

## INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ALAMBRES DE ACERO TREFILADOS

F. Gálvez, J. M. Atienza, J. Ruiz, M. Elices

Universidad Politécnica de Madrid  
Departamento de Ciencia de Materiales  
E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. c/ Prof. Aranguren s/n, 28040 Madrid

**Resumen.** El presente trabajo es un estudio experimental del efecto de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de alambres de acero trefilados. Se han realizado por una parte ensayos convencionales de tracción con una máquina universal de ensayos y por otra ensayos de compresión a altas velocidades de deformación con una barra Hopkinson. En el estudio se han empleado varios alambres con distinto contenido de carbono, y en distintas etapas del proceso de trefilado. Los resultados obtenidos muestran que la velocidad de deformación puede ser un factor a tener en cuenta en la modelización numérica del proceso de trefilado, al menos en las primeras etapas del proceso.

**Abstract.** This paper is an experimental study of the strain rate effect on the mechanical behaviour of drawn steel wires. On the one hand, conventional tensile tests have been performed with a universal testing machine and on the other hand compression tests have been performed with a Hopkinson bar. Wires with different carbon content and from different drawing stages have been studied. The experimental results show that the strain rate can be a key factor in the numerical modeling of the drawing process, at least in the initial stages of the process.

### 1. INTRODUCCIÓN

El alambre de acero trefilado es un material de gran interés industrial. Se emplea masivamente en las obras del hormigón pretensado, en los cables de la minería y de la industria pesquera y en la industria del automóvil, como hilos muy finos para refuerzo de neumáticos.

El proceso de trefilado con el que se obtienen estos alambres es una de las más antiguas operaciones de conformado de metales y consiste, esencialmente, en reducir las dimensiones de una barra haciéndola pasar a través de una matriz por estirado en frío.

El trefilado se lleva a cabo normalmente a temperatura ambiente y se trata de un proceso multipaso en el que se obliga al material a pasar por varias hileras (el número oscila normalmente entre 7 y 20, dependiendo de la reducción deseada) colocadas en serie. Las reducciones que se alcanzan en el proceso pueden llegar al 90 % de sección [1].

En los últimos años, el desarrollo de la industria de fabricación de alambres se ha caracterizado por la demanda de productos de mayor calidad obtenidos en menos tiempo [2]. Esto ha obligado a aumentar las velocidades de trefilado, llegándose a alcanzar en el

material velocidades de deformación del orden de  $1000 \text{ s}^{-1}$  e incluso  $10000 \text{ s}^{-1}$  en las últimas etapas del proceso.

Pero a la vez, nunca hasta ahora la calidad de los productos había jugado un papel tan decisivo en la industria. Hoy en día, las grandes empresas del sector tienen sus propios centros de investigación y utilizan modernas herramientas de cálculo numérico para simular los procesos y controlar los factores que pueden influir en los mismos [3-6], minimizando los riesgos de rotura del alambre.

En estas simulaciones se emplea una ecuación de comportamiento mecánico del material obtenida a partir de ensayos cuasiestáticos de tracción simple [3, 7-10]. En dichos ensayos las velocidades de deformación oscilan típicamente entre  $10^{-5}$  y  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Sin embargo, como se ha dicho anteriormente, la velocidad de deformación del material en el proceso de trefilado real puede llegar a valores de  $1000$  e incluso  $10000 \text{ s}^{-1}$ , es decir, entre 6 y 9 órdenes de magnitud superiores. Por tanto, para modelizar de forma fiable el proceso de trefilado parece interesante comprobar la influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico del material durante el proceso.

El objetivo del presente trabajo consiste en investigar la influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de los alambres de trefilado. Para ello se han realizado ensayos cuasiestáticos de tracción hasta rotura y ensayos dinámicos de compresión en cuatro tipos de alambres, con distinta composición y en distintas etapas del proceso.

