

CARACTERIZACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DEL CONFORMADO POR EXTRUSIÓN EN CANAL ANGULAR DE SECCIÓN CONSTANTE DE BARRAS DE Al 6061-T6

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF Al 6061-T6 BILLETS DEFORMED BY EQUAL CHANNEL ANGULAR EXTRUSION

Juan José E. Pastor Alés^{1,2}, Fernando D. Carazo^{1,2}, Carlos Guevara¹, Javier W.
Signorelli^{3,2}, Diego J. Celentano⁴

¹*Instituto de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería - UNSJ. Av. Lib. Gral. San Martín (O) 1290,
San Juan, Argentina. email: jpastor@unsj.edu.ar, fcarazo@unsj.edu.ar, cguevara@unsj.edu.ar*

²*CONICET, Av. Rivadavia 1917, C.A.B.A., Argentina.*

³*Instituto de Física Rosario. Fac. de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. CONICET-UNR.
Bv. 27 de febrero 210 bis, (2000), Rosario, Argentina. e-mail: signorelli@ifir-conicet.gov.ar*

⁴*Dpto. de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica, PUC. Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago,
Chile. e-mail: dcelentano@ing.puc.cl*

Palabras claves: Elemento Finito, Aluminio, ECAE, Deformaciones plásticas severas.

Resumen. En este artículo se presenta la caracterización numérica y experimental del proceso de extrusión en canal angular de sección constante de probetas de sección cuadrada de 10 mm de Al 6061. El principal objetivo de este trabajo es determinar la historia de deformación con el objeto de ser empleada como dato de entrada en modelos policristalinos. Para esto se implementa un modelo constitutivo elastoplástico con endurecimiento isotrópico en un código de elementos finitos (EF). El desarrollo experimental contempla el diseño y la fabricación de un dispositivo ECAE en el cual se realizaron los ensayos en dos canales de igual sección que forman un ángulo de 120°. En las simulaciones se impone una velocidad de 0,1 mm/s a la probeta y se contempla la fricción entre la probeta y el canal. Los resultados obtenidos en las simulaciones se comparan con los reportados en la literatura y la forma de la probeta simulada con las probetas conformadas.

Keywords: Finite element, Aluminum, ECAE, Severe plastic deformation.

Abstract. This article presents the numerical and experimental characterization of the equal channel angular extrusion process of 10 mm square section samples of Al 6061. The main objective of this work is to determine the history of deformation in order to be used as input in polycrystalline models. To achieve this objective an elastoplastic constitutive model with isotropic hardening is implemented in a finite element method (FEM) code. The experimental work contemplates the design and fabrication of an ECAE device in which the tests were carried out in two channels of the same section that intersect at an angle of 120°. Simulations are carried out at speed of 0,1 mm/s and the friction between the specimen and the ECAE device is considered. The results obtained in the simulations are compared with those reported in the literature and the shapes of the experimental and simulated tests specimen are compared.

1. INTRODUCCION

La reducción del tamaño de grano como mecanismo para incrementar la resistencia tiene la ventaja de disminuir la tenacidad en menor medida que otros mecanismos de endurecimiento (Weng, 2008), tales como soluto (sustitucional o intersticial), por acritud o por precipitados de segundas fases; éstos si bien aumentan la resistencia, en general reducen la ductilidad y por extensión la tenacidad (Weng, 2008).

En las últimas décadas, el desarrollo de aleaciones livianas con granos ultrafinos (UFG) obtenidas mediante procesos que introducen deformaciones plásticas severas (SPD), ha experimentado un gran auge (Valiev *et al.* 2014; Valiev *et al.* 2015; Verlinden, 2018). Esto se debió a que los materiales con UFG obtenidos mediante SPD son densos y pueden fabricarse con dimensiones que permiten su empleo en aplicaciones estructurales comerciales (J. Xu *et al.* 2017) (a diferencia de otros materiales nanoestructurados producidos con técnicas solo a escala de laboratorio), tienen alta resistencia, buena ductilidad, buena superplasticidad, elevada resistencia al desgaste y un límite de fatiga mayor que las mismas aleaciones que no se obtuvieron mediante SPD (Zhu and Langdon, 2004).

De los procesos más conocidos empleados para la obtención de aleaciones con UFG mediante SPD, el proceso de ECAE, presentado por Segal *et al.* (1981), tiene la ventaja de poder aplicar grandes deformaciones permanentes sin que un cambio apreciable en la forma de la muestra original o probeta tenga lugar. En ECAE un dado ejerce la fuerza sobre la probeta que fluye mientras experimenta una deformación por un esfuerzo cortante simple (en una zona elíptica denominada zona de deformación plástica) tal como se observa en la Figura 1. De esta manera, con esta técnica pueden alcanzarse deformaciones plásticas, por cada pasada, del orden del 83 % hasta el 100 % con ángulos entre canales que van desde los 135° hasta los 90° (Segal 1995; Iwahashi *et al.*, 1996; Beyerlien 2004), con las cuales se obtienen microestructuras de grano micro o nanométricos (Valiev *et al.*, 1993). Una característica distintiva de este proceso es su carácter discontinuo, ya que la pieza es insertada y reinsertada en el canal. Esto permite diseñar el camino de deformación para producir materiales con texturas, u orientaciones preferenciales, difíciles de lograr con otros procesos (Signorelli *et al.*, 2004)

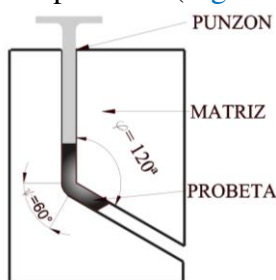


Figura 1 – Diagrama esquemático de un dispositivo ECAE y de una probeta conformada mediante esta técnica.

