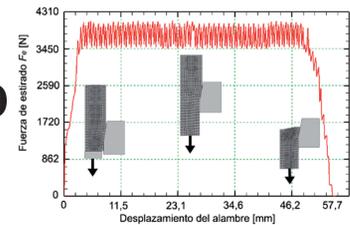


Determinación de la ley de endurecimiento del cobre electrolítico procesado mediante trefilado



Determination of the strain hardening law of electrolytic copper processed by wiredrawing



Oscar Rodríguez-Alabanda¹, Guillermo Guerrero-Vaca¹, Lorenzo Sevilla², Pablo E. Romero-Carrillo¹

¹ Universidad de Córdoba. Dpto. de Mecánica. Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación. Edif. Leonardo da Vinci. Campus de Rabanales. Ctra. Madrid-Cádiz, km 396 - 14014 Córdoba (España)

² Universidad de Málaga. Dpto. de Ingeniería Civil, Materiales y Fabricación. Calle Dr. Ortiz Gómez, s/n - 29071 Málaga (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8878> | Recibido: 18/06/2018 • Inicio Evaluación: 18/06/2018 • Aceptado: 01/08/2018

ABSTRACT

- In the industrial process of multi-stage sequential drawing, the previously annealed wire is passed through a series of rows arranged consecutively by means of a traction system, progressively reducing its section while its length increases, causing the metal to harden.

In the present work a complete study of the material has been made, before and during the multi-stage wiredrawing process, to know the evolution of its main mechanical properties when being processed by drawing in successive stages.

The results obtained have allowed to establish a hardening law with great utility to predict the plastic behaviour of this metal when it is transformed by this process.

The study has been completed with a series of FEM simulations performed on the Finite element method (FEM) analysis which have allowed to implement the behaviour law established from the experimental work and analyze the sequential process by numerical method.

- Key Words:** wire drawing, electrolytic copper, finite element method, mechanical properties, strain hardening.

RESUMEN

En el proceso industrial de trefilado secuencial multi-etapa el alambre, previamente recocido, se hace pasar a través de una serie de hileras dispuestas consecutivamente, usando un sistema de tracción, reduciendo progresivamente su sección mientras su longitud se incrementa, provocando el endurecimiento del metal.

En el presente trabajo se ha realizado un completo estudio del cobre electrolítico antes y durante el proceso de trefilado multi-etapa, con objeto de conocer la evolución de sus principales propiedades mecánicas al ser procesado por estirado en etapas sucesivas.

Los resultados obtenidos han permitido establecer una ley de endurecimiento que es muy útil para predecir el comportamiento plástico de este metal cuando se transforma mediante este proceso.

El estudio se ha completado con una serie de simulaciones realizadas mediante el método de análisis de elementos finitos, las cuales han permitido implementar la ley de comportamiento establecida a partir del trabajo experimental y analizar el proceso secuencial mediante el método numérico.

Palabras Clave: trefilado, cobre electrolítico, método de los elementos finitos, propiedades mecánicas, endurecimiento por deformación.

1. INTRODUCCIÓN

El estirado es una técnica de conformado del metal en frío empleada para obtener cables, tubos, varillas y barras. En el estudio presentado en este trabajo se trata el estirado de alambre o hilo metálico, comúnmente conocido como estirado secuencial o trefilado. Mediante esta técnica, se aplica una reducción en el área de la sección del alambre procesado y se consigue una microestructura que mejora sus propiedades mecánicas, haciéndolo más eficiente y resistente en condiciones de servicio.

De entre los modelos analíticos existentes para estimar la fuerza necesaria F_e para producir el estirado, el método analítico denominado de "análisis local de tensiones" [1], basado en el análisis del estado de equilibrio en el sistema alambre-hilera de estirado en el instante en el que el proceso alcanza su estacionariedad, es el más conocido y utilizado en muchos de los trabajos consultados [2, 3].

El método analítico es de fácil aplicación en geometrías simples, ofreciendo buenos resultados al considerar los efectos producidos a causa del rozamiento metal-hilera y el endurecimiento por deformación del metal en el proceso, pero está limitado a hipótesis y condiciones muy específicas [4].

En el trefilado se emplea como materia prima el alambón obtenido mediante colada continua y laminación en caliente [5] que se ha preparado, limpiado y empuntado para pasarlo por las hileras. Para obtener alambre fino, se diseña generalmente un proceso multi-etapa continuo mediante el cual se hace pasar el alambre a través de entre 7 a 11 hileras, reduciendo su diámetro desde los 8 milímetros hasta 1,5 o 2 milímetros finales.

Los metales no féreos, como el cobre electrolítico, permiten obtener un rango diverso de calidades en función del grado de deformación aplicada y la geometría de las hileras utilizadas. Dependiendo de estas condiciones, es posible que el metal transformado plásticamente en frío requiera tratamiento de recocido intermedio para poder completar toda la secuencia de reducciones hasta alcanzar el diámetro final.

La fuerza de estirado F_e requerida para hacer pasar el alambre de cobre a través de la hilera, es función de la energía necesaria para reducir el diámetro de manera homogénea (en el núcleo del alambre se produce fundamentalmente deformación por elongación a tracción), también depende de la energía requerida para superar el efecto del rozamiento existente entre las superficies de contacto, así como también de la energía consecuencia de la deformación no homogénea o distorsión que se produce en las capas superficiales del alambre, fenómeno causado por el esfuerzo cortante que se presenta en dicha zona [6].

La fuerza de estirado F_e es función de [7]: el semi-ángulo (α), la longitud de calibración de la hilera (L_c); la tasa de reducción (r ; D_o , D_f); el límite de fluencia del metal (σ_o) y el coeficiente de rozamiento en la interfase alambre-hilera (μ), que depende del material de la hilera, la lubricación y la velocidad del proceso.

