

ESTUDIO DE LA FRICCIÓN EN EL PROCESO SKIN-PASS MEDIANTE LA TÉCNICA DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Rubén Escribano-García

Manuel J. Alía-Martínez

Fernando Antoñanzas-Torres

Eduardo Alonso-García

Alpha V. Pernía-Espinoza

Grupo EDMANS (<http://www.mineriadatos.com>)

Universidad de La Rioja. España

Abstract

The slip of surfaces and the friction between them is critical phenomenon in many manufacturing processes. Specifically, several authors point out this phenomenon as the most important in rolling process study. Therefore, the friction knowledge and the ability of modelling it is a key element for improving various aspects in rolling processes. This work studies the variables involved in the friction phenomenon in the skin-pass processes. The idea is to build a model through finite element method taking into account aspects like roughness of the two surfaces, contact stresses and materials. The aim is to obtain a friction coefficient as function of the studied variables.

Keywords: *friction; slip; skin-pass; rolling; finite element method*

Resumen

El deslizamiento de superficies y la fricción entre ellas es un fenómeno crítico en muchos procesos de fabricación. Concretamente, varios autores señalan a este fenómeno como el más importante dentro del estudio de los procesos de laminado, por ello, el conocimiento de la fricción y la capacidad de modelarla se convierte en un elemento clave para la mejora de varios aspectos de los procesos de laminación. Este trabajo estudia las variables que intervienen en el fenómeno de fricción de los procesos de skin-pass para construir un modelo mediante elementos finitos considerando aspectos como la rugosidad de ambas superficies, la presión y los materiales. El objetivo es obtener un coeficiente de rozamiento en función de las variables estudiadas.

Palabras clave: *fricción; deslizamiento; skin-pass; laminado; método de los elementos finitos*

1. Introducción

En proceso Skin-Pass es un tipo de laminado que consiste en una pequeña reducción de espesor de la chapa (inferior al 2%) realizada en frío con el objetivo de alcanzar el espesor final deseado, conseguir unas propiedades mecánicas mejoradas (eliminación de la zona de fluencia y aumento de dureza) y un determinado acabado superficial evitando la aparición de la bandas de Lüders. En este tipo de procesos, los rodillos son movidos por la fricción producida en el contacto entre chapa y rodillos, lo que convierte a la fricción en un aspecto clave del Skin-Pass (Patula, 1979).

El proceso de laminado de chapa ha sido estudiado ampliamente desde hace décadas mediante métodos gráficos y teóricos que requerían algunas simplificaciones que implicaban una pérdida de precisión de los métodos. En los años setenta surgen los primeros estudios basados en el método de los elementos finitos (FEM) que permitieron desarrollar modelos más realistas (Tamano, 1976) pero aún con algunas simplificaciones, como el no-deslizamiento o los rodillos rígidos. Desde entonces la complejidad y realismo de los modelos ha ido en aumento considerando aspectos como la deformación de los rodillos (Fleck y Johnson, 1987), coeficiente de fricción variable (Chandra, 2004) o endurecimiento de la chapa.

Sobre la rugosidad superficial de productos laminados en frío se han realizado varios estudios experimentales en los últimos años, como (Gjønnnes, 1996), (Plouraboué y Boehm, 1999) y (Ahmed y Sutcliffe, 2000) que estudiaron las superficies de aluminios y de aceros inoxidables. Un estudio más amplio fue realizado por (Ma, 2002), en el que se estudió experimentalmente la influencia de la velocidad de giro de los rodillos, el porcentaje de reducción y el tipo de lubricación sobre la textura de chapas de acero laminadas en frío.

En (Kijima y Bay, 2008) se estudia con FEM, la influencia de la rugosidad y de la presión de contacto en el grado de transferencia de textura. El modelo de elementos finitos (FE), realizado en 2D, consistía en una herramienta rígida que realizaba un desplazamiento vertical para transferir la rugosidad a la chapa. La rugosidad de la herramienta consistía en arcos de circunferencia de igual diámetro y con una separación constante. En (Kijima y Bay, 2009) se comparan resultados FEM y experimentales en un proceso de transferencia de bandas transversales a chapas de acero. El modelo FEM consistía en una herramienta elástica que aplicaba cargas normales sobre una chapa elastoplástica de acero. Así, estudiaron la influencia de la presión y la lubricación en el grado de transferencia de estas bandas sobre la chapa.

