

EXTRUSIÓN ANGULAR EN AL-4% CU

P.A.Turner^{*}, J.W.Signorelli^{*}, R.E.Bolmaro^{*}, E.A.Vieira[†] y M.Ferrante[†]

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

[†]Depto. de Engenharia de Materiais
UFSCa
13.565-905, São Carlos (SP) Brasil

Palabras claves: ECAE. Textura, Modelos policristalinos.

Resumen. *En el presente trabajo se presentan estudios tendientes a analizar la evolución de la microestructura en una aleación de Al-4%Cu (T4) sometida a un proceso de extrusión a través de canales angulares 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. 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 historia de deformación en diferentes zonas de la probeta se modeliza empleando la técnica de elementos finitos. La evolución microestructural, principalmente textura cristalográfica se analiza utilizando un modelo policristalino viscoplástico. A escala del monocristal se propone deslizamiento $\{111\}\langle 110 \rangle$ como modo de deformación. Los parámetros son ajustados de forma de reproducir la curva de carga obtenida para un ensayo de tracción simple. Las texturas cristalográficas predichas se comparan con las experimentales para validar el esquema de cálculo propuesto.*

1 INTRODUCCIÓN

El proceso de extrusión angular (ECAE – Equal Channel Angular Extrusion), originalmente desarrollado por Segal^{1,2}, es una técnica que actualmente se encuentra en su etapa de investigación. Su creciente interés se debe a la ventaja, en esta clase de proceso, de poder imponer altas deformaciones sin producir un cambio apreciable de la forma externa de la muestra original o lingote (Figura 1). Con ECAE se persigue la producción de aleaciones metálicas de granos muy finos, alcanzándose tamaños de grano muy pequeños (nano-rango), y además, de muy alta dureza ya que se induce endurecimiento por deformación y partición de grano. La técnica 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 elegido, lo que implica, idealmente, que la pieza no presente cambios en su sección. A su vez, la conservación de la sección redonda en la posibilidad de obtener un producto semi-terminado de un tamaño dado^{3,4}.

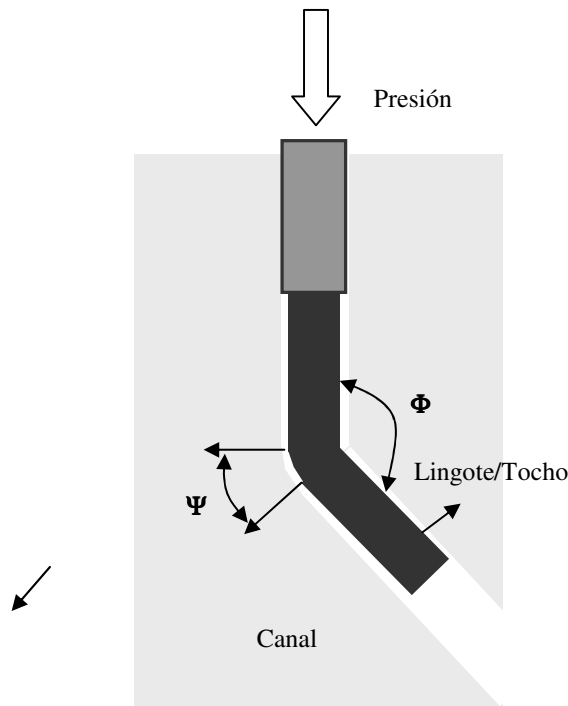


Figura 1: Descripción del proceso ECAE.

Una característica distintiva de este proceso es su carácter discontinuo: la pieza es insertada y reinsertada en el canal. Esta última característica del proceso permite diseñar el camino de deformación a través de rotaciones entre pasajes, dando como resultado otra de la

particularidades de esta técnica que es la de producir materiales con texturas, u orientaciones preferenciales, no típicas. En el presente trabajo, investigamos experimental y numéricamente la técnica, restringiéndonos a procesos denominados de tipo A, es decir, sin rotaciones entre pasajes. Salvo por el posible daño y fractura del material, el proceso se puede repetir varias veces, alcanzándose así el objetivo de acumular altas deformaciones.

Si bien la técnica es muy simple permite, además de la elección del material y de la temperatura del proceso, variaciones de algunas condiciones: ángulo del canal, lubricación y velocidad de deformación, asociadas a cada paso por el canal. El material investigado es Al-4%Cu a temperatura ambiente. A escala macroscópica utilizamos la técnica de Elementos Finitos (FEM) para evaluar las heterogeneidades en tensión-deformación durante el proceso de deformación. De este modo, los cálculos con FEM nos asisten en la elección de donde y como realizar las mediciones. A menor escala, las texturas que resultan de las predicciones con modelos policristalinos autoconsistentes se comparan con las medidas experimentalmente.

