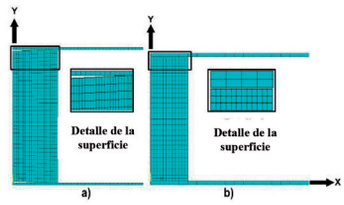
Comparación del abarrilamiento producido por un ensayo de compresión realizado por elementos finitos entre dos tipos de probeta



Comparison of barreling effect in compression tests of two kinds of specimens using the finite element method

Elías Ledesma-Orozco[1*], Eduardo Aguilera-Gómez[1], Héctor Plascencia Mora[1], Ismael Ruiz-López[2], Diego-Armando Gómez-Márquez[1] y Francisco Reveles-Arredondo[1]

[1] Universidad de Guanajuato. Campus Irapuato-Salamanca. Departamento de Ingeniería Mecánica. Carretera Salamanca-Valle de Santiago, Km 3.5 - 36885 Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato (México).
[2] Pintura y estampados y montaje S.A.P.I.A. S.A. Carretera Celaya-Salamanca Km. 5. Zona Industrial Poniente - 38020 Celaya, Guanajuato (México).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9065 | Recibido: 13/12/2018 • Inicio Evaluación: 14/12/2018 • Aceptado: 27/05/2019

ABSTRACT

- This paper shows a comparative study of two types of forging specimens (Rastegaev and B-T specimen) in order to obtain stress flow curves at compressive loads with a wide range of temperature, by using a Finite Element Analysis.
  The main aim is to determine which specimen shows the minimum barreling phenomena under compression at different temperature condition.
  After the data were obtained, a comparative analysis leads to conclude that the B-T specimen shows better compressive performance.
- **Keywords:** Finite Element Method; barreling; compression test; forging test.

RESUMEN

Este trabajo es un estudio comparativo de dos especímenes para realizar pruebas para forja y así obtener las curvas de flujo bajo cargas de compresión, a diferentes temperaturas, utilizando el método del elemento finito.

El principal objetivo es determinar cuál espécimen presenta un abarrilamiento mínimo en la prueba de compresión a diferentes temperaturas.

Palabras clave: Método del elemento finito; abarrilamiento; prueba de compresión; prueba de forja.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, la caracterización de propiedades mecánicas de un material metálico es realizada bajo carga de tensión, puesto que el estampado de lámina metálica requiere solo esfuerzos de tensión. Sin embargo, el proceso de forja requiere también la caracterización del material por la prueba de compresión; cuyos resultados son útiles para la reducción de arrugas durante procesos de estampado. Mientas la prueba de tensión está bien desarrollada [1], actualmente, no hay una metodología estándar la prueba de compresión en aceros a elevadas temperaturas y tasas de deformación. Para que sea de utilidad en el análisis de conformado de metales, el esfuerzo de flujo del metal debe ser determinado experimentalmente para condiciones de deformación, tasas de deformación y temperaturas que existan durante el proceso de conformado [2]. Algunos investigadores han trabajado en los retos tecnológicos de la prueba de compresión [3, 4] y algunos estándares como el ASTM E-8, tratan sobre el procedimiento de la prueba de tensión, sin embargo, aún no se cuenta con un método estandarizado que permita obtener las curvas de flujo de esfuerzo plástico.

La metodología usada en conformado de metales está basada en la deformación de pequeños cilindros, empleando cargas de compresión sobre el espécimen, con prensas mecánicas o servo hidráulicas. Al igual que en las pruebas de tensión, la fuerza requerida para comprimir la muestra es medida por una celda de carga. No obstante, para obtener datos confiables, la prueba se debe realizar de forma isotérmica. En consecuencia, el espécimen y las herramientas deben ser calentadas a la misma temperatura. Esto implica un grado de complejidad técnica, que hace difícil la compra o desarrollo de equipos para este fin, por lo que el número de laboratorios capaces de realizar dicha prueba es muy limitado [5]. El esfuerzo de flujo de un metal σ puede ser expresado como una función de la temperatura T, la deformación ε, la tasa de deformación $\dot{\varepsilon}$ y la microestructura S [6], entonces, para una microestructura dada, i.e., tratamiento térmico e historial de deformación previo, esto puede representarse mediante la ecuación (1).

$$\sigma = f(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}) \tag{1}$$

Además, para tensión o compresión uniaxial, considerando fijo un extremo del espécimen y un actuador aplicando la fuerza de tensión o compresión en el extremo opuesto, considerando que la longitud del espécimen es h y la velocidad del actuador v, el perfil de tasa de deformación inducido sobre el espécimen se puede describir mediante la ecuación (2).

