

## Propiedades mecánicas del corcho bajo la acción de tensiones de contacto

A.D. Parralejo\*, F. Guiberteau\*, M.A. Fortes\*\* y M.E. Rosa\*\*

**Resumen** En este trabajo nuestro interés se centra en el estudio de las propiedades mecánicas del corcho sometido a tensiones de contacto. Si bien numerosas aplicaciones de este curioso material están relacionadas con su respuesta mecánica frente a tensiones de contacto, este aspecto ha sido poco contemplado en la literatura científica sobre el tema. En este trabajo se propone la utilización de ensayos de indentación Hertz para dicho propósito. Utilizando esta metodología se ha investigado la influencia que tiene la estructura del corcho en sus propiedades mecánicas. Nuestros resultados revelan un claro efecto de anisotropía mecánica. Además, se ha estimado el módulo elástico correspondiente a direcciones determinadas. Entre las ventajas de la metodología propuesta destacaremos su simplicidad y carácter local, que la hacen especialmente idónea para este tipo de estudios.

**Palabras clave** Corcho. Propiedades mecánicas. Indentación. Tensiones de contacto.

### Mechanical properties of cork under contact stresses

**Abstract** In this work our interest is focussed on the mechanical behaviour of natural cork under contact stresses. Many of the applications of this curious material are related with its mechanical response under such a stress field, however this topic has not been still sufficiently considered in the scientific literature. For this purpose, we proposed the use of Hertzian indentation tests. By using this methodology we have investigated the cork structure influence on the corresponding mechanical properties. Our results reveal a clear mechanical anisotropy effect. Moreover, the elastic modulus corresponding to specific directions have been estimated. Several are the main advantages of this specific test methodology versus traditional uniaxial compression tests, specially simplicity and local character.

**Keywords** Cork. Mechanical properties. Indentation. Contact stresses.

### 1. INTRODUCCIÓN

El corcho es un material ampliamente utilizado en múltiples y variadas aplicaciones, debido a sus excelentes propiedades mecánicas, baja densidad, impermeabilidad, capacidad para aislamiento térmico y acústico, resistencia a agentes corrosivos, etc. Por ejemplo, es utilizado como tapón en botellas de vino de cierta calidad, para solado y recubrimiento de paredes, en juntas para motores, carburadores, etc. Pese a sus innegables aptitudes para tan diversas aplicaciones, resulta un tanto desconcertante cómo la atención científica sobre este material ha estado sumida en tan injustificado letargo. Sin embargo, en las últimas décadas se han efectuado algunos estudios sobre la estructura y propiedades

mecánicas de sólidos celulares<sup>[1]</sup>, en general, y sobre propiedades mecánicas del corcho<sup>[2-4]</sup>, en particular, que han aportado luz sobre las propiedades de este singular material.

En numerosas aplicaciones tecnológicas, el corcho se encuentra sometido a la acción de fuertes tensiones de contacto localizadas en pequeñas regiones, y no a la distribución más homogénea de tensiones típica de los ensayos de compresión uniaxial. A pesar de ello, no existen estudios que ilustren sobre la respuesta mecánica del material en tales condiciones. A este respecto, los ensayos de indentación constituyen una excelente vía para evaluar el daño y comportamiento de los materiales sometidos a tensiones localizadas. Entre las diferentes posibilidades (Hertz, Vickers, Knoop, etc.)

(\*) Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura. Avda. de Elvas s/n. 06071 Badajoz (España).

(\*\*) Dpto. de Engenharia de Materiais, Instituto Superior Técnico. Avda. Rovisco Pais, 1096 Lisboa (Portugal).

los ensayos de indentación Hertz resultan especialmente interesantes ya que nos permiten controlar la presión de contacto ejercida sobre el material, desde valores muy bajos (respuesta elástica y/o viscoelástica) hasta valores suficientemente elevados para generar un cierto daño irreversible en el material. El ensayo Hertz consiste en la aplicación de una carga,  $P$ , sobre la superficie del material utilizando para ello impresores esféricos (generalmente de un material duro como WC). Se trata de un ensayo usado tradicionalmente para investigar la plasticidad de los materiales metálicos y, más recientemente, para estudiar la fractura de materiales cerámicos<sup>[5-7]</sup>. En el presente estudio pondremos de manifiesto también su utilidad para investigar las propiedades mecánicas del corcho.

