

# Aplicación del modelo de Hosford-Caddel en para la estimación de la recuperación elástica de láminas metálicas conformadas en frío

## Jorge González Coneo

Msc. Ing. Mecánica.  
Docente tiempo Completo Universidad de la Costa, CUC.  
jgonzalez@cuc.edu.co

## Jose Ahumada Villafañe

Ingeniero Civil.  
Docente tiempo completo Universidad de la Costa, CUC.  
jahumada4@cuc.edu.co

## Heriberto Maury Ramirez

PhD. Ing. Mecánico.  
Docente Tiempo completo Universidad del Norte.  
hmaury@uninorte.edu.co

Recepción: 2012 - 06 - 06 | Aceptación: 2012 - 11 - 08

### Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo.

González, C. Jorge., & Ahumada, V. Jose., & Maury R, Ramirez (2013). Aplicación del modelo de Hosford-Caddel en para la estimación de la recuperación elástica de láminas metálicas conformadas en frío. *Ingenio Magno*. Vol 4, pp. 6-10

**Resumen** — La recuperación elástica es un fenómeno que produce una variación en la configuración final de un elemento conformado en frío debido a la desaparición del componente elástico de la deformación alcanzada durante el proceso. El presente trabajo muestra cómo, mediante el uso de un modelo elastoplástico, se puede predecir de forma aproximada la recuperación elástica que alcanzará el material luego de un proceso de doblado de láminas o de placas. El modelo de recuperación empleado es el de Hosford-Caddel y se utilizaron datos de la Dra. María Luisa García Romeu, de la Universidad Politécnica de Valencia para su validación.

**Palabras Clave** — Deformación plástica, doblado de láminas, modelos elastoplásticos, recuperación elástica.

**Abstract** — Springback phenomenon causes a variation in the final configuration of a cold-formed element because the elastic component of deformation disappears during the process. This paper shows how the springback reached by a material after a bending process of sheets or plates can be approximately predicted with an elastoplastic model. The Hosford-Caddel model was used as recovery model and the data given by Dr. María Luisa García Romeu from the Polytechnic University of Valencia was used for the model validation.

**Keywords** — Bending of sheet, elastoplastic models, plastic deformation, springback.

## 1. INTRODUCCIÓN

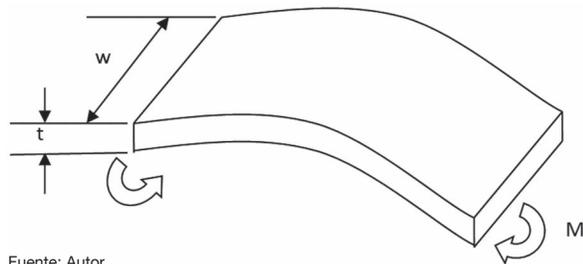
Existe una gran gama de procesos de fabricación en los que se requiere llevar al material a condiciones en las que se supera su esfuerzo de fluencia, es decir que este alcance la zona donde su comportamiento plástico. El doblado de láminas, planchas, platinas es uno de estos procesos en los que mediante la acción de un punzón, un troquel o una matriz se inducen momentos flectores que generan la deformación de la pieza. Al retirar la carga el material sufre una recuperación elástica, que hace que la deformación final alcanzada por el material sea inferior a la máxima deformación obtenida durante la aplicación de la misma. A este fenómeno se le conoce como Springback.

En la conformación de diferentes elementos o en el doblado de láminas, se requiere determinar, con un cierto nivel de precisión, la configuración geométrica que se va alcanzar. La cual puede desviarse en gran medida de lo esperado debido al fenómeno de la recuperación elástica mencionado, por lo cual es deseable contar con herramientas que permitan determinar la relación entre los parámetros del proceso y la recuperación que sufre el material.

## 2. DESARROLLO

### 2.1 MODELOS DE RECUPERACIÓN

En general, el doblado de la lámina o de la chapa (figura 1) se consigue mediante la aplicación de momentos flectores sobre la misma, generando que unas zonas del material se encuentren tensionadas y otras comprimidas tal como puede leerse en [1].



