

INCREMENTO TÉRMICO ASOCIADO A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE PROBETAS METÁLICAS

R Guzmán y J.L. Pérez Castellanos

¹Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
 Universidad Carlos III de Madrid
 Avda. de la Universidad 30
 28911 Leganés, Madrid, España
 E-mail: percaste@ing.uc3m.es

RESUMEN

La relación constitutiva de un material metálico muestra la tensión como función de la deformación, la velocidad de deformación, la temperatura y, en general, de otras variables termomecánicas. La relación constitutiva incluye coeficientes y exponentes que, generalmente, se determinan mediante ajuste de la relación tensión-deformación obtenida en ensayos experimentales.

En un material que se deforma plásticamente, parte del trabajo de deformación plástica se convierte en calor. En ensayos a alta velocidad de deformación, en los que se asume la hipótesis de adiabaticidad, la ecuación de balance térmico permite obtener directamente el calor generado por integración de la energía de deformación plástica.

El objetivo de este trabajo es presentar un procedimiento de ensayo de compresión con medida sincronizada del incremento de temperatura en la superficie de la probeta y su aplicación a la determinación de los parámetros de la relación constitutiva.

ABSTRACT

The constitutive relation of a metallic material shows the stress as function of the plastic strain, the strain rate, the temperature and, possibly, other thermo-mechanical variables. The constitutive relation usually includes parameters as coefficients or exponents that usually are determined by adjusting of the true stress-true strain relation obtained in experimental tests.

During plastic straining, part of the strain energy is dissipated as heat. If the strain process takes place at high strain rate, this heating process can be considered adiabatic which, by means of the corresponding heat balance equation, allows for direct calculation of the heat generated as a function of plastic strain energy.

The main objective of this work is to present a compressive testing procedure with a synchronized measure of temperature increment in the specimen surface and its application to the constitutive relation parameters determination.

Keywords: *Constitutive equation, infrared thermography, plastic strain, temperature increment, emissivity, Hopkinson Bar, strain rate*

1. INTRODUCCION

1.1 Deformación plástica e incremento térmico

Para un material elasto-plástico que se deforma en condición uniaxial la ecuación que representa el balance de temperatura es

$$\lambda \nabla^2 T - \dot{T} = -\frac{\beta}{\rho \cdot C_p} \sigma \cdot \dot{\epsilon}^p + \frac{\alpha}{\rho \cdot C_p} \frac{E}{(1-2\nu)} T \dot{\epsilon}_{kk}^e \quad (1)$$

donde

- \dot{T} es la tasa de variación de la temperatura por unidad de volumen

- $\lambda \nabla^2 T$ es la pérdida de temperatura por conductividad
- $\frac{\alpha}{\rho \cdot C_p} \frac{E}{(1-2\nu)} T \dot{\epsilon}_{kk}^e$ es la variación de temperatura (reversible) asociada a la deformación elástica
- β es el parámetro de Quinney-Taylor que representa la proporción de energía de deformación plástica que se convierte en calor generado
- $\frac{\beta}{\rho \cdot C_p} \sigma \cdot \dot{\epsilon}^p$ es la variación de temperatura (irreversible) asociada a la deformación plástica.

En condiciones de alta velocidad de deformación, puede suponerse un proceso de deformación adiabático, $k\nabla^2 T = 0$; si, además, se desprecia el efecto termoelástico,

$$\frac{\alpha}{\rho \cdot C_p} \frac{E}{(1-2\nu)} T_0 \dot{\epsilon}_{kk}^e \quad (2)$$

la ecuación (1) pasa a ser:

$$\dot{T} = \frac{\beta}{\rho \cdot C_p} \sigma \cdot \dot{\epsilon}^p \quad (3)$$

Por integración de la expresión anterior, se obtiene el incremento de temperatura como función de la deformación plástica alcanzada

$$\Delta T(\epsilon_0^p) = \int_0^{\epsilon_0^p} \frac{\beta}{\rho \cdot C_p} \sigma \cdot d\epsilon^p \quad (4)$$

