

# Mejora de la eficiencia del proceso de conformado electromagnético para piezas de acero mediante recubrimiento electrolítico



## IMPROVING THE ELECTROMAGNETIC FORMING PROCESS EFFICIENCY FOR STEEL PARTS BY ELECTROLYTIC COATING

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7364> | Recibido: 06/10/2015 • Aceptado: 06/02/2015

Pello Jimbert-Lacha<sup>1</sup> y Iñaki Eguía-Ibarzabal<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad del País Vasco UPV/EHU. Dpto Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería. Alda. Urquijo, s/n – 48013 Bilbao.

<sup>2</sup> Tecnalia Research And Innovation. División de Industria y Transporte. Área de Automoción. Parque Tecnológico de Bizkaia. Edif.700 – 48160 Derio (Vizcaya)

### ABSTRACT

• The present study addresses a novel solution to the problems posed by low electrical conductivity metallic materials that want to be deformed by Electro Magnetic Forming (EMF). The EMF is a forming process that is part of the so-called "High Speed Deformation." By electromagnetic forming surface transient high intensity magnetic fields are generated over the workpiece to deform that cause the appearance of Lorentz forces. These repulsive forces act instantaneously and for a short period of time between the workpiece and the object that is opposed to it and that generates it, the EMF coil. One of the drawbacks of the technology is in the fact that the efficiency of the induction phenomenon is proportional to the electrical conductivity of the object to deform. Steels, due to their low conductivity when compared against materials such as copper or aluminum, are little susceptible to be shaped with guarantees. In this study we have worked with H360LA microalloyed steel with low electrical conductivity. In order to improve the surface conductivity several tubes of the material were electrolytically coated with copper and expanded using the EMF. The tubes with copper coating had an increase of the circumferential deformation of 16% relative to that experienced by the uncoated tubes.

• **Keywords:** Electromagnetic forming, steel, surface conductivity, tube expansion.

### RESUMEN

El presente estudio aborda una solución novedosa a los problemas que presentan los materiales metálicos de baja conductividad eléctrica que se deseen deformar mediante el Conformado Electromagnético o Electro Magnetic Forming (EMF). El EMF es un proceso de conformado que se enmarca dentro de los denominados de "Alta Velocidad de Deformación". Mediante el conformado electromagnético se generan campos magnéticos transitorios superficiales de alta intensidad en la pieza a deformar que provocan la aparición de fuerzas de Lorentz. Estas fuerzas de carácter repulsivo actúan de manera instantánea y durante un breve lapso de tiempo entre la pieza y el objeto que se contraponen a la misma y que contribuye a generarla, la bobina de EMF.

Uno de los condicionantes de la tecnología reside en el hecho de que la eficacia del fenómeno de inducción es proporcional a la conductividad eléctrica del objeto a deformar. Los aceros, por su baja conductividad en relación a materiales como el cobre o el aluminio, son poco susceptibles de ser conformados con garantías.

En el presente estudio se ha trabajado con un acero microaleado H360LA de baja conductividad eléctrica. Con objeto de mejorar su conductividad eléctrica superficial se recubrieron electrolíticamente con cobre varios tubos de dicho material y se expandieron utilizando el EMF. Los tubos con recubrimiento electrolítico de cobre experimentaron un incremento de la deformación circunferencial de un 16% con respecto a la experimentada por los tubos sin recubrir.

**Palabras clave:** Conformado electromagnético, acero, conductividad superficial, expansión de tubo.

### 1. INTRODUCCIÓN

El Conformado Electromagnético, o *Electro Magnetic Forming* (EMF) es un proceso de conformado de los denominados de "alta velocidad" en el que se usan unos campos magnéticos transitorios para aplicar las *fuerzas de Lorentz* sobre una pieza. Estas fuerzas de repulsión generadas en forma de pulso entre la pieza y la bobina de EMF son utilizadas para conseguir la deformación o el conformado deseado en la pieza.

Con el término "alta velocidad" se hace referencia a la velocidad de deformación que sufre la pieza durante su proceso de conformado. Mientras las velocidades de deformación en los procesos tradicionales de conformado mecánicos o en prensa son del orden de  $10^{-1}s^{-1}$ , para estos procesos de confor-

mado a alta velocidad pueden ser de entorno a  $10^4\text{s}^{-1}$  [1].

A pesar de ser una técnica conocida ya desde los años 1930 y empleada desde los años 60 [2], es ahora, a raíz de la implantación de políticas de seguridad junto con la aparición en el mercado de nuevos componentes electrónicos de potencia de gran eficiencia y bajo coste lo que permite el uso de esta tecnología a alta cadencia para la fabricación de grandes series sin necesidad de mantenimiento.

