

APLICACIONES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS AL ESTUDIO DE PROCESOS DE LAMINACIÓN DE CHAPAS

Miguel A. Cavaliere, Rita G. Toscano,
Marcela B. Goldschmit y Eduardo N. Dvorkin
Centro de Investigación Industrial, FUDETEC
Av. Córdoba 320, 1054 Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

El presente trabajo muestra como el método de los elementos finitos se constituye en una herramienta imprescindible para analizar los diferentes procesos que tienen lugar durante la laminación de chapas planas de acero. Se describe la formulación empleada. Se presenta la aplicación a la laminación en caliente de chapas y la validación mediante experiencias llevadas a cabo en planta. También se presenta el análisis del proceso de laminación -temperizado que se realiza con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas de la chapa.

INTRODUCCION

La laminación de chapa puede efectuarse en caliente o en frío según los objetivos que se quieran obtener con el proceso. En la laminación en caliente la pieza que está siendo laminada no sólo cambia de forma sino que su temperatura y su microestructura evolucionan. El proceso se lleva a cabo en una serie de bastidores que contienen y soportan a los rodillos de laminación. El caso más general que se analiza es el del bastidor de 4 rodillos en alto que se presenta en la Figura 1. En la misma se representan los rodillos superiores, se indican las fuerzas que actúan sobre los mismos (F fuerza de bending y P reacción del bastidor) y se muestran las distribuciones de fuerza separatriz (fuerza que la chapa ejerce sobre los rodillos de trabajo) y de presión de contacto ejercida por el rodillo de trabajo sobre el de respaldo.

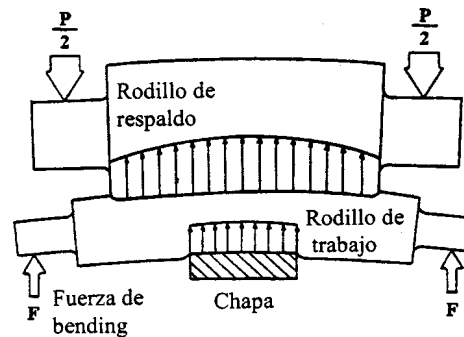


Figura 1: Esquema de los rodillos de laminación (caso 4 en alto)

Dada la magnitud de las fuerzas en juego los rodillos de laminación se deforman y sufren un proceso de desgaste. Este último no se modela con elementos finitos sino que se utilizan formulas empíricas ajustadas experimentalmente para su predicción. Asimismo están sometidos a la acción del calor por lo que desarrollan un perfil de temperatura que produce la dilatación de los mismos.

FORMULACION DEL PROBLEMA

Deformación plástica de la chapa

En el proceso de laminación las deformaciones plásticas predominan sobre las deformaciones elásticas con lo cual es posible despreciarlas y utilizar una relación constitutiva rígida/viscoplástica con una función de fluencia de Von Mises junto con una ley de flujo plástico asociada [1] que, por ej., para el caso perfectamente plástico resulta:

$$S_{ij} = 2\mu \dot{\varepsilon}_{ij} \quad \text{siendo} \quad \mu = \frac{\sigma_Y}{3\dot{\varepsilon}} \quad \text{y} \quad \dot{\varepsilon} = \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} \right)^{1/2} \quad (1)$$

donde:

S_{ij} : componentes cartesianas del tensor de tensiones desviadoras,

$\dot{\varepsilon}_{ij}$: componentes cartesianas del tensor de tasa de deformación,

$\mu(\dot{\varepsilon})$: viscosidad variable función de la tasa de deformación efectiva,

σ_Y : tensión de fluencia.

De esta manera, y despreciando además las fuerzas de inercia, el proceso de deformación plástica de la chapa se modela como un flujo incompresible no lineal, lo que se denomina Formulación de Flujo [2]. La incompresibilidad se impone por medio de la técnica de Lagrangeanos Aumentados [3], lo cual tiene la ventaja de disminuir el mal condicionamiento que producen otras técnicas como, por ej, la penalización.