Es usual considerar el coeficiente β constante; sin embargo, es un hecho constatado que β depende de la deformación plástica. Diferentes modelos se han propuesto para tener en cuenta esta dependencia. Entre otros investigadores, Zehnder et al. [1], propuso un modelo basado en el cálculo de la energía por unidad de densidad de dislocaciones. Para un material con una relación constitutiva de tipo potencial, el coeficiente β es una función de la deformación plástica ϵ^p y del exponente de endurecimiento n :

$$\beta = 1 - n \left(\frac{\epsilon^p}{\epsilon_0} \right)^{n-1} \quad (5)$$

1.2 Medición de la temperatura

Existen al menos dos técnicas para medir el calor generado durante el proceso de deformación plástica de materiales metálicos. La primera de ellas es la que se basa en el uso de termopares de respuesta rápida conectadas a la probeta que se ensaya [2]. La segunda se basa en la medición de la radiación térmica que emite la probeta [3] al deformarse y que corresponde al campo de temperatura en la superficie del material; cuando esta técnica se lleva a cabo con una cámara de infrarrojos, se la denomina *termografía infrarroja* [4]. Esta técnica es la que ha sido utilizada en este trabajo.

La termografía infrarroja (TIR) ha sido frecuentemente utilizada para medir el incremento de temperatura asociado a la deformación plástica en materiales metálicos. Así, Manson et al. [5], Kappor et al. [6] y Trojanowski et al. [7] han medido el incremento de temperatura en ensayos de compresión en barra

Hopkinson. Gadaj et al. [8], Nowacky et al [9] y Rusinek et al. [10] utilizaron la TIR en ensayos de cortadura a alta velocidad de deformación. Hartley et al. [11] llevaron a cabo ensayos en barra Hopkinson de torsión con medida simultánea del incremento de temperatura. Probetas de aleaciones de Titanio han sido ensayadas en barra Hopkinson de tracción por MacDougall et al. [12] midiendo el incremento térmico con un radiómetro de infrarrojos. Guzmán et al. [13] han desarrollado un procedimiento de ensayo en barra Hopkinson con medida simultánea del incremento térmico mediante TIR.

Walley et al. [14] ha hecho un estudio comparativo de ambas técnicas concluyendo en la fiabilidad de los termopares pero en su difícil uso en ensayos dinámicos debido a su inercia térmica.

2 SISTEMA DE ENSAYO

Se describe a continuación un sistema para ensayar materiales en compresión y en el que simultáneamente se mide el incremento de temperatura asociado a la deformación plástica. Los principales elementos del sistema son los siguientes.

Máquina de ensayo

En los ensayos cuasi-estáticos se ha utilizado un máquina universal de ensayos marca Instron.

En los ensayos dinámicos se ha utilizado una barra Hopkinson de compresión (SHPB), aparato que consta de dos barras coaxiales (barra incidente y barra transmisora) entre las cuales se coloca la probeta del material a ensayar. Un proyectil cilíndrico del mismo material, con la misma sección que las barras y coaxial con éstas es acelerado con aire comprimido hasta que golpea en el extremo libre de la barra incidente. Como resultado del impacto, un pulso de compresión se propaga por la barra incidente hasta alcanzar la probeta instante en el que se divide, en contacto con la barra transmisora en una onda reflejada y en una transmitida a través de la barra transmisora. Dos bandas extensométricas adheridas respectivamente a la barra incidente y transmisora registran las ondas de tensión en las barras en forma de variaciones de voltaje, $V_o(t)$. El voltaje registrado se relaciona con el pulso de deformación, $e(t)$, (incidente, e_i , transmitido, e_t y reflejado, e_r) en la expresión:

$$V_o = G V_e \frac{K}{2} (1 - \nu) e \quad (6)$$

siendo G el factor de ganancia, K el factor de galga y ν el coeficiente de Poisson del material de las barras. A partir de estos pulsos de deformación, la deformación,

e_s , la velocidad de deformación, \dot{e}_s , y la tensión en el material, S_s , pueden calcularse utilizando las expresiones que ofrece la teoría de ondas unidimensionales

$$e_s = \frac{2c}{L} \int_0^t e_r \cdot dt; \dot{e}_s = \frac{2c}{L} e_r; s_s = E \frac{A}{A_s} e_r \quad (7)$$

siendo c la velocidad de las ondas elásticas en el material, A_s la sección inicial de la barra, A el área de la barra, L la longitud inicial de la probeta y E el módulo de Young del material de la barra. Finalmente, la tensión, σ , y la deformación verdaderas, ε , pueden obtenerse, respectivamente, mediante las expresiones $\sigma = s(1+e)$, $\varepsilon = \ln(1+e)$.

