles de velocidad en función de su diámetro para ocho condiciones de operación diferentes así como los correspondientes perfiles de velocidad terminal. Los resultados muestran que conforme disminuye el diámetro de la gota, la velocidad que adquieren es mayor debido a que por su mayor área de contacto existe mayor transferencia de momentum desde el aire y esto se ve reflejado en la velocidad terminal, donde las gotas más grandes son las más lentas.

Abstract

Use of Sprays or Air-Mists generated by hydraulic or pneumatic nozzles is a method applied in metallurgical industry for secondary cooling of continuous casting of steel. In order to a system of cooling guarantees a good quality of material a homogeneous and intense heat extraction from the surface is required. In this work a hydrodynamic study of the droplet velocity in the mixing chamber of the nozzles used in the secondary cooling of steel was realized. This study was carried on by implementing a numerical code in Matlab for the solution of motion equations of individual droplets. Velocity profiles as a function of droplet-diameter for eight different conditions as well as corresponding terminal velocity profiles were obtained. Results show that a decrease in the droplet-diameter causes an increase in the droplet-velocity due to the more quantity of momentum transferred from the air related to the major contact droplet area, this is reflected in the terminal velocity profiles where it can be appreciated that biggest droplets have the lowest velocities.

Palabras Clave

Atomización; Gotas; Velocidad; Chorros; Boquilla

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Los sistemas de atomización de líquidos tienen aplicación en una gran gama de procesos de la ingeniería. Una de estas aplicaciones la encuentran en los procesos industriales de fabricación de acero mediante colada continua, específicamente en el enfriamiento secundario, donde sistemas de rocíos de agua (*sprays*) y/o chorros de niebla (*Air-Mists*) son los más utilizados. Los primeros son generados por boquillas hidráulicas, mientras que las boquillas neumáticas son los dispositivos utilizados para generar los chorros de niebla. En las boquillas neumáticas la atomización de líquido se vuelve más intensa debido a que se utiliza una corriente de aire que se alimenta a gran velocidad para favorecer la atomización; dependiendo del diseño de cada boquilla, se pueden generar nieblas con un patrón de esparcido distinto. Entre estos patrones, el de abanico plano es el más utilizado en los sistemas de enfriamiento secundario del acero. En las boquillas empleadas en estos sistemas, los flujos de agua, W (con presión p_w) y aire, A (con presión p_a) se alimentan a 90° entre sí (i.e., perpendiculares) y de este modo se provoca una primera atomización del agua [1], al chocar contra la superficie deflectora en la cámara de mezclado de la boquilla. Las distintas combinaciones de flujos y presiones de agua y aire son conocidas como condiciones de operación. En el interior de la cámara, las gotas formadas son adicionalmente fragmentadas debido a los esfuerzos de corte ejercidos por la corriente de aire y aceleradas por el momentum que éste les transfiere conforme se desplazan hacia el orificio de salida de la boquilla.

De acuerdo con Montes [2] las boquillas neumáticas extraen una mayor cantidad de flujo de calor para un rango determinado de temperaturas superficiales y densidades de impacto de agua y esto se debe probablemente a la velocidad de las gotas, argumentando que las gotas generadas con las boquillas neumáticas adquieren mayor velocidad que las generadas con las hidráulicas, para el caso en el que los flujos de agua sean similares [3].

Justificación

La modificación de las condiciones de operación de las boquillas provoca que los niveles de extracción de calor sean diferentes. Lo anterior se debe a que las propiedades de los rocíos (es decir, tamaño y velocidad de las gotas) que son generados son dependientes de las condiciones de operación. Sin embargo, a pesar del rol fundamental que tienen las propiedades de los rocíos cuando son utilizados para el enfriamiento de superficies calientes, se conoce poco acerca de dichas propiedades, particularmente de los rocíos que son generados bajo condiciones de operación que corresponden con el proceso industrial del enfriamiento secundario del acero.