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1 Material

En el estudio se han empleado cuatro tipos de alambres trefilados suministrados por la empresa Bekaert. Dos de ellos de bajo contenido en carbono (0,05%) y los otros dos de alto contenido de carbono (0,7%). En ambos casos uno de los alambres había sido sometido a un tratamiento térmico de recocido después de la primera parte del proceso, para restaurar sus propiedades y continuar posteriormente con el trefilado. Los otros dos alambres han sido trefilados con una reducción en sección del orden del 80% para el acero de bajo contenido en carbono y del 70% para el alto contenido de carbono. Las denominaciones que se emplean se recogen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Denominación de los alambres estudiados.

Material	%C	Estado	Diámetro (mm)
LCA	0,05	tref.+recocido	3,00
LCD	0,05	trefilado	3,08
HCA	0,7	tref.+recocido	3,05
HCD	0,7	trefilado	3,05

Las propiedades mecánicas convencionales obtenidas por medio de ensayos cuasiestáticos de tracción simple se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas convencionales de los alambres estudiados. Cada valor es la media de cuatro ensayos.

Material	Límite elástico al 0,2%	Resistencia a tracción	Máxima deformación uniforme
LCA	210 MPa	294 Mpa	32,0 %
LCD	575 Mpa	578 Mpa	0,6 %
HCA	700 Mpa	1105 Mpa	7,8 %
HCD	1210 Mpa	1495 Mpa	2,7 %

Los resultados indican que el tratamiento de recocido después de la primera parte del proceso y previa al trefilado posterior aumenta la ductilidad del acero – hecho especialmente notorio en el acero de bajo contenido en carbono, donde la máxima deformación uniforme sube desde un 0,6% hasta un 32%– aunque disminuye de forma considerable tanto el límite elástico como la resistencia a tracción. El objetivo del tratamiento de recocido es restaurar la capacidad del

material para ser sometido a nuevas operaciones de trefilado con posterioridad. Al aumentar la ductilidad se minimiza el riesgo de rotura del alambre en un proceso multipaso con reducciones de sección elevadas.

### 2.2 Ensayos a alta velocidad de deformación

Los ensayos a altas velocidades de deformación se llevaron a cabo mediante la técnica experimental de la barra de Hopkinson. Esta técnica, ampliamente extendida, permite determinar la historia de tensiones y deformaciones, y a partir de ellas llegar a la curva tensión deformación del material a elevadas velocidades de deformación [11-12].

El equipo experimental de la barra de Hopkinson empleado, representado en la figura 1, consta de un cañón sobre el que desliza un proyectil propulsado por aire comprimido. Este impacta sobre la primera de las dos barras de acero, entre las que previamente se coloca la probeta. Las dos barras están instrumentadas mediante bandas extensométricas que son las encargadas de recoger las deformaciones que sufren.

El equipo experimental ha sido especialmente diseñado en el Departamento de Ciencia de Materiales para ensayar probetas de reducido tamaño. El proyectil utilizado es de acero de 8 mm de diámetro y 180 mm de longitud. Las barras, instrumentadas en su mitad, son del mismo material y diámetro y de 200 mm de longitud. El equipo permite ensayos de 40  $\mu$ s de duración a velocidades de deformación del orden de los 1000  $s^{-1}$ .



**Fig. 1.** Dispositivo experimental de los ensayos de compresión a alta velocidad de deformación en la barra de Hopkinson.

Las hipótesis del ensayo más importantes son el comportamiento elástico de las barras, la propagación de ondas unidimensional y equilibrio en la probeta [13]. Las señales procedentes de la barra incidente son la onda incidente sobre la probeta,  $\epsilon_i$  y la onda reflejada,  $\epsilon_r$ . La onda transmitida,  $\epsilon_t$ , se recoge en la barra

transmisora. El ensayo permite determinar la carga aplicada sobre cada extremo de la probeta y el desplazamiento relativo entre ambos extremos en cada instante. Estas fuerzas se pueden determinar mediante la teoría unidimensional de propagación de ondas elásticas a partir de las siguientes expresiones:

$$F_a = A_b E (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (1)$$

$$F_b = A_b E \varepsilon_t \quad (2)$$

donde  $A_b$  y  $E$  son la sección y el módulo de elasticidad de las barras y las variables  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_r$  y  $\varepsilon_t$  son las historias de las deformaciones correspondientes a la onda incidente generada en el impacto, la reflejada en la superficie de separación barra-probeta y la transmitida a la segunda barra. Cuando se alcanza el equilibrio en la probeta, la tensión soportada por la probeta puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{A_b}{A_p} E \varepsilon_t \quad (3)$$

