

# Modelación física del flujo de acero en un distribuidor de colada continua equipado con un inhibidor de turbulencia y una cortina de gas<sup>(\*)</sup>

M. Pérez-Labra\*, M. Díaz-Cruz\*\*, J. Palafox-Ramos\*\*, E.O. Ávila-Dávila\*  
y F. Patiño-Cardona\*\*\*

**Resumen** Usando el número de Froude como criterio de diseño se construyó un modelo de distribuidor, en acrílico, a 2/5 de la escala real, en el cual, ocho casos propuestos se estudiaron mediante la técnica PIV, manteniendo un flujo de gas constante de 596 ml/min y variando, solamente, la posición de la cortina de gas. Los resultados permitieron obtener curvas de distribución de tiempos de residencia (RTD) y, del procesamiento de los datos, se halló que la combinación del inhibidor de turbulencia (IT) con la adecuada posición de la cortina de gas presentó el mas alto volumen pistón. El caso VII presentó los mejores resultados, incrementando el volumen pistón en 131,85 % en comparación con el caso IV, que fue tomado como referencia.

**Palabras clave** Inclusión. Distribuidor. PIV. Cortina de gas. RTD. Inhibidor de turbulencia.

## Physical modeling of steel flow in a tundish equipped with a turbulence inhibitor and a gas curtain

**Abstract** A 2/5 scale model with a transparent plastic sheet was built based on Froude criterion in which eight cases were studied by PIV technique, maintaining a constant gas flow rate of 596 ml/min and only varying the gas curtain position. The results permitted to get Residence Time Distribution (RTD) curves, and from the data processing it was found that combining Turbulence Inhibitor (TI) with the adequate gas curtain position it is enhanced the plug volume. The case VII presented the best results increasing the plug volume in 131.85 % in comparison with the de case IV which was taken as the reference one.

**Keywords** Inclusion. Tundish. PIV. Gas curtain. RTD. Turbulence inhibitor.

### 1. INTRODUCCIÓN

La calidad del acero se mejora cuando el comportamiento del fluido disminuye la turbulencia superficial del líquido. Esta disminución de la turbulencia evita que se abra la capa de escoria que protege al acero líquido del contacto con el aire. También, el comportamiento del fluido debe de ser tal que evite el atrapamiento (emulsificación) de la escoria en el acero líquido y que dirija las inclusiones hacia la superficie del baño líquido. El apropiado flujo de metal en el distribuidor es de gran importancia para la producción de un acero limpio y de

alta calidad, para cuyo fin se emplean dispositivos de control de flujo, tales como inhibidores de turbulencia, represas, mamparas y deflectores, cuya efectividad en el flujo del fluido se mide mediante técnicas de simulación matemática y modelación física<sup>[1]</sup>. En los últimos años, se ha realizado un gran número de estudios sobre optimización del flujo del fluido mediante el empleo de diversos arreglos de dispositivos modificadores de flujo en el distribuidor de colada continua, usando modelos físicos<sup>[1-3]</sup> y matemáticos<sup>[4-7]</sup>. Los fundamentos de los trabajos se apoyan en el hecho de saber que la eliminación de inclusiones es más rápida en

(\*) Trabajo recibido el día 29 de noviembre de 2004 y aceptado en su forma final el día 4 de octubre de 2005.

(\*) Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, Apdo. Postal 75-874, México D.F. CP 07300. E-mail: MIGUELABRA@hotmail.com

(\*\*) Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, Apdo. Postal 75-874, México D.F. CP 07300. E-mail: mdiazc@ipn.mx

(\*\*\*) Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Centro de Investigaciones en Metalurgia y Materiales. Pachuca Hgo. CP 42184.

sistemas en los que interviene una fuerza que favorece su arrastre hacia la superficie del baño líquido. Los efectos que participan en el transporte de las inclusiones son el diseño de los dispositivos ya mencionados para dirigir el flujo a la superficie y el uso de cortinas de gas. La inyección de gas se considera como un método efectivo para transportar inclusiones a la superficie del líquido. Esta técnica es comúnmente practicada en procesos de metalurgia secundaria ya que su aplicación, además de proveer de una área interfacial gas/líquido grande produciendo una alta probabilidad para el arrastre de las inclusiones, también lleva a cabo la homogenización de la temperatura, de la composición química del líquido y disolución de impurezas<sup>[8]</sup>.

En el presente trabajo se propone el estudio de la aplicación combinada de dos dispositivos. El primero, un inhibidor de turbulencia que funciona como una placa de impacto en el distribuidor, eliminando la turbulencia generada durante el vaciado de la artesa y obligando al acero a fluir de manera vertical y con dirección a la superficie. El segundo dispositivo es una cortina de gas ubicada dentro del distribuidor, la cual, además de funcionar como dispositivo modificador de flujo tiene la función de atrapar, transportar y dirigir a las inclusiones a la superficie del baño líquido.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Usando el número de Froude ( $Fr = \frac{v}{\sqrt{Lg}}$ ) como cri-

terio de diseño se construyó un modelo, en acrílico de 1 cm. de espesor, de un distribuidor de colada continua brasileño, a una escala de 2/5 de la escala real, con las dimensiones geométricas que se muestran en las figuras 1 a) y b). Los dispositivos modificadores de flujo son: un diseño propuesto de inhibidor de turbulencia (IT), cuyas dimensiones geométricas se muestran en la figura 2, y una cortina de gas, indicada en la figura 1. Para modelar la cortina de gas (aire) se utilizó una madera balsa de  $2,3 \times 2,3 \times 22$  cm. que es un material altamente poroso y, a la cual, se realizó un orificio en el centro, a lo largo de toda su longitud por donde se inyectó aire a través de un pequeño tubo con un diámetro de 0,2 cm. Se sellaron tres de sus cuatro caras longitudinales con silicona, generando, así, una cortina de burbujas uniforme sobre la cara restante. El flujo de gas utilizado fue de 596 ml/min y se midió mediante un rotámetro con una capacidad de 0 a 1.200 cm<sup>3</sup>/min. La madera se colocó dentro del distribuidor, en la posición inicial loca-

