

jifi-eai 2012



Jornadas de Investigación | Encuentro Académico Industrial

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA

26 - 30 noviembre 2012

## FLUJO DE FLUIDO EN UN MOLDE DE COLADA CONTINUA DE PLANCHÓN DE ACERO

Ruth Bisbal<sup>1\*</sup>, Rodolfo Morales<sup>2</sup>, Jorge Palafox<sup>2</sup>, Alejandro Sandoval<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela

<sup>2</sup> Escuela Superior de Industrias Químicas y Extractivas (ESIQIE), Instituto Politécnico Nacional, México

\*bisbalr@gmail.com

### RESUMEN

Con el tiempo el nivel de requerimientos de calidad de los productos colados de acero se ha incrementado, por lo que la comprensión de las características del flujo de fluido en el molde de colada continua reviste particular importancia. El flujo de fluido en el molde de colada continua de aceros puede llegar a ser muy complejo, afectando considerablemente la calidad del producto final. Diversos trabajos acerca de los fenómenos del flujo de fluido se han realizado desde hace tiempo, en los que se han utilizado modelos físicos de agua del molde y de la buza sumergida, y éstos han dado resultados satisfactorios, permitiendo la comprensión básica de los fenómenos del flujo de fluido en el molde de colada continua. En este trabajo se estudió el comportamiento del flujo de fluido, bajo la influencia de una buza sumergida, en un molde de colada continua de planchón de acero, utilizando un modelo físico de agua fabricado en material plástico transparente. A fin de obtener los campos de velocidades desarrollados por el flujo en el molde se utilizó la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV). Durante los experimentos se observó la formación de flujos de recirculación alrededor de los puertos de la buza sumergida. El diseño de la buza es una característica importante que influye en el comportamiento del flujo de fluido, debido al control que ejerce sobre el flujo que sale por los puertos de ésta.

*Palabras Clave:* Flujo de fluido, PIV, molde, colada continua, planchón.

### ABSTRACT

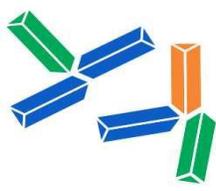
Over time, quality requirements for cast steel products have increased. For this reason, an understanding of the characteristics of molten steel flow in continuous casting molds is particularly important. The steel flow in continuous casting molds can be very complex, considerably affecting the quality of the final product. Several successful studies on the fluid flow phenomena have been made for some time, in which physical models of the mold and the ladle shroud have been used with flowing water, allowing for basic understanding of the phenomena of fluid flow in the strand casting mold. In this work, the behavior of the fluid under the influence of a submerged entry nozzle in a continuous casting mold for steel slabs was studied, using a transparent plastic material physical model with water. Particle Image Velocimetry (PIV) was used to obtain the velocity fields developed by the flow within the mold. During the experiments, swirling flow formation around the submerged entry nozzle outlet ports was observed. The nozzle design is an important feature that influences the fluid flow behavior, due to the control that it exercises over the flow that exits the ports.

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS. Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Tel.: +58 212-605 1644 / 1645. Telfax: +58 212 - 6628927