El uso del método de las pseudo-concentraciones [4,5], que se basa en definir una variable "c" (denominada pseudo-concetración) cuyo valor indica la presencia o ausencia de material, permite modelar las superficies libres y tener en cuenta las condiciones de contacto con las herramientas utilizando una malla fija (o en movimiento con una velocidad prescrita arbitrariamente) dentro de la cual el material fluye. En la Figura 2 se observa la malla de elementos finitos y en color gris oscuro el material que esta siendo laminado (que corresponde a $c \geq 0$). Esta técnica evita tener que efectuar remallados pero requiere que se resuelvan ecuaciones diferenciales de transporte para la pseudo-concentración "c" para lo cual se utiliza un algoritmo SUPG [6].



Figura 2 : Malla de elementos finitos

Para la implementación de la fricción entre los rodillos y la chapa hemos utilizado dos modelos: fricción constante y Coulomb [7].

Mayores detalles acerca de la implementación mediante elementos finitos de esta formulación en la cual se interpolan tres campos (velocidades, velocidades de deformación y presiones) pueden consultarse en nuestras publicaciones [8-16]. Como resultado se obtienen las tasas de deformación, las deformaciones y la distribución de la fuerza separatriz sobre los rodillos de laminación.

Deformación elástica de los rodillos de laminación

La deformación elástica que sufren los rodillos de laminación al estar sometidos a la acción de la fuerza separatriz se manifiesta básicamente de dos modos: flexión y aplastamiento. En los bastidores 4 en alto, el contacto entre los rodillos de trabajo y respaldo es afectado por la deformación elástica lo que introduce una no-linealidad de tipo geométrica. Una descripción completa del problema requeriría una malla tridimensional de elementos finitos y la resolución del problema sería muy costosa.

El esquema de resolución que se adoptó consiste en modelar la deformación por flexión de los rodillos utilizando elementos finitos de viga (elementos hermiticos que incluyen la deformación por corte) y superponer el efecto del aplastamiento calculado a partir de la solución elástica [17] correspondiente a un sólido semi-infinito cargado por una fuerza distribuida normal al plano (problema de Boussinesq) con lo cual se desprecia la curvatura del rodillo.

En la Figura 3 se observa que la discretización de los rodillos de trabajo y respaldo en la zona de posible contacto se ha efectuado de forma tal que los nodos en ambos rodillos resulten apareados a los efectos de implementar un algoritmo de contacto "nodo a nodo". Entre cada par de nodos coincidentes se introduce lo que hemos dado en llamar "*i*-ésimo elemento de Hertz" el cual calcula la brecha entre rodillos (función de la corona mecánica, de la corona térmica y de la deformación por flexión de los rodillos) y tiene en cuenta el aplastamiento de la superficie de los rodillos que se produce cuando la brecha entre los mismos se cierra y se establece una fuerza de contacto. Cada uno de estos elementos permite calcular el aplastamiento sobre toda la superficie del rodillo causado por una fuerza de contacto P_i que actúa sobre una superficie de contacto rectangular de lados D y b , siendo este último calculado a partir de la fórmula de Hertz para cilindros en contacto [18].

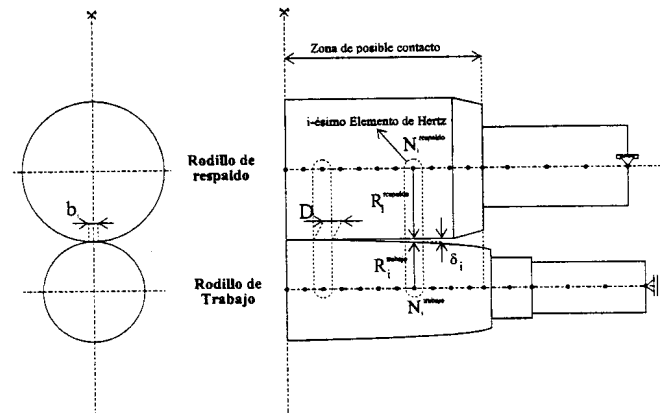


Figura 3 : Discretización del problema de flexión, aplastamiento y contacto entre rodillos

De esta forma se plantea un sistema de ecuaciones no lineales que se resuelve por el método de Newton dando por resultado la distribución de la presión de contacto entre los rodillos. Una descripción detallada del problema puede consultarse en nuestras publicaciones [19,20]. En los casos en que el bastidor tiene solamente dos rodillos únicamente debe tenerse en cuenta el aplastamiento que sufre el rodillo que está en contacto con la chapa.