El EMF cuenta con ventajas con respecto a otros métodos convencionales de estampación. Debido a la alta velocidad de deformación obtenida, el material cambia su modo de deformación debido a efectos inerciales que aparecen. Estos efectos reducen las inestabilidades de deformación, tales como arrugas generadas por acumulación de material [3] y aumentan el límite de deformación de ciertos materiales [4], [5], [6], [7]. Además, si la pieza a deformar impacta contra el molde, se generan grandes presiones locales lo que pueden reducir la recuperación elástica o “springback” [8] e incluso mejorar la reproducción de pequeños detalles siempre y cuando el proceso de EMF se realice con los utillajes necesarios [9] ya que de lo contrario se produciría el efecto opuesto, es decir, que la pieza rebote y no se consiga ni reducir la recuperación elástica ni una reproducción de los detalles [10], [11]. Este impacto entre pieza y troquel contribuye además al aumento de la deformación debido a una reducción del daño interno del material en las zonas de mayor deformación [12]. A todo ello se debe unir una reducción en costes que viene dado por la reducción en utillajes, ya que solo se necesita una de las dos estampas, además de un ahorro energético.

A pesar de aportar grandes ventajas también presenta una serie de desventajas como son la altura de embutición cilíndrica limitada que se puede obtener, el limitado ciclo de vida de las bobinas electromagnéticas [13], la baja eficiencia energética del proceso (entorno al 2-10%) y la dificultad de deformar materiales de baja conductividad eléctrica como pueden ser los aceros [1] y sobre todo los aceros de alto límite elástico [14]. El presente estudio trata de solucionar este último inconveniente deformando electromagnéticamente unos tubos de acero microaleado recubriéndolos de un material conductor.

Por su amplia utilización y bajo coste, el acero es el material que más interesa conformar mediante esta nueva tecnología. Sin embargo, además de tener una peor conductividad eléctrica, su límite elástico es mayor que el del aluminio por lo que su conformado mediante EMF resulta complicado.

En la actualidad se utilizan dos vías diferentes para intentar solucionar este problema: (1) aumentar la energía de descarga o canalizarla a través de concentradores de campo o “field shapers” [15], [16] o (2) utilizar una pieza intermedia o “driver” de un material conductor sobre el que se inducen las corrientes y empuja la pieza adyacente de acero [17].

Aumentar la energía descargada lleva consigo una reducción importante en la vida útil de las bobinas electromagnéticas ya que este aumento aumenta a su vez las fuerzas magnéticas a las que se ve sometida la bobina.

La utilización de un concentrador de campo es la solución más utilizada. El concentrador es una herramienta práctica que sirve para concentrar el campo magnético y producir una mayor presión magnética localizada sobre la pieza a deformar. A pesar de conseguir una mejora en la eficiencia del proceso al concentrar el campo magnético, a la hora de conformar aceros

esta mejora es reducida y además presenta el inconveniente de que su geometría es apta únicamente para conformar tubo [18] además de contribuir a una pérdida de eficiencia global de energía del sistema.

Por otro lado, la utilización de un “driver” o pieza intermedia para conformar la pieza deseada tiene un costo elevado ya que por cada pieza de acero a conformar se necesitaría una pieza similar de aluminio o cobre.

A pesar de ello se han realizado diversos estudios con el propósito de deformar piezas de acero e incluso calibrar dimensionalmente piezas de aceros ultra duros [19]. En el estudio realizado por Seth *et al.* [20] se analizó la deformación obtenida para varios aceros utilizando el EMF. Los experimentos se llevaron a cabo lanzando una chapa de acero contra varios punzones de diferentes geometrías para obtener distintos estados de deformación utilizando la ayuda de un “driver” o pieza intermedia de cobre. Se comprobó que la formabilidad de los aceros utilizados aumento ostensiblemente con respecto a los datos obtenidos mediante ensayos cuasi-estáticos al conformarlos mediante EMF. Este aumento es más dramático para los aceros con baja conformabilidad que para los aceros que poseen una conformabilidad mayor. Este aumento es atribuible a la alta velocidad de deformación utilizada y a las altas presiones generadas al impactar contra el troquel, tal y como ocurre en el aluminio [21].

Una vía que no se ha estudiado por el momento es la de aumentar la eficiencia del proceso de EMF aumentando para ello la conductividad del acero a deformar. En el presente estudio se han recubierto electrolíticamente varios tubos de acero para aumentar de esta manera la conductividad eléctrica superficial de los mismos. Es conveniente decir que la aplicación industrial más desarrollada y que a día de hoy se producen piezas reales son aplicaciones de deformaciones tubulares. Sobre todo son aplicaciones tipo compresión de tubo contra un soporte interno [22] y viceversa o deformaciones tanto de expansión como de compresión cilíndrica [23]. Teniendo en cuenta que el EMF es un proceso de descarga pulsada de alta frecuencia, la conductividad superficial es el parámetro más importante a la hora de inducir las corrientes sobre la pieza a conformar.

