

Bottoming bending process assisted by electroplasticity

Antonio J. Sánchez Egea^a, Hernán A. González Rojas^a, Diego J. Celentano^b,
J. Antonio Travieso Rodríguez^a, Jordi Llumà i Fuentes^a

^a*EUETIB, URT DEFAM, Universitat Politècnica de Catalunya*

^b*Departament of Mechanical and Metallurgical Engineering,
Pontifical Catholic University of Chile.*

Resumen

Este estudio reporta la influencia de los efectos atérmicos de la electroplasticidad en el proceso de doblado por estampa. Se fabrica un generador que genera pulsos de 300A y un ancho de 50 μ s. Los materiales estudiados fueron Al1050 y X5CrNi18-10. Se realizó un análisis por elementos finitos para caracterizar las diferentes fases del comportamiento mecánico de las probetas durante el proceso. Se estudió el efecto que tienen los pulsos de corriente sobre las fases mencionadas, prestando especial atención a las de recuperación elástica y la de máxima deformación plástica. Los resultados muestran que en el proceso asistido eléctricamente se reducen las fuerzas de doblado, hasta en un 18% en el aluminio y un 6% en el acero inoxidable. Además se observa que se reduce la recuperación elástica del material en un 21% y un 12% respectivamente. Se concluye que los efectos atérmicos de la electroplasticidad influyen en el proceso estudiado.

Palabras Clave: electroplasticidad, corriente, recuperación elástica, doblado.

Abstract

The present study reports the influence of electroplasticity athermal effects on bottoming bending. To do so a short-time current pulse generator, capable of inducing 300A current pulses and a 50 μ s pulse duration, was manufactured. The materials studied were Al1050 and X5CrNi18-10. A finite element analysis was done in order to characterize the different phases of specimen mechanical behavior during bottoming bending. The influence of current pulses on different phases was studied, specifically on the elastic restoring force and the maximum plastic deformation phases. The results show that, compared to the conventional process, during the electrically-assisted process bending forces drop up to 18% in aluminium and 6% in stainless steel. The elastic restoring force is also reduced by 21% and 12% respectively. Therefore it can be concluded that the electroplasticity athermal effects have an influence on the bottoming bending process.

Keywords: electroplasticity, current pulse, elastic restoring force, bottoming bending.

1. Introducción

El fenómeno de la electroplasticidad fue definido por Troitskii y Likhtman (1963) y posteriormente probado por A. Troitskii (1969), cuando estaba investigando la influencia de la corriente eléctrica en el comportamiento durante la deformación plástica de un material.

Este fenómeno tiene ligado efectos térmicos y no térmicos, estos efectos fueron probados cuando un campo eléctrico es inducido a través de un material metálico. Conrad (2000) y Conrad (2001) demostró que la electroplasticidad promueve el arrastre de las dislocaciones al espacio intersticial entre los granos de la matriz estructural del material. Kravchenko (1967) estudio que el movimiento de dislocaciones avoca a la modificación de la matriz estructural, haciendo que varíen las dimensiones de los huecos intersticiales. Probándose que esta variación de la matriz estructural conlleva cambios en las propiedades mecánicas del material.

La etiología física del fenómeno de electroplasticidad no está completamente definida. Aunque estudios empíricos como los realizados por Sprecher et al. (1986) y Stanton et al. (1994) muestran que diferentes parámetros, como la densidad de corriente, duración del pulso y frecuencia de los pulsos influyen en la resistencia del material a ser deformado. Dichos parámetros no explican los complejos cambios metalúrgicos de la matriz, tampoco el cambio del comportamiento mecánica del material bajo la influencia del campo eléctrico.

Algunos autores han realizado modelos teóricos que intentan dar una explicación al principio físico de la electroplasticidad, concretamente a los efectos no térmicos. Los modelos más referenciados son la teoría del “electro wind” descrito por Kravchenko (1966), el cual se basa en la difusión atómica. Y el modelo de campo magnético desarrollado por Molotskii and Fleurov (1995), campo que genera fuerzas tangenciales en el material, las cuales favorecen al movimiento de las dislocaciones. Si bien ambos modelos son muy referenciados, están lejos de poder definir completamente el comportamiento de los materiales bajo la influencia de los efectos no térmicos de la electroplasticidad.

Diferentes publicaciones experimentales han demostrado que la electroplasticidad tiene un potencial directo en la industria como se recoge en el review realizado por L. Guan et al. (2010). La electroplasticidad es una herramienta idónea para asistir procesos convencionales de conformado por deformación plástica o arranque de viruta. El interés sustancial de esta nueva técnica es poder modificar las propiedades del material mientras es procesado. Por ejemplo, Zhang et al. (2002) probó que la tensión de fluencia disminuía, Stolyarov (2009) investigó que la tensión última de ruptura disminuía mientras que la ductilidad aumentaba, Xu et al. (2007) estudió el cambio de la microestructura y Tang et al. (2000), observó que la elongación aumentaba.