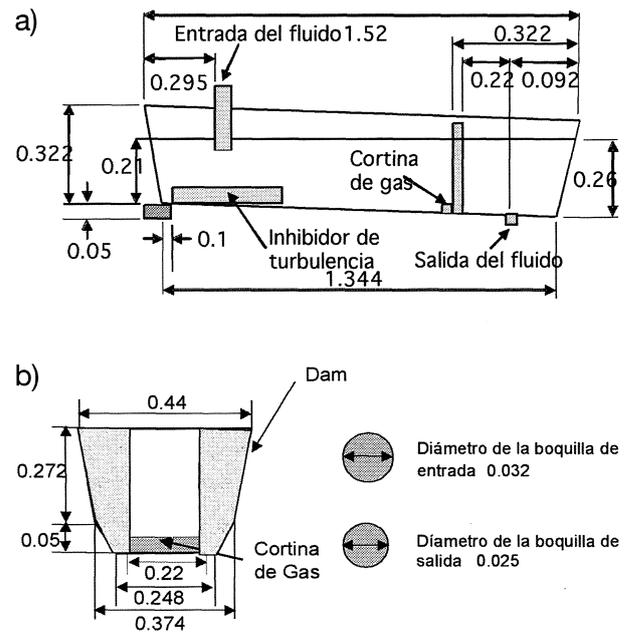


Figura 1. Dimensiones y forma geométrica del distribuidor (m). a) Vista longitudinal, b) Vista transversal.

Figure 1. Geometric dimensions of the tundish (m). a) longitudinal section, b) cross section.

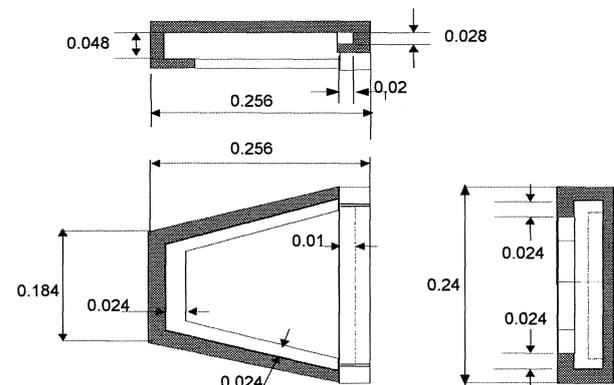


Figura 2. Dimensiones y forma geométrica del inhibidor de turbulencia (m).

Figure 2. Geometric dimensions of the turbulence inhibitor (m).

lizada a 22 cm antes de la boquilla de salida y fue movida 10 cm atrás (32 cm antes de la boquilla de salida) y 10 cm. adelante (12 cm. antes de la boquilla de salida) con el fin de determinar su posición más adecuada. Además, debido a la geometría del distribuidor fue necesario utilizar dos medios dams, mostrados en la figura 1, acoplados en cada extremo de la madera porosa, con la finalidad de lograr que todo el flujo del fluido fuese cubierto por la cortina de aire generada.

Las curvas de distribución de tiempos de residencia (RTD) para los casos de estudio mostrados en la tabla I se determinaron a través de la técnica típica estímulo-respuesta<sup>[9]</sup>, que consistió en la inyección de 20 cm<sup>3</sup> de solución natural roja trazadora, tomada de una solución original con concentración de 35g/l. La inyección se realizó en la boquilla de la artesa y la respuesta de esta señal o concentración de trazador se monitorizó en la salida del distribuidor, mediante el bombeo de la muestra hacia una celda de un espectrofotómetro. Los datos obtenidos se grabaron en una PC equipada con una tarjeta de adquisición de datos, permitiendo representar gráficamente los resultados en tiempo real. Todos los experimentos se realizaron bajo condiciones isotérmicas. El distribuidor opera, normalmente, con un flujo de acero de 3,12 t/min, equivalente a 45 l/min de agua, de acuerdo al criterio de Froude utilizado. Además, el flujo del fluido para cada prueba se monitorizó usando la técnica *particle image velocimetry* (PIV), que cuenta con un láser de frecuencia verde, de doble pulso de Nd:YAG, con una longitud de onda de 532 nm. La energía de salida del láser es de 20 mJ y es emitida en el rango de 6 a 10 nanosegundos, siendo incrementada hasta 500 mJ. La luz del láser fue movida en el plano deseado por medio de un posicionador con movimientos en tres dimensiones (3D) controlado por computadora para colocar la hoja láser en el plano axial simétrico del distribuidor. Con el fin de seguir el flujo del fluido se utilizaron partículas de poliamida, de 20 μm de diámetro, con una densidad de 1.030 Kg/m<sup>3</sup>. El plano de luz incidió sobre las partículas iluminándolas para las cámaras, las cuales siguieron la tra-

vectoria de estas en el fluido. Estas grabaciones se procesaron a través del software comercial Flow Map con el fin de obtener los vectores de velocidad y otros parámetros derivados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización del flujo del fluido