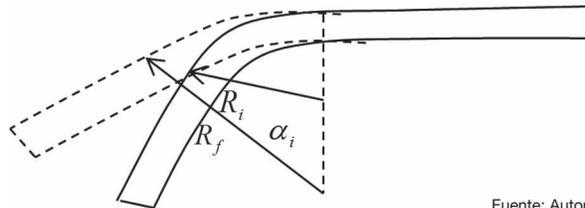
Fuente: Autor

Figura 1: Doblando de láminas

Por otra parte, la recuperación elástica es el fenómeno por el cual el material retorna parcialmente a su forma original cuando la herramienta formadora es retirada de la pieza (ver figura 2). Esta recuperación se mide como la variación del ángulo comprendido entre la parte doblada en relación con el ángulo producido por herramienta [2]. Es decir el ángulo alcanzado durante el proceso de doblado y el ángulo final adquirido por la pieza al retirar la carga.

El fenómeno de la recuperación elástica ha sido abordado por diversos autores (ver referencias bibliográficas), quienes han propuesto diferentes modelos analíticos, numéricos y experimentales para tratar de predecir la respuesta del material en diferentes situaciones de carga, que tienen validez dentro de ciertos rangos y bajo ciertos supuestos. Sin embargo, a pesar de los diferentes enfoques y el uso de diversos tipos de tecnologías para el análisis de estos procesos, no existe un consenso general sobre el uso de las mismas. Algunas de las soluciones requieren del uso de instrumentación sofisticada y técnicas avanzadas de control lo que las convierte en engorrosas para su aplicación y otras no son lo suficientemente precisas para justificar su aplicación. Este trabajo ofrece un cuadro comparativo entre algunos modelos de recuperación elástica.

Para el desarrollo de este trabajo se emplearon datos recolectados por la Dra. María Luisa García-Romeu en su trabajo doctoral, correspondientes al doblado de láminas de acero inoxidable ASTM A-304, y a partir de éstos se determina su modelo elastoplástico potencial. Con esta información, el modelo elastoplástico se aplicaron las expresiones para el cálculo de la recuperación elástica.



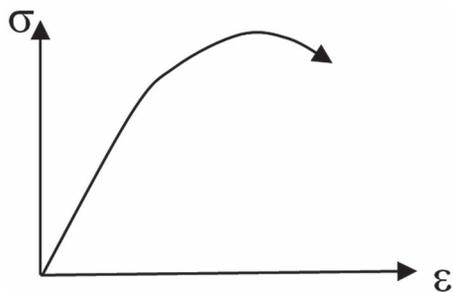
Fuente: Autor

Figura 2. Recuperación elástica

En la formulación de modelos para el proceso de conformación plástica de láminas y de recuperación elástica se deben asumir hipótesis tales como: el eje neutro permanece invariable y coincide con el centroide de la sección, las secciones normales a la superficie de la lámina y paralelas al eje de doblado permanecen así durante el proceso, los esfuerzos transversales no son significativos por lo que se pueden omitir y algunas otras. Estas hipótesis, son aproximaciones al comportamiento real del material y simplifican los modelos empleados para el estudio de los mismos.

La formulación del modelo de recuperación elástica depende en gran medida del modelo elastoplástico del material ante la aplicación de cargas. Estos modelos elastoplásticos son ecuaciones o descripciones matemáticas (basadas en principios de teoría de la elasticidad, teoría de la plasticidad, medios continuos,...), que describen la respuesta macroscópica de los materiales debido a su constitución o estructura interna de los mismos [Meyers, 3]. En este trabajo se utiliza el modelo elastoplástico con endurecimiento no lineal, por ser el que más se asemeja al comportamiento de la mayoría de los metales dúctiles.

La consideración principal en este comportamiento es que el material sufre un endurecimiento el cual no varía linealmente con la deformación unitaria del material.



