

ANÁLISIS DE FLUJOS CON SUPERFICIE LIBRE EN PROBLEMAS INDUSTRIALES

Sergio P. Ferro y Marcela B. Goldschmit
Centro de Investigación Industrial, FUDETEC
Córdoba 320, (1054) Buenos Aires, ARGENTINA
e-mail: sidfes@siderca.com

RESUMEN

Durante la colada continua de acero en la industria siderúrgica, el metal fundido debe circular por una serie de recipientes antes de solidificar y tomar su forma final. Las características del flujo en estos recipientes influyen sobre la calidad del producto, lo que motiva el estudio de la fluidodinámica del proceso. En este trabajo se analiza numéricamente el flujo en el interior de un molde de planchones y de una cuchara, con particular énfasis en el comportamiento de la superficie libre.

Se utiliza un modelo de flujo turbulento incompresible que se resuelve mediante la técnica de elementos finitos. La condición de incompresibilidad es impuesta por penalización y la turbulencia es modelada con el modelo de longitud de mezcla o con el modelo k- ϵ . El método de las pseudoconcentraciones es empleado para estimar la posición de la superficie libre.

El modelo numérico fue validado con mediciones tomadas de la literatura realizadas en modelos de agua de un molde de planchones. Finalmente, se presentan resultados de la formación del vórtice en el proceso de vaciado de una cuchara.

ABSTRACT

During the continuous casting of steel, in steel industry, the molten metal circulates through a series of vessels before solidifying and taking its final shape. The characteristics of the flow inside these vessels affect the quality of the final product. This motivates the study of the fluid dynamics of the continuous casting process. In this work the flow inside a slab mold and inside a ladle is analyzed with particular attention to the free surface behaviour.

A turbulent incompressible fluid is considered. The finite element method is used to solve the equations. Incompressibility condition is imposed by penalization and the turbulence is modeled by the mixing length model or the k- ϵ model. Free surface position is estimated by the pseudoconcentration technique.

The numerical model was validated with measurements taken from literature performed on a water model of a slabs mold. Finally, results from the vortex formation during a ladle drainage are presented.

INTRODUCCIÓN

En la industria siderúrgica actual, la mayor parte de la producción de acero tiene lugar a través del proceso de colada continua. En este proceso, el acero líquido generado en el horno es transportado en un recipiente llamado cuchara hasta un repartidor o tundish donde vierte su contenido. El tundish, a su

vez, distribuye el acero entre las distintas líneas de colado. Cada línea de colado se halla equipada con un molde refrigerado donde el acero comienza a solidificarse de acuerdo con la forma que se pretende dar al producto semielaborado. El acero solidificado descansa sobre una serie de rodillos que lo van retirando de la colada continua y lo trasladan al punto de corte.

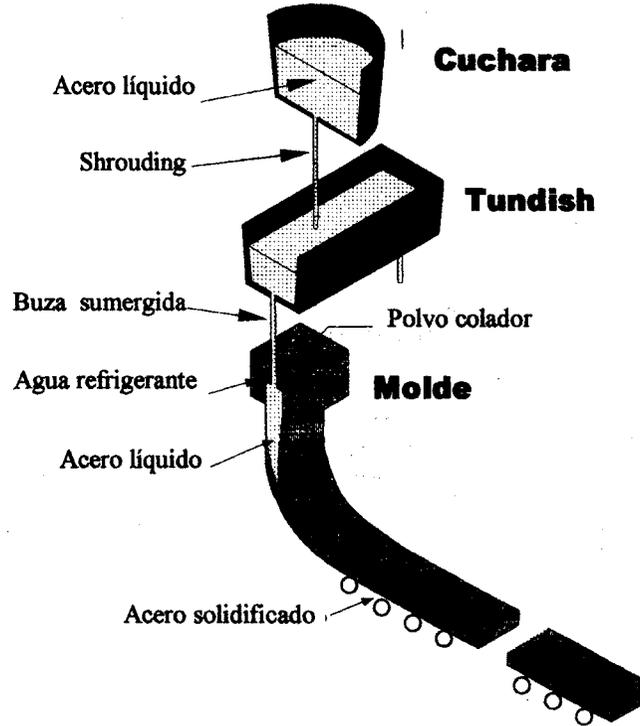


Figura 1: Diagrama de una colada continua de planchones

En la Figura 1 se presenta un diagrama donde se pueden observar los principales componentes de una colada continua de planchones de acero. Las características del flujo en el interior de la cuchara, el tundish y el molde influyen fuertemente sobre la productividad de la colada continua y sobre la calidad del producto final. Es por esto que surge el interés de modelar numéricamente el flujo del acero líquido en la colada continua y, en particular, analizar el comportamiento de la superficie libre en los distintos recipientes que la conforman.