Estos tubos recubiertos electrolíticamente de cobre fueron deformados electromagnéticamente y comparados contra otros tubos conformados en las mismas condiciones de proceso pero sin recubrir. Las deformaciones obtenidas en las piezas fueron posteriormente medidas así como los parámetros eléctricos de la descarga electromagnética.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. SIMULACIÓN DE LOS FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS

Para un mayor rendimiento del proceso de EMF los campos magnéticos tienen que localizarse en la superficie de la pieza a deformar, generando un fenómeno de apantallamiento antes de traspasar el espesor de la pieza. Además este apantallamiento ha de ser en la superficie para que toda la energía magnética se transforme en presión sobre la pieza y la deformación sea mayor. Este apantallamiento se mide a través del “skin depth” o efecto pelicular [24], [25].

El “*skin depth*” se define como la distancia desde la superficie del conductor donde se concentra el 63% de la densidad de la corriente que corre por toda la sección del conductor. La fórmula para calcular el “*skin depth*” está determinada por la Ec. (1).

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_e}{\mu_0\omega}} \quad (1)$$

donde  $\rho_e$  es la resistividad eléctrica ( $\Omega.m$ ) del material (inversa de la conductividad),  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética de vacío ( $N/A^2$ ) y  $\omega$  la frecuencia angular ( $rad/s$ ) característica del proceso (durante el “pico” del primer ciclo, dado que en general es variable durante el proceso), que se aproxima por la expresión de la frecuencia propia de un circuito RLC.

Con los datos de nuestro circuito se realizó una estimación teórica de cómo variaría el “*skin depth*” al aplicarle el recubrimiento de cobre. Para ello se tomaron los siguientes datos: una frecuencia de 12 kHz (obtenida de la señal de descarga de la Fig. 6), una  $\mu_0$  de  $4\pi 10^{-7} Wb/A.m$  y una resistividad eléctrica del hierro de  $9.8 \cdot 10^{-8} \Omega.m$  que nos dan un “*skin depth*” de 1.44mm.

Para el caso del cobre la resistencia es de  $1.7 \cdot 10^{-8} \Omega.m$  por lo que el “*skin depth*” será menor, 0.6mm.

Si tenemos en cuenta la definición del “*skin depth*” esto significa que en 0.6 mm de cobre se concentra el 63% de toda la corriente. Nuestro recubrimiento es de 25 micras por lo que en esa distancia se concentra el 2.6% de la corriente.

Por lo que queda todavía un 60.4% de corriente que tiene

que ser reducida en el acero para lo que necesitamos 1.375mm de hierro, que sumándolo a las 25 micras de cobre nos da un nuevo “*skin depth*”:

$$\delta_{\text{acero+cobre}} = 1.4mm < \delta_{\text{acero}} = 1.44mm$$

Para hacer una cuantificación preliminar de la influencia del recubrimiento electrolítico de cobre sobre la posible mejora a la hora de ser expandido mediante EMF, se realizaron simulaciones utilizando el software Maxwell 3D®.

Con estas simulaciones previas a los ensayos físicos se obtuvieron los parámetros electromagnéticos de los ensayos.

En la Fig. (2) se observa, para el caso del tubo sin recubrimiento electrolítico, como las corrientes que circulan por la bobina se desplazan hacia el tubo al colocarlo a su lado, esto se conoce como efecto proximidad. En esa misma imagen se puede observar el orden de magnitud de las corrientes que transitan por la bobina en su punto máximo de la onda de descarga y las corrientes inducidas que recorren el tubo colocado a 2 milímetros de las espiras. También se puede observar qué porcentaje de la energía eléctrica que se descarga por la bobina se logra replicar en la pieza.

En la Fig. 2 se observa como en el caso del tubo no recubierto electrolíticamente el porcentaje de la energía eléctrica que se descarga por la bobina que se logra inducir sobre la pieza a deformar es de algo más del 50%. Conviene señalar que la distancia entre las espiras de la bobina y el tubo se ha mantenido constante para todos los ensayos ya que es un parámetro que influye en el porcentaje de corriente que se induce en el tubo.

