

Predicción de fractura dúctil en el formado de terminales automotrices

Jesús Anselmo Moreno Armendáriz, Luis Arturo Reyes Osorio, Roberto Cabriales

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, y Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica.
luis.reyessr@uanl.edu.mx

RESUMEN

Las tecnologías de fabricación han evolucionado en la industria automotriz debido al esfuerzo de los fabricantes por reducir costos, minimizar tiempos y mejorar la calidad de los productos. En el presente trabajo se analiza mediante el método de elementos finitos el daño por fractura dúctil durante el formado de una terminal utilizando el modelo de daño Cockcroft-Latham (C&L). Se desarrolló un modelo numérico para el formado de dos aleaciones CuSn₆ con diferentes condiciones de flujo. Los resultados obtenidos reflejan la validez del modelo desarrollado, detectando y evaluando el daño ocurrido durante el proceso de formado de una terminal automotriz.

PALABRAS CLAVE

Formado, elemento finito, fractura frágil, daño.

ABSTRACT

The manufacturing technologies have evolved in the automotive industry due to the constant pressures on manufactures to reduce cost, minimize times and improve quality. In this paper, the finite element method (FEM) is applied to analyze the damage by ductile fracture present in a terminal of automotive socket using the software DEFORM and the Cockcroft-Latham (C&L) damage model. Through this platform was developed a forming simulation for two CuSn₆ alloys with different flow conditions. The results reflect the usefulness of the finite element method resulting in the detection and evaluation of the damage that occurred during the progressive-die process of a terminal.

KEYWORDS

Forming, finite element, ductile fracture, damage.

INTRODUCCIÓN

Los componentes porta-lámparas son ampliamente utilizados en la industria automotriz. Este componente incluye tomas con base de cuña en un conector integral, cables, conjuntos de placa de circuito e interfaces asociadas. (figura 1).

La terminal de enchufe sirve para energizar la bombilla de un automóvil a la señal enviada desde la computadora por el conductor. Estas terminales requieren una atención significativa desde el diseño hasta la operación debido a sus características eléctricas, térmicas y mecánicas. La norma USCAR 15 es la especificación de prueba para ensambles de circuito/enchufe para bombillas miniatura utilizadas en la industria automotriz; esta especificación establece los requisitos y procedimientos de prueba para dispositivos de retención de bombillas automotrices.¹

La fractura dúctil durante flujo plástico posee una gran dependencia en esfuerzos locales, inestabilidades de flujo, velocidad, condiciones de temperatura, además de la influencia de los cambios de microestructura. Es de gran importancia el estudio del micro-mecanismo que ocurre durante la fractura y la probabilidad de daño como vía de cuantificación de los efectos que son partícipes durante el proceso de disipación energético y la formación de superficies de fractura. El flujo plástico es un proceso físico donde a través del movimiento de dislocaciones se deforma permanentemente un material. La fractura dúctil es un fenómeno complejo que posee una gran dependencia en parámetros térmicos y mecánicos, tales como: estado de esfuerzos, grado de deformación, velocidad y cambios de temperatura.²⁻⁴ Los modelos matemáticos por elementos finitos son técnicas frecuentemente utilizadas para determinar estados de esfuerzo locales, patrones de deformación y daño crítico en la predicción de fractura durante el flujo plástico.^{5,6}

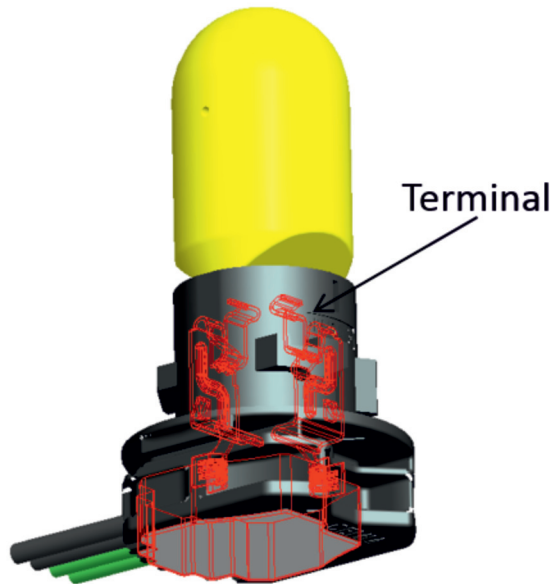


Fig. 1. Porta-lámpara utilizado en la manufactura automotriz.

Los principales tipos de fallas por fractura durante el flujo plástico son la fractura superficial y la fractura interna. Frecuentemente, el fenómeno de fractura ocurre en las superficies en contacto que imparten la fuerza requerida para deformar un material. Una combinación de deformación cortante con esfuerzos de tensión, o un bajo valor de presión hidrostática en la vecindad del área de contacto es la principal causante de fractura superficial. El tamaño de grano y la estructura interna de un material poseen una gran influencia en las propiedades mecánicas, típicamente, la resistencia a la fractura decrece con un incremento de tamaño de grano debido a que la generación de grietas puede iniciar y propagarse fácilmente a través de los límites de grano. Los mecanismos de daño dominante son ampliamente dependientes de la velocidad, temperatura, microestructura y composición química. Los cambios y reconfiguraciones energéticas internas del material surgen durante la deformación debido principalmente al fenómeno de recristalización dinámica.⁷⁻¹⁰

Los modelos de elementos finitos permiten analizar la influencia de los principales parámetros de formado en el fenómeno de agrietamiento. Se debe seleccionar un criterio de fractura adecuado en la predicción del agrietamiento durante el formado.

