

PROPAGACION DE GRIETAS POR FATIGA EN CEMENTOS OSEOS
ACRILICOS BAJO CONDICIONES FISIOLÓGICAS

M.M. Vila y J.A. Planell

Depto. de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica
 Universidad Politécnica de Cataluña. E.T.S. Ingenieros Industriales Barcelona.
 Avda. Diagonal, 647, 08028-BARCELONA

Resumen. El cemento óseo es un material basado en polimetilmetacrilato utilizado para la fijación de prótesis ortopédicas. Su baja tenacidad a la fractura y resistencia a fatiga le confieren una vida en servicio relativamente corta. Ello conduce a la necesidad de mejorar el comportamiento mecánico y en especial de obtener un cemento óseo más tenaz. En este trabajo se presenta un cemento óseo acrílico modificado con partículas elastoméricas, en concreto ABS. Se ha estudiado la propagación de grietas por fatiga en el cemento óseo convencional y en el modificado. Así mismo se ha analizado la influencia del medio fisiológico y de la temperatura realizándose ensayos de propagación de grietas en solución salina a 37 °C. Se observa que tanto la conservación en medio fisiológico como la modificación con ABS reduce sustancialmente la velocidad de propagación de la grieta y su efecto combinado produce una disminución de la misma hasta de cuatro órdenes de magnitud respecto al cemento convencional.

Abstract. Bone cements are polymethylmethacrylate (PMMA) based materials used for the anchorage of joint prostheses to bone. Their failure in service is usually explained by their low fracture toughness and fatigue endurance. This leads to the need of improving their mechanical properties and more specifically their fracture toughness. A new acrylic bone cement modified with ABS particles is presented in this investigation. The fatigue crack propagation behaviour of conventional and modified bone cement has been studied. Fatigue crack propagation tests in saline solution at 37 °C have been carried out in order to assess the effect of physiological environment and temperature. It has been shown that the physiological environment and the ABS modification reduce substantially the fatigue crack propagation rate and that their combined effect reduces it four orders of magnitude in relation to that of conventional bone cement.

1. INTRODUCCION

El material utilizado para la cementación de prótesis ortopédicas, el cemento óseo acrílico, es el resultado de la mezcla de polimetilmetacrilato (PMMA), en polvo, metilmetacrilato (MMA), líquido, y un agente iniciador de radicales libres [1]. La mezcla de dichos componentes da lugar a una reacción de polimerización de la que resulta un material que puede tratarse como un composite de matriz rígida. Es frecuente obtener unos valores de la resistencia a la tracción y de la tenacidad a la fractura muy bajos, con frecuencia, menores incluso que los de un polímero cristalino, o, en el mejor de los casos, ligeramente superiores. Uno de los problemas que se presentan es que la tenacidad de tales materiales depende en gran parte de la técnica de fabricación, la cual es difícil de optimizar bajo las condiciones habituales de trabajo, esto es en el protocolo quirúrgico. Se cree, por otra parte, que la resistencia a fatiga de estos materiales está

relacionada con su tenacidad a fractura, [2,3] los valores relativamente bajos de tenacidad y de la resistencia a fatiga son, sin duda, responsables de la corta vida en servicio de los cementos óseos.

En los pocos estudios realizados sobre la propagación de grietas por fatiga [4,5] se observa que dicha propagación obedece la ley de Paris:

$$da/dN = A (\Delta K_I)^n \quad (1)$$

donde da/dN es la velocidad de crecimiento de la grieta, siendo a su longitud y N el número de ciclos; ΔK_I , la amplitud del factor de intensidad de tensiones ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$) y A, n son constantes que dependen del material, de las condiciones ambientales, de la frecuencia, de la temperatura y de la relación de cargas. Asimismo se pone de manifiesto el efecto de la microestructura sobre la velocidad de propagación.

La mayoría de los trabajos, sin embargo, se refieren a la resistencia a la fatiga, dentro de estudios más amplios sobre propiedades mecánicas [6-8]. Existe coincidencia entre diferentes autores en encontrar una resistencia a fatiga a 10^8 ciclos entre 10 y 20 MPa, a partir de las correspondientes curvas S-N determinadas a frecuencias entre 1 y 30 Hz. El examen de las mismas curvas S-N obtenidas indica que la vida a fatiga es mayor en las muestras ensayadas en solución salina a 37 °C que en las ensayadas al aire a temperatura ambiente.