Fuente: Autor

Figura 3. Modelo elastoplástico con endurecimiento no lineal

El estudio del fenómeno de springback o recuperación elástica, bajo un enfoque analítico se desarrolla teniendo en cuenta las relaciones constitutivas del material, el estado tensional alcanzado y su relación con la distribución de deformaciones se obtiene la forma como se espera varíe el ángulo de doblado.

Por otra parte se encuentran los modelos analíticos, buscan expresiones generales que puedan ser aplicables con el conocimiento de un número relativamente pequeño de parámetros y que brinde la confiabilidad necesaria para ser aplicados. En General, la recuperación elástica se calcula aplicando la expresión mostrada:

$$\Delta\theta = \theta_i * \left( \frac{R_i}{R_f} - 1 \right) \quad (1)$$

Donde  $R_i$  y  $R_f$  son los radios de curvatura de la lámina durante el doblado y luego de retirada la carga.

El modelo de Hosford- Caddel, propone un modelo de recuperación basado en un comportamiento elastoplástico con endurecimiento potencial del material. Su expresión para la variación del radio de doblado es la que se muestra a continuación:

$$\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f} = \left( \frac{6}{2-n} \right) \left[ H \cdot \left( \frac{4}{3} \right)^{\frac{n+1}{2}} \frac{(1-\vartheta^2)}{E \cdot t} \right] \left( \frac{t}{2R_i} \right)^n \quad (2)$$

Donde  $H$  y  $n$  son la constante y el exponente de endurecimiento del material.  $E$  corresponde al Módulo de elasticidad,  $t$  es el espesor y  $\nu$  es el módulo de Poisson.

Reemplazando en la expresión para el ángulo de recuperación se convierte en:

$$\Delta\theta = \theta_i \cdot \left( \frac{6}{2-n} \right) \left[ H \cdot \left( \frac{4}{3} \right)^{\frac{n+1}{2}} \frac{(1-\vartheta^2)}{E \cdot t} \right] \cdot R_i \left( \frac{t}{2R_i} \right)^n \quad (3)$$

## 2.2 Caracterización del Material

En el trabajo de la Dra. María Luisa García Romeu, se realiza un análisis del proceso de doblado para muestras de acero ASTM -A304 y para probetas de aluminio. Para fines de este trabajo se utilizan los datos del acero especificado. Con los datos suministrados en este trabajo se obtuvo un modelo polinomial del comportamiento elastoplástico y se comparó con el modelo potencial utilizado por la Dra. y no se encontraron diferencias significativas entre los resultados obtenidos.

A continuación se muestra la tabla de datos utilizada y el modelo.

Tabla 1. Modelo Polinomial datos García-Romeu

$\epsilon$ (mm/mm)	$\sigma$ (MPa)	$\sigma$ Modelo pol. (MPa)	Desv (%).
0,025	400	405,9	1,5
0,050	465	463,9	0,2
0,075	525	518,2	1,3
0,10	575	569,1	1,0
0,125	620	617,1	0,5
0,150	652	662,3	1,6
0,175	700	705,2	0,7
0,200	750	746,1	0,5
0,225	785	785,3	0,0
0,250	825	823,1	0,2
0,275	860	859,9	0,0
0,300	895	896,0	0,1
0,325	930	931,7	0,2
0,350	965	967,4	0,2
0,375	1002	1003,4	0,1
0,400	1050	1039,9	1,0
0,425	1080	1077,4	0,2
0,450	1110	1116,2	0,6
desv.prom (%)			0,4

La ecuación que expresa la zona curvilínea del material es:

$$\sigma_v = 3506,9\epsilon^3 - 3458,3\epsilon^2 + 2562,2\epsilon + 343,99 \quad (4)$$

El  $R^2=0,999$ , por lo que se concluye un ajuste muy bueno entre los datos del modelo y los valores medidos.

Los datos del modelo potencial fueron tomados del trabajo del autor mencionado.