La deformación aplicada en un proceso ECAE puede variar en intensidad, uniformidad y complejidad en función de las variables del proceso, algunas de estas son: las rutas (Segal, 1995; Ferrase *et al.*, 1997) y el número de pasadas (Segal 1995; Beyerlein *et al.*, 2003, Turner *et al.*, 2004), la temperatura de operación (Delo y Semiatin, 1999; Kim *et al.*, 2004), la textura inicial de la muestra (Signorelli *et al.*, 2004), el coeficiente de fricción –lubricación- (Jin *et al.*, 2009; Aguiar de Souza *et al.*, 2016; Manafi y Saeidi, 2016; Aminnudin *et al.*, 2018) y el diseño del canal (Nakashima *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2002; Wei *et al.*, 2006). La textura desarrollada al final de cada pasada es en gran parte una variable fundamental en las propiedades mecánicas obtenidas en los materiales conformados mediante esta técnica. La mejor ruta de procesamiento por ECAE para lograr la reducción de tamaño de grano más efectiva, depende de las características del material (estructura cristalina y elementos de aleación entre otras) (Zhu y

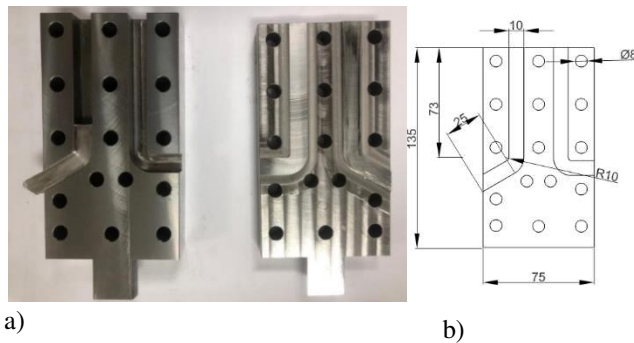
Lowe, 2000).

En este trabajo se estudia la influencia del coeficiente de fricción en las tensiones, en las deformaciones plásticas y la historia de deformación en una probeta conformada mediante ECAE. Para alcanzar este objetivo se calcula el gradiente de velocidad de deformación en posiciones de la probeta seleccionadas para ser utilizado posteriormente en modelos policristalinos para el estudio de la evolución de textura de las probetas conformadas mediante este proceso.

2. METODOLOGÍA

2.1. Metodología experimental

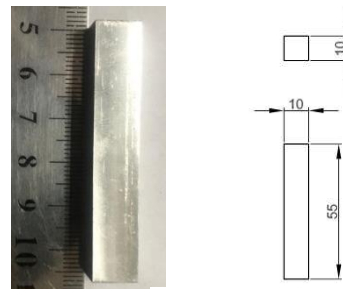
Sobre una matriz de acero H13 se maquinaron dos canales de 10x10 mm de sección, uno de los canales con un ángulo interno de 120° y el otro de 90° (ver Figura 2). En los ensayos llevados a cabo en este trabajo se empleó un canal de 120°, éste consta de un radio de acuerdo de 10 mm para la cara inferior del mismo (Figura 3).



a)

b)

Figura 2 – a) Matriz ECAE construida. b) Plano de matriz construida



a)

b)

Figura 3 - a) Probeta empleada en los ensayos. b) Esquema de la probeta confeccionada (medidas en mm)

Las probetas empleadas en los ensayos son de Al 6061 en condición T6, sus dimensiones fueron 10x10 mm y 55 mm de largo (ver Figura 3). Las probetas fueron extruidas a velocidad constante y se empleó grasa industrial para rodamientos de alta presión como lubricante.

La matriz y la probeta se ensayaron en una máquina Ibertest de 10 Tn en el IMA de la FI-UNSJ. Algunas de las imágenes del conjunto durante el ensayo se muestran en la Figura 4. En la Figura 5 se puede observar la probeta en su estado inicial y luego de una pasada por el canal de 120°.

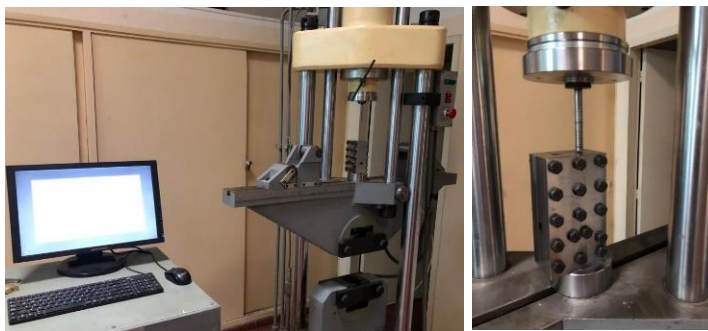


Figura 4 – Máquina, matriz y punzón empleadas en el conformado por ECAE.