2. Objetivos

Este trabajo es parte de un estudio que trata de desarrollar, mediante técnicas de elementos finitos y de minería de datos, un modelo del comportamiento del coeficiente de fricción dependiente de la presión, de la velocidad de deslizamiento, de los materiales y de las rugosidades en contacto. El objetivo final es utilizar este coeficiente en posteriores modelos FE de procesos de fabricación donde la fricción tiene gran importancia.

El presente artículo presenta una metodología que permite el uso de rugosidades reales en modelos FE con el objetivo de estudiar sus coeficientes de rozamiento.

3. Metodología

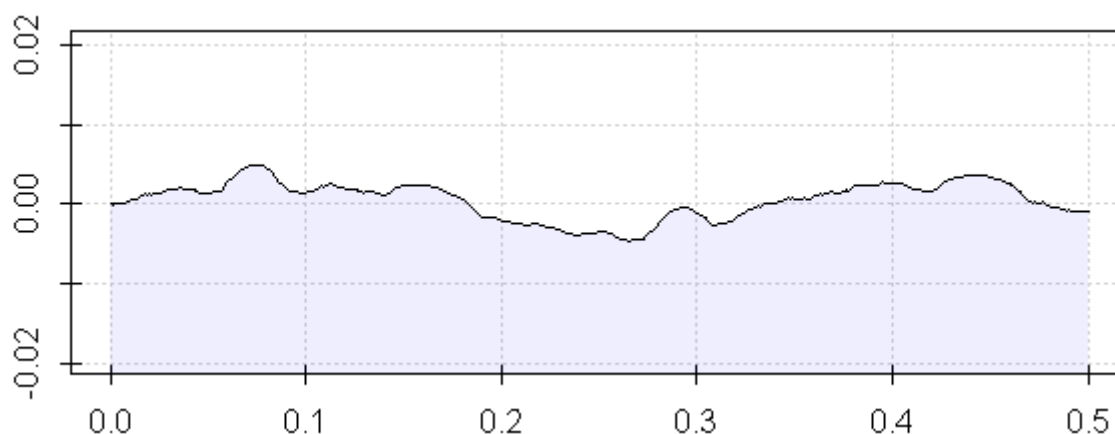
3.1 Modelización de la rugosidad estocástica

El perfil ejemplo de la Figura 1, de 0,5 mm de longitud, definido por 500 puntos de la forma (x,y), y Ra de 0.63 μm , corresponde a la superficie inicial, con rugosidad estocástica, de una

chapa previamente laminada que va a ser sometida a un proceso Skin-Pass. Como se puede ver en la Figura 1, la superficie de la chapa posee imperfecciones y estas pueden ser clasificadas como:

- Ondulaciones: son imperfecciones de baja frecuencia producidas por desajustes de las máquinas. Sin embargo, en este caso, al tratarse de un elemento delgado, esta forma se debe también a una curvatura de la chapa.
- Rugosidades: esta determinada por ciertas variables de los procesos de fabricación utilizados, como el estado superficial de los rodillos.
- Ruido: se trata de rugosidad de alta frecuencia y de ruido de medición.

