

MODELADO 3D DE UNA RUGOSIDAD Y MEJORA DE TRANSFERENCIA DE TEXTURA EN PROCESOS SKIN PASS

Rubén Escribano García

Alpha Pernia Espinoza

Rubén Lostado Lorza

Francisco Javier Martínez de Pisón

Eliseo Vergara González.

Grupo EDMANS, Universidad de La Rioja

Abstract

The roughness present in any industrial product surface influences in its friction coefficient, and this determines friction forces, lubrication or paint adhesion.

The aim of this study is to find the Skin-Pass rolled process parameters that print in the sheet surface the maximum roughness present in a roller mill surface. The texture, called Topocrom, has been defined by a points cloud taken from a real mill, and its draw consist of a small hemispheres separated by flat areas. In order to model this texture, an algorithm has created able to find the groups of points that make up the hemispheres.

The texture model is used in a finite element 3D model in order to calculate the result of several rolled process generated by variation of three key parameters: pretension, sheet wrap angle and mills separation. Prediction models had been trained with the FE model results for estimating the final thickness and the transfered roughness using the key parameters values.

Keywords: *Sheet; skin-pass; texture; roughness; finite elements; predictive model*

Resumen

La rugosidad presente en la superficie de cualquier producto industrial influye en su coeficiente de fricción y este, a su vez, determina aspectos como fuerzas de fricción, lubricación o adhesión de pinturas.

El objetivo de este estudio es determinar los parámetros de un proceso de laminado Skin-Pass que imprima en la superficie de la chapa la máxima rugosidad presente en la superficie del rodillo laminador. La textura, llamada Topocrom, ha sido definida por una nube de puntos tomados de un rodillo real, y su dibujo consiste en pequeñas semiesferas (del orden de las 10 micras) separadas por áreas planas. Con el objetivo de modelar esta textura, se ha creado un algoritmo capaz de encontrar los grupos de puntos que conforman las semiesferas.

Este modelo de textura es utilizado en un modelo 3D de elementos finitos con el objetivo de calcular los resultados de distintos procesos de laminado generados por variación de tres parámetros clave del proceso: pretensión y ángulo de curvado de la chapa y separación entre rodillos laminadores. Con los resultados del modelo FE se han entrenado modelos de predicción capaces de estimar el espesor final y la rugosidad transferida utilizando los valores de los tres parámetros mencionados.

Palabras Clave: *Chapa; skin-pass; textura; rugosidad; elementos finitos; modelo predictivo*

1. Introducción

Conocer el modo en el se transfiere la rugosidad en los procesos de laminado de chapa es una cuestión complicada debido a su naturaleza no lineal y a la multitud de variables a considerar: diámetro de los rodillos, espesor de la chapa, sus propiedades mecánicas, sus estados superficiales, porcentaje de reducción, entre otras. El presente estudio se centra en el estudio y optimización de la transferencia de textura en el proceso Skin-Pass, y más concretamente en la modelización de una rugosidad real y su posterior utilización en un modelo de elementos finitos. El Skin-Pass es el último paso en el proceso de laminado de chapas de acero, que consiste en una ligera pasada en frío para reducir ligeramente su espesor y aportar buen acabado dimensional y superficial. Además, se busca modificar las propiedades mecánicas finales del producto eliminando la zona de fluencia.

El interés por el estudio y la captura de rugosidades en productos laminados en frío se refleja en los estudios de Gjønnes (1996), Plouraboué y Boehm (1999) y Ahmed y Sutcliffe (2000) en los que estudian, por diversos métodos, superficies de aluminios y de aceros laminados en frío. Ma (2002) estudio experimentalmente la influencia de la velocidad de giro de los rodillos, el porcentaje de reducción y el tipo de lubricación sobre la transferencia de rugosidad en chapas de acero laminadas en frío.