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{h} \tag{2}$$

Adicionalmente, de acuerdo con Douglas y Altan [7], a pesar de que la tasa de deformación no permanece constante durante la compresión uniforme (dado el hecho de que la velocidad del actuador permanece constante pero la longitud del espécimen no), esfuerzos de flujo promedios pueden ser obtenidos con razonable aproximación siempre que los valores de tasas de deformación

inducidos estén dentro del rango de interés para el proceso en particular. Por esto, típicamente el valor de tasas de deformación promedio es medido experimentalmente. Los plastómetros convencionales están generalmente equipados con una celda de carga y un sensor de desplazamiento, para adquirir datos durante la prueba de compresión. Los especímenes son comprimidos hasta una altura específica, y con los datos adquiridos, mediante un procesamiento de éstos, pueden ser calculadas curvas de esfuerzo deformación tras la realización de la prueba.

También, estas pruebas pueden ser realizadas en un rango de temperaturas amplio. Sin embargo, la prueba de compresión es comúnmente realizada a elevadas temperaturas para alcanzar la región plástica del material rápidamente. Farren y Taylor [8] determinaron experimentalmente que, en deformación en caliente (llevadas a cabo entre un 50 % hasta 75 % de la temperatura de fusión), la fricción entre el espécimen y las herramientas contribuye a generar calor y aproximadamente 86 % de la energía mecánica se convierte en calor (para aceros). Por tanto, un control de temperatura es crucial para la prueba de compresión. Así, la condición isoterma debe ser garantizada.

Múltiples sistemas de calentamiento han sido implementados previamente en diferenciantes centros de investigación. Douglas y Altan [7] usaron un horno para calentar las herramientas por radiación. Después, Li et al. Proponen el calentamiento de las herramientas y el espécimen mediante inducción. Por otra parte, Kane [10] propone el uso del sistema Gleeble para la calentar mediante efecto Joule.

A pesar de una gran variedad de estudios reportados sobre la prueba y sus parámetros [12, 12, 13] escasamente se ha estudiado el efecto de las características geométricas del espécimen sobre los resultados del experimento. Este artículo proporciona una comparación entre dos diferentes tipos de especímenes para la prueba de compresión, los cuales han sido desarrollados por dos centros de investigación reconocidos. Este estudio está basado en datos numéricos obtenidos mediante el análisis por elemento finito (FEA) usando el software ANSYS LS-DYNA, el cual es un código explícito, adecuado para problemas altamente dinámicos y no lineales, que involucren grandes deformaciones y altas tasas de deformación (como es el caso). Las mismas propiedades mecánicas son consideradas para ambos especímenes bajo diferentes condiciones de temperaturas durante la prueba de compresión.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. PRUEBA DE COMPRESIÓN

La prueba de compresión consiste principalmente en un espécimen de forma cilíndrica, el cual es puesto entre dos herramientas, montadas en una prensa, donde la herramienta superior genera la carga de compresión, como se muestra en la Figura 1. El espécimen y las herramientas son calentadas a la misma temperatura, para general un ambiente isotérmico.