Correo electrónico: jifi.eai.2012.ucv@gmail.com <http://www.ing.ucv.ve>



jifi-eai 2012



Jornadas de Investigación Encuentro Académico Industrial

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA

26 - 30 noviembre 2012

*Keywords: Fluid flow, PIV, mold, continuous casting, slab.*

## INTRODUCCIÓN

El proceso de colada continua es usado para obtener la mayor parte de las toneladas de acero producidas en el mundo. La viabilidad de la industria del acero depende del incremento de la eficiencia en la productividad y de la calidad del acero. La investigación innovadora y la experiencia han ayudado a resolver problemas y a optimizar el proceso en una gran extensión. Sin embargo, en la colada continua de acero aún persisten muchos problemas asociados con el flujo de acero líquido y con la turbulencia, siendo éstos la principal fuente de defectos en los productos.<sup>[1]</sup> El flujo de fluido interviene en el flujo turbulento y transitorio a través de la buza sumergida, en el transporte de inclusiones a través del acero líquido, en las fluctuaciones transitorias, en las ondas en la superficie, etc. Estos factores pueden provocar la formación de serios defectos en el producto final.<sup>[2]</sup> Por su parte, el fenómeno de flujo de fluido en moldes de planchón delgado<sup>[3,4]</sup> ha sido objeto de estudio en los últimos años. Estos moldes tienen una cavidad en forma de embudo para que la buza pueda ser sumergida dentro de él. Todos los problemas antes referidos llegan a ser más influyentes en la calidad del acero cuando se usa este tipo de moldes, porque se utilizan velocidades de colada más altas y esto hace que el flujo turbulento se incremente dentro de la cavidad. De igual modo es importante tomar en consideración el diseño de una buza que libere el metal de la manera más controlada posible dentro del molde. La buza sumergida tiene como funciones principales proteger el acero fundido de la reoxidación en la medida en que el acero es liberado desde el distribuidor hacia el molde y regular a su vez el flujo de acero en el molde. Por lo cual, el diseño de la buza sumergida desempeña un papel importante en la calidad del acero debido a su influencia en el patrón de flujo que se desarrolla dentro del molde.<sup>[5]</sup> Muchos investigadores han considerado que los modelos físicos de agua pueden modelar muy bien el flujo de acero en el molde de colada continua (la viscosidad cinemática del acero y del agua son muy parecidas<sup>[6,7]</sup>) sin dejar de mencionar que una de las ventajas de un modelo de agua es que sus paredes transparentes permiten la penetración de la luz láser. Esto último hace posible el uso de técnicas como la Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV por sus siglas en inglés).<sup>[8,9]</sup> En este trabajo se presenta un estudio acerca del comportamiento del flujo de fluido bajo la influencia del diseño de una buza sumergida en el molde de colada continua de planchón delgado, utilizando un modelo físico de agua del molde y una buza sumergida, a escala real.

## METODOLOGÍA

Para realizar los experimentos se utilizó un modelo de agua, a escala 1:1, fabricado en material plástico transparente, para representar un molde de colada continua de planchón delgado. La figura 1 muestra un esquema del molde y sus dimensiones. El diseño del molde utilizado difiere de los moldes usados en la colada convencional de planchón en que la parte superior del molde tiene una cavidad en forma de embudo para permitir que la buza pueda ser sumergida dentro del molde. El molde fabricado tiene las siguientes dimensiones: 1670 mm de ancho y 1000 mm de altura, y una sección transversal de 50 mm de espesor.

**SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.** Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Telf.: +58 212-605 1644 / 1645. Telfax: +58 212 - 6628927

Correo electrónico: jifi.eai.2012.ucv@gmail.com <http://www.ing.ucv.ve>

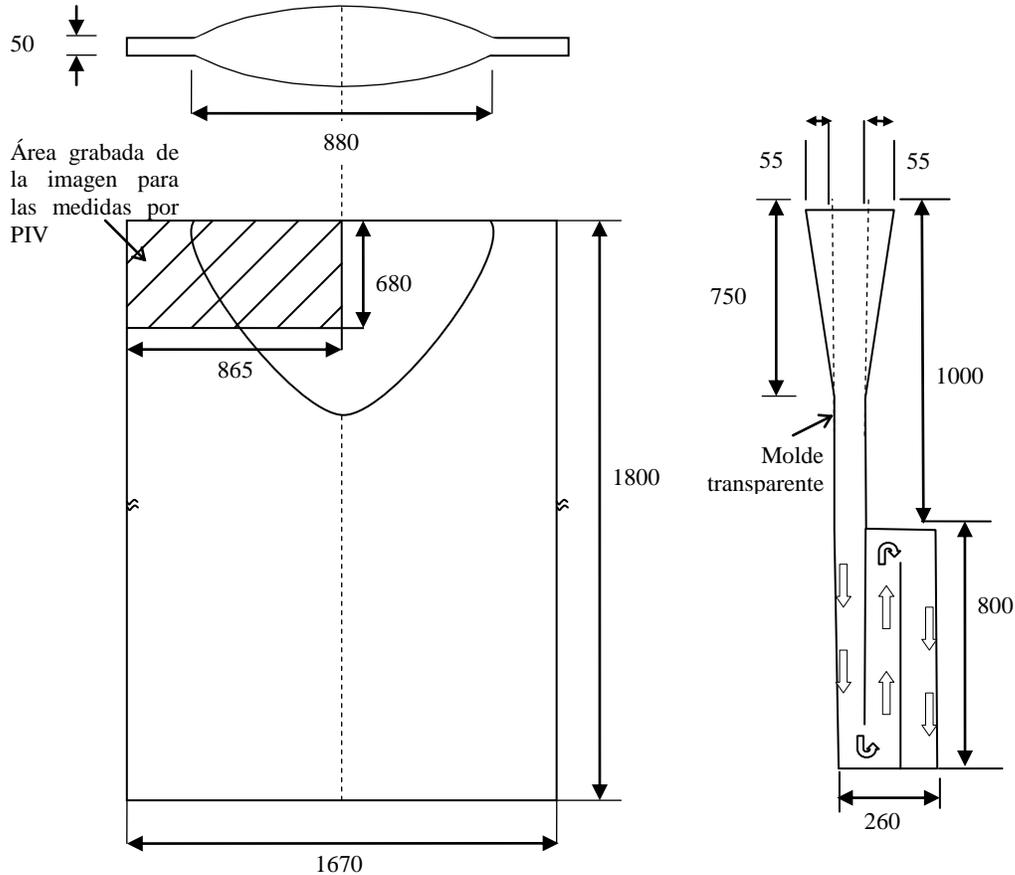
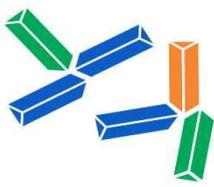