La tasa de reducción aplicada en una etapa de estirado se calcula según la Ec. (1), mientras que en la Ec. (2) se define la deformación unitaria acumulada (ϵ) en cualquier etapa i de una secuencia de trefilado continuo.

$$r = 1 - \left(\frac{D_f^2}{D_o^2} \right) \quad (1)$$

$$\epsilon_{(i)} = -2 \ln \left(\frac{D_{o(i)}}{D_{f(i)}} \right) \quad (2)$$

La influencia del fenómeno del endurecimiento por deformación en cada una de las i etapas de este proceso va a depender del valor de la tensión de fluencia del metal (σ_o) a la entrada de cada una. Por tanto, para el estudio analítico o numérico del proceso multi-etapa, ha sido imprescindible definir una ley que caracterice la evolución del valor de dicha variable en función del grado de deformación (ϵ) alcanzado en cada etapa.

En este trabajo se ha realizado una secuencia de trefilado partiendo de un alambro de cobre electrolítico Cu-OF1 recocido [8], fabricado a partir de cátodo de cobre CATH-A mediante colada continua y laminación en caliente. Se ha establecido una serie de cuatro reducciones para la obtención de una muestra de cada uno de los diámetros correspondientes a estas para alcanzar el 63% de reducción acumulada en el área de la sección del alambre al final de la secuencia. Esta reducción es la máxima posible cuando el metal se comporta como un material plástico perfecto y la deformación es homogénea en estirado [10, 11].

El principal objetivo de este trabajo ha sido definir una ley de endurecimiento que describa fielmente la evolución del límite de fluencia en función del grado de deformación aplicado. Como objetivo adicional, se propone la implementación de esta ley mediante el método numérico aplicado y se presentan los resultados del correspondiente análisis numérico de la secuencia de reduc-

ciones aplicada, utilizando el software de simulación numérica *Deform* [11] que se basa en el método de los elementos finitos y en el que se ha implementado la ley de endurecimiento definida experimentalmente en este trabajo.

La estructura del artículo es la siguiente: en el segundo apartado se muestran los materiales utilizados y los procedimientos seguidos; en el apartado tercero se exponen los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados, además de los que tienen origen en las simulaciones llevadas a cabo; finalmente, en el apartado cuarto se presentan las conclusiones de este trabajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El cobre electrolítico Cu-OF1, CW007A según la norma UNE EN-1977 [8], es un metal de gran pureza y prácticamente libre de oxígeno, tal como muestra la Tabla 1.

Su conductividad eléctrica es <101% IACS y admite un alargamiento superior al 30%, con un límite de rotura que se encuentra entre 210-250 MPa.

El equipo de estirado empleado ha consistido en un banco de tracción de hilera única, en el cual se han montado de manera sucesiva las cuatro hileras para la secuencia de trefilado establecida en el procesamiento de las muestras. Las hileras utilizadas presentan un núcleo de diamante policristalino, con un semi-ángulo $\alpha=18^\circ$ y una longitud de calibración $L_c=0,35D_f$, diseñadas y suministradas por *Esteves Group* [12].

Como lubricante se ha empleado una emulsión a base de agua y aceite *Lubricool 22G* de *Metalube* [13], con excelentes propiedades de lubricación y absorción del calor generado a causa de la energía de deformación, reduciendo así el desgaste de las hileras y proporcionando un acabado excepcionalmente suave y limpio para el alambre estirado. Se ha aplicado mediante el continuo llenado de la caja de inmersión de la hilera de estirado.

Los correspondientes ensayos de tracción uniaxial han sido realizados en la máquina de la marca *Shimadzu* [14], modelo *AG-250kN Xplus* de la Fig. 1, equipada con un extensómetro de fijación directa a la probeta, elemento que permite medir el desplazamiento y conocer así la elongación que ésta sufre durante el ensayo.

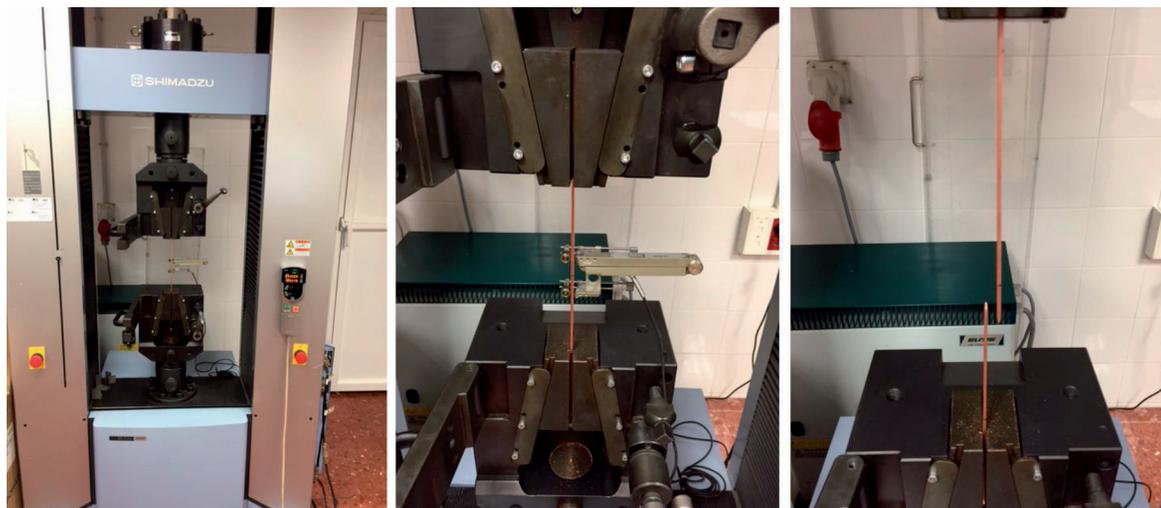


Fig. 1: Ensayo de tracción: (a) máquina de tracción (b) montaje de la muestra (c) final del ensayo

Ag	As	Bi	Fe	O	Pb	S	Sb	Se	Te	As	Cd	Cr	Mn	P	Sb	Bi	Se	Te	Co	Ni	Si	Sn	Zn	Cu
<25	<5	<2	<10	<3	<5	<15	<4	<2	<2			<15					<3			<20				resto

Tabla 1: Composición química del cobre Cu-OF1/CW007A (ppm)

Para los ensayos de tracción, se siguieron los criterios de la norma UNE-EN ISO 6892-1 [15], en la que se establecen las condiciones y parámetros a considerar para su realización. Para las probetas, la longitud inicial entre puntos L_0 se define por la Ec.(3) y es función del área de la sección transversal inicial S_0 , donde k es el coeficiente de proporcionalidad de la probeta. El valor adoptado para k es 5,65 [15].