## 2. ESTRUCTURA CELULAR Y MORFOLOGÍA DEL CORCHO

Las celdas del corcho, generadas por la actividad y división diferenciada del felógeno<sup>[8]</sup>, están apiladas en columnas con ejes paralelos a la dirección radial del árbol (Fig. 1).

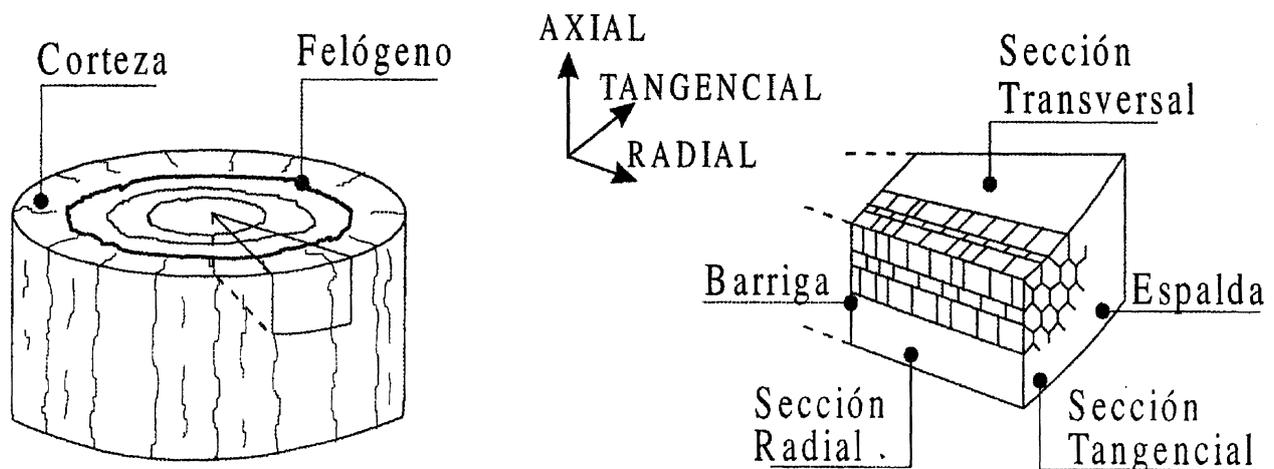
Las secciones denominadas radial y transversal, presentan esta disposición en columnas paralelas a la dirección radial. En las secciones perpendiculares a la dirección radial del árbol, denominadas secciones tangenciales, las celdas de corcho muestran una morfología que recuerda la estructura poligonal de tipo panal de abeja. Debemos destacar que las celdas de columnas adyacentes no tienen su base en el mismo plano, ya que las células de fe-

lógeno adyacentes generan celdas de corcho de forma independiente. Así pues, no hay correlación entre las alturas de las celdas de corcho correspondientes a columnas adyacentes.

Otro aspecto importante a destacar en la estructura celular del corcho es la ondulación que presentan las paredes laterales de las celdas. Del mismo modo, las bases de las celdas no son tan regulares como se ilustra en la figura 1, ya que también presentan ondulaciones o irregularidades. Estas ondulaciones se deben a que las nuevas celdas generadas a partir de la capa de felógeno empujan a las células ya formadas, generando fuertes tensiones en la estructura. Para concluir esta breve descripción acerca de la estructura celular y morfología del corcho, hemos de indicar que las dimensiones de las celdas varían con la época del año correspondiente a su formación<sup>[9]</sup>, así como el tamaño o espesor final de cada capa de corcho generada por estación de crecimiento biológico. Estas dimensiones suelen ser: altura entre 30 y 40  $\mu\text{m}$ , aristas de la base entre 13 y 15  $\mu\text{m}$ , espesor de las paredes celulares de 1 a 2  $\mu\text{m}$ , espesor de las capas de 200 a 3000  $\mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>.

## 3. MÉTODO EXPERIMENTAL

Las muestras de corcho han sido suministradas por el Instituto de Promoción del Corcho, la Madera y el Carbón (ICMC), procedentes de fincas situadas en las proximidades de Mérida (Badajoz). Para poder proceder a la realización de los ensayos de indentación las probetas fueron cortadas, con una



**Figura 1.** Representación de las diferentes direcciones y secciones en un trozo de corcho según su colocación en el árbol. Así mismo se aprecia la morfología de las células en cada sección.