Las técnicas empleadas hasta la fecha para mejorar las propiedades mecánicas del material han consistido fundamentalmente en reforzar el cemento óseo mediante fibras de carbono [9-11] o mediante partículas de hidroxapatita [12]. En ambos casos se consigue un aumento considerable del módulo elástico y parece incrementarse la resistencia a la fatiga pero no la tenacidad a la fractura. Recientemente se ha reforzado el cemento óseo acrílico con partículas tenaces elastoméricas [13,14], los estudios realizados muestran que aunque disminuye el módulo elástico y la resistencia a la tracción, se mejora sustancialmente la tenacidad a la fractura del material.

El presente trabajo analiza la influencia del refuerzo elastomérico en la propagación de grietas por fatiga en los cementos óseos. Para ello se lleva a cabo un estudio con material convencional y con material modificado con un 10% en volumen de partículas de refuerzo, consistentes en el copolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno, ABS. Se estudia asimismo el efecto de las condiciones fisiológicas utilizando paralelamente los mismos cementos óseos conservados en solución salina a 37 °C y ensayándolos en las mismas condiciones.

2. MATERIALES Y METODO EXPERIMENTAL

Se ha utilizado cemento óseo acrílico Rostal suministrado por Industrias Quirúrgicas de Levante S.A. en forma de dosis quirúrgicas de 40 g de PMMA en polvo y 20 ml de MMA líquido. El cemento óseo convencional se obtuvo mezclando ambos componentes hasta obtener una masa pastosa con la cual se moldearon probetas C.T. según las especificaciones de la norma ASTM E-399 de dimensiones $B = 6$ mm, $W = 23$ mm y longitud de la entalla $a = 11,35$ mm. El fondo de la entalla se hizo agudo mediante un bisturí tal como recomienda para polímeros el European Group on Fracture [15].

Paralelamente se elaboró el material modificado siguiendo el mismo procedimiento previa adición a la mezcla inicial de un 10% en volumen de partículas de ABS y la cantidad correspondiente de monómero para mantener la proporción 2:1 de polvo a líquido.

La mitad de las probetas, tanto de 0% como de 10% de ABS, se conservaron en solución salina a una temperatura constante de 37 ± 1 °C durante 12 meses. Estas probetas las denominaremos 0-s y 10-s.

Todos los ensayos se han realizado en una máquina electromecánica Instron en modo de control de carga a una frecuencia de 2 Hz aplicando cargas cíclicas tracción-tracción y una relación de carga $R=0,5$. El cemento óseo convencional (0%) se ha ensayado con una carga media de 60 N y una amplitud de carga de ± 20 N y el cemento óseo modificado (10%) se ha ensayado con una carga media de 82,5 N y una amplitud de carga de $\pm 27,5$ N. Las probetas conservadas en solución salina se han ensayado en condiciones fisiológicas a 37 °C en el interior de un recipiente diseñado para tal fin y por el que circula de forma continua suero salino a la temperatura indicada. El material 0-s se ha ensayado con una carga media de 82,5 N y una amplitud de carga de $\pm 27,5$ N y el modificado, 10-s, con una carga media de 105 N y una amplitud de carga de ± 35 N.

Se ha medido experimentalmente la longitud de la grieta, a , frente al número de ciclos, N , con objeto de obtener para cada valor de a la velocidad de propagación de la grieta expresado por da/dN y correlacionarlo con ΔK_I tal como predice la ley de Paris (ecuación (1)).

Las superficies de fractura se han estudiado mediante microscopía electrónica de barrido.

3. RESULTADOS

A partir de los valores de a y N obtenidos experimentalmente se ha evaluado la velocidad de propagación de la grieta da/dN para distintas longitudes de la misma. Para estos mismos valores de a se ha calculado el rango del factor de intensidad de tensiones ΔK_I de acuerdo con la norma ASTM E-399 para probetas C.T. a partir de la expresión:

$$\Delta K_I = f(a/W) \Delta P / BW^{1/2} \quad (2)$$

donde ΔP es el rango de cargas aplicadas, B y W son el espesor y la anchura de la probeta respectivamente y $f(a/W)$ es un factor geométrico cuya expresión es:

$$f(a/W) = \frac{(2+a/W)}{(1-a/W)^{3/2}} [0,886 + 4,64(a/W) - 13,32(a/W)^2 + 14,72(a/W)^3 - 5,6(a/W)^4]$$

Para cada tipo de material se representó gráficamente da/dN frente ΔK_I en escala logarítmica. Se observa en la gráfica de la figura 1 que los valores experimentales se ajustan a una recta para cada tipo de cemento. La expresión matemática de dicha recta viene dada por la ecuación de Paris a partir de la cual se calculan los coeficientes A y n para cada material que se muestran en la Tabla I. A partir de ellos se observa cómo la tasa de la velocidad de propagación de la grieta, n , es muy similar en todos los casos.