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (3)$$

Las muestras preparadas para los ensayos de tracción tienen una longitud de 100 milímetros, sin cabezas. Los diámetros ensayados se muestran en la Tabla 2 y en estos se ha incluido el alambón correspondiente al diámetro inicial de 8 milímetros.

Esteves Group ha diseñado y suministrado las hileras, cuya geometría se ha verificado en la aplicación informática *Drawing Die Wizard* [16]. Esta aplicación permite al usuario, previa indicación del metal a estirar, el material de la hilera y los valores correspondientes a los diferentes parámetros geométricos de la misma, comprobar el buen funcionamiento e incluso conocer las zonas de máximo desgaste en la hilera.

La Fig. 2 muestra los diseños de los núcleos correspondientes a las cuatro hileras utilizadas para obtener las muestras en cada una de las etapas de la secuencia objeto de este estudio.

El PCD (*Poli-Crystalline Diamond*) ofrece bajo coeficiente de fricción μ , siendo el valor de éste más bajo cuando el grado o calidad de sinterizado de la placa de PCD es de un grano medio-fino [17]. Aun así, este material requiere de una buena lubricación para su buen funcionamiento.

La Fig. 3 muestra los valores típicos del coeficiente μ para el PCD lubricado con emulsión, comparado con otros materiales como el diamante monocristalino o el carburo de tungsteno al cobalto, habituales en la fabricación de hileras de estirado [18].

En el modelo numérico definido y simulado mediante la herramienta informática *Deform*, se ha considerado un valor $\mu=0,055$

Etapa (i)	0	1	2	3	4
Diámetro hilera, D_i [mm]	8,00	7,10	6,30	5,50	4,90
tasa de reducción, r	-	0,219	0,213	0,238	0,207
tasa de reducción acumulada, r_{acum}	-	0,219	0,379	0,527	0,624
Semiángulo, α [°]	-	18	18	18	18
Longitud de calibración, L_c [mm]	-	2,13	1,89	1,65	1,47

Tabla 2: Parámetros de diseño geométrico de las hileras utilizadas

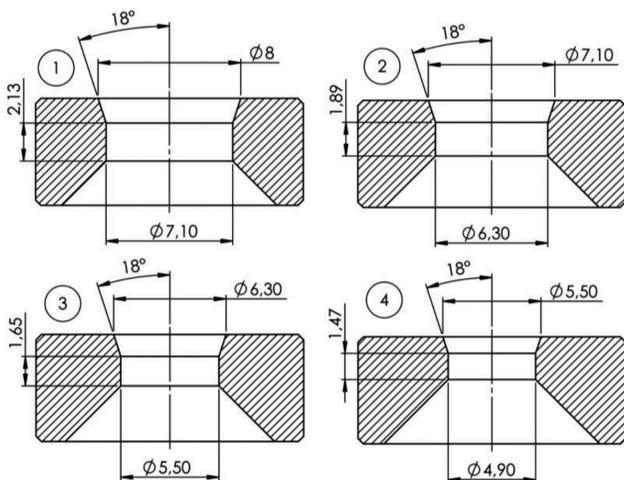


Fig. 2: Parámetros geométricos de los núcleos de las 4 hileras utilizadas

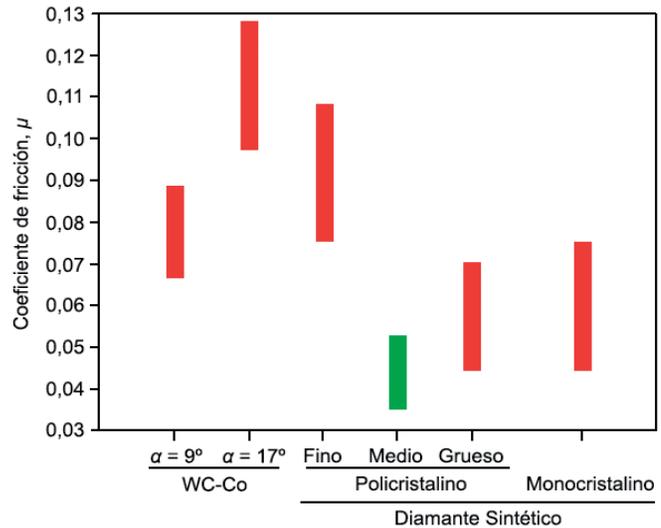


Fig. 3: Coeficientes de rozamiento μ para el estirado del cobre Cu-ETP [18]

para dicho coeficiente de fricción como valor más desfavorable presentado para el PCD [18].

Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica a diversos problemas en el ámbito de la mecánica de flujos de material producidos por deformación plástica, el empleo ingenieril de los métodos numéricos y, en particular, del método de los elementos finitos, se convierten en una alternativa útil para el análisis del proceso de estirado [18, 19].

El método de elementos finitos se basa en la discretización del sistema continuo, consistente en definir cada elemento o unidad concreta a partir de la cual crear un modelo que simule el comportamiento de todo el sistema cuando evoluciona bajo ciertas condiciones de contorno [21].

En el presente trabajo se ha utilizado el software *Deform*, una potente herramienta basada en el método de los elementos finitos, especialmente diseñada para analizar procesos de deformación plástica. *Deform* permite modelizar, de forma simplificada, el problema de deformación plana axi-simétrica, solución adecuada para el proceso objeto de estudio a partir de una correcta caracterización del material objeto de estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ENSAYOS Y LEY DE ENDURECIMIENTO

La expresión que mejor representa el comportamiento de un metal dúctil deformado plásticamente es la ley de endurecimiento de *Ludwik-Hollomon* [22], mostrada en la Ec. (3). En ella C es el coeficiente resistencia a la deformación plástica y n es el coeficiente de endurecimiento por deformación, ambas constantes asociadas al metal que es deformado plásticamente en frío. Con ella es posible calcular el valor del límite de fluencia del metal sometido a una secuencia de deformación $\sigma_{o(i)}$, en función del valor de este límite cuando el metal está en su estado inicial recocido σ_0 y de la deformación acumulada ϵ en el metal deformado.

$$\sigma_{o(i)} = \sigma_0 + C(\epsilon_i)^n \quad (4)$$

La Tabla 3 presenta los valores del diámetro de alambre D_p obtenidos en cada una de las muestras, a partir de los cuales se ha determinado el $\%R_s$ acumulado al final de cada reducción.