En general, un criterio de fractura define un valor de daño C , este valor instantáneo cambia con el estado de esfuerzos y deformación. Un valor de daño más grande indica que el material tiene más probabilidades de agrietarse. Si se encuentra un valor de daño crítico C para el material específico y las condiciones de formado por experimento, se podrá predecir el instante en que ocurrirá el agrietamiento, es decir, una vez que el valor de daño instantáneo es mayor que el valor crítico, el material se agrietará. Sin embargo, el valor exacto del daño crítico es difícil de determinar.¹¹

Existen diversos criterios en la predicción de fractura dúctil, el criterio de fractura utilizado en el presente estudio, desarrollado por Cockcroft y Latham (C & L), define el valor del daño como:¹²

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}} \left(\frac{\sigma_{max}^*}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon}$$

Donde C es el valor de daño instantáneo, $\bar{\epsilon}$ es la deformación efectiva, σ_{max}^* es el esfuerzo principal máximo, $\bar{\sigma}$ es el esfuerzo efectivo. El criterio C & L puede reflejar la cantidad de deformación, ya que considera el historial de deformación al calcular el valor de daño.

MATERIALES Y MÉTODOS

Láminas de la aleación CuSn₆ fueron utilizadas en el formado progresivo y su posterior análisis numérico. El CuSn₆ es una aleación de cobre (bronce) con 6% de estaño, ver tabla I.¹³ Su mayor contenido de estaño imparte una gran resistencia y elasticidad al metal. Este material proporciona una excelente combinación de resistencia, conformabilidad en frío y dureza, es resistente al desgaste, posee buena resistencia a la corrosión y propiedades de soldadura.

Algunas de sus propiedades mecánicas se presentan en la tabla II. Características como el tamaño de partícula y la liberación de esfuerzos térmico-mecánicos mejoran las propiedades mecánicas y proporcionan una mayor resistencia y maleabilidad. El CuSn₆ cuenta con aplicaciones típicas en el campo automotriz como: interruptores, contactos, conectores a electricidad y resortes.

Tabla I Composición química característica de la aleación CuSn₆ (porcentaje en peso).

Cu (%)	Sn (%)	P (%)	Zn (%)
94	5.5-7.0	0.03-0.18	Max 0.1

Tabla II Propiedades mecánicas de la aleación CuSn₆.¹³

Tratamiento térmico	Esfuerzo a tensión (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Elongación %	Dureza (HV)
R350	350-420	≤ 300	45	80-120
R420	420-520	≥ 350	22	120-170
R500	500-590	≥ 450	15	160-190
R550	560-650	≥ 500	16	170-230

El diseño de las herramientas desempeña un papel fundamental en el formado pues a través de la aplicación de matrices progresivas, en lugar de matrices simples, se logra optimizar los procesos de formado. En la figura 2 se presenta el formado progresivo de una serie de terminales automotrices de CuSn₆.

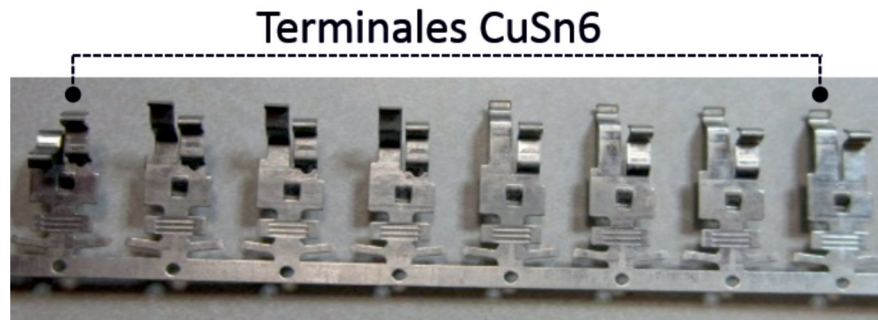


Fig. 2. Formado progresivo en la manufactura de terminales CuSn₆ de porta-lámpara automotriz.

El diseño del proceso de formado es un procedimiento complejo y altamente especializado. Las características de diseño de las piezas laminadas, disposición, selección y el modelado de los componentes de la matriz son las principales actividades en el diseño de una matriz progresiva. Los sistemas CAD/CAM brindan una gran ayuda en el diseño y el análisis de matrices. El diseño de la pieza laminada se rige principalmente por las características geométricas de la pieza, la tolerancia en las dimensiones de la pieza, la dirección del borde afilado de la banda y otros requisitos técnicos.

No existe una solución única para el diseño de la lámina, en general se consideran algunas pautas básicas durante esta actividad.¹⁴

Los principales componentes del formado progresivo son; el bloque del formado, las matrices, la placa separadora, la placa de perforación, la placa posterior, los punzones y los sujetadores. El tamaño de las matrices depende principalmente del grosor de la lámina. El espesor mínimo está restringido por el riesgo de pandeo, que puede ocurrir durante el proceso de tratamiento térmico durante la fabricación. La selección de materiales para componentes en el formado progresivo depende de qué mecanismos de falla sean predominantes. La idea básica en el diseño de una matriz es seleccionar un material adecuado para un componente en particular de manera que se eliminen todos los demás mecanismos de falla, excepto el desgaste.

