

MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN ANGULAR. PARTE II: DESARROLLO DE TEXTURA

M. Severino, I. Novara, R. Bolmaro, P. Turner y J.W. Signorelli

Grupo de Materia Condensada II
IFIR (CONICET-UNR) – FCEIA (UNR)
27 de febrero 210 bis - 2000, Rosario, Argentina
e-mail: severino@ifir.edu.ar

Palabras claves: ECAE – Textura - Modelos policristalinos

Resumen. *En el presente trabajo se presentan estudios tendientes a analizar la evolución de la textura cristalográfica y morfológica en una aleación de Al-4%Cu (T4) sometida a un proceso de extrusión a través de un canal angular de 120°. Los ensayos se realizan a temperatura ambiente y el material es introducido hasta 5 veces en el canal, sin rotación de la muestra entre cada paso de deformación (ruta A). La distribución de orientaciones preferenciales es recalculada a partir de la medición de las figuras de polos (111), (200) y (220), utilizando la técnica de rayos X. La descripción de la historia de deformación sufrida por el material se obtiene utilizando simulación por elementos finitos (Y. Novara et al., MECOM 2005). El desarrollo de la textura cristalográfica y morfológica se analiza mediante un modelo de plasticidad cristalina. La ley constitutiva del material es del tipo viscoplástica y el método de homogeneización es autoconsistente de 1-sitio. La función de distribución de orientaciones obtenida a partir de las figuras de polos medidas es discretizada a través de un conjunto de 5000 orientaciones con peso. Cada grano del policristal es asociado a un elipsoide el cual puede evolucionar tanto en su relación de aspecto como en su orientación.*

Las texturas al final de cada paso de extrusión presentan en todos los casos un valor de intensidad del orden de 2-3 veces el nivel del material no texturado siendo mínimas las variaciones con los pasos de extrusión. La ubicación de las componentes principales de textura permanecen estables con el proceso de extrusión, salvo en el caso de la componente central (dirección normal). La no uniformidad en la sección del material obtenida en el gradiente de deformación da como resultado una heterogeneidad en la textura del lingote.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de extrusión angular (ECAE – Equal Channel Angular Extrusion), originalmente desarrollado por Segal^{1,2}, es una técnica para extrudido que utiliza dos canales de igual sección (cuadrada o circular) que se intersecan formando un ángulo determinado. La deformación impuesta es esencialmente de corte, cuya magnitud depende del ángulo de intersección elegido, lo que implica, idealmente, que la pieza no presente cambios en su sección. De ese modo por extrusión, y a través de sucesivas pasadas, permite imponer altas deformaciones sin producir un cambio apreciable de la forma externa de la muestra original (Figura 1). La severa deformación impuesta al material induce la partición de los granos, dando como resultado aleaciones metálicas de granos muy finos (nano-rango), y de muy alta dureza debida al endurecimiento por deformación.

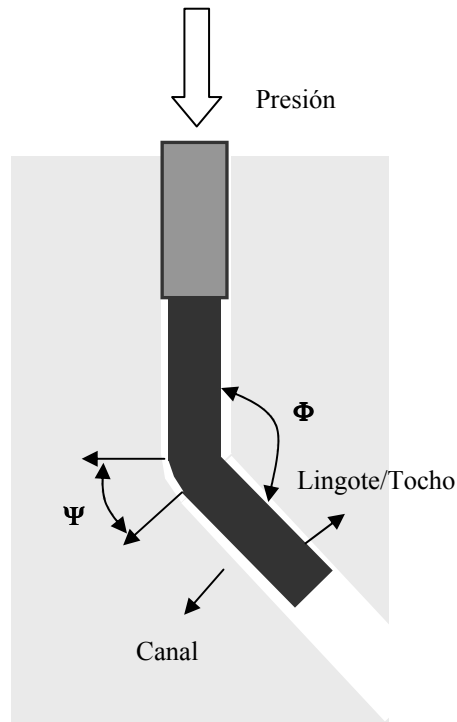


Figura 1: Esquema y parámetros del proceso de extrusión angular (ECAE).

Con el fin de obtener las altas deformaciones requeridas y un producto semi-terminado de un tamaño dado^{3,4}, el proceso completo es discontinuo y requiere de que la pieza sea insertada y reinsertada en el canal. Si bien la mencionada discontinuidad puede en principio aparecer como una desventaja, una vez elegido el camino a seguir, las matrices serán fabricadas usando un único canal continuo de forma cíclica. Por otra parte, esta característica del proceso, la

discontinuidad, permite diseñar el camino de deformación a través de rotaciones entre pasajes. La elección de uno u otro camino y las rotaciones, dan como resultado otra de las particularidades de esta técnica que es la de producir materiales con texturas, u orientaciones preferenciales, no típicas.

Si bien la técnica es muy simple y ofrece la posibilidad de obtener materiales con características macroscópicas y propiedades mecánicas microscópicas muy interesantes, varios problemas se presentan en su implementación. De las propiedades distintivas mencionadas anteriormente, la fragmentación repetida de los granos, para dar nano-granos que podrían utilizarse como materiales para semi-sólidos, es difícil de ser retenida en algunas aleaciones metálicas debido a recristalización durante el mismo proceso o durante los tratamientos térmicos posteriores. Por otra parte, la posibilidad de obtener un material semi-terminado se ve limitada ya que con la alta deformación impuesta el material se fragiliza y se daña en general a nivel superficial y en otros casos en su interior. Por último, la condición ideal de uniformidad del campo de deformación no es fácilmente alcanzable y las texturas resultantes presentan diferencias locales.