Figura 5 – Probeta deformada y sin deformar.

2.2. Simulación

Dada la simetría del conjunto matriz/probeta, las simulaciones se llevaron a cabo mediante una aproximación 2D, utilizando la condición de deformación plana, grandes deformaciones y un código comercial implícito. La muestra se discretizó en 6039 cuadriláteros con funciones de interpolación de segundo orden, mientras que los canales fueron mallados con 816 elementos de dos nodos definiendo en ellos dos puntos de referencia encastrados solidarios a los mismos (Figura 6 (a)). Sobre la cara superior de la probeta se impuso una velocidad de 0,1 mm/s (ver Figura 6 (a)). La probeta se modeló como un sólido elastoplástico deformable, el comportamiento constitutivo del material fue descrito mediante una ley de endurecimiento exponencial de tipo Hollomon (Hollomon, 1945) publicado por Basavaraj, 2016:

$$\sigma = Ke^n \quad (1)$$

El modelo de plasticidad es asociativo, el criterio de fluencia es el de Von Mises y la ley de endurecimiento es isotrópica. Se utilizó el algoritmo de retorno radial con procedimiento incremental iterativo en una formulación euleriana actualizada. .

Los canales se consideraron como superficies rígidas y adiabáticas. Se simularon 4 casos, variando el coeficiente de rozamiento de 0 a 0,15 pasando por 0,05 y 0,1.

La modelización se llevó a cabo considerando las siguientes constantes: E (módulo de Young) = 45 GPa, ν (coeficiente de Poisson) = 0,3 y como se observa en la Ec. (1), para la ley de endurecimiento, σ = límite de fluencia, e = deformaciones plásticas, $K = 208$ y $n = 0,25$.

Finalmente se consideraron tres puntos dispuestos sobre la fibra media de la probeta con el objetivo de ser utilizados para calcular y analizar la evolución de los valores de las tensiones, de las deformaciones plásticas y la historia de deformación (Figura 6 b).

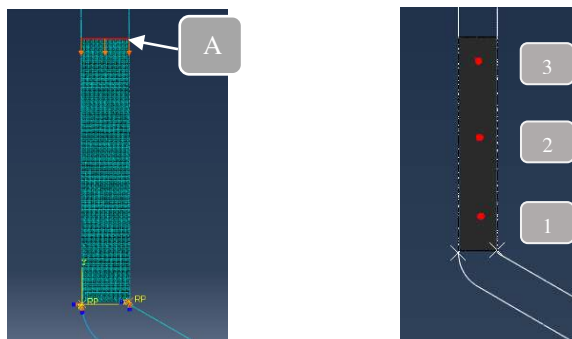


Figura 6 –a) Malla y condiciones de contorno para el caso simulado. b) Puntos dispuestos sobre la muestra

El modelo contempla contacto normal y tangencial entre la pieza y los canales. El contacto normal es formulado bajo la siguiente condición:

$$-\sigma_v = p_v(u_v) \quad (2)$$

donde

σ_v : es la componente normal del vector tensión de contacto.

u_v : componente normal del campo de desplazamiento.

El contacto tangencial se formula con una ley clásica de Coulomb donde el valor de μ (coeficiente de rozamiento) es constante, isotrópico e independiente de la tasa de deslizamiento y de la temperatura como:

$$\sigma_t = \mu|\sigma_v| \quad (3)$$

Resumiendo, las condiciones de contacto son:

1. Si $u_v \leq 0$, no existe contacto
$$\begin{cases} \sigma_v = 0 \\ \sigma_t = 0 \end{cases} \quad (4)$$
2. Si $u_v > 0$, existe contacto
$$\begin{cases} -\sigma_v = p_v(u_v) \\ \sigma_t = \mu |\sigma_v| \end{cases} \quad (5)$$

El algoritmo de resolución de la formulación del contacto es de penalización lineal. El coeficiente de penalidad usado en las simulaciones es el estándar del código empleado.

3. RESULTADOS NUMERICOS

En la [Figura 7](#) se muestra el contorno uniforme de las tensiones de Von Mises para el mismo desplazamiento del punzón, y valores extremos del coeficiente fricción, esto es 0 y 0,15. Al analizar las figuras se observa que un incremento del coeficiente de fricción no modifica la distribución de las tensiones en la probeta, y los valores en zonas homólogas aumentan con el valor del coeficiente de fricción. No teniendo en cuenta la zona de contacto de la probeta con el canal, las zonas de la probeta con las tensiones máximas corresponden a la región de quiebre del canal (sometida a un esfuerzo cortante simple).