Dichos autores han demostrado que los esfuerzos necesarios para producir una deformación plástica, disminuyeron cuando se aplica una corriente sobre el material. Las variaciones que experimentan las propiedades: tensión de fluencia, tensión última de ruptura, ductilidad y elongación, están estrechamente relacionadas con el tipo de material, cantidad de deformación plástica acumulada y la intensidad de corriente que fluye por el material.

Los trabajos previos de doblado asistidos eléctricamente han combinado los efectos térmicos y no térmicos acoplados en el fenómeno de la electroplasticidad, como los ensayos de doblado de chapa convencional realizados por Salandro (2010), los ensayos de doblado de chapa con tracción realizado por Jones and Mears (2010) y el trabajo de la recuperación elástica de chapa metálicas previamente dobladas realizado por Green (2009). Dichos autores utilizaron pulsos de entre 1 y 4s y densidades de corriente entre 10 y 90A/mm², lo que produce un aumento de la temperatura en la chapa entre los 100 y 400°C.

En este artículo se estudia el proceso de doblado de chapa asistido por pulsos de alta densidad de corriente, atendiendo especialmente al efecto no térmico de la electroplasticidad. Para ello se induce un campo eléctrico a través de diferentes probetas metálicas planas, mientras se le realiza un proceso de doblado por estampación. Se miden las fuerzas de doblado, determinado con ello la variación que experimentan las fuerzas producto de la aplicación de los pulsos de corriente. Con el propósito de centrarse en los efectos no térmicos, un nuevo generador de micro pulsos de corriente fue diseñado y fabricado. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo será analizar el impacto de los efectos no térmicos durante el proceso de doblado con estampa asistido eléctricamente, para aleaciones de aluminio 1050 y aceros inoxidables X5CrNi18-10.

2. Metodología

2.1 Generador de micro pulsos de corriente

Un generador de micro pulsos de corriente se ha sido fabricado para minimizar los efectos térmicos en la probeta durante el proceso de doblado asistido eléctricamente. El generador dispone de dos circuitos: el circuito principal y el circuito de control de los pulsos de corriente.

El circuito principal se encarga de inducir la intensidad de corriente a la pieza de trabajo mediante la descarga de un condensador. Las descargas eléctricas están controladas por un tiristor de silicio, el que da inicio al pulso de corriente que circula por el material. El tiempo de descarga o duración del pulso, se define por el circuito en serie RLC. La bobina o choque utilizado es para limitar la deriva de la corriente y no dañar el tiristor.

En la parte izquierda de la figura 1 se puede ver el esquema general de los principales componentes del generador de pulsos de corriente. En la parte derecha de la figura 1 se muestra la forma del pulso de corriente que pasa a través del material.

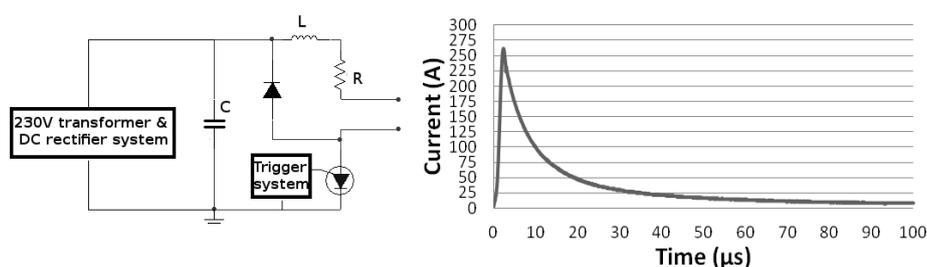


Figura 1. Generador de micro pulsos de corriente

El circuito de disparo (Trigger) controla la frecuencia de los pulsos de corriente inducidos. Dicho circuito es un oscilador hecho con un transistor unión programable (PUT), que trabaja como un oscilador de relajación. Las características de los pulsos de corriente son: periodo aproximado de 50 μ s, rango de frecuencias desde los 75Hz a los 250Hz y una intensidad máxima de corriente de 300A. Parámetros con magnitudes similares de pulsos de corriente fueron usados para evaluar la influencia de la electroplasticidad en el proceso de laminado asistido por electricidad, G. Tang (2007).