Figura 1: Topografía superficial de la chapa

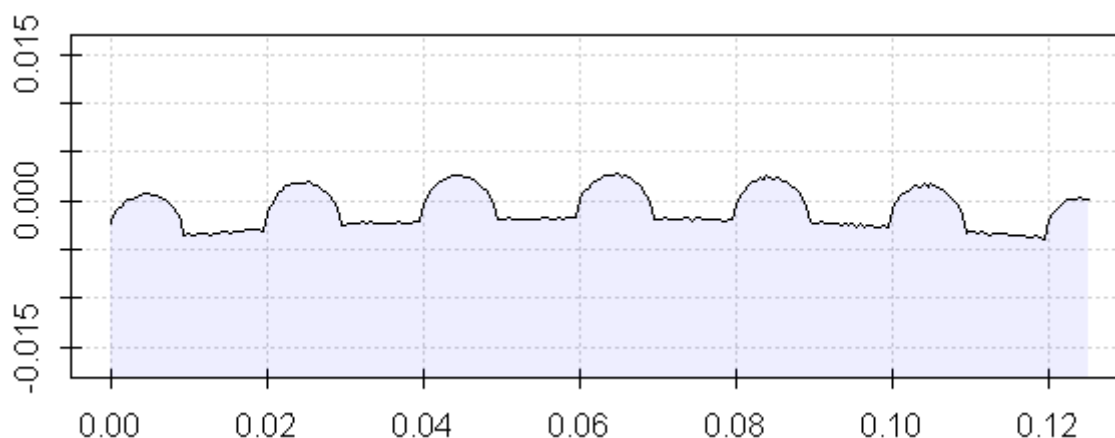


Para modelizar esta topografía, se ha desarrollado un programa en lenguaje R (software libre, www.r-project.org) basado en la transformada discreta de Fourier que separa un perfil a partir de unas frecuencias de corte dadas. Estas frecuencias son definidas en cada caso pero existen normas como la ASME B46,1-2002, que recomiendan ciertos valores. Por otra parte, hay que señalar que esta metodología se aplica al coeficiente de fricción producido únicamente por la *rugosidad*, ya que la fricción provocada por la ondulación será calculada por los propios análisis FE, y el cálculo de la fricción debida a la rugosidad de alta frecuencia requeriría el uso de elementos de tamaño muy reducido (inferior a la centésima de micra) de difícil implementación. Ésta última rugosidad (la de alta frecuencia), será tratada en el apartado 3.3.

3.2 Modelización de la rugosidad determinista

En el proceso Skin-Pass, los rodillos laminadores tienen una determinada topografía superficial que es importante debido a que los rodillos se mueven arrastrados por la chapa (rodillos no accionados). En este trabajo hemos estudiado una rugosidad de rodillo del tipo determinista, es decir, que tiene un patrón que se repite, como por ejemplo la que se consigue por medio del método *EBT* (Electron Beam Texturing). Esta propiedad determinista permite dibujar fácilmente la rugosidad con elementos geométricos (ver Figura 6), en este caso, mediante líneas y arcos de circunferencia. En este caso se ha estudiado una rugosidad con Ra de 1.27 μm .

Figura 2: Topografía superficial del rodillo



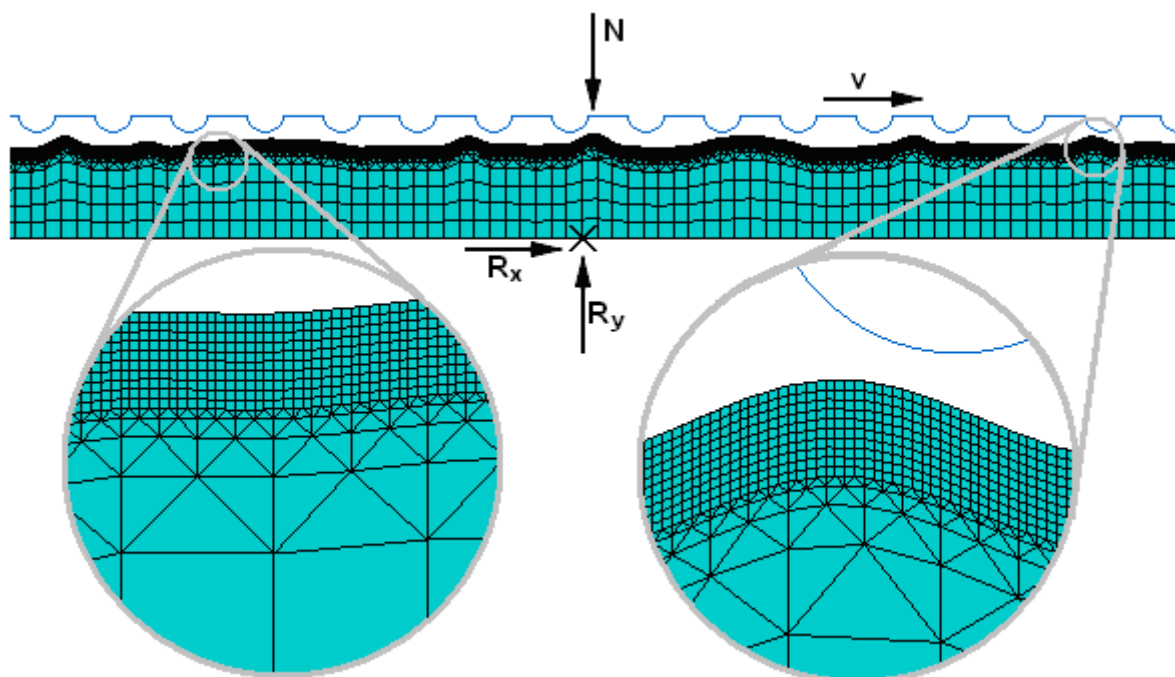
El proceso de modelizado ha consistido, como en la textura anterior, en separar las componentes ondulación (en este caso corresponde a la curvatura del rodillo), rugosidad y ruido. Después, siguiendo la metodología propuesta por (Escribano et al., 2011) se han determinado el número de picos, el radio de cada pico y la posición de su centro. Por último, se ha calculado el radio y la separación media de las circunferencias para dibujar la textura en un programa CAD y exportar los resultados a Abaqus®.

