

MODELIZADO POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL DEL PROCESO DE SKIN-PASS

Rubén Lostado (ruben.lostado@unirioja.es)

Alpha Verónica Pernía (alpha.pernia@unirioja.es)

Eduardo Martínez de Pisón (eduardo.mtnezdepison@unirioja.es)

Roberto Fernández (robfermar@gmail.com)

Grupo EDMANS. (<http://www.mineriadatos.com>). Universidad de La Rioja

Manuel Castejón (manuel.castejon@unileon.es)

Universidad de León

Abstract

The process of laminated sheet or skin-pass has been used in the industry of the steel and studied for many years. Several mathematical models and later, models of finite elements has been proposed throughout all these years.

The authors of this work has developed a model using the method of the finite elements of the process of skin-pass, considering characteristics as deformable Rollers, diameter of the rollers, models of friction, models of material and speed of the sheet.

Besides the model of finite elements, there has developed a model of prediction (based on artificial intelligence) using tools of data mining, and for finish with the exposition of an optimization of the process of skin-pass.

Keywords: *Skin-pass, Artificial intelligence, Optimization*

RESUMEN:

El proceso de laminado de chapa o skin-pass ha sido utilizado en la industria del acero y estudiado desde hace muchos años. Varios modelos matemáticos y posteriormente, modelos de elementos finitos se han propuesto a lo largo de todos estos años.

Los autores de este trabajo han desarrollado un modelo utilizando el método de los elementos finitos del proceso de skin-pass, teniendo en cuenta características como rodillos deformables, diámetro de los rodillos, modelos de fricción, modelos de material y velocidad de la chapa.

Además del modelo de elementos finitos del proceso, se ha desarrollado un modelo de predicción (inteligencia artificial) utilizando herramientas de minería de datos, y para finalizar con el planteamiento de una optimización del proceso de skin-pass

Palabras clave: *Skin-pass, Inteligencia artificial, Optimización*

1. Introducción

El proceso de Skin-pass es un proceso industrial bien conocido para la obtención de chapa de acero de espesor pequeño y de planitud controlada.

El proceso consta de 2 rodillos laminadores que giran en diferente dirección, separados una distancia, y por la que pasa la chapa que se quiera reducir de espesor o aplanar.

En la mayoría de los procesos, la chapa va precargada con valores de σ_2 (tensión a la salida) y de σ_1 (tensión a la entrada), el espesor de la chapa en la entrada del rodillo se denomina t y el espesor a la salida $t(1-r)$ siendo r el % de reducción del espesor de la chapa.

Para que la chapa pase a través de los rodillos y se pueda reducir su espesor, hay que aplicar una fuerza f sobre los rodillos de manera que sea capaz de mantener la distancia entre éstos, un par τ para girarlos y que éstos arrastren por fricción la chapa a través del hueco que queda entre ellos

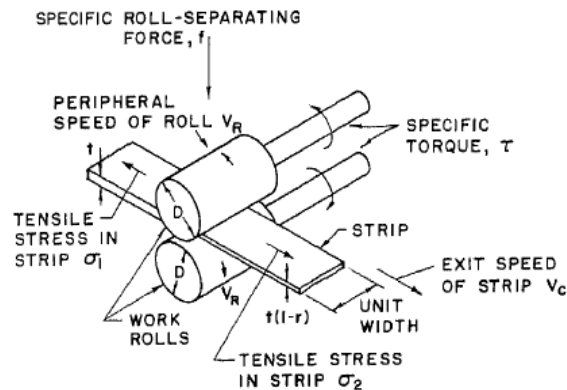


Figura 1. Esquema típico de un proceso de Skin-pass

Existen varias formas de modelar el proceso de Skin-pass (modelos teóricos, modelos de elementos finitos, modelos de inteligencia artificial...) siendo cada uno de ellos totalmente válido en la actualidad pero con ciertas ventajas e inconvenientes

La mayoría de los modelos estudiados, calculan las siguientes variables:

- τ : Par de giro sobre los rodillos para que arrastren la chapa
- p : Potencia necesaria para comunicar ese par
- f : fuerza necesaria para mantener los rodillos la distancia de separación requerida

2. Modelos teóricos:

La mayoría de los modelos teóricos están basados en las mismas suposiciones matemáticas y en el mismo método de resolución (**Slab Method**), los modelos matemáticos más conocidos y utilizados son:

2.1 Modelo de Von Karman

Basado en los trabajos de Von Karman (Von Karman, 1925), es el primer estudio teórico que se conoce del proceso de skin-pass en el que se trata el problema en 2D (problema de deformación plana), y no tienen en cuenta lo que ocurre en los bordes de la chapa, además de no tener en cuenta la velocidad de giro de los rodillos ni la de desplazamiento de la chapa (problema estático)

Encuentra una fórmula matemática para calcular la potencia consumida en el proceso de skin-pass (función de la velocidad angular de los rodillos)

$$p = k.r.\varpi.(h_1 - h_2) + \varpi \cdot \int_0^a p \cdot \frac{x}{r} \cdot \partial x \quad (1)$$

2.1 Modelo de Roberts

Basado en los trabajos de Roberts (Roberts, 1967), es el modelo matemático mas avanzado y con él se puede calcular la fuerza de separación de los rodillos en función de la distribución de presiones sobre la zona de contacto, del coeficiente de fricción, de la velocidad de la chapa y de la velocidad de giro de los rodillo.

$$f = \left[\frac{\alpha \sqrt{\frac{D}{E} + \sqrt{\frac{\alpha^2 \cdot D}{E} + \sqrt{8 \cdot D \cdot t \cdot r} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_e} - \frac{\alpha^2 \cdot \mu \cdot D \cdot (2-r)}{2 \cdot E \cdot t \cdot (1-r)} \right)}}}{2 \cdot \left(\frac{1}{\sigma_e} - \frac{\alpha^2 \cdot \mu \cdot D \cdot (2-r)}{2 \cdot E \cdot t \cdot (1-r)} \right)} \right]^2 \quad (2)$$

El par que han de hacer los rodillos para pasar la chapa a entre el hueco que los separa, es función de las precargas y del propio material

$$\tau = \frac{D \cdot t \cdot \sigma_e}{4} \cdot \left[r \left(1 + \frac{\sigma_2}{\sigma_e} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_e} \right) \right] \quad (3)$$

3. Modelos de Elementos finitos (fem)

El primer modelo de elementos finitos planteado para resolver el proceso de Skin-pass, es el de Tamano (Tamano, 1975) en el que supone que el rodillo es rígido, la chapa elasto-plástica y no existe deslizamiento entre rodillo y chapa (es planteado como un contacto sin deslizamiento o como una condición de contorno de no desplazamiento) y el problema resuelto en régimen estacionario. Además en este caso, no se utiliza ningún software comercial, desarrollando un software propio para resolver el problema.

Otros autores como Mori (Mori, Oskada and Oda, 1982) usan el método de los elementos finitos para resolver el problema de skin-pass y supone que el rodillo es rígido, y el material de la chapa tiene un comportamiento elasto-plástico. El problema se resolvió en régimen estacionario y transitorio, y considera que en la zona de contacto el rozamiento es constante.

Investigaciones más recientes, como las de Liu (Liu, Hartley, Sturgess and Rowe, 1985) utilizan la teoría de Hitchcock (Hitchcock, 1935) en la formulación del problema de elementos finitos para tener en consideración la deformación de los rodillos que actúan sobre la chapa.

Los estudios mas avanzados realizados son los de Kainz (Kainz, Krimpelstätter and Zeman, 2003) en los que utilizan el programa comercial de elementos finitos **ABAQUS®** para desarrollar un modelo con la capacidad de obtener el campo de velocidades, fuerza, par, distribución de presiones normales y tangenciales, así como la localización del punto neutral de la zona de contacto

3.1 Modelo de elementos finitos planteado:

El modelo planteado es un modelo simétrico de 2 dimensiones (deformación plana), y se considera un espesor unidad, con lo que los resultados obtenidos serán por unidad de longitud de chapa

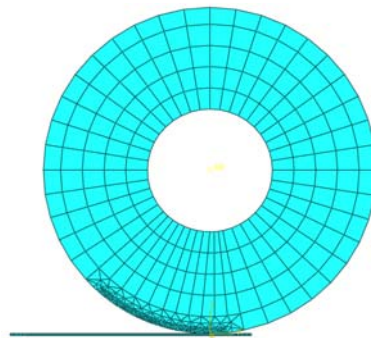


Figura 2. Modelo de elementos finitos planteado

Para el crear el modelo de elementos finitos se ha tenido en cuenta lo siguiente:

- **Rodillos Elásticos:**

La decisión de utilizar rodillos rígidos o deformables en el modelo de elementos finitos requiere un estudio previo. Existe una serie de ventajas al usar rodillos rígidos como puede ser un menor tiempo de cálculo para el ordenador, pero con la desventaja que las tensiones que aparecen en la zona de contacto son muy elevadas (irreales) obligando a la utilización de rodillos deformables.

