

MODELADO DEL FLUJO TURBULENTO BIFÁSICO EN UNA CUCHARA SIDERÚRGICA Y SU VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Carlos G. Méndez, Ángel Zanotti, Norberto Nigro, Alberto Cardona
CIMEC (INTEC), UNL-Conicet, Güemes 3450, 3000 Santa Fe

Sebastián Sylvestre Begnis, Jorge Madías
IAS, Av. Central y 19 Oeste, 2900 San Nicolás

RESUMEN

Se realiza el análisis del flujo turbulento bifásico en las operaciones de afino en una cuchara siderúrgica. Asumimos que en esta operación coexisten tres fases: dos fases líquidas (metal fundido y escoria), y una fase gaseosa dada por el argón inyectado a través de taponos porosos en la base del reactor. En una primera aproximación estudiamos sólo dos de las tres fases antes mencionadas, ignorando la presencia de escoria. El régimen de flujo es altamente turbulento.

El análisis se realiza utilizando un código para resolución del problema de flujo multifásico y turbulento. A efectos de calibrar modelos y programa, se realizan comparaciones con resultados de experiencias en modelos de agua. Se construyó un modelo físico a escala de la cuchara, en la cual se inyecta aire a presión para simular la inyección de argón. Se verifican las relaciones de similaridad necesarias para reproducir el proceso de metalurgia de aceros y se están realizando mediciones de velocidad, a fin de contrastar los valores obtenidos en el cálculo con resultados experimentales propios.

ABSTRACT

The analysis of the two-phase turbulent flow during operations in a metallurgical ladle vessel is made. There are three coexisting phases: two liquid phases (molten metal and slag), and a gas phase due to the argon injected through a nozzle located at the bottom of the ladle. In a first approximation we only studied two of the three phases mentioned before, ignoring the presence of the slag. The flow regime is highly turbulent.

The analysis uses a code for the multiphase flow problem with turbulence. To calibrate models and code, we compare our results with experiments in water models. In order to do this, a physical scaled model of the ladle vessel was constructed, where air is injected to simulate the argon injection. The similarity relations to reproduce the metallurgical process are verified. Velocity measurements are being made to compare the numerical values obtained in the calculations with our own experimental results.

INTRODUCCIÓN

En las operaciones de afino en una cuchara siderúrgica coexisten dos fases líquidas, metal fundido y escoria, y una fase gaseosa, dada por el argón inyectado a través de la base de la cuchara para inducir el agitado del metal.

El conocimiento de las condiciones del flujo en la región donde coexisten el metal y la escoria es de suma importancia para la industria ya que es una información fundamental para la comprensión de fenómenos como por ejemplo la emulsificación de la escoria en el metal y las reacciones químicas entre las dos fases.

Las altas temperaturas a las que se realizan las operaciones de afino hacen que las mediciones de las condiciones del flujo sean muy difíciles de llevar a cabo directamente en la cuchara. Por ese motivo frecuentemente se utiliza un modelo a escala de agua y aire para simular al sistema real [1]. A fin de comparar nuestros modelos con los experimentos, en esta primera etapa nos centramos en el análisis del flujo en el sistema agua-aire, considerando, por lo tanto, solamente dos fases, una líquida y una gaseosa.

Para obtener los resultados usamos el código CFX-4, el cual es un programa para la simulación de flujo laminar o turbulento y transferencia de calor que utiliza volúmenes finitos. También puede trabajar con modelos adicionales tales como flujo multifásico, combustión, transporte de partículas y reacciones químicas. El cálculo del flujo se basa en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes pudiéndose obtener tanto la evolución temporal como la solución estacionaria.

Si bien el programa permite dividir la geometría del problema en un conjunto de bloques no estructurados, la malla en cada uno de estos bloques tiene que ser estructurada. Se pueden definir diferentes tipos de condiciones de borde tales como entradas, salidas, paredes y regiones sólidas. En particular, el código permite el tratamiento de superficies libres (siempre y cuando las deformaciones no sean muy grandes).