En la [Figura 8](#) se grafican los campos de deformación plástica equivalente para las mismas posiciones y valores del coeficiente de fricción de la [Figura 7](#). Un aspecto importante y poco tenido en cuenta en los análisis llevados a cabo por otros investigadores ([Aminnudin et al., 2018](#)), es que a medida que el coeficiente de fricción aumenta, la extensión de la deformación plástica equivalente en la zona de quiebre del canal también lo hace; eso se debe a que para bajos coeficientes de fricción, el efecto del contacto y la fricción entre el canal y la probeta tiende a ser determinante en los valores máximos de las deformaciones plásticas equivalentes, paralelamente la mayor extensión en los valores máximos de la tensión de Von Mises ([Figura 7](#)) en la zona de análisis, trae aparejada una mayor extensión de la deformación plástica equivalente y junto con esta una mayor uniformidad en los campos y valores de las deformaciones plásticas alcanzadas a lo largo de la sección de la probeta. Esto ratifica lo reportado por [Dumoulin et al. \(2005\)](#) y [Aminnudin et al. \(2018\)](#).

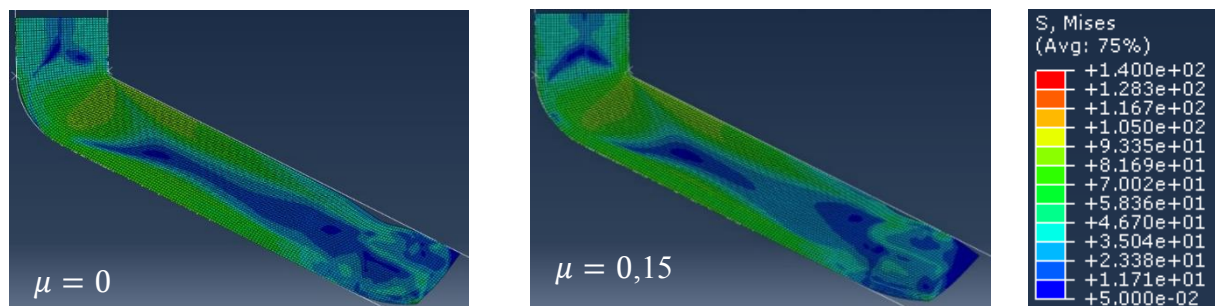


Figura 7 - Campo de tensiones.

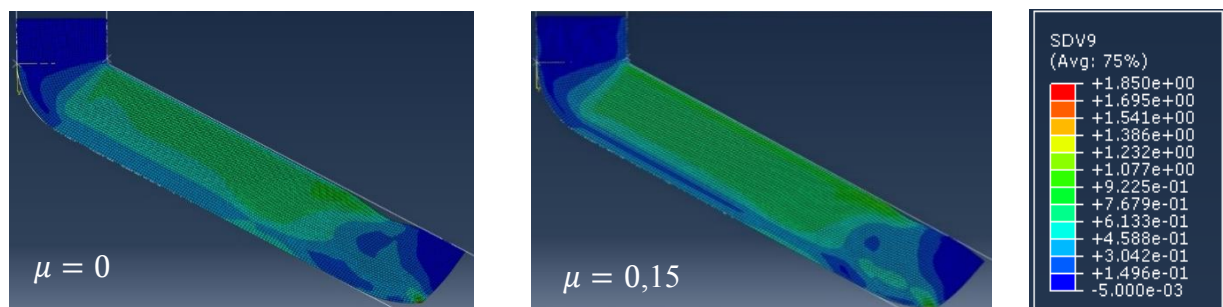


Figura 8 - Campo de deformaciones plásticas equivalentes.

Con el fin de analizar con mayor detalle los resultados mostrados en las Figuras 7 y 8, en la Figura 9-a se grafican los valores de la deformación plástica equivalente en función del desplazamiento del punzón para los puntos de estudio 1, 2 y 3 y para un coeficiente de fricción igual a 0. En forma análoga para la Figura 9-b pero para un coeficiente de fricción de 0,15.

Observando los valores de deformación plástica equivalente y contrastándolos con los resultados obtenidos de la expresión de Iwahashi *et al.* (1996), para el caso de $\Phi = 120^\circ$ y $\Psi = 60^\circ$, se tiene

$$\varepsilon = \frac{2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right)}{\sqrt[2]{3}} = 0,60 \quad (6)$$

Se concluye que, en la zona media de la probeta, esto es en el punto 2, es donde obtiene el valor de deformación plástica equivalente más representativo, ya que los valores obtenidos se encuentran muy próximos al teórico. Esto se debe a que dicha zona se encuentra sobre la fibra media de la probeta y no se ve afectado por los efectos de los bordes. Por otro lado, se observa que en el extremo (punta de la probeta) se obtienen valores de deformación que están por debajo del ideal o teórico, lo que confirma lo resaltado por otros investigadores (Turner *et al.*, 2004). En la zona del punto 3, los valores se encuentran por encima del calculado por la Ec. (6). Esto se debe a que en su paso por el canal, la probeta tiende a adquirir una forma curva producida por las tensiones generadas en el plano de corte, lo que conlleva a que en la zona del punto 3, debido al contacto muestra/matriz los valores de tensiones y deformaciones sean mayores.

