

# Variación de las constantes elastomecánicas del aluminio puro deformado en frío por estirado

M. Lucena<sup>(\*)</sup>, J.A. Benito<sup>(\*\*)</sup>, A. Roca<sup>(\*)</sup> y J. Jorba<sup>(\*\*)</sup>

**Resumen** Se ha determinado, a 298 K, la variación de las constantes elásticas de muestras policristalinas de aluminio puro (99,5 %) deformado en frío por estirado. El proceso de deformación se ha llevado a cabo en una máquina de tracción. Se han medido las siguientes propiedades: módulo de Young,  $E$ , coeficiente de Poisson,  $\nu$ , y límite elástico del 0,2 % ( $\sigma_{0,2}$ ). El valor del módulo de Young disminuye entre el 0 y 2,5 % de deformación (alargamiento porcentual) desde 70 GPa hasta 63 GPa y, después, se recupera alcanzando los valores del material original con el sucesivo trabajo en frío. Se ha observado un comportamiento similar para el coeficiente de Poisson, mientras que el límite elástico del 0,2 % se incrementa con el trabajo en frío, tal como cabía esperar. El comportamiento observado para el aluminio puro es similar al determinado previamente para el hierro puro (Armco) y para el acero F-1140 recocido.

Palabras clave: **Constantes elastomecánicas. Aluminio. Estirado en frío.**

## Changes in the elastomechanic constants of cold drawn pure aluminium

**Abstract** The changes in the elastic constants at 298 K of polycrystalline samples of pure aluminium (99.5 %) with different levels of cold-working have been determined. The deformation process has been carried out in a tension machine. The properties measured are: Young modulus,  $E$ , Poisson ratio,  $\nu$ , and yield strength,  $\sigma_{0,2}$ . The Young modulus diminishes from 70 to 63 GPa for 0 - 2.5 % deformation (elongation) and then increases with the successive cold-working passes. The Poisson ratio shows a similar behavior whereas the yield strength increases with cold-work. Pure aluminium behavior is similar to that obtained for pure iron (Armco) and for F-1140 annealed steel.

Keywords: **Elastic constants. Aluminium. Cold drawing.**

## 1. INTRODUCCIÓN

En un trabajo anterior (1) sobre la determinación de propiedades mecánicas de hierro Armco deformado por laminación en frío se ha comprobado que se produce un incremento de la dureza, del límite elástico y de la resistencia a la tracción con el grado de deformación, así como una disminución del alargamiento porcentual a rotura, comportamiento ampliamente aceptado y descrito en la bibliografía.

Asimismo, tanto el módulo de Young,  $E$ , como el coeficiente de Poisson,  $\nu$ , inicialmente disminuyen con la deformación en frío hasta un grado de reducción del 20 % para después aumentar, no superando los valores iniciales hasta reducciones superiores al 40 %. Igualmente, el módulo de rigidez calculado a partir de  $E$  y  $\nu$  sigue el mismo comportamiento, aunque las variaciones son inferiores en porcentaje. En trabajos posteriores (2 y 3), se ha estudiado la variación de las constantes elastomecánicas del hierro Armco y del acero F-1140 deformados en frío por estirado. Para ambos materiales, el límite elástico del 0,2 % se incrementa con el trabajo en frío, tal como cabía esperar. En cambio, el módulo de Young disminuye inicialmente con el porcentaje de

(\*) Dpt. d'Enginyeria Química i Metal·lúrgia, Facultat de Química, Martí i Franquès 1. 08028-Barcelona (España).

(\*\*) Dpt. de Mecànica Aplicada. E.U.E.T.I. Barcelona. Comte d'Urgell 187. 08036-Barcelona (España).

deformación alcanzándose un valor mínimo alrededor del 3 % de alargamiento y posteriormente aumenta para grados de deformación mayores, tendiendo al valor del módulo original. El coeficiente de Poisson muestra un comportamiento similar al del módulo de Young, existiendo una cierta dispersión en los valores obtenidos. Finalmente, el módulo de rigidez calculado sigue un comportamiento del mismo tipo, aunque la disminución es inferior en porcentaje. La variación del módulo de Young con el trabajo en frío ya ha sido observada (4-6) en aluminio, cobre, latón, níquel, etc., pero no existe información bibliográfica sobre el comportamiento del coeficiente de Poisson ni del módulo de rigidez.