MODELO NUMERICO

El flujo de acero en el interior de la colada continua se desarrolla a alto número de Reynolds, por lo que distintos modelos de turbulencia deben ser incorporados a la formulación del problema. En estos modelos las incógnitas (velocidad, presión) se descomponen en valores medios y valores fluctuantes, resolviéndose sólo ecuaciones en términos de los valores medios. Estas ecuaciones son resueltas con una viscosidad efectiva que da cuenta de las fluctuaciones turbulentas y que resulta ser considerablemente mayor que la viscosidad molecular.

El sistema de ecuaciones a resolver para el flujo incompresible turbulento al que se halla sometido el acero líquido en la colada continua estará dado por la ecuación de continuidad y la ecuación de Navier-Stokes

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} - \nabla \cdot [(\mu + \mu')(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \nabla P + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (2)$$

donde \mathbf{v} y P son los valores medios de la velocidad y la presión, μ y ρ son la viscosidad y densidad del acero líquido, \mathbf{g} es la aceleración de la gravedad y μ' es la viscosidad turbulenta cuya expresión depende del modelo de turbulencia empleado.

Para integrar el sistema no lineal formado por las ecuaciones (1-2) se recurrió al código numérico FANTOM [1]. Este programa resuelve las ecuaciones mediante la técnica elementos finitos, interpolando las velocidades con elementos finitos isoparamétricos standard e imponiendo la condición de incompresibilidad por penalización [2].

SUPERFICIE LIBRE

Cuando se consideran fluidos con superficie libre la interface misma del fluido es una incógnita del problema a ser calculada como parte de la solución. Para poder determinar la superficie libre usaremos la técnica de pseudoconcentraciones [3].

En el método de pseudoconcentraciones, las ecuaciones de flujo (1-2) son resueltas en un dominio extendido que incluye no solo al fluido a ser estudiado, sino también una región adicional donde se postula la existencia de un fluido artificial o "pseudofluido". La viscosidad y densidad de este fluido son elegidas de tal forma que los efectos del pseudofluido sobre el fluido real sean poco significativos. El dominio debe ser elegido de manera tal que la superficie libre permanezca en él durante toda la simulación.

Además de las variables propias del flujo se introduce una nueva incógnita, la pseudoconcentración C , que permitirá estimar la posición de la superficie libre. La pseudoconcentración es una función del espacio y del tiempo y satisface la ecuación de convección, (3), que también es resuelta con elementos finitos isoparamétricos.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C = 0 \quad (3)$$

Se define un valor arbitrario de la pseudoconcentración, C_c , de tal forma que las superficies de nivel $C(\mathbf{x}, t) = C_c$ determinan la posición de la superficie libre. Consecuentemente para cada posición espacial se tiene que $C(\mathbf{x}, t) > C_c$ si \mathbf{x} representa a un punto ocupado por el fluido real y $C(\mathbf{x}, t) < C_c$ si \mathbf{x} representa a un punto ocupado por el fluido artificial.

El valor inicial de C es elegido de acuerdo con la posición inicial de la superficie libre. La evolución posterior de C está dada por la ecuación (6). Las ecuaciones (1-2) se resuelven en todo el dominio utilizando las propiedades físicas del acero líquido en la región con fluido real y las propiedades "artificiales" en el resto del dominio.

