

MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN ANGULAR. PARTE I: ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DEL FLUJO DE MATERIAL

I. Novara¹, M. Severino¹, J. Fernández Bugna², P. Turner¹ y J. Signorelli¹

¹ Instituto de Física Rosario
Fac. de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. CONICET-UNR.
Bv. 27 de febrero 210 bis, (2000), Rosario, Argentina
e-mail: severino@ifir.edu.ar

² Departamento de Física,
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires,
Av. Paseo Colón 850, (1063), Ciudad de Buenos Aires, Argentina

Palabras claves: Elementos Finitos, ECAE.

Resumen. *En el presente trabajo se simuló numéricamente hasta tres pasos del proceso de extrusión angular (ECAE – Equal Channel Angular Extrusion), asumiendo condición de deformación plana, mediante el software de elementos finitos Abaqus Student versión 6.5.3.. El creciente interés por este proceso se debe a la ventaja de poder imponer altas deformaciones sin producir un cambio apreciable de la forma externa de la muestra original. La técnica utiliza dos canales de igual sección que se intersecan formando un ángulo determinado, en nuestro caso 120°. El material utilizado se comporta según la ley constitutiva elasto-plástica del tipo Ramberg-Osgood. Se estudió la influencia del ángulo exterior ($\Psi = 0^\circ - 60^\circ$), y del coeficiente de fricción ($\mu = 0 - 0.125$) en la distribución transversal de la deformación y del gradiente de velocidad en posiciones del lingote previamente elegidas. Este último será utilizado como entrada en modelos policristalinos para el posterior estudio de la evolución de textura y la microestructura, del material deformado.*

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de severa deformación plástica tales como laminado, extrusión, forja, somete al material a deformaciones muy altas con los cambios subsecuentes en las características físicas y mecánicas. Estos métodos realizan un cambio sensible en las dimensiones materiales. Una técnica de deformación especial, llamada de extrusión angular donde los canales de entrada y salida tienen igual sección (ECAE) fue desarrollada por Segal^{1,2} en 1971. Este método representa una técnica innovadora para inducir altas deformaciones plásticas por corte simple, desarrollando así una microestructura de grano fino cuyo tamaño puede alcanzar el orden del micrómetro o aún del nanómetro^{3,4}. Además diversas microestructuras y propiedades mecánicas pueden alcanzarse modificando la orientación del espécimen entre pasadas⁵. En ECAE, las dimensiones del espécimen no se modifican, en contraste con los métodos tradicionales de deformación. La magnitud de la deformación, uniforme y unidireccional, lograda con baja carga y las dimensiones invariables, se pueden considerar como las ventajas principales del ECAE.

El análisis teórico de Segal¹ indica que para grandes muestras y suponiendo además condiciones idealizadas sin fricción, el material experimenta corte simple, produciendo un flujo plástico estacionario en el plano de corte. Una expresión más refinada, obtenida por Iwahashi et al.⁶, para la deformación efectiva, incluye el ángulo de la curvatura Ψ de la esquina exterior (Figura 1).

$$\varepsilon = \frac{2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right)}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

Una consecuencia de la ecuación (1), es que en el caso de múltiples pasos, resulta una deformación total acumulada igual a la deformación correspondiente a un paso multiplicada por el número de estos. El trabajo experimental⁷ confirma que la deformación acumulada en el centro del material es de hecho aditiva. Pero se tienen desviaciones de la situación ideal cerca de las superficies que están en contacto con el canal. Estas desviaciones son atribuidas a la fricción. Otra evidencia experimental sugiere también que debido a la fricción existe una región de deformaciones no uniformes que pueden extenderse hasta en un 15% de la sección transversal⁸.

Una de las pioneras simulaciones de ECAE por elementos finitos⁹, muestra que incluso en ausencia de la fricción, la deformación efectiva en la superficie exterior es aproximadamente un 4% menor que en el centro del material puesto que hay una tendencia del material a separarse de la esquina externa. En presencia de fricción esta separación no es tan grande, y la distribución de la deformación es más uniforme en la sección transversal.