Cámara de infrarrojos (CIR)

Para medir el incremento de temperatura en la probeta durante el ensayo se ha utilizado una cámara de infrarrojos Thermosensorik CMT 384 M. Previamente a los ensayos, la cámara fue calibrada.

Cámara de ensayo

La probeta unida a la barra Hopkinson (o a los actuadores de La máquina Instron) se coloca en una cámara de ensayo cuya misión es aislarla de radiaciones externas espurias de tal modo que la CIR mida solamente su radiación térmica. En el interior de la cámara se han dispuesto unas resistencias eléctricas controlables mediante termopares; mediante estas resistencias se calienta la probeta en ensayos a alta temperatura.

Cámara oscura

Esta cámara, que está conectada con la cámara de ensayo, fue diseñada teniendo en cuenta la distancia focal de trabajo de la CIR. En la figura 1 puede verse una fotografía del conjunto de las cámaras de ensayo y oscura montadas sobre la barra Hopkinson.



Figura 1

Sistema de sincronismo

Un aspecto fundamental del sistema de ensayo es el sincronismo entre el disparo de la SHPB y el comienzo de la toma de imágenes por la CIR. Han de tenerse en cuenta tanto los tiempos que la onda tarda en recorrer los elementos mecánicos de la SHPB como el tiempo consumido en la toma de una imagen y el espaciamiento entre tomas así como otros retardos del sistema. Este sincronismo se consigue mediante un trigger y un sistema especialmente diseñado basado de fibra óptica.

3 ENSAYOS Y RESULTADOS

3.1 Material

Se ha aplicado la técnica de ensayo descrita a varios materiales como, por ejemplo, la aleación de Magnesio ZC71, un compuesto de base la aleación anterior y refuerzo cerámico (SiC, 12%vol) y la aleación de aluminio Al6082.

En todos los casos, se llevaron a cabo ensayos previos para determinar la emisividad del material. Una probeta con un termopar insertado en un taladro radial y cubierta de humo de vela se colocó sobre la superficie de una placa de calentamiento donde fue calentada suavemente desde la temperatura ambiente. Durante el proceso de calentamiento se registraron de forma continua la temperatura captada por el termopar, TC, y la medida por la CIR. Comparando ambas temperaturas se obtuvo la emisividad del material. Los valores resultantes fueron los siguientes; para la aleación de Mg y para el compuesto de base Mg, 0.8, y para la aleación de aluminio, 0.95.

3.2 Ensayos

En primer lugar se llevaron a cabo ensayos de compresión estática. En estos ensayos se observan oscilaciones periódicas de pequeña amplitud en el incremento de temperatura medido, oscilaciones que se corresponden con oscilaciones del mismo período en las curvas tensión-tiempo y deformación-tiempo. Estas oscilaciones probablemente se deben a discontinuidades en el proceso de deformación asociadas a la formación de bandas de cortante en la superficie de la probeta.

Se han realizado, también, ensayos de compresión dinámica obteniéndose en cada uno de ellos tanto la relación tensión verdadera-deformación verdadera como una colección de imágenes de temperatura sucesivas. Tanto en ensayos estáticos como dinámicos, una vez obtenidas, las imágenes fueron tratadas para obtener los mapas de temperatura durante el ensayo. La figura 2 muestra cuatro perfiles de incremento de temperatura obtenidos en el mismo ensayo en

diferentes instantes de tiempo. Cada perfil corresponde a la temperatura en la probeta y en parte de ambas barras siendo su ancho total la dimensión horizontal de la ventana utilizada. Dado que durante el ensayo la probeta se mueve ligeramente en el sentido del impacto (de derecha a izquierda), los perfiles se muestran progresivamente desplazados hacia la izquierda; la primera imagen obtenida es pues la que se encuentra más a la derecha en la figura 2. Puede observarse cómo la temperatura se eleva en la probeta conforme progresa el ensayo.