2.2 Configuración experimental

La composición química de los dos materiales comerciales investigados son aluminio 1050 (0.05 wt.% Cu, 0.25 wt.% Si, 0.4 wt.% Fe, 0.05 wt.% Mn, 0.07 wt.% Zn, 0.05 wt.% Ti, balance Al) y acero inoxidable X5CrNi18-10 (0.05 wt.% C, 1.97 wt.% Mn, 8.31 wt.% Ni, 18.38 wt.% Cr, 0.22 wt.% Mo, 0.32 wt.% Cu, 0.048 wt.% N, 0.005 wt.% S balance Fe). La dimensión de las láminas metálicas y la densidad de corriente inducida están representadas en la tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones de las probetas (L=longitud, W=ancho y T=espesor) y densidad de corriente pico transmitida

Material	L (mm)	W (mm)	T (mm)	Frequency (Hz)	Peak current density (A/mm ²)
1050 aluminio	120	32	0.5	100	17.2
				200	15.9
	130	30/20/10		100	17.6 / 26.5 / 53
				200	17 / 25.5 / 51
X5CrNi18-10 stainless steel	130	25 / 19 / 14 / 9	1	100	11 / 14.6 / 19.6 / 30.5
				200	10.6 / 13.4 / 18.9 / 29.4

Una matriz de nylon tipo V de 90° con una punta de 3mm de radio fue usada como estampa en el proceso de doblado. La operación de doblado fue realizada por una máquina de tracción universal

Micro Test EM1/20/FR, con una velocidad de 162mm/min. Dos células de carga fueron usadas de la casa HBM, modelos S9M/500N y S9N/2KN con un rango de escala de 500N y 2KN respectivamente. Una cámara termográfica fue usada para estudiar las variaciones de temperatura. Los efectos de la electroplasticidad fueron registrados de forma continua durante el ensayo de doblado por estampa, para ello se usó una tarjeta de adquisición de datos, Spider 2030, con una frecuencia de muestreo de 600Hz. Una ilustración esquemática del proceso de doblado por estampa asistido por electricidad ha sido representada en la figura 2.

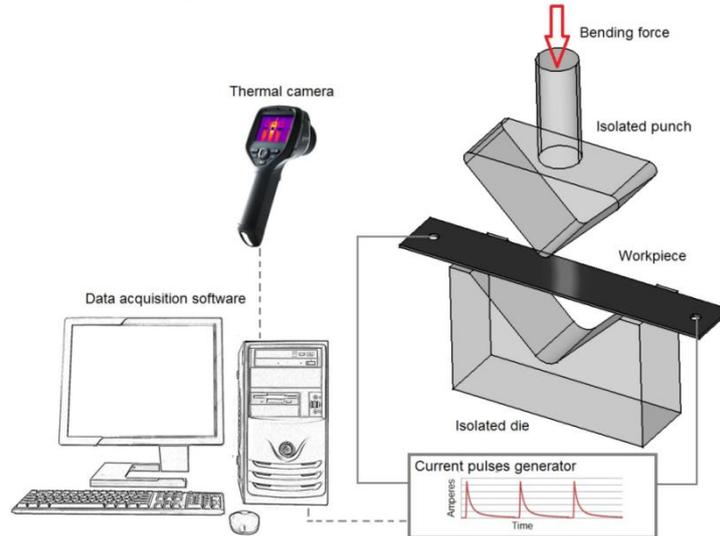


Figura 2. Esquema del proceso de doblado de chapa en matriz

2.3 Comportamiento térmico

La variación térmica del material fue determinada para saber si el efecto Joule es significativo. Como la temperatura depende directamente de la energía eléctrica consumida, el flujo de calor se estimara de la señal eléctrica de los pulsos de corriente inducidos durante el proceso de doblado. La forma de la intensidad de corriente y la tensión (voltaje), aplicada a la probeta de acero inoxidable X5CrNi18-10, son mostrados en la figura 3. La potencia media de dicho pulso es 0.29Ws.

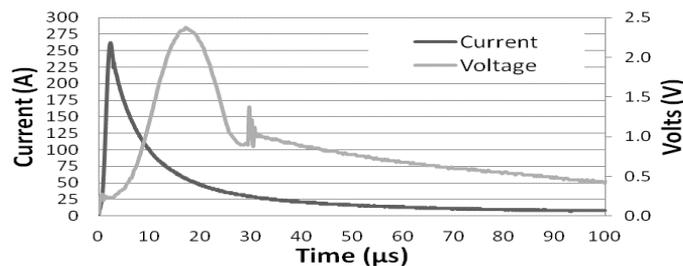


Figura 3. Señal eléctrica de un pulso de corriente

Las probetas a las que se le indujo la corriente eléctrica, no presentaron una variación térmica significativa durante el proceso de doblado por estampa. La temperatura estimada con un modelo adiabático, muestra que la variación de la temperatura debido al calor generado por el flujo eléctrico es de 5.8°C. La variación de la temperatura en la pieza será siempre menor que la estimada con el modelo adiabático, debido a la disipación del calor por conducción y convección natural.