3.3 Modelo FE

Con el fin de estudiar el coeficiente de rozamiento se ha construido un modelo FE, mediante Abaqus/Explicit, que reproduce la zona de contacto entre un rodillo laminador y una chapa de un proceso Skin-Pass. Estos procesos se caracterizan por tener una relación radio/espesor de chapa muy grande lo que permite considerar al arco de contacto como un contacto plano (Kijima y Bay, 2007).

Mediante el software Abaqus® se ha construido un modelo 2D compuesto por dos cuerpos, tal y como se ve en la Figura 3. El primero modela la chapa y se trata de un cuerpo elastoplástico, con endurecimiento cíclico, de dimensiones 500 x 25 μm que presenta, en su cara superior, la rugosidad estocástica determinada en el apartado 3.1. De esta forma, se ha modelado únicamente una pequeña porción de la chapa que interviene directamente en el fenómeno del rozamiento. Por otro lado, el segundo cuerpo modela el rodillo y es totalmente rígido, de longitud 800 μm y con una rugosidad determinista construida mediante líneas y arcos de circunferencia de altura 10 μm respecto a su base. La simplificación como cuerpo rígido es válida debido a que la dureza superficial del rodillo es mucho mayor que la de la chapa, y adicionalmente, las reducciones y por tanto las presiones en el proceso de Skin-pass no son elevadas, lo que hace que las deformaciones en el rodillo sean despreciables. Además, su simplificación mediante arcos es posible debido a que la topografía del rodillo es determinista, es decir, la posición de los bultos es totalmente predecible. Estas dos simplificaciones reducen la complejidad del modelo haciéndolo más eficiente en tiempo de ejecución y en uso de memoria.

Figura 3: Configuración y mallado del modelo FE



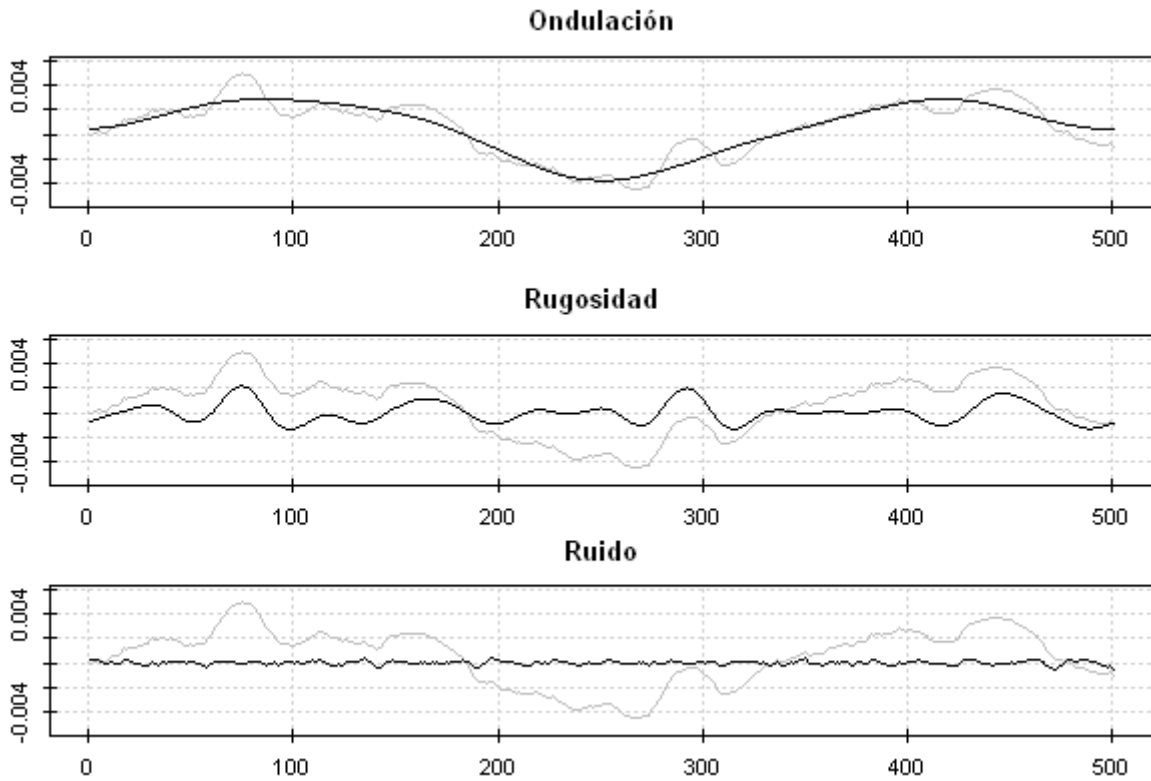
El cuerpo elastoplástico se encuentra totalmente fijo debido a condiciones de empotramiento que poseen sus dos extremos y su cara inferior. Por su parte, el cuerpo rígido se mueve a velocidad constante a la vez que se ejerce sobre él una fuerza normal al sentido de movimiento, generando así fuerzas de rozamiento. Anteriormente, se comentó que las rugosidades de alta frecuencia no son modeladas a través de FE por las dificultades que entrañan. Sin embargo, se hace necesaria su consideración debido a que generan rozamiento (Zhang, 2003), por lo que se ha aplicado un coeficiente de rozamiento constante de valor 0,01. El efecto conjunto de este rozamiento y el del rozamiento generado por el contacto de ambas rugosidades determinará el coeficiente de rozamiento entre ambas superficies.