El hecho más significativo es, sin embargo la diferencia de velocidad de propagación que se observa entre unos y otros: el cemento convencional ensayado en seco posee la velocidad de propagación más alta mientras que el cemento modificado y conservado en solución salina (10-s) es el que se propaga más lentamente. En general, se observa que tanto la modificación con ABS como las condiciones fisiológicas son los factores que retardan el crecimiento de la grieta. Este efecto se traduce además en dos hechos: en primer lugar, el valor del factor de intensidad de tensiones umbral, AK_{th} , aumenta en el mismo sentido que la velocidad de propagación decrece obteniéndose valores entre 0,4 MPa en el caso de 0% en seco y 0,7 MPa para 10-s. En segundo lugar, se aprecia también que se alcanzan longitudes de grieta mayores en propagación estable al aumentar la modificación y en presencia de condiciones salinas.

Las superficies de fractura por fatiga han sido estudiadas por microscopía electrónica de barrido. Las figuras 2 a 5 muestran detalles de la matriz de los cementos óseos estudiados. Estas micrografías han sido tomadas a 4000 aumentos. La grieta se propaga de izquierda a derecha.

La figura 2 corresponde al cemento óseo convencional (0% ABS) en seco. Se observa un cierto desgarro dúctil y multitud de cavidades donde se alojan las partículas de sulfato de bario, la fractura es más frágil alrededor de estos poros. La figura 3 muestra la matriz del cemento óseo modificado con 10% ABS y ensayado en seco, se aprecia un mayor grado de ductilidad y una superficie menos plana que en

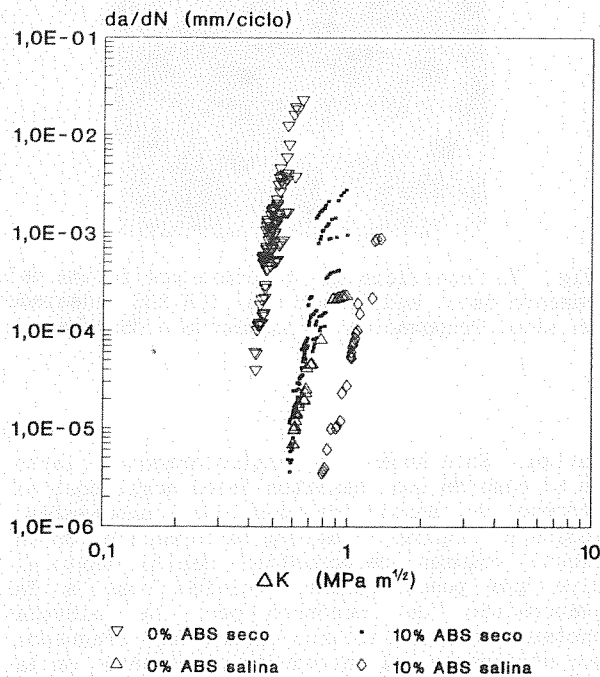


Fig. 1. Representación de da/dN frente a ΔK_I para los cuatro cementos óseos estudiados.

Tabla I. Coeficientes de la ecuación de Paris para cada uno de los cementos óseos estudiados.

| MATERIAL | A | n |
|------------|----------|-----------|
| 0% seco | 2,827205 | 10,959469 |
| 10% seco | 0,003846 | 9,6421340 |
| 0% salina | 0,000298 | 6,3571360 |
| 10% salina | 0,000036 | 10,831559 |