La Tabla 4 presenta los valores medios para el límite de fluencia σ_0 , la tensión máxima $\sigma_{m\acute{a}x}$ y la deformación unitaria ϵ a la salida de cada reducción, valores obtenidos en los ensayos.

Etapa (i)	0	1	2	3	4
Diámetro hilera, D_f [mm]	8,00	7,10	6,30	5,50	4,90
Diámetro obtenido, D_r [mm]	8,00	7,13	6,28	5,53	4,87
Área sección final, S [mm ²]	50,27	39,93	30,97	24,02	18,63
Reducción de área, % R_s	0	20,57	38,38	52,22	62,94

Tabla 3: Diámetros programados y obtenidos al final de cada etapa

Para determinar las constantes C y n , correspondientes al cobre se ha utilizado la aplicación en línea *MyCurveFit* [23]. En esta aplicación informática, se ha introducido la expresión matemática correspondiente a la ley de endurecimiento tipo *Ludwik-Hollomon* [22] (Ec. 4), considerando $\sigma_0 = 84,101$ MPa. Además, se ha introducido la tabla de valores límite de fluencia $\sigma_{0(i)}$ y deformación $\epsilon_{(i)}$, obtenidos a partir de los ensayos para así determinar las constantes C y n mediante la correspondiente regresión de los datos. Empleando esta técnica se ha obtenido la ley de endurecimiento específica según la Ec. 5, que describe la tendencia del valor de la tensión de fluencia σ_0 en función de la deformación unitaria ϵ , en cualquier etapa i del proceso.

$$\sigma_{0(i)} = 84,1 + 312,2(\epsilon_i)^{0,35} \quad (5)$$

Los valores correspondientes a las constantes C y n son $C=312,2$ y $n=0,35$, respectivamente, y el límite de fluencia del cobre en su diámetro inicial recocido es $\sigma_0=84,101$ MPa. La gráfica de la Fig. 4 presenta la curva correspondiente a la ley de endurecimiento específica y muestra el buen nivel de ajuste de los puntos correspondientes a los datos conocidos.

El coeficiente $R^2=99\%$, estadístico que determina la calidad del modelo y la proporción de variación de los resultados que se obtienen con éste, nos indica que la Ec. (5) permite predecir los valores de la tensión de fluencia (σ_0) con una fiabilidad del 99%.

3.2. ANÁLISIS NUMÉRICO DEL PROCESO SECUENCIAL DE TREFILADO

Definida la ley de endurecimiento del Cu-OF1, se ha procedido a la modelización de las etapas correspondientes a las reducciones de área aplicadas en el proceso secuencial realizado. El modelo ha consistido en el diseño geométrico y la definición de los materiales de alambre e hilera, así como de las condiciones de contorno del sistema en el módulo preprocesador de *Deform* [24].

Inicialmente se han establecido las condiciones de control de las simulaciones, considerando deformación axi-simétrica en un sistema dinámico incremental. Para el cálculo de la evolución del sistema se han establecido 120 pasos, guardando resultado cada 5 pasos para agilizar los cálculos. Hay que considerar que se trata de un proceso estacionario en el que, al alcanzarse la velocidad programada, el sistema dinámico se estabiliza.

En el preprocesador se han definido las geometrías de hilera y alambre en el modelo 2D que representa la mitad del sistema si-

métrico, indicando el carácter de cada uno: rígido perfecto y plástico, respectivamente. Seguidamente, se ha creado el mallado de elementos finitos que constituyen el alambre y se le ha asignado el material definido. Finalmente se ha definido el movimiento del alambre como un movimiento colineal con el eje de revolución de la hilera, a una velocidad de 20 mms^{-1} y se ha fijado temperatura constante de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ durante el proceso.

A partir de la base de datos del modelo, el procesador ha sido capaz de generar las simulaciones para cada etapa que constituye la secuencia estudiada. El postprocesador ha permitido analizar la evolución de las diferentes variables durante el proceso, permitiendo conocer el estado del metal en los alambres estirados tras finalizar cada etapa.

La Fig. 5 presenta la distribución de deformación acumulada para cada una de las etapas del experimento. En cada una ellas, la deformación unitaria ϵ se incrementa entre un 20-30%, hasta alcanzar su valor máximo al final de la secuencia. La distribución de deformación en el producto estirado no es homogénea en toda la sección, presentándose un valor de deformación unitaria menor en el núcleo y mayor cuando el valor del radio aumenta en las cuatro.

La deformación acumulada en la zona cercana a la superficie decrece ligeramente respecto al valor máximo alcanzado, justo en las capas inmediatamente inferiores a la superficie (Fig. 5). En la cuarta etapa de la secuencia se observa un valor de deformación acumulada en el núcleo prácticamente igual a la unidad ($\epsilon \approx 1$), correspondiente al límite teórico % $R_s=63\%$. El mapa de deformación unitaria efectiva ϵ , obtenida para cada diámetro de alambre trefilado, se muestra en la Fig. 6.

La Fig. 7 presenta la distribución de tensiones durante el proceso estacionario de estirado. En la sección de los alambres estudiados se diferencia claramente la zona de deformación (interior de la hilera), donde se alcanza el valor máximo de la tensión efectiva $\sigma_{ef(máx.)}$ o tensión de deformación. El metal deformado se mantiene bajo la acción de una tensión de tracción constante en toda su sección a la salida de la hilera, definida como tensión de estirado o σ_{xe} , que es consecuencia de la fuerza de estirado F_e o fuerza de tracción en el extremo del alambre.