*Figure 1.* Representation of the various directions and sections of a cork part according to its situation in the tree. In addition, the morphology of the cells in each section is observed.

cortadora automática (Struers modelo Accutom-50) de disco adiamantado, en forma de paralelepípedos regulares con caras correspondientes a las secciones radiales, transversales y tangenciales (Fig. 2). La sección tangencial barriga se obtuvo tras eliminar la zona de la corteza externa (aproximadamente 2 cm de espesor), mientras que la sección tangencial espalda se obtuvo tras eliminar la capa (aprox. 1 cm de espesor) en contacto con el tronco del árbol.

Los ensayos fueron realizados en una máquina universal (Instron modelo 1122) en el rango de cargas comprendido entre 0 y 300 N, utilizando como impresores esferas de carburo de wolframio (WC) de radios  $r = 12,7$  mm y  $r = 7$  mm.

Tras varios intentos (sputtering sobre la muestra, rociado de tinta, etc.) se optó por cubrir las bolas de WC con tinta de forma que, al presionar sobre el material, quedara bien definida la región de contacto. Para la medida del radio de contacto,  $a$ , se utilizó un microscopio óptico con reloj comparador acoplado a la platina móvil.

En los ensayos de indentación Hertz, el campo de tensiones se escala con la presión de contacto,  $p_o$ ,<sup>[5]</sup>:

$$p_o = P/\pi a^2 \quad (1)$$

donde  $P$  es la carga de indentación y  $a$  el radio del círculo de contacto (Fig. 2a). A  $p_o$  se le suele denominar tensión de indentación.

De acuerdo con el principio de similitud geométrica, el campo de deformaciones se escala con la razón:

$$a/r \quad (2)$$

donde  $r$  es el radio de la esfera. A esta razón se le denomina deformación de indentación.

La determinación experimental de  $a$  nos permite la obtención de la curva tensión-deformación de indentación:

$$p_o = a/r \quad (3)$$

característica de cada material e independiente del radio,  $r$ , del impresor utilizado. La figura 2b ilustra una curva tensión-deformación genérica. La parte lineal corresponde al dominio de contacto elástico. A partir de un cierto nivel de tensiones la respuesta deja de ser lineal, indicando la iniciación de procesos irreversibles que generan un cierto daño en el material.

Por ser de interés para nuestro estudio resumiremos brevemente algunos resultados deducidos de la teoría elástica de Hertz<sup>[5]</sup>. En condiciones de contacto elástico se cumple:

$$p_o = (3E/4\pi k)(a/r) \quad (4)$$

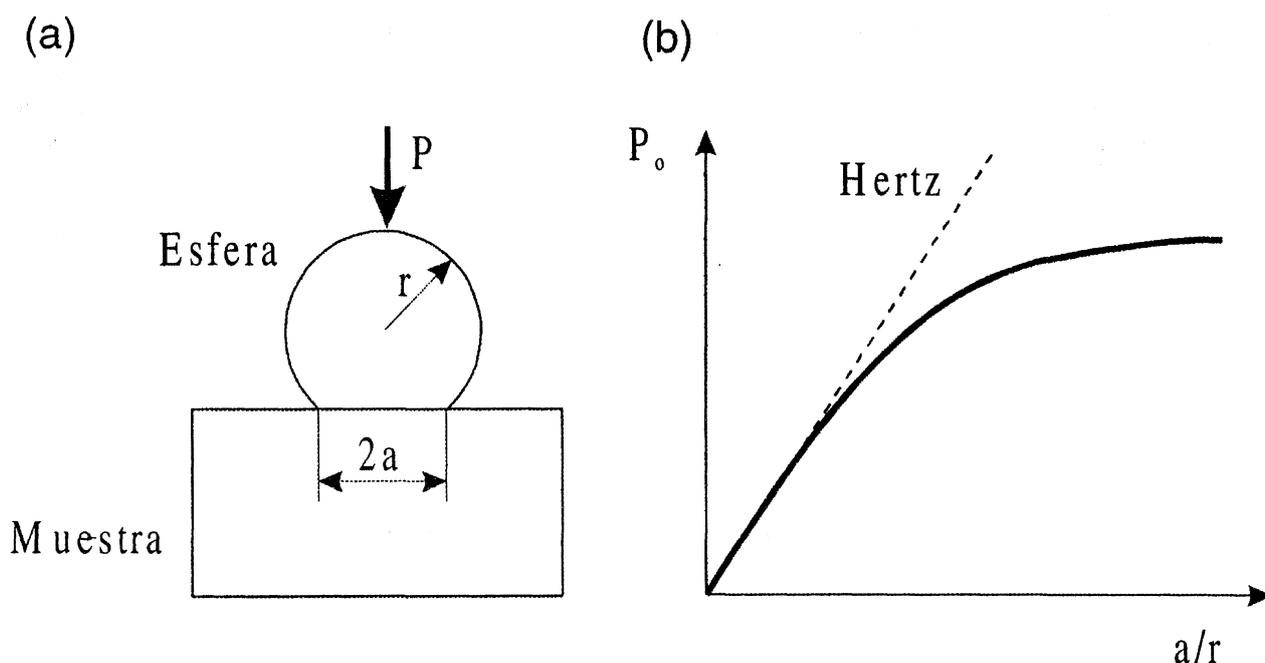


Figura 2. a) Esquema de un ensayo de indentación Hertz. b) Curva típica tensión-deformación de indentación.

Figure 2. a) Scheme of a Hertz indentation test. b) Typical indentation curve-stress-strain.

donde  $E$  es el módulo de Young del material y  $k$  una constante adimensional en la forma:

$$k = (9/16) \{ (1-\nu^2) + (1-\nu'^2)E/E' \} \quad (5)$$

siendo  $\nu$ ,  $\nu'$  y  $E$ ,  $E'$  los coeficientes de Poisson y módulos de Young de la muestra e impresor, respectivamente. Así pues, conocidas las constantes elásticas del impresor, es posible estimar el valor de  $E$  a partir del tramo lineal de la curva tensión-deformación experimental.

#### 4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los ensayos se han efectuado sobre las cuatro secciones que presentan morfologías, características y

diferencias entre sí (Fig.1) a saber: sección tangencial espalda (TE), sección tangencial barriga (TB), sección transversal (TR) y sección radial (RD). Desde un punto de vista cuantitativo, existe gran dispersión en los resultados siendo muy difícil establecer comparaciones entre diferentes muestras, probablemente debido a la multitud de factores que intervienen (humedad, temperatura, diferente estructura incluso para muestras de la misma procedencia, etc.). No obstante, se pueden deducir interesantes conclusiones de tipo cualitativo.

En la figura 3 se muestran algunas curvas experimentales carga-desplazamiento correspondientes a diferentes secciones. Se muestra que la sección tangencial espalda (TE) es más débil que la tangencial barriga (TB). Además, la sección TE es