De la ecuación (1) puede verse que para un Φ determinado, a medida que Ψ aumenta, la deformación acumulada por paso es menor. Como la deformación es aditiva, es posible obtener una deformación uniforme en el material, rotando 90° el mismo entre pasadas¹⁰.

A medida que Φ crece, la deformación por paso disminuye, por lo que se logra la misma deformación acumulada total aumentando la cantidad de pasadas, resultando distintas

microestructuras¹⁰.

En el presente trabajo se muestra, la influencia combinada del ángulo de la esquina externa y del rozamiento entre el material y el canal en la inhomogeneidad de la deformación en cada paso de ECAE. Además, se calculó el gradiente de velocidad de deformación en posiciones del lingote previamente elegidas para ser utilizado como entrada en modelos policristalinos para el posterior estudio de la evolución de textura. Con este propósito, las simulaciones por elemento finito son realizadas en 2D y se considera deformación plana. El ángulo entre los canales es 120° y la probeta no es rotada entre pasadas.

2. MODELO NUMÉRICO

Las simulaciones de elementos finitos se realizaron con Abaqus Student versión 6.5.3.. El canal, se definió rígido y se trabajó en condiciones adiabáticas a temperatura ambiente. La Figura 1 muestra un esquema del dispositivo experimental.

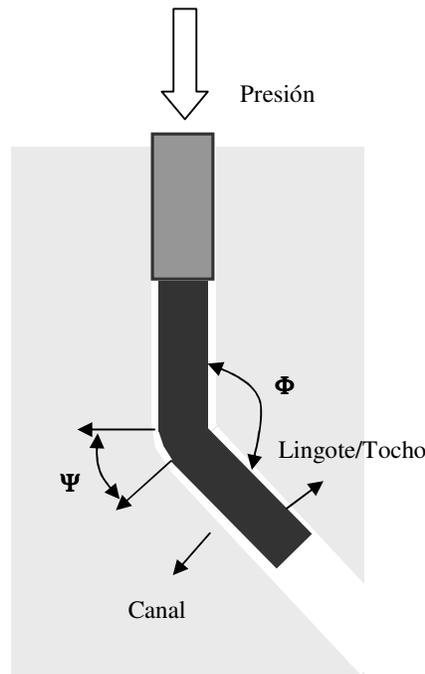


Figura 1: Esquema y parámetros del proceso de extrusión angular (ECAE).

Las dimensiones del material sometido al proceso ECAE son los siguientes: ancho (W) 14.4 milímetros y longitud (L) 100 milímetros. Para facilitar el comienzo de las simulaciones se redondeó con un radio de $0.16W$ el lado externo del frente del material. Los canales de entrada y salida tienen el mismo ancho que el material. En cuanto a la longitud de los mismos, se eligieron de modo que el material esté siempre confinado en el canal. La velocidad del

proceso adoptada es 0.01 m/s.

El material fue particionado en 863 elementos CPE4R (elemento cuadrilátero de 4 nodos de deformación plana con interpolación bi-lineal e integración reducida) resultando un número total de nodos de 947. Para evitar una excesiva distorsión de la malla, y disminuir tanto el tiempo de convergencia como la necesidad de remallar entre pasadas, se redondeó la esquina interna con un radio de $0.025W$.

El comportamiento constitutivo del material se describe utilizando una ley elasto-plástica del tipo Ramberg-Osgood¹¹

$$\sigma = 250(\varepsilon_p)^{0.335} + 31 \quad (2)$$

Donde σ es la tensión en MPa y ε_p es la deformación plástica equivalente. Las propiedades elásticas seleccionadas son módulo de Young 110GPa y una relación de Poisson igual a 0.35.

