

ANÁLISIS DE LA ANISOTROPÍA Y RECUPERACIÓN ELÁSTICA DURANTE EL PROCESO DE CONFORMADO

*Jose F. Diaz C. ^{*1}, Rodolfo Rodriguez B. ²*

1: Ingeniero Mecánico, Estudiante de maestría en Materiales y Procesos de Manufactura, Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá, Colombia

2: PhD. Profesor Universidad Nacional de Colombia, Director de grupo de Innovación en procesos de manufactura e ingeniería de materiales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

*Contacto: jofdiazca@unal.edu.co

RESUMEN

En esta investigación se analiza la conformación del material SAE-J403 por medios experimentales y de simulación donde se hace énfasis en el estudio de la combinación del “springback” y anisotropía plástica. El trabajo experimental se realizó en láminas con geometría estandarizadas y matriz de conformado. La simulación se realizó mediante elementos finitos (FEM) que permite cargar los datos obtenidos de la caracterización del material y condiciones de trabajo de la matriz. Los resultados obtenidos por medio experimental y FEM muestran concordancia entre sí, dado que además de analizar la recuperación elástica y anisotropía. También pueden ser comparados los adelgazamientos generados por la conformación de la pieza, que ha sido endurecida en las zonas que han alcanzado una mayor tensión debido al trabajo que experimenta el material en las zonas de mayor deformación.

Palabras Clave: *Recuperación elástica, Anisotropía, Conformado, FEM*

ABSTRACT

This research analyzes the plastic deformation process of SAE-J403 material by experimental and simulation studies. The study emphasis on combination of springback and plastic anisotropy. The experimental work was carried out with samples with standardized geometry and forming dies. The simulation was performed using finite element method (FEM) using data obtained from the material characterization and real conditions into the die. The experimental results and FEM analyses show concordance. The elastic recovery and anisotropy can also be compared with thinning generated by the shaping of the piece, which has been hardened in the specific areas due to work stress experienced by the material in the areas of highest deformation.

Keywords: *Springback, Anisotropy, Forming, FEM*

1 INTRODUCCION

La conformación de lámina metálica por medio de embutido, estirado, doblado y corte tiene gran importancia en la industria automotriz y otros sectores en Colombia. Los metales más usados son los aceros aleados, el éxito de la conformación de la lámina viene asociado con la optimización

y control de la calidad del producto terminado. La conformación puede definirse como una medida de deformación que el material experimenta antes de que haya rotura o falle [1].

La conformación varía según las propiedades de los materiales y las condiciones de deformación, esta puede ser estudiada a partir de varios parámetros (n es endurecimiento por deformación, K es resistencia del material, ϵ es deformación, σ es el esfuerzo, w es ancho de probeta, t es espesor de la probeta, R_0 , R_{45} and R_{90} coeficiente anisotrópico con relación al distintos ángulos al sentido de laminación, \bar{R} es anisotropía normal) que se obtienen a partir de ensayos estándares de tracción, como alargamiento hasta falla, endurecimiento por deformación formulado por la ecuación 1 y la anisotropía plástica formulado por la ecuación 2 y 3 [2]. Hasta ahora ha hecho falta realizar estudios más rigurosos de la relación anisotropía plástica que hace referencia a la selección de la orientación del material durante el proceso de estampado propuesta por el parámetro de Lankford [3], y la recuperación elástica.

$$\delta = K \epsilon^n \quad (1)$$

$$R = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)} \quad (2)$$

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (3)$$

En la recuperación elástica se genera un estado de esfuerzos. Donde las curvas esfuerzo-deformación unitaria, tanto a tensión como a compresión, son recorridas completamente en los lados sujetos a tensión y compresión. Esto significa que alrededor del plano neutro, los esfuerzos deben ser elásticos [4]. Cuando en el troquelado la carga de la matriz es retirada de lámina, después de esta ser conformada, se desarrollan componentes elásticos de esfuerzos en el material que causan una recuperación elástica, mientras que en la zona deformada plásticamente surgirá un patrón de esfuerzos residuales. La recuperación elástica disminuye la deformación de la pieza, por este motivo hace que se deban evaluar dos aspectos en el tema de conformado que corresponden al control y predicción del “*springback*” durante la conformación de piezas metálicas, esto para definir y diseñar matrices que compensen este efecto [5].