El número de fases que se puede especificar es arbitrario y cada una de ellas se puede definir como continua o dispersa. Las fases son consideradas como un continuo interpenetrante por lo cual cada fase ocupa una cierta fracción de volumen de cada celda de control. Básicamente hay dos modelos multifásicos, un modelo multifluido y un modelo homogéneo. El modelo multifluido resuelve para cada fase todas las ecuaciones de transporte, las cuales se acoplan a través de términos de transferencia entre las fases. El modelo homogéneo, en cambio, supone que algunas variables son las mismas para todas las fases (p. ej. velocidad, temperatura). Para representar la distribución de tamaños de la fase dispersa el código cuenta con un modelo MUSIG (Multiple-Size Group) que tiene en consideración el rompimiento y la coalescencia de las burbujas o gotas.

FORMULACIÓN DEL MODELO

Como ya se mencionó, en primer lugar consideramos un sistema agua-aire. Para poder comparar con resultados experimentales utilizamos la geometría de la Ref.[2]. La cuchara es un cilindro de 0.4m de altura y 0.5m de diámetro y la entrada de aire se hace a través de un tapón poroso de 6,35 mm de diámetro ubicado en el centro de la base.

Las principales características del modelo utilizado son:

- 2D con simetría cilíndrica.
- Malla estructurada no uniforme de 50x54 elementos rectangulares.
- Superficie libre deformable.
- Flujo isotérmico e incompresible.
- Esquema de diferencias "upwind" para los términos convectivos.
- Esquema de diferencias totalmente implícita Backward Euler para la evolución temporal.
- Fase líquida (agua) continua y turbulenta (modelo $k-\epsilon$).
- Fase gaseosa (aire) dispersa y laminar con la posibilidad de salir del sistema a través de la superficie libre.
- 10 tamaños diferentes de partículas para la fase dispersa (diámetro máximo de 30mm) incluyéndose la posibilidad de coalescencia y de rompimiento de las burbujas (modelo MUSIG).
- Cada fase tiene su propio conjunto de variables (modelo multifluido).

MODELO MULTIFÁSICO

La simulación del flujo de las burbujas de gas en el seno del líquido se efectúa empleando un modelo euleriano multifásico multifluido.

En estos modelos existe un campo de soluciones para cada fase por separado, de manera tal que cada fase posee su propio campo de velocidades, las cuales se encuentran acopladas via un término de drag entre fases que permite la transferencia de cantidad de movimiento. El campo de presiones es compartido por todas fases, siendo esta imposición necesaria para la resolución del sistema de ecuaciones.

Las ecuaciones que gobiernan al flujo multifásico son las ecuaciones básicas de continuidad, momento y energía, planteadas para cada fase en forma separada, más el agregado de un término de transferencia entre fases.

- Ecuaciones de continuidad

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_{liq}\rho_{liq}) + \nabla \cdot (f_{liq}\rho_{liq}\mathbf{U}_{liq}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_{gas}\rho_{gas}) + \nabla \cdot (f_{gas}\rho_{gas}\mathbf{U}_{gas}) = 0. \quad (2)$$

- Ecuaciones de cantidad de movimiento

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_{liq}\rho_{liq}\mathbf{U}_{liq}) + \nabla \cdot (f_{liq}(\rho_{liq}\mathbf{U}_{liq} \otimes \mathbf{U}_{liq})) = \nabla \cdot (f_{liq}\mu_{eff_{liq}}(\nabla\mathbf{U}_{liq} + (\nabla\mathbf{U}_{liq})^T) \\ - f_{liq}\nabla p + c_{liq-gas}^{(drag)}(\mathbf{U}_{gas} - \mathbf{U}_{liq}) + \mathbf{F}_{liq}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_{gas}\rho_{gas}\mathbf{U}_{gas}) + \nabla \cdot (f_{gas}(\rho_{gas}\mathbf{U}_{gas} \otimes \mathbf{U}_{gas})) = \nabla \cdot (f_{gas}\mu_{gas}(\nabla\mathbf{U}_{gas} + (\nabla\mathbf{U}_{gas})^T) \\ + f_{gas}(\mathbf{B}_{gas} - \nabla p) + c_{gas-liq}^{(drag)}(\mathbf{U}_{liq} - \mathbf{U}_{gas}) - \mathbf{F}_{gas}, \end{aligned} \quad (4)$$