El desgaste puede optimizarse para que coincida con la cantidad de producción requerida de piezas laminadas, obteniendo una vida útil más larga y, por lo tanto, una mayor productividad. Los aceros grado herramienta se utilizan ampliamente como materiales componentes de las matrices. La selección del rango de dureza adecuado de los materiales seleccionados de los componentes depende de la geometría de la pieza que se fabrica en el formado progresivo.¹³

MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico para el formado en frío de la aleación CuSn₆ fue desarrollado mediante una aproximación incremental Lagrangiana. Se consideró un avance total del dado principal de 2.7 mm y un método de iteración Newton-Raphson para llevar a cabo la solución numérica. La geometría del modelo se simplificó considerando una lámina con ancho de 2.7 mm, largo de 10 mm y espesor de 0.4 mm, así mismo, la operación de formado considera el doblado de la lámina a 90° para analizar el estado de esfuerzos y la posible fractura de la terminal (figura 3)

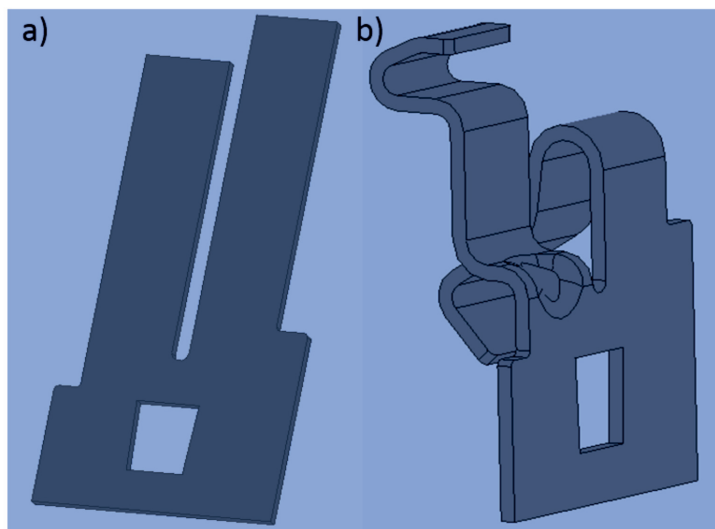


Fig.3. Diseño de geometría de terminal: a) modelo utilizado en el análisis numérico y b) modelo de pieza final.

La metodología planteada en el desarrollo del modelo numérico se muestra en la figura 4: el esfuerzo de flujo y las condiciones de frontera son de gran importancia en la obtención de resultados numéricos confiables. Para el estudio se consideran dos condiciones del material CuSn₆: la condición H04 y la condición H06. Estos tratamientos corresponden a las condiciones R550 y R670 mostradas en la tabla II. Las curvas esfuerzo-deformación del material CuSn₆ para las condiciones de tratamiento H04 y H06 se presentan en la figura 5.

Los componentes utilizados en el modelo numérico constituyen tres geometrías: la matriz, el bloque de formado y la placa (figura 6). La generación y disposición de las geometrías del modelo se ilustra en la misma figura; un modelo de fricción cortante con valor de 0.12 fue utilizado para la interacción entre la pieza y las herramientas, este modelo corresponde al formado en frío con herramientas de acero.¹⁴ Para el discretizado de la pieza se utilizó una malla hexaédrica con un total de 16,380 elementos, la distribución de malla seleccionada permitió optimizar el tiempo de cálculo durante las iteraciones numéricas.

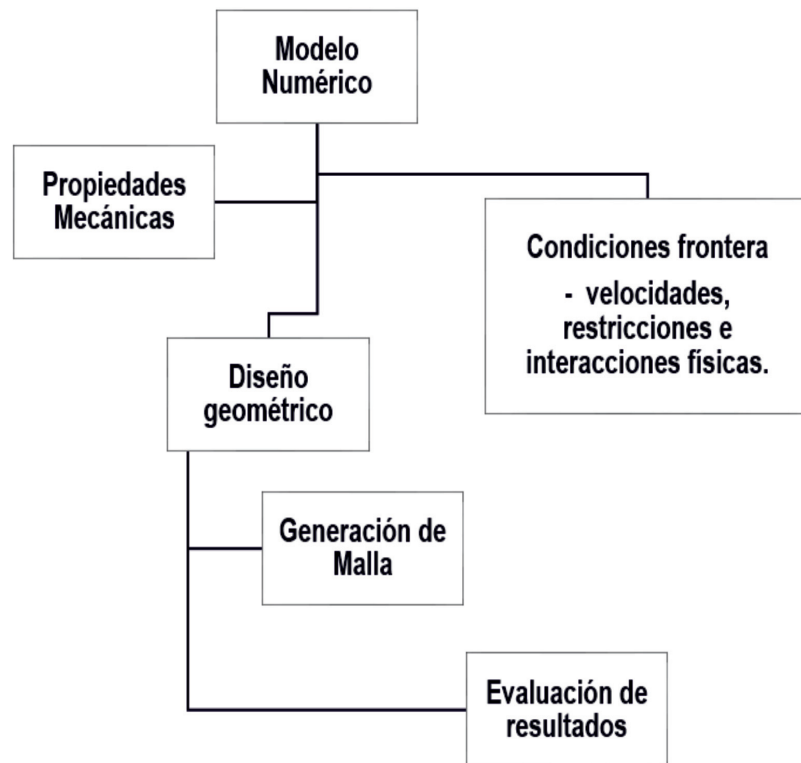


Fig. 4. Metodología utilizada en el desarrollo del modelo numérico.