Evidentemente, para cada posición de la superficie libre existe una infinidad de posibles funciones pseudoconcentración que la representan. Para evitar errores numéricos, es necesario trabajar con funciones $C(\mathbf{x}, t)$ que varíen suavemente con la posición. Esto se logra recalculando $C(\mathbf{x}, t)$ con la ecuación (4), después de actualizar la superficie libre en cada paso de tiempo.

$$C(\mathbf{x}, t) = C_c + d \sigma \operatorname{sgn}(C(\mathbf{x}, t) - C_c) \quad (4)$$

Esta ecuación (donde d representa la distancia a la superficie libre y σ es una constante arbitraria) deja invariante la posición de la superficie libre y asegura la "suavidad" de la función $C(x,t)$.

APLICACIÓN A UN MOLDE DE PLANCHONES

Se considerará en primer lugar el flujo dentro de un molde de planchones. Un molde de planchones es una pieza de cobre de sección rectangular refrigerada con agua, donde el acero líquido comienza a solidificarse. Interesa observar la incidencia de la velocidad de entrada de fluido y de la geometría de la buza de entrada sobre el perfil de la superficie libre del molde (menisco). En la Figura 2 se muestra un esquema bidimensional del molde y de una buza de descarga sumergida (por simetría sólo se modeló una mitad del molde)

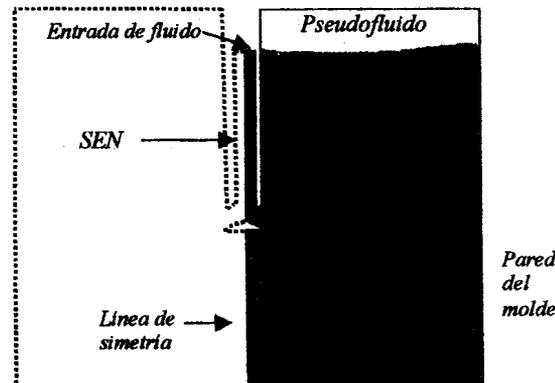


Figura 2. Esquema del molde de planchones

Se modelaron numéricamente las experiencias realizadas en moldes de agua Panaras *et al.* [4] y Anagstopoulos y Bergeles [5]. Las características de estas experiencias se señalan en la Tabla I.

Tabla I. Características de los experimentos realizados en modelos de agua [4,5]

Ancho del molde	457 mm
Profundidad de inmersión de la buza	150 mm
Diámetro de la buza	19.5 mm
Angulo de descarga de la buza	20°
Velocidad de entrada del fluido en la buza	780 y 1340 mm/seg

Modelo de turbulencia

Para incluir la turbulencia en la formulación del flujo se recurrió al modelo "k-ε" desarrollado por Launder y Spalding [6]. En este modelo los efectos de las fluctuaciones de las variables respecto de los valores medios entran en la formulación a través de dos nuevas variables: la energía cinética turbulenta (k) y la velocidad de disipación de energía cinética turbulenta (ϵ). El modelo k-ε usado junto con el método de las funciones de pared para las condiciones de contorno ha sido usado con éxito en el modelado de flujos industriales y en particular en instalaciones de colada continua [7-10].

En el modelo k-ε la viscosidad turbulenta se obtiene a partir de la siguiente expresión

$$\mu^t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon \quad (5)$$

La energía cinética turbulenta y la velocidad de disipación de energía cinética turbulenta, son a su vez obtenidas a partir de sendas ecuaciones de transporte

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla k - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu'}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] - \mu' (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) : \nabla \mathbf{v} + \rho \frac{C_\mu k^2}{\mu' / \rho} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \varepsilon - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu'}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] - \rho C_\mu C_1 k (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) : \nabla \mathbf{v} + \rho \frac{C_2 \varepsilon^2}{k} = 0 \quad (7)$$

Las constantes $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ y $\sigma_\varepsilon = 1.0$ son propias del modelo de turbulencia y tienen valores dados por calibraciones con resultados experimentales [6]. El modelo k- ε de turbulencia fue implementado mediante un algoritmo k-L-predictor ε -corrector [11-12] (donde L representa la longitud de mezcla) que ya fue aplicado para estudiar este tipo de flujos [10].