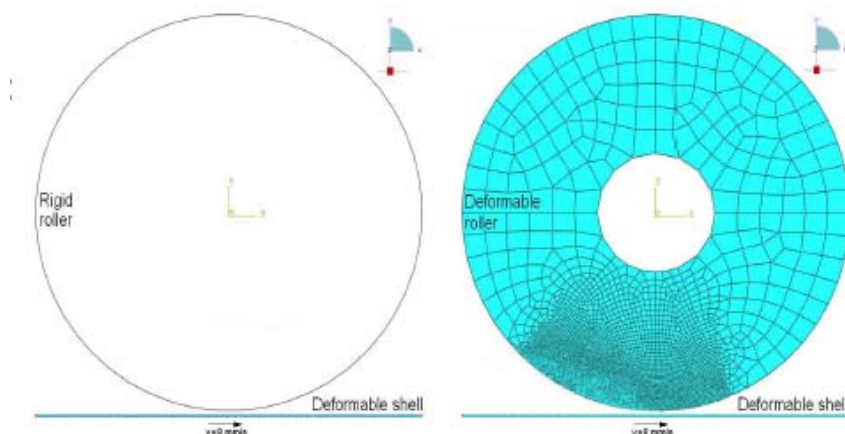
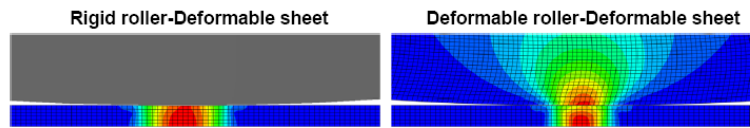


Figura 3. Rodillo rígido y deformable

Von Mises stress distribution



Von Mises stress comparison in the sheet's upper surface:

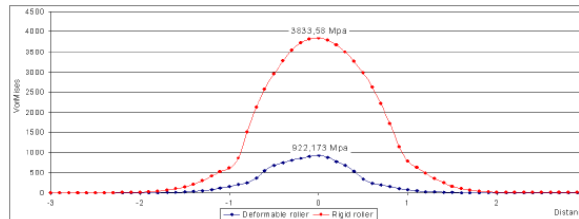


Figura 4. Distribución de tensiones en la zona de contacto para el rodillo rígido y deformable

- **Modelos de Material:**

En el problema de elementos finitos estudiado, se define un comportamiento elasto-plástico para el material de la chapa y se opta por utilizar un modelo de Ramberg-osgood (Ramberg and Osgood, 1943) para definir la curva elasto-plástica del material.

Este modelo de plasticidad se define con 3 parámetros y es apropiado para materiales dúctiles que van a sufrir deformación plástica en procesos de laminado

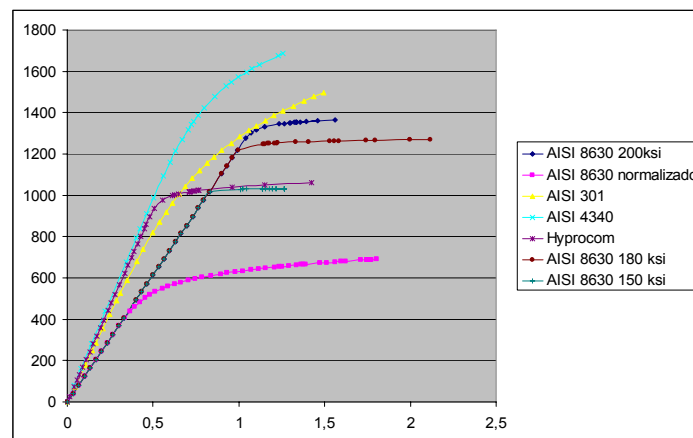


Figura 5. Curva elasto-plástica para diferentes tipos de acero

Las ecuaciones del modelo de Ramberg-osgood descomponen la deformación del material en parte elástica y parte plástica, suponiendo que la parte plástica se define mediante una ley exponencial

$$e_{total} = e_{elastica} + e_{plastica} = \frac{S}{E} + 0,002 \cdot \left(\frac{S}{S_{0,2\%}} \right)^n \quad (4)$$

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{S_{0,2\%}}{S_{0,01\%}}\right)} \quad (5)$$

- **Modelos de Fricción:**

El modelo de fricción empleado, es un modelo basado en las leyes de fricción de Coulomb con la ventaja de eliminar la no linealidad presentada en éste modelo al pasar de los valores de coeficiente de fricción estático a dinámico.