Por otra parte, la cámara termográfica que tiene una sensibilidad inicial de 2°C, no fue capaz de registrar ninguna variación de temperatura, debido probablemente a que la variación temperatura de la probeta está por debajo de la sensibilidad. Se puede concluir que el efecto Joule es poco

significativo, debido principalmente a que el ancho de los pulsos de corriente son del orden de μs y la frecuencia empleada en los experimentos está por debajo de los 250Hz.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos han sido divididos en la caracterización del proceso de doblado y el efecto electroplástico en las fuerzas de doblado y la recuperación elástica.

3.1 Caracterización del proceso de doblado

Para caracterizar el proceso de doblado con estampa han sido realizados ensayos experimentales y simulaciones por elementos finitos. La simulación numérica ha sido hecha para estimar la distribución de la deformación plástica en las probetas dobladas sin el efecto de la electroplasticidad.

En la figura 4, se pueden ver simultáneamente los resultados de la simulación numérica y de los experimentos hechos en una placa de aluminio de espesor 0.5mm. En dicha figura se muestran tres curvas, dos de las cuales corresponden a la fuerza de doblado aplicada a la chapa: fuerza medida línea negra y fuerza simulada línea segmentada. La tercera curva corresponde a la deformación plástica en el punto P.

La abscisa de la gráfica esta adimensionalizada de forma que en el tiempo $t^*=1$ se encuentra la máxima fuerza aplicada en al doblado. El proceso de doblado por estampa se realiza hasta dejar una cierta holgura, evitándose el contacto entre la matriz superior con la inferior. Esta holgura final es el doble del espesor de la probeta doblada.

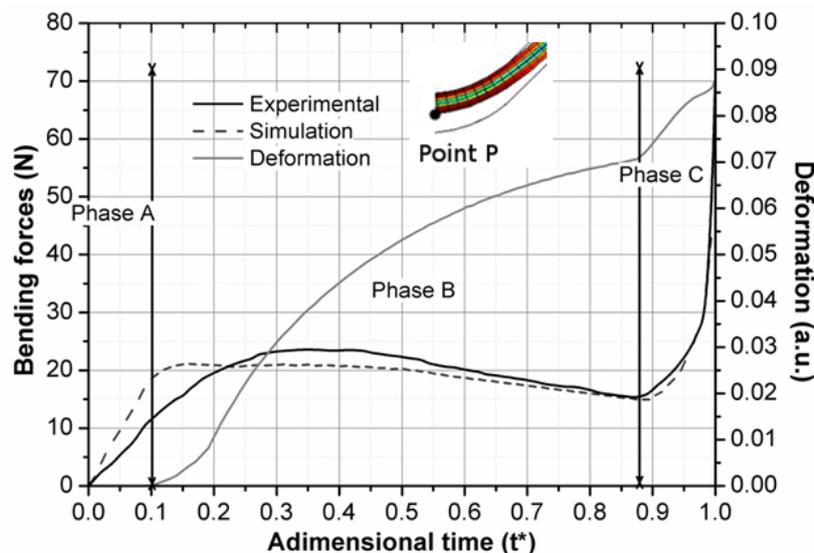


Figura 4. Caracterización del proceso de doblado en estampa

La curva gris acusa la aparición de la deformación en el doblado. Antes del tiempo adimensional 0.1 el punto P no experimenta deformación. A partir del tiempo adimensional 0.1 aparecen deformaciones considerables en el punto P y una tensión de von Mises de 143MPa, es levemente superior a la tensión de fluencia del aluminio.

Estos dos indicadores hacen pensar que ha comenzado la deformación plástica en la chapa, fase B, deformación de momento localizada en la superficie. A partir del tiempo adimensional 0.4 aparece una disminución de las fuerza de doblado, fenómeno que se debe probablemente al deslizamiento que sufre la chapa. Durante esta etapa la tensión de von Mises se mantiene prácticamente constante en el punto P, su variación es del orden de los 16MPa y se debe probablemente al endurecimiento por deformación del aluminio, que en general es pequeño.

A partir de un tiempo adimensional 0.88 la fuerza de doblado aumenta drásticamente, fase C, este es el momento en que la parte superior e inferior de la matriz se acercan sin que haya contacto en la zona cercana al punto P pero sí en el resto de la chapa. Es el momento en que la chapa tiene el mayor contacto con la matriz imprimiendo el radio de curvatura de la matriz en la chapa. Este fenómeno también se ve en el cambio de inclinación que se produce en la curva de deformación, obteniéndose con ello las mayores deformaciones halladas.