En este trabajo se realizó un estudio hidrodinámico de la velocidad de las gotas que se forman en el interior de una boquilla neumática usada en el enfriamiento secundario del acero operando bajo ocho condiciones de operación distintas. El estudio considera que las gotas son formadas en la superficie deflectora de manera instantánea y que son aceleradas por el momentum transferido por el aire, por lo que se llevó a cabo la implementación de un código de resolución numérica mediante el software Matlab, para la solución de las ecuaciones de movimiento (bajo los efectos de arrastre aerodinámico y de gravedad) y trayectoria de gotas individuales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio, se considera la boquilla neumática CJ-1/2-6.5-90-SS utilizada en el enfriamiento secundario del acero. Dentro de la cámara de mezclado, se considera que las gotas solamente son aceleradas en la dirección axial de la boquilla desde la superficie deflectora ubicada en la posición inicial en donde las gotas tienen una velocidad inicial 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 m de la superficie deflectora, con una velocidad terminal dependiente de su tamaño y de la velocidad superficial del aire. Las Ecs. (1) y (2) describen el movimiento y trayectoria de las gotas individuales:

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

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

El coeficiente de arrastre, C_D , que aparece en la Ec. (1) se considera dependiente del número de Reynolds, Re_d , de la gota de acuerdo a las Ecs. (3)-(5) [4]:

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 ($500 \leq Re_d \leq 2 \times 10^5$)

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

$$\text{donde } Re_d = \frac{d_d |U_i - u_{i,d}|}{\nu} \quad (6)$$

Para la resolución numérica de las ecuaciones, se implementó un código en el software comercial Matlab. Para dicho código 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; también, en este estudio se asumió que el coeficiente de arrastre varía en función del número de Reynolds de la gota, de acuerdo a las expresiones (3)-(6). La velocidad superficial del aire, U_i , es distinta para cada una de las condiciones de operación estudiadas, de acuerdo a lo que se reporta en la Tabla 1 [5].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El código implementado permite obtener datos de la evolución de la velocidad de la gota dentro de la cámara de mezclado, tales como la velocidad, tiempo de vuelo y el número de Re en cada posición. Con todos estos datos, se puede determinar el valor del coeficiente de arrastre que corresponda y el régimen en que se encuentra la gota.

Las Imágenes 1 y 2 muestran los perfiles de velocidad de las gotas calculados en el interior de la cámara de mezclado, para una condición de operación en particular; estas figuras fueron calculadas considerando gotas en el rango de $7.5 \mu\text{m} \leq d_d \leq 457.5 \mu\text{m}$ y en ellas se puede apreciar que las gotas más chicas son las que rápidamente adquieren la velocidad terminal (i.e., alcanzan la velocidad del aire dentro de la cámara de mezclado). Las gotas más chicas ($d_d \leq 7.5 \mu\text{m}$) alcanzan la velocidad terminal en una distancia muy corta, siendo ésta de aproximadamente $x \leq 0.03$ m; en cambio, las gotas más grandes muestran una aceleración gradual, sin embargo, debido a su menor área de contacto, la cantidad de momentum transferido por el aire durante su vuelo en la cámara de mezclado no alcanza a ser suficiente para que las gotas lleguen con la velocidad terminal al orificio de salida de la boquilla. Las Imágenes 1 y 2 corresponden con una de las ocho condiciones estudiadas, sin embargo, un comportamiento similar se obtuvo para todas las condiciones de operación.

A partir de los datos de velocidad reportados en las Imágenes 1 y 2, se pueden extraer los datos de velocidad de salida de las gotas, es decir, la velocidad que tiene cada gota justo antes de salir de la boquilla, ubicadas en el orificio en la posición $x = 0.25$ m. De este modo, se construyeron los perfiles de velocidad de salida de las gotas mostrados en las Imágenes 3 y 4. La Imagen 3 corresponde con el caso cuando se mantiene la presión de aire constante con un incremento en el flujo de agua, mientras que la Imagen 4 corresponde al caso cuando se mantiene constante el flujo de agua variando la presión de aire dentro de la boquilla. En todos los casos se puede observar que las gotas de menor tamaño son las que presentan las mayores velocidades, en correspondencia con los resultados de las Imágenes 1 y 2. La Imagen 3 muestra que un