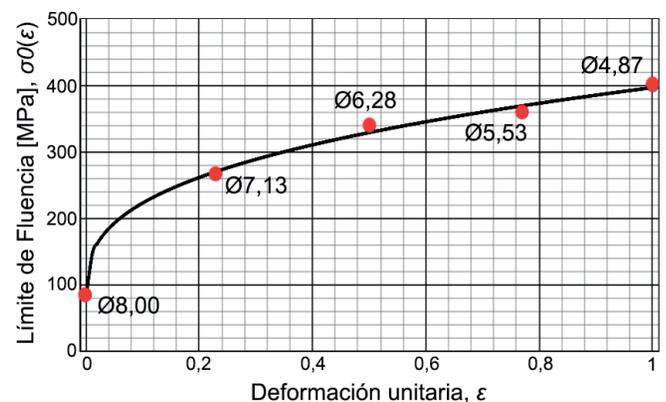


Fig. 4: Ley de endurecimiento obtenida para el cobre Cu-OF1(CW007A)

Diámetro D_f [mm]	Fuerza máx. F [N]	Límite Rotura $\sigma_{máx}$ [MPa]	Límite Fluencia σ_0 [MPa]	Reducción área % R_s	Deformación ϵ
8,00	11450,70	231,26	84,101	0,001	0,00
7,13	11705,50	293,66	266,900	20,567	0,26
6,28	10763,60	349,71	338,140	38,378	0,50
5,53	8942,13	377,06	359,230	52,217	0,77
4,87	7354,54	399,73	399,590	62,942	1,00

Tabla 4: Resultados obtenidos en los ensayos de tracción

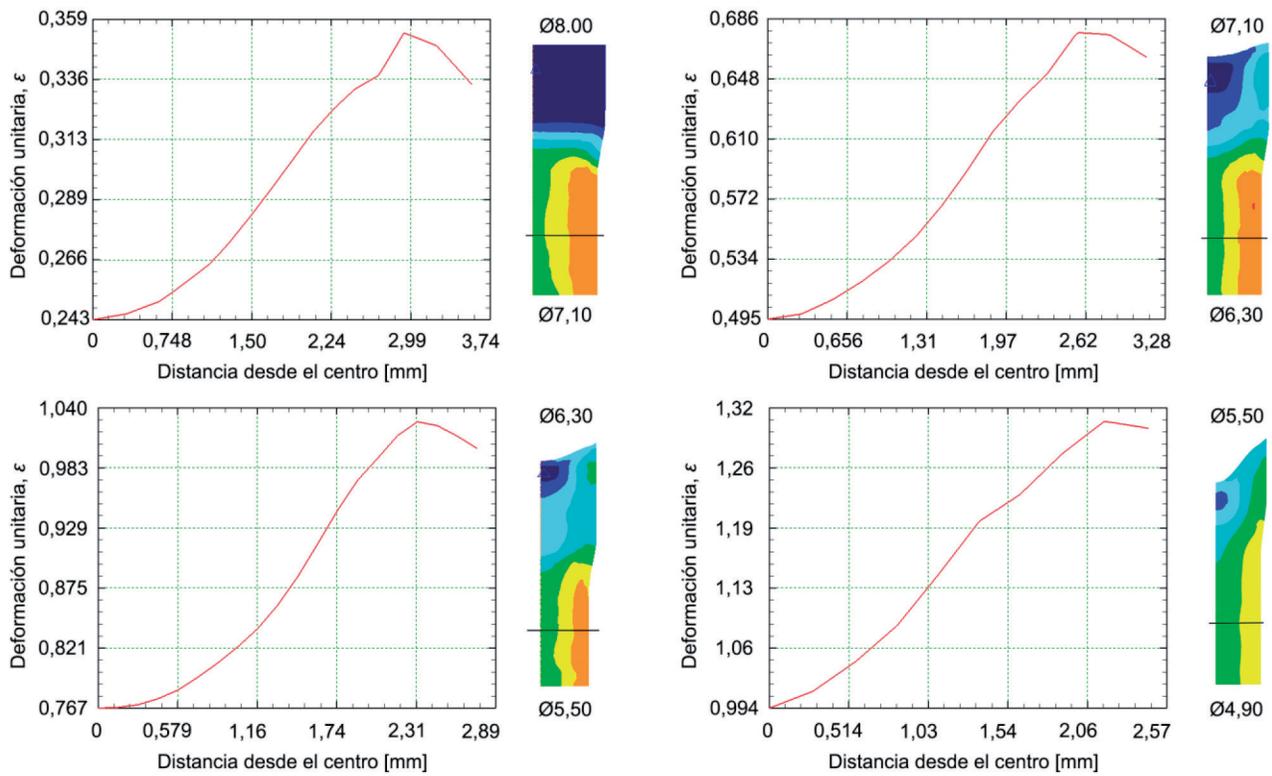


Fig. 5: Curvas de distribución de deformación en la sección del alambre, para cada etapa

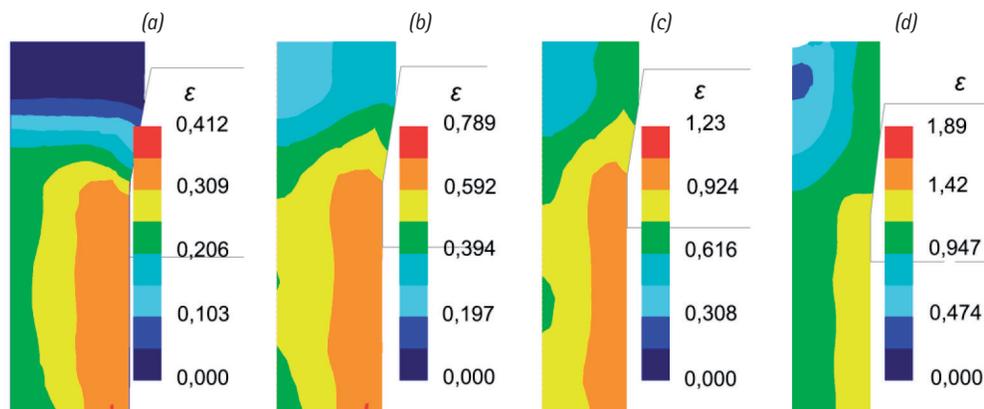


Fig. 6: Distribución de la deformación efectiva ϵ en la sección del alambre, para las etapas (a) 8,00-7,10 mm, (b) 7,10-6,30 mm, (c) 6,30-5,50, (d) 5,50-4,90 mm