La importancia del apropiado flujo del fluido dentro del distribuidor de colada continua es ampliamente reconocida como un aspecto relevante para la producción de un acero limpio. Por ello, fue necesario determinar la calidad del flujo de fluido mediante el análisis de las curvas RTD. Los datos obtenidos para cada experimento con solución trazadora se representaron gráficamente usando concentraciones y tiempos adimensionales, que se definen como:

$$C = \frac{C_i}{(Q)} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad (2)$$

siendo  $Q$ , el área bajo la curva concentración-tiempo (cantidad de trazador que sale del distribuidor en la boquilla de análisis) y  $\bar{t}$  el tiempo medio de residencia, que están dados por:

$$Q = \int_0^\infty C dt = 1 \quad (3)$$

$$\int_0^\infty \frac{C}{Q} dt = 1 \quad (4)$$

$$\bar{t} = \frac{\sum C_i t_i}{\sum C_i} \quad (5)$$

donde,  $C$  es la concentración del trazador y  $t$  es el tiempo.

De los datos obtenidos de las curvas de distribución de tiempo de residencia se determinaron las características de flujo<sup>[9]</sup> que se muestran en la tabla II para cada caso de estudio, en términos porcentuales de volumen muerto, volumen pistón y mezcla mediante las siguientes expresiones:

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \int_0^2 C d\theta \frac{C \theta d\theta}{\int_0^2 C d\theta} \quad (6)$$

$$\int_0^{\frac{VP}{V}} C d\theta = 0,01 \quad (7)$$

Tabla I. Casos estudiados

Table I. Studied cases

Caso	Modificaciones de flujo	Posición de la cortina antes de la boquilla de salida (cm.)
I	Inhibidor, dams, cortina	22
II	Inhibidor, dams	
III	Dams, cortina	22
IV		
V	Inhibidor, dams, cortina	32
VI	Dams, cortina	32
VII	Inhibidor, dams, cortina	12
VIII	Dams, cortina	12

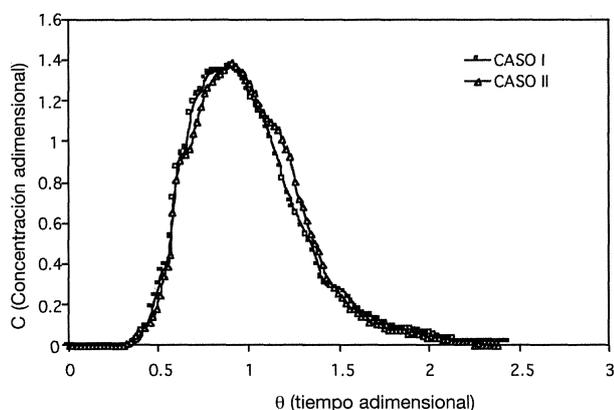
**Tabla II.** Características de flujo

*Table II. Flow characteristics*

Caso	% Volumen pistón	% Volumen mezclado	% Volumen muerto	Tiempo mínimo de residencia (s)
I	47,43	49,89	2,67	51
II	45,37	53,40	1,22	46
III	32,48	58,48	9,04	27
IV	20,78	65,45	13,77	21
V	45,47	53,15	1,38	48
VI	25,77	60,33	13,89	27
VII	48,18	50,89	0,92	51
VIII	27,76	58,73	13,51	27

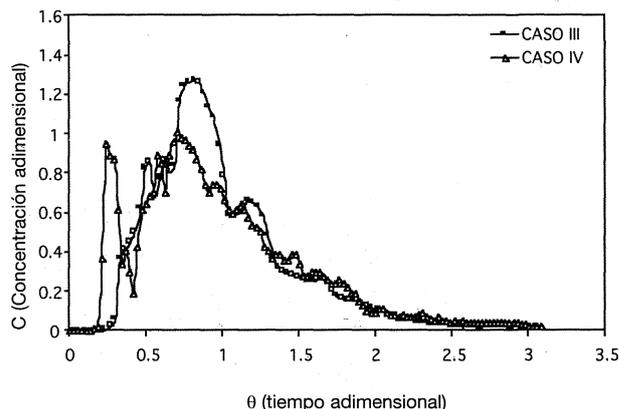
$$\frac{V_m}{V} = 1 - \frac{V_p}{V} - \frac{V_d}{V} \quad (8)$$

La figura 3 muestra las curvas de distribución de tiempos de residencia para los casos I y II, y la figura 4 las correspondientes para los casos III y IV; en los cuatro casos, la posición de la cortina de aire se encuentra a 22 cm antes de la boquilla de salida. El caso IV corresponde al distribuidor vacío (sin accesorios), el cual se evaluó solo para tomarse como referencia respecto a los demás casos, con el fin de determinar el impacto de cada dispositivo, de forma individual y combinada, sobre el flujo del fluido. Las figuras 5 y 6 muestran las curvas RTD para los casos V y VI (posición de la cortina, 32 cm atrás de la boquilla de salida), y VII y VIII (posición de la cortina, 12 cm atrás de la bo-