La caracterización del doblado permite definir 4 fases. La fase A está caracterizada por el acoplamiento chapa-matriz sin deformación apreciable. La fase B caracterizada por deslizamiento y la aparición de la deformación. La fase C caracterizada por una gran deformación. Por último, la fase D caracterizada por la relajación de esfuerzos.

La simulación por elementos finitos permitió determinar el comportamiento mecánica del material durante el proceso de doblado. En la figura 5 se muestra el campo de deformaciones para dos de las fases antes mencionadas, las que corresponden a un tiempo adimensional t^* igual a 0.3 y 1 respectivamente. En dicha simulación solo se consideró la mitad de la pieza debido a la simetría en el proceso de doblado.

En las simulaciones hechas se puede observar una fibra neutra ubicada en el espesor medio de la chapa, en la que no existe deformación. En cambio, en los bordes de la chapa aparecen unos valores máximos de deformación, en la cara interior de la chapa a compresión y en la cara exterior de la chapa a tracción. El campo de deformaciones presenta simetría respecto de la fibra neutra.

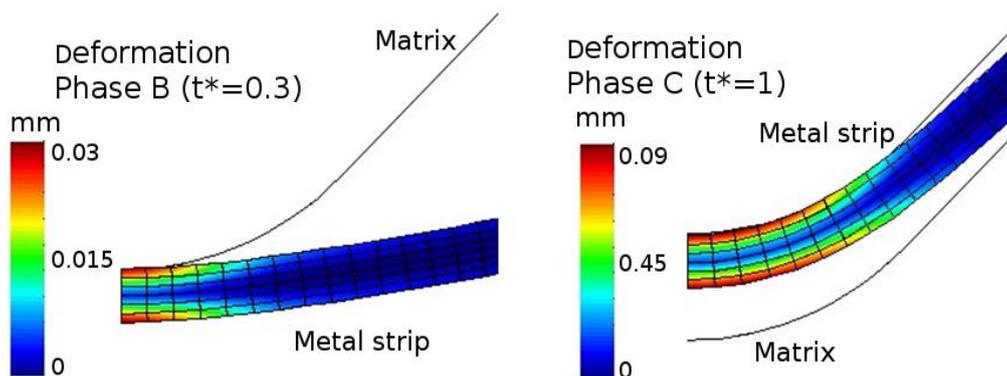


Figura 5. Simulación numérica de la deformación plástica del proceso de doblado con estampa

Inicialmente la superficie de contacto entre la semi-matriz superior y la probeta es pequeña, en cambio, en los instantes finales del doblado la sección de contacto aumenta. Dicho momento es donde se producen las mayores deformaciones debido a que la matriz imprime su forma sobre la chapa, obligando al material a adquirir la forma de la matriz. En la figura 6 se muestra como se distribuye la tensión de von Mises del punto P durante el ciclo de doblado.

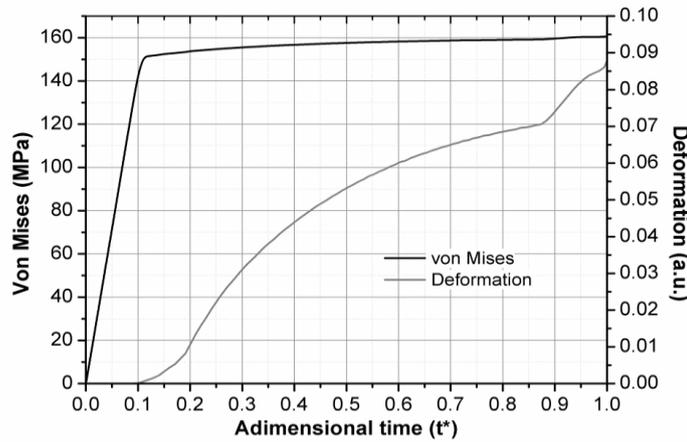


Figura 6. Tensiones de Von Mises durante el proceso de doblado con estampa

En la fase A, la tensión de von Mises está por debajo de la tensión de fluencia del material, mientras que la fase B y C las tensiones de von Mises registradas son próximas a la tensión de fluencia del material.

3.2 Efecto electroplástico

Se registran dos variables de interés, la fuerza media de doblado en la fase C y la fuerza de recuperación elástica de la chapa, fase que se encuentra después del pico de máxima fuerza. Se comparan las fuerzas obtenida en un proceso de doblado asistido por pulsos de alta densidad de corriente, con respecto a un doblado convencional, sin pulsos de corriente.

Se seleccionan estas dos variables debido a que las fuerzas asociadas a grandes deformaciones plásticas, en general son muy sensibles a los pulsos de alta densidad de corriente Tang (1998 y 2002). Por esta razón centramos la atención en la fase C, que es donde se producen las mayores deformaciones y la mayor tasa de deformación en el material. Por otra parte esperamos que lo ocurrido en la fase C, repercute en la fase posterior o zona de recuperación elástica.