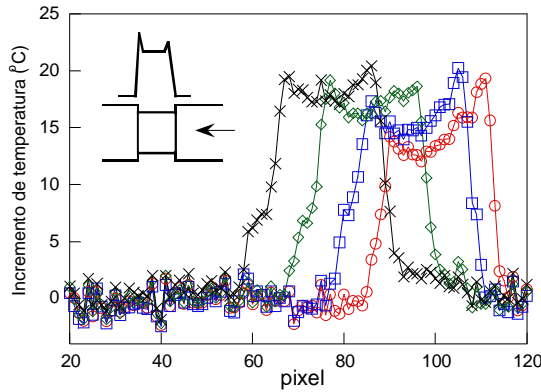


Figura 2

3.3 Influencia de la lubricación

Tanto en ensayos estáticos como dinámicos, el uso de lubricante entre probeta y máquina produce en todos los casos un aumento de alrededor de 1° C en el incremento de temperatura. Esta diferencia es debida, probablemente, al hecho de que la presencia de lubricante facilita la deformación de la probeta en la dirección radial.

3.4 Efecto termoelástico

En ensayos dinámicos de alguno de los materiales estudiados, el ΔT correspondiente a la deformación máxima (última imagen de la CIR durante el proceso de deformación) resultó ligeramente mayor que el ΔT obtenido en la siguiente imagen de la CIR (finalizado el proceso de deformación y cuando aún no se ha producido evacuación de calor al entorno). La diferencia entre ambos incrementos coincide sensiblemente con el incremento térmico asociado a la deformación elástica, $\frac{\alpha}{\rho C_p} \frac{E}{(1-2\nu)} T \dot{\epsilon}^e$. Finalizado

pues el proceso de deformación y anulada la deformación elástica, el carácter de reversible del incremento térmico asociado a esta deformación, da lugar a que se modifique la temperatura medida por la CIR. Este hecho lleva a la conclusión de que la hipótesis de no consideración del incremento térmico asociado a la deformación elástica, que conduce a la ecuación (4), debe ser ratificada en cada caso.

4 CALIBRACIÓN DE ECUACIONES CONSTITUTIVAS

Se plantea, a continuación, un procedimiento para la calibración de relaciones constitutivas basado en la medición del incremento térmico por deformación. Considérese una relación constitutiva para un material metálico

$$\sigma = \sigma(\epsilon^p, \dot{\epsilon}, T; p_1, \dots, p_n) \quad (9)$$

Aceptando la hipótesis de un proceso adiabático de deformación, el incremento de temperatura en el material, ΔT , correspondiente a la deformación plástica alcanzada, ϵ_0^p , en un ensayo a temperatura T_0 y en el que se alcanzó una velocidad de deformación $\dot{\epsilon}_0$ se obtiene por integración (4) en el intervalo $[0, \epsilon_0^p]$ de la energía de deformación plástica afectada del coeficiente de Quinney-Taylor, $\beta(\epsilon^p)$. En esta integral la expresión utilizada para σ como función de la deformación plástica es la propuesta en (9). La integral (4) resulta entonces igual a una expresión de los parámetros (coeficientes y exponentes) de (9)

$$\Delta T_c(\epsilon_0^p, \dot{\epsilon}_0, T_0; p_1, \dots, p_n) \quad (10)$$

Igualando el incremento de temperatura calculado al medido se obtiene una ecuación que incluye como variables los parámetros de la relación constitutiva p_1, \dots, p_n

$$\Delta T_m = \Delta T_c(\epsilon_0^p, \dot{\epsilon}_0, T_0; p_1, \dots, p_n) \quad (11)$$

Realizando diferentes ensayos en los que de uno a otro se varía la temperatura del ensayo así como la velocidad de deformación alcanzada pueden obtenerse ecuaciones como la (11). En un mismo ensayo pueden considerarse, también, diferentes valores de la temperatura alcanzada y de la correspondiente deformación plástica dando lugar a ecuaciones diferentes. Resolviendo el sistema de ecuaciones resultante se obtienen los valores de los parámetros de la relación constitutiva (9).