donde  $A_p$  es la sección de la probeta. Las señales recogidas permiten además obtener las velocidades de los extremos de las barras, y por tanto los desplazamientos relativos de las mismas:

$$u_a = \int V_a dt = c \int (\varepsilon_i - \varepsilon_r) dt \quad (4)$$

$$u_b = \int V_b dt = c \int \varepsilon_t dt \quad (5)$$

por tanto, la deformación ingenieril que experimenta la probeta se puede obtener utilizando la siguiente expresión:

$$\varepsilon_p = \frac{u_a - u_b}{L} = \frac{c}{L} \int (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (6)$$

donde  $c$  representa la velocidad de propagación de las ondas elásticas en las barras y  $L$  la longitud inicial de la probeta. La velocidad de deformación durante el ensayo se obtiene a partir de:

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{c}{L} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (7)$$

Relacionando la historia de tensiones con la de deformaciones se determina la curva tensión-deformación. Se comprueba finalmente que la probeta alcanza el equilibrio en un tiempo suficientemente pequeño frente al tiempo de ensayo, para que el proceso pueda considerarse cuasiestático.

En los ensayos dinámicos se emplearon muestras de cada uno de los cuatro alambres estudiados. Cada una de las muestras era un pequeño cilindro de 4,5 mm de

altura y aproximadamente 3 mm de diámetro. En la figura 2 se muestra un detalle de la probeta (en el centro de la figura) situada entre las barras de carga.

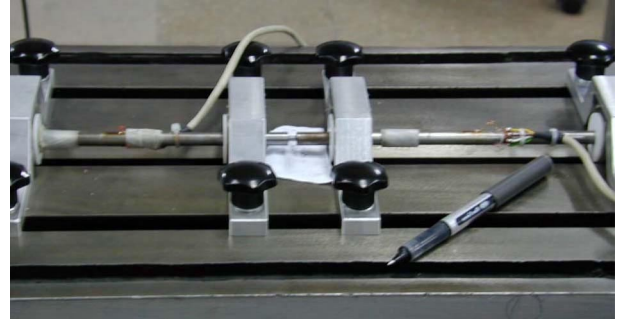


Fig. 2. Detalle de la colocación de la probeta.

### 3. RESULTADOS.

#### Ensayos

Se han realizado 5 ensayos de compresión en barra Hopkinson para cada uno de los cuatro alambres estudiados. La velocidad de deformación media obtenida estuvo comprendida entre los  $10^3 \text{ s}^{-1}$  y los  $3 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ . En las figuras 3 a 6 se muestran en trazo fino los resultados obtenidos en los ensayos dinámicos con la barra Hopkinson y en trazo grueso las curvas tensión-deformación correspondientes a los ensayos convencionales de tracción simple, para cada uno de los alambres estudiados.

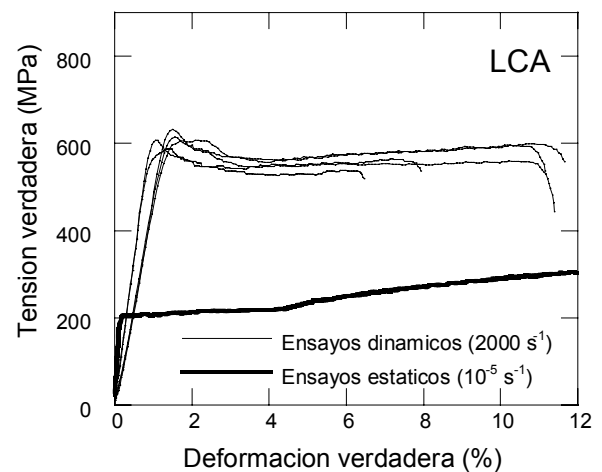


Fig. 3. Curvas tensión-deformación del alambre LCA.