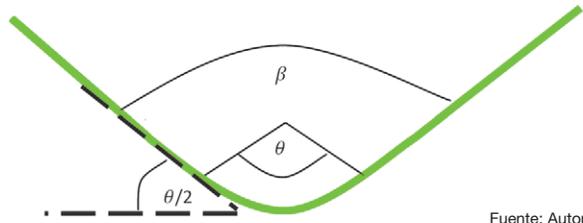
$$\sigma = 1490MPa \cdot \epsilon^{0,419} \quad (5)$$

Para fines del trabajo se utilizó el modelo potencial, debido a que es más simple que el polinomial. Al reemplazar en

el modelo de Hosford-Caddel se observó que las curvas de recuperación elástica contra ángulo interno de doblado se sobreponen (esta figura no está incluida en este documento), por lo que se utilizó el modelo potencial como referencia, debido a que es más simple.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4. Puede observarse el ángulo interno de doblado ( $\theta$ ) y el ángulo externo ( $\beta$ ), a los que hacen referencia los datos consignados en la tabla y que son utilizados en el modelo.



Fuente: Autor

Figura 4. Ángulos de doblado

En la tabla 2 están los datos experimentales obtenidos por la Dra. García-Romeu. Adicionalmente se encuentran los resultados obtenidos al reemplazar los valores reales dentro del modelo Hosford-Caddel.

Tabla 2. Comparación modelos de recuperación

	Ángulo externo (°)	Ángulo de Recuperación (°)	Ángulo interno Inicial (°)	Ángulo interno Final (°)	Error respecto a los datos experimentales (%)
Hosford Caddel	161,59	4,13	18,41	14,28	9,19
	143,68	3,67	36,32	32,65	1,30
	127,07	3,24	52,93	49,69	3,37
	112,27	2,87	67,73	64,86	1,84
Datos García-Romeu	161,59	5,33	18,41	13,08	
	143,68	3,24	36,32	33,08	
	127,07	1,51	52,93	51,42	
	112,27	1,644	67,727	66,083	

El modelo de recuperación de Hosford, muestra que entre mayor sea la severidad del doblado, mejor es el grado de ajuste.

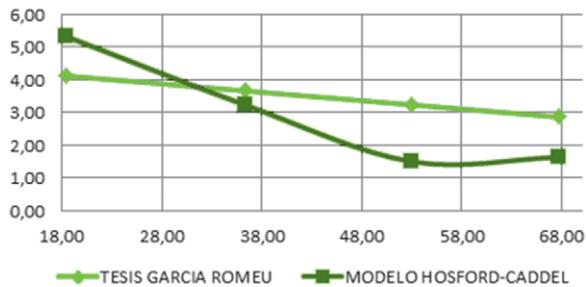


Figura 5. Recuperación elástica - ángulo de doblado interno

El modelo de Hosford muestra una relación lineal inversa entre el nivel de doblado y el nivel de recuperación. A mayor severidad de doblado se espera una menor recuperación. Por otro lado, en los resultados obtenidos por García-Romeu, aunque muestran una relación inversa, inicialmente lineal, éste comienza a estabilizarse. Se requeriría probar con ángulos de doblado internos más altos para poder establecer si la recuperación tiende a volverse constante o no.

A partir de la figura 6 puede inferirse que el método de Hosford tiende a sobreestimar el grado de recuperación, lo cual repercute en que sobrepasamos el nivel requerido. La figura 6, permite ver más claramente la relación existente entre el ángulo de doblado inicial y el ángulo de recuperación elástica.

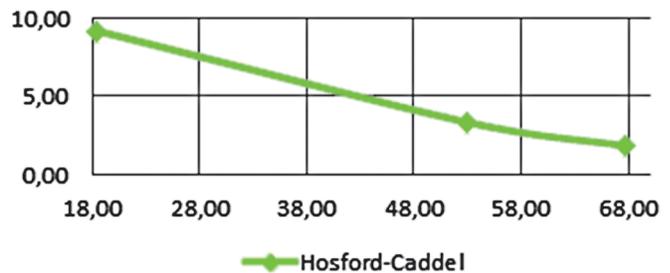


Figura 6. Desviación del modelo de recuperación elástica.