siendo f_{gas} y f_{liq} las fracciones de volumen del gas y el líquido respectivamente.

Se emplea un modelo estándar $k-\epsilon$ para el flujo turbulento, donde la fase líquida se asume como turbulenta y la fase gaseosa como laminar.

- Ecuaciones de transporte para la fase líquida

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_{liq}\rho_{liq}k_{liq}) + \nabla \cdot (f_{liq}(\rho_{liq}k_{liq}\mathbf{U}_{liq})) = \nabla \cdot \left(f_{liq} \left(\mu_{liq} + \frac{\mu_{liq}^T}{Pr_k} \right) \nabla k_{liq} \right) + f_{liq}\Phi_{liq} - f_{liq}\rho_{liq}\epsilon_{liq}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(f_{liq}\rho_{liq}\epsilon_{liq}) + \nabla \cdot (f_{liq}(\rho_{liq}\epsilon_{liq}\mathbf{U}_{liq})) = \nabla \cdot \left(f_{liq} \left(\mu_{liq} + \frac{\mu_{liq}^T}{Pr_\epsilon} \right) \nabla \epsilon_{liq} \right) + C_1 f_{liq} \frac{\epsilon_{liq}}{k_{liq}} \Phi_{liq} \\ + C_2 f_{liq}\rho_{liq} \frac{\epsilon_{liq}^2}{k_{liq}}, \end{aligned} \quad (5)$$

donde la producción de corte para la fase líquida viene dada por

$$\Phi_{liq} = \mu_{eff_{liq}} \nabla\mathbf{U}_{liq} \cdot (\nabla\mathbf{U}_{liq} + (\nabla\mathbf{U}_{liq})^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{U}_{liq} (\mu_{eff_{liq}} \nabla \cdot \mathbf{U}_{liq} + \rho_{liq}k_{liq}). \quad (6)$$

y los coeficiente C_1 y C_2 son constantes empíricas.

La viscosidad turbulenta μ^T es calculada a partir de los parámetros de turbulencia k y ε

$$\mu^T = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (9)$$

y la viscosidad efectiva está dada por

$$\mu_{eff} = \mu + \mu^T. \quad (10)$$

MODELO DE DRAG ENTRE FASES

Los términos de drag entre fases $c_{gas-liq}^{(drag)}$ y $c_{liq-gas}^{(drag)}$ son definidos como

$$\begin{aligned} c_{gas-liq}^{(drag)} &= \frac{3 C_D}{4 d} f_{liq} \rho_{gas} |\mathbf{U}_{liq} - \mathbf{U}_{gas}|, \\ c_{liq-gas}^{(drag)} &= \frac{3 C_D}{4 d} f_{gas} \rho_{liq} |\mathbf{U}_{gas} - \mathbf{U}_{liq}|, \end{aligned} \quad (11)$$

donde el coeficiente de drag C_D sólo depende del número de Reynolds de la burbuja

$$Re_b = \frac{\rho_{liq} |\mathbf{U}_{liq} - \mathbf{U}_{gas}| d}{\mu_{liq}}. \quad (12)$$