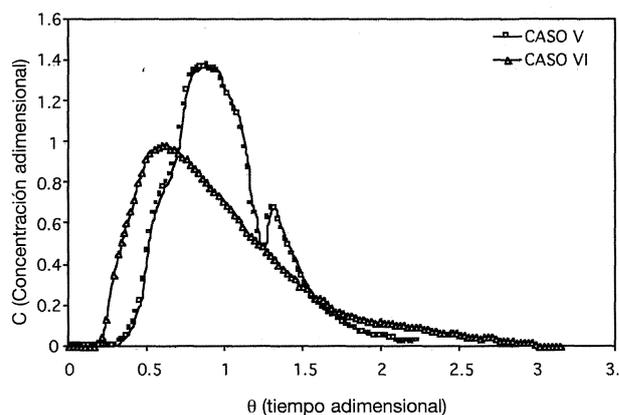
**Figura 3.** Curvas de distribución de tiempos de residencia para los casos I, y II.

*Figure 3. Residence time distribution curves for the cases I and II.*



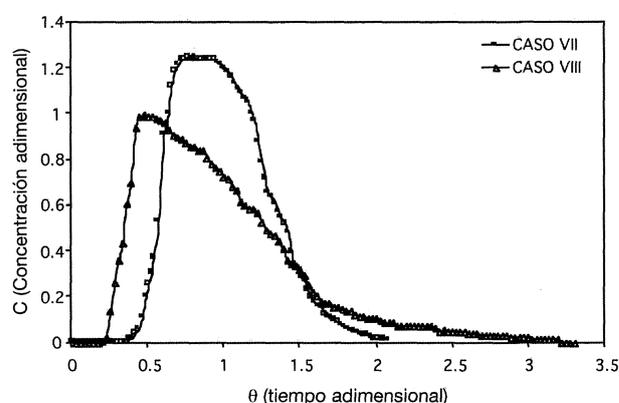
**Figura 4.** Curvas de distribución de tiempos de residencia para los casos III y IV.

*Figure 4. Residence time distribution curves for the cases III and IV.*



**Figura 5.** Curvas de distribución de tiempos de residencia para los casos V y VI.

*Figure 5. Residence time distribution curves for the cases V and VI.*



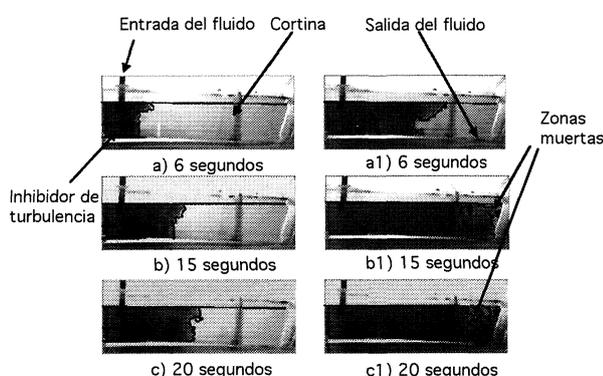
**Figura 6.** Curvas de distribución de tiempos de residencia para los casos VII y VIII.

*Figure 6. Residence time distribution curves for the cases VII and VIII.*

quilla de salida), respectivamente. Los casos I, II, V y VII, de las figuras 3, 5 y 6, presentan un comportamiento muy similar en cuanto a amplitud y características de las curvas, independientemente del uso o no de la cortina de gas. De lo anterior, se observa que quien marca un cambio en el comportamiento del flujo del fluido dentro del distribuidor es el uso del inhibidor de turbulencia (IT).

La figura 7 muestra las imágenes digitalizadas de los perfiles de concentración obtenidos de los experimentos correspondientes a los casos I y IV con fines de comparación, a diferentes tiempos, después de haberse inyectado el trazador. El caso I corresponde al distribuidor equipado con el inhibidor de turbulencia y la cortina de gas, en la posición a 22 cm antes de la boquilla de salida y el caso IV corresponde al distribuidor vacío. Se puede notar la diferencia en el comportamiento del perfil de concentración del flujo del fluido que existe en ambos casos, el cual tiende a ser pistón con el uso del inhibidor de turbulencia, disminuyendo las zonas muertas (Figs. 7 a), b) y c)) y aumentando los tiempos de residencia, lo que es beneficioso, ya que se provoca que las inclusiones no metálicas tengan mas tiempo para alcanzar la superficie del baño. También, se puede observar la enorme turbulencia que se genera sin el uso del inhibidor así como zonas muertas en la parte superior derecha del distribuidor (Figs. 7 a1), b1) y c1)) y canalizaciones en la parte central antes de la boquilla de salida, condiciones desfavorables para el desempeño del distribuidor.

A mayor volumen pistón existe un mejor desempeño del sistema para mejorar la calidad del acero, debido a la eliminación de inclusiones no metálicas<sup>[2, 6, y 10]</sup>, y se puede apreciar, en la tabla



**Figura 7.** Imágenes de video de la dispersión del trazador in el flujo para: a, b y c, caso I; y a1, b1 y c1, caso IV.

*Figure 7. Video images of the tracer dispersion in the flow for: a, b and c case I; and a1, b1 and c1, case IV.*

II, que el caso que presentó los mejores resultados en este aspecto es el caso VII, con 48,18 %, seguido del caso I, con 47,43 %, caso V, con 45,47 % y caso II, con 45,37 %. También, se observa que el caso que presenta el resultado menos deseado es el IV, con 20,78 %, el cual corresponde al distribuidor vacío.