2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

El arreglo experimental implementado en este trabajo consiste en una herramienta de acero H-13, maquinada para contener dos canales de sección: 14.75 (ancho) x 14.40 (profundidad) mm² que se intersecan a 120°, y con una longitud total de 141.8 mm (Figura 2). El dispositivo es actuado por una presión hidráulica y se lubrica con bisulfato de molibdeno sólido. El material utilizado es Al-4%Cu preparado en laboratorio en estado T4 no deformado.



Figura 2: Esquema simplificado y foto del dispositivo ECAE.

En la foto de la Figura 3 se presentan los lingotes resultantes luego de cada paso de extrusión. Nótese que durante el proceso el material llena completamente el canal de salida, produciéndose daño en la cara ubicada en el interior de la herramienta y, dependiendo del paso, la fractura del material.



Figura 3: Muestras típicas luego de cada paso.

Para la determinación de las propiedades mecánicas se utilizó una INSTRON 5500-R. En la Tabla I se presentan los resultados de los ensayos de tracción simple para la muestra no deformada y las muestras cortadas de los lingotes obtenidos luego de cada paso de extrusión.

Material	Fluencia 0.2% (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Elongación (%)
No deformada	145	292	16.8
Al-4Cu 1X	287	352	7.7
Al-4Cu 2X	189	327	5.0
Al-4Cu 3X	222	412	4.2
Al-4Cu 4X	192	424	7.9
Al-4Cu 5X	193	438	7.1

Tabla 1: Resultados ensayos de tracción simple de muestras ECAE.

La Figura 4 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 FEM del ensayo de tracción realizado para obtener los parámetros de la ley elasto-plástica (véase sección 4.1), necesaria para las posteriores simulaciones del proceso de extrusión angular.

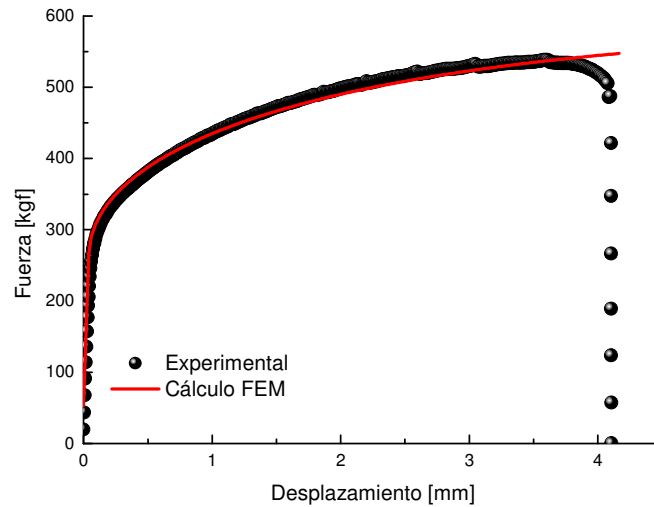


Figura 4: Curva de carga experimental y comparación con los resultados obtenidos con cálculo por FEM.

La medición de texturas para los materiales resultantes luego de cada paso de deformación se realizó por rayos X con un goniómetro Siemens. Se midieron figuras de polos $\{111\}$, $\{200\}$ y $\{220\}$ en el plano medio ubicado a un tercio de la muestra para descartar regiones donde el proceso, según las simulaciones FEM, presenta un campo de deformación marcadamente heterogéneo. Las texturas no muestran una marcada modificación luego de cada paso de deformación. Esto se debe a que durante el proceso completo (varias pasadas), si bien la deformación total alcanzada es alta, no se produce un monótono desarrollo de textura debido a que luego de cada paso se modifica el gradiente de deformación impuesto.

3 MODELOS NUMÉRICOS

Las simulaciones FEM se realizaron con un código de elementos finitos con Mini elementos basado en tetrahedros isoparamétricos lineales. Se pueden considerar materiales elastoplásticos o elásticos-viscoplásticos. El código posee una implementación de un modelo de remallado automático. Con estas modelizaciones se persiguieron los siguientes objetivos:

- Obtener una mayor comprensión de la influencia en el proceso del nivel de heterogeneidad, de la geometría y la lubricación.
- Ubicar los mejores volúmenes de material para realizar las mediciones sobre la base de haber sido sometidos a los caminos de deformación más homogéneos.

Como subproducto de las simulaciones por FEM se obtiene el gradiente de deformación en puntos elegidos de la muestra (sensores) para luego realizar modelizaciones policristalinas del desarrollo de textura.

Para la modelización del desarrollo de textura en cada paso de ECAE se utilizó un modelo policristalino autoconsistente viscoplástico. Una descripción más detallada de la formulación aquí utilizada puede encontrarse en Lebensohn y Tomé⁵, presentaremos aquí un resumen de las hipótesis sobre las que se desarrolla la formulación. En el modelo el agregado

policristalino se representa como un conjunto de orientaciones con pesos. La respuesta de cada grano (una orientación) resulta del criterio de localización, que en este caso es la interacción viscoplástica del grano con un medio viscoplástico efectivo equivalente, que a su vez representa el agregado policristalino como un todo homogéneo. El comportamiento global se obtiene por la imposición de homogeneización, que es un promedio pesado, por la fracción de volumen, del comportamiento de todos los granos. Además, en la actual implementación computacional de la formulación, se puede también seguir la evolución de la textura morfológica (forma y orientación de los granos).