Las simulaciones realizadas persiguen los siguientes objetivos:

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

Asimismo de los resultados de FEM obtenidos podemos extraer información del gradiente de deformación en puntos elegidos de la muestra a los cuales denominaremos sensores (Figura 2).

Se variaron dos factores en las simulaciones: el ángulo de la esquina externa $\Psi = 0^\circ - 60^\circ$, y el coeficiente de fricción entre el canal y el lingote $\mu = 0 - 0.125$.

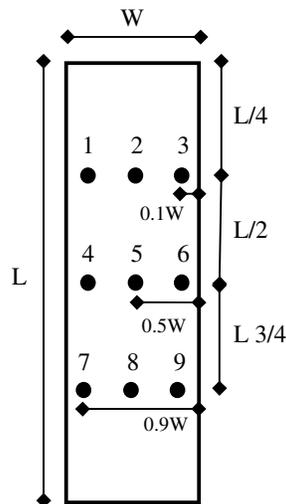


Figura 2: Ubicación de los sensores en las simulaciones FEM.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

La inhomogeneidad en la distribución de la deformación en el lingote en cada paso de ECAE depende fundamentalmente de la geometría de la zona de deformación plástica (ZDP), y de la distribución de la velocidad de deformación.

Las hipótesis comunes de los estudios analíticos para alcanzar homogeneidad en la distribución de deformación por corte simple en el plano de intersección de los canales son^{2,6}: llenado completo del canal con un material perfectamente plástico y $\mu = 0$. En los casos analizados, donde se tiene principalmente un llenado defectuoso del canal, la zona en donde se produce la deformación plástica, tiende a ensancharse y a perder simetría respecto al plano de intersección. En la Figura 3, se muestra la velocidad de deformación plástica máxima en el plano principal para tres pasadas de ECAE, para los casos $\Psi = 0^\circ - 60^\circ$, sin considerar rozamiento entre el canal y el lingote, y posteriormente mostrando los efectos del mismo.

En la Figura 3 se muestra:

a) Casos sin rozamiento:

- A medida que Ψ aumenta, la (ZDP) es más amplia y se divide en dos partes, cercanas a los extremos del radio que define la esquina exterior.
- Para el caso $\Psi = 0^\circ$, al aparecer un hueco en la esquina externa del canal, el material se comporta como si $\Psi \neq 0^\circ$, definiendo un ángulo material o Ψ efectivo desplazando el plano de corte.
- Para $\Psi = 60^\circ$, al no existir una superficie libre en el material generada por el hueco de la esquina externa, el mismo apoya sobre el canal, distribuyendo los esfuerzos, obteniendo zonas simétricas, extensas, y de baja intensidad.