El método de los elementos finitos ha sido utilizado en los últimos años para abordar el problema de la transferencia de textura. En este sentido, Kijima y Bay (2008) desarrollaron un modelo 2D que consistía en una herramienta perfectamente rígida que se desplaza para imprimir la rugosidad sobre el material. La rugosidad presente en la herramienta consistía en arcos de círculo de igual diámetro y con una separación constante. Kijima y Bay (2009), en un artículo posterior, compararon datos experimentales con los resultados obtenidos por un modelo FE que consistía en una herramienta elástica, con una textura similar a la anterior, que aplicaba cargas normales sobre una chapa elasto-plástica de acero. De esta forma, concluyeron que la fuerza y la lubricación tienen gran influencia en el grado de transferencia de textura en bandas de acero.

No se han encontrado referencias sobre la utilización del método de los elementos finitos (FEM) para estudiar la transferencia de textura que utilicen una rugosidad tomada de un rodillo laminador.

2. Objetivos

El primer objetivo del estudio es desarrollar una metodología para modelar superficies rugosas para su posterior utilización en modelos de elementos finitos (FEM). De esta forma, se consigue trabajar con superficies realistas a un bajo coste computacional.

El segundo objetivo es crear un modelo FE que simule un proceso de laminado Skin-Pass con transferencia de textura colocando la rugosidad modelada sobre la superficie de uno de los rodillos. Además, se tienen en cuenta la elastoplásticidad de la chapa, coeficiente de rozamiento variable, desplazamiento y velocidad de giro de los rodillos,...

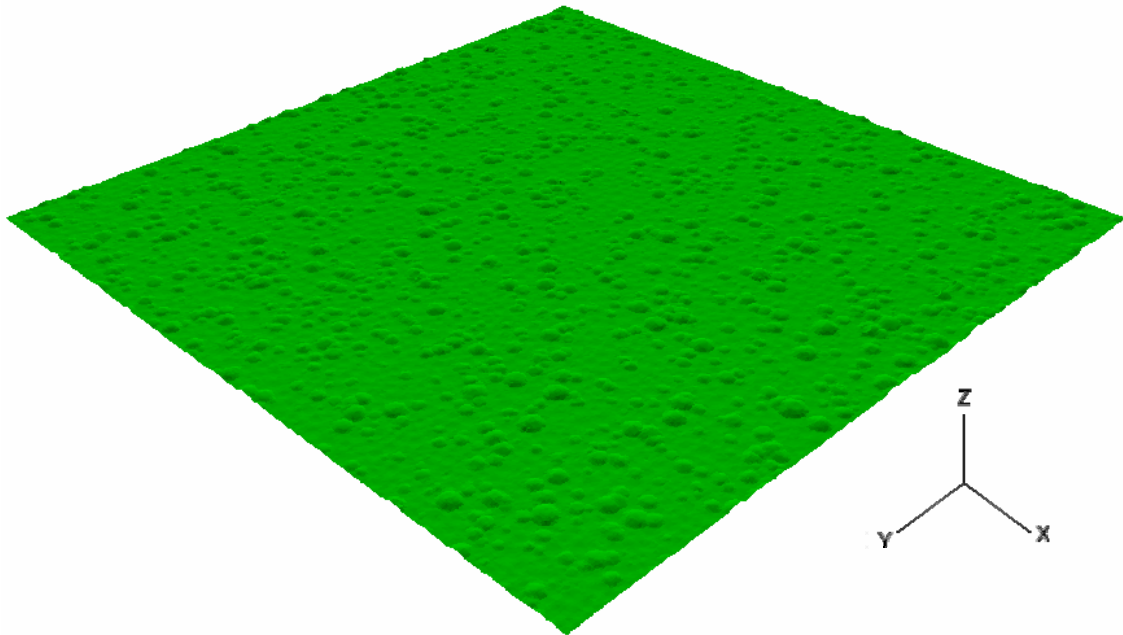
3. Metodología

3.1. Descripción de la rugosidad

Se trata de un área de dimensiones 2 x 2 mm² capturada de un rodillo laminador, con un número indeterminado de bultos, asimilables a casquetes esféricos, que se encuentran repartidos heterogéneamente por la superficie como puede verse en la Figura 1. Hay que destacar que la textura presenta cierta cantidad de ruido (ver los

valles en la Figura 2) que dificulta los cálculos y que obligan a la utilización de filtros para modelar correctamente esta rugosidad.