El procedimiento descrito ha sido aplicado a la determinación de los parámetros de la conocida relación constitutiva de Johnson-Cook modificada.

$$\sigma = \left(A + B \epsilon^{p_n} \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (12)$$

siendo

$$T^* = \frac{T - T_{amb}}{T_{fus} - T_{amb}} \quad (13)$$

Esta relación constitutiva incluye cinco parámetros que han de ser determinados: A, B, C, n y m.

Como ejemplo se muestra, los resultados de aplicación de este procedimiento para la determinación de los valores de estos parámetros de la aleación de aluminio Al6082. Como expresión del coeficiente de Quinney-Taylor, $\beta(\epsilon^p)$ se ha utilizado la propuesta por Zehnder. Dado que la velocidad de deformación durante el ensayo es prácticamente constante y el incremento de

temperatura es pequeño, tanto el factor $\left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}\right)$

como el factor $(1 - T^{*m})$ pueden ser sacados fuera de la integral. Como resultado, la expresión (4) pasa a ser

$$\Delta T(\epsilon^p) = \frac{\left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}\right) (1 - T^{*m})}{\rho C_p} \int_0^{\epsilon^p} \left(1 - n \left(\frac{\epsilon^p}{\epsilon_0}\right)^{n-1}\right) (A + B \epsilon^{p,n}) H \epsilon^p \quad (14)$$

Se llevaron a cabo ensayos en barra Hopkinson (tabla 1) a diferente temperatura y velocidad de deformación (determinadas por el operador). En cada uno de ellos se midieron varios incrementos de temperatura pudiendo relacionar cada uno de ellos con el valor de la deformación plástica alcanzada mediante el sistema de sincronismo.

Tabla 1.- Datos de los ensayos

Ensayo	Vel. def. (s ⁻¹)	Temp. del ensayo (°C)
1	280	23
2	570	23
3	570	100
4	1050	23
5	1050	23
6	1050	100

La tabla 2 muestra, para cada ensayo el valor del incremento de temperatura medido y el de la correspondiente deformación plástica alcanzada

Tabla 1.- Resultados de los ensayos

Ensayo	ΔT medido (°C)	Def. plástica
1	7	0.01
2	10	0.06
3	11	0.09
4	12	0.06
5	17	0.12
6	13	0.13

Estos valores fueron sustituidos, para cada ensayo, en la expresión (14) obteniendo una ecuación con cinco variables (los parámetros A, B, C, n y m). Aplicando el método de Newton-Raphson al sistema resultante se obtuvo la mejor solución para el sistema algebraico resultante (seis ecuaciones y cinco incógnitas). Reemplazando los valores de los parámetros en la expresión (12), la relación constitutiva resulta

$$\sigma = (260 + 285 \epsilon^{p,0.5}) \left(1 + 0,005 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{1}\right) (1 - T^{*1.7}) \quad (15)$$

Como clara consecuencia de que la aleación de aluminio ensayada tiene una baja dependencia de la velocidad de deformación, el coeficiente C resulta muy pequeño.

Los parámetros de la relación constitutiva fueron también obtenidos ajustando por mínimos cuadrados las relaciones tensión verdadera-deformación verdadera obtenidas en los ensayos. Los valores resultantes son muy similares a los obtenidos aplicando el procedimiento propuesto.

$$\sigma = (265 + 275 \epsilon^{p,0.475}) \left(1 + 0,032 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{1}\right) (1 - T^{*1.58}) \quad (16)$$

La mayor diferencia encontrada fue en el parámetro C lo que, obviamente, se debe a su pequeño valor.

4. CONCLUSIONES

El uso de la termografía infrarroja posibilita la medición del incremento térmico asociado con la deformación plástica alcanzada por un material en un ensayo de compresión.

Establecer la correspondencia entre temperatura y deformación ha requerido definir y construir un sistema que garantice el sincronismo entre el ensayo mecánico y la adquisición de datos por la CIR, especialmente en ensayos a alta velocidad de deformación. Para ello se han identificado y cuantificado los intervalos de tiempo tanto mecánicos como electrónicos que intervienen en el ensayo. Este sistema es especialmente importante en el caso de los ensayos dinámicos.

Utilizando este sistema y el correspondiente procedimiento operativo, se han llevado a cabo mediciones del incremento térmico asociado a la deformación plástica en ensayos estáticos y dinámicos de diferentes materiales pudiéndose asociar la temperatura medida con la deformación plástica.