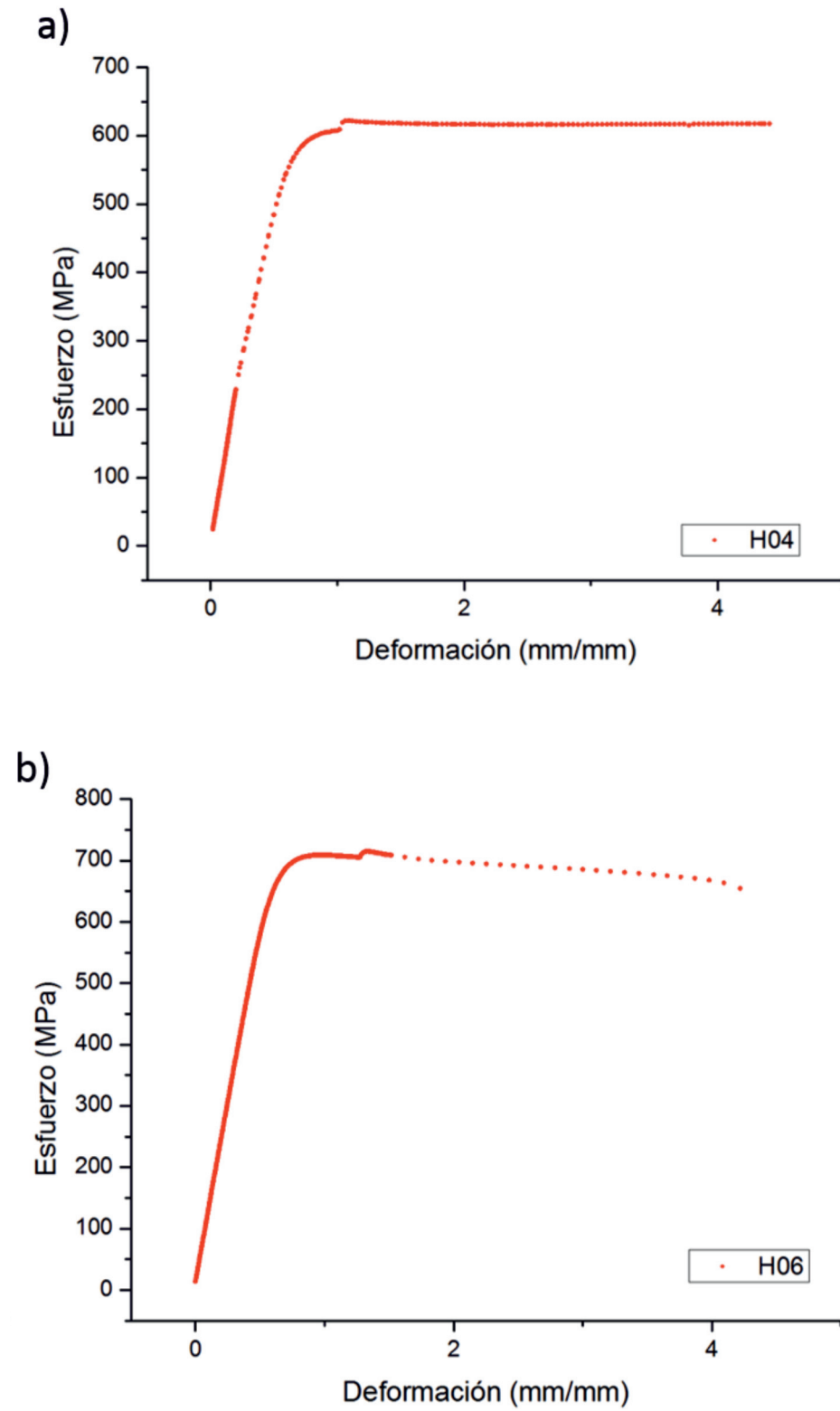


Fig. 5 Curvas esfuerzo-deformación de la aleación CuSn₆: a) condición H04 y b) condición H06.