La solución a las mencionadas dificultades requiere de un minucioso estudio experimental del proceso, el cual puede ser optimizado a través de la asistencia de simulaciones numéricas. Para abarcar las diferentes escalas espaciales necesarias en la modelización del proceso y del material, la combinación de distintas técnicas numéricas se presenta como una alternativa ventajosa. A escala macroscópica utilizamos la técnica de Elementos Finitos (FEM) para evaluar las heterogeneidades en tensión-deformación durante el proceso de deformación, y el modelado del posible daño del material. A menor escala, las texturas, la fragmentación y la recristalización son simuladas con modelos policristalinos autoconsistentes.

El presente trabajo, es continuación de estudios experimentales y numéricos presentados anteriormente^{5,6}. Se completa la discusión de los resultados macroscópicos utilizando otro código FEM (ABAQUS⁷), con el cual es posible utilizar elementos cuadrangulares que en principio se adaptarían mejor al tipo de proceso de conformado que se estudia. Se obtienen los gradientes de deformación que corresponderían a distintas zonas de la muestra y a partir de ellos se simula la evolución de textura, verificándose el efecto que la no uniformidad de la deformación de corte impuesta tiene sobre la textura final del material. Por último se ha incluido en el modelo policristalino un criterio y un modelo de fragmentación de los granos que da información sobre la textura morfológica resultante en el material. Se ha modelado la técnica variando algunas condiciones: ángulo del canal y lubricación (rozamiento), pero en el presente trabajo nos hemos restringido a procesos denominados de tipo A, es decir, sin rotaciones entre pasajes.

2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La información experimental completa y los detalles del arreglo experimental^{5,6,8} implementado en el proyecto se encuentran descriptos en publicaciones anteriores. Presentamos en este trabajo un resumen de las principales características y resultados obtenidos. El dispositivo consiste en una herramienta de acero, conteniendo dos canales de sección aproximadamente cuadrada de 15 mm de lado intersecándose a 120°, con 140 mm de

longitud. El material utilizado fue Al-4%Cu y de los lingotes resultantes luego de cada paso de extrusión se observó que el material llena completamente el canal de salida. Los lingotes muestran daño en la cara interior de la herramienta.

La Figura 2 muestra la curva de tensión-deformación para el ensayo de tracción simple del material en su estado inicial, junto con los resultados de la simulación del ensayo de tracción realizado para obtener los parámetros de la ley elastoplástica que se utilizan en las posteriores simulaciones del proceso.

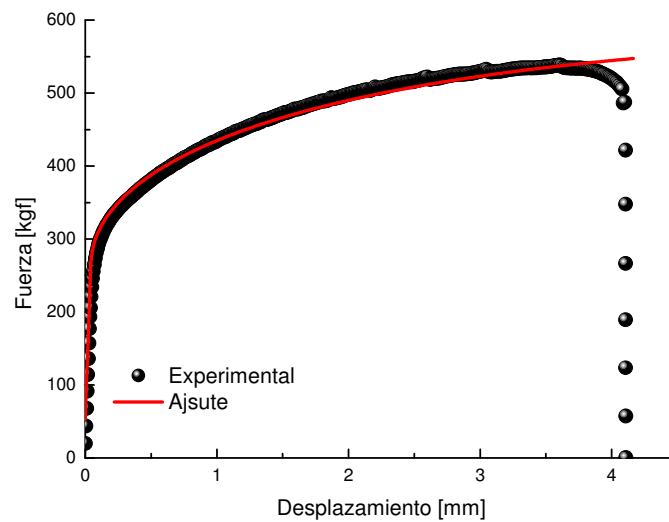


Figura 2: Curva de carga experimental y ajuste elasto-plástico.

La medición de texturas para los materiales resultantes luego de cada paso de deformación se realizó por rayos X. Se midieron figuras de polos $\{111\}$, $\{200\}$ y $\{220\}$ en el plano medio y en la superficie.

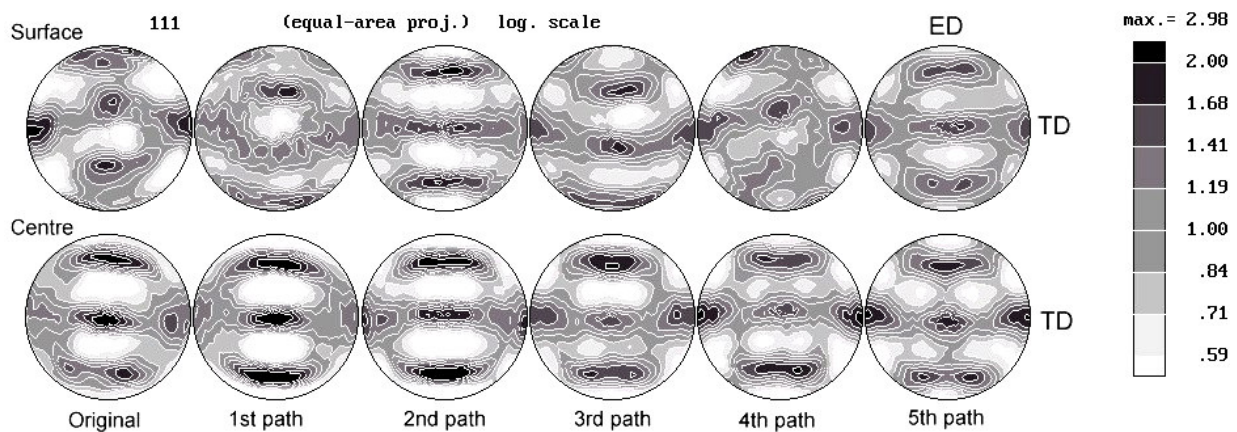


Figura 3: Texturas medidas en la superficie interior y en centro de los lingotes.