Figura 1. Esquema del molde utilizado. Dimensiones en mm.

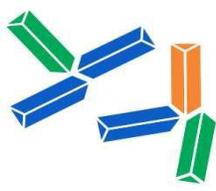
En la figura 2 se muestra el diseño de la buza sumergida utilizada en los experimentos. Esta buza también se fabricó a escala 1:1, en material plástico transparente. La buza utilizada tiene cuatro puertos: dos puertos laterales y dos puertos en el fondo, a través de los cuales el fluido es descargado en el molde.

Para la construcción del molde transparente se tomó en cuenta el número de Froude (ecuación 1) como criterio de diseño, el cual se cumple en el arreglo experimental utilizado. El número de Froude es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de la gravedad, y se define como:

$$Fr = \frac{v^2}{gL} \quad (1)$$

donde  $v$  es la velocidad promedio del fluido dentro del molde,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $L$  es una longitud característica del sistema, por ejemplo la longitud.<sup>[10]</sup>

Para el caso de flujo de acero en el molde de colada continua donde el flujo es promovido por gravedad (es decir, es un chorro vaciado), es importante considerar además de la similitud



geométrica, que el número de Froude de ambos sistemas, modelo de agua y molde real, debe ser igual. La simulación física del flujo de acero líquido con modelos de agua se basa en el simple hecho de que la viscosidad cinemática de ambos fluidos es muy parecida:  $0,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  para el acero y  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  para el agua,<sup>[10]</sup> y que tanto en el modelo de agua como en el molde real la temperatura es constante. El flujo de agua utilizado para todos los experimentos fue de 300 L/min, lo cual equivale a una velocidad de colada de 3,6 m/min. Se utilizó la técnica PIV para determinar los vectores de velocidad. Los componentes del sistema diseñado para obtener medidas instantáneas del campo de velocidades utilizando la técnica PIV son los siguientes: Láser PIV (sistema de iluminación), cámara CCD, procesador FlowMap (incluye: unidades de correlación, interfaz de entrada y unidad de sincronización) y el software FlowManager versión 3.12.<sup>[11,12]</sup>

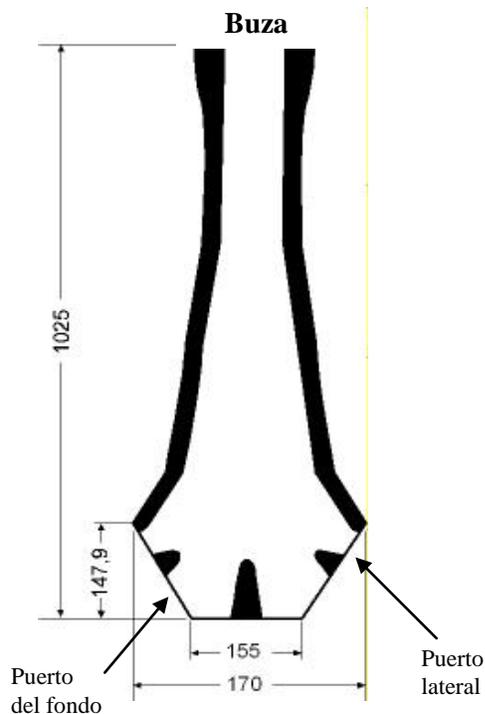


Figura 2. Esquema de la buza utilizada en los experimentos. Dimensiones en mm.