Acoplamiento del problema

La formulación adoptada para el modelado de la deformación plástica de la chapa corresponde a una descripción euleriana mientras que la descripción adoptada para el modelado de la deformación de los rodillos es lagrangeana. Los detalles del acoplamiento de ambas formulaciones se describen en [15,16,19,20]

APLICACIONES INDUSTRIALES

Evolución de la corona térmica

Por lo general, los rodillos no tienen un diámetro constante sino que por el contrario se les efectúa un maquinado para que, por ejemplo, el diámetro en el centro sea 100 micrones mayor que en los extremos (corona mecánica positiva). Durante el proceso de laminación los rodillos adquieren un perfil térmico lo que origina una variación transversal del diámetro de los mismos debido a la dilatación térmica (corona térmica) de magnitud comparable con la corona mecánica. Para el caso de la laminación en caliente de chapas se empleó un modelo de transferencia de calor axilsimétrico transitorio para predecir la evolución de la temperatura de los rodillos, dado que estos se calientan mientras están en contacto con la chapa, a la vez que están permanentemente refrigerados. En la figura 4 se aprecia la secuencia de calentamiento-enfriamiento del rodillo para el caso de 3 chapas.

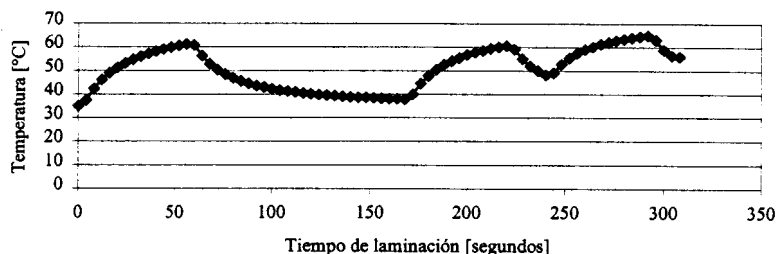


Figura 4 : Evolución de la temperatura superficial del rodillo

Laminación en caliente

Desde el punto de vista dimensional el objetivo del proceso es obtener chapa de espesor constante en sentido longitudinal y con un perfil transversal de espesores caracterizado por el valor de C_{40} (ver Figura 5) deformando todas las fibras en forma uniforme para evitar problemas de forma, como los mostrados en la Figura 6.



$$C_{40} = t_3 - \frac{(t_1 + t_2)}{2}$$

Figura 5 : Perfil de la chapa y definición de corona a 40 mm



Figura 6 : Problemas de forma de la chapa

En publicaciones previas se ha presentado la validación de nuestra modelación con mediciones industriales efectuadas a la salida del tren desbastador (que constituye una etapa intermedia en el proceso) [16,21]. En la Figura 7 se presenta la comparación entre los resultados predichos por el modelo y las mediciones efectuadas a la salida del tren terminador, o sea, el producto final de la laminación en caliente.

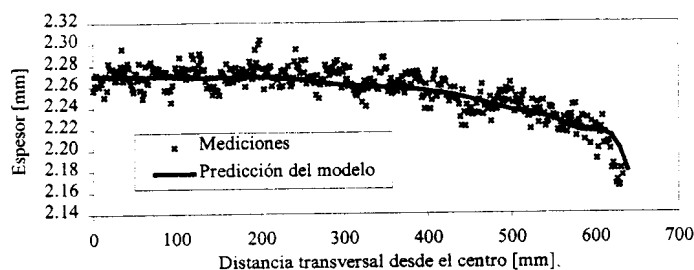


Figura 7 : Validación del modelo a la salida del tren terminador

La simulación por elementos finitos permite analizar el efecto de cada una de las variables que afectan el proceso de laminación. En la Figura 8 se presenta el efecto de variar la fuerza de bending (ver Figura 1) sobre el perfil de la chapa para distintos anchos de chapa. En la Figura 9 se observa el efecto del bending sobre la distribución de presiones de contacto entre rodillos.