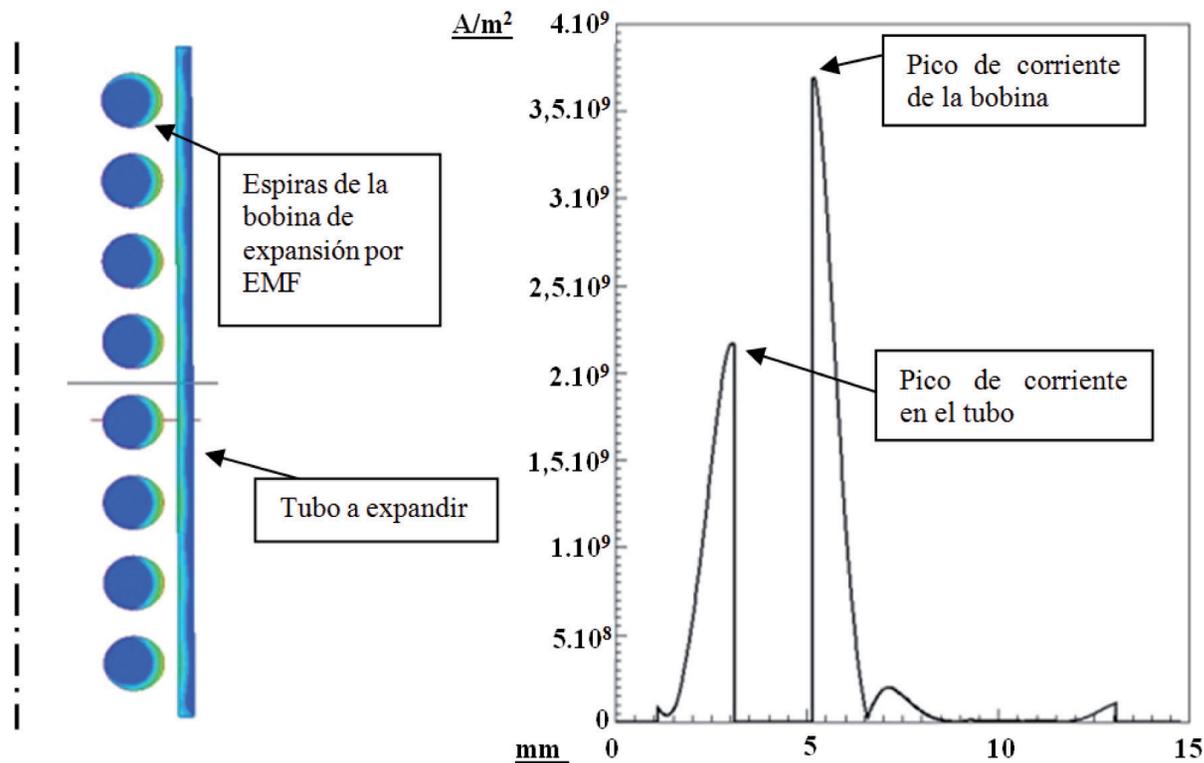


Fig. 2: Sección radial de la bobina de expansión y el tubo sin recubrir a deformar (izquierda) y gráfica lineal que atraviesa el tubo y una espira de la bobina durante el pico máximo de la descarga donde se ven los valores máximos de densidad de corriente eléctrica en  $A/m^2$  (derecha). Ambas imágenes obtenidas con el software Maxwell 3D®

Para calcular la presión generada en este caso en el tubo se utiliza la Ec. (2):

$$p(z,t) = \frac{1}{2} \mu_0 (H_a^2(t,z) - H_i^2(t,z)) \quad (2)$$

En donde  $H_a$  es la intensidad de campo magnético generado dentro del tubo, en la cara interior del mismo (en el lado de la bobina),  $H_i$  es el campo magnético al otro lado del tubo, en la cara exterior y  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética de vacío. Por lo tanto, tan importante como el campo  $H_a$  generado en el lado de la bobina es importante que ese campo sea apantallado por la pieza y que por lo tanto la  $H_i$  resultante sea la menor posible.

De las simulaciones se graficó el apantallamiento del campo magnético para ambos casos que se puede ver en la Fig. 3 obtenido con el programa de simulación Maxwell 3D®.

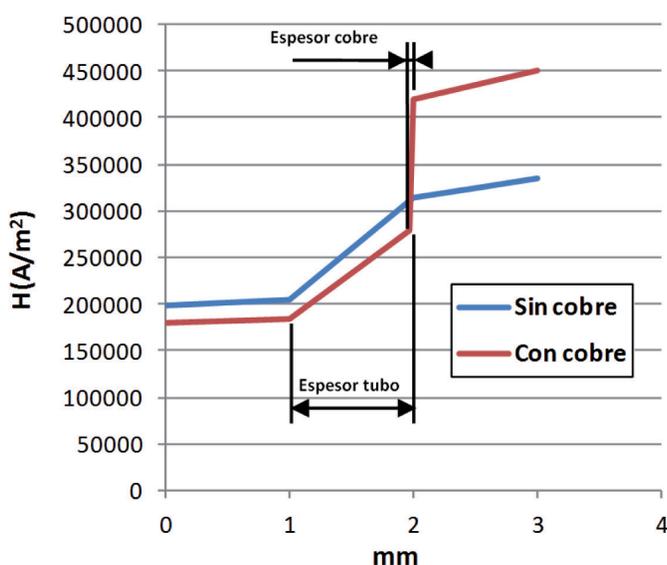


Fig. 3: Apantallamiento del campo magnético (H) a través del espesor del tubo sin recubrimiento de cobre y con recubrimiento de cobre obtenidas con el software Maxwell 3D®. El campo magnético viene del lado derecho de la gráfica y se apantalla a lo largo del espesor del tubo que va de los 2 a 1 mm

En la Fig.3 se observa como para el caso del tubo recubierto de cobre el campo magnético generado en la parte interior del tubo (parte derecha de las gráficas) es apantallado en un 53% en el espesor del recubrimiento aprovechando toda esa energía magnética y transformándola en mecánica.

En el caso del tubo sin recubrir el campo magnético atraviesa en mayor medida el espesor del tubo ya que solamente consigue apantallar el 35,5% del campo magnético con lo que se pierde rendimiento en el proceso de deformación.