Especialmente en las mediciones realizadas en la zona media indican que las texturas en esa parte de los lingotes no muestran una marcada modificación luego de cada paso de deformación (Figura 3). Como se verá más adelante en las simulaciones, esto puede ser explicado ya que durante el proceso completo (varias pasadas), si bien la acumulación de deformación es alta, el desarrollo de textura no es monótono debido a que en cada paso se modifica, por rotación, el gradiente de deformación impuesto.

3. MODELOS NUMÉRICOS

Como se mencionó anteriormente, a escala macroscópica donde la geometría y las condiciones de borde juegan un rol relevante, se utilizaron códigos de Elementos Finitos. En este trabajo como en los anteriores se decidió utilizar códigos standard. Los detalles de las simulaciones FEM y del código utilizado se encuentran descriptas en otro trabajo presentado en este congreso^{9,10}. En las simulaciones con ABAQUS se utilizaron elementos cuadrangulares, a diferencia de los tetrahédricos utilizados en los cálculos realizados anteriormente con otro código FEM⁶. El material se modeló como elastoplástico y en esta primera etapa no se profundizó en el estudio del endurecimiento del material. Se usó la versión implícita (Standard) de ABAQUS y no se implementó ningún esquema de remallado, a pesar de que ello significó una limitación para aumentar el número de pasadas simuladas, concentrándonos en el estudio de la geometría del proceso, y no en la aproximación más realista del modelo, para lograr una mayor comprensión de la influencia en el proceso del nivel de la heterogeneidad, de la geometría y el rozamiento. De las simulaciones por FEM se obtienen las variables locales que permiten luego calcular el gradiente de deformación.

Con el gradiente de deformación obtenido, en puntos elegidos de la muestra (sensores), de las simulaciones FEM, en cada paso de ECAE el desarrollo de textura se simuló con un modelo policristalino autoconsistente viscoplástico. La descripción de la formulación utilizada en este trabajo puede encontrarse en Lebensohn y Tomé¹¹. Sólo recordaremos aquí que en el modelo el agregado policristalino se representa como un conjunto de orientaciones con pesos (la textura cristalográfica) y que la respuesta de cada grano (una orientación) resulta del criterio de localización dado por la interacción viscoplástica del grano con el agregado policristalino viscoplástico. Además, se puede también seguir la evolución de la textura morfológica (forma y orientación de los granos), y eventualmente incluir la evolución de ciertos parámetros microestructurales de interés en el proceso.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Se analizó el proceso de extrusión a través de canales angulares de 120° con el código FEM. Por las simetrías y para simplificar el problema, haciéndolo más apto para ser tratado con un reducido número de elementos, las simulaciones se realizaron en 2D, asumiendo condición de deformación plana.

El modelo material es elastoplástico y la ley de endurecimiento por deformación utilizada es:

$$\sigma = 250 \varepsilon_p^{0.335} + 31$$

donde σ es la tensión de flujo y ε_p es la deformación plástica equivalente. Los valores para las propiedades elásticas fueron: módulo de Young $E = 110$ GPa y módulo de Poisson $\nu = 0.35$.

La geometría de la muestra es un prisma de 15 mm de ancho x 100 mm de longitud. Se malló con 566 elementos cuadrangulares lineales (638 nodos). El canal se definió como una superficie rígida y se trabajó en condiciones adiabáticas a temperatura ambiente. Se estudió la influencia de la geometría del canal Ψ (0 – 30), y del coeficiente de fricción μ (0 – 0.075 – 0.125).

En la Figura 4 se comparan los resultados del campo de deformación equivalente acumulada para el primer paso de extrusión para las configuraciones fijadas en los cálculos con FEM.