La mayor parte de las investigaciones se centran en procesos de dobles de lámina, donde se han encontrado técnicas para corregir la recuperación elástica, se ha demostrado que una fuerza alta de embutido durante la operación de conformado puede reducir la cantidad de recuperación elástica [6]. Actualmente se está evaluando cuantitativamente los factores numéricos que influyen en la predicción de la recuperación elástica [7]. Para el tema de investigación el método de elementos finitos (FEM), fue el mejor método para estudiar el proceso de conformación, debido a su operación viable y de bajo costo [8]. En la actualidad el método de elementos finitos es el método comparativo, preciso para simular y estudiar el control eficiente de procesos de conformado de chapa metálica, ya que se puede utilizar los resultados de la caracterización de los materiales, geométricas exactas de las matrices y condiciones reales de los tiempos de operación de las máquinas de prensado.

En el presente trabajo se estudia el proceso de conformación por vía experimental y de simulación del material SAE-J403. El efecto sinérgico de la recuperación elástica y la anisotropía plástica son los puntos en los que se centra la investigación, ya que en la mayor parte de los análisis realizados, solo se hace referencia a los dos efectos mencionados por separado, es de gran importancia relacionarlos para obtener un mejor control en los procesos de conformado y el diseño de matrices.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La pieza estudiada fue analizada con el programa ANSYS, en este se utilizó el material SAE-J403 (ver tabla 1 composición química) de tamaño 1200mm X 325mm X 1mm, que se caracterizó para alimentar el código de FEM con las propiedades físicas del material obtenidas por ensayos estandarizados de la norma ASTM, en estas normas se formulan el cálculo del endurecimiento por deformación, anisotropía plástica, curvas limite conformado [9], [10], [11], [12]. También se realizó el experimento de conformar la pieza en un troquel, según la optimización obtenida por el método de elementos finitos, para el ensayo se utilizó una prensa ONA-PRESS de 600Tn donde se aplicaron los aspectos evaluados como la anisotropía plástica durante la estampación y la recuperación elástica en el momento de descargue de presión de la prensa en el material [13].

Tabla 1. Composición química de material SAE J403

Material SAE J403	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	V	Mo	Nb	Al	Ti
Composición (%)	0.05	0.20	0.07	0.02	0.16	0.05	0.006	0.009	0.001	0.003	0.001	0.025	0.0005

En el experimento se aplicó un modelo factorial de 2^k , con dos niveles, en este se comparan los resultados del ensayo de la obtención de la anisotropía plástica y tener la certeza de que el material con sentido de laminación de 0° es el que menor genera adelgazamiento, durante la simulación por el método de elementos finitos y así pasarlo al modelo real.

En los elementos finitos dado que se trabaja la zona plástica se enfatiza en [14] procedimientos iterativos dentro de un incremento de carga particular, donde es importante siempre calcular el cambio de tensión correspondiente al cambio total de los parámetros de desplazamiento, y por lo tanto, de la deformación que se acumula en todas la iteraciones previas a las iteraciones siguientes, lo cual es de vital importancia dado que el desplazamiento de estas iteraciones siguen diferentes trayectorias de deformación, generando cambios de signos de tensión y descargas elásticas dadas, en estas circunstancias se debe integrar las tensiones $E\epsilon$, para este comportamientos elasto-plastico D_{ep}^* el cual depende del esfuerzo, endurecimiento y desplazamientos correspondiendo a un incremento lineal $\Delta\epsilon_n^i$.