La función $C_D(Re_b)$ es determinada en forma experimental y se conoce como curva de drag. En este trabajo empleamos la correlación de Ihme [3] dada por

$$C_D = \frac{24}{Re} + 5.48 Re^{-0.543} + 0.36. \quad (13)$$

MODELO MUSIG

El modelo MUSIG (Multiple-Size-Group) se emplea para flujos multifásicos en los cuales la fase dispersa tiene gran variación de tamaño. En general la fase dispersa es dividida en varios grupos de burbujas de distintos tamaños, en donde cada uno de estos grupos es tratado como una fase separada en el cálculo. De esta manera, el modelo de flujo multifásico tendrá $N+1$ conjuntos de ecuaciones (continuidad y momento) a resolver, donde N es el número de grupos, MUSIG asume que todas las velocidades de las partículas pueden ser relacionadas por medio de su promedio algebraico, disminuyendo de esta forma el número de ecuaciones que intervienen en el cálculo.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Debido a las continuas fluctuaciones producidas por la entrada de gas, el sistema real no alcanza un régimen estacionario. Esta característica del sistema se vio reflejada en las dificultades encontradas cuando se intentó obtener una solución independiente del tiempo. Por ese motivo hicimos un seguimiento de la evolución temporal del proceso y tomando intervalos de tiempo lo suficientemente cortos conseguimos capturar la naturaleza intrínsecamente no estacionaria del fenómeno. Al igual que en los experimentos, después de establecido el flujo global, hicimos promedios temporales de las distintas variables a fin de poder comparar resultados. En la Figura 1 se muestran dos instantes de tiempo diferentes y el promedio temporal de la fracción de volumen del gas.

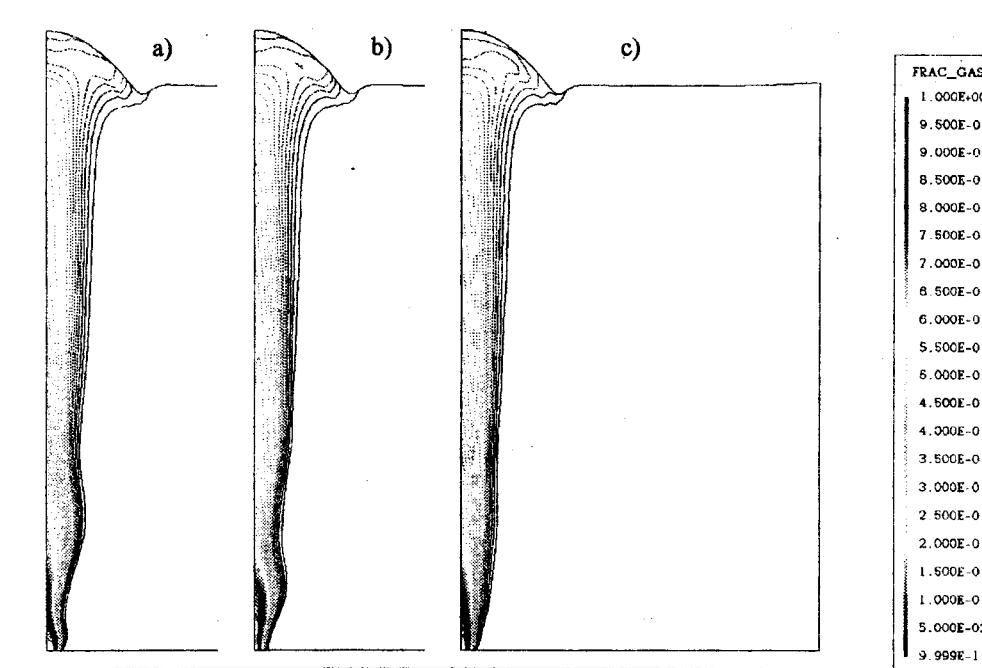


Figura 1: a) y b) fracción de volumen de gas en dos instantes de tiempo diferentes y c) promedio temporal.