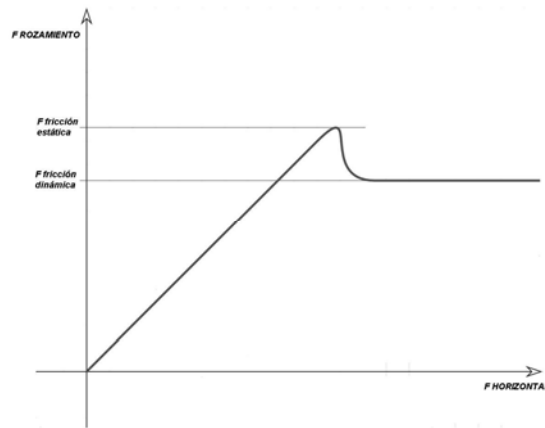


Figura 6. Variación de la fuerza de rozamiento una vez alcanzado el movimiento

El modelo empleado en las simulaciones esta basado en los trabajos de Oden y Martins (Oden and Martins, 1985) y tiene en cuenta la variación del coeficiente de fricción en función del ratio de deslizamiento entre la superficie de la chapa y la del rodillo.

La función de variación del coeficiente de fricción es la siguiente:

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) \cdot e^{-d \cdot \delta} \quad (5)$$

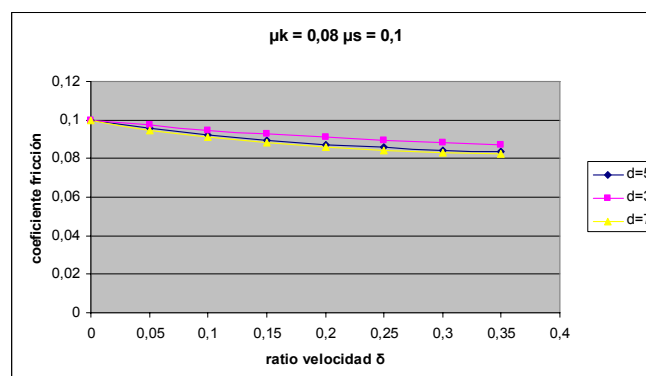


Figura 7. Variación de los coeficientes de fricción

En función del tipo de superficie de rodillo, de la velocidad angular del rodillo y de la velocidad de salida de la chapa, se obtienen los parámetros de ratio de velocidad y coeficiente de decaimiento.

Los distintos tipos de rugosidades presentes en la superficies de los rodillos, se detallan a continuación, y son a partir de éstas muestras de las que se obtienen los distintos valores de μ_k y μ_s experimentalmente

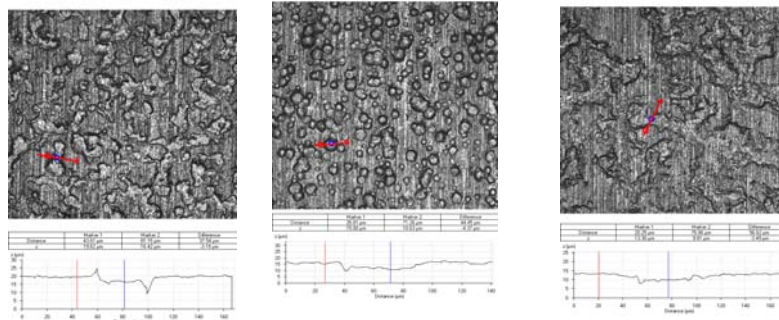


Figura 8. Tipos de rugosidades presentes en los rodillos

4 Combinación del Modelo de elementos finitos y del modelo de Predicción:

Esta técnica es bastante reciente, y consiste en realizar un primer modelo de elementos finitos (FEM) y con los datos obtenidos de la simulación de éste primer modelo de elementos finitos, crear las entradas de un modelo matemático de predicción (en este caso de redes neuronales).

La ventaja principal del modelo de predicción frente al modelo de elementos finitos es que son modelos menos costosos de resolver una vez que están bien formulados.

Estos modelos de predicción, presentan el inconveniente de que requieren de cierta cantidad de datos (obtenidas del modelo de elementos finitos) para entrenar y validar éste modelo.