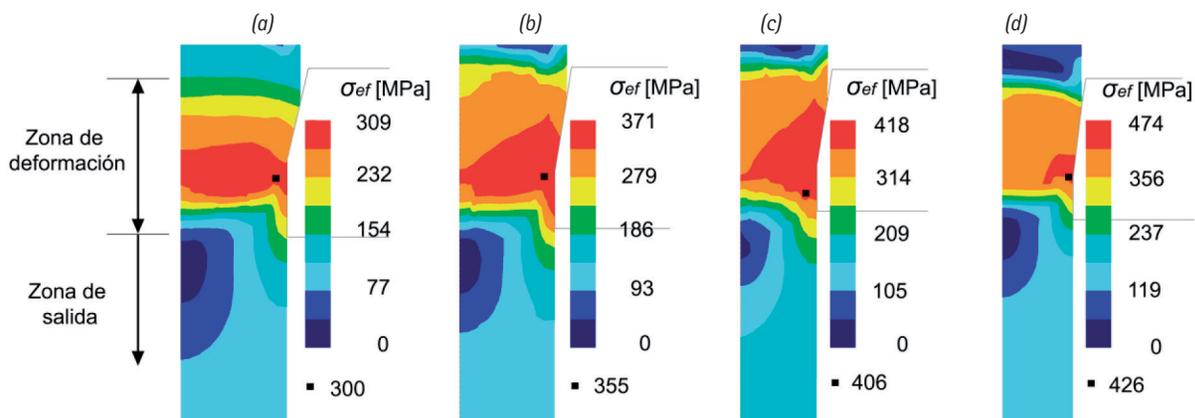


Fig. 7: Tensión efectiva σ_{ef} en la sección de cada alambre, para las etapas (a) 8,00-7,10 mm, (b) 7,10-6,30 mm, (c) 6,30-5,50, (d) 5,50-4,90 mm

El valor de la fuerza de estirado F_e , se ha obtenido directamente de las simulaciones. La Fig. 8 muestra un ejemplo de la gráfica F_e vs. desplazamiento en la cual el valor de la fuerza necesaria para el estirado F_e se alcanza cuando el proceso estabiliza su velocidad (constante), convirtiéndose en estacionario.

Por otro lado, los valores correspondientes a la tensión de esti-

rado σ_{xe} se mantienen siempre por debajo del límite de fluencia del metal ya estirado, en todas las reducciones de la secuencia objeto de estudio. De este modo, en ningún caso se produce deformación indeseada alguna en el alambre ya estirado, conservando éste su sección perfectamente cilíndrica a la salida y en cada una de las hileras de estirado.

La Ec. (6) define la fuerza de estirado F_e y la Tabla 7 presenta los resultados obtenidos para dicha fuerza:

$$F_e = \sigma_{xe} \cdot S \quad (6)$$

La fiabilidad de los resultados obtenidos en las simulaciones depende de la correcta caracterización del material. En el presente trabajo, se ha establecido una ley de endurecimiento a partir de la información obtenida del ensayo de estirado secuencial realizado. Mediante el análisis numérico se ha determinado la evolución de la tensión y deformación efectivas, función principalmente del semiángulo α de las hileras y, en menor medida, del coeficiente de rozamiento μ en la zona de contacto alambre-hilera [7, 21].

La gráfica de la Fig. 9 muestra la evolución del valor de las tensiones significativas del proceso. Es en la zona de deformación, en el interior de la hilera, donde sí se supera el límite de fluencia del metal; zona en la cual se produce la deformación plástica durante el proceso de estirado del metal.

Para la realización del presente estudio se han consultado diversos trabajos [2, 22–24] en los que se ha analizado el proceso de estirado multi-etapa de diversos materiales, utilizando métodos analíticos y también herramientas informáticas fundamentadas en el método numérico como es el software *Deform*.

Suliga ha estudiado el comportamiento del acero perlítico-ferrítico al 75% de carbono [26], realizando las correspondientes simulaciones mediante software basado en el método numérico e implementando las propiedades plásticas propias de este metal en el sistema. Hassan y Hashim [2], realizaron el análisis del estirado secuencial de aluminio AL-1100 utilizando *Deform3D* para las simulaciones, pero no proponen un procedimiento experimen-

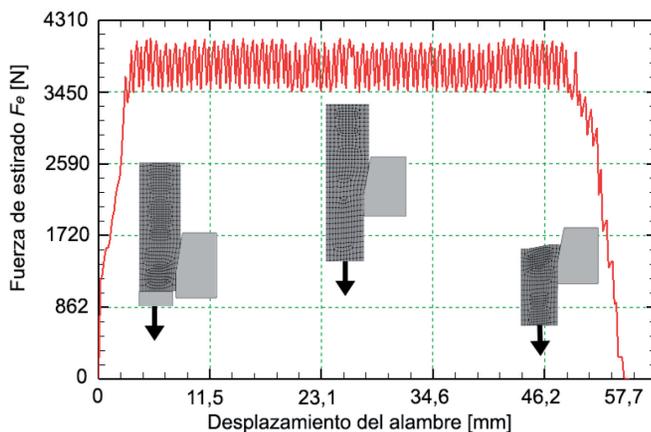


Fig. 8: Evolución de la fuerza de estirado F_e en la primera reducción de la secuencia de estirado

Etapa (i)	0	1	2	3	4
Diámetro hilera, D_i [mm]	8,00	7,10	6,30	5,50	4,90
Límite Fluencia, σ_o [MPa]	84,101	266,9	338,140	359,23	399,59
Tensión máx. deformación, $\sigma_{eff(máx.)}$ [MPa]	-	300	355	406	426
Tensión de estirado, σ_{xe} [MPa]	-	92	125	163	156
Fuerza de estirado, F_e (N)	-	3673	3871	3915	2906

Tabla 7: Tensiones significativas y fuerza de estirado en la simulación de cada etapa

