

SIMULACIÓN 3D DEL CONTROL DEL RECUBRIMIENTO DEL ESPESOR DE ZN MEDIANTE LAS CUCHILLAS DE SOPLADO EN EL PROCESO DE GALVANIZADO

*Rodríguez Montequín, M^a.T.¹ Vergara Gonzáles, E², Menéndez
Fernández, C², De Cos Juez, Javi³*

¹UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Area de Matemática Aplicada.

²UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Area de Proyectos de Ingeniería

³UNIVERSIDAD DE LA RIOJA. Area de Proyectos de Ingeniería

Resumen

El proceso de galvanización por inmersión en caliente tiene como objetivo la protección de la superficie del acero con una capa de zinc, para evitar el proceso de corrosión.

En este artículo se presenta el desarrollo de la simulación numérica del proceso de galvanizado. El modelo se ha realizado en dos fases:

En la primera fase se ha realizado un estudio sobre el comportamiento del zinc ante el impacto del chorro de aire mediante la simulación bidimensional del flujo del zinc y del aire. De esta primera fase se ha obtenido información sobre el efecto de la abertura, distancia vertical (entre la cuchilla y la superficie del pote de Zn) y distancia horizontal (entre la cuchilla y la banda) de las cuchillas de aire sobre el espesor final de recubrimiento de Zn. Esta información permite proponer diferentes cambios sobre el perfil del diseño de la cuchilla de aire.

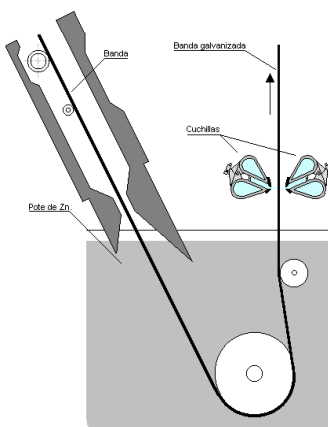
En la segunda fase se ha realizado un estudio sobre el efecto de los diferentes diseños de las cuchillas de aire sobre el comportamiento

del flujo del chorro de aire. Este estudio ha sido realizado mediante la simulación tridimensional del flujo de aire procedente de la cuchilla de aire, introduciendo los efectos combinados de la turbulencia en el eje longitudinal.

Los resultados obtenidos en la simulación numérica han permitido definir las formas más adecuadas para las cuchillas. Actualmente se están realizando las pruebas en planta de estos diseños, obteniéndose una mejora en el consumo de Zn de un 5%.

Introducción

El proceso de galvanizado está fundamentalmente condicionado por la etapa de inmersión del material en el baño y el control de su recubrimiento a la salida. En una línea de galvanización continua el control de espesor se realiza mediante el empleo de cuchillas de aire. Estas, colocadas a ambos lados de la banda, soplan aire a una presión adecuada para conseguir escurrir el Zn líquido sobrante hasta dejar sobre la banda el recubrimiento deseado. Actualmente el control de estas cuchillas se realiza de



forma totalmente manual mediante pulsadores accionados por el operador con el fin de acercar o alejar estas a la banda, manteniéndose la mayor parte de resto de variables constantes en mayor o menor medida. El grado de aproximación o alejamiento lo decide el propio operario en función únicamente de su experiencia, por lo que se hace necesario el desarrollo de un modelo matemático que tomando como entradas las diferentes variables del proceso proporcione el espesor del recubrimiento, posibilitando así una mayor optimización del proceso.

Se ha realizado un estudio preliminar del comportamiento físico del proceso. Para ello ha sido necesario el desarrollo e instalación de un sistema de

captura de información sobre los parámetros más influyentes del proceso. En esta primera etapa se observa que el comportamiento del flujo del Zn sobre la zona es distinto en función de la región de la banda afectada por el impacto del chorro de aire, pudiendo considerarse las siguientes regiones:

Región I: región de transición. Es la zona en la que ocurre el contacto entre la banda y el baño de zinc, resultando un flujo vertical de zinc que debido a la fuerza de la viscosidad se mantiene sobre la banda.