Los resultados para la fracción de volumen y la velocidad del gas sobre el eje pueden verse en la Figura 2. Aunque los experimentos muestran que la deformación de la superficie libre es importante, en general en los modelos numéricos se considera una superficie plana.

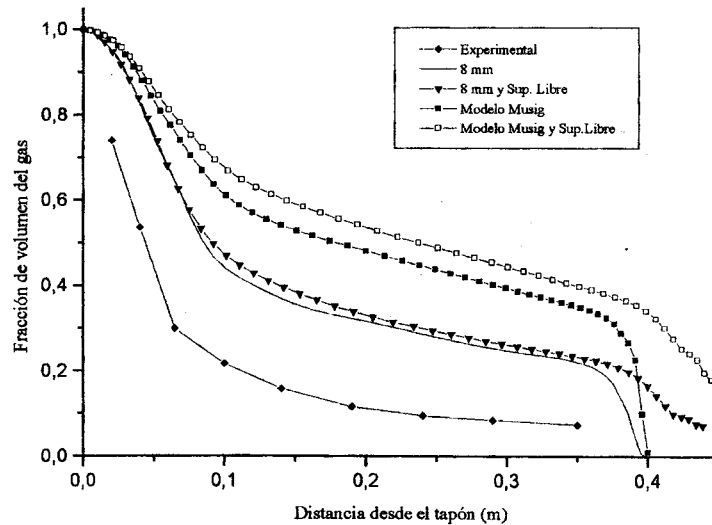


Figura 2: fracción de volumen del gas sobre el eje de simetría.

Comparando los resultados que obtuvimos con y sin deformación de la superficie libre (Fig. 2 y 3) vemos que en el caso que estamos analizando las diferencias no son significativas y estaría justificado el uso de una superficie plana.

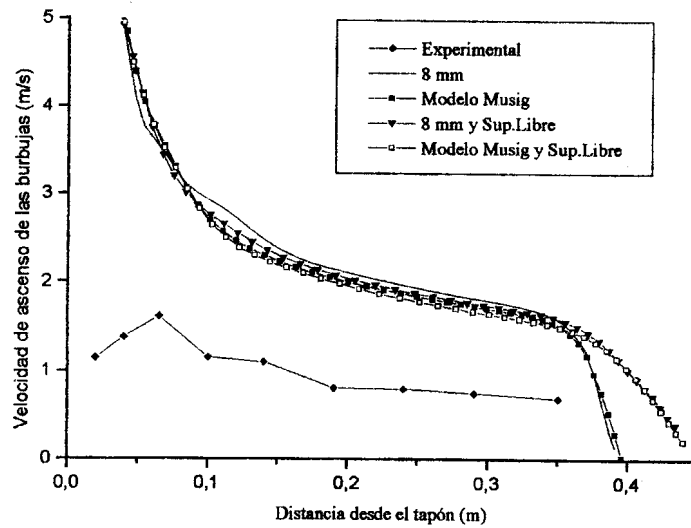


Figura 3: velocidad del gas sobre el eje de simetría.

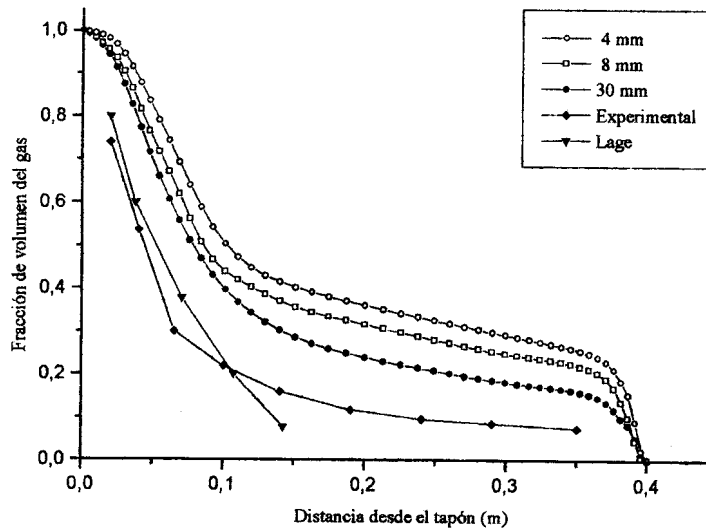


Figura 4: fracción de volumen del gas sobre el eje de simetría para tres tamaños de burbujas.