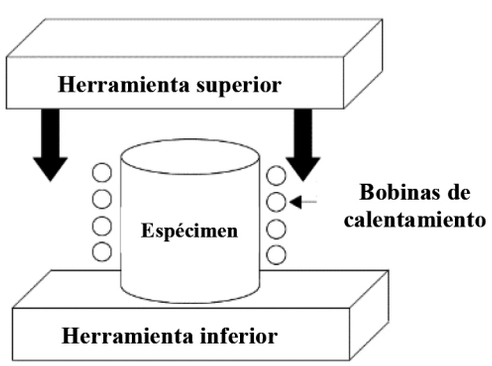


Fig. 1: Esquema de la prueba de compresión

El espécimen tiene una geometría cilíndrica (ver la Figura 2a), el cual puede ser deformado en un rango del 1 % al 90 %. Nótese que la muestra debe ser comprimida uniformemente, evitando fallas comunes como el pandeo y el abarrilamiento, como es mostrado en la Figura 2. Una fricción elevada entre el espécimen y la superficie de las herramientas causa el fenómeno de abarrilamiento (forma conexa), mientras que baja fricción genera efecto de abarrilamiento cóncavo (efecto *bollarding*) [7].

A diferencia del fenómeno de *bollarding*, el fenómeno de abarrilamiento durante la prueba de compresión ha sido ampliamente reportado en la literatura [2, 7, 9, 14]. Con el fin de evitar el abarrilamiento, el espécimen debe ser lubricado adecuadamente. El uso de grafito o vidrio entre las superficies en contacto entre el espécimen y las herramientas a elevadas temperaturas ha sido reportado por diversos autores como una técnica de lubricación prometedora [2, 7].

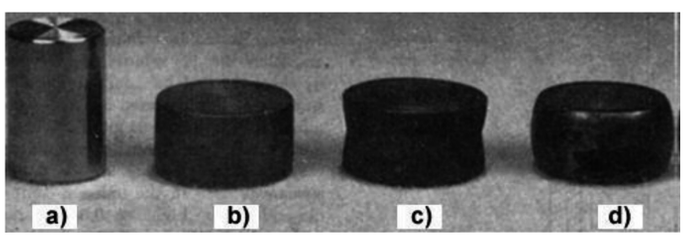


Fig. 2: Especímenes de compresión a) antes de la deformación, b) deformado con adecuada lubricación, c) deformado con exceso de lubricación (bollarding) y d) deformado con lubricación pobre (barreling) [7]

Los datos de salida de la prueba de compresión son las curvas de esfuerzo de flujo plástico del material. Al igual que en las pruebas de tensión, estas curvas deben determinadas experimentalmente con deformación uniforme del espécimen. Una metodología de la prueba de compresión es descrita en detalle por Roebuck et. al. [12]. Esta metodología se resume en los siguientes pasos:

- Diseño y fabricación del espécimen.
- Determinación de la dureza en al menos tres puntos del espécimen.
- Posicionamiento de las herramientas.
- Calentamiento del espécimen y las herramientas a la temperatura de prueba.
- Compresión del espécimen a la deformación deseada.
- Captura de datos de desplazamiento y fuerza.
- Enfriamiento lento del espécimen evitando cambios de su microestructura.
- Dimensionamiento del espécimen para calcular el grado de abarrilamiento (β) usando la ecuación (3).
- Medición de la dureza en al menos tres putos similares a los iniciales, para verificar la homogeneidad de la microestructura.

El grado de abarrilamiento puede calcularse como sigue:

$$\beta = H_2 - H_1 \tag{3}$$

Donde H_1 y H_2 son los diámetros finales del espécimen, según se muestra en la Figura 3.