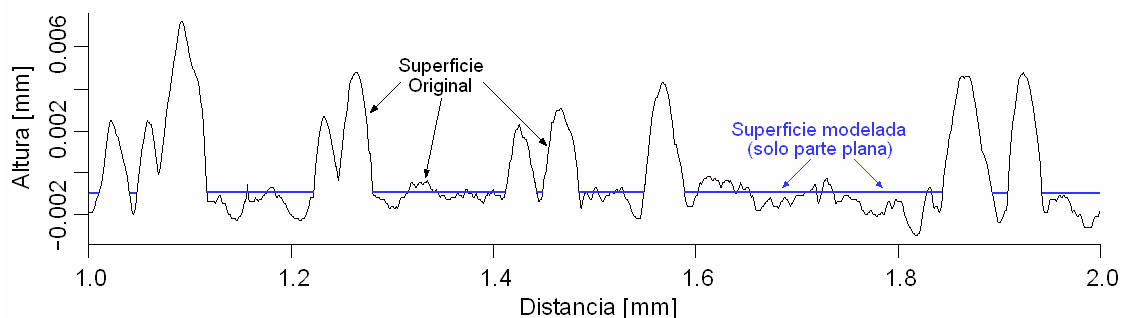
Figura 1: Rugosidad Topocrom



La rugosidad, llamada Topocrom, está definida por cuatro millones de puntos de la forma (x, y, z), donde las coordenadas XY de cada punto definen la posición en el plano y la coordenada Z especifica la altura respecto al plano XY. En este caso las alturas de los puntos están comprendidas entre -5,9 y 11,7 micras.

La textura se compone de pequeños bultos, o picos, que pueden ser identificados con casquetes esféricos, y de áreas lisas, o valles, equiparables a un plano (ver Figura 1). Cortando la superficie por un plano perpendicular al plano XY y paralelo a uno de los ejes se obtiene un perfil de la rugosidad. En este perfil, se distinguen de forma muy clara los puntos que forman los picos y los que forman los valles (ver Figura 2).

Figura 2: Perfil Topocrom



3.2. Modelización de la rugosidad

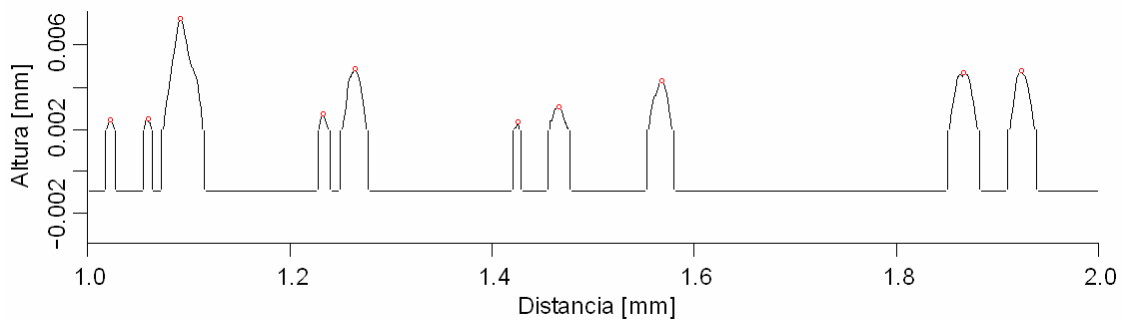
El proceso de modelización comienza por distinguir que es valle y que es pico; para ello, se establece un límite en $z=1 \mu\text{m}$ que separa los puntos valle de los puntos pico. Así, el número de puntos valle asciende a 3 millones y con ellos es posible calcular el plano que modela las zonas valle de la rugosidad. Este plano es paralelo al plano XY y la distancia que los separa es la media de las alturas de los puntos valle, en este caso

-1.0 μm . La Figura 2 representa un perfil de la rugosidad original y el plano (en color azul) que modela los valles de la rugosidad.