La ecuación constitutiva de cada grano (u orientación) es dada por una ley viscoplástica potencial de la forma:

$$\dot{\varepsilon}^g = \gamma_0 \sum_{s=1}^n \frac{\mathbf{m}^s \otimes \mathbf{m}^s}{\tau_c^s} \left(\frac{\mathbf{m}^s : \sigma'^g}{\tau_c^s} \right)^{n-1} : \sigma'^g \quad (1)$$

donde \mathbf{m}^s , τ_c^s , γ_0 y n , son los parámetros de cada sistema de deslizamiento s : tensor de Schmid, tensión crítica, velocidad de corte de referencia y inversa a la sensibilidad a la velocidad de deformación. La ecuación de interacción resulta:

$$\left(\dot{\varepsilon}^g - \dot{\mathbf{E}} \right) = \tilde{\mathbf{M}} : \left(\sigma'^g - \Sigma' \right) \quad (2)$$

donde g identifica a cada grano y $\dot{\varepsilon}^g$ y σ'^g son la velocidad de deformación y tensión del grano, mientras que $\dot{\mathbf{E}}$ y Σ' corresponden a las mismas variables para el agregado policristalino. El tensor de localización $\tilde{\mathbf{M}}$ es una función del modulo viscoplástico del policristal, del tensor de Eshelby \mathbf{S}^{esh} y, de la forma y orientación de cada grano:

$$\tilde{\mathbf{M}} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{S}^{esh} \right)^{-1} : \mathbf{S}^{esh} : \mathbf{M}^{tg} \quad (3)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (1), (2) y (3) para todas las orientaciones (granos) se calcula la respuesta mecánica de cada una de ellas y la del agregado policristalino.

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

4.1 Resultados FEM

La geometría de la muestra es un prisma de 14.75 mm de ancho x 100 mm de longitud con un espesor de 0.4 mm, en vez de los 14.4 mm de la probeta experimental, e imponiendo simetrías en los planos laterales. Se malló con 12888 elementos tetraédricos isoparamétricos P1+P1 (4515 nodos). Las herramientas, el canal y el dispositivo de presión, se definieron rígidas y se trabajó en condiciones adiabáticas a temperatura ambiente. Si bien el programa de

FEM utilizado en el presente trabajo es un código 3D, las simulaciones realizadas para los resultados que se presentan fueron llevadas a cabo en la aproximación 2D.

El comportamiento constitutivo del material es descrito a través de una función de endurecimiento dependiente de la deformación y de la velocidad de deformación que toma la forma:

$$\sigma_e(p, \dot{p}) = \sqrt{3} K_0 (1 + a p^n) \dot{p}^m \quad (4)$$

Los coeficientes elásticos y los parámetros en la ecuación (4) son obtenidos por ajuste a los datos experimentales. La comparación de los cálculos con FEM del ajuste obtenido y la curva experimental es presentada en la Figura 4. Los resultados para las constantes elásticas son próximos a los del aluminio: E (módulo de Young) = 68.5 GPa con ν (coeficiente de Poisson) = 0.3 y para la ley de endurecimiento son: K_0 (umbral de consistencia) = 83.72 MPa, a (endurecimiento por deformación) = 3.5, n (sensibilidad al endurecimiento) = 0.5 y $m = 0.02$.

En la Figura 5 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.