El comportamiento anterior se pudo explicar, debido a que solo con el uso del inhibidor de turbulencia se aumenta un 118,3 % el volumen pistón, con respecto al distribuidor vacío, y se debe a que la función principal de este dispositivo es la de eliminar la turbulencia y obligar al fluido a fluir de manera vertical y pausada, como se observa en la figura 7 a), b) y c). Este comportamiento del flujo promueve un mejor desempeño del sistema.

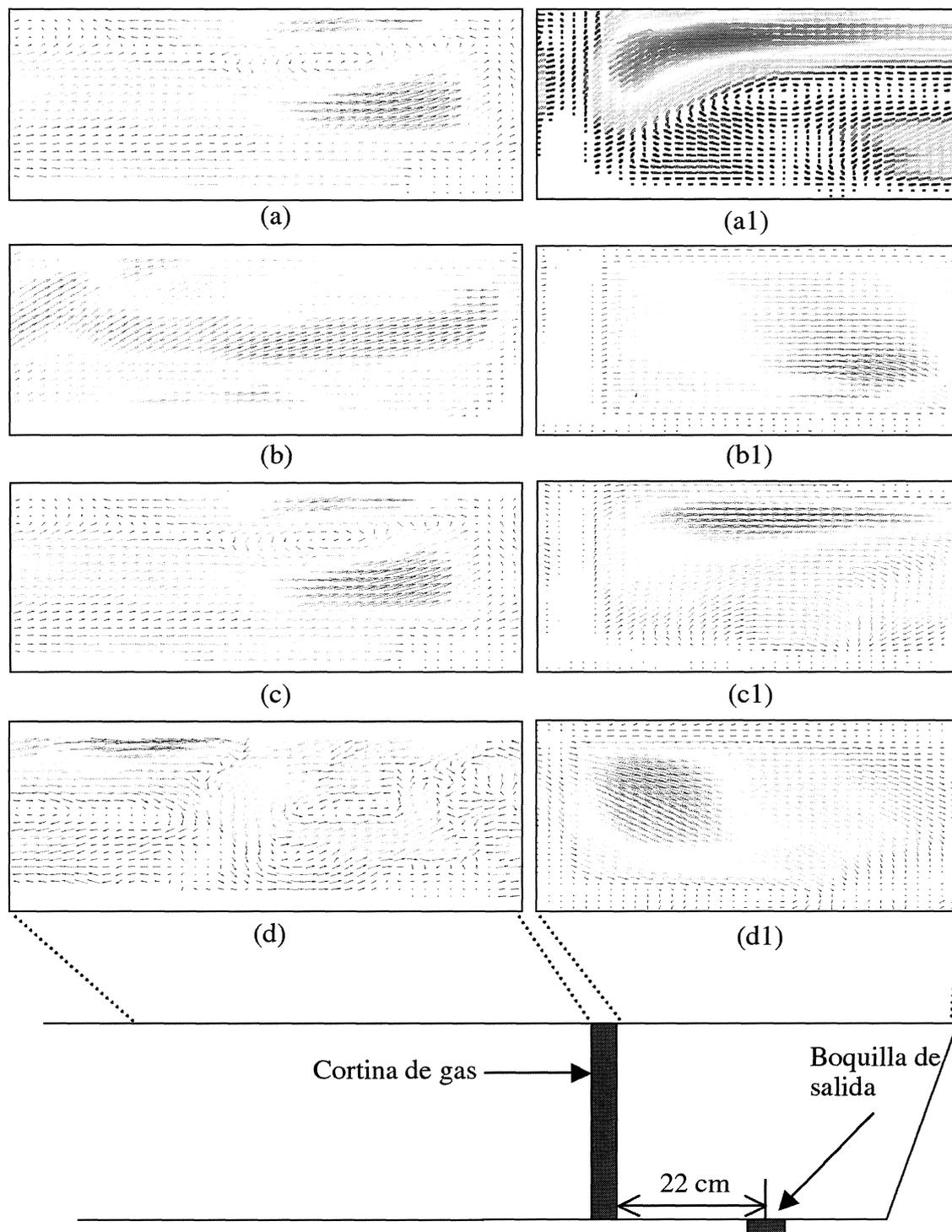
El uso individual de la cortina de gas (caso III) incrementa el volumen pistón solo un 56,3 % (Tabla II) con respecto al distribuidor vacío (caso IV), lo que no es muy significativo e indica que el uso combinado de ambos sistemas (caso VII) aumenta el volumen pistón un 131,85 %, comportamiento que, de igual manera, favorece el desempeño del distribuidor. Por otro lado, para lograr una máxima eliminación de inclusiones no metálicas se deben obtener los más altos tiempos mínimos de residencia y se puede observar, nuevamente en la Tabla II, que los casos que presentan esta característica son el I y VII (51 s), el V (48 s), el II (46 s) y el más bajo de los siete casos, el IV (21 s). De lo anterior, se tiene que el uso de la cortina de gas aumenta el tiempo mínimo de residencia, retardando la salida del flujo (Figs. 7 a), b) y c)), aspecto que también favorece la eliminación de inclusiones ya que se proporciona el mayor tiempo para que estas puedan flotar o ser captadas por la escoria<sup>[11]</sup>.