El mallado del cuerpo elastoplástico se ha generado con elementos (CPE4R) cuadrados y triangulares de diferentes tamaños: elementos pequeños (0,25 micras) en la zona de contacto para dar máxima precisión en la zona de contacto, y elementos más grandes en la zona mas alejada del contacto para disminuir el numero de elementos y reducir así el tiempo de calculo y el uso de memoria.

4. Resultados

La topografía, mostrada en la Figura 1, ha sido descompuesta en tres perfiles siguiendo la metodología expuesta en el apartado 3.1, tal y como puede verse en la Figura 4. Aquí puede verse (en la figura central) como el algoritmo desarrollado separa la rugosidad dejándola horizontal y sin ruido para que su mallado pueda ser realizado con elementos de tamaño razonable.

Figura 4: Topografía estocástica descompuesta



La rugosidad del perfil del rodillo, mostrado en la Figura 2, ha sido obtenida de la misma forma que la rugosidad anterior (ver Figura 5). Pero en lugar de dibujar directamente esta rugosidad, se ha optado por dibujarla con líneas rectas y arcos de circunferencia, porque se obtiene el mismo perfil simplificándolo: se pasa de 800 puntos (es decir, 800 líneas) a 40 líneas y 40 arcos (ver Figura 6).

Figura 5: Topografía determinista descompuesta

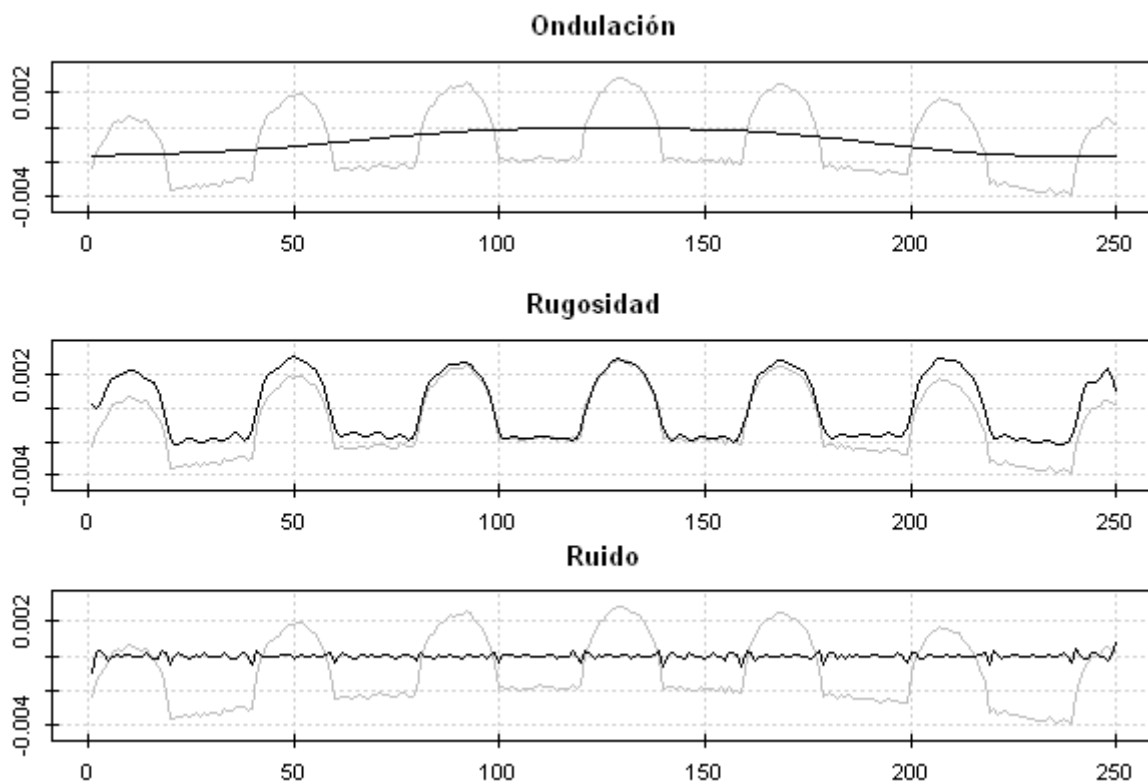
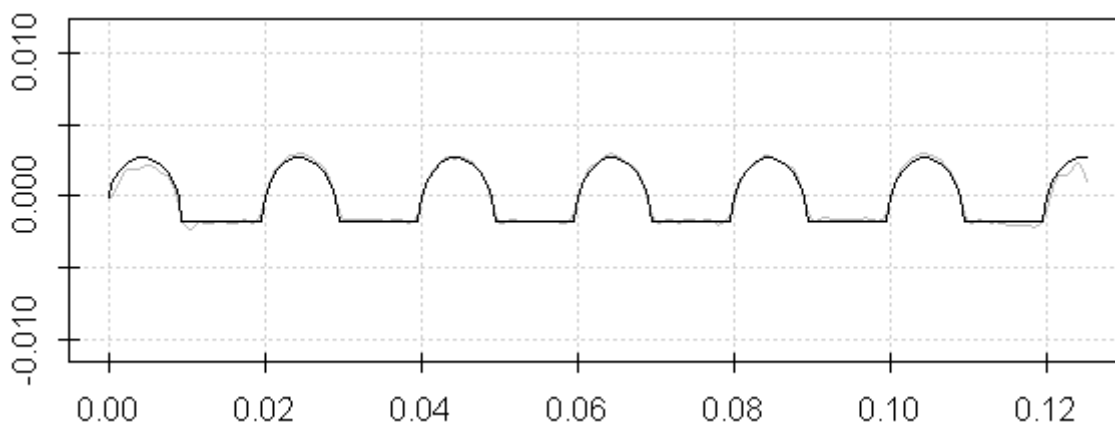


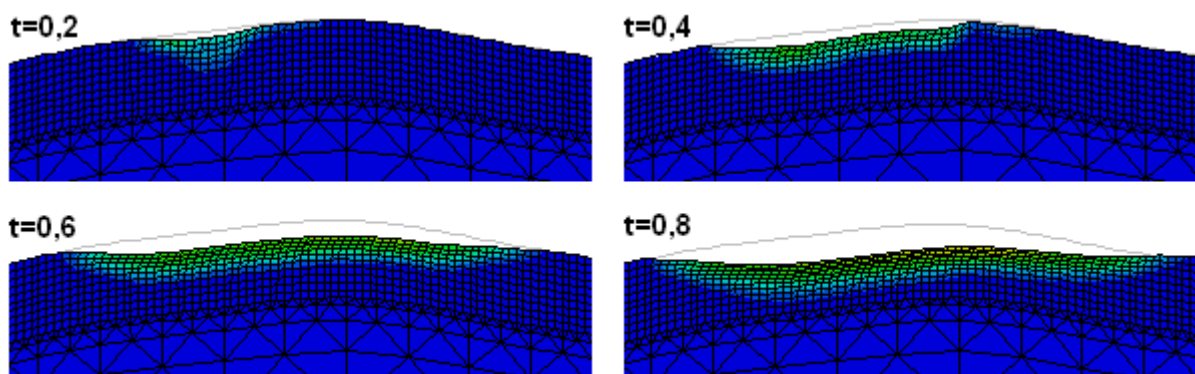
Figura 6: Rugosidad determinista simplificada