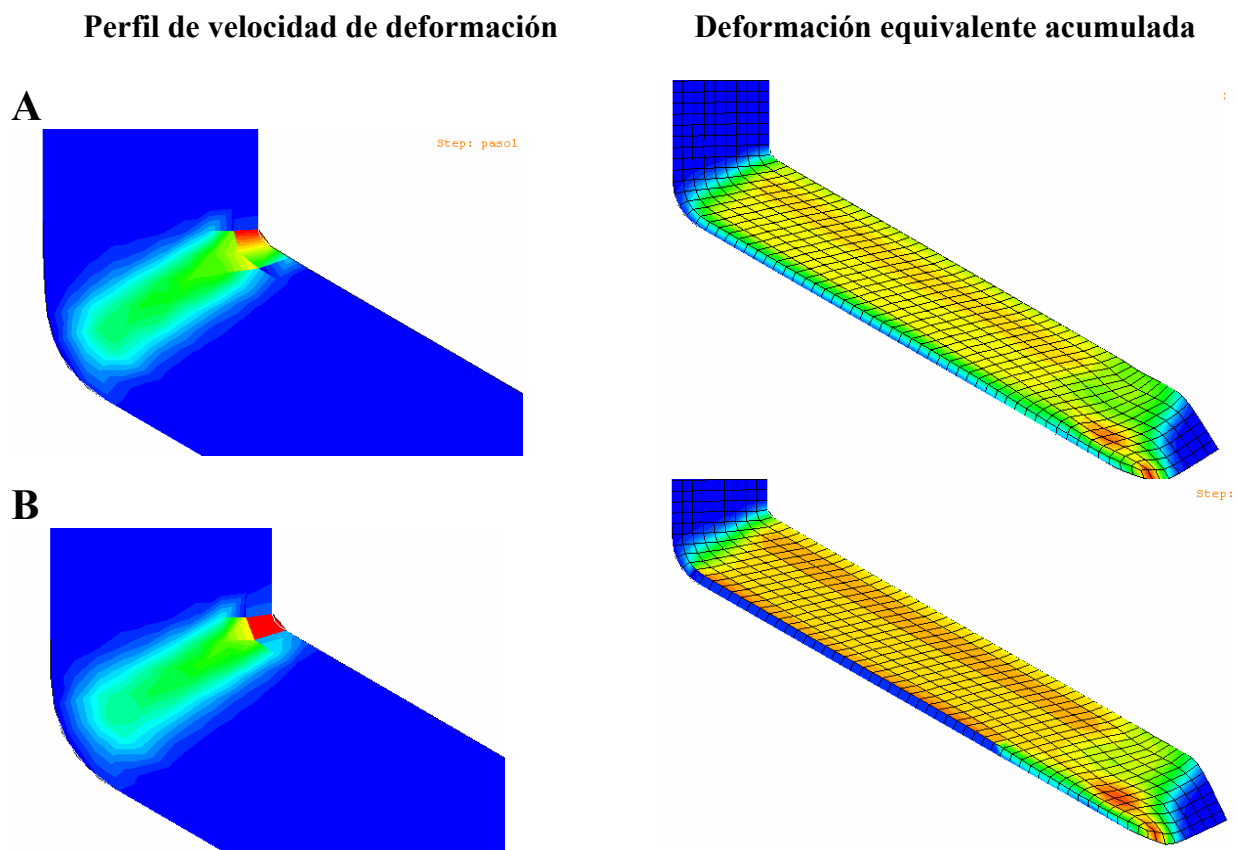


Figura 4: Comparación de condiciones geométricas y rozamiento en las simulaciones FEM.
A: sin rozamiento – B: con rozamiento

De los resultados obtenidos para los campos de velocidad de deformación y de deformación acumulada se observa que ni el ángulo externo Ψ , ni el rozamiento (para el rango estudiado) dan diferencias apreciables, si bien resultan modificaciones en los perfiles de

deformación acumulada, tanto en su amplitud como en su distribución.

Para poder analizar con mayor precisión los distintos efectos de la geometría se calculó el gradiente de velocidad de deformación y la deformación efectiva acumulada en posiciones de la probeta previamente elegidas (sensores). En la Figura 5 se muestra la ubicación de las 9 posiciones de los sensores que dan la información en distintos volúmenes del material. En este trabajo se presentan los resultados que corresponden a los sensores 4, 5 y 6, ya que los mismos nos dan la información del proceso de un elemento material en la superficie externa, en la fibra media (zona más representativa del proceso) y en la superficie interna. Además, la posición de todos ellos corresponde a una posición donde ya el proceso se encuentra en estado estacionario. La información calculada para los gradientes de deformación es utilizada en las simulaciones con los modelos policristalinos para el estudio de la evolución de textura.

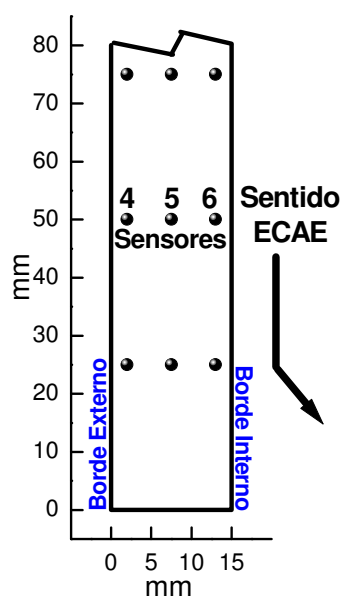


Figura 5: Ubicación de los sensores en las simulaciones con FEM.

En las Figuras 6 y 7 se presentan los gráficos que corresponden a las componentes para la velocidad de deformación y para la rotación rígida. Se comparan los resultados obtenidos para el sensor 4 (fibra externa) $S = 0.9$, el sensor 5 (fibra media) $S = 0.5$ y el sensor 6 (fibra interna) $S = 0.1$. En la Figura 6 se contrastan los resultados obtenidos en simulaciones anteriores con elementos tetragonales y en aproximación a 2D, con los que resultan del uso del código FEM ABAQUS con elementos cuadrangulares y simulación 2D.