Región II: transporte viscoso del recubrimiento de zinc: En esta zona está actuando la fuerza viscosa hacia arriba, y la fuerza gravitacional hacia abajo.

Región III: zona de actuación del chorro acabador: Es la zona de impacto del chorro acabador sobre la banda. En la parte de debajo del impacto del chorro se crea un gradiente de presión que se opone a la velocidad inducida por el recubrimiento de zinc.

Región IV: zona de equilibrio entre el perfil de velocidad y la viscosidad Esta es la zona que está situada sobre la zona de actuación del chorro acabador. Las únicas fuerzas actuando en esta zona son las debidas a la viscosidad.

Región V: incremento de la viscosidad y solidificación En esta zona la temperatura del baño cae por debajo del punto de solidificación, causando un incremento de la viscosidad y empezando el baño a solidificar.

Región VI: Región sólida Esta es la zona del espesor final del recubrimiento.

Simulación 2D

La simulación 2D se corresponde con la primera fase de la modelización del problema, permitiendo tener una primera aproximación del comportamiento del flujo de Zn ante el impacto del chorro de aire. Esta simulación ha sido desarrollada mediante elementos finitos, resultando el problema muy complejo de resolver debido a los siguientes puntos:

1. La frontera entre el flujo del Zn y del aire se desconoce cuando la geometría del problema es creada. Este tipo de problemas se

denominan problemas de frontera libre, siendo necesaria la introducción de métodos especiales para definir la localización y movimiento de la frontera.

2. Existen grandes diferencias de escala en el proceso: El espesor de Zn es del orden de 10^{-3} mm, mientras que la distancia de la cuchilla a la banda es del orden de cm.
3. La temperatura del pote es de 450°C , siendo casi imposible la medida de algunos parámetros que influyen en el proceso. Estos parámetros han sido estimados, pero existe una desviación respecto a los valores reales, lo que implica que las condiciones de entrada para la simulación numérica son aproximadas, y por lo tanto los resultados obtenidos no se corresponden de forma exacta con la salida del espesor de Zn. Sin embargo, la simulación numérica proporciona una buena información sobre el comportamiento cualitativo de los flujos implicados en el proceso.

Hipótesis de modelado

Las hipótesis de cálculo que se realizan para obtener el modelo son las siguientes:

- El fluido es no reactivo
- El problema se comporta como un medio continuo
- Existe regularidad suficiente para poder pasar de Principios Integrales de conservación (en media) a ecuaciones en derivadas parciales (puntuales)
- No existen fuerzas exteriores actuando sobre el sistema.
- Se trata de un problema multifase, con dos fluidos de interés: el aire y el zinc.
- El aire y el zinc son fluidos no miscibles.

- La superficie que limita la frontera entre el aire y el zinc se trata de una superficie libre.
- Las variaciones de la viscosidad son muy pequeñas en el rango de temperaturas bajo consideración.
- Los fluidos son incompresibles: sus densidades son constantes en el espacio, aunque pueden variar con la temperatura. El aire puede considerarse como incompresible puesto que la caída global de presión, es una pequeña fracción de la presión total en el sistema y su velocidad lineal no está cercana a la del sonido.
- Se supondrá una condición de no deslizamiento del zinc sobre la banda: la velocidad del zinc sobre la banda coincide con la velocidad de la banda.
- Se calculará la solución estacionaria de un problema no estacionario.