El estudio de simulación realizado concluye por tanto que el recubrimiento de cobre era capaz de apantallar un 17,5 % más de campo magnético que el tubo sin recubrir, resultado que dio pie a proseguir con los experimentos físicos.

Se observa además que el campo magnético inducido sobre el tubo también es mayor para el caso del tubo recubierto de cobre. Esto viene a probar que la eficiencia eléctrica del proceso mejora con el recubrimiento y que por lo tanto también debería de mejorar la eficiencia total del proceso.

## 2.2. MATERIALES Y MÉTODO DE ENSAYO

Para realizar estos ensayos se recubrieron 6 tubos con cobre electrolíticamente, creando una capa de recubrimiento de 25 micras de espesor. El diámetro exterior es de 60mm y tienen 1mm de espesor. El material base es un acero microaleado de alto límite elástico para el conformado en frío, clasificado como H360LA según la norma EN 10268, que ha sido soldado para proporcionarle forma de tubo. Tal y como se puede ver en la Tabla 1, se trata de un acero de resistencia mecánica considerable, lo que hace si cabe más exigente el presente estudio, ya que es necesario transformar una mayor cantidad de energía eléctrica en repulsión magnética para conseguir su deformación. Resaltar que se ha decidido trabajar con un material real utilizado en automoción para explorar la posibilidad de implementar los resultados en un proceso industrial actual, en lugar de utilizar un material menos aleado, con mejor conductividad eléctrica y con el que se obtendrían mayores deformaciones.

Los ensayos se realizaron con el banco de capacitores de Tecnia de 60 kJ de energía. En la Fig. 4 se pueden ver las partes más representativas de un equipamiento para el EMF: banco de capacitores, cables, mordaza y bobina.

Los tubos se ensayaron a 18 kJ de energía utilizando una bobina de expansión (Fig. 5) y se midió el diámetro final después de la descarga en tres puntos y se calculó su aumento porcentual (Tabla 2). Para realizar estos experimentos se activaron 15 de los 30 capacitores que dispone el banco de capacitores. Ello supone una capacidad eléctrica de 900 F (60  $\mu$ F por cada capacitor) y un voltaje de descarga de 6498 V. La curva de una de las descargas puede verse en la Fig. 6. Esta curva se obtuvo conectando un osciloscopio Fluke® 192B series (60 MHz y 500MS/s) a la salida de la máquina. La bobina utilizada consta de un arrollamiento con un alambre de cobre con una resistividad eléctrica aproximada de  $1.8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$  de 6 mm de diámetro de 15 espiras y 120 mm de longitud. El diámetro medio de la bobina es de 48 mm lo que nos da una inductancia de la bobina de 0.00426 mH.

Después de los experimentos se comprobó que la bobina no había sufrido ninguna variación dimensional ya que el dimensionamiento se realizó teniendo en cuenta una estimación de las fuerzas de reacción. Además el tamaño del refuerzo interior de la bobina y el conductor utilizado eran de gran tamaño para evitar una rotura prematura de la misma.

$R_e$ (MPa)		$R_m$ (MPa)		A80 (%)	
390		460		26	
C (% de peso)	Mn (% de peso)	P (% de peso)	S (% de peso)	Nb (% de peso)	
0,045	0,5	0,01	0,005	0,013	

Tabla 1: Propiedades mecánicas y composición química del material H360LA del tubo base