$$\Delta\sigma_n^i = \int_0^{\Delta\epsilon_n^i} D_{ep}^* d\epsilon \quad (4)$$

En el experimento se adoptó procedimiento de integración llamado método explícito Ec. 5, donde se utiliza el método de integración directa o bien el método de Runge-Kutta. En el primero, el incremento conocido $\Delta \varepsilon_n^i$ se subdivide en K intervalos y la y la integral de la Ec. (2) se reemplaza por un sumatorio, escribiéndose.

$$\Delta \sigma = \sum_{l=0}^k \frac{{}^{l-1}D^* \Delta \varepsilon}{k} \quad (5)$$

Donde D^* es la matriz tangente, ${}^{l-1}D^*$ implica la evaluación de D^* para los esfuerzos y endurecimientos en L-1, este procedimientos es conocido como sub-incrementación.

La precisión de este método aumenta con el numero utilizados de K. esta integración genera un cambio de tensión que separa un cierto margen de la superficie de fluencia. En el caso de plasticidad donde la superficie es un límite se hace un escalonado proporcional de las tensiones, para obtener tensiones que están en el límite de fluencia.

En el caso donde se encuentran deformaciones, endurecimiento y fricción el método de Runge-Kutta proporciona un procedimiento explícito de mayor precisión, donde se aplican primero incrementos de $\Delta \varepsilon/2$ en un único paso y de forma explícita [14], donde se obtiene la Ec. (6).

$$\Delta \sigma^{1/2} = D_0^* \frac{\Delta \varepsilon}{2} \quad (6)$$

Dando uso a la matriz elasto-plastica inicial, este incremento de tensión se evalúa para calcular ${}^{1/2}D^*$ y finalmente se obtiene la Ec. (7), que tiene un proceso de precisión de segundo orden, el cual puede dar una estimación de error de la forma Ec. (8).

$$\Delta \sigma = {}^{1/2}D^* \Delta \varepsilon \quad (7)$$

$$\Delta \sigma - 2\Delta \sigma_{1/2} \quad (8)$$

Si este error aumenta superando la norma, el tamaño del incremento se puede modificar y pasar este cálculo explícito a varios pasos.

Este modelo explícito se utilizó en el programa ANSYS donde se aplicaron las propiedades del material, presiones de máquina, tamaño de blanco y coeficiente de fricción usado procesos de conformado con coeficiente de 0.125.

3 RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de la simulación por el método de elementos finitos (figura 1) indican que se pueden generar aproximaciones similares a las pruebas físicas, donde las prueba muestran reales diferencias en el eje Z un desplazamiento de 1.2mm y por el método de FEM 1.0mm donde estas respuestas corresponde al “springback” debido a la orientación de la posición de la lámina en la matriz.

Los resultados obtenidos por medio experimental y FEM muestran concordancia entre sí, dado que además de analizar la recuperación elástica y anisotropía, también pueden ser comparados los adelgazamientos generados por la conformación de la pieza, que ha sido endurecida en las zonas

que han alcanzado una mayor tensión debido al trabajo que experimenta el material en las zonas de mayor deformación.

Es interesante como el efecto “*Bauschinger*” aparece en el momento de cada carga y descarga de tensión en el material, cuando este es sometido al proceso de conformación en las prensas de estampado, que retiran la presión de conformado después de definir la geometría de la lámina metálica [15], lo cual afecta el material para que este se comporte elásticamente, a diferencia de la experimentación real el método FEM durante los incrementos de tensiones, la deformación plástica no llega a la superficie de fluencia debido a que es retirada la carga donde el incremento elástico de tensión no tiene fluencia y pasa a un comportamiento elástico lineal[12].