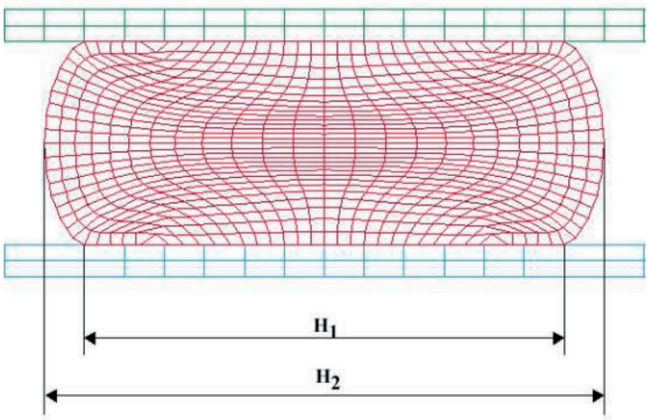


Fig. 3: Abarrilamiento a 60 % de deformación

2.2. ESPECÍMENES PARA PRUEBA DE COMPRESIÓN

Como se mencionó anteriormente, no existe un estándar que regule la geometría del espécimen de prueba, así como la metodología a usar en la prueba de compresión. Por lo tanto, cada laboratorio posee su propia metodología para el diseño y fabricación de especímenes de prueba con diferentes diámetros, longitudes y superficies de contacto lubricadas. La mayoría de los especímenes usados alrededor del mundo son cilíndricos y sus dimensiones están basadas en la geometría propuesta por el *Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing* (ERC/NSM Ohio University). Este espécimen tiene 25.4 mm de diámetro y 38.1 mm de longitud; además, dicho espécimen tiene dos espirales artificiales maquinadas en sus caras planas que ayudan mantener una película de lubricante reduciendo así así la fricción entre el espécimen y las herramientas.

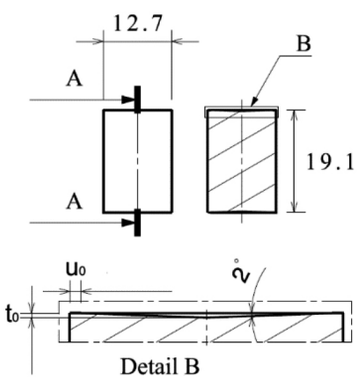


Fig. 4: Espécimen tipo Rastegaev (mm)

Espécimen	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Surface
Rastegaev	12.7	19.1	Canal
B-T	10.0	18.0	Plana

Tabla 1: Características geométricas de los especímenes

Propiedad	Unidad	Temperatura (°C)				
		25	1000	1100	1200	1300
Densidad	kg m^{-3}	7850	7792	7791	7790	7789
Módulo de Young	GPa	209	138	120	107	92
Módulo de Poisson	-	0.29	0.43	0.44	0.45	0.46
Límite de fluencia	MPa	530	120	70	60	42
Modulo tangente	MPa	146	53	70	53	49

Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero SAE1538MV a diferentes temperaturas

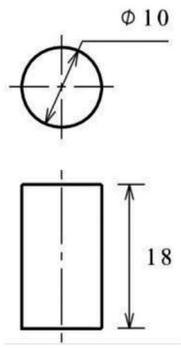


Fig. 5: Esquema del espécimen Stauchprobe (espécimen B-T), dimensiones en milímetros

Con base en el espécimen propuesto por Rastagaev en 1940, se realizaron nuevas propuestas de especímenes hacia la década los noventas [2]. Este nuevo espécimen tiene dimensiones de 12.7 mm de diámetro y 19.1 mm de largo (relación longitud/diámetro=1.5). Este espécimen tiene un maquinado en forma de canal en sus extremos, en lugar de espirales, como se muestra en la Figura 4; las dimensiones del canal son t_0 = 0.2 mm y u_0 = 0.5 mm. Estas dimensiones aseguran una capa de lubricación constante en la superficie de contacto. En el caso de aceros, la relación entre t_0 y u_0 debe ser de 0.4 para que el espécimen mantenga su forma cilíndrica a elevadas deformaciones [2].

El espécimen tipo Rastagaev asegura una lubricación adecuada en deformaciones entre 0.8 y 1. Dado que la película de lubricante insertada ejerce una presión radial, la forma cilíndrica es mantenida [14]. Otro espécimen comúnmente usado es el diseñado por Bähr-Thermoanalyse GmbH [15]. Este espécimen no usa la relación de aspecto de 1.5 usada por el ERC/NSM, puesto que encontraron que para la obtención de curvas de flujo a elevadas temperaturas la relación de aspecto de 1.8 es más adecuada. Entonces, la geometría utilizada cuenta con 10 mm de diámetro y 18 mm de longitud, como se muestra en la figura 5. Este espécimen es denominado Stauchprobe (de aquí en adelante, se denominará espécimen B-T)

En este artículo, se muestra un estudio comparativo de los dos especímenes antes descrito, i.e., Rastagaev y B-T. Las características de estos especímenes están contenidas en la Tabla 1, la cual contiene el diámetro, largo y el tipo de superficie en su cara plana. La principal diferencia entre los especímenes es que uno de ellos tiene una cavidad cónica maquinada en sus extremos, mientras que el otro tiene sus caras completamente planas. Una vez definidas las características, se presenta en la siguiente sección la descripción del modelo de elemento finito.