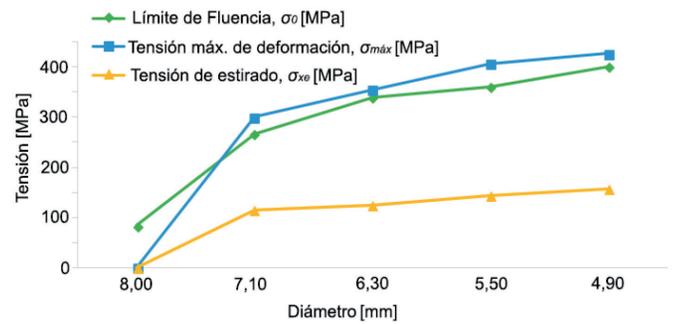


Fig. 9: Evolución de las tensiones significativas durante el proceso de estirado

tal detallado para determinar la ley de endurecimiento del metal. Prisco [27] establece una ley de fluencia de tipo lineal para el trefilado de acero al 0,8% de carbono y basa su trabajo en el método analítico, estableciendo valores mínimos para a la fuerza de estirado necesaria en el proceso. El reciente trabajo de Zottis [28] corrobora la viabilidad del método, los materiales propuestos y de los resultados obtenidos en el presente trabajo, aunque su caso particular trata el estudio del trefilado de un acero.

El presente trabajo, a diferencia de los citados, desarrolla detalladamente el procedimiento de estudio previo del metal y presenta todo lo necesario para aplicarlo a cualquier otro metal dúctil. Otra aportación ha consistido en la propuesta de un ajuste por regresión de datos a la expresión-ley de endurecimiento que mejor describe el comportamiento de la mayoría de los metales dúctiles, la ley de *Ludwik-Hollomon*.

El cobre y otros metales han sido estudiados en diversos trabajos de investigación consultados [2, 22–24], pero en este trabajo se define de forma precisa la ley de endurecimiento del cobre electrolítico Cu-OF1 (CW007A) [8] sometido a deformación plástica mediante estirado secuencial. Este aspecto es de gran interés desde el punto de vista industrial al tratarse de un tipo de metal muy utilizado como materia prima para la manufactura de todo tipo de conductores eléctricos.

Esta ley ha sido implementada para el método numérico que, a diferencia de los métodos analíticos que están condicionados a hipótesis muy específicas [4], ofrece unos resultados muy acordes con las mediciones de las deformaciones, tensiones y fuerzas de estirado obtenidas de los ensayos, siempre que se haya trabajado en el rango de deformaciones y para el metal caracterizado en este trabajo.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del desarrollo del procedimiento presentado y del estudio de material realizado se resumen en una serie de observaciones que se exponen en este apartado. Una vez analizadas estas claves se han expuesto las conclusiones generales del presente trabajo.

Se han podido realizar las cuatro reducciones consecutivas que constituyen el experimento, alcanzando un valor final del 62,94% de reducción de área, que es prácticamente el valor límite de deformación del proceso de estirado, sin observar defectos ni deformaciones indeseadas en las muestras obtenidas.

La ley de endurecimiento específica, definida mediante la regresión de los puntos obtenidos a partir de los ensayos de tracción correspondientes a cada uno de los cuatro diámetros que constituyen la secuencia de reducciones aplicada, representa fielmente la evolución del valor del límite de fluencia en función de la deformación aplicada.

Se han establecido las condiciones conocidas para la realización de las simulaciones numéricas de las cuatro reducciones en

el software *Deform*, de manera que estas emulan el proceso real realizado a temperatura ambiente, bajo un valor del coeficiente de fricción en la zona de contacto que representa el peor de los casos posibles y considerando las condiciones reales en cuanto a material de las hileras además del sistema y tipo de lubricación empleados. En este sistema se ha implementado ley de comportamiento definida para metal objeto de estudio a partir de los ensayos realizados.

La distribución de deformaciones observada en los resultados de las simulaciones realizadas indica un mayor grado de deformación acumulada en la zona cercana a la superficie del alambre, en los cuatro diámetros obtenidos de la secuencia de reducciones consecutivas obtenida. Este aspecto implica un mayor grado de endurecimiento por deformación en frío y una mayor implicación de las tensiones residuales que se acumulan en esta zona del material estirado.

El valor máximo obtenido en las simulaciones para la deformación efectiva acumulada al final de la cuarta reducción es 1, alcanzando prácticamente el valor equivalente al límite teórico R_s del 63%. Este aspecto corrobora la correspondencia de los resultados de la simulación con las bases analíticas del experimento realizado, así como la fiabilidad de la ley de comportamiento establecida para el proceso de estirado secuencial del cobre Cu-OF1.

En las simulaciones, se ha observado que la tensión de estirado σ_{xe} alcanzada nunca supera el valor del límite de fluencia del metal ya estirado, obtenido por otra parte en los ensayos realizados en el laboratorio, de manera el alambre ya estirado conserva su sección perfectamente cilíndrica a la salida de las hileras de estirado. Este hecho se ha podido comprobar tanto en las simulaciones como en el proceso de estirado realizado para la obtención de las muestras estudiadas.

- La ley de endurecimiento específica, definida en este trabajo, hace posible prever con gran fiabilidad cómo evoluciona el límite de fluencia del cobre electrolítico Cu-OF1 en función del grado de deformación aplicada. También permite conocer la evolución y distribución de las deformaciones cuando esta ley es correctamente implementada para generar las simulaciones numéricas del proceso de estirado secuencial.
- La ley de endurecimiento específica, implementada en la aplicación software *Deform*, permite prever mediante simulación las posibles deformaciones indeseadas del metal a la salida de la hilera e incluso permite prever la rotura del alambre.
- Se ha comprobado que el procedimiento seguido para definir la ley de endurecimiento específica definida en el presente trabajo es viable. Se trata de un procedimiento bien constituido y perfectamente reproducible, marcando así las pautas para futuros estudios análogos que posibiliten caracterizar otros metales habitualmente procesados mediante trefilado.
- El software de simulación numérica permite analizar y valorar las características geométricas y técnicas de las hileras y de los equipos de trefilado, haciendo posible plantear posibles mejoras aplicables al proceso de trefilado secuencial multi-etapa en el ámbito industrial.

REFERENCIAS

[1] Avitzur B. "Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle". *Journal of Engineering for Industry*. 1964. vol. 86-4, P.305. (doi: <https://doi.org/10.1115/1.3670543>).