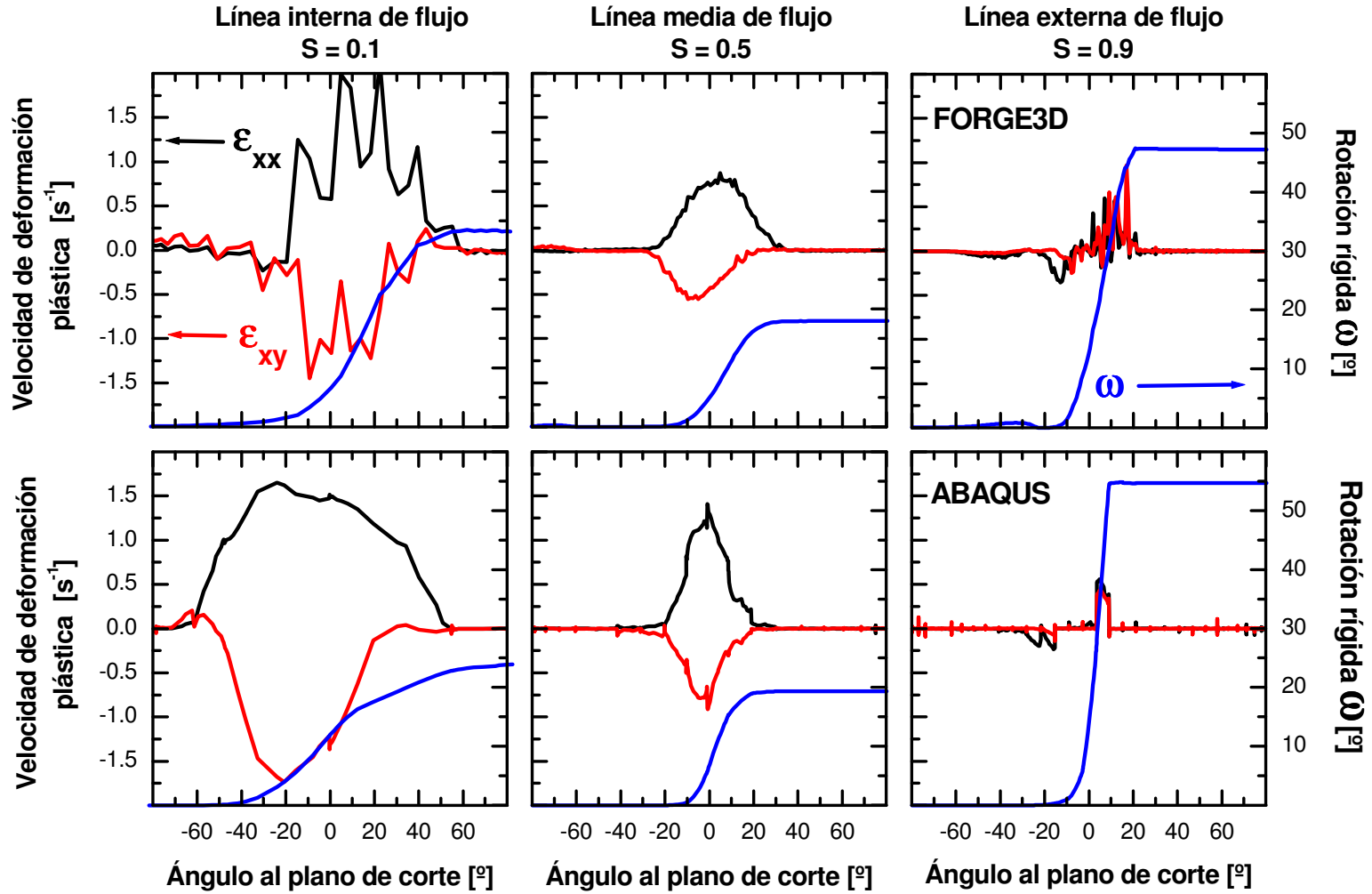


Figura 6: Gradientes de deformación (componentes de velocidad de deformación y rotación rígida) calculados con distintos códigos FEM para las fibras interna, media y externa de los lingotes en la primera pasada de ECAE.