Antes de empezar a modelar los picos mediante esferas, es necesario identificar el número de picos, determinar su posición en el plano XY y agrupar los puntos por su pertenencia a un pico. Después se toma cada grupo de puntos y se calcula, en base a sus coordenadas, el casquete esférico que modeliza cada grupo. Para precisar el número de picos es necesario establecer una altura mínima, porque sino se encontrarán muchos picos en la rugosidad pero muchos de ellos con una altura muy pequeña. El valor de esta altura mínima es de 2 μm y viene determinada por la precisión deseada en el modelo de elementos finitos que será expuesto más adelante.

Los picos de más de 2 μm de altura son determinados tomando todos aquellos puntos cuya cota sea igual o superior a 2 μm y llevando el resto de puntos a cota -1 μm (altura del plano) como se muestra en el perfil de la Figura 3. Después, se filtra la superficie para eliminar el ruido, se calculan las derivadas discretas parciales en todos los puntos, y donde estas se igualen a cero existirá un máximo. Con este procedimiento se encuentran 410 picos, de alturas comprendidas entre 2 y 11,7 μm y sus posiciones en el plano XY.

Figura 3: Determinación del número de picos



Cada uno de los picos será modelado mediante una esfera que tiene la siguiente ecuación:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2 \quad (1)$$

Donde ' x_0, y_0, z_0 ' son las coordenadas del centro y ' R ' es el radio de la esfera; es decir, cuatro incógnitas, y para hallarlas son necesarias cuatro ecuaciones:

$$\begin{aligned} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 &= R^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 &= R^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 + (z_3 - z_0)^2 &= R^2 \\ (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 + (z_4 - z_0)^2 &= R^2 \end{aligned} \quad (2)$$

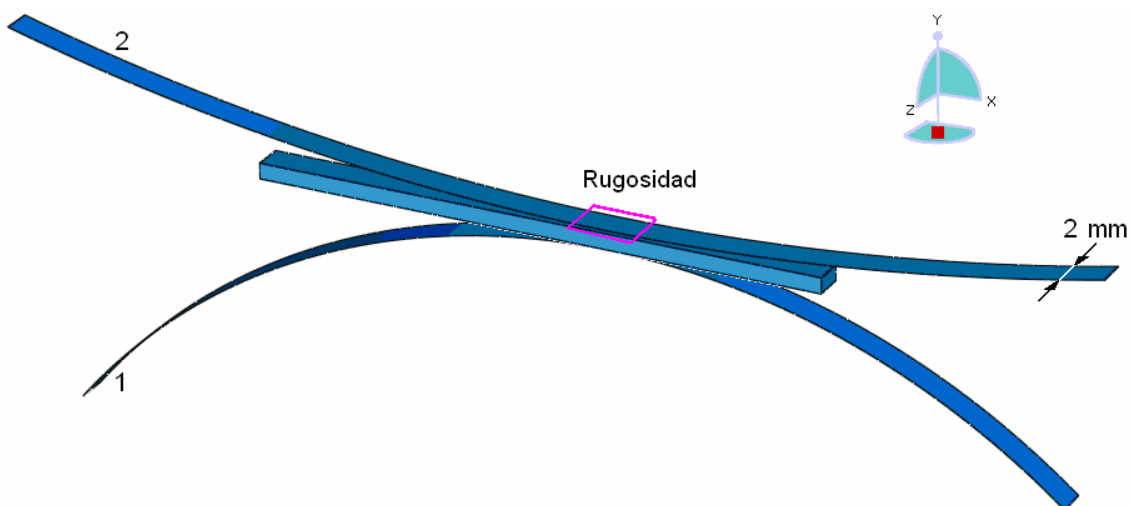
Donde (x_n, y_n y z_n) son las coordenadas de cuatro puntos. Se trata de un sistema no lineal con cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas, pero en este caso cada esfera (o cada pico) está definida por un número mucho mayor e indeterminado de puntos. Esta circunstancia es resuelta utilizando el método de los mínimos cuadrados para determinar la esfera que modela a cada grupo de puntos. Una vez calculadas todas las esferas son cortadas por el mismo plano que modela los valles para dar como resultado un conjunto de casquetes esféricos dispuestos sobre un plano. Así, el plano,

anteriormente calculado, y el conjunto de casquetes esféricos constituyen la rugosidad modelada (ver Figura 6).