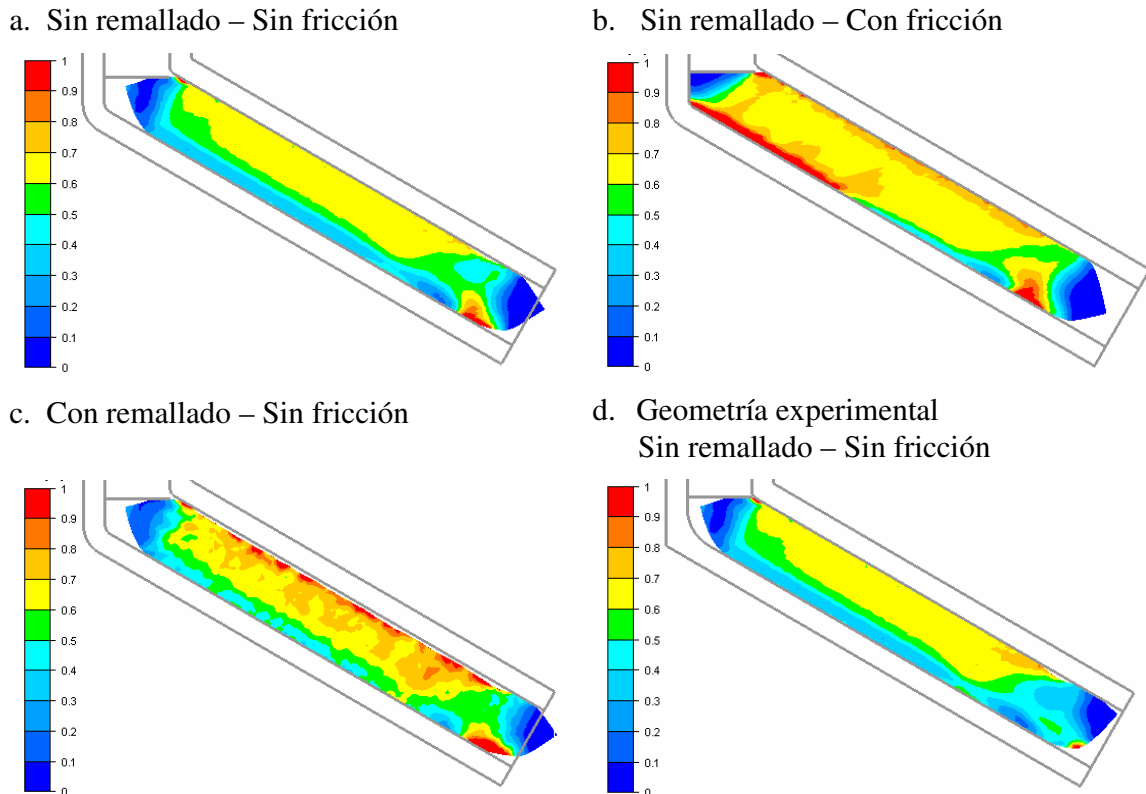


Figura 5: Comparación de las configuraciones para las simulaciones FEM.

Se investigó el efecto de la fricción, el remallado y la geometría del canal. De los resultados obtenidos para el presente trabajo se decidió no utilizar el remallado ya que por la transferencia de material se obtiene un campo de deformación final altamente heterogéneo. Actualmente se está desarrollando una distribución de volúmenes de lingote con diferentes mallados que permitirá obtener una mejor representación del proceso en zonas donde se produce un cambio de geometría importante. El efecto de la fricción y la geometría del canal si bien influyen en la distribución del campo resultante sobre la muestra final, en las zonas en estudio (parte media de la probeta) no producen diferencias importantes y con el fin de disminuir los tiempos de cálculo no se han tomado en cuenta en este trabajo.

Se calcularon el gradiente de velocidad de deformación y la deformación efectiva acumulada en posiciones de la probeta previamente elegidas para asistir en la elección de la mejor posición para las mediciones de textura. Además esta información es utilizada en los cálculos con los modelos policristalinos para el estudio de la evolución de textura. En la Figura 6 se muestra la ubicación de las 9 posiciones de los sensores que dan la información en distintos volúmenes del material. El sensor 8 es el que corresponde a una posición donde ya el proceso se encuentra en estado estacionario y representa el comportamiento final de la mayor parte de volumen de material (Figura 5.a).

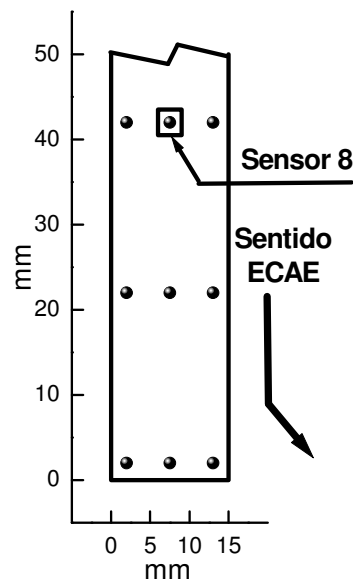


Figura 6: Ubicación de los sensores en las simulaciones con FEM.

En las Figuras 7, 8 y 9 se presentan los gráficos que corresponden a los campos de velocidad de deformación equivalente y de deformación equivalente acumulada, junto con los mismos parámetros y la textura final para la ubicación del sensor 8 en los primeros tres pasos de extrusión. Para mantener las simulaciones lo más realista posible, luego de cada paso el material es descargado elásticamente y acomodado nuevamente en el canal.