2.2. SIMULACIÓN DE LA PRUEBA DE COMPRESIÓN

Para estudiar el comportamiento de los especímenes, en este trabajo se usará un modelo de material bilineal de endurecimiento isotrópico [16]. Dicho material corresponde a un acero microaleado SAE 1538MV (ferrítico-perlítico). Las propiedades para diferentes temperaturas de este acero están mostradas en la Tabla 2. El coeficiente de fricción es considerado constante en este caso, e igual a 0.3, que es un valor típico en estos procesos [17]. Para este estudio, un rango de temperaturas de 25 a 1300 °C es considerado. Además, dentro del modelo de elemento finito fue considerada la simetría del espécimen. En las siguien-

tes secciones se muestran imágenes de resultados de esfuerzos, deformación y desplazamientos para 1000 °C.

La información arriba mostrada fue calculada con base en las curvas de flujo plástico determinadas experimentalmente por el Instituto de Conformado de la Universidad Tecnológica de Freiberg (Alemania), además, información similar puede ser obtenida de la literatura [18, 19]. El modelo de elemento finito para el estudio se muestra en la Figura 6a y 6b. Los resultados y el análisis comparativos son mostrados en la siguiente sección. El contacto entre el espécimen de prueba y las herramientas fue modelado mediante la ley de Coulomb, usando un coeficiente de fracción constante.

3. RESULTADOS

Cada espécimen es sujeto a compresión hasta el 60 % de deformación y a una tasa de deformación de $5s^{-1}$, como se muestra en la Figura 7, donde l_0 y l_f son la longitud inicial y final, respectivamente. El parámetro de salida es el fenómeno de abarrilamiento. Para medir este parámetro, dos puntos de referencia sobre el espécimen son fijados. El primero corresponde al lugar más externo de la superficie (inicialmente este punto está ubicado sobre la cara cilíndrica el espécimen), el cual es definido como el punto A. el segundo está ubicado sobre el borde de la cara superior plana, denominado B (véase la Figura 7).

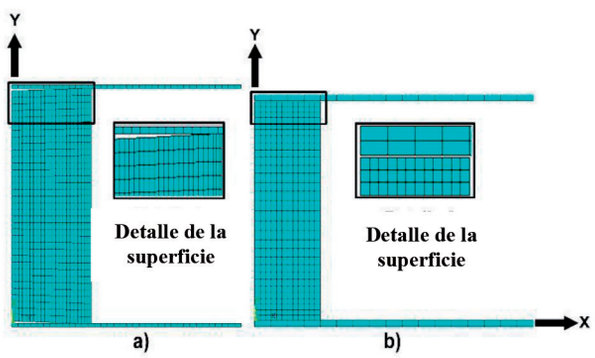


Fig. 6: Modelo de elemento finito a) espécimen Rastegaev y b) espécimen B-T

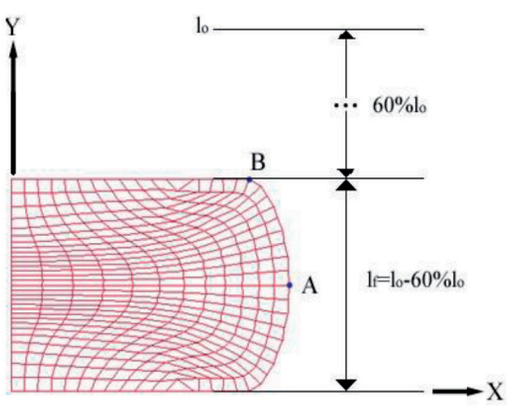


Fig. 7: Puntos de referencia sobre el espécimen

Point		Desplazamiento máximo a lo largo del eje X (mm) para diferentes condiciones de temperaturas				
		25 °C	1000 °C	1100 °C	1200 °C	1300 °C
Rastegaev	*A*	*4.05*	*2.24*	*3.82*	*3.84*	*3.83*
	B	*2.02*	*3.94*	*2.28*	*2.15*	*2.20*
B-T	*A*	*3.29*	*2.85*	*3.79*	*4.87*	*9.77*
	B	*1.79*	*1.72*	*2.51*	*2.48*	*2.50*