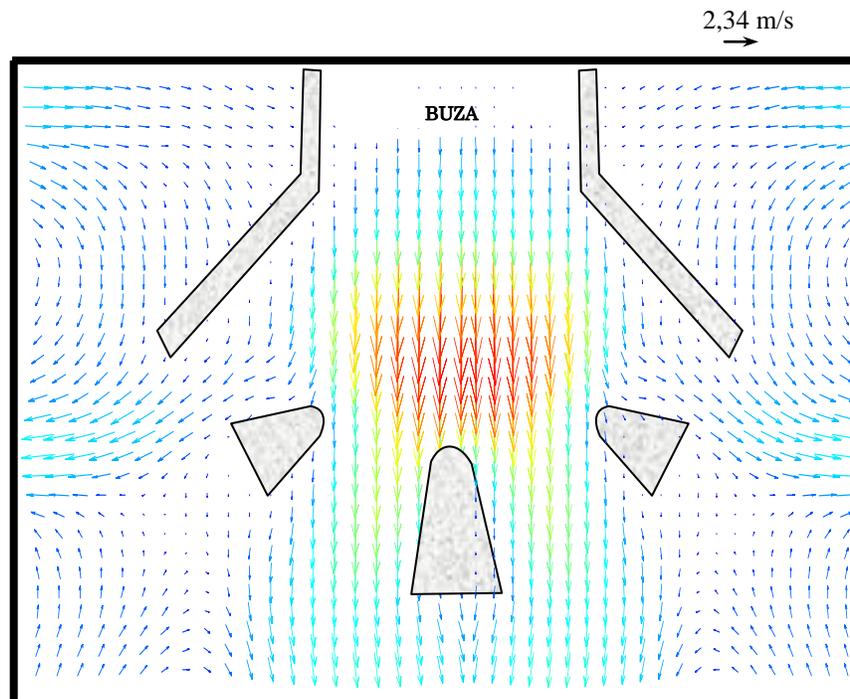
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Campo de velocidades dentro de la buza*

La figura 1 muestra el campo de velocidades promedio del fluido que se desarrolla en el interior de la buza para un nivel de agua de 870 mm medido desde la base del molde. El fluido que entra en la buza se caracteriza por tener un perfil de velocidades plano, pero una vez que alcanza la región central de ésta, el fluido se acelera marcadamente incrementando su velocidad, y por tanto, su energía cinética. Sin embargo, el fluido se desacelera al incidir directamente contra el elemento (obstáculo) central de la buza, y la velocidad va disminuyendo progresivamente

conforme el fluido va saliendo a través de los puertos del fondo. De igual modo, la energía cinética del fluido en la buza se va disipando en la medida que va disminuyendo la velocidad. No obstante, una vez que el fluido sale de la buza a través de los puertos del fondo, su velocidad tiende a incrementarse para dar origen a un flujo que recircula en el fondo del molde.

Se observa que las velocidades del fluido que sale a través de los puertos laterales son menores. Sin embargo, en la medida que el fluido sale de los puertos laterales la velocidad también se incrementa fuera de la buza. Es de hacer notar que el área de salida de la sección transversal de cada puerto lateral ( $1.484 \text{ mm}^2$ ) es más pequeña que el área de salida de cada puerto del fondo ( $2.802 \text{ mm}^2$ ).