3.2.1 Fuerzas de doblado

La fuerza media de doblado en la fase C, se representa como una fuerza relativa. Dicha fuerza, es la fuerza media en el intervalo de tiempo adimensional [0.88-1.0], para un proceso asistido por pulsos de corriente, expresada como una fracción de la fuerza media en un doblado convencional. En la figura 7 se muestra la fuerza relativa en función de la densidad de corriente y de la frecuencia de los pulsos, para un pulso de 50µs.

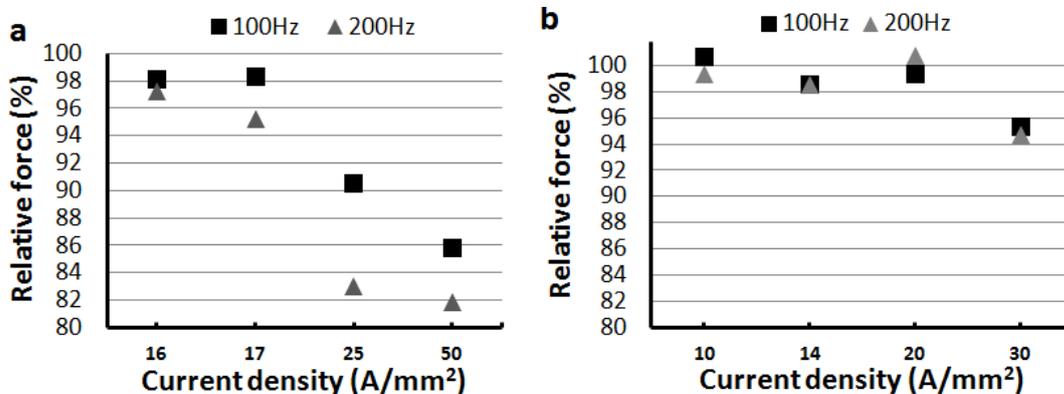


Figura 7. Fuerzas relativas de doblado para Aluminio (a) y Acero Inoxidable (b) para las diferentes configuraciones eléctricas.

En general la fuerza media necesaria para doblar una chapa, disminuye cuando el proceso esta asistido por pulsos de alta densidad de corriente. El efecto que producen los pulsos de corriente varía de un material a otro. Una densidad de 25A/mm² reduce en un 10% la fuerza necesaria para doblar un aluminio, en cambio una densidad de 30A/mm² reduce sólo en un 4% la fuerza necesaria para doblar un acero inoxidable. En general la fuerza de doblado es inversamente proporcional a la densidad de corriente. Si la densidad de corriente aumenta la fuerza necesaria para doblar la chapa disminuye. De forma similar ocurre con la frecuencia de los pulsos, a medida que aumenta la frecuencia, la fuerza de doblado disminuye.

Por ejemplo para el doblado asistido de un aluminio, con pulsos de 50µs, frecuencia de 200Hz y densidad de corriente de 50A/mm², la reducción en la fuerza de doblado es un 18%. Mientras que en un acero con densidad de corriente de 30A/mm², la reducción de la fuerza es sólo de un 6%. Para un aluminio la fuerza de doblado es más sensible a la frecuencia de los pulsos que a la densidad de corriente.

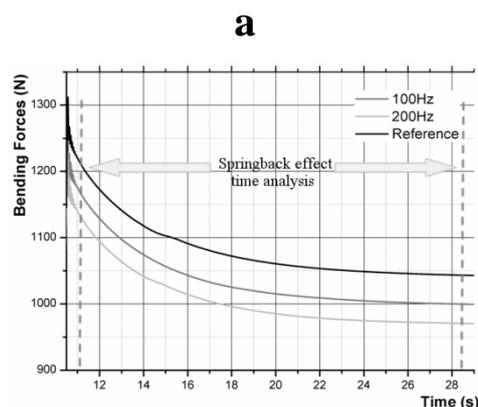
Por otro lado, la contribución relativa entre la densidad de corriente y la frecuencia para el acero inoxidable se comporta de la siguiente manera. Un aumento de densidad de corriente de 10 a 30A/mm² produce una disminución promedio de un 5%. En cambio un aumento en frecuencia de 100 a 200Hz para las mismas densidades de corriente, produce una disminución de fuerza relativa de un 0.7%. Observando los datos de la figura 7(a), se puede analizar la contribución relativa entre la densidad de corriente y la frecuencia para un aluminio. Un aumento en la densidad de corriente de 25 a 50Amm² produce una disminución promedio de la fuerza relativa de un 3.5%. En cambio, un aumento en la frecuencia de 100Hz a 200Hz, para las mismas densidades de corriente, produce una disminución de la fuerza relativa de un 6%.