El objetivo del presente trabajo es establecer el comportamiento de las propiedades mecánicas en función del grado de deformación en frío por estirado de un material de estructura cúbica centrada, y para ello se ha utilizado el aluminio puro (99,5 %) equivalente a UNE L-3051, y se han determinado el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y el límite elástico del 0,2 % ( $\sigma_{0,2}$ ) del citado material recocido y estirado a diferentes grados de deformación aplicados mediante la propia máquina de tracción.

## 2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de este trabajo, se ha utilizado una lámina de  $2.000 \times 1.000 \times 8$  mm de aluminio puro (UNE L-3051) obtenida por deformación plástica en frío. La caracterización química por FRX se incluye en la siguiente tabla:

- Elementos mayoritarios: Al
- Elementos minoritarios de 1<sup>er</sup> orden: —
- Elementos minoritarios de 2<sup>o</sup> orden: Fe, Si
- Trazas: Zn, Ti, Cu, Mn, V, Cr, Zr, Ca, Ni

De acuerdo con las especificaciones, la composición química cuantitativa es la siguiente:

0,32 % Fe; 0,09 % Si; 0,027 % Ti; < 0,04 % Zn; < 0,03 % Cu, Mn, Cr; < 0,02 % Mg; 0,1 % otros elementos. Base aluminio.

En la figura 1 se muestra la microestructura del material original (dirección longitudinal), en la que se observan los granos alargados en la dirección de laminación que indica la conformación por laminación en frío. Para determinar las propiedades mecánicas en estado de recocido, se han realizado una serie de estudios previos con el fin de elegir las condiciones óptimas del tratamiento térmico. El intervalo de temperatura estudiado ha sido 300-400 °C, y los mejores resultados se han obtenido con un tratamiento a 400 °C durante 2 h. La correspondiente micrografía se muestra en la figura 2.

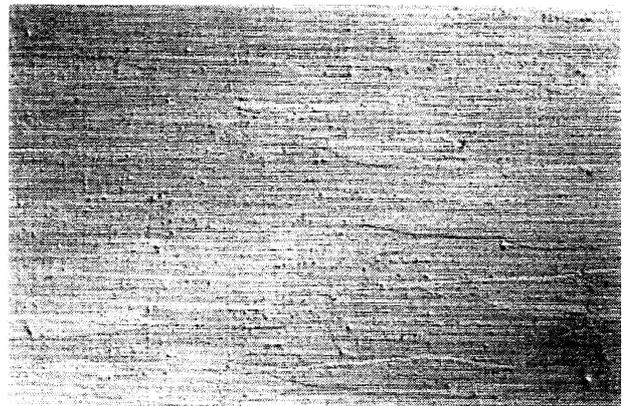


FIG. 1.— Microestructura del aluminio original. (Sección longitudinal)  $\times 50$

*FIG. 1.— Microstructure of the original aluminium. (Longitudinal section)  $\times 50$*

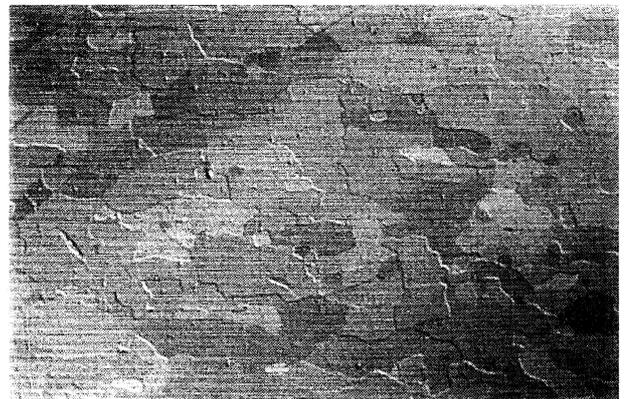


FIG. 2.— Microestructura del aluminio recocido (Sección longitudinal)  $\times 50$