Modelo matemático

Las ecuaciones que describen el comportamiento de un fluido incompresible vienen dadas por las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\sum_{j=1,3} \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j) = 0 \quad (\text{Ecuación de continuidad})$$

[1]

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i + \rho g_i = \rho \frac{du_i}{dt} \quad i = 1,2,3 \quad (\text{Ecuación de movimiento})$$

[2]

donde $\rho \rightarrow$ densidad, $u_i \rightarrow$ componente i de la velocidad, $i=1,2,3$, $p \rightarrow$ presión, $t \rightarrow$ tiempo y $(g_1, g_2, g_3) = (0,0,-9.8) \rightarrow$ gravedad

Sin embargo, estas ecuaciones consideran únicamente el comportamiento de un único fluido, por lo que es necesario el desarrollo de modelos multifase o de frontera libre, que permitan tener en consideración el comportamiento de los flujos de Zn líquido y del aire. Para ello se ha seleccionado el método VOF (Volume Of Fluid) que consiste en tratar el flujo como un fluido

simple con una densidad variable, lo que permite la utilización de las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles, junto con otra ecuación denominada *ecuación de continuidad de la fracción de volumen* que cierra el sistema. De esta forma, las ecuaciones matemáticas que gobiernan el flujo del problema vienen dadas por:

- *Ecuación principal del VOF*

$$\frac{\partial F_2}{\partial t} + \vec{u} \text{div} F_2 = 0$$

[3]

donde

$F_2 \rightarrow$ Fracción de volumen del aire

$F_1 = 1 - F_2 \rightarrow$ Fracción de volumen del Zn.

- Navier-Stokes:

$$\begin{cases} \text{div} \vec{u} = 0 \\ \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \vec{\nabla}) \vec{u} + \vec{\nabla} p = \mu \Delta \vec{u} + \rho \vec{g} \end{cases}$$

Donde la densidad y viscosidad se calculan considerando la fracción de volumen:

Resultados

De las simulaciones numéricas bidimensionales realizadas se ha obtenido una primera aproximación del comportamiento del chorro de la cuchilla de aire y la influencia sobre el recubrimiento de Zn. Para ello se han realizado varias

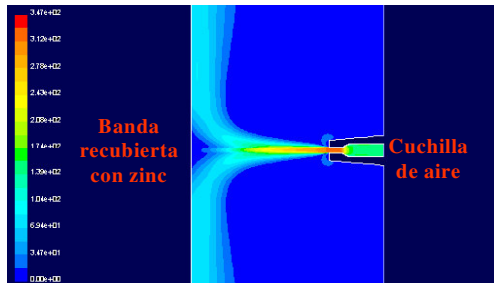


Figura 1: Contorno de velocidad del flujo del chorro de aire

modificaciones sobre la geometría del problema, introduciendo cambios en los parámetros de abertura de la cuchilla, así como de la posición de la cuchilla (distancia de la cuchilla a la banda o a la superficie del pote de Zn).

Así mismo se han extraído resultados sobre el comportamiento del flujo del Zn y del aire que permiten conocer los perfiles de velocidad en las diferentes regiones de la banda:

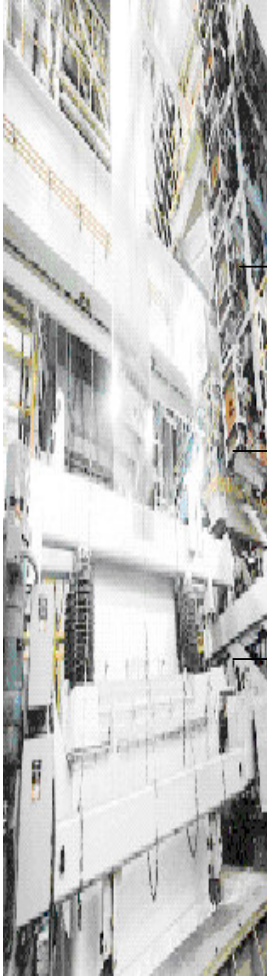


Figura 1: Foto de la línea de galvanizado

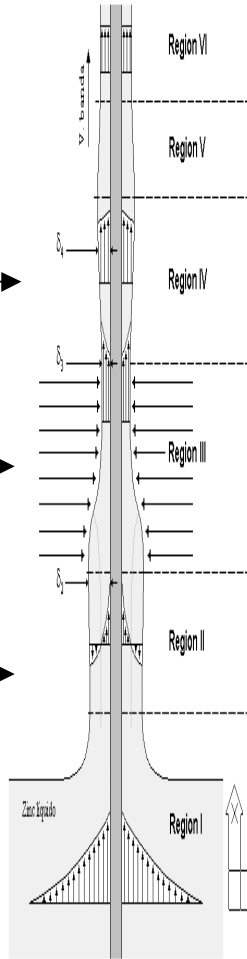


Figura 2: Esquema de los perfiles de velocidad de la simulación.

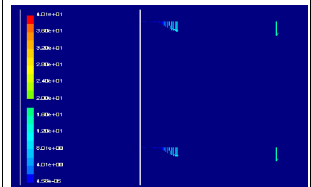
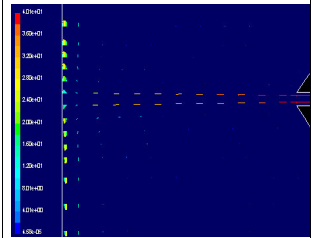
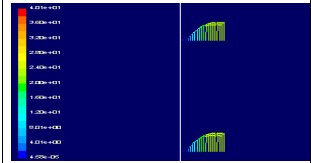


Figura 4: Perfil de la velocidad calculada con la simulación numérica en la zona superior a la cuchilla de aire, en la cuchilla de aire y en la zona inferior de la cuchilla de aire

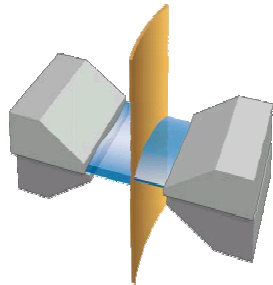
Los resultados obtenidos en la simulación bidimensional, junto con los derivados del análisis previo, proponen como perfiles alternativos al perfil actual de la cuchilla los siguientes:

- Perfil liso con una abertura similar a la actual pero incrementada en 0.5 mm.
- Perfil similar al actual pero con una abertura incrementada en 0.5 mm
- Perfil parabólico.

Estos perfiles serán probados a continuación mediante simulación numérica 3D, para posteriormente en función de los resultados obtenidos, realizar las pruebas en línea con las modificaciones necesarias, que se deduzcan de los análisis.

Simulación 3D

La simulación 2D describe parcialmente el comportamiento del proceso, permitiendo conocer el comportamiento del zinc ante el impacto del chorro de aire. Sin embargo no es capaz de introducir los efectos combinados de la turbulencia en el eje longitudinal, así como el efecto del diseño de la cuchilla.



La modelización 3D permite tener en consideración todos estos aspectos. Sin embargo debido a la complejidad de realizar una modelización 3D ha sido necesario simplificar la modelización del problema considerando únicamente el comportamiento del aire. Esta simplificación es posible realizarla debido a que la simulación 2D había aportado un estudio completo del comportamiento del Zn ante el impacto del aire, permitiendo realizar un estudio exhaustivo de la influencia del diseño de la cuchilla sobre el chorro de aire. El flujo del chorro de aire se ha considerado turbulento, lo que permite un análisis más real del comportamiento del flujo.

Hipótesis de modelado

Las hipótesis de cálculo que se realizan para obtener el modelo son las siguientes:

- Tras la salida del chorro acabador el problema evoluciona hasta un estado en el que permanece estacionario.
- El chorro acabador tiene un comportamiento turbulento totalmente desarrollado cuando incide sobre el zinc.
- La viscosidad molecular es despreciable.
- El chorro acabador ejerce sólo una fuerza normal a la superficie de zinc.
- Existe simetría respecto de la banda
- Existe simetría axial respecto del eje longitudinal central de la cuchilla.
- El flujo del chorro acabador no se ve afectado por las altas temperaturas.
- La densidad del aire permanece constante.