3.2.2 Fuerza de recuperación elástica

La fluencia del material en el doblado se realiza a partir de la fuerza de recuperación elástica. Dicha fuerza se registra una vez detenida la máquina de tracción compresión, utilizada para doblar la chapa. La fuerza de recuperación elástica comienza con una oscilación amortiguada o damping, asociada a la detención brusca de la máquina. El damping dura menos de 1s y seguido aparece un comportamiento de relajación, el que converge a una fuerza límite constante.

En la figura 8(a) se muestra el comportamiento que tiene la fuerza de recuperación elástica, asociada al doblado de una chapa de acero inoxidable. En dicha figura se puede ver que el período transitorio de la fuera de recuperación elástica es aproximadamente de 18s. Para estudiar la variación de dicha fuerza, se considera un intervalo de tiempo que comienza una vez que ha finalizado el damping hasta que desaparece el transitorio.

La variación que experimenta la fuerza en este intervalo de tiempo, es el resultado de la interacción de dos comportamientos acoplados. Dicho comportamiento se debe a la reacción de la base polimérica (matriz de doblado) y a la fuerza elástica remanente producto del doblado. Por esta razón, la comparación de fuerzas se realizará de forma relativa, se compararan los procesos asistidos a 100 y 200Hz con respecto al doblado convencional.



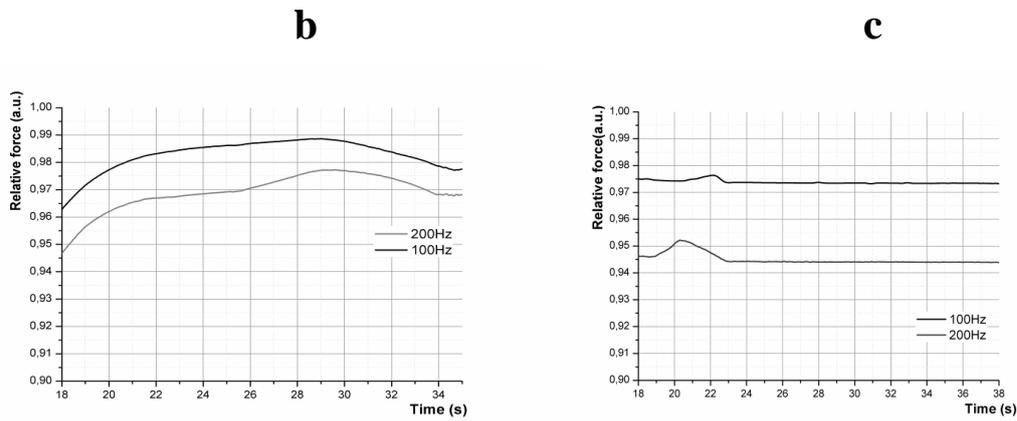


Figura 8. Análisis temporal de la fuerza de recuperación elástica (a); Aluminio (b) y acero inoxidable (c) fuerza relativa de recuperación elástica en la fase D

En la figura 8(b) y (c) se muestra la fuerza relativa de recuperación elástica para una densidad de corriente de 50A/mm^2 en un aluminio y 30A/mm^2 en un acero inoxidable, respectivamente. En ambas figuras se puede ver que a mayor frecuencia, menor fuerza de recuperación elástica y, en consecuencia, mayor fluencia. También se puede ver que en el doblado asistido se produce una menor fuerza de recuperación elástica que en el doblado convencional.

En el gráfico de barras figura 9(a) y (b) se resumen las variaciones de la fuerza de recuperación elástica para aluminio y acero inoxidable, bajo diferentes densidades de corriente y frecuencia de los pulsos. En dicha figura se puede ver que la reducción de la fuerza de recuperación elástica es significativa cuando la densidad de corriente es del orden de 20A/mm^2 .

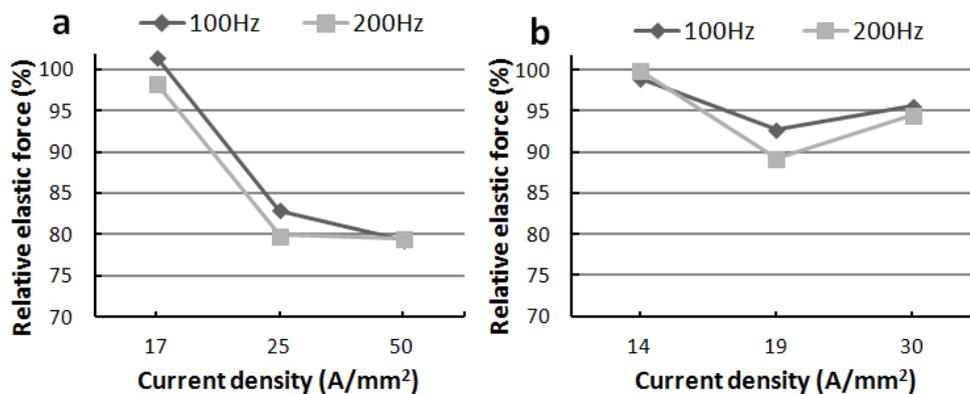


Figura 9. Fuerzas elásticas relativas al doblado del Aluminio (a) y Acero Inoxidable (b) para las diferentes configuraciones eléctricas.