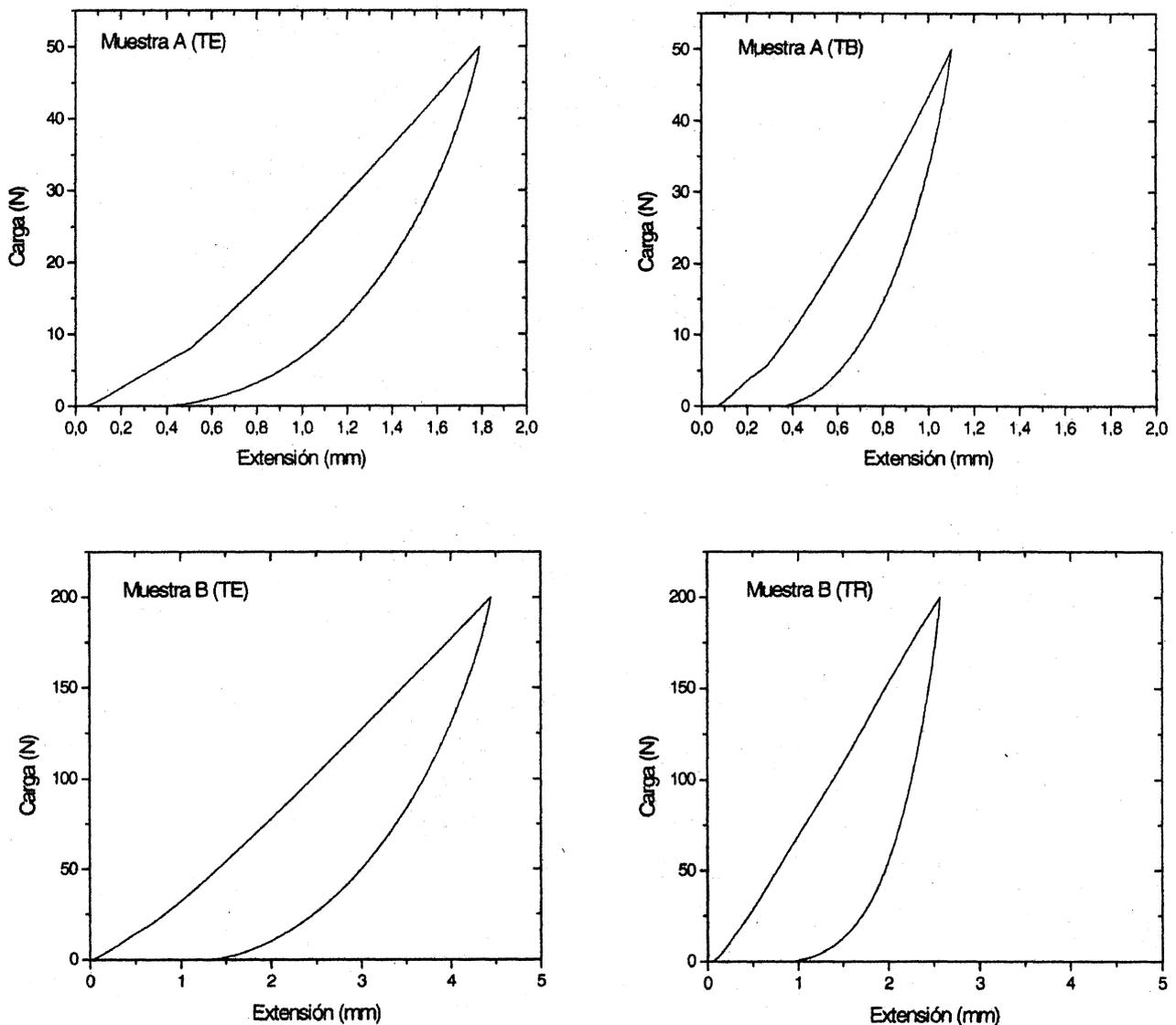


Figura 3. Curvas típicas esfuerzo-deformación en distintas secciones de algunas muestras.

Figure 3. Typical curves load-strain in various of some samples.

también más débil que la transversal (TR) o radial (RD), si bien estas diferencias dependen de la profundidad a la que se realicen los ensayos con respecto a la sección TE. A medida que nos aproximamos a la sección TB al realizar ensayos sobre las secciones TR o RD el material es más resistente a la deformación elástica y, lógicamente, las diferencias con respecto a la sección (TE) aumentan. En general, se observa una amplia deformación de la probeta a esfuerzos relativamente bajos acorde con el bajo módulo elástico del material. En cuanto a la curva de descarga, se observa una lenta recuperación al inicio que aumenta al progresar la descarga, si bien la energía almacenada por la muestra es relativamente importante en descarga total. Conviene no obstante destacar que nuestras observaciones microscópicas revelan que el material continúa su recuperación elástica al finalizar el ensayo. Este hecho, junto con la lenta recuperación elástica al inicio de la descarga, tienen su justificación en la respuesta viscoelástica del material. A partir de un cierto valor (entre 6 y 10 N) la curva de carga se desvía de un comportamiento más o menos lineal, aumentando su resistencia a la deformación. Probablemente este cambio se debe al colapso progresivo de células al aumentar la presión de contacto.

En cuanto a las curvas experimentales tensión-deformación, en la figura 4 se muestran los resultados correspondientes a dos muestras diferentes. Como puede apreciarse, los resultados muestran un primer tramo lineal hasta un cierto valor de  $p_0$  que