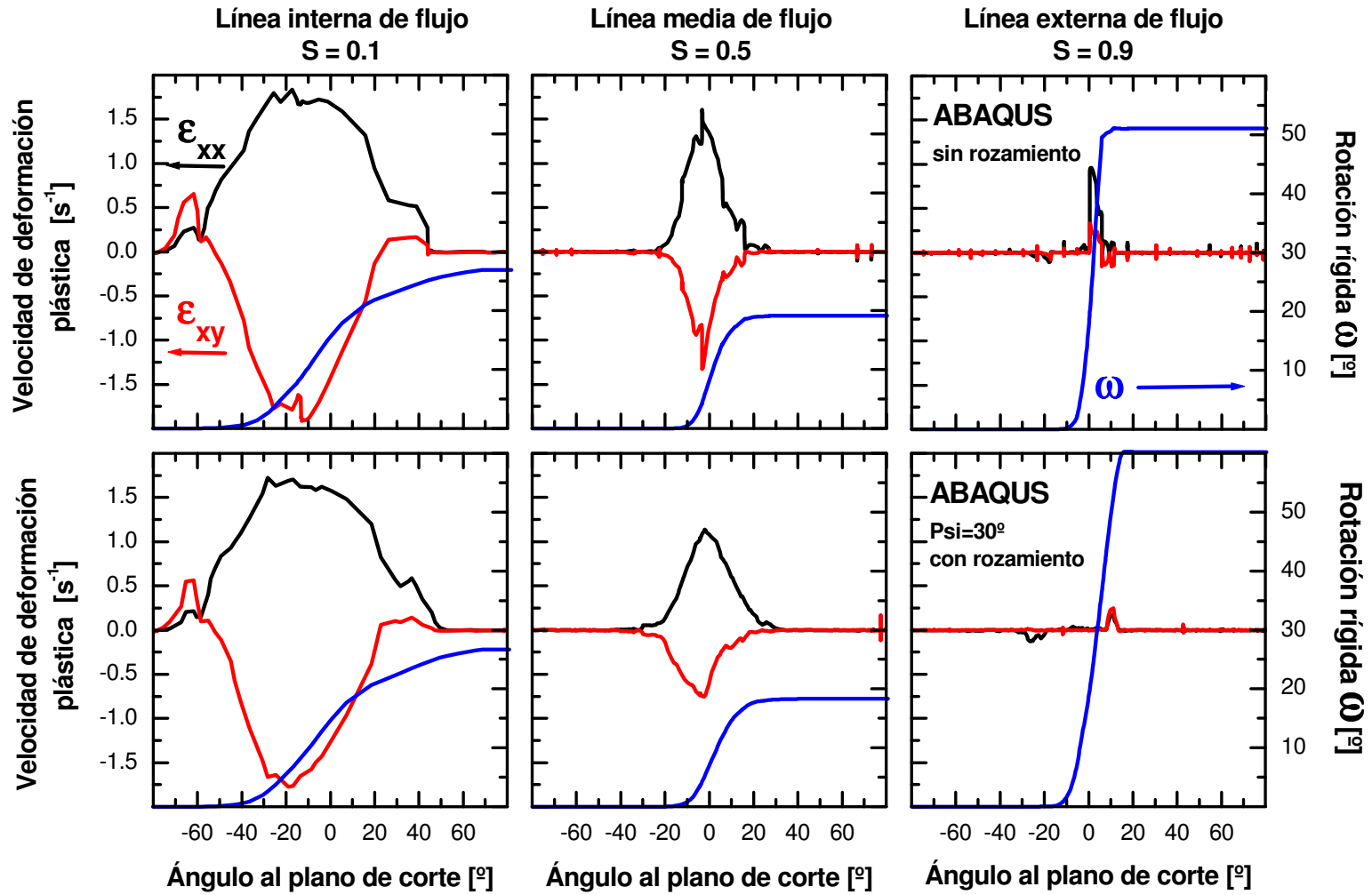


Figura 7: Componentes de velocidad de deformación y rotación rígida calculados con FEM sin y con rozamiento, para las fibras interna, media y externa una pasada ECAE.

De la Figura 6 se observa que ambos códigos de elementos finitos dan resultados que están en muy buen acuerdo, sin embargo pareciera que el uso de elementos cuadrangulares, para la simetría del problema, es mucho más adecuado.

El efecto del rozamiento mostrado en la Figura 7, no es importante en el cálculo del gradiente de deformación impuesto, salvo por una disminución en los valores de la velocidad de deformación plástica, esperable en el caso de trabajar con rozamiento, y de un aumento en la rotación rígida que corresponde a los elementos materiales de la fibra más externa ($S = 0.9$). Este último efecto, aumento de la rotación, se corresponde con el hecho de que al haber rozamiento el material tiende a llenar el ángulo externo y a seguir la forma del canal.

Como también resultó en las simulaciones de trabajos anteriores, al inicio del proceso de extrusión el ángulo externo del canal es llenado con material y luego se inicia un vaciamiento debido a la continuidad del material. También se observa que no produce un completo llenado del canal a la salida a medida que se aumenta el número de pasada. Ambos efectos se reducen a medida que se aumenta la fricción impuesta.

El efecto de las diferencias de deformación y rotación para las distintas zonas (fibras) del lingote durante la extrusión se pone claramente de manifiesto en la evolución de la forma y orientación del elemento. En la Figura 8 se muestra un esquema del seguimiento durante el extrudado de la evolución de un elemento material pegado a la pared interna ($S = 0.1$), de otro en la línea media ($S = 0.5$) y de uno pegado a la cara externa ($S = 0.9$) del canal.

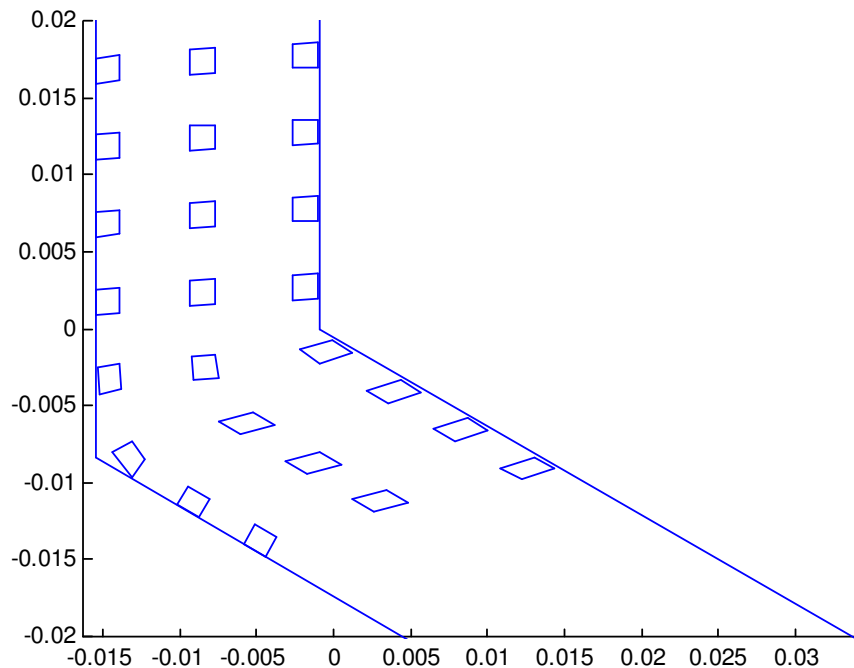


Figura 8: Deformación y rotación rígida de los elementos durante una pasada ECAE calculados con FEM.