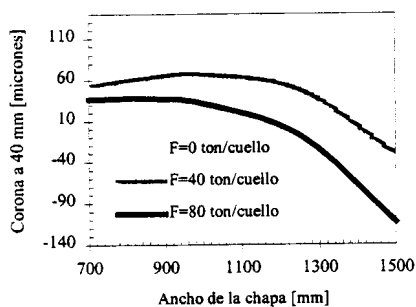


Figura 8 : Efecto del bending sobre la corona

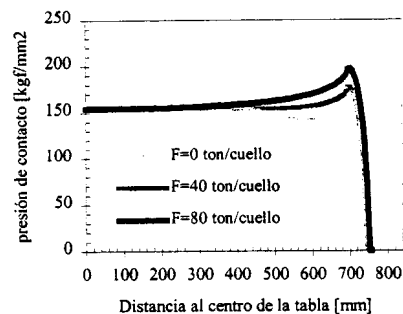
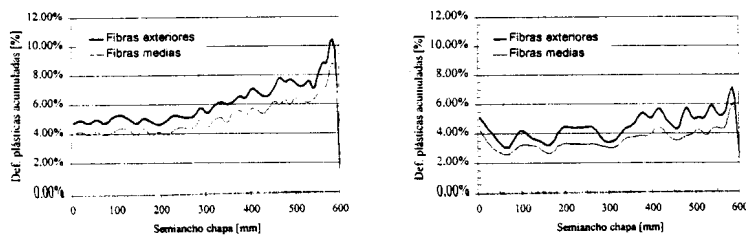


Figura 9 : Efecto del bending sobre la presión de contacto

Proceso de laminación - temperizado

En el proceso de laminación - temperizado a la chapa se la lamina en frío aplicándosele una pequeña reducción mientras se la mantiene tensionada longitudinalmente. El objetivo de este proceso es mejorar las propiedades mecánicas de la chapa. En el análisis por elementos finitos efectuado se calcula la deformación plástica acumulada en la chapa y se analiza su distribución en espesor y en ancho bajo dos condiciones de tiro. En la Figura 10 se observa que la deformación acumulada en la superficie de la chapa es mayor que en el centro (efecto de "skin pass") y que la aplicación de tiro uniformiza transversalmente la deformación acumulada en la chapa con lo cual se homogeneizan las propiedades mecánicas.



a) caso sin tiro

b) caso con tiro

Figura 10 : Distribución de deformaciones efectivas en el espesor de la chapa

CONCLUSIONES

Se presento la formulación de elementos finitos empleada para modelar el proceso de laminación de chapa de acero junto con las aplicaciones industriales. En el modelado de la deformación plástica de la chapa se considero al problema como isotérmico y no se tuvo en cuenta la evolución de la microestructura. Actualmente se esta implementando el acoplamiento termo-mecánico para luego poder analizar la evolución de la microestructura.