*FIG. 2.— Microstructure of the annealed aluminium (Longitudinal section)  $\times 50$*

Para determinar las propiedades mecánicas del aluminio en estado de recocido y en los distintos estados de deformación obtenidos por estirado se ha utilizado una máquina universal de ensayos servocontrolada con una capacidad de carga de 100 kN. En la figura 3 se presenta el esquema de trabajo utilizado para determinar las propiedades mecánicas del material original y deformado. La medición simultánea de las deformaciones en las direcciones axial y transversal se ha llevado a cabo por extensometría eléctrica utilizando galgas extensométricas a 90°. Para el diseño de las probetas, se ha seguido lo establecido en la norma UNE 7-474-92, correspondiente a la norma europea EN 10002-1. Las probetas se han diseñado con una sección rectangular según el anexo C de dicha norma. En cada una de las rampas ensayadas, se ha determinado el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y el límite elástico del 0,2 %.

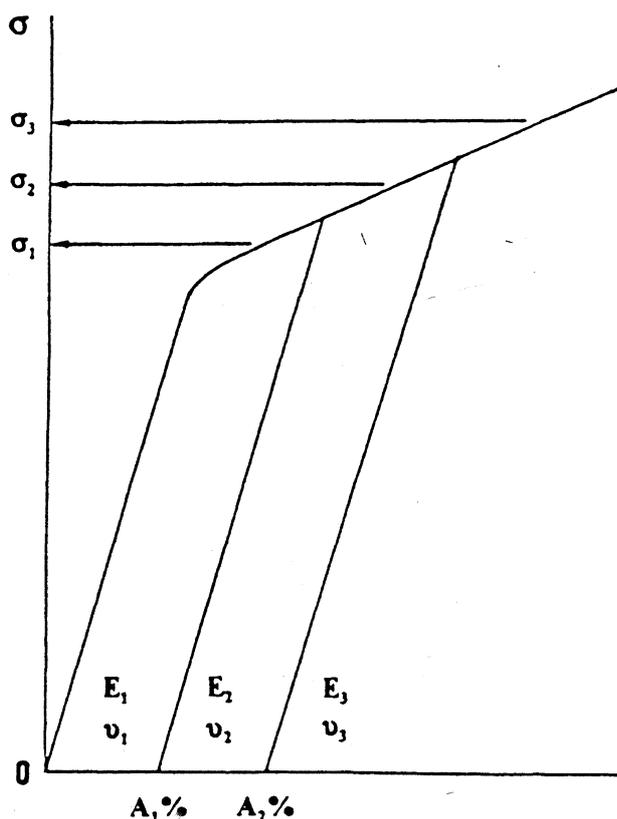


FIG. 3.— Procedimiento experimental.

FIG. 3.— Experimental procedure.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Determinación de las propiedades mecánicas

En las tablas I-IV, se presentan los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades mecánicas citadas para las probetas 1-3, 4, 2 y 5, respectivamente. Se indican los alargamientos porcentuales al inicio de cada una de las rampas.

En la figura 4 se representan los valores del módulo de Young obtenidos para todas las probetas estudiadas.

TABLA I.— Parámetros mecánicos del ensayo de tracción de aluminio puro en función del porcentaje de alargamiento. Probetas 1 y 3

TABLE I.— Mechanical parameters of the tensile test of pure aluminium vs elongation percentage. Samples 1 and 3

	P-1	0 %	1,5 %	3,8 %	P-3	1,5 %	2,5 %
E (GPa)		69	66	62		65	62
$\nu$		0,34	0,28	—		0,31	0,30
$\sigma_{0,2}$ (MPa)		30	45	55		44	49

TABLA II.— Parámetros mecánicos del ensayo de tracción de aluminio puro en función del porcentaje de alargamiento. Probeta 4

TABLE II.— Mechanical parameters of the tensile test of pure aluminium vs elongation percentage. Sample 4

	0 %	1,3 %	2,5 %	3,5 %
E (GPa)	71	65	65	64
$\nu$	0,29	0,30	0,29	0,28
$\sigma_{0,2}$ (MPa)	31	45	51	54

De los resultados obtenidos se desprende que el límite elástico del 0,2 % es de 30 MPa en el material recocido (0 % de alargamiento) y que se incrementa, tal como describe la bibliografía consultada, con el grado de deformación, desde este valor inicial hasta 53-55 MPa para un alargamiento porcentual del material del 3,5 y hasta 69 MPa para un alargamiento del 12,5 %.