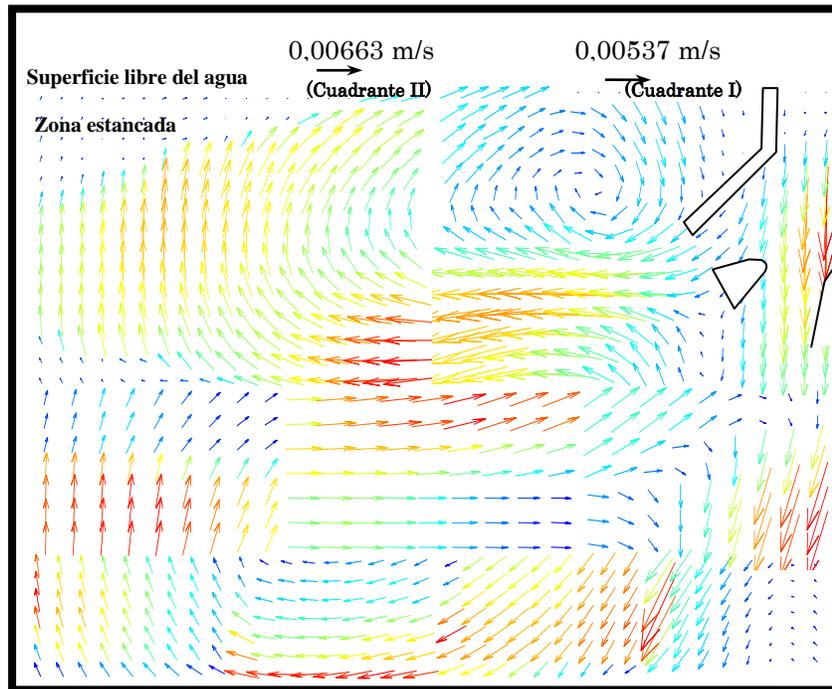


**Figura 1.** Medidas por PIV del campo de velocidades dentro de la buza sumergida.

Del análisis de los campos de velocidades desarrollados dentro de la buza se puede afirmar que con este diseño de buza se logran obtener mayores velocidades del fluido hacia los puertos del fondo, y se observa que el fluido sale de la buza como en caída libre a través de éstos puertos.

#### *Campo de velocidades promedio*

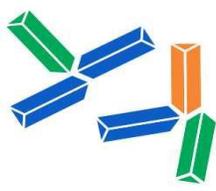
La figura 2 muestra el campo de velocidades promedio obtenido por la técnica PIV, en el que se observa la formación de un patrón de flujo que recircula en el sentido de las agujas del reloj delante del puerto lateral de la buza. El fluido sale del puerto lateral y desarrolla velocidades más altas, y se dirige hacia la pared estrecha del molde para formar un flujo que recircula y asciende a través de la pared estrecha, luego se dirige hacia la buza y a lo largo de la superficie libre del agua. Por otra parte, a la salida del puerto del fondo, el fluido incrementa su velocidad, y se forma otro flujo en el fondo que recircula en el sentido de las agujas del reloj que choca con la pared estrecha del molde, y después vuelve hacia la corriente del fluido por debajo de la buza.



**Figura 2.** Medidas por PIV del campo de velocidades alrededor de la buza sumergida.

Es notable además, la formación de una zona estancada cercana a la esquina superior del molde. En condiciones reales, en el molde de colada continua no es conveniente la presencia de zonas estancadas en la superficie libre, pareciera que este diseño de buza no ofrece las mejores condiciones para controlar la dinámica del flujo. En el molde conviene el desarrollo de condiciones de mezclado lo más homogéneas posibles, que favorezcan la transferencia de calor en esa zona del molde. Resultados similares a éste también fueron encontrados por Morales *et al.*<sup>[9]</sup> en su investigación en modelos de agua de moldes de planchón delgado. En su estudio observaron una zona estancada en la esquina superior del molde y pequeñas oscilaciones del nivel cuando trabajaron con la buza sumergida en una posición profunda. Ellos afirman que esta situación si bien es de beneficio para mantener la superficie del baño con mínima turbulencia, en ese punto crítico puede acarrear problemas debido a una ineficiente transferencia de calor convectiva que puede llegar a promover el crecimiento excesivo de una capa sólida en el menisco en los moldes de colada continua reales. Igualmente, Odenthal *et al.*<sup>[8]</sup> reafirman que es necesario que exista movimiento del fluido en el nivel del baño en el molde para compensar la pérdida de calor encima de la superficie libre y asegurar la fusión del polvo de colada.

En los campos de velocidades desarrollados con la buza para el nivel de agua utilizado, se observa que esta buza regula el flujo a través de los puertos del fondo, que son sus puertos principales. Con este diseño de buza sumergida se forma una zona estancada en la esquina superior del molde debido a que no se desarrollan velocidades de suficiente magnitud en los chorros que emergen de los puertos de la buza, que logren alcanzar la esquina del molde y así evitar la presencia de esta zona.



### CONCLUSIONES

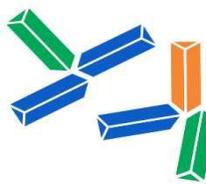
Los campos de velocidades promedio obtenidos por la técnica PIV permitieron conocer importantes características del flujo de fluido estudiado. En el molde se forman dominios de flujo que recirculan y que pueden dar origen a fluctuaciones en la superficie libre. La extensión y magnitud de estos flujos recirculatorios depende del diseño de la buza sumergida, y seguramente del nivel de agua utilizado.