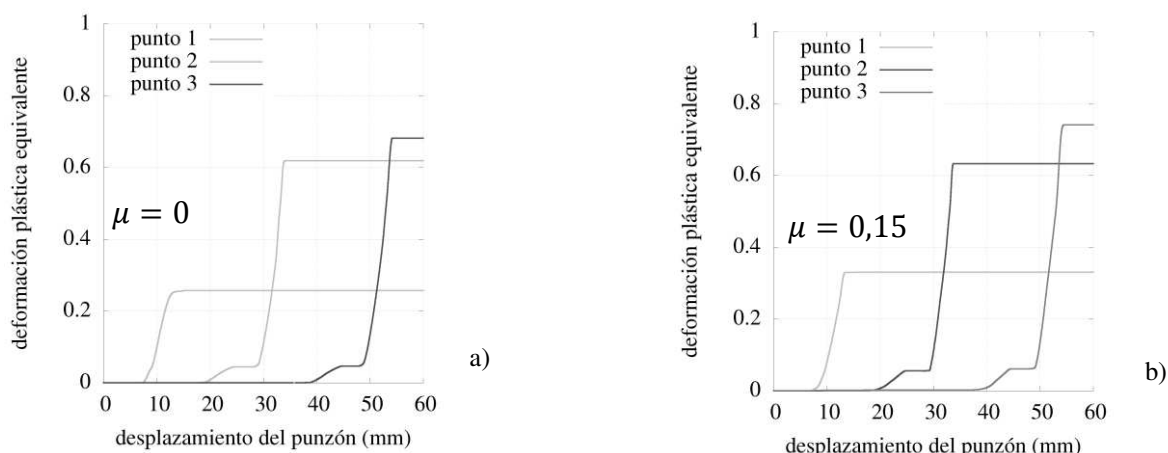


Figura 9 – Valores de deformación plástica equivalente para los valores de los coeficientes de fricción extremos.

En la Figura 10 a, se comparan los valores de deformación plástica equivalente para los cuatro casos obtenidos en el punto 2, mostrándose en detalle la diferencia de los valores máximos alcanzados en la Figura 10 b.

En la Figura 11, se presentan los valores de las componentes del tensor gradiente de velocidad de deformación en el punto 2, para los valores extremos de los coeficientes de fricción. Una característica importante a resaltar es que los valores alcanzados de las componentes del tensor gradiente de velocidad de deformación no sufren gran variación con el incremento del coeficiente fricción. Esta información será utilizada en los cálculos con los modelos policristalinos para el estudio de la evolución de textura.

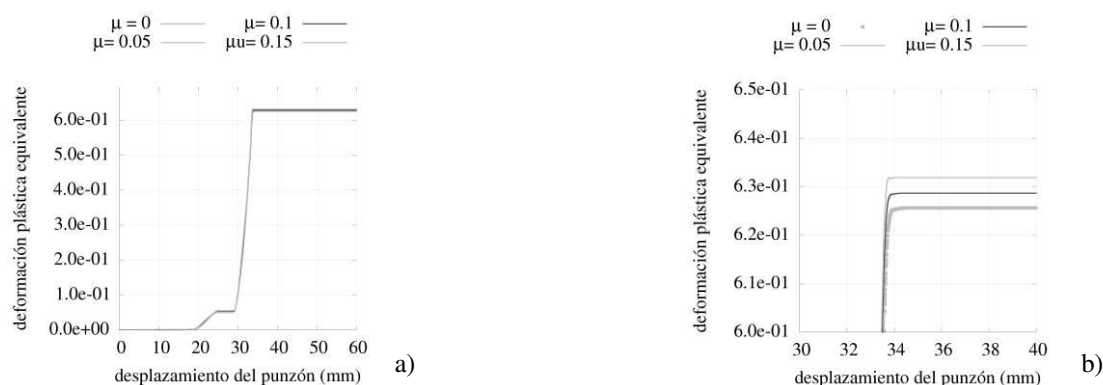


Figura 10 – Valores de deformación plástica equivalente.

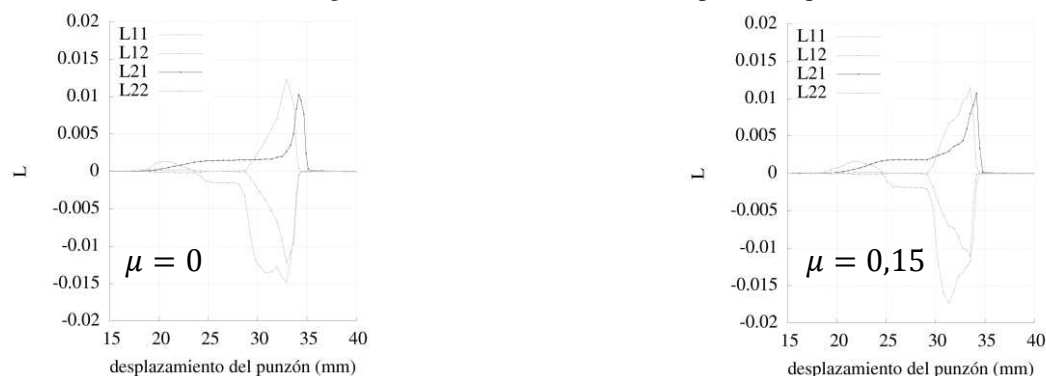


Figura 11 – Componentes del tensor gradiente de velocidad de deformación para los valores extremos de los coeficientes de fricción.