Modelo matemático

Las ecuaciones de Navier-Stokes son aplicables a la descripción del flujo turbulento, pero su resolución directa resulta computacionalmente muy costosa, debido a las grandes fluctuaciones que presentan la velocidad y la turbulencia alrededor de sus valores medios. Será necesario por lo tanto el desarrollo de modelos de turbulencia para transformar estas ecuaciones en otras ecuaciones que sea posible resolver de forma más rápida y económica. Para ello se introduce el concepto de *velocidad de tiempo ajustado* que se define como el promedio de tiempo de la velocidad, en un intervalo de tiempo t_0 ($\bar{u}_i = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} u_i dt$). El tiempo t_0 , se toma de forma que sea grande con respecto al tiempo de oscilación turbulenta, pero pequeño en

comparación con el tiempo de variación de la diferencia de presión que da lugar al flujo.

La velocidad instantánea se descompone en la suma de la velocidad de tiempo ajustado y una velocidad de fluctuación:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad [5]$$

Para la presión se puede escribir una expresión fluctuante análoga:

$$p = \bar{p} + p' \quad [6]$$

Sustituyendo en las ecuaciones [1] y [2] la velocidad y la presión instantáneas por las expresiones [3] y [4], y tomando un promedio de tiempo se obtienen las ecuaciones de continuidad y de movimiento de tiempo ajustado, también conocidas como ecuaciones RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes):

$$\sum_{j=1,3} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j) = 0 \quad [7]$$

$$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{u}_i - \sum_{j=1,3} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i' u_j'}) + \rho g_i = \rho \frac{d\bar{u}_i}{dt} \quad i = 1,2,3 \quad [8]$$

Comparando las ecuaciones de RANS con las ecuaciones [1] y [2], se observa que la ecuación de continuidad es la misma que antes, salvo que las componentes de la velocidad de tiempo ajustado sustituyen a los componentes de la velocidad instantánea. En la ecuación de movimiento también se han sustituido las magnitudes velocidad y presión por su magnitud ajustada, pero además, intervienen nuevos términos que están relacionados con las fluctuaciones de velocidad turbulenta. Estos términos, $\rho \overline{u_i' u_j'}$, se denominan *esfuerzos de Reynolds*, y deben de ser modelados para que la ecuación [8] quede cerrada.

Con este fin se ha utilizado la hipótesis de Boussinesq, para relacionar los esfuerzos de Reynolds con los gradientes de velocidad medios:

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i}) \delta_{ij} \quad [9]$$

siendo μ_t un coeficiente turbulento de viscosidad o viscosidad de remolino que, en general, varía considerablemente con la posición, y k la energía cinética turbulenta.

Para el cálculo del coeficiente turbulento de viscosidad se ha utilizado un *Modelo k-ε Realizable*, que consiste en considerar dos ecuaciones de transporte adicionales (ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta, k , y ecuación de transporte para la tasa de disipación turbulenta, ϵ), calculándose μ_t en función de k y ϵ .

En el caso particular de la modelización de la cuchilla de aire, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1,3} \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u}_j) = 0 \\ -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \overline{u}_i + \sum_{j=1,3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \mu_t \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) + \rho \frac{\partial k}{\partial x_i} + \rho g_i = \rho \frac{d\overline{u}_i}{dt} \quad i=1,2,3 \\ \sum_{j=1,3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t S^2 - \rho \epsilon = \rho \frac{dk}{dt} \\ \sum_{j=1,3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{1.2} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} = \rho \frac{d\epsilon}{dt} \end{array} \right.$$

donde $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\epsilon = 1.2$ y $C_2 = 1.9$

Resultados

Se ha simulado numéricamente el comportamiento del flujo de aire para los perfiles 1, 2 y 3, realizando posteriormente un análisis de los resultados obtenidos. En cada caso se han seleccionado las imágenes del contorno de

presión a la salida de la cuchilla, una sección transversal del contorno de velocidad y un estudio del contorno de velocidad en la zona de impacto.