incremento en el flujo de agua, manteniendo la presión de aire constante, provoca una disminución de la velocidad de salida de las gotas. Lo anterior puede deberse a que al tener mayor cantidad de agua dentro de un espacio confinado se tiene una disminución en la relación entre los flujos A/W y esto genera como resultado que la cantidad de aire disponible para transferirle cantidad de movimiento al agua es menor, acelerando en menor medida las gotas que son generadas dentro de la cámara de mezclado. Un comportamiento contrario se obtiene al incrementar la presión de aire manteniendo constante el flujo de agua, como se puede observar en la Imagen 4; ésta imagen muestra que el incremento en la presión de aire provoca un aumento en la velocidad de salida de las gotas y esto puede deberse a que en esta situación, la relación entre flujos de agua y aire, A/W, aumenta conforme aumenta la presión de aire, con lo que se tiene una mayor cantidad de aire disponible para transferirle momentum a las gotas durante su vuelo en la cámara de mezclado.

Los resultados generados en el presente estudio consisten de información valiosa y útil para el planteamiento y refinamiento de modelos computacionales que permiten representar la dinámica de movimiento y vuelo de las gotas presentes en los chorros de niebla utilizados para el enfriamiento secundario del acero [4]. Al día de hoy, el campo de estudio en estos sistemas sigue siendo amplio, debido a que las condiciones de experimentación no resultan triviales, por lo que el contar con modelos CFD que permitan estudiar los sistemas de rocíos y nieblas constituyen una herramienta valiosa y poderosa para este propósito.

CONCLUSIONES

Con el presente estudio, se pudo calcular la velocidad de las gotas que son generadas por una boquilla neumática desde el instante en que aparecen en la superficie deflectora hasta el instante en que arriban al orificio de salida de la boquilla.

Los perfiles de velocidad de las gotas muestran que las más chicas alcanzan con mayor rapidez la velocidad terminal, mientras que las gotas de mayor tamaño, aunque son aceleradas gradualmente, no alcanzan la velocidad superficial del aire.

Los resultados mostraron que la velocidad con que llegan las gotas al orificio de salida, justo antes de ser expulsadas a la zona de chorro libre, depende principalmente de dos factores: el tamaño de la gota y la velocidad superficial del aire. El tamaño de la gota va de la mano con el coeficiente de arrastre, ya que al tener más área de contacto, el aire puede transferirle con mayor facilidad su momentum, con lo que se tiene una mayor aceleración de las gotas. Por esta razón, se sugiere realizar como trabajo futuro un estudio con mayor detalle en el que el cálculo del coeficiente de arrastre sea el principal objetivo, considerando las condiciones presentes en el interior de la cámara de mezclado de las boquillas y el posterior refinamiento en los resultados de perfiles de velocidad de las gotas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a veranos UG por la oportunidad que me dieron para poder realizar este proyecto, en segundo lugar a mi familia por el apoyo otorgado durante la realización de este trabajo y principalmente a mi asesor el Doctor Jesús Isaac Minchaca Mojica por su apoyo incondicional, por su tiempo y dedicación a este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Anthonis, J., Wulteputte, L. & De Ketelaere, B. (May 2007). Modelling of Water-Air Internal Mix Nozzles for Process Monitoring. In Proc. ILASS Americas 20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Chicago, IL, USA.
- [2] Montes R., J.J.III. (2008). Modelo para Predecir la Evolución del Enfriamiento y la Solidificación de Planchones Delgados durante Cambios en Condiciones de Proceso. Tesis de Doctorado. CINVESTAV-IPN.
- [3] Minchaca M., J.I. (2007). Efecto de la Proporción Aire/Agua sobre la Velocidad de las Gotas generadas por Boquillas Neumáticas empleadas en el Enfriamiento Secundario del Acero. Tesis de Maestría. CINVESTAV-IPN.
- [4] 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.
- [5] Minchaca M., J.I. (2012). Estudio de las Características Fluidodinámicas de Nieblas de Agua usadas en la Colada Continua del Acero. Tesis de Doctorado. CINVESTAV-IPN.

Tabla 1: Condiciones de operación estudiadas y velocidad superficial del aire.