depende de la sección de la probeta considerada. Si bien los resultados correspondientes a las secciones TR, RD y TB pueden ser más o menos similares, la curva correspondiente a la sección TE se desmarca netamente de todas ellas siendo, a todas luces, la sección más débil. Los módulos de Young calculados a partir de este primer tramo lineal oscilan entre los 4,3 MPa para la sección TE y los 11,5 MPa para la sección TB en el caso de la muestra A, y entre los 4,5 MPa de la sección TE y los 13,5 MPa de la sección TR para la muestra B. Tras este primer tramo lineal aparece un cierto "plateau" que debe tener su origen en el colapso de celdas a partir de una cierta presión de contacto, si bien esta explicación precisará de confirmación experimental en trabajos futuros. En cuanto al origen de esta anisotropía elástica, está relacionada con la estructura anisotrópica del corcho. La sección TE es más débil que la TB debido a que es la capa tangencial más externa. Efectivamente, las celdas más internas se desarrollan con posterioridad a las más externas, por lo que se ven obligadas a empujar a estas últimas durante su crecimiento. De este modo, la densidad de paredes celulares es mayor cuanto más próximas se encuentran las células al tronco del árbol, por lo que su resistencia a la deformación elástica es también mayor.

En cuanto a las implicaciones de este estudio, sería de interés explorar la posible utilidad de los ensayos Hertz para realizar catas en la finca al objeto de estimar el espesor y/o la calidad del corcho antes de proceder a las operaciones de saca.

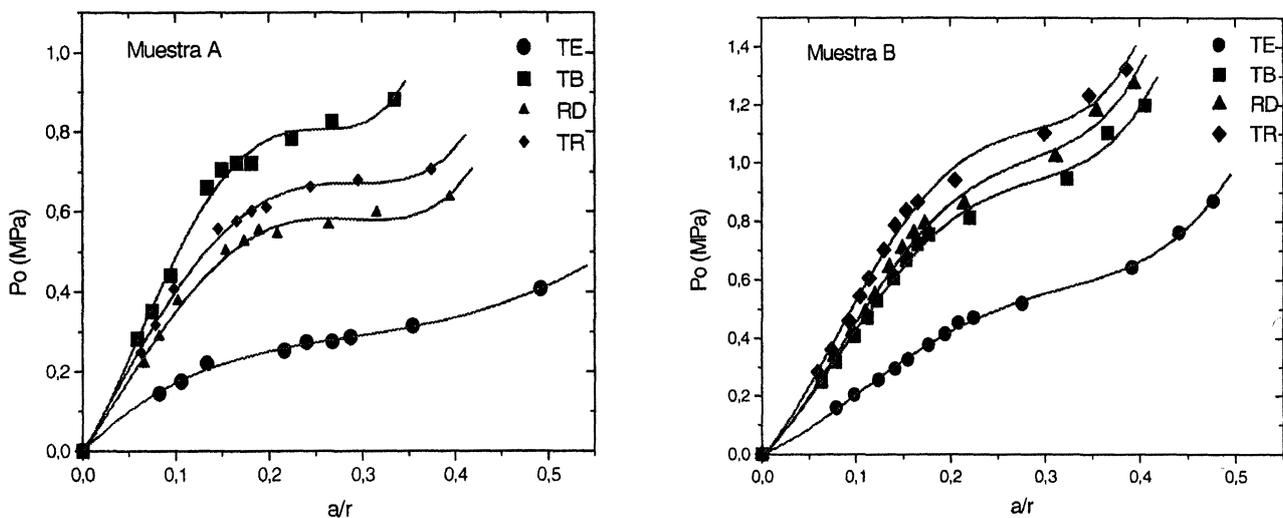


Figura 4. Curvas tensión-deformación para secciones TE, TB, TR y RD.

Figure 4. Stress-strain curves for sections TE, TB, TR and RD.

## REFERENCIAS

- [1] M.F. ASHBY, *Met. Trans.* 14 (1983) 1775.
- [2] L.J. GIBSON, K.E. EASTERLING y M.F. ASHBY, *Proc. R. Soc. London A* 377 (1981) 99.
- [3] H. PEREIRA, M.E. ROSA y M.A. FORTES, *Iawa Bull.* 8 (1987) 321.
- [4] M.E. ROSA y M.A. FORTES, *J. Mater. Sci.* 23 (1988) 35-42.
- [5] F.C. FRANK y B.R. LAWN, *Proc. R. Soc. London A* 299 (1967) 291-306.
- [6] B.R. LAWN y T.R. WILSHAW, *J. Mater. Sci.* 10 (1975) 1049-1081.
- [7] F. GUIBERTEAU, *Anales Mec. Fract.* 13 (1996) 9-19.
- [8] M.A. FORTES y M.E. ROSA, *Técnica (Lisboa)* 2-88 (1988).
- [9] J.V. NATIVIDADE, *Subericultura, Direcção Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas*, Lisboa, 1990.