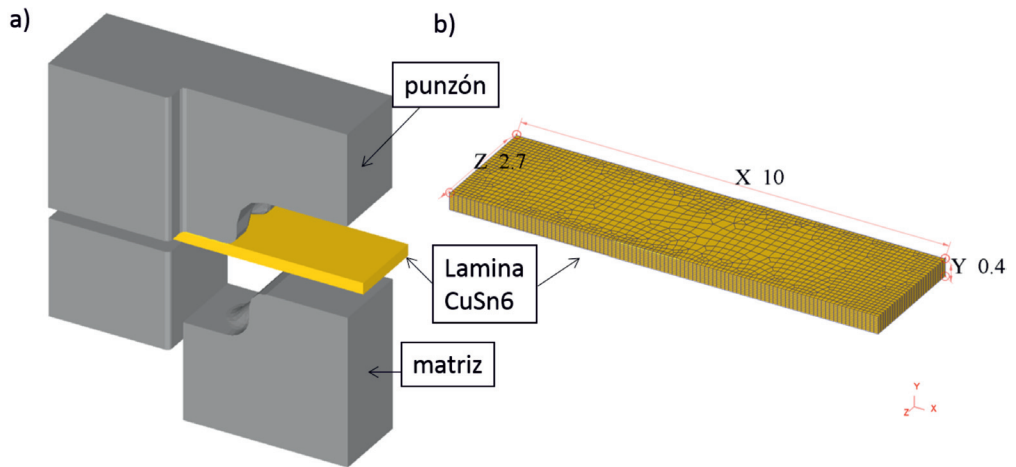


Fig. 6. Generación de modelo numérico en el formado de la aleación CuSn₆: a) diseño de herramientas utilizadas y b) discretizado de la lámina de trabajo.

RESULTADOS

Se desarrollaron experimentos del formado progresivo en la aleación CuSn₆ (figura 7). Durante el desarrollo experimental la terminal presentó fractura superficial bajo la condición H06 como se observa en la figura 7b. Esta fractura se presentó cerca de la cavidad presente en la región de doblado. Así mismo, se desarrollaron experimentos para el material CuSn₆ bajo la condición H04, esta condición no presentó fractura superficial como se observa en la figura 6a. Se desarrollaron experimentos adicionales corroborando la ausencia de fractura en las terminales CuSn₆ bajo la condición H04.

Los resultados numéricos del estado de esfuerzos y deformación en el formado del CuSn₆ bajo la condición H04 se muestran en la figura 8. La distribución del esfuerzo máximo y el esfuerzo máximo principal en la zona de doblado observa

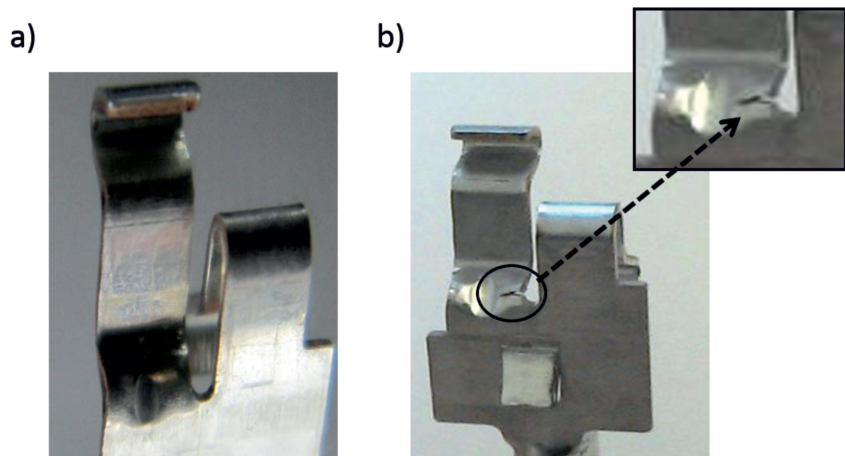


Fig. 7. Formado de terminales de CuSn₆, a) condición H04 y b) condición H06.

valores alrededor de 567 MPa y 593 MPa respectivamente. La deformación efectiva muestra valores máximos en la región de doblado central de 0.59.

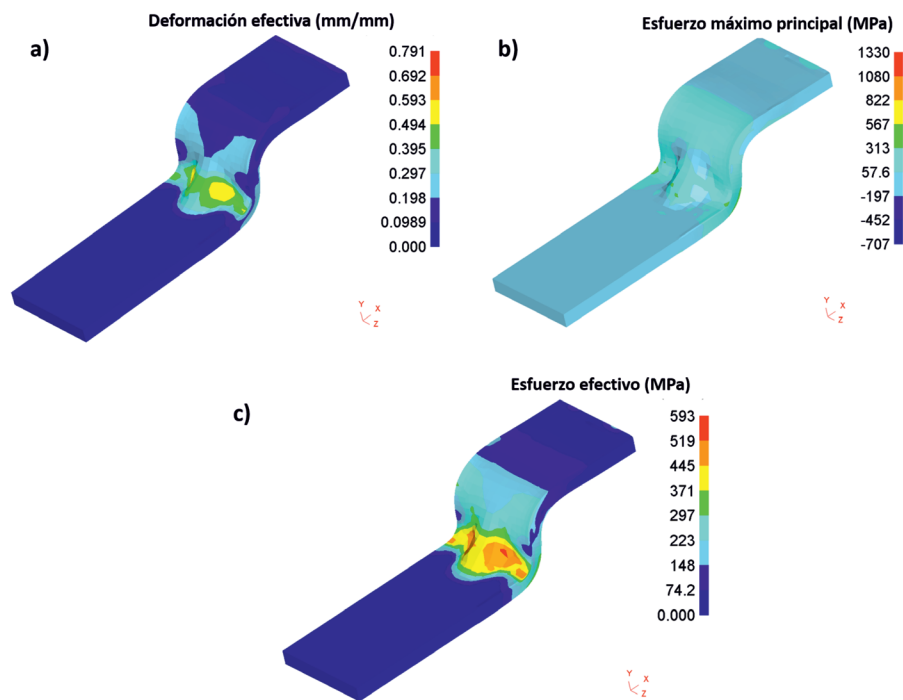


Fig. 8. Resultados numéricos del estado de esfuerzos y deformación del CuSn₆ en la condición H04.