Con estas dos rugosidades se ha construido un modelo FE como el descrito en el apartado 3.3 con un mallado fino en la zona de contacto y otro más basto en el resto. De esta forma, se obtuvo un modelo con 26.290 elementos que ha sido analizado con una carga normal de 20 N y una velocidad de deslizamiento de 0,1 mm/s. El tiempo de cálculo de este modelo ha sido de 15,23 horas, utilizando 4 procesadores Opteron en paralelo.

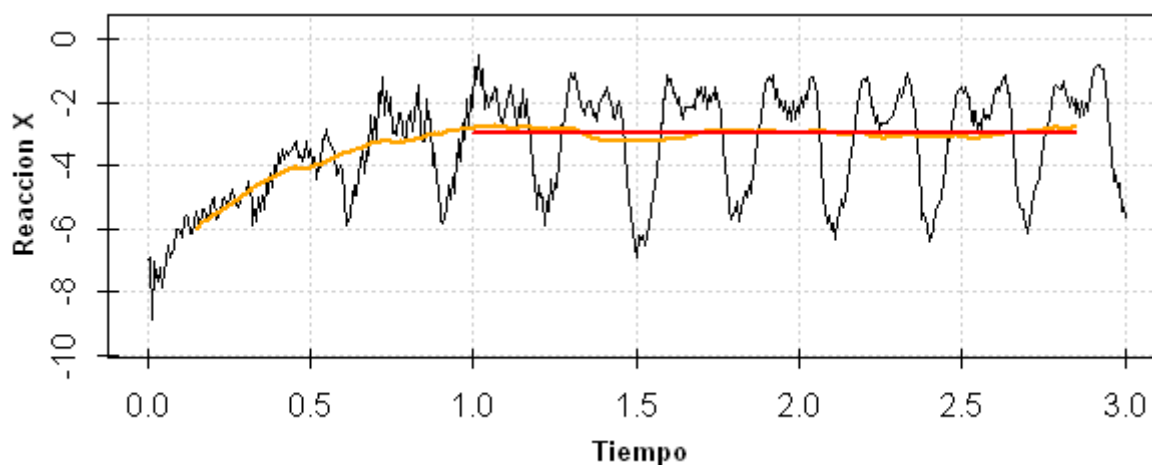
Los resultados (Figura 7) muestran como se produce la deformación de los picos más altos de la rugosidad de la chapa por la presión del rodillo en los primeros momentos de la simulación (desde $t=0,2$ s a $t=0,6$ s) y un posterior mantenimiento de la forma debido a que se han endurecido plásticamente ($t=0,8$ s).

Figura 7: Deformación de la rugosidad. Tiempo “t” en segundos.



La determinación del coeficiente de rozamiento se calculó a partir de las fuerzas de reacción en el apoyo de la chapa cuando ya se han deformado los picos de su rugosidad. Esto tiene su explicación en la Figura 8. Como se puede ver en esta figura (Figura 8), existe un primer período (entre 0 y 1 s) en el que se aprecia una reacción elevada (y negativa) debida a la presencia de picos en la rugosidad de la chapa. Sin embargo, cuando estos son deformados la reacción va disminuyendo hasta alcanzar estacionalidad. En este periodo de estacionalidad (de 1 a 3 s) se aprecian las subidas y bajadas en la reacción debidas a la entrada en contacto de los picos de la rugosidad del rodillo con la chapa en cada momento.

Figura 8: Calculo del coeficiente de rozamiento. “Reacción X” en N y “Tiempo” en s.



En la Figura 8, la línea naranja es la media móvil de la reacción (línea negra) y la línea roja es la media del período 1-3 s. El valor de esta media es 2.99 N (en valor absoluto).