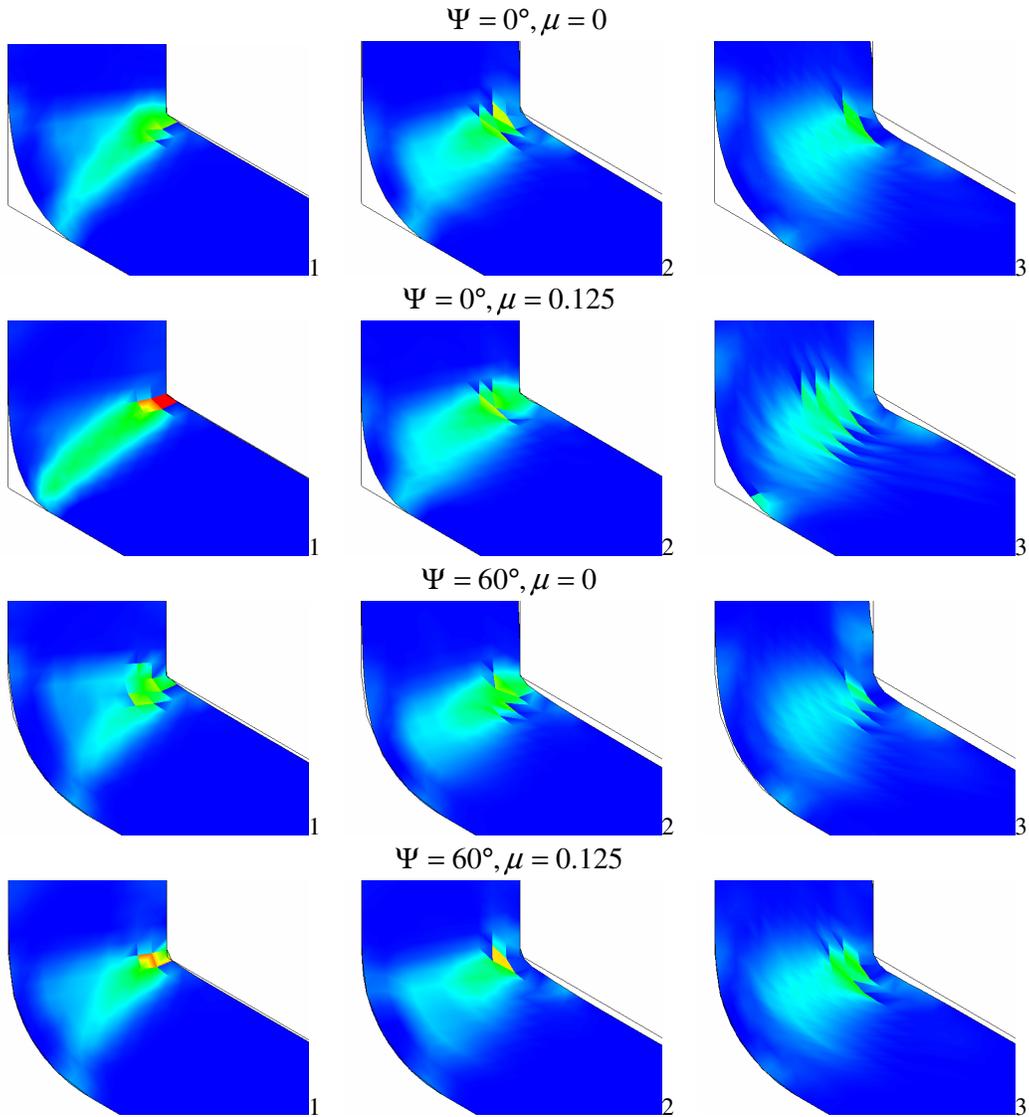
b) Casos con rozamiento:

- Si no existe hueco en la esquina exterior, la forma de ZDP, no es afectada significativamente.
- Si hay superficie libre (caso $\Psi = 0^\circ$), disminuye el hueco o el Ψ efectivo, incrementando aún más la asimetría del campo de velocidad de deformación.
- La velocidad de deformación siempre es mayor en la esquina interior, respecto al mismo caso pero sin rozamiento.

En todos los ejemplos el efecto de las sucesivas pasadas, ensancha y disminuye la intensidad de la zona de deformación.

Como consecuencia a lo expuesto anteriormente, la deformación plástica equivalente presenta inhomogeneidades en el lingote, después de cada paso ECAE. En la Figura 4, se muestran los campos de deformación plástica equivalente, para los casos analizados con anterioridad. En todos, la deformación obtenida varía tanto en la dirección longitudinal como transversal del lingote.

En la dirección longitudinal, se distinguen tres zonas: una inicial o cabeza del lingote, una final o cola del lingote y una que denominamos estado estacionario, en la cual la deformación es constante a lo largo de la dirección longitudinal. En la Figura 5, se muestran los perfiles de deformación plástica equivalente a lo largo de la dirección transversal, una vez concluida cada pasada a la altura del sensor 5 (Figura 2). En la misma se observa:



ER, Max. In-Plane Principal
(Ave. Crit.: 75%)

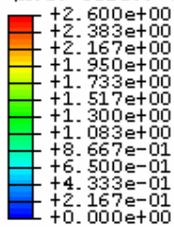


Figura 3: Comparación de los campos de velocidad de deformación máxima en el plano principal (ER), en la zona de deformación plástica, para los casos mencionados en la figura. 1, 2 y 3 indica el número de pasada.