Como una posible aplicación del sistema, se ha definido un procedimiento para la determinación de los parámetros de la relación constitutiva del material ensayado. Este procedimiento se ha aplicado al caso de la relación constitutiva de Johnson-Cook modificada.

El procedimiento se basa en igualar la temperatura medida en un ensayo con la calculada por integración de la energía de deformación plástica afectada del coeficiente de Quinney-Taylor. La temperatura calculada es una expresión analítica en la que aparecen como variables los parámetros de la relación constitutiva. Como expresión del coeficiente de Quinney-Taylor se ha utilizado la propuesta por Zehnder.

Realizando ensayos a diferentes temperaturas y velocidades de deformación o igualando la temperatura medida con la calculada para un cierto valor de la deformación plástica, se obtienen ecuaciones que constituyen un sistema cuya solución numérica es una estimación de los valores de los parámetros de la relación constitutiva.

Los valores de los parámetros así obtenidos son muy similares a los que resultan del ajuste de las relaciones tensión verdadera-deformación verdadera obtenidas en los ensayos.

El incremento de temperatura es, pues, una variable observable que puede ser utilizada para la determinación de los parámetros de la relación constitutiva de un material metálico.

REFERENCIAS

- [1] Zehnder A.T., 1991, "A Model for the Heating Due to Plastic Work", *Mechanics Research Communications*, Vol 18, 23-28.
- [2] Rittel, D., "Transient temperature measurement using embedded thermocouples." *Exp. Mech.*, 38 (2), 73±79, 1998.
- [3] Y. Rabin and D. Rittel, "Infrared temperature sensing of mechanically loaded specimens: Thermal Analysis", *Exp. Mech.*, pp 197-202, 2000.
- [4] D.P. Dewitt y Gene D. Nutter, "Theory and practice of Radiation Thermometry" A Wiley- Interscience Publication, 1988.
- [5] Manson, J.J., Rosakis, A. J. and Ravichandran (1994) On the strain and strain rate dependence of the fraction of plastic work converted to heat: an experimental study using high speed infrared detectors and the Kolsky bar. *Mechanics of Material* 17, 135-145.
- [6] Kappor, R., Sia Nemat-Nasser (1998) Determination of temperature rise during high strain rate deformation. *Mechanics of Material* 27, 1-12.
- [7] Trojanowski, A., Macdougall, D. and Harding, J. (1998) An improved technique for the experimental measurement of specimen surface temperature during Hopkinson-bar tests. *Mesurement Sci. Tech.* 9, 12-19.
- [8] Gadaj, S.P.; Nowacki, W.K. and Pieczyska, E.A. (1996) Changes of temperature during the simple shear test of stainless steel. *Archives of Mechanics* 48 (2), 779-788.
- [9] Nowacki W.K., Gadaj S.P. and Pieczyska E.A. Measurement of temperature during simple dynamic shear. *Center of Mechanics and information Technology*. 185-191.
- [10] Rusinek A., Nowacki W.K., Gadaj P. and Klepaczko J.R., 2003, "Measurement of temperature coupling by thermovision and constitutive relation at high strain rates for the dual phase sheet steel.", *Journal de Physique IV France* 110, pp 411-416
- [11] K. A. Hartley, J. Duffy, y R. H. Hawley, 1897, "Measurement of the temperature profile during shear band formation in steels deforming at high strain rate.", *Journal of the Mechanics and Physics*, Vo 35, No 3 pp 283-301.
- [12] MacDougall, D. and Harding, J. (1998) The measurement of specimen surface temperature in high-speed tension and torsion test. *Int. J. of Impact Enging.* 21(6), 473-488.
- [13] R. Guzmán, Y.E. Essa, J. Meléndez, J. Aranda, F. López y J. L. Pérez-Castellanos "Measurement of temperature increment in compressive quasi-static and dynamic tests using the infrared thermography", *Strain* 2007 In press
- [14] Walley, S.M., Pround, W.G., Rae, P.J. and Field, E. (2000) Comparison of two methods of measuring the rapid temperature rises in split Hopkinson bar specimens. *Review of Scientific Instruments* 71, 4, 1766-1777.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología la ayuda recibida a través del proyecto N° GR/MAT/0504/2004.