la micrografía anterior; además de los poros inducidos por el sulfato de bario, existen otros, mucho más pequeños, que quizá corresponden a las posiciones ocupadas por las partículas de ABS pues es un hecho común en todos los materiales modificados. En la parte superior derecha se puede observar un fragmento de una partícula de PMMA, debe hacerse notar el alto grado de adhesión con la matriz. La figura 4 muestra el detalle de la matriz de material no modificado (0% ABS) mantenido y ensayado en seco y en condiciones fisiológicas, en este caso se observan menos poros y más grandes quizá debido a coalescencia producida en el desgarro de la matriz, se aprecian cúpulas más grandes lo cual le confiere un aspecto más dúctil. La parte derecha corresponde a un fragmento de partícula de PMMA y se aprecia también la buena adhesión con la matriz. En la figura 5 se muestra el cemento óseo modificado (10% ABS) conservado y ensayado en solución salina, el aspecto es mucho más dúctil, la matriz se ve severamente desgarrada y los poros aparecen muy distorsionados de modo que las partículas de sulfato de bario no se encuentran en el interior de ellos como en los casos anteriores sino dispersas por la matriz; la parte inferior derecha muestra una porción de partícula de PMMA que como en el resto de materiales aparece fuertemente cohesionada con la matriz.

Las figuras 6 y 7 corresponden a superficies de fractura por fatiga del cemento óseo convencional (0% ABS) y cemento óseo modificado (10% ABS) respectivamente, ambas ensayadas en seco.

Las micrografías se han obtenido a 400 aumentos y en ellas la propagación discurre de izquierda a derecha. En la figura 6 se observa una propagación bastante plana seccionando las bolas de PMMA a distintos niveles en contraste con la figura 7 en que se observa como la propagación de la grieta es más sensible a la microestructura y avanza siguiendo el contorno de algunas partículas, que aparecen recubiertas de matriz, por lo que la superficie de fractura no es tan plana, en otros casos el frente de grieta secciona en un sólo plano algunas partículas de PMMA. La observación de estas dos micrografías sugiere un comportamiento más dúctil del material reforzado con ABS (figura 7).

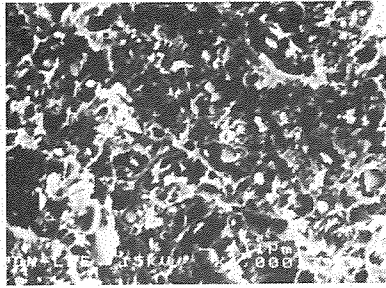


Fig. 2. Superficie de fractura por fatiga del cemento óseo convencional ensayado en seco. Detalle de la matriz. Propagación de izquierda a derecha.

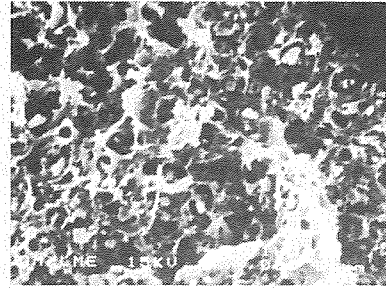


Fig. 3. Superficie de fractura por fatiga del cemento óseo modificado con 10% ABS ensayado en seco. Detalle de la matriz. Propagación de izquierda a derecha.

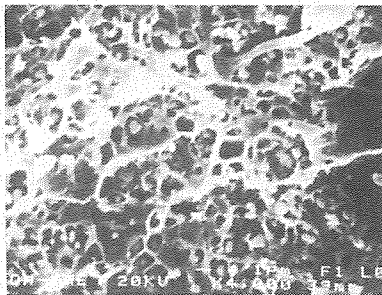


Fig. 4. Superficie de fractura por fatiga del cemento óseo convencional ensayado en solución salina. Detalle de la matriz. Propagación de izquierda a derecha.

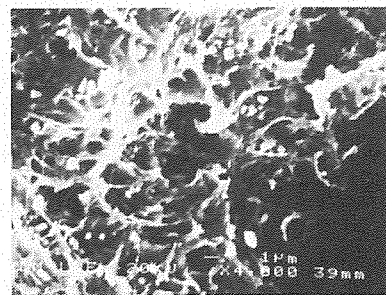


Fig. 5. Superficie de fractura por fatiga del cemento óseo modificado con 10% ABS ensayado en solución salina. Detalle de la matriz. Propagación de izquierda a derecha.

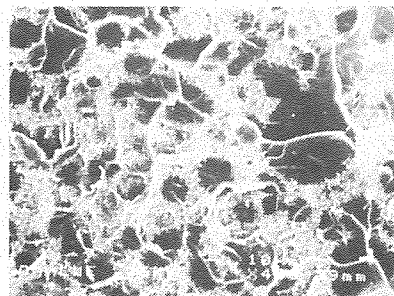


Fig. 6. Superficie de fractura por fatiga del cemento óseo convencional ensayado en seco. Propagación de izquierda a derecha.