3.3. Modelo de elementos finitos

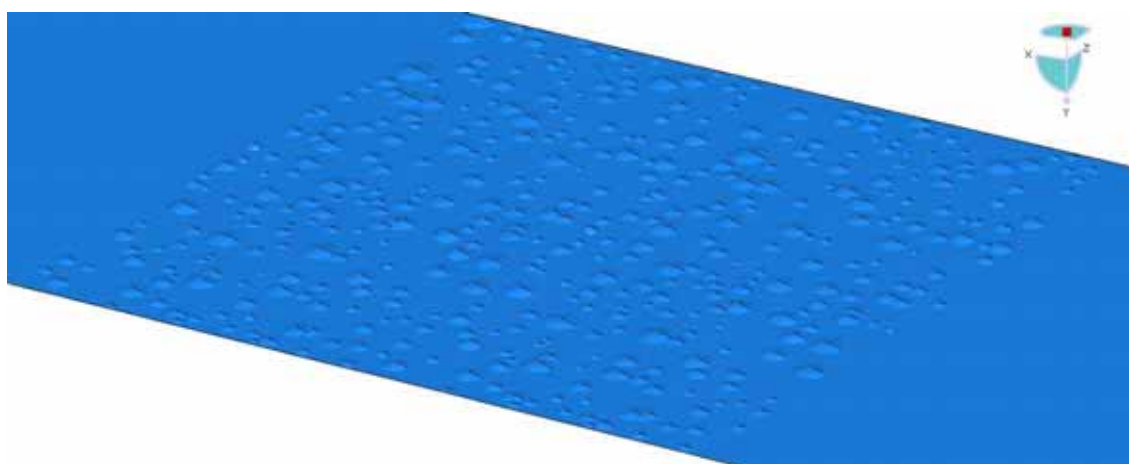
El modelo tridimensional planteado reproduce un proceso de laminado Skin-Pass con transferencia de textura, y se compone de dos rodillos rígidos y una chapa elastoplástica como se muestra en la Figura 4.

Figura 4: Configuración del modelo



Ambos rodillos han sido modelados mediante una porción de la superficie de un cilindro totalmente rígido. El rodillo '1' tiene un diámetro de 90 mm, su centro permanece fijo durante todo el análisis y su superficie es totalmente lisa; mientras que el rodillo '2' es de diámetro 300 mm, su centro se desplazada hacia abajo y parte de su superficie presenta la rugosidad modelada en el apartado anterior (ver Figura 5). Inicialmente, este rodillo está en contacto con la chapa, luego desciende aplastándola, y después realiza un giro a velocidad constante que transfiere parte de la textura sobre la superficie de la chapa.

Figura 5: Rugosidad sobre el rodillo '2'



La chapa tiene unas dimensiones de 1 mm de espesor, 1 mm de anchura y 40 mm de longitud, inicialmente es totalmente lisa, se considera elastoplástica y está compuesta por un acero DC04 cuyas propiedades mecánicas son:

- Módulo elástico: 190.000 MPa
- Coeficiente de Poisson: 0.3
- Límite elástico: 180 MPa.

Se ha utilizado el modelo de fricción de Martins y Oden (1985) porque considera la variación del coeficiente de fricción en función del ratio de deslizamiento entre las superficies en contacto:

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) \cdot e^{-\delta \cdot v} \quad (3)$$

Donde ' μ_s ' es el coeficiente de fricción estático y ' μ_k ' el dinámico; ' δ ' el coeficiente de decaimiento y ' v ' la velocidad relativa entre las superficies.