Por otra parte, la reducción del volumen muerto a un mínimo porcentaje es el objetivo de cualquier diseño de distribuidor para optimizar su desempeño general. De esta forma, y basándose en los resultados obtenidos de la caracterización del flujo del fluido, se tiene que el uso combinado del inhibidor de turbulencia y de la cortina de gas colocada a 12 cm antes de la boquilla de salida (caso VII) lo reduce hasta 0,92 %, lo que representa un 6,68 % del volumen muerto obtenido en comparación al distribuidor vacío. Del análisis de las curvas RTD, se tiene que el caso que presenta los mejores resultados corresponde al caso VII, con 48,18 % de volumen pistón, 0,92 % de volumen muerto y 51 s de tiempo mínimo de residencia, y que corresponde al uso del inhibidor de turbulencia y la cortina de gas colocada a 12 cm antes de la boquilla de salida.

### 3.2. Resultados de la técnica *Particle Image Velocimetry* (PIV)

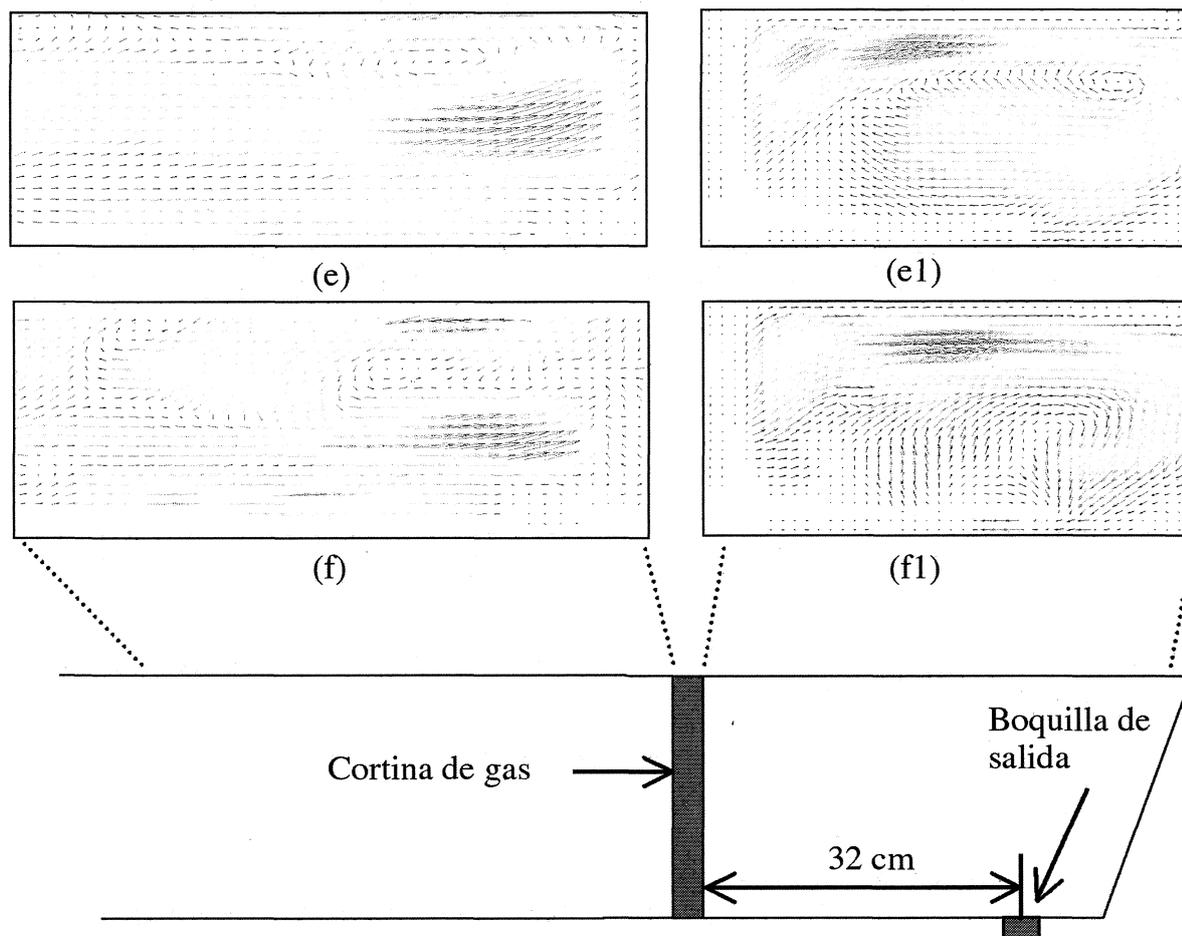
Las figuras 8, 9 y 10 muestran los perfiles de velocidad para cada caso de estudio en la posición lo-

calizada antes (a, b, c, d, e, f, g y h) y después (a1, b1, c1, d1, e1, f1, g1 y h1) de la cortina de aire. La figura 8 muestra los perfiles de velocidad promedio en la zona localizada, antes y después de la cortina de gas (aire), para los casos I, II, III y IV, los



**Figura 8.** Perfiles de velocidad promedio para: a) caso I, b) caso II, c) caso III, y d) caso IV (posición de la cortina de gas, 22 cm antes de la boquilla de salida).

Figure 8. Average velocity fields for: a) case I, b) case II, c) case III, and d) case IV (position of the gas curtain to 22 cm before the nozzle outlet).