De acuerdo a los gradientes calculados graficados en la Figura 7 se desprende que los

elementos de la fibra interna y la fibra media deberán tener deformaciones equivalentes y rotaciones muy próximas como se ve en el esquema de la Figura 8, mientras que los elementos que evolucionan según la fibra externa mantendrán su forma cuadrangular (su orientación respecto a la línea de flujo más precisamente) y no se deformarán.

Para la simulación del desarrollo de textura se discretizó en 5000 orientaciones con pesos proporcionales a las intensidades definidas por la función de distribución de orientaciones de la textura inicial medida experimentalmente. Los mecanismos de deformación plástica incluidos en el modelo policristalino son los sistemas de deslizamiento usuales en materiales fcc: $\{111\}\langle 110\rangle$. En los cálculos con el modelo policristalino se utilizó una sensibilidad a la velocidad de deformación de 0.1 y un esquema de interacción autoconsistente. La historia de deformación impuesta es la que resulta del cálculo de los gradientes de deformación de las simulaciones con FEM. Cuando el gradiente es el calculado por FEM, se imponen incrementos con las componentes obtenidas y con los intervalos de tiempo del cálculo. Así, la velocidad de deformación impuesta es más realista ya que toma en cuenta la geometría y las condiciones de borde. Por otra parte se observa que el gradiente obtenido por FEM contiene componentes de corte que no resultan en el caso ideal. En la Figura 9 se esquematiza el proceso de evolución de textura por extrudado angular.

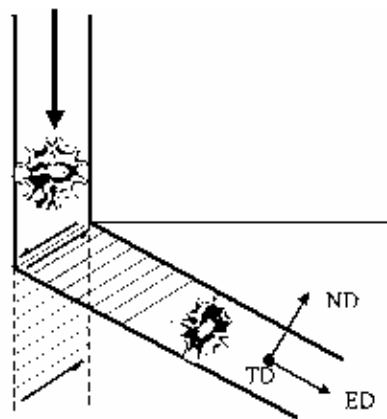


Figura 9: Esquema simplificado de la evolución de textura en el extrudido ECAE.

En trabajos anteriores se discutió la diferencia de imponer un gradiente ideal y el uso de un gradiente obtenido por simulación FEM del proceso ECAE. En este trabajo se presentan las diferencias de desarrollo de la textura del material en las distintas zonas de una sección de la probeta.