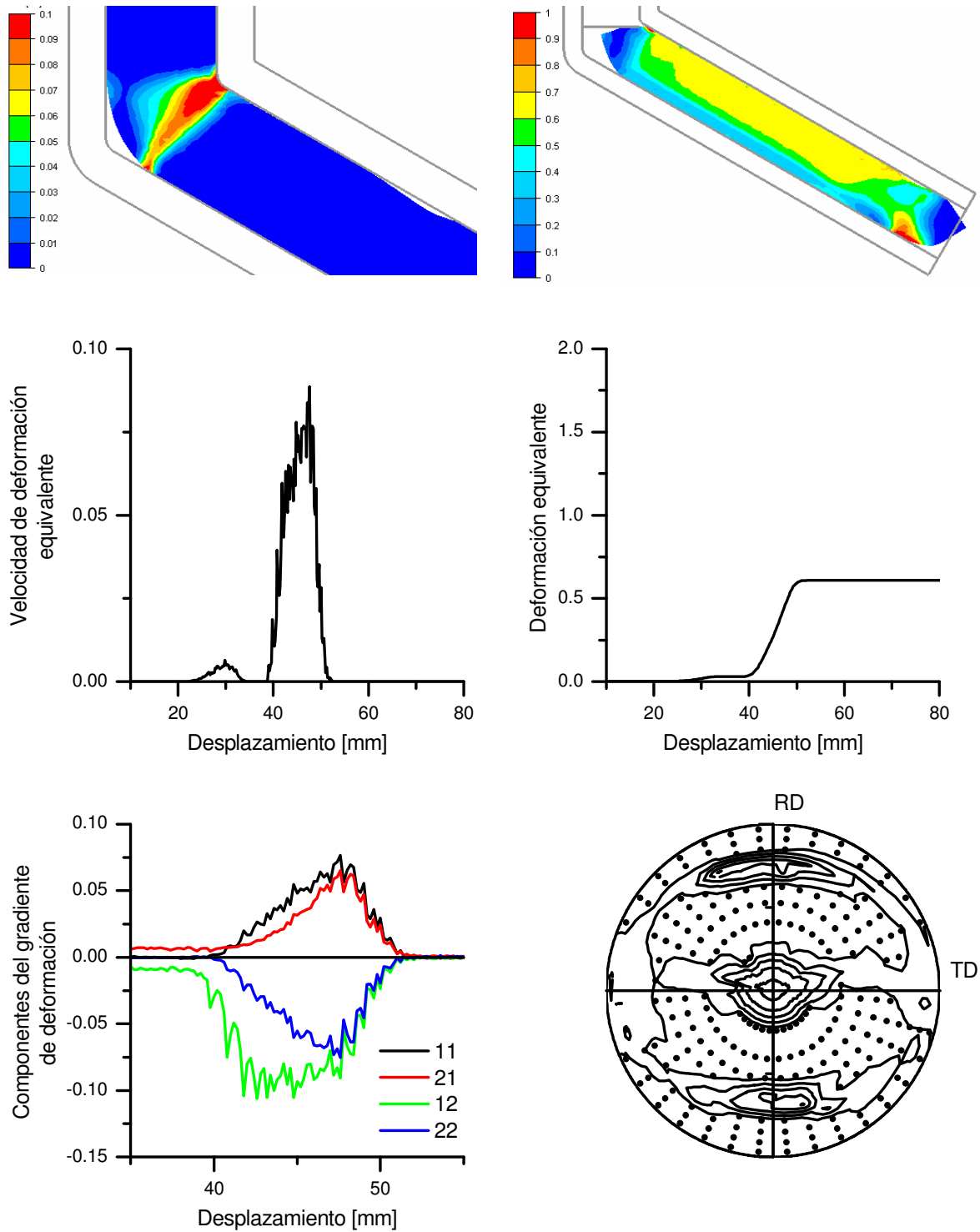


Figura 7: Detalle de resultados en la probeta y para el sensor 8 durante 1^o paso ECAE.