Cuando consideramos un solo tamaño de burbuja (en la Ref.[2] el tamaño medio es de unos 8 mm) los valores que obtuvimos para la fracción de volumen y la velocidad del gas se aproximan más a los resultados experimentales que cuando usamos varios tamaños de partículas. Esto refleja la necesidad de un ajuste en los parámetros utilizados en los modelos de coalescencia y de rompimiento de las burbujas.

Del análisis de la Figura 4, donde se observan los resultados para tres tamaños de burbujas, podemos inferir que la modificación de los parámetros tiene que tender hacia un aumento de la coalescencia y una disminución del rompimiento de las burbujas. En esta figura también se han incorporado los resultados obtenidos por L. Jonsson [4], donde podemos observar que si bien la fracción de gas toma valores cercanos para una distancia entre 0,02 a 0,07 m, luego divergen con respecto a los medidos, mientras que los resultados numéricos que hemos obtenido siguen el mismo comportamiento que los experimentales.

Un factor que puede ser la causa de la discrepancia entre los resultados numéricos y los datos experimentales es el coeficiente de drag entre fases. A juzgar por los resultados del modelo, el aire no se dispersa lo suficiente en la dirección radial y esto estaría indicando que el coeficiente de transferencia entre las burbujas de aire y el agua no es lo suficientemente grande. Por otro lado un refinamiento de la malla utilizada podría mejorar los resultados.

CONCLUSIONES

Al hacer un seguimiento de la evolución temporal y capturar las características no estacionarias del fenómeno se consiguió una buena descripción de las condiciones del flujo dentro de una cuchara siderúrgica.

En lo que a campos de velocidades y fracciones de volumen se refiere, los resultados son cualitativamente razonables. Sin embargo, antes de obtener información cuantitativa sobre el sistema real a partir del modelo numérico, debe hacerse un mejor ajuste de los parámetros que se utilizaron en los modelos de transferencia entre fases y de rompimiento y coalescencia de burbujas.

La deformación de la superficie libre no modifica significativamente los resultados para la velocidad y la fracción de gas obtenidos utilizando una superficie libre plana, pero puede ser relevante cuando se incluya la escoria y se analice la interacción metal-escoria.

Con relación a la inclusión de la escoria en el modelo, resultados preliminares nos indican que podremos simular el sistema en una forma bastante realista y establecer las características principales del proceso de emulsificación de la escoria en el metal.

NOMENCLATURA

B	Fuerza de boyancia.	k	Energía cinética turbulenta.
C_D	Coefficiente de drag.	ϵ	Disipación turbulenta.
C_μ	Cte. del modelo de turbulencia.	Pr	Número de Prandl.
d	Diámetro de burbuja.	p	Presión.
f_{gas}	Fracción de volumen del gas.	ρ	Densidad.
f_{liq}	Fracción de volumen del líquido.	U	Velocidad.
F	Fuerza de dispersión turbulenta.		

REFERENCIAS

- [1] D. Mazumdar and R. I. L. Guthrie, *ISIJ Int.*, **35**, 1 (1995).
- [2] A. H. Castillejos and J. K. Brimacombe, *Metall. Trans.*, **18B**, 659 (1987).
- [3] F. Ihme, H. Schmidt-Traub, and H. Brauer, *Chemie-Ing.-Tech.*, **44**, 306 (1972).
- [4] L. Jonsson, *Doctoral Thesis, Mathematical Modeling of Selected Ladle Operations*, (1998).