Los resultados numéricos del estado de esfuerzos y deformación en el formado del CuSn₆ bajo la condición H06 se muestran en la figura 9. La distribución del esfuerzo promedio y el esfuerzo efectivo en la zona de doblado observa valores cercanos a 332 MPa y 675 MPa respectivamente. La deformación efectiva muestra valores máximos en la región de doblado central de 0.77. Los resultados de esta condición muestran que el esfuerzo efectivo en la superficie de doblado es mayor comparado con la región superior de la pieza. Esta distribución indica que la pieza es susceptible a agrietarse en la región con mayor inestabilidad de flujo mecánico.

Se desarrollaron simulaciones numéricas utilizando el criterio de fractura C & L, donde los valores de daño instantáneo fueron calculados cuando el punzón alcanza el avance total en la operación de formado (figura 10). En general, los valores máximos del factor de daño se encuentran cercanos a la región superficial externa (P1-P4), en el inciso a) de la figura 10 se presentan los valores de daño para la condición H04 y en el inciso b) se presentan los valores del factor de daño y fractura para la condición H06. En base a los resultados obtenidos en el modelo de daño para las condiciones evaluadas se distingue un valor de daño crítico de 140 como valor proclive a fractura dúctil en la aleación CuSn₆ durante el formado en frío.

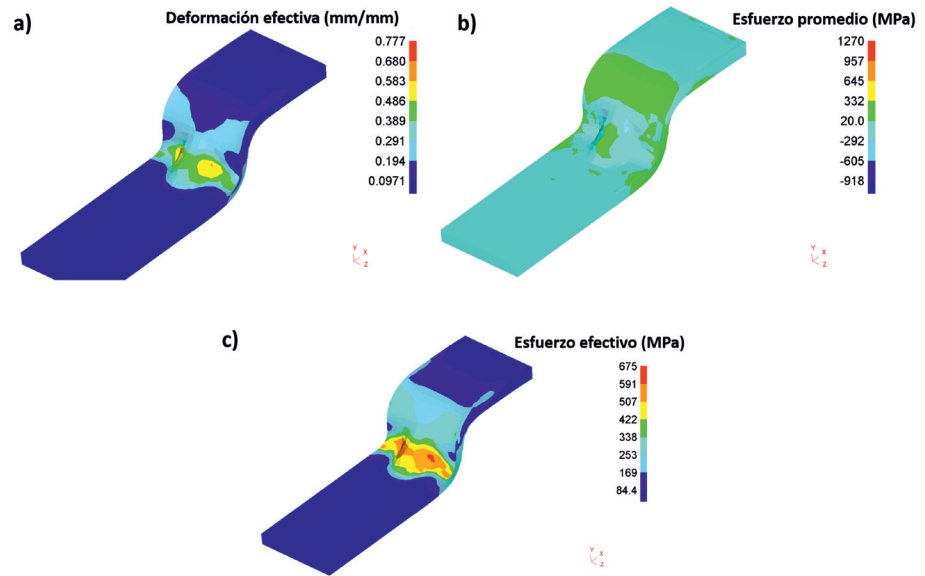


Fig. 9. Resultados numéricos del estado de esfuerzos y deformación del CuSn₆ en la condición H06.

La figura 11 presenta los valores de daño, en función del tiempo, obtenidos en los puntos de análisis mostrados en la figura 10. Se observa que un material bajo condición de dureza menor puede disminuir significativamente los valores de daño y reducir el agrietamiento. Se observan valores de daño cercanos a 110 al final del proceso para la condición H04, en cambio, para el tratamiento H06 se observa un valor máximo de daño de 140 para el punto de análisis P4. La combinación de deformación cortante con esfuerzos de tensión máximos en la vecindad del área de doblado es la principal causante de fractura superficial durante el formado en frío de la aleación CuSn₆. El modelo de daño C & L permite determinar el valor crítico de daño en base al historial de deformación y estado de esfuerzos presente.