La evolución de la fuerza de extrusión para los cuatro casos simulados se muestran en la [Figura 12](#). Dos aspectos que deben resaltarse son: (i) que la forma de la curva es independiente de μ , esto se debe a la correspondencia entre la disposición de la probeta en el canal y el valor de la fuerza, y (ii) que la diferencia de magnitudes reportadas en función de μ es altamente no lineal, la misma tiende a incrementarse notablemente para valores mayores de 0,1.

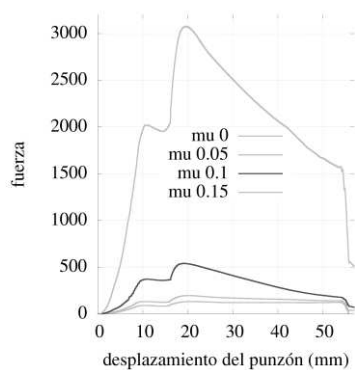


Figura 12 – Comparación de fuerzas de extrusión.

La [Figura 13](#) muestra las distintas zonas que se pueden destacar en función de la posición de la probeta en cada punto. En la zona 1, se puede observar un incremento monótono de los valores de fuerza. Esto ocurre cuando la punta inferior de la probeta alcanza el radio de acuerdo del canal inferior, originando que se comience a deformar dicho extremo y además, tal como se observa en la [Figura 13](#), se incrementan los valores debido al contacto entre la cara lateral derecha de la muestra con el canal superior, generando un rápido incremento de la fuerza necesaria de extrusión. En la zona 2 se observa una disminución de la fuerza, lo cual confirma

lo reportado por otros autores (Aguiar de Souza *et al.*, 2016; Manafi y Saeidi, 2016), esto se puede explicar a través de la Figura 13 donde se observa que en la región próxima al extremo de probeta, se produce una separación de la misma con el canal inferior, disminuyendo la superficie en contacto y junto con esta el valor de la fuerza. A continuación la curva muestra un incremento en el valor de la fuerza, lo cual se debe a que se produce contacto entre el extremo de la probeta y el canal superior (Figura 13). Es importante destacar que en este instante la zona media de la probeta no hace contacto con el canal superior tal como se puede observar en la Figura 13. En la zona 4 se encuentra el pico de fuerza máxima la cual se produce en el momento en que ocurre el contacto entre la zona media de la probeta y el canal superior. En ese momento comienza la uniformidad del proceso, el cual, tal como se puede ver en la zona 5, trae aparejado un decremento de la fuerza necesaria de extrusión. Finalmente, en la zona 6, la muestra ya avanzó por sobre el plano el corte lo que genera una disminución brusca de la fuerza.