El módulo de Young disminuye inicialmente con el grado de deformación, encontrándose un valor mínimo para alargamientos entre el 2,5 y el 3,8 %. El valor mínimo oscila entre 62 y 65 GPa, según la probeta ensayada. La variación respecto al valor inicial oscila entre el 6 y el 10 %. A partir de estos valores, el módulo de Young se recupera, tendiendo a alcanzar el valor del material recocido. El coeficiente de Poisson sigue un comportamiento similar al del módulo de Young, aunque los valores determinados presentan una apreciable dispersión.

TABLA III.— Parámetros mecánicos del ensayo de tracción de aluminio puro en función del porcentaje de alargamiento. Probeta 2

TABLE III.— Mechanical parameters of the tensile test of pure aluminium vs elongation percentage. Sample 2

	0 %	1,6 %	2,5 %	3,5 %	4,3 %	4,9 %	6,0 %	10 %	12,5 %
E (GPa)	69	66	63	64	65	68	65	68	67
$\nu$	0,33	0,30	0,33	0,31	0,30	0,31	0,31	0,32	0,31
$\sigma_{0,2}$ (MPa)	—	45	51	53	55	57	59	67	69

TABLA IV.- Parámetros mecánicos del ensayo de tracción de aluminio puro en función del porcentaje de alargamiento. Probeta 5

TABLE IV.- Mechanical parameters of the tensile test of pure aluminium vs elongation percentage. Sample 5

	0 %	1,5 %	2,5 %	3,5 %	4,5 %	5,5 %	7,2 %
E (GPa)	69	65	65	65	66	68	67
$\nu$	0,30	0,29	0,29	0,27	0,29	-	-
$\sigma_{0,2}$ (MPa)	23	41	46	50	53	56	60

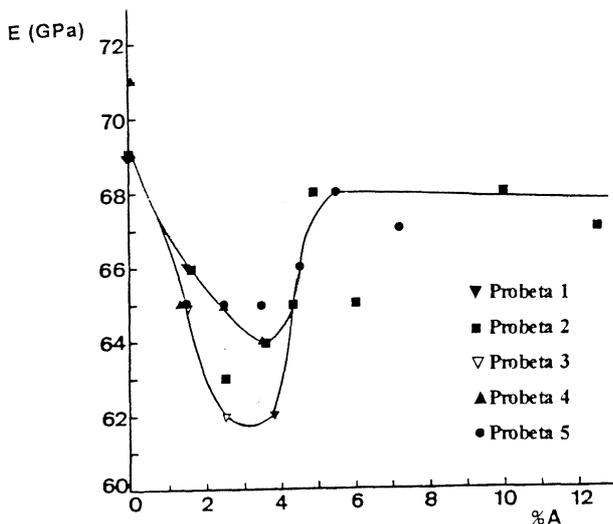


FIG. 4.- Variación del módulo de Young con el trabajo en frío por estirado.

FIG. 4.- Variation of the Young's modulus with cold-working by drawing.