En la figura 6 puede verse que entre mayor sea el ángulo de doblado, mejor es el grado de ajuste del modelo de recuperación elástica.

## 4. CONCLUSIONES

Este trabajo se fundamentó en el uso del modelo de Hosford-Caddel para la predicción del grado de recuperación elástica esperado en un proceso de doblado al aire de una chapa, placa o de una platina. Se encontró que este modelo tiene una menor desviación respecto a medida que se incrementa el nivel de doblado. Esto es muy importante, debido a que permitirá obtener un mayor control sobre el proceso de doblado.

Para ángulos pequeños, el modelo es conservador y predice una recuperación menor a la obtenida, pero para mayores valores del ángulo de doblado, sobreestima el valor de la misma.

El modelo de recuperación elástica mostrado requiere para su implementación de la determinación del modelo elastoplástico del comportamiento del material. Este es el insumo para poder emplear el modelo de Hosford-Caddel.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

1. Kalpakjian, S. (Ed). (2002). Proceso de forjado de hojas o láminas metálicas. Manufactura: Ingeniería y tecnología, pp 407-410. México. Pearson.
2. Marciniak, Z. (2002). Bending of Sheet. Mechanics of Sheet Metal Forming. pp. 82-107. Oxford. Butterworth-Heinemann.
3. Meyers, M (Ed). (2009). Plasticity. Mechanical Behaviour of Materials. pp. 163-209. Cambridge, Cambridge University Press.
4. Appiah, E et al. (2004). A new constitutive model for prediction of springback sheet metal forming. Material processing and design: modeling, simulation and applications, numiform. pp. 1651-1657.
5. Wagoner, R. (2005). Advances in springback. American Institute of physics, numisheet. pp. 209-216.
6. Oliveira, M et al. (2005). Study on the influence of the work hardening models constitutive parameters identification in the springback prediction. American institute of physic, numisheet, pp. 253-258.
7. Torres, M. et al. (2000). Análisis de las curvas esfuerzo-deformación de un acero 1040 mediante la ecuación de Voce. Revista latinoamericana de metalurgia y materiales. vol. 20, nº 2, pp. 24-32.
8. Garcia-Romeu, M. L. (2005). Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapas: modelo de predicción del ángulo de recuperación y del radio de doblado final, Disertación doctoral, Dpto. Ingeniería mecánica, universidad de Girona, Girona.
9. J. Wang (2008). «Springback control of sheet metal air bending process,» Journal of manufacturing processes, vol. 10, pp. 21-27.
10. Abdullah, A et al. (2012). A comprehensive review of experimental approaches used in the measurement of springback. Advances in natural and applied sciences. vol. 6, nº 2, pp. 195-205.
11. Klemola, H y Nifminen, M. (1974). On the strain-hardening parameters of metals. Metallurgical transactions. vol. 5, pp. 1863-1866.
12. Aguiar, J. (2001). Sheet bending theory applied to three roll process. 1er Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricacao, Curitiba.
13. Lubliner, J. (2006). Plasticity theory. Elastic-plastic bending, Berkeley. Pearson. pp. 229-245.
14. Xio, H et al. (2006). Elastoplasticity beyond small deformations. Acta Mechanica. Bochun, Springer-Verlag. pp. 31-111.
15. Rees, D. (2007). Descriptions of reversed yielding in bending. Journal of mechanical engineering sciences. vol. 221, nº c, pp. 981-992.
16. Yi, H. (2008). Analytical prediction of springback based on residual differential strain during sheet metal bending. Journal of mechanical engineering scienc. vol. 222, nº c, pp. 117-129.
17. Dariani, B. (2008). A new approach for inverse analysis of springback in sheet bending process. Journal on engineering manufacture. vol. 222, nº B. pp. 1363-1374,
18. Panthi, S y. Ramakrishnan, N. (2011). Semi analytical modeling of springback in arc bending and effect of forming load. Transaction of nonferrous metals society of china. vol. 21, pp. 2276-2284.