Tabla 3: valores máximos de desplazamientos en los puntos A y B de los especímenes Rastegaev and B-T

La Figura 8 muestra el resultado obtenido para ambos especímenes a 1000 °C y 60 % de deformación debido a compresión. La escala de colores representa el desplazamiento debido a la carga de compresión a lo largo del eje X para cada espécimen. El desplazamiento para el espécimen tipo Rastagaev está entre 0 y 3.95 mm, mientras que para el espécimen B-T entre 0 y 3.98 mm.

La Tabla 3 muestra el máximo desplazamiento a lo largo del eje X para los puntos A y B en ambos especímenes, considerando una deformación total de 60 % respecto de la longitud inicial. Los significados de los puntos A y B fueron definidos previamente. La Figura 9, por otro lado, muestra una gráfica de los desplazamientos de A y B a una temperatura de 1000 °C como función de la deformación. De esto puede observarse que el espécimen Rastagaev presenta mayor desplazamiento que el espécimen B-T; por tanto, puede inferirse que el fenómeno de abarrilamiento es más evidente en la primera muestra. Resultados similares se observan cuando la temperatura se incrementa.

4. DISCUSIÓN

Con base en la ecuación (3) se calculó el abarrilamiento de cada espécimen; los máximos valores de este parámetro fueron determinados. La Figura 10 muestra estos valores para ambos especímenes dentro del rango de temperatura especificado antes. A 25 °C el valor máximo de diferencia de abarrilamiento entre los especímenes fue de 1.05 mm; subsecuentemente, un decaimiento en el valor es observado hasta 0.5 mm a 1000 °C, esto es atribuible al notorio cambio de las propiedades mecánicas del material con la temperatura; luego, el abarrilamiento permanece aproximadamente constante hasta 1200 °C para ambos especí-

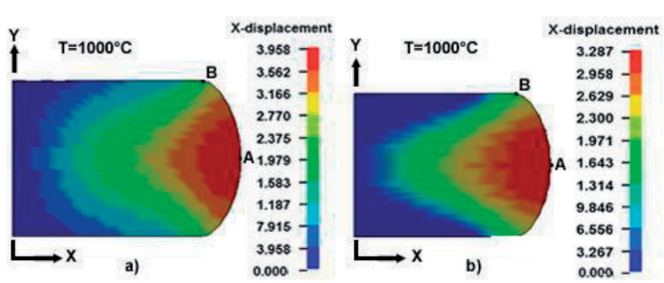


Fig. 8: Desplazamiento a lo largo del eje X (mm) para los especímenes a) Rastegaev y b) B-T