El **diseño del perfil 1**, es el mismo que el utilizado en la actualidad en ACERALIA, pero con una mayor abertura entre los labios. En los resultados se puede observar, cómo la presión en la zona central de la cuchilla es mayor y esta presión disminuye a medida que aumenta la superficie de la boquilla.

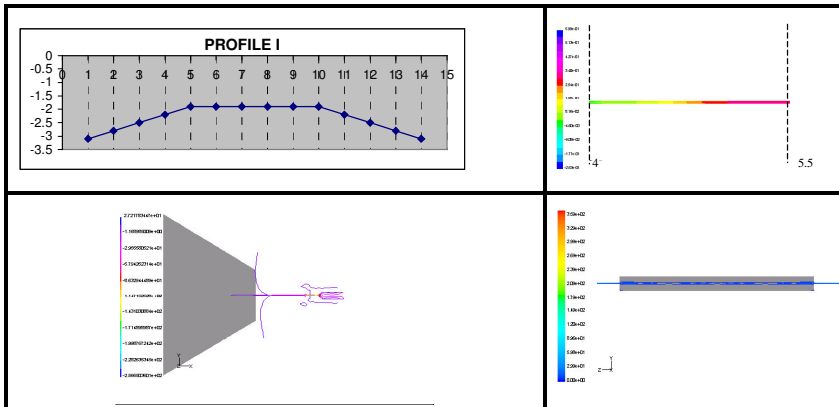


Figura 5: Diseño del perfil 1 de la cuchilla. Contorno de la presión a la salida de la cuchilla en la boquilla zona 4 – 6. Sección transversal del contorno de velocidad. Contorno de velocidad en la región de impacto.

El **diseño del perfil 2** de la cuchilla es plano, y se observa como la salida del aire de la boquilla es uniforme dando lugar a un flujo uniforme y cortante sobre la banda.

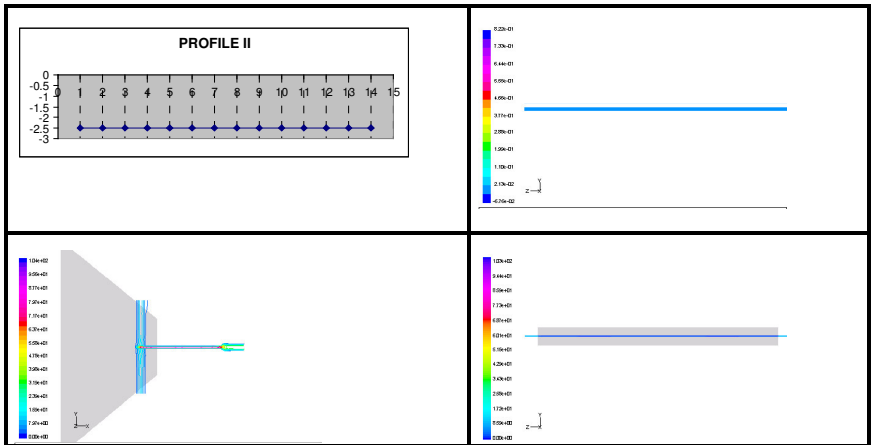


Figura 6: Diseño del perfil 2 de la cuchilla. Contorno de la presión a la salida de la cuchilla en la boquilla zona 4 – 6. Sección transversal del contorno de velocidad. Contorno de velocidad en la región de impacto.

El **diseño del perfil 3** tiene forma parabólica suavizando la forma del perfil actual en funcionamiento y logrando así de esta forma una salida del flujo más uniforme.