El efecto que produce la electroplasticidad varía dependiendo del material. Como se muestra en la figura 9, la fuerza de recuperación elástica en el aluminio es aproximadamente un 9% menor a la del acero inoxidable.

4. Conclusiones

1. Se ha probado la influencia mecánica de los efectos atérmicos de la electroplasticidad durante el ensayo de doblado con estampa.
2. La simulación numérica del proceso ha permitido caracterizar las diferentes fases que componen un ciclo de doblado por estampa.
3. La densidad de corriente como la frecuencia de los pulsos son dos parámetros que influyen sensiblemente sobre las fuerzas de doblado y la recuperación elástica.

4. La recuperación elástica del material es menor cuando el proceso de doblado es asistido eléctricamente.
5. Los pulsos de alta densidad de corriente no producen el mismo efecto en el aluminio que en el acero inoxidable, las fuerzas de doblado en un aluminio han resultado ser mucho más sensibles a la acción de los pulsos de corriente.

5. Referencias

1. Conrad, H., Yang, D. I., 2000. Influence of an electric field on the plastic deformation of fine-grained MgO at high. *Acta Metallurgica*, vol. 48, pp. 4045-4052.
2. Conrad H., 2001. Space charge and the dependence of the flow stress of ceramics on an applied electric field. *Acta Metallurgica*, vol. 44, pp. 311-316.
3. Green, C. R., Mcneal, T. A., Roth, J. T., Erie, P. S., College, T. B., 2009. Springback elimination for al-6111 alloys using electrically-assisted manufacturing (EAM). *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*, vol. 37.
4. Guan, L., Tang, G., Chu, P. K., 2010. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. *Journal of Materials Research*, vol. 25, no. 07, pp. 1215–1224.
5. Jones, J. J., Mears, L., 2010. A process comparison of simple stretch forming using both conventional and electrically-assisted forming techniques. *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, pp. 1-9.
6. Kravchenko, V. Ya., 1966. *Fiz. Tverd. Tela (Leningrad)* 8, 927. *Sov. Phys. Solid State* 8, 1157.
7. Kravchenko, V. Y., 1967. Effect of directed electron beam on moving dislocations. *Soviet Physics JETP*, vol. 24, p. 1135.
8. Molotskii, M., Fleurov, V., 1995. Magnetic effect in electroplasticity of metals,” *Physical Review*, vol. 52, no. 22, pp. 829-834.
9. Salandro, W. A., Bunget, C., Mears, L., 2010. Modelling and quantification of the electroplastic effect when bending stainless steel sheet metal. *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, pp. 1-10.
10. Sprecher, A. F., Mannant, S. L., Conrad, H., Carolina, N., 1986. On the mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta Metallurgica*, vol. 34, no. 7, pp. 1145-1162.
11. Stanton, C. T., 1994. Investigation of the electroplastic effect using optical and conventional techniques. *J. Mater. Res.*, pp. 258-260.
12. Stolyarov, V. V., 2009. Deformability and nanostructuring of TiNi shape-memory alloys during electroplastic rolling. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 503, no. 1–2, pp. 18-20.
13. Tang, G., Zhang, J., Zheng, M., Zhang, J., Fang, W., Li, Q., 2000. Experimental study of electroplastic effect on stainless. *Materials Science and Engineering A*, vol. 281, pp. 263-267.
14. Troitskii, O. A., 1969. Electromechanical effect in metals. *USSR Academy of Sciences*, pp. 18-22.
15. Troitskii, O.A., Likhtman, V.I., 1963. The effect of the anisotropy of electron and g radiation on the deformation of zinc single crystals in the brittle state. *Kokl. Akad. Nauk. SSSR*. 148, 332.
16. Xu, Z., Tang, G., Tian, S., Ding, F., Tian, H., 2007. Research of electroplastic rolling of AZ31 Mg alloy strip. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 182, no. 1–3, pp. 128-133.

6. Agradecimientos

El apoyo financiero fue proporcionado por el gobierno español, a través de proyecto con referencia DPI2011-26326.