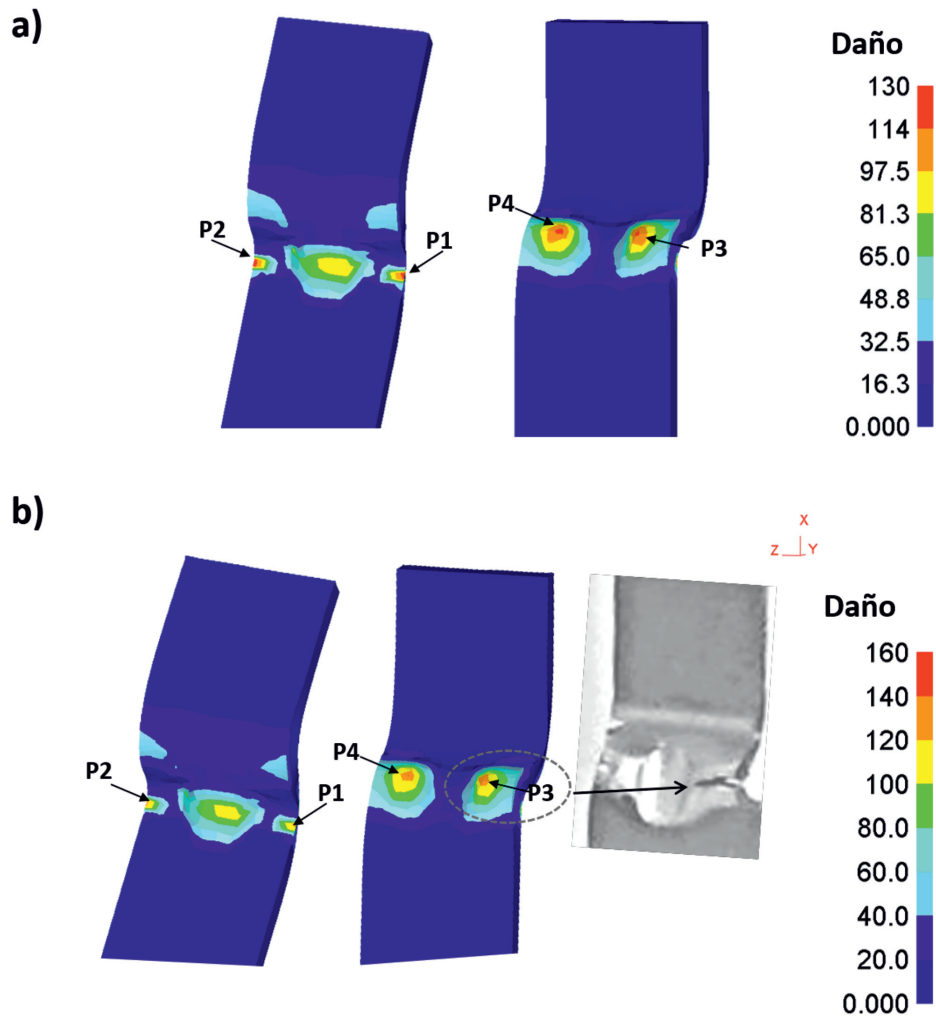


Fig. 10. Resultados numéricos del factor de daño en el CuSn_6 : a) condición H04 y b) condición H06.