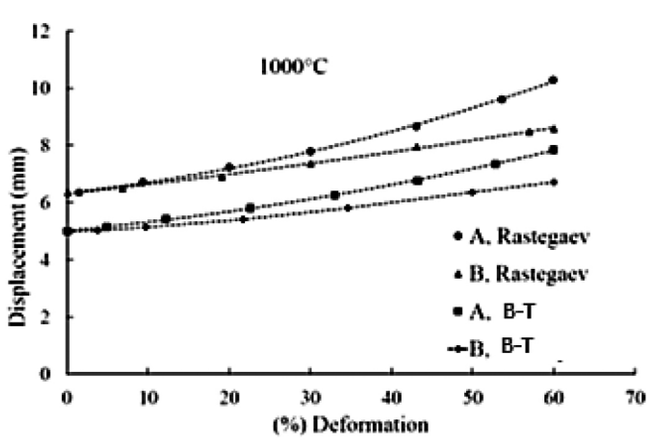


Fig. 9: Deformación de los puntos A y B a lo largo del eje X a 1000°C

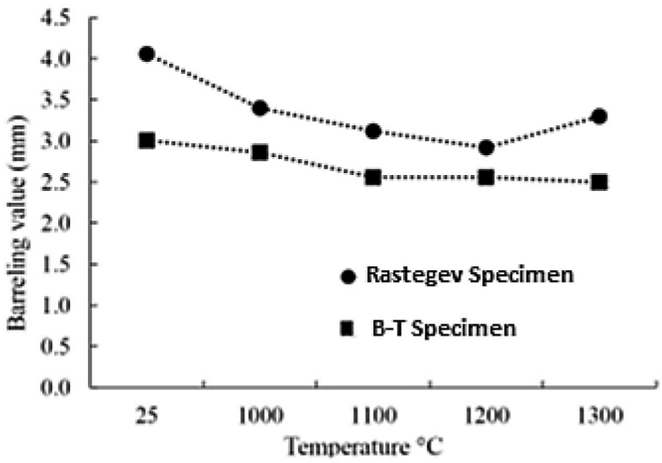


Fig. 10: Diferencia de abarrilamiento de los dos especímenes (βR-βS)

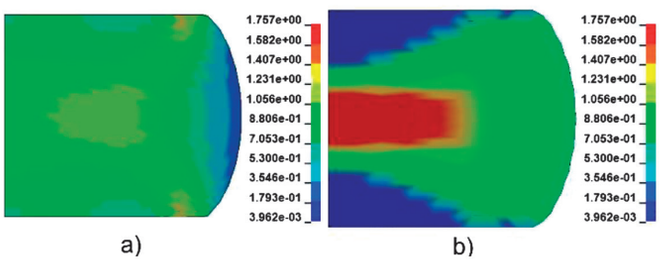


Fig. 11: Distribución de deformación efectiva (von Misses) a 1000 °C en probetas; a) Rastegaev y b) B-T

menes. Finalmente, a 1300 °C, existe un notable incremento en el abarrilamiento de ambos especímenes. El incremento del abarrilamiento en la probeta tipo Rastagaev a 1300 °C puede deberse a los efectos combinados del decremento del límite de fluencia del material y la forma de canal maquinado en las caras planas sobre la distribución de deformaciones. Es de notar que el espécimen Rastagaev siempre presenta mayo abarrilamiento respecto al B-T.

La Figura 11 muestra el contorno de deformación efectiva de cada espécimen a 1000 °C. esta distribución genera las diferencias en el abarrilamiento de los especímenes. El valor máximo de deformación está localizado en el centro, para la probeta B-T. En contraste, la probeta Rastagaev exhibió una distribución más homogénea de la deformación; esto causa un mayor desplazamiento de la superficie y, consecuentemente, un mayor valor de abarrilamiento. Resultados similares fueron encontrados para las diversas condiciones de temperatura analizadas.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, dos especímenes. Diferentes (Rastagaev y B-T) fueron modelados y comparados por elemento finito. Diferentes pruebas de compresión fueron simuladas bajo condiciones similares de carga, propiedades de material y fricción, variando únicamente la temperatura en un rango de 25 a 1300 °C. Se mostró una comparación entre los desplazamientos de las dos probetas referidas, por medio de punto definidos en las mismas. El parámetro de salida es el abarrilamiento de las probetas. Con base en ellos, las siguientes conclusiones pueden establecerse:

- De los datos obtenidos, puede concluirse que el espécimen Rastagaev exhibe un mayor abarrilamiento en todos los casos analizados, de un 14 % a un 35 % mayor respecto al espécimen B-T. El caso más crítico fue encontrado a temperatura ambiente. La variación en el abarrilamiento es debido a las características geométricas de cada espécimen. Con base en esto, se puede concluir que la geometría Rastagaev presenta un comportamiento más pobre en la simulación de pruebas de compresión.
- Además, se observa una clara ventaja en el uso del espécimen B-T para pruebas de compresión, a pesar de que las superficies planas son incapaces de retener una película de lubricante.
- Se presentó gran distorsión en la malla de elemento finito, sobre todo al final de la simulación. Por esta razón, realizar simulaciones con otros enfoques de elemento finito, tales como ALE o EFG es recomendable.