**Figura 9.** Perfiles de velocidad promedio para: e) caso V y f) caso VI (posición de la cortina de gas, 32 cm antes de la boquilla de salida).

*Figure 9.* Average velocity fields for: e) case V, f) case VI (position of the gas curtain to 32 cm before the nozzle outlet).

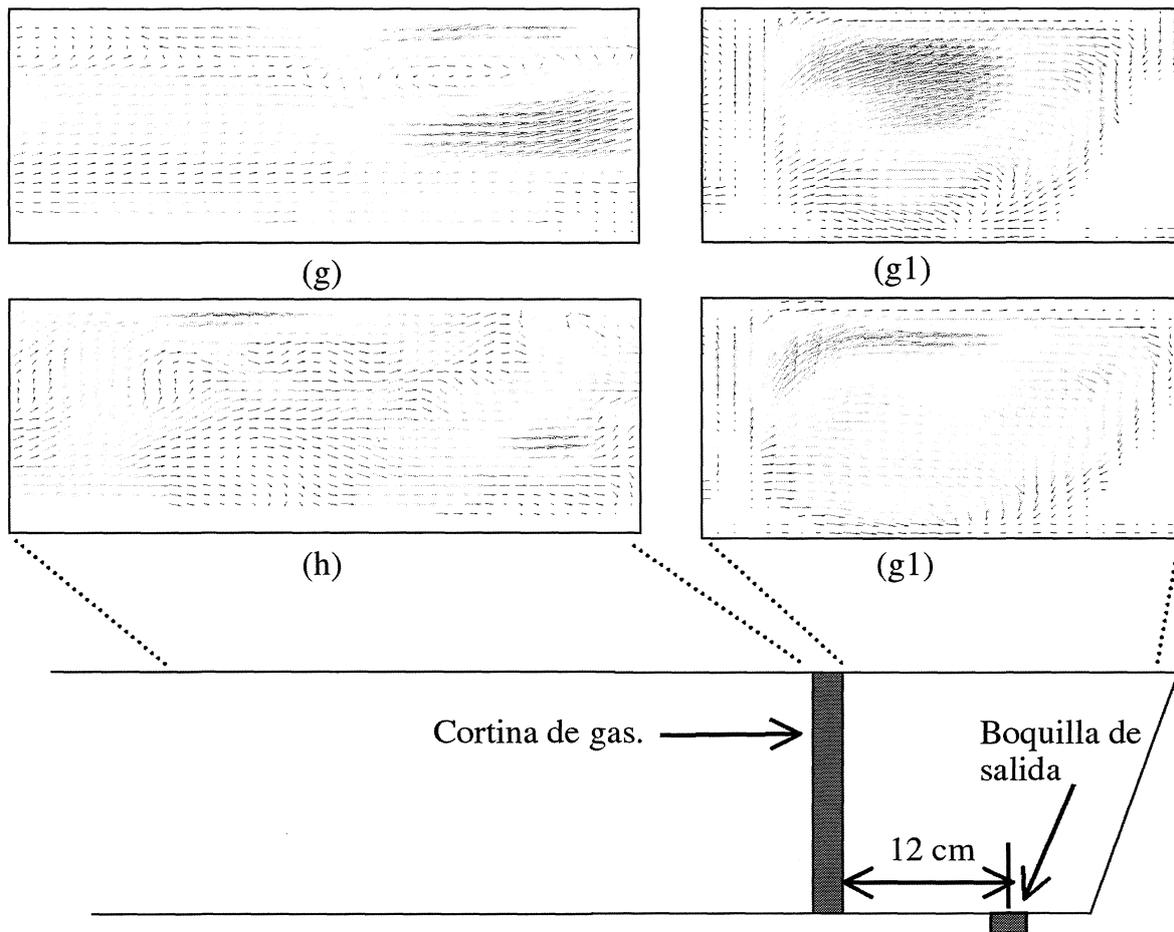
cuales corresponden a la posición en la cual la cortina de gas esta ubicada 22 cm antes de la boquilla de salida. La figura 9 muestra los casos V y VI, que corresponden a la posición de la cortina de gas a 32 cm antes de la boquilla de salida, y la figura 10 muestra los perfiles de velocidad de los casos VII y VIII en la posición de la cortina a 12 cm antes de la boquilla de salida.

Los perfiles de velocidad promedio para el flujo del fluido, obtenidos para cada caso de estudio mediante la técnica PIV, muestran la influencia del uso del inhibidor de turbulencia y de la cortina de gas. Se puede apreciar en la figura 8 a), (caso I), que el comportamiento del flujo con el uso de la cortina provoca recirculación en la parte superior antes de la cortina y aumenta la velocidad del flujo en la parte superior (Fig. 11), después de ésta. Este efecto no provoca una disminución del flujo pistón ya que el flujo no se desordena completamente y sigue manteniendo el mismo patrón proporcional

do por el inhibidor de turbulencia. Esto, se puede apreciar claramente en la figura 8 b), (caso II), en la cual se observa un patrón de flujo representado por los vectores de velocidad, completamente ordenado a lo largo de toda la longitud del distribuidor.