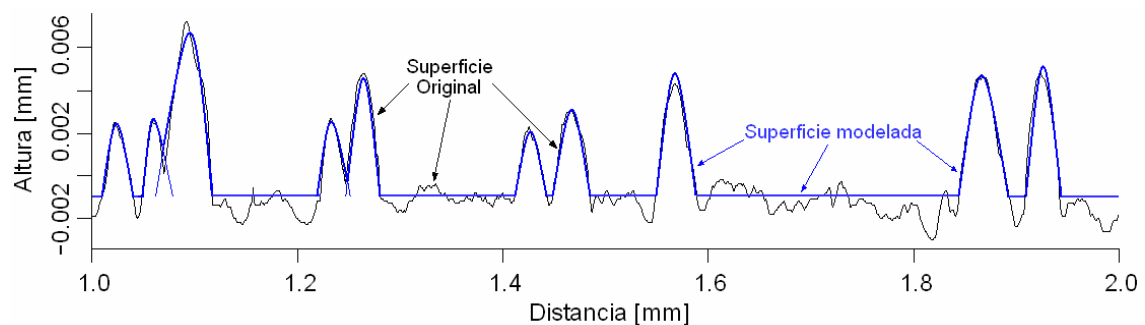
Debido al pequeño tamaño de los casquetes esféricos es necesario hacer un mallado fino en la zona de la chapa que va a recibir la rugosidad con elementos hexaédricos de 0,0125 mm (12,5 μm); mientras que el resto de la chapa está constituido de elementos hexaédricos y tetraédricos más grandes (hasta 0,33 mm).

La aplicación de las condiciones de contorno se realiza en tres etapas. En la primera se aplica sobre la chapa una tensión longitudinal saliente; después, el rodillo '2' desciende aplastando la chapa; y por último, los rodillos empiezan a girar hasta alcanzar una determinada velocidad, arrastrando por rozamiento a la chapa. La segunda etapa es un estado estacionario, en el que la chapa se mueve y los rodillos giran a velocidad constante, reduciendo el espesor de la chapa y transfiriendo la rugosidad del rodillo '2' a la superficie superior de la chapa. En la última etapa, ambos rodillos y la chapa son desacelerados hasta detenerse; luego, el rodillo '2' asciende librando a la chapa del aplastamiento; y finalmente, cesa la tensión longitudinal saliente sobre la chapa. De esta forma, la chapa que liberada de todas las cargas.

4. Resultados

El proceso de modelización de una rugosidad definida por 4 millones de puntos de la forma (x, y, z) da como resultado una rugosidad simplificada, definida por un plano y por 410 casquetes esféricos. No obstante, se mantienen las propiedades tribológicas de la superficie original: número de picos por unidad de área, distancia máxima entre crestas y valles (Rt) y aspereza (Ra).

Figura 6: Perfil original y perfil modelado



La simple observación de cierto número de perfiles nos da una idea de la aproximación obtenida por la modelización. Por ejemplo, En la Figura 6 se observa

que el modelo no se ajusta bien en los valles y que en algunos picos existe una pequeña diferencia respecto a la rugosidad original. No obstante, se puede afirmar que, en términos generales, el modelo obtenido se ajusta bien a la textura Topocrom. Por otro lado, hay que decir que el objetivo de la modelización de esta rugosidad es usarla en un modelo de elementos finitos y que no es necesario que la textura tenga mayor precisión que el propio modelo.

El modelo de elementos finitos descrito en el apartado 3.3 ha sido ejecutado en paralelo utilizando cuatro procesadores, siendo el tiempo de análisis 47,5 horas. El resultado del laminado es una chapa con un espesor final de 0,9953 mm lo que supone una reducción de espesor del 0,47 % y con una rugosidad en su superficie. Esta puede verse en la Figura 7 donde se muestra el estado final de una porción de chapa en la que se representa la deformación plástica y en la que se aprecian claramente los cráteres imprimidos por el rodillo. La aspereza superficial de la rugosidad modelada es 1.52 y la aspereza transmitida a la chapa es 0.944, lo que supone un porcentaje de transferencia de textura del 62,11%. Como aspecto negativo se tienen las tensiones residuales que permanecen en la chapa como consecuencia de una deformación plástica y que pueden ser apreciadas en la Figura 8.