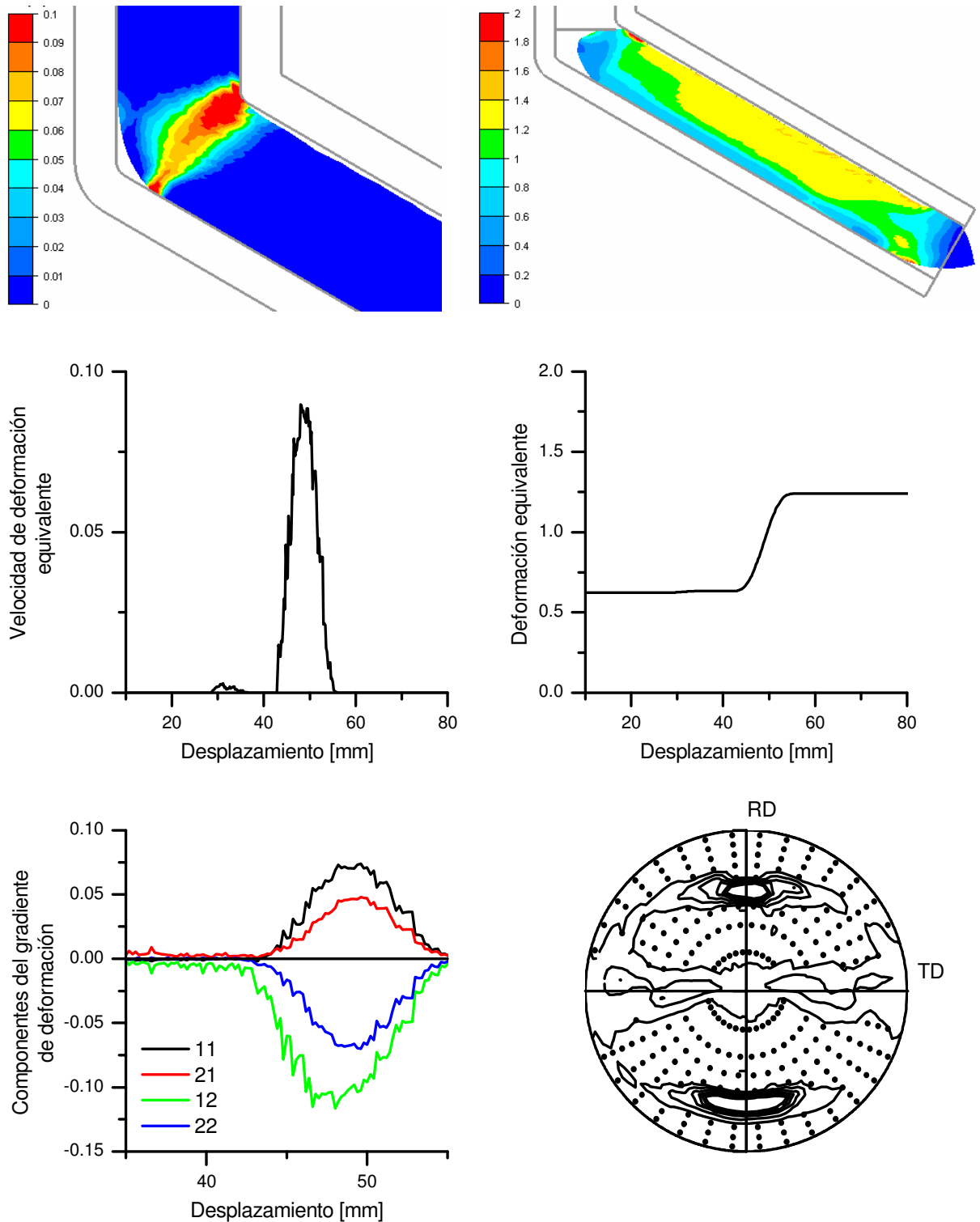


Figura 8: Detalle de resultados en la probeta y para el sensor 8 durante 2° paso ECAE.