De los resultados anteriores, puede deducirse que el comportamiento de las constantes elastomecánicas del aluminio puro sometido a distintos grados de reducción por estirado es idéntico al observado en los trabajos anteriores realizados sobre hierro Armco deformado en frío por laminación (1), y hierro Armco y acero F-1140 deformados en frío por estirado mediante la máquina de tracción (2 y 3). Es decir, existe una disminución de las constantes elastomecánicas hasta alcanzar un valor mínimo, y un posterior incremento con el grado de deformación obtenido en las sucesivas reducciones. Además, el grado de alargamiento que corresponde al mínimo del módulo en el aluminio (2,5-3,8 %) coincide con el intervalo de alargamiento obtenido en el hierro Armco y el acero F-1140 deformados por estirado (2,5-3,5 %). En todos los casos, el valor de la deformación plástica equivalente (7) correspondiente a este intervalo (0,0247-0,0373) es muy distinto del valor de deformación correspondiente al valor mínimo del módulo para el hierro Armco deformado por laminación (0,166).

En relación con el cambio en el módulo de Young con el trabajado en frío, Kawai (5) efectuó

un exhaustivo estudio del cambio de este parámetro en distintos materiales, atribuyendo el descenso del módulo al incremento de las tensiones internas, y la recuperación del mismo a la texturización del material. Ledbetter y Kim (6) encuentran este mismo comportamiento en cobre policristalino y atribuyen el descenso del módulo al incremento en la densidad de las dislocaciones libres y su recuperación a la texturización del material. Drapkin *et al.* (8) indican que, para el hierro Armco sometido a fricción, se incrementan la densidad de las dislocaciones a nivel superficial, de lo que resulta una progresiva disminución del módulo de Young de la superficie del material hasta un 70 % de su valor original. De hecho, según Dieter (7), puede empezar a detectarse la orientación preferente para grados de reducción del 20 al 30 %, aunque ésta no se completa hasta el 80-90 %. En estudios preliminares sobre laminación de hierro Armco llevados a cabo en la actualidad por nuestro equipo de investigación (9), se pone de manifiesto que la texturización del material no puede ser responsable de la disminución del módulo de Young, así como de su recuperación hasta el valor original, dado que el proceso de texturización sólo se detecta significativamente para un grado de deformación del 60 % (deformación plástica equivalente de  $\epsilon = 0,429$ ).

#### Agradecimiento

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Sra. Esther Vilalta por su colaboración en los estudios de microscopía óptica de reflexión.

#### REFERENCIAS

- (1) BENITO, J.A., CALLE, J., ROCA, A. y JORBA, J. Propiedades mecánicas de hierro Armco deformado en frío. V Cong. Nac. de Propiedades Mecánicas de Sólidos, E.T.S.I.I. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Jul. 1996: 320-325.
- (2) CALLE, J., BENITO, J.A., JORBA, J. y ROCA, A. Propiedades mecánicas del acero F-1140 deformado en frío. V Cong. Nac. de Propiedades Mecánicas de Sólidos, E.T.S.I.I. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Jul. 1996: 314-319.
- (3) CALLE, J., BENITO, J., JORBA, J. y ROCA, A. Changes of the elastic constants for a carbon steel and iron deformed by cold-working. I Trobada Transfronterera sobre la Mecànica i la Física dels Materials Bifàsics. Xarxa Temàtica de Propietats Mecàniques dels Materials. E.T.S.I.I. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Jul. 1997: 193-198.
- (4) MACK, D.J. Young Modulus. Its Metallurgical Aspects. Trans. AIME, 166, 1946, 68-85.
- (5) KAWAI, T. Effect of cold-working on Young's modulus of elasticity. *Sci. Repts. Tohoku Imp. Univ.* 19, 1930: 209-234.
- (6) LEDBETTER, H.M. y KIM, S.A. Low temperature elastic constants of deformed polycrystalline copper. *Mater. Sci. Eng.* 101, 1988, 87-92.
- (7) DIETER, G.E. Mechanical Metallurgy. 3ª. Ed. McGraw-Hill Co., Nueva York (EE.UU.). 1986: 88 y 238.
- (8) DRAPKIN, B.M., ZAMIATIN, Y.P., VINOGRADOV, V.E. y ZAMIATINA, L.A. Effects of plastic deformation on Young's modulus. *Fiz. Khim. Obrab. Mater.*, 4, 1988: 127-131.
- (9) BENITO, J.A., JORBA, J. y ROCA, A. Trabajo no publicado. 1997.