El coeficiente de rozamiento se calculó entonces empleando la siguiente fórmula:

$$\mu = \frac{F_R}{N} \quad (1)$$

Sabiendo que el valor de la fuerza normal es siempre 20 N, el coeficiente de rozamiento en este caso fue de:

$$\mu_{20/0,1} = f(p = 20, v = 0,1) = \frac{2.893}{20} = 0,145$$

5. Conclusiones

La metodología expuesta en este trabajo ha sido utilizada para modelizar dos rugosidades mediante dos estrategias distintas: en un caso se ha reproducido fielmente la rugosidad original; y en otro se ha elegido dibujar la superficie mediante líneas y arcos con el objetivo de reducir la complejidad del modelo. La metodología se ha apoyado en un programa de separación de frecuencias en la textura, basado en Fourier, y desarrollado en el software libre R. Ambas rugosidades han sido utilizadas en un modelo 2D de elementos finitos para determinar el rozamiento que se produce para unas determinadas condiciones de carga. En estas páginas se han mostrado los resultados para una carga normal de 20 N y una velocidad de 0,1 mm/s. Además, se ha explicado el procedimiento para determinar el coeficiente de rozamiento a partir de la reacción en el apoyo de la chapa.

El próximo paso consistirá en lanzar una batería de análisis de este modelo para distintos valores de carga normal y velocidad de deslizamiento. Después, se calculará el coeficiente de rozamiento para cada caso y se tratará de encontrar, mediante técnicas de minería de datos, una expresión matemática que relacione el coeficiente de rozamiento con las condiciones del proceso: velocidad y carga.

6. Agradecimientos

Los autores quieren dar las gracias a la Universidad de La Rioja y el Banco Santander por la financiación del proyecto API11/13, a la unión europea por el proyecto RFS-PR-06035 y al Gobierno de la Rioja por el proyecto FOMENTA 2010/13.

7. Referencias

- Abaqus/CAE User's Manual v6.11 (2011)
- ASME Standards Committee B46 (2002), ASME B46.1, Surface texture (surface roughness, waviness, and lay)
- Ahmed, R., & Sutcliffe, M.P.F. (2000). Identification of surface features on cold-rolled stainless steel strip. *Wear*, 244, 60-70.
- S. Chandra, U.S. Dixit (2004), A Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Temper Rolling Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 152, 9-16.
- Escribano R., Pernia A., Lostado R., Martínez de Pisón, F.J., Vergara E. (2011), Modelado 3D de una rugosidad y mejora de transferencia de textura en procesos skin pass, *15th International Congress on Project Engineering*.
- N. A. Fleck, K. L. Johnson, Towards A New Theory of Cold Rolling Thin Foil, *International Journal of Mechanical Sciences Vol. 29, 7, 507-524*.

- Gjønnnes, L. (1996). Quantitative characterisation of the surface topography of rolled sheets by laser scanning microscopy and Fourier transformation. *Metallurgical and Materials Transactions*, 27, 2338-2346.
- Kijima, H., & Bay, N. (2007). Contact conditions in Skin-pass rolling. *Annals of the CIRP*, Vol. 56/1/2007.
- Kijima, H., & Bay, N. (2008). Skin-Pass rolling I-Studies on roughness transfer and elongation under pure normal loading. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 1313-1317.
- Kijima, H., & Bay, N. (2009). Influence of tool roughness and lubrication on contact conditions in Skin-Pass rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4835-4841.
- Ma, B., Tieu, A.K., Lu, C., & Jiang, Z. (2002). An experimental investigation of steel surface characteristic transfer by cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 657-663.
- E.J. Patula, Tension-roller-levelling process; elongation and power loss, *Transactions ASME, Journal of Engineering Industry*, 101, 269-277.
- Plouraboué, F., & Boehm, M. (1999). Multi-scale roughness transfer in cold metal rolling. *Tribology International*, 32, 45-47.
- R Development Core Team (2005), R: A language and environment for statistical computing, reference index version 2.2.1. *R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*.
- Tamano T., Finite Element Analysis of Steady Flow in Metal Processing, *Journal of Japan Society for Technology of Plasticity*, 14, 766.
- S. Zhang, P.D. Hodgson, M.J. Cardew-Hall, S. Kalyanasundaram (2003), A Finite Element Simulation of Micro-Mechanical Frictional Behaviour in Metal Forming, *Tribology Transactions*, 46, 383-390.

Corresponding author: (For more information, please contact to):

Dra. Alpha Verónica Pernía Espinoza

Grupo EDMANS. URL: <http://www.mineriadatos.com>

Área de Proyectos de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica

Edificio Departamental. ETSII de Logroño. C/ Luis de Ulloa, 20, 26004 Logroño (España).

Phone: +34 941 299 517

Fax: + 34 941 299 794

E-mail: alpha.pernia@unrrioja.es.