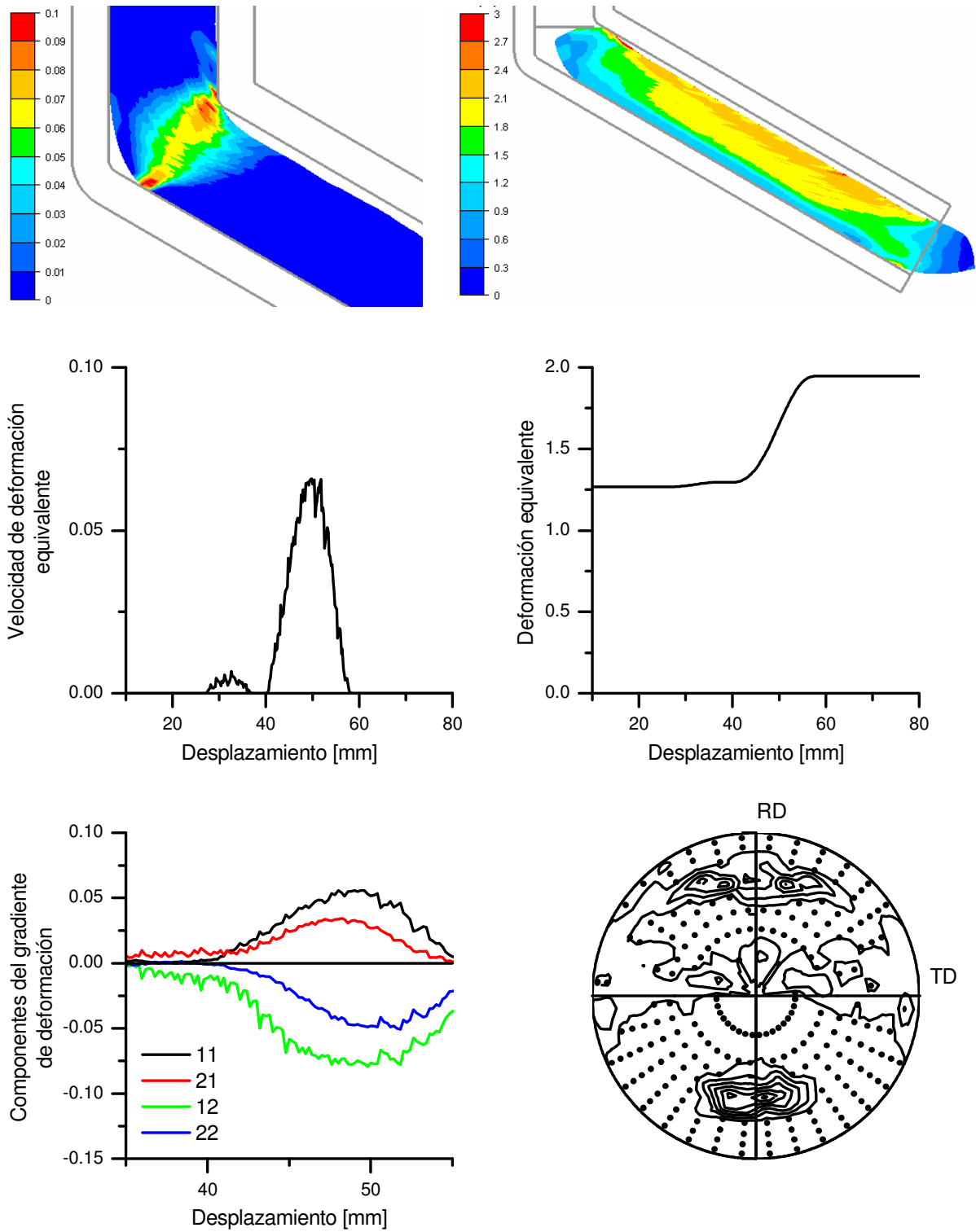


Figura 9: Detalle de resultados en la probeta y para el sensor 8 durante 3° paso ECAE.

Durante la simulación de la descarga resulta un remarcado retorno elástico, que si bien es también observado experimentalmente, es de menor magnitud. 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. Sin embargo, en ninguno de los casos estudiados numéricamente se ha logrado reproducir la forma externa (llenado completo) que resulta en los ensayos experimentales (véase Figura 3).

De las Figuras 7, 8 y 9 se observa que resulta una porción de material que posee heterogeneidad del campo de deformación (parte inferior del canal) y que ambos extremos de la muestra poseen valores de deformación menores a los ideales. De las curvas que corresponden a las componentes del gradiente de velocidad de deformación resulta que a mitad que se pasa el material se produce un ensanchamiento de la zona con velocidad de deformación no nula y una disminución de la magnitud, alejándose así de las condiciones ideales. Durante los tres primeros pasos de extrusión mostrados el remallado no es necesario, sin embargo a partir del cuarto paso, algunos elementos son altamente deformados y el remallado es obligatorio. Como se mencionó, una de las desventajas de utilizar remallado es la heterogeneidad resultante, pero también, que eventualmente el sensor puede cambiar de elemento al cual pertenece y resultan saltos en los valores calculados de las variables bajo estudio.

4.2 Resultados simulaciones de texturas

La textura inicial del material obtenida experimentalmente se discretizó en 1000 orientaciones con pesos proporcionales a las intensidades definidas por la función de distribución de orientaciones. La forma de grano impuesta al inicio del proceso es esférica ya que es que resultaría del proceso de solubilización en la producción en laboratorio del material. Se eligieron como mecanismos de deformación plástica los sistemas de deslizamiento usuales en materiales fcc: $\{111\}\langle 110\rangle$. En los cálculos de desarrollo de textura se utilizaron dos historias de deformación impuestas a través de las componentes del gradiente de deformación: ideal y calculada con FEM (representadas en las Figuras 7, 8 y 9).

El caso ideal resulta de suponer un gradiente homogéneo determinado por la acción de un corte simple localizado en el ángulo (codo) del canal de ECAE [1]. La magnitud del corte en el plano de corte es calculado como función del ángulo del canal (véase Figura 2) y para el caso de $\Theta = 120^\circ$ el gradiente de deformación ideal es:

$$V_{grad} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0.25 \\ 0 & -0.75 & 0.5 \end{pmatrix} \quad (5)$$