Uno de los trabajos mas interesantes es el de Krimpelstätter (Krimpelstätter, Hohenbichler, Finstermann and Zeman, 2007) ya que desarrollaron un modelo de predicción para un proceso de skin pass de chapa muy delgada y muy dura, y para predecir la fuerza y el par que han de hacer los rodillos para desplazar la chapa.

4.1 Modelo de elementos finitos y Modelo de red neuronal:

Se obtienen 3 modelos de redes neuronales diferentes, uno para el par (τ), para la potencia (p) y para la fuerza (f)

- **Modelo de red para la fuerza:**

Las variables de entrada del modelo son: diámetro de los rodillos, diferencia de espesor de entrada menos el de salida (h_1-h_2), precarga, S 0.2%, S0.001%, μ_k , μ_s , d, δ , velocidad angular del rodillo y velocidad de salida de la chapa

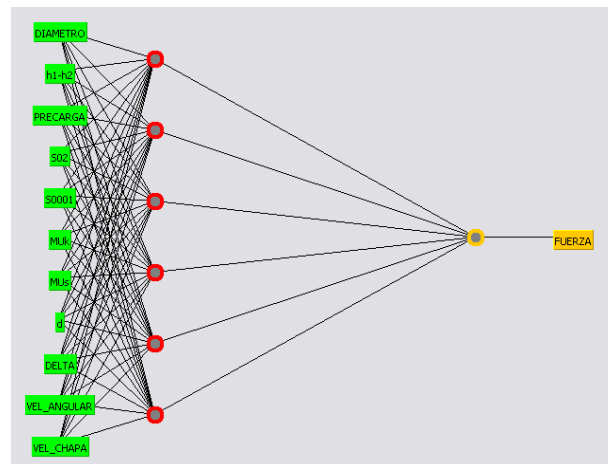


Figura 9. Modelo de red neuronal para calcular la fuerza

- **Modelo de red para el par:**

Las variables de entrada del modelo son: diámetro de los rodillos, diferencia de espesor de entrada menos el de salida (h_1-h_2), precarga, S 0.2%, S0.001%, μ_k , μ_s , d, δ , velocidad angular del rodillo y velocidad de salida de la chapa

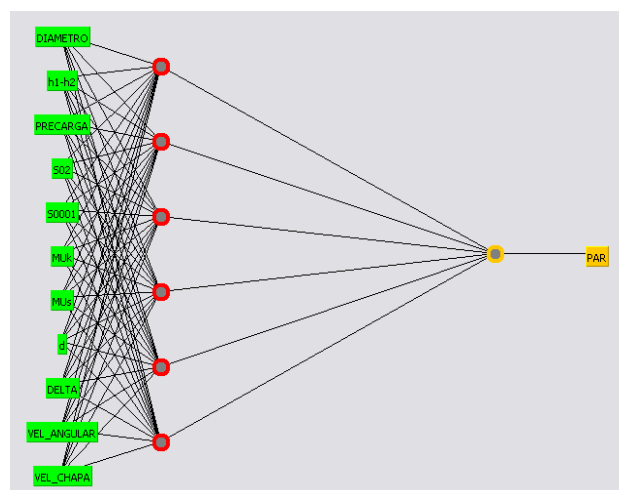


Figura 10. Modelo de red neuronal para calcular el par

- **Modelo de red para la potencia:**

Las variables de entrada del modelo son: diámetro de los rodillos, diferencia de espesor de entrada menos el de salida (h_1-h_2), precarga, fuerza, par, velocidad angular del rodillo y velocidad de salida de la chapa, en este caso, la potencia se puede calcular a través de la fuerza, el par y la velocidad angular de la chapa