La buza utilizada trabaja principalmente a través de los puertos del fondo, originando flujos grandes que recirculan en el fondo del molde. Con el diseño de esta buza se desarrollan patrones de flujo que recirculan hacia la superficie libre, encontrándose una zona estancada y regiones de baja velocidad hacia la esquina superior del molde, donde se alcanza una velocidad promedio de 0,00663 m/s.

Es necesario continuar desarrollando investigación dirigida a estudiar todos los aspectos relacionados con el modelado físico del molde de colada y del diseño de la buza sumergida, con la finalidad de lograr mejoras en la dinámica del flujo de fluido durante el proceso de colada continua de planchón delgado de acero, y así poder minimizar la aparición de defectos que afecten la calidad del producto final.

### REFERENCIAS

- [1] Kamal, M., Sahai, Y. Modeling of Melt Flow and Surface Waves in a Continuous Casting Mold. *Steel Research Int.*, 76 (2005), 44-52.
- [2] Väyrynen, P., Wang, S., Laine, J., Louhenkilpi, S. (2010) Control of Fluid Flow, Heat Transfer and Inclusions in Continuous Casting: CFD and Neural Network Studies. TMS Annual Meeting & Exhibition (Jim Evans Honorary Symposium), Seattle, Washington, USA.
- [3] Zhao, B., Thomas, B. G., Vanka, S. P., O'Malley, R. J. Transient Fluid Flow and Superheat Transport in Continuous Casting of Steel Slabs. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 36B (2005), 801-823.
- [4] Liu, H., Yang, Ch., Zhang, H., Zhai, Q., Gan, Y. Numerical Simulation of Fluid Flow and Thermal Characteristics of Thin Slab in the Funnel-Type Molds of Two Casters. *ISIJ International*, 51 (2011), 392-401.
- [5] Torres-Alonso, E., Morales, R. D., García-Hernández, S., Palafox-Ramos, J. Cyclic Turbulent Instabilities in a Thin Slab Mold. Part I: Physical Model. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 41B (2010), 583-597.
- [6] Yuan, Q., Sivaramakrishnan, S., Vanka, S. P., Thomas, B. G. Computational and Experimental Study of Turbulent Flow in a 0.4 Scale Water Model of a Continuous Steel Caster. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35B (2004), 967-982.
- [7] Miranda, R., Barrón, M. A., Barreto, J., Hoyos, L. González, J. Experimental and Numerical Analysis of the Free Surface in a Water Model of a Slab Continuous Casting Mold. *International Iron and Steel Institute of Japan-ISIJ International*, 45 (2005), 1626-1635.
- [8] Odenthal, H. J., Lemanowicz, I., Gorissen, R., Pfeifer, H. (2002). Simulation of the Submerged Entry Nozzle-Mold Water Model System Using Laser-Optical and



**jifi-eai 2012**



**Jornadas de Investigación | Encuentro Académico Industrial**

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA

26 - 30 noviembre 2012

Computational Fluid Dynamics Methods. Metallurgical and Materials Transactions B, 33B (2002), 163-172.

- [9] Morales, R. D., Palafox-Ramos, J., García-Demedices, L., Sánchez-Pérez, R. A DPIV Study of Liquid Steel Flow in a Wide Thin Slab Caster Using Four Ports Submerged Entry Nozzles. International Iron and Steel Institute of Japan-ISIJ International, 44 (2004), 1384-1392.
- [10] Morales, R., Cabrera, J. M. (1997) Limpieza del Acero. Metalurgia de la Artesa o Distribuidor. I Seminario de Tecnología Metalúrgica. Barcelona. PUBLICACIONES D'ABAST S.L.L, p. 236.
- [11] FlowMap® Particle Image Velocimetry Instrumentation. (2000). Installation & User's guide. 5<sup>th</sup> Ed. Skovlunde, Denmark. Dantec Measurement Technology A/S, p 310.
- [12] FlowMap® 3D-PIV System. (2000). Installation & User's guide. 4<sup>th</sup> Ed. Skovlunde, Denmark. Dantec Measurement Technology A/S, p. 63.

**SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.** Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Telf.: +58 212-605 1644 / 1645. Telfax: +58 212 - 6628927

Correo electrónico: [jifi.eai.2012.ucv@gmail.com](mailto:jifi.eai.2012.ucv@gmail.com) <http://www.ing.ucv.ve>