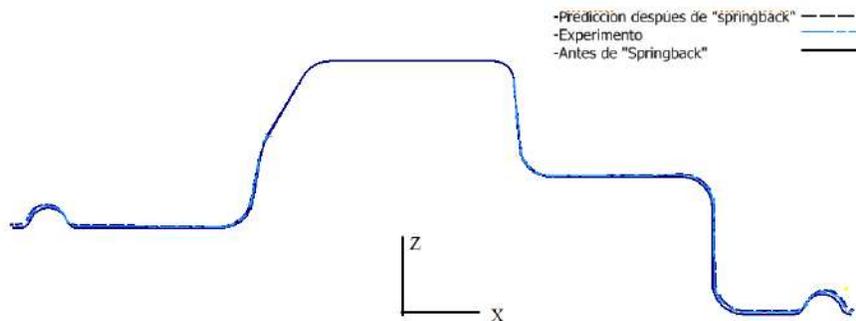


Figura 1. Comparación de recuperación elástica Experimento-Simulación por FEM.

4 CONCLUSIONES

En la conformación de láminas es importante analizar la anisotropía plástica, ya que de esto depende que los materiales se deformen mejor y que tengan mayor resistencia a la tracción según el sentido de laminación y por lo tanto el material tendrá una mayor “*Springback*”. También se puede concluir que la orientación del material en cero grados con respecto a la zona de la geometría con formas más pronunciadas y profundas de la pieza analizada, fluyo mejor que con orientación a 90 grados, ya que con la orientación a 90 grados se generaban fisuras en la zona de los radios del macho de troquel. Es importante evidenciar el efecto “*Bauschinger*” en el momento de cada carga y descarga de tensión en el material, cuando este es sometido al proceso de conformación en las prensas de estampado.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo económico a este trabajo a través del proyecto 14044.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Gedney R, Guide to testing metals under tension. Advanced Materials and Processes, 160 (8), 33-36, 2002.
2. Miles MP, Siles JL, Wagoner RH, Narasimhan K, Metall. Trans., 24A(5), 1143-1151, 1993.

3. William F. Hosford., RobertM. Caddell, Metal Forming, Mechanics and Metallurgy, 3 ed, Cambridge University Press, 208-260, (2007).
4. John A. Schey., Procesos de Manufactura, McGraw-Hill, tercera edicion, 412, 2000.
5. Rahul K. Verna, A. Haldar, Effect of normal anisotropy of springback, J. Mater Process Technol., 190, 300–304, (2007).
6. M. Sunseri, J. Cao, A.P. Karafillis, M.C. Boyce, Accommodation of springback in channel forming using active binder force control: numerical simulations and experiments, J. Eng. Mater Technol., Trans. ASME 118, 426–435, (1996).
7. S.W. Lee, D.Y. Yang, An influence of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal forming process, J. Mater Process Technol. 80-81, 60–67, (1998).
8. Wang Lin, Tai-Chui, Lee, “Process modeling of targeted Control Forming of sheet materials”, The Hong Kong Polytechnic University, department of industrial and systems engineering, pp 145-148, 2006.
9. ASTM E 517-00 “Standard Test for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal”, “American Society for Testing Materials”, 2000.
10. ASTM A568/A 568M-07 “Standard Test for Steel, Sheet, Carbon, Structural, and High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled and Cold-Roller, General Requirements for”, “American Society for Testing Materials”, 2008.
11. ASTM E 646-00 “Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials”, “American Society for Testing Materials”, 2000.
12. ASTM E 2218 – 02 “Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves”, “American Society for Testing Materials”, 2002.
13. José F. Diaz C., R Rodríguez Baracaldo., Análisis mediante elementos finitos de los frenos de conformado en la fabricación de una pieza automotriz, VI Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, IV de Ingeniería Mecatrónica, y IV Congreso Internacional de Materiales Energía y Medio ISSN 2344-7311, 68, (2013).
14. Zienkiewicz C. O. and Taylor R. L. El método de los elementos finitos, Cuarta Edición, Volumen 2. Barcelona, España. McGraw Hill. 1994.
15. Dieter J., Mechanical Metallurgy, 2 ed, Mc Graw Hill, 751, (1988).