Figura 7: Rugosidad final en la chapa

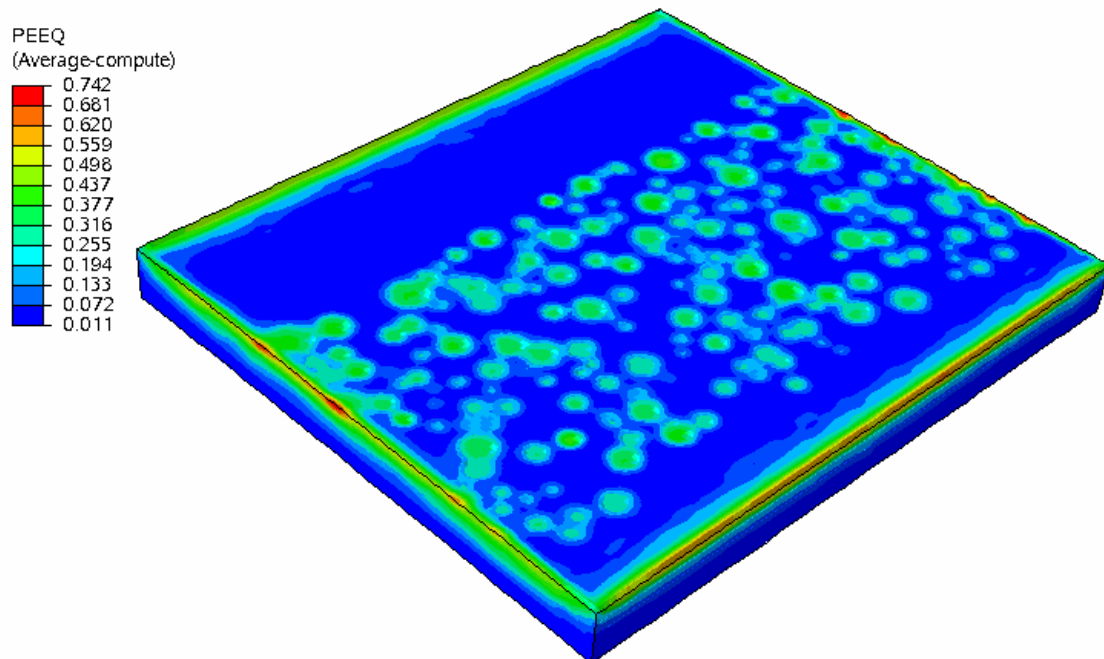
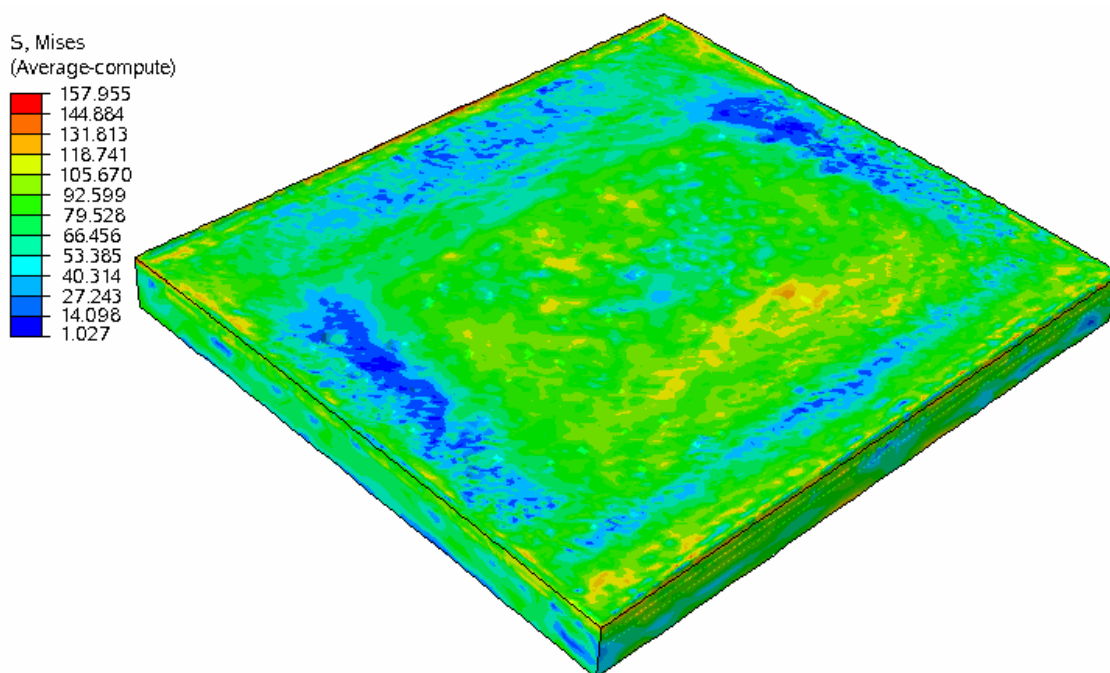