[2] Hassan A, Hashim A. "Three Dimensional Finite Element Analysis of Wire Drawing Process". *Universal Journal of Mechanical Engineering*. 2015. vol. 3-3, P.71-82. (doi: <https://doi.org/10.13189/ujme.2015.030302>).

[3] Zhang GL, Wang ZW, Zhang SH, Cheng M, Song HW. "A fast optimization approach for

multipass wire drawing processes based on the analytical model". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2013. vol. 227-7, P.1023-1031. (doi: <https://doi.org/10.1177/0954405413481780>).

[4] Rodríguez-Alabanda O. "Metodología para el estudio y diseño tecnológico del proceso secuencial de estirado multi-etapa de alambre y barras de sección circular". Tesis Doctoral Universidad de Málaga. 2017, P.84-93. <https://hdl.handle.net/10630/14910> [accessed July 24, 2017].

[5] Cunext Copper Industries S.L. "Productos estirados de cobre" 2018. <https://www.cunext.com/origen-y-aplicaciones/> [accessed June 1, 2018].

[6] Luis CJ, León J, Luri R. "Comparison between finite element method and analytical methods for studying wire drawing processes". *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. vol. 164-165, P.1218-1225. (doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.138>).

[7] Vega G, Haddi A, Imad A. "Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing". *Materials and Design*. 2009. vol. 30-8, P.3308-3312. (doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.12.006>).

[8] European Committee for Standardization. EN-1977:2013 Copper and copper alloys - Copper drawing stock (wire rod). 1977.

[9] Salcedo D, Luis CJ, León J, Luri R, Puertas I, Pérez I. "Analysis of residual stresses in wire drawing processes". *Proceedings of The 14th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*. 2010. vol. 11-18-September, P.69-72.

[10] Blazynski TZ. *Design of tools for deformation processes*. Netherlands: Elsevier Applied Sciences Publisher LTD; 1986. (doi: [10.1007/978-94-009-4177-9](https://doi.org/10.1007/978-94-009-4177-9)).

[11] Chen DC, Huang JY. "Design of brass alloy drawing process using Taguchi method". *Materials Science and Engineering: A*. 2007. vol. 464-1-2, P.135-140. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.139>).

[12] Esteves Group. "Hileras de diamante policristalino PCD" 2018. <http://www.estevesgroup.com/es/products/wire-drawing-dies/polycrystalline-dies/index.php> [accessed June 1, 2018].

[13] Metalube. "Lubricantes solubles en agua para cobre y trefilado de otros metales no ferrosos, rolado y recedores" 2012. [http://www.metalube.es/uploads/downloads/product-pdfs/Lubricool_PRS_\(Spanish\).pdf](http://www.metalube.es/uploads/downloads/product-pdfs/Lubricool_PRS_(Spanish).pdf) [accessed June 1, 2018].

[14] Shimadzu. "Materials Testing & Inspection machines" 2018. <https://www.shimadzu.com/an/test/universal/ag-xplus/ag-xplus3.html> [accessed June 1, 2018].

[15] AENOR, Una Norma Española-European Standardization. UNE-EN ISO 6892-1:2009 Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. 2010.

[16] van der Putten C. "Drawing Die Wizard" 2011. <http://www.estevesgroup.com/es/services/drawing-die-wizard-software/overview/index.php> [accessed June 1, 2018].

[17] Baker BB, Kasprzak DJ. "Thermal degradation of commercial fluoropolymers in air". *Polymer Degradation and Stability*. 1993. vol. 42-2, P.181-188. (doi: [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(93\)90111-U](https://doi.org/10.1016/0141-3910(93)90111-U)).

[18] Baker, G. Wright RN. "Friction Coefficients in Laboratory Simulation of Magnet Wire Drawing". *Wire Journal International*. 1992. vol. 25-6, P.67-72.

[19] Celentano DJ, Palacios MA, Rojas EL, Cruchaga MA, Artigas AA, Monsalve AE. "Simulation and experimental validation of multiple-step wire drawing processes". *Finite Elements in Analysis and Design*. 2009. vol. 45-3, P.163-180. (doi: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2008.09.001>).

[20] Siva C, Teja N, N GM, Reddy PS. "Finite Element Analysis of Wire Drawing Process with different die contours". *International Journal of Science Engineering and Advance Technology*. 2016. vol. 4-2, P.134-143.

[21] Duggirala R. "Using the Finite Element Method in Metal-Forming Processes". *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 1990. vol. 42-2, P.24-27. (doi: <https://doi.org/10.1007/BF03220868>).

[22] Rowe GW. *An Introduction to the principles of metalworking*. London (UK): Edward Arnold Editions; 1965.

[23] MyAssays Ltd. "My Curve Fit, on line curve fitting" 2017. <https://mycurvefit.com/> [accessed July 24, 2017].

[24] Flührer J. *Deform2D version 8.1 User's Manual*. Ohio (EE.UU.): Scientific Forming Technologies Corporation; 2004.

[25] Muskalski Z. "Selected Problems from the High-Carbon Steel Wire Drawing Theory and Technology". *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014. vol. 59-2. (doi: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0087>).

[26] Suliga M. "The Analysis of the Mechanical Properties of High Carbon Steel Wires after Multipass High Speed Drawing Process in Conventional and Hydrodynamic Dies". *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014. vol. 59-2, P.16-20. (doi: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0111>).

[27] Prisco U. "Strain Hardening of Carbon Steel During Wire Drawing". *Materials Research*. 2018. vol. 21-3, P.1-5. (doi: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0303>).

[28] Zottis J, Soares Diehl CAT, Rocha A da S. "Evaluation of experimentally observed asymmetric distributions of hardness, strain and residual stress in cold drawn bars by FEM-simulation". *Journal of Materials Research and Technology*. 2018-March. (doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.01.004>).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de Tania López Calero, técnica de laboratorio de Cunext Copper Industries S. L., empresa en la que se han llevado a cabo los trabajos de obtención y preparación de las muestras, así como de los correspondientes ensayos de tracción en los que se ha basado este trabajo. También dan las gracias a la profesora Ana María Camacho López, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la UNED, que nos ha permitido la utilización del software *Deform* para poder realizar las simulaciones presentadas en este trabajo.