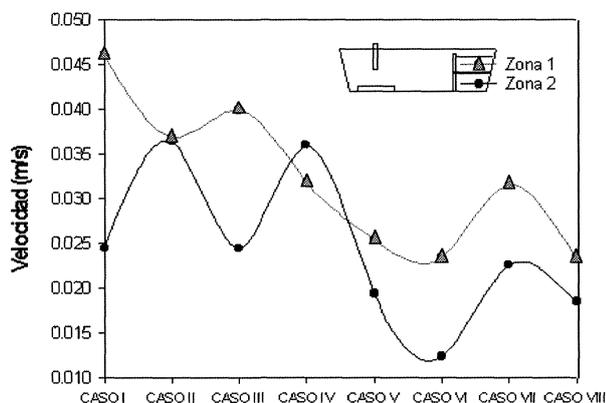
El volumen pistón mostrado en la tabla II para los casos I, II, V y VII es muy similar; sin embargo, se puede apreciar que el uso y posición de la cortina de gas puede aumentarlo por la velocidad que proporciona en la parte superior. Este efecto se puede observar en la figura 11, la cual muestra un análisis del efecto que provoca la cortina de gas sobre la velocidad promedio del flujo del fluido en la sección localizada después de la cortina de gas para las diferentes posiciones de ella.

El uso de la cortina de gas para los casos I, III, V y VII provoca un incremento en la velocidad superficial del flujo y se reduce cuando no se usa este dispositivo como se observa en la figura 9 e) (caso



**Figura 10.** Perfiles de velocidad promedio para: g) caso VII y h) caso VIII (posición de la cortina de gas, 12 cm antes de la boquilla de salida).

Figure 10. Average velocity fields for: g) case VII, h) case VIII (position of the gas curtain to 12 cm before the nozzle outlet).



**Figura 11.** Velocidades promedio obtenidas en la zona localizada después de la cortina de aire para cada caso de estudio.

Figure 11. Obtained average speeds in the zone located after the air curtain for each case of study.

V) y figura 10 g) (caso VII), a pesar de provocar recirculación del flujo en la parte superior, antes y después de ella. De acuerdo a los resultados obtenidos de los mapas de vectores de velocidad, para el caso VII, mostrados en la figura 11, se concluye que la velocidad es de 0,030 m/s para la zona ubicada después de la cortina de gas.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el flujo del fluido en un distribuidor de colada continua, construido a 2/5 de la escala real, equipado con un dispositivo modificador de flujo, el cual es un diseño propuesto de inhibidor de turbulencia y de una cortina de gas, utilizando la modelación física. Las principales conclusiones derivadas de este estudio son las siguientes:

- El inhibidor de turbulencia, de manera aislada, cumple con la función de dirigir el flujo de manera vertical y con dirección a la superficie, minimizando la turbulencia en la superficie del baño, aumentando el tiempo de residencia del flujo en el distribuidor e incrementando el flujo pistón de manera considerable.
- La cortina de gas incrementa el volumen pistón un 56,3 % (caso III) con respecto al distribuidor vacío. El uso individual de este dispositivo no es suficiente para obtener una buena calidad del flujo del fluido.
- La cortina de gas aumenta el flujo pistón a medida que su posición es más cercana a la boquilla de salida. La posición adecuada para la cortina es, a 12 cm de ésta en cuanto a calidad de flujo.
- Con el uso combinado (caso VII) de la cortina de gas (posición, a 12 cm. antes de la boquilla de salida) y el inhibidor de turbulencia se obtiene el más alto flujo pistón (48,18 %) y el más bajo volumen muerto (0,92 %).

### Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por el soporte financiero para este trabajo y al IPN, por el apoyo para la realización de las actividades de modelación física.

### REFERENCIAS

- [1] R.D. MORALES-DÁVILA, J. DE J. BARRETO, S. LÓPEZ-RAMÍREZ, J. PALAFOX-RAMOS Y D. ZACHARIAS, *Mater. Metall. Trans. B* 31 (2000) 1.505-1.515.
- [2] J. PALAFOX-RAMOS, J. DE J. BARRETO, S. LÓPEZ-RAMÍREZ Y R.D. MORALES, *Ironmaking Steelmaking* 28 (2001) 101-109.
- [3] S. LÓPEZ-RAMÍREZ, J. DE J. BARRETO, J. PALAFOX-RAMOS, R.D. MORALES, Y D. ZACHARIAS, *Mater. Metall. Trans. B* 32 (2001) 1.615-1.627.
- [4] CH.M. FAN Y W.S. HWANG, *ISIJ Int.* 40 (2000) 1.105-1.114
- [5] L. ZHANG, S. TANIGUCHI Y K. CAI, *Mater. Metall. Trans. B* 30 (1999).
- [6] S. LÓPEZ-RAMÍREZ, *Tesis Doctoral*, IPN, 2000.
- [7] A. RAMOS-BANDERAS, R.D. MORALES, L. GARCÍA-DEMÉDICES Y M. DÍAZ-CRUZ, *ISIJ Int.* 43 (2003) 653-662.
- [8] L. ZHANG Y S. TANIGUCHI, *Int. Mater. Rev.* 45 (2000) 59-81.
- [9] O. LEVENSPIEL, *Ingeniería de las reacciones químicas*, Ed. Reverté, España, 1979.
- [10] J. SEKELI, *The Mathematical and Physical Modelling of Metals Processing Operations*, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 02139 Massachusetts.
- [11] A. CRUZ-RAMÍREZ, J.F. CHAVEZ-ALCALÁ Y J.A. ROMERO, *Rev. Metal. Madrid* 40 (2004) 39-45.