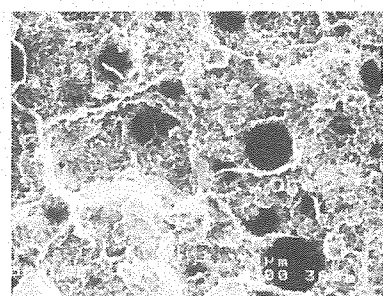


Fig. 7. Superficie de fractura por fatiga del cemento óseo modificado con 10% ABS ensayado en seco. Propagación de izquierda a derecha.

4. DISCUSION

El comportamiento a fatiga de muchos polímeros reforzados ha sido objeto de estudio en numerosas ocasiones [16]. En la mayoría de estos estudios se hace mayor hincapié en el mecanismo de propagación de la grieta que en su iniciación. La razón está en que, por lo general, la condición de vida en servicio más relevante viene dada por la propagación de grietas ya existentes, (en forma de poros, defectos superficiales, grietas de poco tamaño, etc) debido a solicitaciones de naturaleza cíclica a que se ve sometido el material y que pueden dar lugar a fractura por

fatiga. Este hecho es particularmente cierto en el caso de los cementos óseos acrílicos: el proceso de mezcla de los dos componentes, sólido y líquido, conlleva la formación de un cierto volumen de porosidad debido tanto al aire que puede quedar ocluido como a la evaporación de monómero por la elevada exotermia que se alcanza durante el fraguado; por otra parte al introducir el cemento en la cavidad femoral se crean defectos superficiales en la intercara con el hueso debido a las imperfecciones y rugosidades de la superficie ósea que se traducen en pequeñas cavidades en dicha intercara [17].

Es por todo ello que el verdadero estudio del comportamiento a fatiga de los cementos óseos debe centrarse en la propagación de la grieta. Tal como se ha dicho anteriormente, el cemento óseo acrílico consiste en pequeñas partículas esféricas de PMMA y un 10% de inclusiones de sulfato de bario en una matriz de PMMA. Debido a la naturaleza acrílica de sus componentes el cemento óseo es un termoplástico amorfo y como tal presenta un mecanismo de deformación por crazing [18]. Las crazes son microgrietas cuya formación va acompañada por un aumento de volumen. Este mecanismo de deformación implica una considerable absorción de energía, sin embargo el material es susceptible de fractura frágil debido a que el crazing opera únicamente en regiones muy localizadas en la punta de la grieta por lo que la zona plástica en la que tiene lugar esta absorción de energía es muy pequeña en comparación a la dimensión total de la probeta y en consecuencia la energía absorbida en la fractura es asimismo pequeña.

Para incrementar la tenacidad a la fractura es necesario asegurar un volumen mayor de zona plástica, es decir de crazing, y asimismo debe limitarse el crecimiento y rotura de los crazes a fin de retardar la iniciación de la grieta [18].

El método de refuerzo más importante en los polímeros se basa en incorporar una fase elastomérica en la matriz frágil. En este trabajo se presenta el cemento óseo reforzado con un 10% en volumen de ABS. El mecanismo de refuerzo [19] se basa en una doble función de las partículas elastoméricas que es, por una parte promover la creación de crazes y, por otra, frenar su crecimiento: cuando el material está solicitado a tracción, las crazes se inician en los puntos de máxima concentración de tensiones triaxiales que suelen estar cerca del ecuador de las partículas de goma por lo que éstas actúan promoviendo la creación de múltiples crazes que crecen en la dirección normal de la sollicitación. El crecimiento de estas crazes, sin embargo, se ve frenado por la presencia de las partículas elastoméricas que actúan como terminaciones evitando la formación de crazes más largas. Como resultado de todo ello se genera mayor número de crazes y de menor tamaño que en el material sin modificar con lo que la zona plástica es mayor y se necesita mayor energía para romper las crazes, lo cual explica el aumento de tenacidad a la fractura en los ensayos de fractura y la disminución de la velocidad de propagación de la grieta por fatiga, así como el emblanquecimiento que se produce en el material.

De los resultados experimentales de propagación de grietas por fatiga obtenidos para el cemento óseo, se pone de manifiesto la eficacia del refuerzo que ejercen las partículas de ABS, pues se observa que la velocidad de propagación se hace ostensiblemente menor en los cementos óseos modificados que en los convencionales de tal modo que para un mismo valor de ΔK_I , da/dN decrece hasta dos órdenes de magnitud tanto en

los materiales ensayados en seco como en los ensayados en condiciones fisiológicas. La formación de múltiples crazes es también evidente en los valores umbrales de ΔK_I , que aumentan en presencia de ABS, debido probablemente a que es necesaria mayor energía para romper las crazes formadas para iniciar la propagación lo cual se traduce en un mayor valor de ΔK_I umbral.