Condiciones de contorno

La resolución de las ecuaciones (1-7) exige la especificación de condiciones de contorno. A la entrada de la buza se impuso velocidad uniforme en dirección vertical según los valores de la Tabla I. Los valores de las variables turbulentas a la entrada fueron impuestos a través de las siguientes relaciones empíricas (Ver Refs [10]),

$$k_m = 0.00425 U_0^2 \quad \varepsilon_m = k_m^{3/2} / (D/2)$$

donde U_0 es la velocidad de entrada y D es el diámetro de la buza. En las paredes de la buza y del molde se utilizaron las funciones de pared para establecer las condiciones de contorno y en la línea de simetría se impuso que la velocidad fuera tangencial. En el límite superior del dominio, ocupado por pseudofluido, no se especificaron condiciones de contorno y en el límite inferior (686 mm debajo del menisco) se impuso presión hidrostática para tener en cuenta el hecho de que el fluido, si bien se halla sometido a gravedad, no está en caída libre sino que está parcialmente contenido por el acero solidificado.

Dada la naturaleza de la ecuación (3), la pseudoconcentración se debe imponer donde el fluido está entrando al dominio. Esto implica imponer un valor de pseudoconcentración correspondiente al material real en la entrada de la buza y un valor de pseudoconcentración de pseudofluido (si la velocidad normal es entrante) en el límite superior del dominio.

Resultados

En las Figura 3 se presentan los resultados obtenidos para el campo de velocidades cuando la velocidad de entrada es 780 mm/s. El gráfico a) muestra el campo de velocidades obtenido con el modelo numérico. Se señalan las dos zonas de recirculación que se forman en el interior del molde. Los gráficos b) y c) presentan las dos componentes de la velocidad (V_x , componente horizontal; V_y , componente vertical) a lo largo de una línea vertical ubicada a 15 cm de la línea de simetría, enfrente de la descarga. Los resultados obtenidos por el modelo numérico (en línea continua) se comparan con los puntos experimentales [4]. En los gráficos d) y e) se repite el análisis pero a lo largo de una línea horizontal ubicada al pie de la buza.

El modelo describe adecuadamente las características generales del flujo, con la formación de dos zonas de recirculación y estima con corrección la posición del punto de separación "S" sobre la pared del molde. Además en los gráficos b)-d) se observa que el campo de velocidades calculado se compara aceptablemente con las mediciones experimentales.

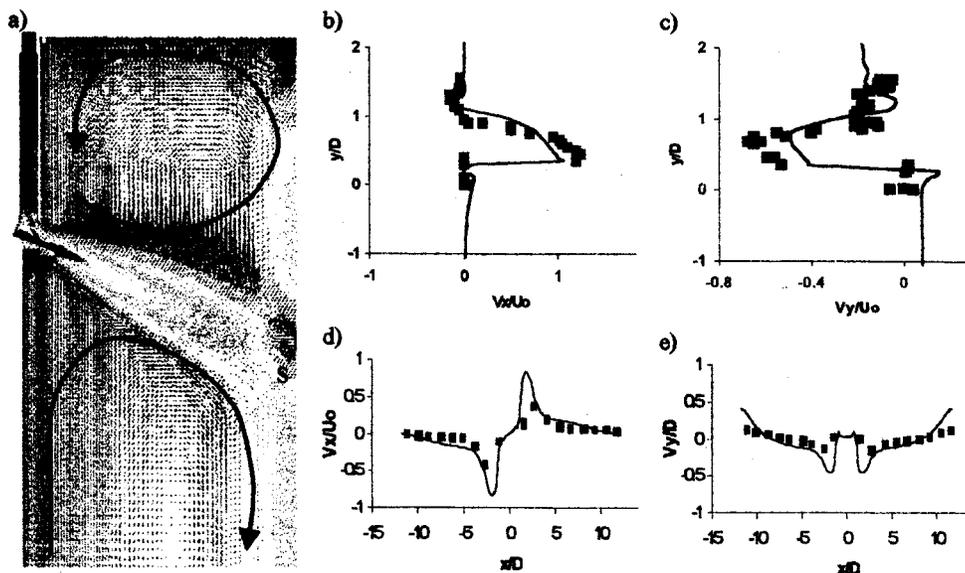


Figura 3. Resultados obtenidos para el campo de velocidades.