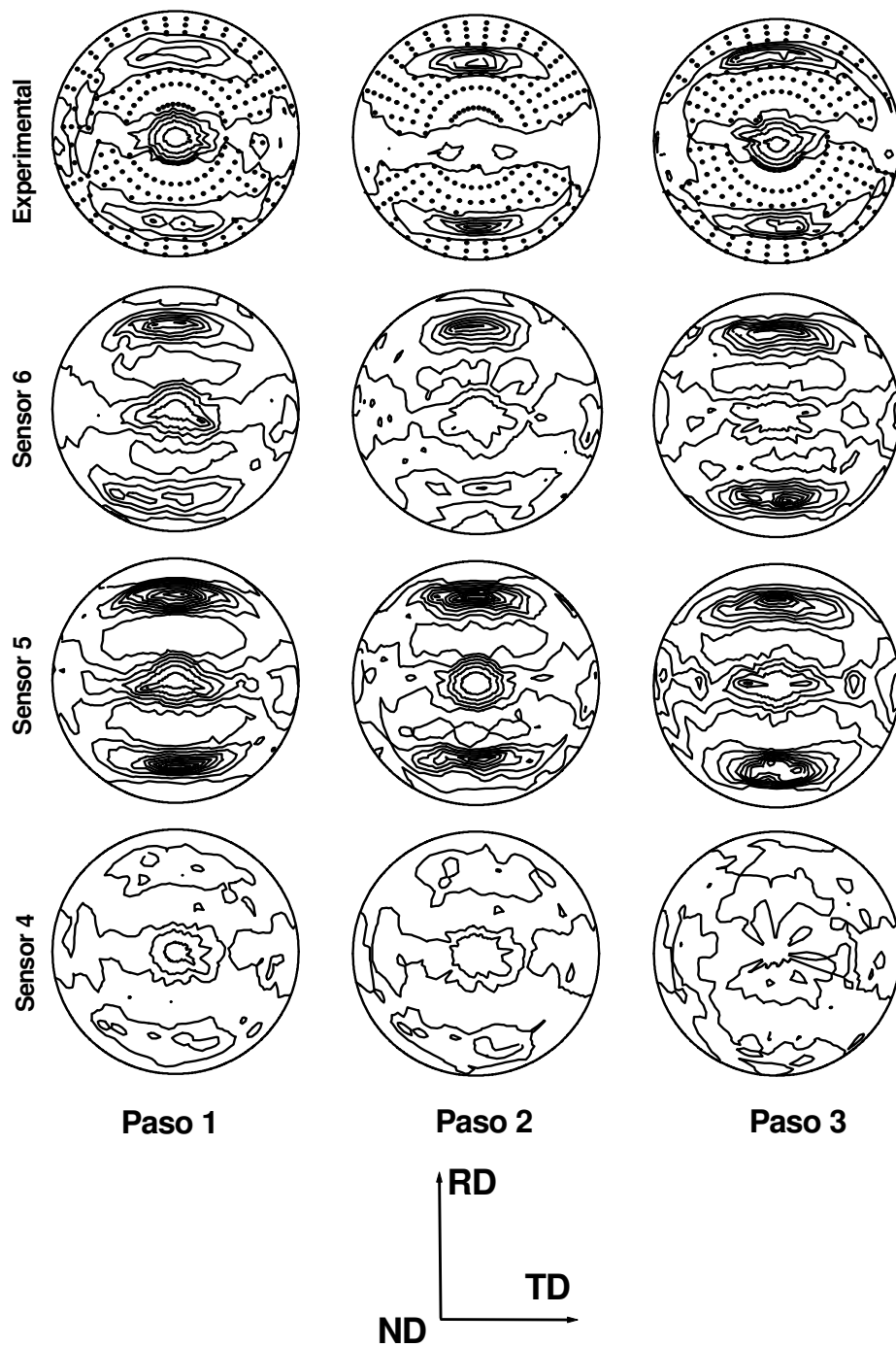


Figura 10: Figuras de polos (111) medidas y simuladas.

La Figura 10 muestra una comparación de los resultados obtenidos para los tres primeros pasos ECAE simulados. En la figura se representan las figuras de polos (111), con líneas de

nivel que se corresponden a intervalos de 0.5 de intensidad relativa a una distribución aleatoria de orientaciones. Todas ellas se refieren a la parte interna, media y externa de la probeta (correspondiente a la posición de los sensores en la Figura 5). Se verifica que si bien, el gradiente de deformación que corresponde a la línea de flujo interna difiere en amplitud del de la línea media, ambos dan como resultados evoluciones de textura muy parecidos y las intensidades son iguales. En cambio, para la línea externa de flujo la rotación sin deformación plástica no modifica la textura, y por el contrario tiende a destruirla, dando como resultado un material poco texturado, con bajas intensidades. En todos los casos, las intensidades simuladas son mayores que las medidas. Este aspecto se corrige si se utiliza un esquema de corotación en las simulaciones policristalinas. De las simulaciones se ha verificado que la fragmentación del grano, si bien modifica la ley de deformación del material, no produce un cambio importante en las texturas.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han comparado las simulaciones del proceso de extrusión angular con distintos tipos de elementos en códigos FEM. Se ha logrado obtener por cálculo los gradientes de deformación, que corresponden a la historia de deformación local del material e introducirlos como dato de entrada de un modelo de homogenización policristalino para luego evaluar las diferencias locales en la evolución de la textura cristalográfica y morfológica. Se ha comprobado la factibilidad de utilizar modelos apropiados a distintas escalas para investigar las características macroscópicas y microscópicas de este tipo de proceso de conformado. Las texturas simuladas imponiendo el gradiente de deformación calculado acuerdan razonablemente con las mediciones.

6. REFERENCIAS

- [1] Segal, V. M., *Mat. Sci. Eng.*, **A197**, 157-164 (1995).
- [2] Segal, V.M., Hartwig, K.T. and Goforth, R.E., *Mat. Sci. Eng.*, **A224**, 107-115 (1997).
- [3] Mishin, O.V., Gertsman, V.Y., Valiev, R.Z. and Gottstein, G., *Scripta mater.*, **35**, 873-878 (1996).
- [4] Uday Chakkingal, Arief B. Suriadi and Thomson, P.F., *Mat. Sci. Eng.*, **A266**, 241-249 (1999).
- [5] "Simulación Tridimensional de un proceso de extrusión multipaso tipo ECAE", Javier Signorelli, Claudio Gazza, Raúl Bolmaro, Roland Loge, Pablo Turner. *Mecánica Computacional Volumen XXII* (M.B.Rosales, V.H.Cortinez y D.V.Bambill eds.) (2003) 2145.
- [6] "Study by experiments and simulations of ECAE deformation of Al-4%Cu alloys". J.W.Signorelli, E.A.Vieira, P.A.Turner, M.Ferrante and R.E.Bolmaro. 2° Congreso en Ciencias de Materiales del Mercosur. 14-17 Septiembre, 2004. Joinville /SC - BRASIL.
- [7] ABAQUS/Standard Student Edition 6.4-2
- [8] "Evolución de la microestructura en Al-4%Cu sometido a extrusión angular". J.W.Signorelli, R.Loge, P.A.Turner, E.A.Vieira, M.Ferrante y R.E.Bolmaro. CONGRESO CONAMET/SAM 2004. 3-5 Noviembre, 2004. La Serena - CHILE
- [9] "ECAE of Al-4%Cu alloys: experimental study assisted by polycrystalline-fem simulations". J.W.Signorelli, R.Loge, P.A.Turner, E.A.Vieira, M.Ferrante y R.E.Bolmaro. 14th International

- Conference on Textures of Materials (ICOTOM 14). July 11-15, 2005. Leuven, BELGIUM.
- [10] "Modelización del proceso de extrusión angular. Parte I: Análisis por elementos finitos del flujo del material ". Y.Novara, M.Severino, P.Turner y J.W.Signorelli.en esta reunión, 2005. Buenos Aires ARGENTINA.
- [11] Lebensohn, R.A. and Tomé, C.N., *Acta metall.*, **41**, 2611 (1993).