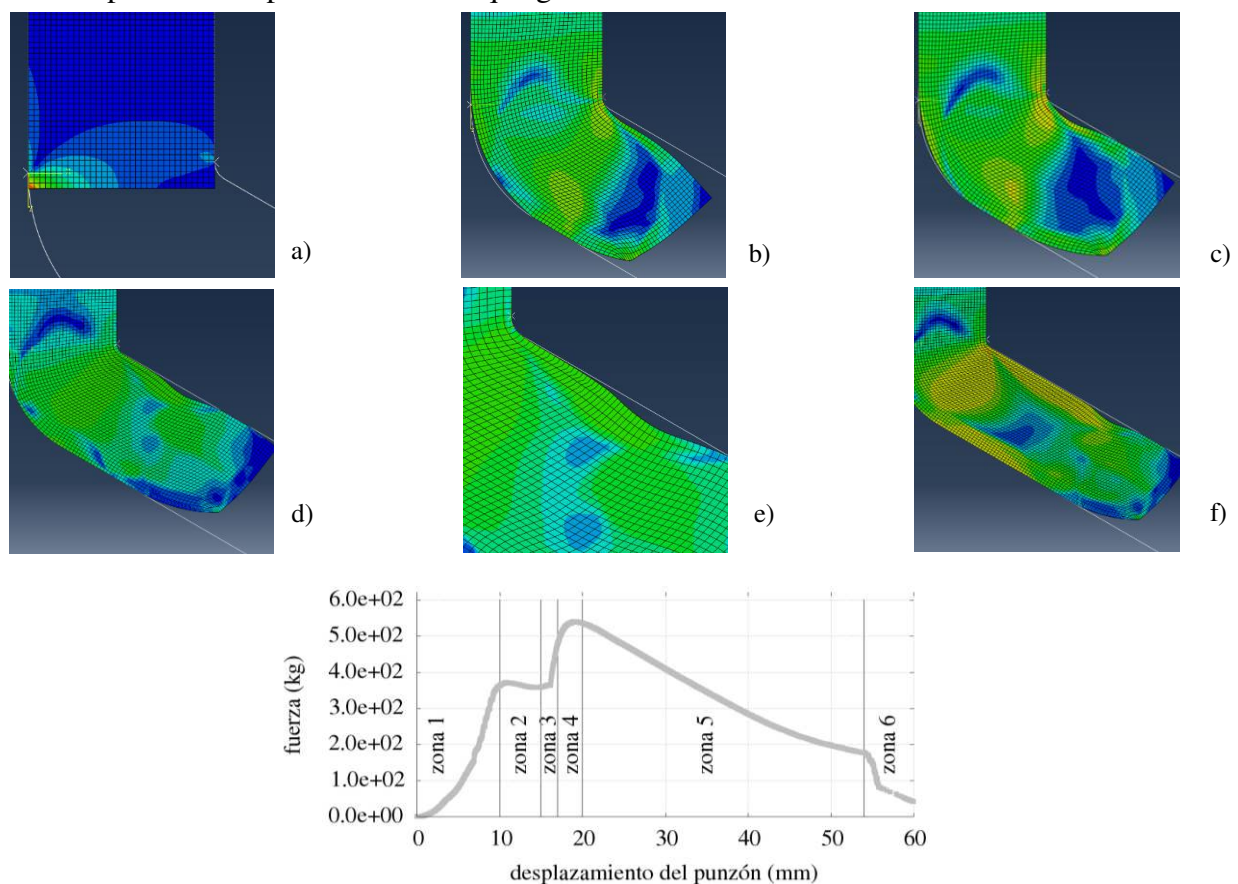


Figura 13 – Evolución de la fuerza de extrusión con indicación de las zonas de análisis.

Finalmente en la Figura 14 se comparan los perfiles de las probetas simuladas y deformadas experimentalmente. Como se puede apreciar, los perfiles de la probeta simulada y extruida experimentalmente son similares. Claramente puede verse como la simulación logra captar la cavidad que se origina en la zona superior de la probeta en las cercanías del comienzo de la misma y los perfiles en la punta de ingreso de la probeta al canal. En la imagen de la probeta extruida se observa la tendencia de la misma a adquirir forma curva una vez deformada.

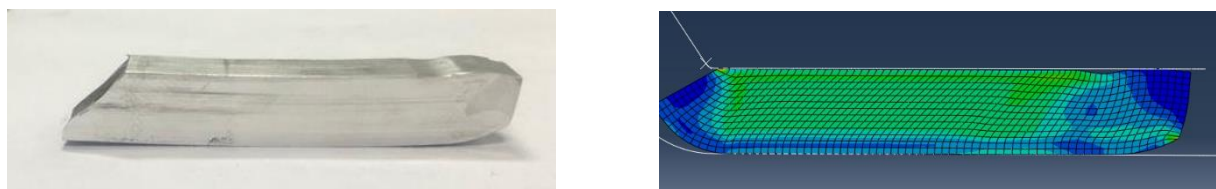


Figura 14 – Comparación morfológica entre probeta extruida y simulada.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han comparado las simulaciones del proceso de extrusión angular con distintos coeficientes de fricción a través de los resultados obtenidos en la historia de deformación en cada caso. En general, los valores hallados son consistentes con los reportados por otros autores. Las conclusiones del presente trabajo incluyen:

- (1) Un incremento en el coeficiente de fricción favorece la homogeneidad de la distribución de deformaciones plásticas equivalentes.
- (2) Para bajos coeficientes de fricción, el efecto del contacto y la fricción entre el canal y la probeta tiende a ser determinante en los valores máximos de las deformaciones plásticas equivalentes.
- (3) No se observan grandes alteraciones de las componentes del tensor gradiente de velocidad de deformación cuando se ve incrementado el coeficiente de fricción del ensayo.
- (4) La discrepancia en la forma de la gráfica comparada con lo reportado en trabajos experimentales, pone en evidencia que las formulaciones clásicas de fricción (por ejemplo Coulomb) no son las más adecuadas para modelar este proceso.
- (5) Los valores obtenidos en la zona central de la probeta (punto 2) son similares al valor teórico obtenido por la Ec(6).

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la comisión nacional chilena de investigación científica y tecnológica (CONICYT) a través del proyecto FONDECYT No. 1180591.