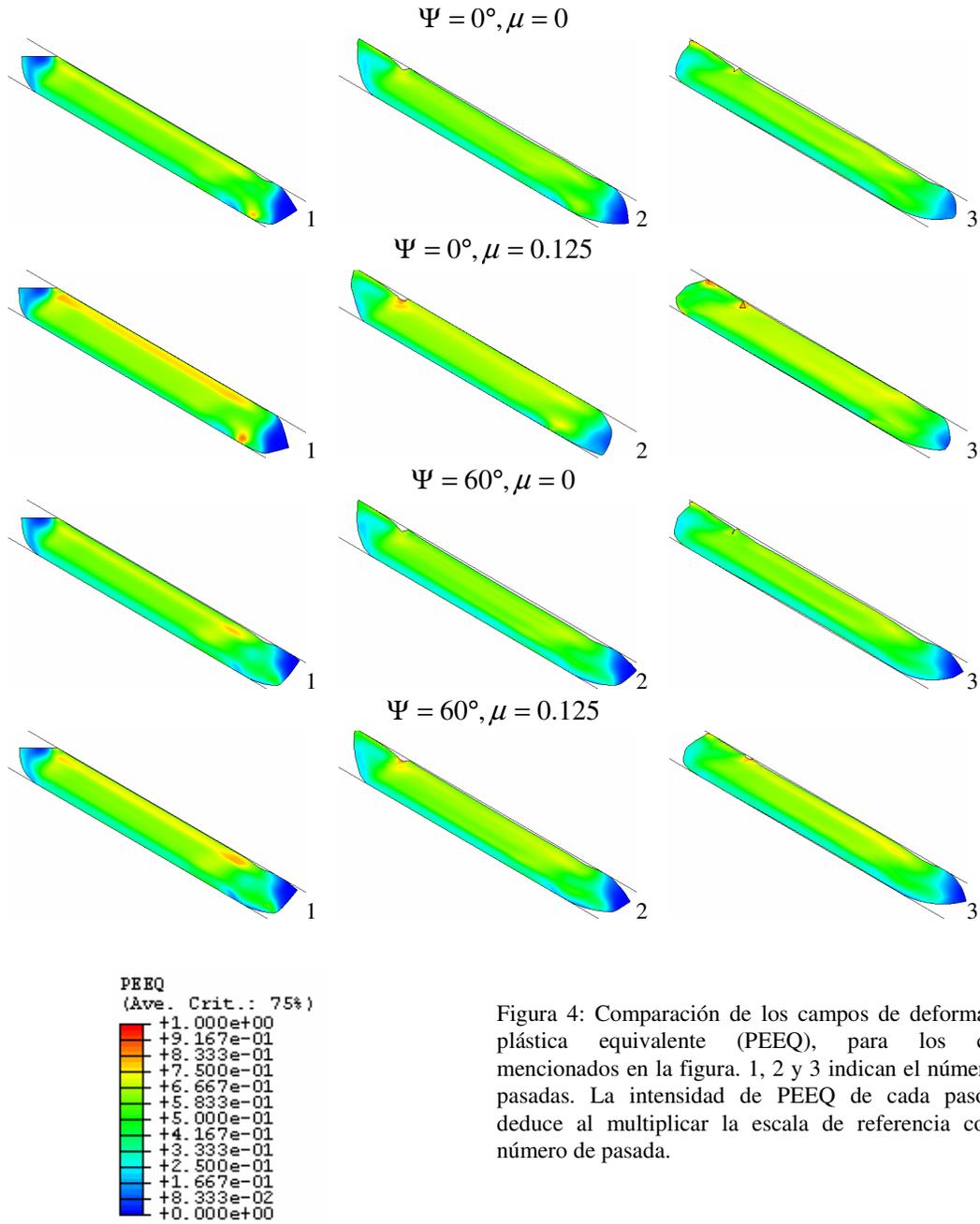


Figura 4: Comparación de los campos de deformación plástica equivalente (PEEQ), para los casos mencionados en la figura. 1, 2 y 3 indican el número de pasadas. La intensidad de PEEQ de cada paso, se deduce al multiplicar la escala de referencia con el número de pasada.

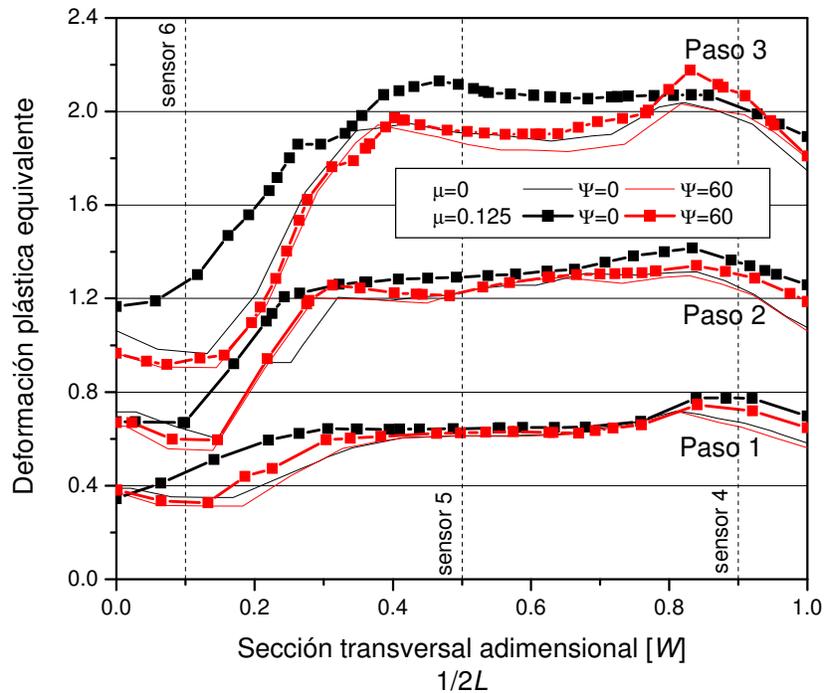


Figura 5: Influencia de Ψ y μ en la deformación plástica equivalente a lo largo de la sección transversal del lingote, al finalizar cada pasada ECAE. Las líneas de punto indican la posición de los sensores.

- Cuando la esquina exterior es más redonda ($\Psi > 0^\circ$), existen zonas donde el corte es menos intenso, obteniendo así, menores deformaciones al aumentar dicho valor. Esto último se pone en evidencia para el caso $\Psi = 0^\circ$, al comparar los resultados con y sin rozamiento. Como se mostró en párrafos anteriores, al aumentar μ , disminuye el hueco en la esquina exterior, resultando una disminución efectiva de Ψ y por lo tanto un aumento en la deformación y en la homogeneidad de la misma.
- En todos los casos, se observa que la deformación plástica equivalente aumenta con μ .
- Al incrementar la cantidad de pasadas, aumenta la inhomogeneidad de la deformación, y el porcentaje de la sección transversal donde es más homogénea disminuye.
- La deformación inhomogénea genera la aparición de huecos cerca de la esquina interna, asociados a la leve flexión ascendente del material. Este efecto es más evidente a medida que aumenta Ψ , la cantidad de pasadas y la disminución del rozamiento (ver Figura 3).