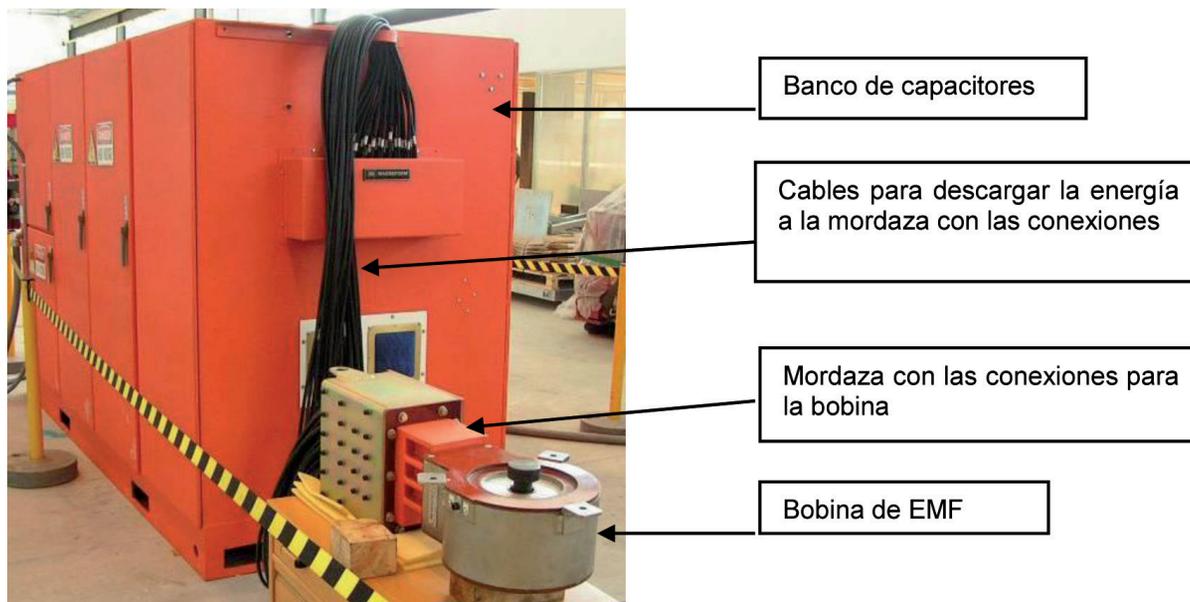


Fig. 4: Banco de capacitores de Tecnalía Automoción utilizado para los experimentos físicos. Es de la marca Magneform modelo ESCU de 60 kJ de energía



Fig. 5: Bobina de expansión utilizada

Para completar las mediciones de las deformaciones generadas, éstas se midieron con el sistema de medición de deformaciones ASAME®.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

De los ensayos físicos se obtuvieron las señales de descarga del banco de capacitores para ambos casos con el osciloscopio Fluke® 192B series (60 MHz y 500MS/s) y se muestran en el gráfico conjuntamente para analizar la influencia del recubrimiento tanto en la forma como en la intensidad de la corriente de descarga en la Fig. 6.

El pico de intensidad medido en la descarga del banco de capacitores durante el ensayo es ligeramente mayor para el caso de los tubos recubiertos de cobre. Esto se traduce en una mayor eficiencia del proceso ya que se consigue descargar una mayor corriente utilizando la misma energía de carga en el

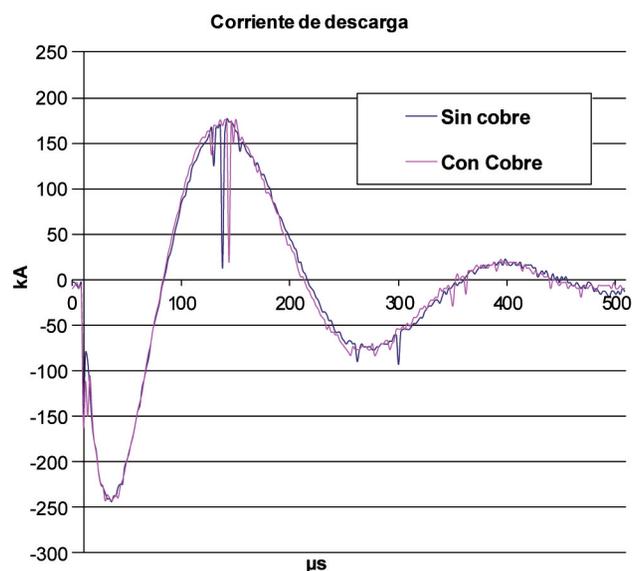


Fig. 6: Corriente eléctrica de descarga para las piezas con y sin recubrimiento de cobre

banco de capacitores debido al aumento de la conductividad superficial de los tubos recubiertos.

Una vez deformados se midieron los tubos con un calibre en ambos extremos y también en su parte central. Estos resultados se pueden observar en la Tabla 2. Los valores presenta-

Extremo Izquierdo				Centro				Extremo Derecho			
Recubierto		Sin recubrir		Recubierto		Sin recubrir		Recubierto		Sin recubrir	
mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
67	11.7	64	6.7	64.3	7.2	63.5	5.8	66.6	11	63.5	5.8

Tabla 2: Diámetro final después de la descarga y aumento % del mismo

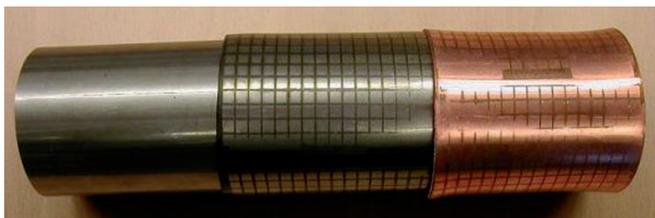


Fig. 7: Tubo original (izquierda), tubo sin recubrir expandido a 18Kj (centro) y tubo recubierto y expandido a 18kj (derecha)

acero (tubos en este caso) con cobre hasta el máximo espesor permitido por esta técnica, 25 micras. Del presente estudio se extraen varias conclusiones:

- Para el caso de la expansión de tubo libre analizado en este estudio se observa un aumento del alargamiento obtenido para la pieza recubierta por cobre. Este aumento en el alargamiento con respecto a los tubos sin recubrir es del 16 %.