Figura 8: Tensiones residuales en la chapa



5. Conclusiones y líneas futuras

La metodología propuesta para la modelización de superficies ha sido utilizada en una rugosidad compuesta por pequeños bultos esféricos de distintos tamaños dispuestos heterogéneamente sobre un área de 2 x 2 mm. La modelización ha simplificado una superficie compuesta por 4 millones de puntos a un plano y 410 casquetes esféricos manteniendo las propiedades superficiales.

Además, se ha creado un modelo 3D de elementos finitos que simula el proceso de laminado Skin-Pass con transferencia de textura. Para ello, se ha dispuesto la rugosidad modelada sobre uno de los rodillos laminadores, ya que la utilización de la superficie original un alto coste computacional. Por ello se puede afirmar que la metodología expuesta permite estudiar procesos de fabricación con transferencia de textura utilizando para ello rugosidades reales.

El próximo paso a realizar consistirá en un estudio paramétrico del proceso Skin-Pass con transferencia de textura, en el que se realizarán variaciones de algunos parámetros de entrada del proceso de laminado, como por ejemplo: la pretensión, el curvado de la chapa y la fuerza en los apoyos de los rodillos. Posteriormente se utilizarán técnicas de minería de datos e inteligencia artificial para encontrar expresiones que relacionen los parámetros de entrada con los de salida, es decir, con el porcentaje de reducción y con el porcentaje de transferencia de textura. Por último, se utilizarán estas expresiones para hallar la combinación de valores de entrada que imprimen sobre la chapa la máxima rugosidad sin generar grandes tensiones o deformaciones.

6. Referencias

- Martins, J.A.C., & Oden, J.T. (1987). Existence and uniqueness results for dynamic contact problems with nonlinear normal and friction interface laws. *Non-linear Analysis*, 11, 407-428.
- 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.
- Plouraboué, F., & Boehm, M. (1999). Multi-scale roughness transfer in cold metal rolling. *Tribology International*, 32, 45-47.
- Ahmed, R., & Sutcliffe, M.P.F. (2000). Identification of surface features on cold-rolled stainless steel strip. *Wear*, 244, 60-70.
- 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.
- 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.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Rubén Escribano García

Phone: +34 941 299 517

Fax: + 34 941 299 794

E-mail: ruben.escribano@alum.unirioja.es

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

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Dirección General de Investigación del ministerio español de Ciencia e Innovación por el proyecto DPI2007-61090, de la Universidad de La Rioja y el Banco Santander por el proyecto API11/13, y a la Unión Europea por el proyecto RFS-PR-06035.

Finalmente, los autores también agradecen a la comunidad autónoma de La Rioja por el apoyo a través del 3^{er} Plan Riojano de I+D+i por el proyecto FOMENTA 2010/13.