Como se mencionó en la sección anterior, se calculó el gradiente de velocidad en puntos

específicos del lingote, dado nuestro interés en la modelización posterior de la evolución de las texturas y de la microestructura en base a simulaciones policristalinas. En las Figuras 6 y 7 se muestra la evolución del gradiente de velocidad para $\Psi = 0^\circ - \mu = 0$ y para $\Psi = 0^\circ - \mu = 0.125$ respectivamente, en función del ángulo α definido por la posición de la línea que une el punto material (posición del sensor) con la esquina interna y el plano de intersección de los canales. Así la ZDP se encuentra definida en un rango de $\alpha = -40^\circ - 40^\circ$ aproximadamente. En las mismas se observa:

- A igual cantidad de pasadas, la magnitud de la velocidad de deformación es mayor para el caso con rozamiento.
- Si no hay rozamiento, las componentes del gradiente para pasadas sucesivas se superponen, mientras que para $\mu = 0.125$, las curvas se desplazan hacia la izquierda, disminuye el máximo de la componente ϵ_{xx} y aumentando el mínimo de la componente ϵ_{xy} .

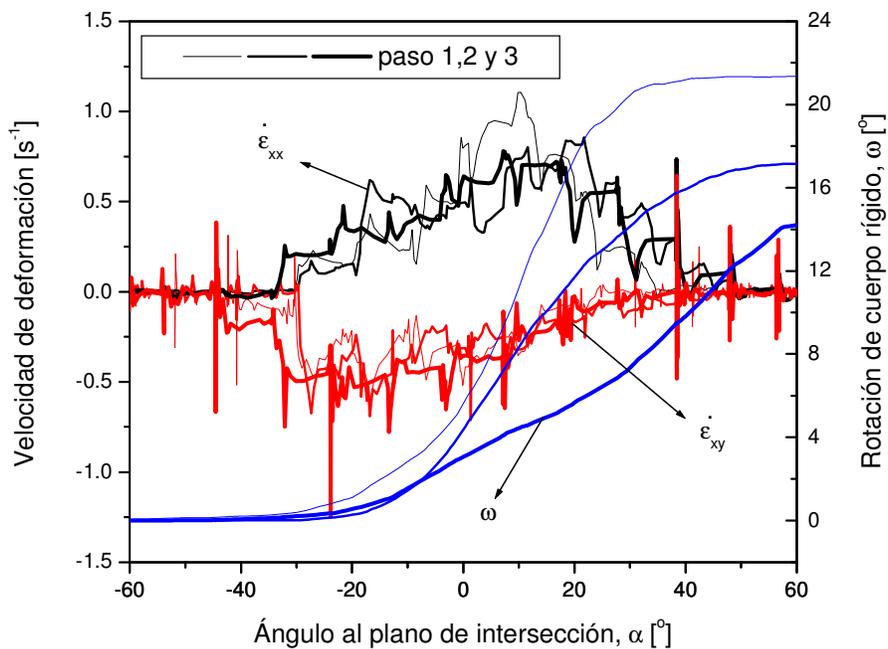


Figura 6: Caso $\Psi = 0^\circ - \mu = 0$. Variación de las componentes de la parte simétrica del gradiente de velocidad (ϵ_{xx}), (ϵ_{xy}) y de la parte antisimétrica (ω) con el ángulo al plano de intersección.