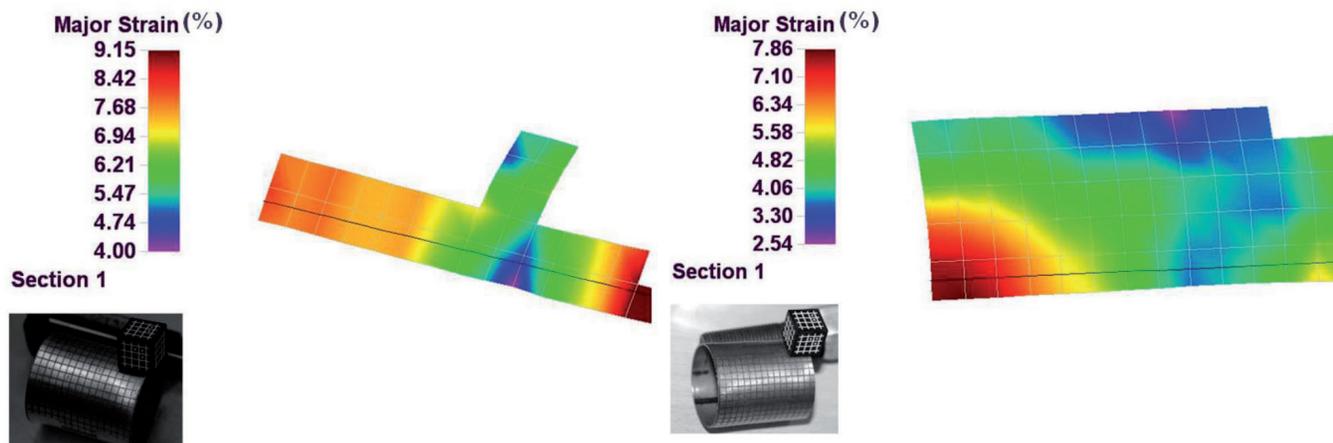


Fig. 8: Deformación máxima (%) en el tubo recubierto con cobre (izquierda) y en el tubo sin recubrir (derecha)

dos son la media de los experimentos realizados y presentan una desviación máxima entorno a los 0,2 mm en todas las mediciones.

Las deformaciones generadas, se midieron finalmente con el sistema de medición de deformaciones ASAME ®. Para ello se realizó la impresión electrolítica de una malla sobre los tubos (Fig.7) que una vez deformados y comparándolos contra un patrón calibrado sirve para calcular las deformaciones con la ayuda de un software específico. En la Fig. 8 se muestran las deformaciones máximas a lo largo de toda la longitud de una pieza recubierta y una pieza sin recubrir.

Se puede observar cómo tanto en los resultados de la Tabla 2 como en los de las Fig. 7 y Fig. 8 las deformaciones obtenidas en los tubos recubiertos son mayores.

Se ha constatado que la mejoría en la deformación se obtiene sobre todo en los extremos del tubo mientras que en el centro esta mejoría es menor.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha puesto a prueba una nueva manera de incrementar la eficiencia del proceso de EMF para conformar piezas de acero. El principal inconveniente que presenta el acero para ser conformado mediante EMF es su baja conductividad eléctrica que baja a medida que se añaden elementos de aleación al mismo. El método ensayado ha sido el de aumentar su conductividad superficial recubriendo electrolíticamente las piezas de

- El resultado de la mejora porcentual del apantallamiento del campo magnético obtenido en la simulación coincide con el porcentaje de mejora obtenido en la deformación de las piezas que se sitúa en torno al 16%-17% en ambos casos. Esto valida las simulaciones realizadas que pueden ser utilizadas en un futuro para probar nuevas maneras de mejorar la eficiencia del EMF para deformar piezas de acero sin necesidad de realizar ensayos físicos.

- El pico de intensidad medido en la descarga del banco de capacitores durante el ensayo es ligeramente mayor para el caso de los tubos recubiertos de cobre. Esto se debe a que al aumentar la conductividad superficial de los tubos mediante el recubrimiento de cobre, se modifican los parámetros de inducción y se consigue un proceso más eficiente. Por lo tanto podemos concluir que el recubrimiento electrolítico de piezas de acero con materiales de alta conductividad eléctrica como el cobre aumenta su aptitud para ser conformados mediante EMF.

- Se hace notar que, a pesar del aumento en el apantallamiento del campo electromagnético (según se desprende de las simulaciones realizadas) y la reducción del “skin depth” (obtenido mediante su estimación teórica), el incremento observado no presenta una magnitud que redunde en un grado de deformación suficiente que justifique el gasto económico que supone el recubrir los tubos de cobre. El apantallamiento calculado parece no

ser capaz de generar la energía suficiente sobre el tubo como para que este se deforme hasta un grado deseable.