En la Figura 4 se presenta la superficie libre obtenida para el estado estacionario con el modelo numérico (en línea continua) comparada con mediciones experimentales [5], para $Uo = 1340$ mm/seg. Los cálculos muestran un acuerdo razonable con las mediciones (dentro de los márgenes de error) y también con resultados numéricos de otros autores (no presentados en la figura).

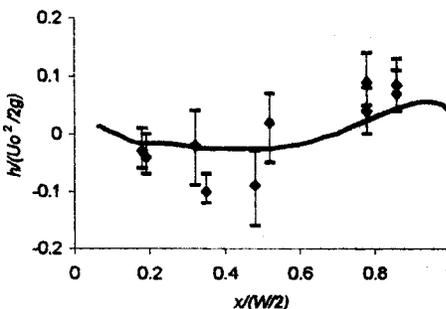


Figura 4. Superficie libre. Comparación con resultados experimentales[5].

APLICACIÓN AL VACIADO DE LA CUCHARA

El método de pseudoconcentraciones también se utilizó para análisis transitorio del vaciado de una cuchara de colada continua. Durante este proceso, la formación de un vórtice en la descarga conduce a un prematuro cierre de la cuchara por lo que en el interior de la misma queda una importante cantidad de acero sin ser colado.

Modelo de turbulencia

Para modelar este problema se utilizó un modelo de turbulencia más sencillo, el modelo de longitud de mezcla, en lugar del modelo $k-\epsilon$ de turbulencia descrito anteriormente. En este modelo la viscosidad

turbulenta se calcula a partir de la ecuación $\mu' = \rho^2 (\nabla v : \nabla v + \nabla v : \nabla v')^{1/2}$ (donde l es la longitud de mezcla que debe ser establecida a priori) que sustituye a las ecuaciones (5-7) del modelo $k-\varepsilon$.

Condiciones de contorno

Durante la operación de la cuchara, el caudal con que el acero fluye de la cuchara al repartidor se mantiene constante mediante una válvula. Para simular este vaciado a caudal constante, se fijó la velocidad a la salida de la descarga. En las paredes se impusieron las funciones de pared como condición de contorno y en el límite superior del dominio sólo se fijó el valor de $C(x, t)$.