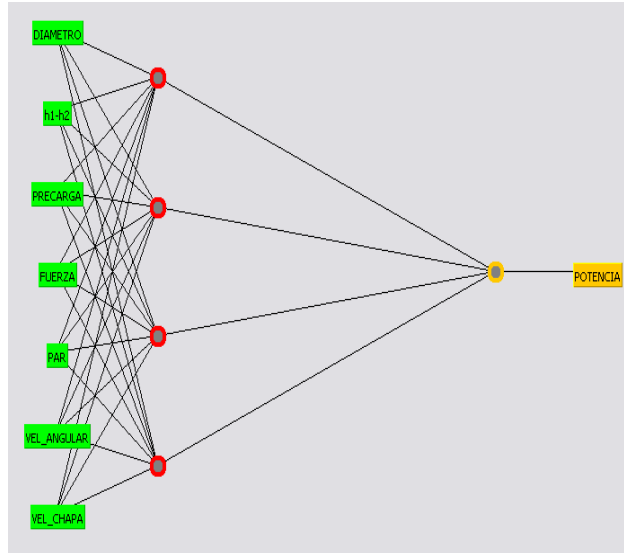


Figura 11. Modelo de red neuronal para calcular la potencia

4.2 Optimización:

Se pretende optimizar los datos de entrada del proceso con la finalidad de que los valores de velocidad de salida de la chapa sean máximos, y el valor de la fuerza, el par y la potencia empleada en el proceso de skin-pass sean lo mínimo posibles

Para ello definen una serie de función a minimizar (funciones potenciales ϕ_1 , ϕ_2 y ϕ_3) partiendo de las funciones obtenidas de los modelos de Fuerza, Par y potencia

Fuerza = f (D, h1-h2, prel, S 0.2%, S0.001%, μ_k , μ_s , d, δ , w, v)

Par = g (D, h1-h2, prel, S 0.2%, S0.001%, μ_k , μ_s , d, δ , w, v)

Potencia = h (D, h1-h2, prel, F, par, w, v)

$$\text{función } \phi_1 = \frac{\text{Fuerza} \cdot \text{Par} \cdot \text{Potencia}}{v} \quad (6)$$

$$\text{función } \phi_2 = \frac{\text{Fuerza} \cdot \text{Par}}{v} \quad (7)$$

$$\text{función } \phi_3 = \frac{\text{Par} \cdot \text{Potencia}}{v} \quad (8)$$

Las entradas óptimas se pueden obtener haciendo:

$$0 = \frac{\partial \text{función } \phi_1}{\partial v} \quad (9)$$

$$0 = \frac{\partial \text{función } \phi_2}{\partial v} \quad (10)$$

$$0 = \frac{\partial \text{función } \phi_3}{\partial v} \quad (11)$$

Y de este modo, se pueden obtener los valores óptimos de fuerza, par y potencia

Referencias

- Hitchcock J.H. "roll neck bearings", American Society of Mechanical Engineers Research Publication, 1935, 52p.
- Kainz A., Krimpelstätter K. and Zeman K. "FE - Simulation of Thin Strip and Temper Rolling Processes", ABAQUS Austria Users' Conference, November 2003, pp. 24-25.
- Krimpelstätter K., Hohenbichler G., Finstermann G. and Zeman K. "New non-circular arc skin pass model", Ironmaking and steel, vol 34, N° 4, 2007, pp. 295-302.
- Liu C., Hartley P., Sturgess C.E.N. and Rowe G.W. "Elastic-Plastic finite element modeling of cold rolling of strip", International Journal of Mechanical Sciences, 27, 1985, pp. 531-541.
- Mori K., Oskada K. and Oda T. "Simulation of plane strain rolling by rigid plastic finite element method", International Journal of Mechanical Sciences, 24, 1982, pp. 519-527.
- Oden, J. T. y J. A. C. Martins, "Existence and uniqueness results for dynamic contact problems with nonlinear normal and friction interface laws", Non-Linear Analysis, Volume 11, Issue 3, 1987, pp. 407-428.
- Roberts W.L. "A simplified cold rolling model", Iron and steel engineer 42 (10), 1965, pp. 75-87.
- Ramberg, W., and Osgood, W. R. "Description of stress-strain curves by three parameters", National Advisory Committee For Aeronautics, Washington DC, 1943, Technical Note No. 902.
- Tamano T. "Finite element analysis of steady flow in metal processing", Transactions of the iron and steel institute of japan 16 (2), 1976, pp. 92-97.
- von Karman T. "On the theory of rolling", Journal for Applied. Mathematics and Mechanics, Vol. 5, 1925, pp. 139-141.
- Witten I. H. and Frank E. "Data Mining: Practical machine learning tools and techniques", 2nd Edition, Morgan Kaufmann, San Francisco, 2005.

Agradecimientos

Los autores dan las gracias a la dirección general de investigación y al ministerio de ciencia e innovación por el apoyo financiero de los proyectos **DPI2006-03060**, **DPI2006-14784**, **DPI-2006-02454** y **DPI2007-61090**, y a la unión europea, por el proyecto "Development of an innovative hybrid procedure for combining tension-levelling and skin pass rolling" (**HYPROCOM**) (**RFS-PR-06035**).