### 4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que la influencia de la velocidad de deformación es muy apreciable en los alambres de bajo contenido en carbono. Así por ejemplo, como se ve en la Fig. 3, en el alambre recocido después del trefilado el límite elástico se triplica. En el caso del alambre simplemente trefilado el incremento del límite elástico se aproxima al 30% (Fig. 4).

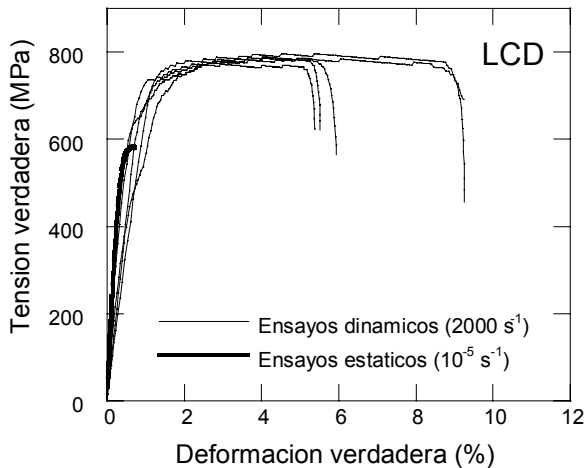


Fig. 4. Curvas tensión-deformación del alambre LCD.

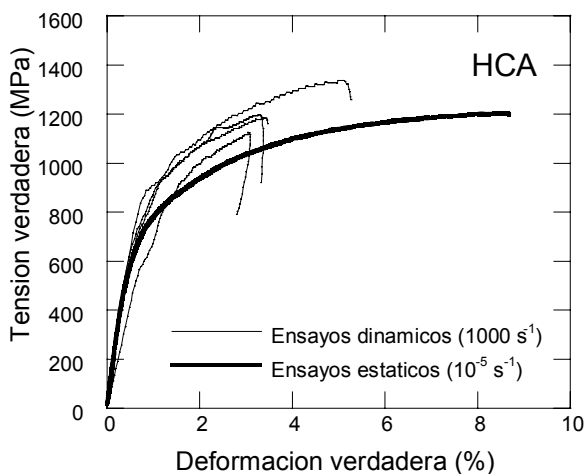


Fig. 5. Curvas tensión-deformación del alambre HCA.

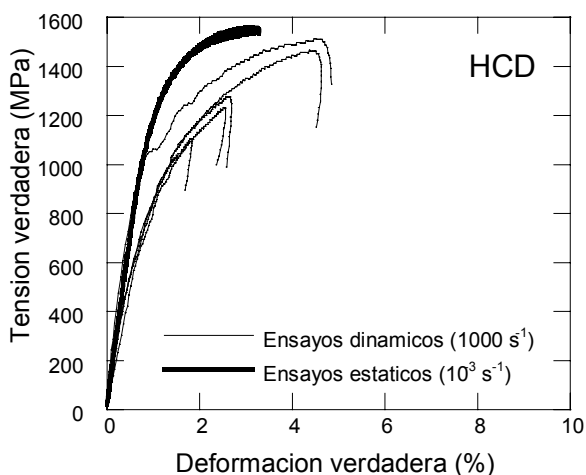


Fig. 6. Curvas tensión-deformación del alambre HCD.

Estos resultados concuerdan con los estudios de Tanimura et al. [14] y los datos experimentales aportados por Berbenni et al. [15]. En ambos trabajos se muestra que en los materiales con estructura BCC la influencia de la velocidad de deformación decrece con la deformación a la que el material está sometido. En el

caso del alambre de bajo contenido en carbono simplemente trefilado, el material ha sido sometido a una gran deformación plástica –la reducción de sección es casi de un 80%– por lo que es de esperar que sea menos sensible a la velocidad de deformación que el alambre recocido después del trefilado. En este último caso el material ha sido restaurado en sus propiedades mecánicas por el tratamiento térmico y ha perdido en cierta medida la memoria del proceso de trefilado.

En el caso de los aceros de alto contenido en carbono la influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico es menor. Así por ejemplo, en el alambre recocido después del trefilado el límite elástico aumenta un 20% en los ensayos dinámicos. Sin embargo, en el caso del alambre simplemente trefilado los resultados de los ensayos convencionales están ligeramente por encima de los correspondientes a los ensayos dinámicos.