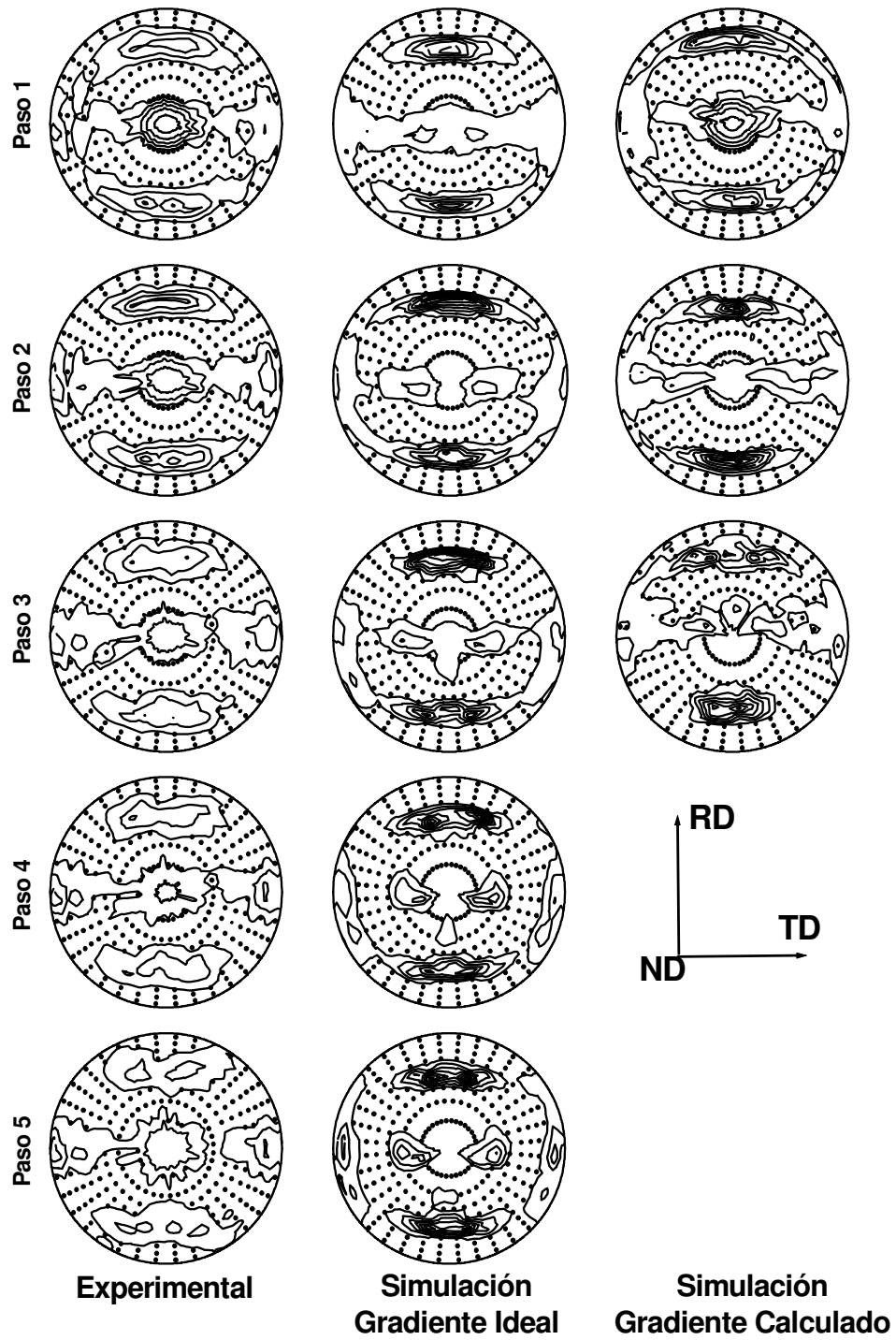


Figura 10: Figuras de polos (111) medidas y simuladas.

Para cada paso de extrusión se impone una deformación equivalente total de Von Mises de 0.666. En la modelización tal deformación total es alcanzada incrementalmente imponiendo 48 pasos de $\Delta E = 0.014$. En el caso de gradiente de velocidad de deformación calculado se imponen incrementos con las componentes obtenidas y con los intervalos de tiempo del cálculo. En este caso la velocidad de deformación impuesta es más realista ya que toma en cuenta la geometría y las condiciones de borde. El gradiente de velocidad de deformación así calculado contiene componentes de corte que no resultan en el caso ideal. En los cálculos con el modelo policristalino para desarrollo de textura se utilizó una sensibilidad a la velocidad de deformación de 0.1 y un esquema de interacción autoconsistente.

La Figura 10 muestra una comparación de los resultados obtenidos para cada paso junto con las texturas medidas. En este trabajo hacemos énfasis en las diferencias obtenidas de la utilización del gradiente ideal y el calculado. En la figura se representan las figuras de polos (111). Todas ellas se refieren a la parte media y central de la probeta (correspondiente a la posición del sensor 8 en la Figura 6). Las intensidades son siempre mayores en las simulaciones que las que se obtienen experimentalmente. Tanto para el caso ideal como para el gradiente calculado con la simulación FEM las componentes y su modificación en cada paso son predichas aceptablemente. Mientras que en el caso ideal se resulta una disminución más pronunciada en la componente normal, el gradiente calculado tiende a distribuir los máximos de forma más pareja. Este efecto desaparece a partir del tercer paso de extrusión. La forma de grano normalmente no modifica sustancialmente el desarrollo de textura en materiales fcc, se espera que la inclusión de un esquema de fragmentación del grano más las rotaciones permitan corregir esta deficiencia en la simulación.

5 CONCLUSIONES

Se investigaron distintas condiciones para el proceso ECAE en Al-4%Cu con la asistencia de los cálculos con la técnica de elementos finitos. La mejor región para la medición de las texturas se ha elegido usando las modelizaciones FEM. Las texturas simuladas imponiendo el gradiente de deformación ideal acuerdan razonablemente con las mediciones, notándose una mejora cuando se utilizan los gradientes de deformación calculados por FEM. En particular se observa una mejora en la componente de polos [111] en la dirección normal. La evolución de la forma de grano se encuentra actualmente en estudio para ser comparadas con metalografías de las muestras y proponer un modelo de fragmentación de grano.

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] Lebensohn, R.A. and Tomé, C.N., *Acta metall.*, **41**, 2611 (1993).