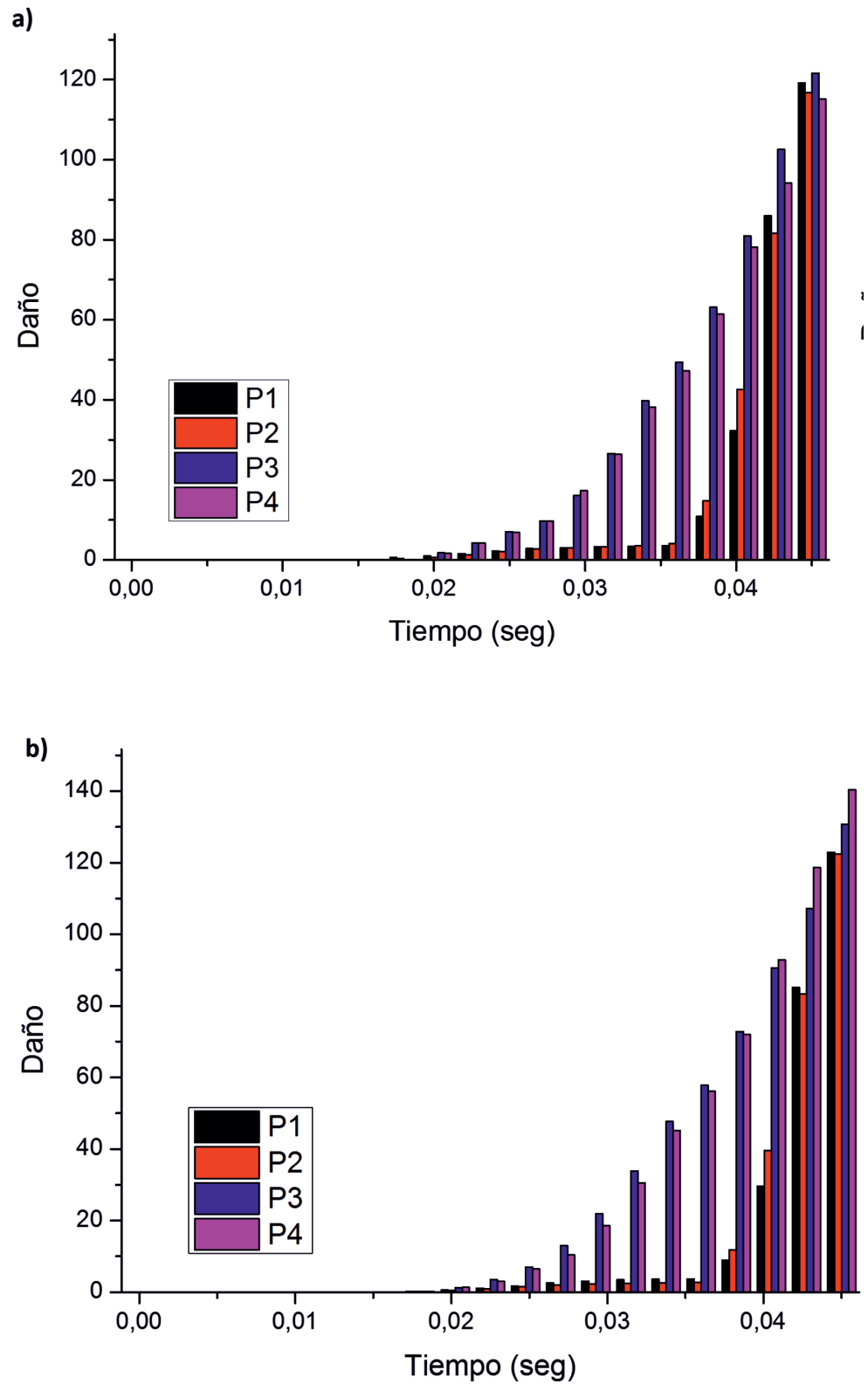


Fig. 11. Valores de daño versus tiempo: a) condición H04 y b) condición H06.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo numérico en la representación del formado de la aleación CuSn₆ bajo dos condiciones de tratamiento.

1. Para estimar el agrietamiento de la pieza durante el formado, se seleccionó el criterio de fractura Cockcroft-Latham, que considera el historial de deformación del material.

2. El criterio de fractura define un valor de daño instantáneo C. Un valor mayor indica que el material tiene más probabilidades de agrietarse. Si se puede determinar un valor de daño crítico C del experimento, el material se agrietará una vez que el valor de daño alcance o supere el valor crítico.

3. En base a los resultados obtenidos en las condiciones evaluadas se distingue un valor de daño crítico de 140 como valor proclive a fractura dúctil en la aleación CuSn₆ (condición H06) durante el formado.

Los resultados del modelo numérico muestran que con la condición de tratamiento H04 el valor máximo de daño tiene una disminución aparente del 21% en comparación con la condición de tratamiento H06. El resultado obtenido coincide con la observación experimental que indica que una aleación CuSn₆ con menor dureza es menos probable que la pieza se agriete.

REFERENCIAS

1. Specification for Testing Automotive Miniature Bulb Socket/Circuit Plate Assemblies, USCAR15, 2017, SAE International 49.

2. Zhang Xue-min, Zeng Wei-dong, Shu Ying, Fracture criterion for predicting surface cracking of Ti40 alloy in hot forming processes, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 19 2009, 267-271.

3. Yanchun Zhu, Weidong Zeng, Fusheng Zhang, Yongqing Zhao, A new methodology for prediction of fracture initiation in hot compression of Ti40 titanium alloy, *Materials Science and Engineering A* 553 2012, 112– 118.

4. T.W.J. de Geus, R.H.J. Peerlings, M.G.D. Geers, Topology and morphology influences on the onset of ductile failure in a two-phase microstructure, *Procedia Materials Science* 3 2014, 598 – 603.

5. Lestriez P. Modélisation numérique du couplage thermo-mécanique-endommagement en transformations finies, Application to metal forming. PhD, UTT, December (2003).

6. C. Summitsch, P. Pölt, G. Rűf, S. Mitsch, On the modelling of the interaction of materials softening and ductile damage during hot working of Alloy 80A, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, 2006 282–286.

7. Behrens, H. Just. Verification of damage model of effective stresses in cold and warm forging operations by experimental testing and FE Simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, 2002 295-301.

8 Xiao-Min Chen, Y.C. Lin, Dong-Xu Wen, Jin-Long Zhang, Min He Dynamic recrystallization behavior of a typical nickel-based superalloy during hot deformation, *Materials and Design* 57 2014, 568–577.

9. Y.C. Lin, Jiao Deng, Yu-Qiang Jiang, Dong-Xu Wen, Guan Liu, Hot tensile deformation behaviors and fracture characteristics of a typical Ni-based superalloy, *Materials and Design* 55 (2014) 949–957.
10. T. Coppola, F. Iob, F. Campanelli, Critical review of ductile fracture criteria for steels, *Procedia Materials Science* 3 2014, 1548-1553.
11. Dongyong Shi, Ping Hu, Liang Ying, Comparative study of ductile fracture prediction of 22MnB5 steel in hot stamping process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 84, I5–8 2016, 895–906.
12. Cockcroft MG, Latham DJ, Ductility and the workability of metals. *J Inst Met* 1968, 96:33–39.
13. Página web electrónica, búsqueda 2017, http://www.aurubis Stolberg.com/wdb/band/eng/Copper%20tin/CuSn6-PNA%20282_EN.pdf
14. F. Djavaanroodi, M. Ebrahimi, Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 527, Issues 4–5, 15 2010, 1230-1235.
15. Automatic piloting in progressive dies using medial axis transform, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 34, 2010 10, 2981-2997.
16. An automated design system for progressive die, *Expert Systems with Applications: An International Journal*, Vol. 38 I4, 2011, 4482-4489.