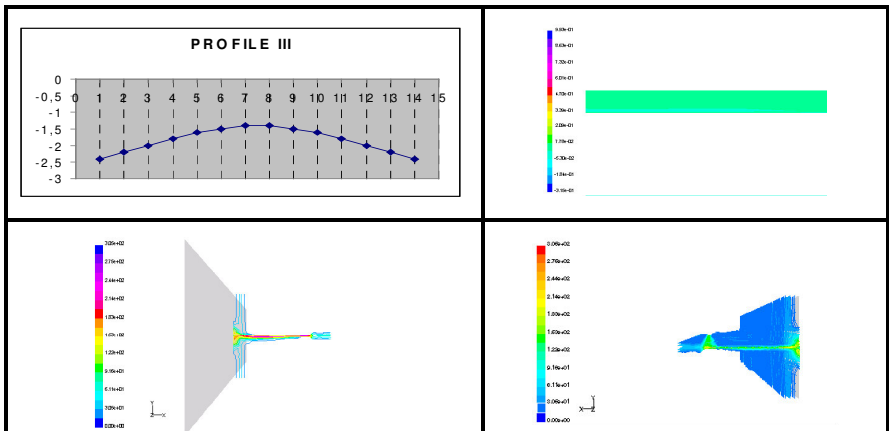


Figura 7: Diseño del perfil 3 de la cuchilla. Contorno de la presión a la salida de la cuchilla en la boquilla zona 4 – 6. Sección transversal del contorno de velocidad. Contorno de velocidad en la región de impacto.

PRUEBAS EN LINEA Y CONCLUSIONES

Las pruebas de los nuevos diseños de cuchilla se están realizando en ACERALIA, desde Octubre de 1999. Se han probado los perfiles 1 y 3, estando pendientes de realizarse las pruebas sobre el perfil 2. En las

pruebas realizadas hasta la actualidad se confirma el ahorro de zinc para los nuevos diseños de cuchillas, siendo este ahorro mayor para el perfil 3.

El perfil muestra mejoras en el consumo de Zn por superficie de aproximadamente un 5% si bien este comportamiento se produce con uso de las colas de castor. El método muestra por tanto su fiabilidad y demuestra que el uso de estas técnicas es factible para la modelización del proceso siendo el siguiente paso la búsqueda del perfil más adecuado para cada uno de los materiales a recubrir

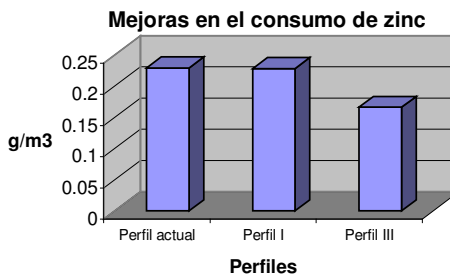


Figura 8: Ahorro del consumo

Referencias

- [Hin75]. Hinza J.O.. Turbulence.Mc Graw-Hill Publishing Co., New York, 1975
- [Hirt81]. Hirt C.W. and Nichols B.D.. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. J. Comput. Phys., 39:201-225, 1981

- [Ram96]. Ramanan N. and Engelman M. S.. An Algorithm For Simulation Of Steady Free Surface Flows. Fluids Dynamics International, 22:103-120, 1996
- [Tho76]. Thornton J. A. and Graff H. F.. An Analytical Description Of The Jet Finishing Process For Hot-Dip Metallec Coatings On Strip. Metallurgical Transactions B 7B:607-618, December 1976
- [Shi95]. Shih T.-H, Liou W.W., Shabbir A., Zhu J.. A New $k - \epsilon$ Eddy-Viscosity model for High Reynolds Number Turbulent Flows- Model Development and Validation. Computers Fluids, 24(3):227-238, 1995.

Correspondencia

Eliseo Vergara González. Universidad de Oviedo. Área de Proyectos de Ingeniería. Edificio de Marina Civil. Campus de Viesques. Carretera de Castiello s/n. Gjón. ASTURIAS

Tel. : + 34 98-518-24-34 FAX: + 34 98-518-24-35