REFERENCIAS

- A. Aminnudin, Pratikto, A. Purnowidodo, Y. S. Irawan. *The analysis of friction effect on equal channel angular pressing (ecap) process on aluminium 5052 to homogeneity of strain distribution*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774, 2018.
- A. V. Nagasekhar and Y. Tick-Hon. *Optimal tool angles for equal channel angular extrusion of stain hardening materials by finite element analysis*. Mater. Sci. 30 489–495, 2004.
- B. Manafi and M. Saeidi. *Development of a novel severe plastic deformation method: friction stir equal channel angular pressing*. Springer-Verlag London, 2016.
- B. Verlinden. *Severe plastic deformation of metals*. Metallurgical and Materials Eng., 2018.
- D. P. Delo and S.L. Semiatin. *Finite-Element Modeling of Nonisothermal Equal-Channel Angular Extrusion*. Metallurgical and Materials Transactions A 30 1391–1402, 1999.
- H.S. Kim, M.H. Seo and S.I. Hong. *Finite element analysis of equal channel angular pressing of strain rate sensitive metals*. J. Mater. Process. Technol. 130 497–503, 2002.
- H.S. Kim, P. Quang, M.H. Seo, S.I. Hong, K.H. Baik, H.R. Lee and D.M. Nghiep. *Process Modelling of Equal Channel Angular Pressing for Ultrafine Grained Materials*. Mater. Trans. 45 2172–2176, 2004.
- I. J. Beyerlein, C. N. Tomé. *Analytical modeling of material flow in equal channel angular extrusion (ECAE)*. Materials Science and Engineering A 380 171–190, 2004.
- I.J. Beyerlein, R.A. Lebensohn, C.N. Tome. *Modeling texture and microstructural evolution in the equal channel angular extrusion process*. Materials Science and Engineering A345

- 122/138, 2003.
- J. H. Hollomon. *Tensile Deformation*. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 162, pp. 268-290, 1945.
- J.W. Signorelli, R. Logé, P. A. Turner, V. Sordi, E.A.Vieira, M.Ferrante y R. E. Bolmaro. *Evolución de la microestructura en al-4%cu sometido a extrusión angular*. Congreso conamet/sam 2004.
- J. Xu, B. Guo and D. Shan. *Innovative Applications of Ultrafine-Grained Materials*. Severe Plastic Deformation Techniques. IntechOpen, 2017.
- K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon. *Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing*. Acta Mater. 46 1589/1599, 1998.
- Mendes Filho, A. de A., Prados, E. F., Valio, G. T., Rubert, J. B., Sordi, V. L., & Ferrante, M. *Severe plastic deformation by equal channel angular pressing: product quality and operational details*. Materials Research 14(3), 335–339, 2011.
- P.A.Turner, J.W.Signorelli, R.E.Bolmaro, E.A.Vieira y M.Ferrante. *Extrusión angular en al-4%cu*. Mecánica Computacional Vol. XXIII, pp. 193-206, 2004
- P. Basavaraj. *3D finite element simulation of equal channel angular pressing with different material models*. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, Vol 3-3, 2016.
- R.Z. Valiev, A.V. Korznikov, R.R. Mulyukov. *Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation*. Mater. Sci. Eng. A 168, 1993.
- R.Z. Valiev, T.G. Langdon. *Report of International NanoSPD Steering Committee and statistics on recent NanoSPD activities*. Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 63 011002, 2015.
- R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer and Y.T. Zhu. *Fundamentals of Superior Properties in Bulk NanoSPD Materials*. Mater. Res. Lett Vol. 4, N 1, 1–21, 2016.
- S. Dumoulin, H.J. Roven, J.C. Werenskiold, H.S. Valberg. *Finite element modeling of equal channel angular pressing: Effect of material properties, friction and die geometry*. Materials Science and Engineering A 410–411 248–251, 2005.
- S. Ferrasse, V.M. Segal, K.T. Hartwig, R.E. Goforth. *Development of a submicrometer-grained microstructure in aluminum 6061*. J. Mater. Res. 12 1253, 1997.
- V. Aguiar de Souza, I. Watanabe and A. Yanagida. *Numerical Estimation of Frictional Effects in Equal Channel Angular Extrusion*. Materials Transactions, Vol.57-9 p.1399 to 1403, 2016.
- V. M. Segal, V. I. Reznikov, A. E. Drobyshvskiy, and V. I. Kopylov. *Plastic working of metals by simple shear*. Russ. Met., 1:99–105, 1981.
- V. M. Segal. *Materials processing by simple shear*. Materials Science and Engineering A197 157 164, 1995.
- W. Wei, A.V. Nagasekhar, G. Chen, Y. Tick-Hon and K.X. Wei. *Origin of inhomogenous behavior during equal channel angular pressing*. Scr. Mater. 54 1865–1869, 2006.
- Y.G. Jin, I.-H. Son, S.-H. Kang, Y.-T. Im. *Three-dimensional finite element analysis of multi-pass equal-channel angular extrusion of aluminum AA1050 with split dies*. Materials Science and Engineering A 503 152–155, 2009.
- Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, m. Nemoto, T. Langdon. *Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials*. Scripta Mater, 35 143, 1996.
- Y. T. Zhu and T C. Lowe. *Observations and issues on mechanisms of grain refinement during ECAP process*. Materials Science and Engineering A291 46–53, 2000.
- Y. T. Zhu and T.G. Langdon. *The fundamentals of nanostructured materials processed by severe plastic deformation*. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2004.
- Y.Weng. *Ultra-finegrained steels*. In Ultra Fine grained steels, page588, Springer-Verlag, 2008.