REFERENCIAS

[1] M. D. Krahmer, R. Polvorosa, L. N. López de La calle, U. Alonso-Pinillos, G. Abate and F. Riu, "Alternatives for Specimen Manufacturing in Tensile Testing of Steel Plates," Experimental Techniques, vol. 40, no. 6, p. 1555–1565, 2016.
[2] ASM International, Cold and hot forging fundamentals and applications, T. Altan, G. Ngaile and G. Shen, Eds., ASM, 2004, p. 341.
[3] C. M. Silva, P. A. Rosa and P. A. Martins, "Innovative Testing Machines and Methodologies for the Mechanical Characterization of Materials," Experimental Techniques, vol. 40, no. 2, p. 569–581, 2016.
[4] U. S. Dixit, S. N. Joshi and J. P. Davim, "Incorporation of material behavior in modeling of metal forming and machining processes: A review," Materials & Design, vol. 32, no. 7, pp. 3655-3670, 2011.
[5] Gleeble, "Gleeble: Case studies and application profiles," Dynamic Systems Inc., 2019. [Online]. Available: https://gleeble.com/resources/case-studies.html. [Accessed 2019].
[6] T. Ozel and T. Altan, "Determination of workpiece flow stress and friction at the chip–tool contact for high-speed cutting," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, no. 1, pp. 133-152, 2000.
[7] J. R. Douglas and T. Altan, "Flow Stress Determination for Metals at Forging Rates and Temperatures," Journal of Engineering for Industry, vol. 97, no. 1, pp. 66-76, 1975.
[8] W. S. Farren and G. I. Taylor, "The heat developed during plastic extension of metals," Proceedings of the Royal Society of London. Series A, vol. 107, pp. 422-451, 1925.
[9] Y. Li, E. Onodera and A. Chiba, "Friction Coefficient in Hot Compression of Cylindrical Sample," MATERIALS TRANSACTIONS, vol. 51, no. 7, pp. 1210-1215, 2010.
[10] ASTM International, Slow strain rate testing for the evaluation of environmentally induced cracking: research and engineering applications, R. D. Kane, Ed., ASTM, 1993.
[11] L. Yong-Cheng, C. Ming-Song and Z. Jun, "Modeling of flow stress of 42CrMo steel under hot compression," Materials Science and Engineering: A, vol. 499, no. 1-2, pp. 88-92, 2009.
[12] B. Roebuck, J. D. Lord, M. Brooks, M. S. Loveday, C. M. Sellars and R. W. Evans, "Measurement of flow stress in hot axisymmetric compression tests," Materials at High Temperatures, vol. 23, no. 2, pp. 59-83, 2006.
[13] H. N. A. &. M. M. Mirzadeh, "Flow Curve Analysis of 17-4 PH Stainless Steel under Hot Compression Test," Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 40, no. 12, pp. 2950-2958, 2009.
[14] AIR FORCE RESEARCH LAB WRIGHT-PATTERSON AFB OH MATERIALS AND MANUFACTURING DIRECTORATE, "Measurement and Interpretation of Flow Stress Data for the Simulation of Metal-Forming Processes," Greene-OH, 2010.
[15] TA Instruments, «Products-TA Instruments,» 2013. [Online]. Available: https://www.tainstruments.com/dil-805ad/?lang=es. [Accessed 2 5 2019].
[16] Livermore Software Technology Corporation, "LS Dyna manuals," [Online]. Available: http://www.lstc.com/download/manuals. [Accessed 2 5 2019].
[17] IIT RESEARCH INST CHICAGO IL, "METAL DEFORMATION PROCESSES/FRICTION AND LUBRICATION," Chicago, 1970.
[18] F. L. Everett and J. Miklowitz, "Poisson's Ratio at High Temperatures," Journal of Applied Physics, vol. 15, pp. 592-598, 1944.
[19] Matweb, "Material Property data," [Online]. Available: http://www.matweb.com/. [Accessed 2 5 2019].

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo de CONACyT.