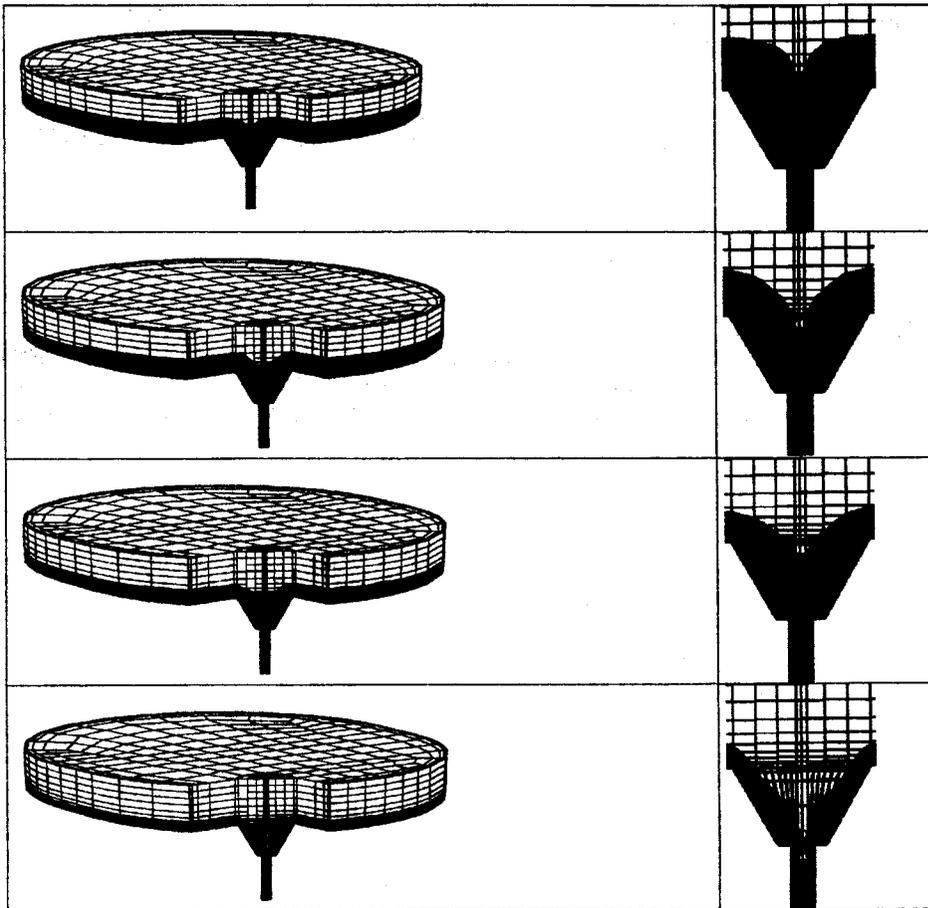


Figura 5. Secuencia de vaciado de una cuchara de colada continua.

Resultados

En la Figura 5 se presenta la evolución de la superficie libre a medida que se va vaciando la cuchara donde se puede apreciar la formación del vórtice en la descarga. La secuencia temporal muestra que el vórtice rápidamente penetra hasta cierta profundidad, luego crece radicalmente manteniendo esta profundidad para finalmente irrumpir dentro de la zona final de la descarga.

CONCLUSIONES

El método de elementos finitos aplicado en combinación con modelos de turbulencia permite describir las características principales del flujo de acero en la colada continua. En particular el método de pseudoconcentraciones es apto para modelar el comportamiento de la superficie libre en los distintos recipientes de la colada continua.

Actualmente se está trabajando en el modelado tridimensional del sistema molde-buza a efectos de poder determinar la incidencia de la geometría de la buza en la superficie libre del molde. De la misma forma, se está trabajando en el mallado de distintos tipos de descarga para la cuchara, con el objeto de poder retrasar la formación del vórtice y disminuir la cantidad de acero remanente cuando se cierra la cuchara.

REFERENCIAS

- [1] *FANTOM, User manual*, International Center for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, Spain, 1994.
- [2] *Zienkiewicz O.C. and Taylor, R.L. The Finite Element Method*, Mc Graw Hill, London, 2000.
- [3] *Thompson, E. , Use of the pseudo-concentrations to follow creeping viscous flows during transient analysis*, Int. J. Num. Meth. Fluids, 6, 1986, págs. 749-761.
- [4] *Panaras G.A., Theodorakakos A., and Bergeles G. Numerical investigation of the Free Surface in a Continuous Steel Casting Mold Model*, Metallurgical and Material Transactions B, Vol. 30, 1998, págs 1117-1126.
- [5] *Anagstopoulos J. and Bergeles G. Three-Dimensional Modelling of the Flow and the interface Surface in a Continuous Casting Mould Model*. Metallurgical and Material Transactions B, Vol 30, 1999, págs 1095-1105.
- [6] *Launder B.E. and Spalding, D.B. The numerical computation of turbulent flows*. Comp. Meth. in Appl. Mech. And Engrg., Vol. 3, 1974, págs 269-289.
- [7] *Szekely, J.; Evans, J.W. and Brimacombe, J.K. The mathematical and physical modelling of primary metals processing operations*. John Wiley, 1988.
- [8] *Szekely, J. Some perspectives on mathematical modelling of metal processing operations*. Ironmaking and Steelmaking, Vol. 16, 1989, págs 183-196.
- [9] *Thomas, B.G. Application of mathematical models to the continuous slab casting mould*, Iron & Steelmaker, 1991, págs. 53-66.
- [10] *Goldschmit, M.B., Principe, R.J. and Koslowski, M. Applications of (k-ε) model for the analysis of continuous casting processes*. Int. J. Numer. Methods in Engineering, Vol. 46, 1999, págs 1505-1519.
- [11] *Goldschmit, M.B and Cavaliere, M.A. Modelling of turbulent recirculating flows via an iterative (k-L)-predictor / (ε)-corrector scheme*. Appl. Mech. Review, Vol 48, 1995, págs. 211-215
- [12] *Goldschmit, M.B. and Cavaliere, M.A. An iterative (k-L)-predictor / (ε)-corrector algorithm for solving (k- ε) turbulent models*. Engineering Computations, Vol. 14, 1997, págs 441-455.