REFERENCIAS

- [1]Perzyna, P., *Fundamental Problems in Viscoplasticity*, Advance in Applied Mechanics, 9, Academic Press, New York, 1966.
- [2]Zienkiewicz, O.C., Jain, P.C. and Oñate, E., *Flow of Solids During Forming and Extrusion: Some Aspects of Numerical Solutions*, Int. J. Solid Struct., Vol. 14, 1977, págs. 15-28.
- [3]Luenberger, D.G., *Linear and Nonlinear Programming*, Addison-wesley, Reading MA, 1984.
- [4]Thompson, E., *Use of the pseudo-concentrations to follow creeping viscous flows during transient analysis*, Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol 6, 1986, págs. 749-761.
- [5]Thompson, E., Smelser, R.E., *Transient analysis of forming operations by the pseudo-concentrations method*, Int. J. Num. Meth. Engrg., Vol 23, 1988, págs. 177-189.
- [6]Hughes, T.J.R., Brooks, A., *A Theoretical Framework for Petrov-Galerkin Methods with Discontinuous Weighting Functions: Application to the Streamline-Upwind Procedure*, Finite Elements in Fluids (Ed. R.H. Gallagher et al), 4, John Wiley & Sons, New York, 1982, págs. 47-65
- [7]Backofen, W.A., *Deformation Processing*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1972.
- [8]Dvorkin, E.N. and Petöcz, E.G., *An effective technique for modelling 2D metal forming processes using the flow formulation and the pseudo-concentrations technique*, In: Proc. Third Int. Conf. Comput. Plasticity (Eds. D. R. J. Owen et al.), Pineridge Press, Swansea, 1992, págs 1037-1052.
- [9]Dvorkin, E.N. and Petöcz, E.G., *On the modelling of 2D metal forming processes using the flow formulation and the pseudo-concentrations technique*, Engng. Comp., Vol 10, 1993, págs 323-336.
- [10]Dvorkin, E.N., Cavaliere, M. A. and Goldschmit M., *A three field element via augmented Lagrangian for modelling bulk metal forming processes*, Computational Mechanics, Vol 17, N° 1-2, 1995, págs 2-9.
- [11]Dvorkin, E.N., Cavaliere, M. A. and Goldschmit M., *A three field element via augmented Lagrangian for modelling incompressible viscoplastic flows*, In: Proc. Fourth Int. Conf. Comput. Plasticity (Eds. D.R.J. Owen et al.), Pineridge Press, Swansea, págs 349-360, 1995.
- [12]Dvorkin, E.N., Goldschmit, M.B., Cavaliere, M.A., Amenta, P.M., Marini, O., Stroppiana, W. *2D Finite Element Parametric Studies of the Flat Rolling Process*, J. of Materials Proc. Technology, Vol 68, 1995, págs. 99-107.
- [13]Cavaliere, M.A. , Goldschmit M.B., Amenta, P.M., Dvorkin, E. N., *Modelado de Procesos de Conformado de Metales*, Mecánica Computacional, Vol. XVII, Publicación de la Asoc. Arg. de Mecánica Computacional, 1996, págs. 262-253.
- [14]Dvorkin, E.N., Goldschmit, M.B., Cavaliere, M.A., Amenta, P.M., *On the modelling of bulk metal forming processes*, Numerical Methods in Engineering '96, Proc. of the Second ECCOMAS Conf. on Numerical Methods in Engrg, Paris, 1996, págs. 725-730
- [15]Cavaliere, M.A., Goldschmit, M.B., Dvorkin, E.N. *3D modeling of bulk metal forming processes via the flow formulation and the pseudo-concentrations technique*, Proc. COMPLAS V, (Eds. D.R.J. Owen et al), Barcelona, 1997, págs 196-208.
- [16]Dvorkin, E.N., Cavaliere, M.A., Goldschmit, M.B., Amenta P.M., *On the modeling of steel product rolling processes*, Int. J. of Forming Processes (ESAFORM), Vol 1, 1998, págs. 211-242.
- [17]Love, A.E.H., *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, Dover Publications, 1944
- [18]Roark, R.J. and Young, W.C., *Formulas for Stress and Strain (5th Edition)*, Mc Graw-Hill, 1975
- [19]Dvorkin, E.N., Cavaliere, M.A., Zielonka, M.G., Goldschmit, M.B., *New Developments for the modeling of metal rolling processes*, Proc. European Conference on Computational Mechanics (ECCM'99), Munich, Alemania, 1999.
- [20]Cavaliere, M.A., Goldschmit, M.B., Dvorkin, E.N., *Finite Element Analysis of Steel Rolling Processes* (en referato)
- [21]Cavaliere, M.A., Goldschmit, M.B., Amenta, P.M., Dvorkin, E.N., *Finite Element Simulation of Rolling Processes*, Proc. Fourth World Congress on Computational Mechanics, Bs.As, Argentina, 1998