En cualquier caso, parece claro que el comportamiento de los alambres a alta velocidad de deformación debe ser tenido en cuenta si se pretende estudiar el flujo del material durante el proceso de trefilado. Factores tan importantes como la fuerza de tirado, la lubricación y el coeficiente de rozamiento podrían verse afectados por el mismo.

## 5. CONCLUSIONES.

En este trabajo se ha realizado un estudio de la influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de cuatro tipos de alambres trefilados (de diferente composición y en diferentes etapas del proceso de conformado).

Los resultados obtenidos muestran que la velocidad de deformación influye en las propiedades mecánicas de los alambres de acero estudiados. Dicha influencia es mayor en los aceros de bajo contenido en carbono que en los de alto contenido en carbono.

Por tanto, parece que debe tenerse en cuenta el efecto de este parámetro para entender el flujo real del material y poder modelizar correctamente el proceso de trefilado, minimizando de paso el riesgo de rotura del alambre. No en vano en los procesos industriales puede llegarse a velocidades de deformación en el material del orden de  $1000 \text{ s}^{-1}$  e incluso  $10000 \text{ s}^{-1}$ . Los resultados preliminares de este trabajo evidencian el interés de un posterior estudio en mayor profundidad.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Persson, L., “Basic principles of wire drawing”, Wire Industry, **63**, 727-733, (octubre 1996).
- [2] Peter, H., “Developments and trends in wire drawing tools”, Wire Journal International, **24**, 53-56 (abril 1982).

- [3] Avitzur, B., "The use of the personal computer for simulation of the process of wire drawing and extrusion in an interactive, user-friendly mode". Wire Journal International, **23**, 48-60 (enero 1990).
- [4] Enghag, P.O., "Computer program for the calculation of drafting, drawing force and drawing power". Wire Industry, **64**, 570-577, (1997).
- [5] Vijayakar, S.S.y Starinshak, T.W., "Optimization of die geometry and drawing parameters in high strength cord production". Wire Journal International, **28**, 78-83, (noviembre 1995).
- [6] Godfrey, H., Richards, F.y Sason, S., "The benefits of using wire-drawing dies with smaller included angles and longer nibs". Wire Journal International, **33**, 102-113, (junio 2000).
- [7] Doege, E., Kroff, A. y Massai, A., "Stress and strain analysis of automated multistage fem-simulation of wire drawing consodering the backward force", Wire Journal International, **33**, 144-149 (mayo 2000).
- [8] Niedzwiedz, M. y Pyka, E., "Prediction of tensile strength of cold drawn wire", Wire World International, **24**, 53-56 (abril 1982).
- [9] Avitzur, B., "Flow through conical dies", Wire Industry, **56**, 243-249 (1989).
- [10] Pilarczyk, J.W., Pietrzyk, M., Dyja, H. y Golis, B., "Fem analysis of metal flow in hydrodynamic drawing of steel wires", Wire Journal International, **30**, 76-82 (noviembre 1997).
- [11] Kolsky H. "Stress waves in solids", Ed. Dover. (1963).
- [12] Davies, E.D.H. y Hunter, S.C., "The Dynamic Compression Testing of Solids by the Method of the Split Hopkinson Pressure Bar", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, **11**, 155-179 (1963).
- [13] Zukas J.A., Nicholas T., Swift H.F., Greszczuk L.B., y Curran D.R. "Impact Dynamics" Ed. John Willey and Sons (1982).
- [14] Tanimura, S., Mimura, K. y Zhu, W.H., "Practical constitutive models covering wide ranges of strain rates, strains and temperature", Key Engineering Materials, **177-180**, 189-200 (2000).
- [15] Berbenni, S., Favier, V., Cayssials, F., Lemoine, X. y Berveiller, M., "Self consistent modelling of the elastic-viscoplastic behaviour of low-carbon steels", Advances in mechanical behaviour, plasticity and damage, Proceedings of EUROMAT 2000 (2000).

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la empresa Bekaert por el material suministrado y a la Dirección General de Enseñanza Superior e Investigación Científica por la financiación recibida para esta investigación a través del proyecto 2FD97-1513-C03-01.