- Es por ello, que aunque la deformación final aumenta, el procedimiento presentado plantea una disyuntiva en

tanto en cuanto la viabilidad económica del proceso de deformación global puede verse comprometida.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Psyk V, Risch D, Kinsey, BL, Tekkaya, AE, Kleiner, M. "Electromagnetic forming - A review". *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 211, Issue 5, 1 May 2011, p. 787-829, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>.
- [2] Wilson FW, "High-velocity Forming of Metals", American Society of Tool and Manufacturing Engineers, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1964.
- [3] Jimbert P, "Engatillado por Conformado Electromagnético", Tesis doctoral, Mondragon Unibertsitatea, Mayo 2009.
- [4] Vohnout VJ, "A Hybrid Quasi-static/Dynamic Process for Forming Large Sheet Metal Parts From Aluminum Alloys", Ph.D. Dissertation, the Ohio State University, Columbus, OH, 1998.
- [5] Ezra AA, "Principles and Practices of Explosive Metallurgy", Metal Working, Industrial Newspapers Ltd., London, 1973.
- [6] Tamhane AA, Altynova MM, Daehn GS, "Effect of Sample Size on Ductility in Electromagnetic Ring Expansion", *Scripta Materialia*, Vol. 34, 8, pp. 1345-1350, 1996. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/1359-6462\(95\)00672-9](http://dx.doi.org/10.1016/1359-6462(95)00672-9).
- [7] Balanethiram VS, Hu X, Altynova M, Daehn GS, "Hyperplasticity: Enhanced formability at high rates *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 45, Issues 1-4, Pages 595-600, 1994. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90404-9](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(94)90404-9)
- [8] Iriondo E, "Electromagnetically impulsed springback calibration. Predictive model to estimate the minimum energy requirements for high strength steel (dp600 & trip700) sidewall curl resizing". Tesis doctoral, Universidad del País Vasco, 2007.
- [9] Kamal M, Cheng V, Bradley J, Hatkevich S, Daehn GS, "Design, Construction, and Applications of the Uniform Pressure Electromagnetic Actuator", *Proc. of the 2nd International Conference On High Speed Forming*, Dortmund, Germany, 2006.
- [10] Imbert, J., Worswick, M., L'Epplattenier, P., 2010. Effects of force distribution and rebound on electromagnetically formed sheet metal. In: *Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming—ICHSF*, 2010, Columbus, pp. 169-180
- [11] Risch, D., Brosius, A., Kleiner, M., 2007. Influence of the workpiece stiffness on the electromagnetic sheet metal forming process into a die. *Journal of Material Engineering and Performance* 16 (3), 327-330 DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-007-9052-0>.
- [12] The Effect of Tool-Sheet Interaction on Damage Evolution in Electromagnetic Forming of Aluminum Alloy Sheet J. M. Imbert, S. L. Winkler, M. J. Worswick, D. A. Oliveira., S. Golovashchenko, *Journal of Engineering Materials and Technology* JANUARY 2005, Vol. 127 pp 145-153, DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1839212>.
- [13] Thermal loads of working coils in electromagnetic sheet metal forming S.Gies, C.Löbbe, C.Weddeling, A.E.Tekkaya, *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 2553-2565, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.005>
- [14] Iriondo E, Alcaraz JL, Daehn GS, Gutiérrez MA, Jimbert P. "Shape calibration of high strength metal sheets by electromagnetic forming". *Journal of Manufacturing Processes*. Volume 15, Issue 2, April 2013, p. 183-193. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.01.007>
- [15] Khimenko LT, Mezhuev AT, Legeza AV, Slijusarev AK, Gavruschenko AD, Chudakov VA, Baranov MI, 1979. Inductor for forming metals by the pressure of a pulsed magnetic field. US-patent 4,143, p. 532.
- [16] Haiping Yu, Chunfeng Li, Zhiheng Zhao, Zhong Li, Effect of field shaper on magnetic pressure in electromagnetic forming, *Journal of Materials Processing Technology* 168 (2005) p.245-249. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.01.001>
- [17] Iriondo E, Gutiérrez MA, González B, Alcaraz JL, Daehn, G.S. "Electromagnetic impulse calibration of high strength sheet metal structures". *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 211, Issue 5, 1 May 2011, p.909-915. DOI: [v10.1016/j.jmatprotec.2010.05.013](http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.013)
- [18] Vivek A, Kim K-H, Daehn GS, Simulation and instrumentation of electromagnetic compression of steel tubes, *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) p.840-850, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.023>
- [19] Iriondo E, Gonzalez B, Gutierrez M, Vohnout V, Daehn GS, Hayes B, "Electromagnetic Springback Reshaping." *Proceedings from 2nd Annual ICHSF 2006*, Germany, 2006.
- [20] Mala Seth, Vincent J Vohnout, Glenn S Daehn. "Formability of steel sheet in high velocity impact". *Journal of Materials Processing Technology* 168 (2005) 390-400. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.08.032>.
- [21] Imbert, J., Worswick, M., Golovashchenko, S., 2006. Contributing factors to the increased formability observed in electromagnetically formed aluminum alloy sheet. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on High Speed Forming—ICHSF 2006*, Dortmund, pp. 3-12.
- [22] [http://www.elmaginc.com/index\\_files/application.htm](http://www.elmaginc.com/index_files/application.htm) [06-feb-15]
- [23] <http://www.magneform.com/apps.html> [06-feb-15]
- [24] Lamb, Horace, On Electrical Motions in a Spherical Conductor. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 174, 519-549, 1883.
- [25] Heaviside, O. *Electromagnetic Theory. The Complete & Unabridged Edition*, E. & F.N. Spon., 1951.