$W, L/s$	P_a, kPa	$U_i, m/s$
0.10	205	85.07
0.30	205	79.55
0.50	205	61.09
0.50	257	75.04
0.50	320	97.75
0.58	205	53.34
0.58	279	72.54
0.58	340	94.64

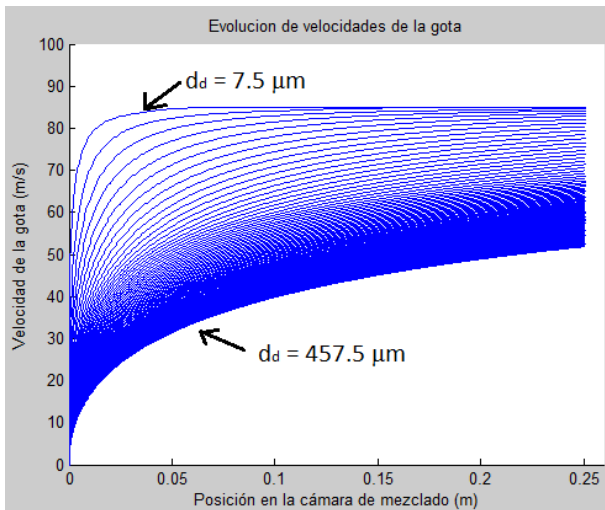


IMAGEN 1: Perfiles de velocidad de las gotas dentro de la cámara de mezclado. $W = 0.10 L/s$, $p_a = 205 kPa$, $U_i = 85.07 m/s$. Todas las gotas calculadas.

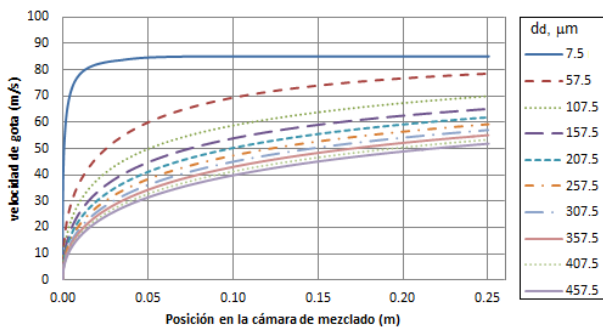


IMAGEN 2: Perfiles de velocidad de las gotas dentro de la cámara de mezclado. $W = 0.10 L/s$, $p_a = 205 kPa$, $U_i = 85.07 m/s$. Algunas gotas seleccionadas.

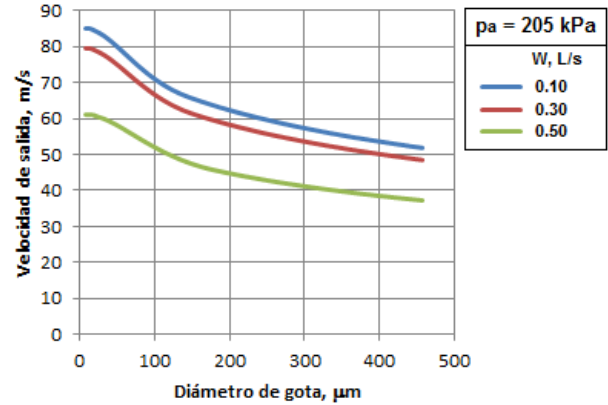


IMAGEN 3: Perfiles de velocidad de salida de las gotas en el orificio de salida. Efecto del flujo de agua.

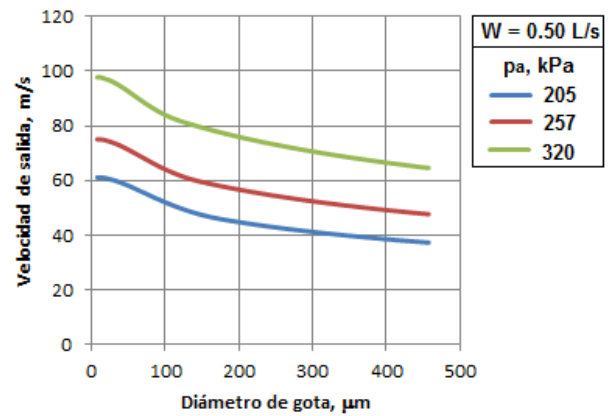


IMAGEN 4: Perfiles de velocidad de salida de las gotas en el orificio de salida. Efecto de la presión de aire.