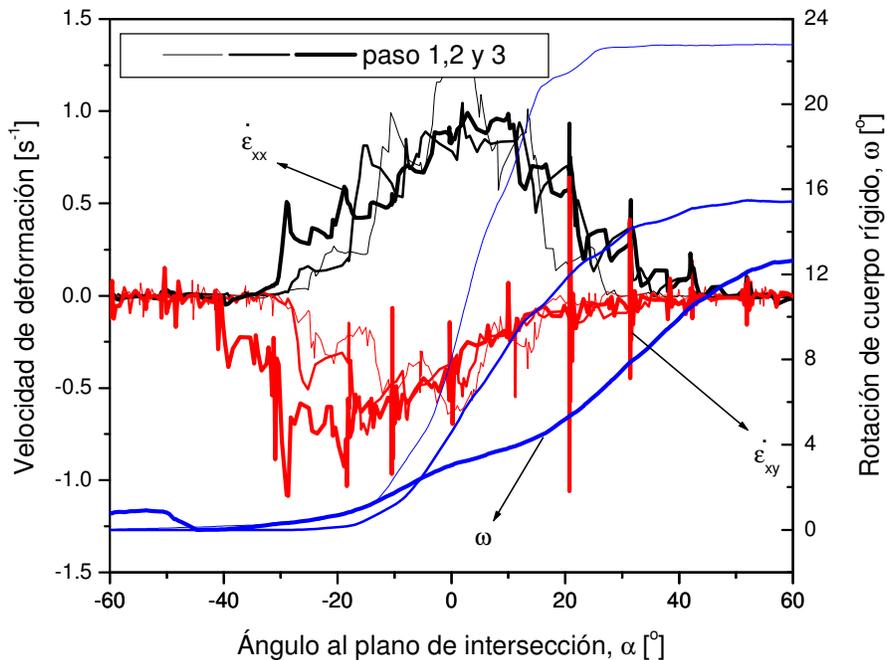


Figura 7: Caso $\Psi = 0^\circ$, $\mu = 0.125$. Variación de las componentes de la parte simétrica del gradiente de velocidad (ε_{xx}), (ε_{xy}) y de la parte antisimétrica (ω) con el ángulo al plano de intersección.

4. CONCLUSIONES

Se analizaron distintas condiciones para el proceso ECAE para un ángulo entre los canales de 120° . Debido a la respuesta material, se produce un hueco en la esquina exterior cuando no hay rozamiento y $\Psi = 0^\circ$. Como consecuencia, se obtiene para ese caso un comportamiento muy similar a $\Psi = 60^\circ$. De esta forma, las diferencias más notables se observan cuando $\Psi = 0$ y el rozamiento es apreciable, dado que se obtiene un efecto combinado, por la reducción del hueco en la esquina externa (Ψ aparente menor) y el rozamiento. Esto último, indica la necesidad de que no existan superficies libres en el lingote para obtener porcentajes de volúmenes mayores con deformación uniforme.

5. REFERENCIAS

- [1] V.M. Segal, V.I. Reznikov, A.E. Drobyshevskiy, V.I.Kopylov, Plastic working of metals by simple shear, Russ.Metall. 1 (1981) 99–105.
- [2] V.M. Segal, Materials processing by simple shear, Mater. Sci. Eng. 197A (1995) 157–164.

- [3] R.Z. Valiev, A.V. Korznikov, R.R. Mulyukov, *Mater. Sci. Eng. A* 168 (1993) 141.
- [4] A. González, C.J. Luis, Y. Garcés, J. Gil-Sevillano, *Rev. Metal. Madrid* 37 (6) (2001) 641–720.
- [5] V.M. Segal, R.E. Goforth, K.T. Hartwig, in: *Proceedings of the First International Conference on Processing Material for Properties*, The Minerals, Metals and Materials Society, 1993, p. 971.
- [6] I. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon, *Scripta Mater.* 35, 143 (1996).
- [7] I. Wu and I. Baker, *Scripta Mater.* 37, 437 (1997).
- [8] A. Shan, I.-G. Moon, H.-S. Ko, and J.-W. Park, *Scripta Mater.* 41, 353 (1999).
- [9] P. B. Prangnell, C. Harris, and S. M. Roberts, *Scripta Mater.* 37, 98d3 (1997).
- [10] M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon, in *Ultrafine Grained Materials*, ed. R. S. Mishra et al., p. 125. The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA (2000).
- [11] S. Li, M.A.M. Bourke, I.J. Beyerlein, D.J. Alexander, B. Clausen, *Materials Science and Engineering A* 382 (2004) 217–236.