El cemento óseo conservado y ensayado en solución salina a 37 °C presenta unos valores de propagación de la grieta menores incluso que el material modificado y ensayado en seco, la razón debe buscarse en el carácter plastificante del medio acuoso, por todo ello se obtiene que el cemento óseo acrílico modificado con 10% v/v de ABS, conservado durante 12 meses en solución salina a 37 °C y ensayado en estas mismas condiciones es el que posee una velocidad de crecimiento de la grieta menor y un umbral de propagación mayor.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecen la financiación recibida de la CAICYT a través del proyecto de investigación PA-0320-85 y la donación del cemento óseo Rostal a Industrias Quirúrgicas de Levante S.A.

5. REFERENCIAS

- [1] Lautenschlager, E.P., Stupp, S.I. y Keller, J.C., "Structure and properties of acrylic bone cement". En: Functional behaviour of orthopaedic biomaterials. Vol. II: Applications. Eds. P. Ducheyne and G.W. Hastings, CRC Press, Boca Raton, Florida, (1984).
- [2] Powers, J.M., Roberts, J.C. y Craig, R.G. *J.Dental Res.*, **55**, 432 (1976).
- [3] Koblitz, F.F., Luna, V.R., Glenn, J.F., DeVries, K.L. y Draughn, R.A., *Org. Coat. Plast. Chem.*, **38**(1), 322 (1978).
- [4] Wright, T.M. y Robinson, R.P. "Fatigue crack propagation in polymethylmethacrylate bone cements". *J. Mater. Sci.*, **17**, 2463-2468 (1982).
- [5] Lankford, G., Astleford, W.J. y Asher, M.A., *J. Mater. Sci.*, **11**, 1624 (1976).
- [6] Freitag, T.A. y Cannon, S.L. "Fracture characteristics of acrylic bone cements II. Fatigue". *J. Biomed. Mater. Res.*, **11**, 609-624 (1977).
- [7] Krause, W. y Mathis, R.S. "Fatigue properties of acrylic bone cements: Review of the literature", *J. Biomed. Mater. Res.*, **22**(A1), 37-53 (1988).
- [8] Krause, W.R., Grimes, L.W. y Mathis, R.S. "Fatigue testing of acrylic bone cements: Statistical concepts and proposed test

- methodology", J. Biomed. Mater. Res., 22(A2), 179-190 (1988).
- [9] Pilliar, R.M., Blackwell, R., Macnab, I., y Cameron, H.V., J. Biomed. Mater. Res., 10, 893 (1976).
- [10] Wright, T.M. y Trent, P.S., J. Mater. Sci., 14, 503 (1979).
- [11] Robinson, R.P., Wright, T.M. y Burstein, A.H., J. Biomed. Mater. Res., 15, 203 (1981).
- [12] Castaldini, A., Cavallini, A., Moroni, A. y Olmi, R. "Biomaterials and Biomechanics 1983". Eds. Ducheyne, P., Van der Perre, G. y Aubert, A.E., Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 91, (1984).
- [13] Murakami, A., Behiri, J.C. y Bonfield, W. J. Mater. Sci., 23, 2029 (1988).
- [14] Vila, M.M., Raya, A. y Planell, J.A. "Mechanical behaviour of a rubber modified bone cement", en Clinical Implant Materials, editado por Heimke, G., Soltész, U. y Lee, A.J.C. Advances in Biomaterials, 9, 155-160 (1990). Elsevier Science Publishers B.U., Amsterdam 1990.
- [15] EGF Newsletter "A linear elastic fracture mechanics (LEFM) standard for determining K_{Ic} and G_c for plastics" H.H. Kausch and J.G. Williams, 8, 14, (1988/89).
- [16] Bucknall, C.B. y Stevens, W.W., en: Toughening of plastics, Conf. Proc. Plastics and Rubb. Inst. London, 24 (1978).
- [17] Willert, H.G., Mueller, K. y Semlitsch "The morphology of polymethylmethacrylate (PMMA) bone cement. Surface structures and causes of their origin" Arch. Orthop. Traumat. Surg., 94, 265-292 (1979).
- [18] Kinloch, A.J. y Young, R.J., en Fracture Behaviour of Polymers, Applied Science Publishers Ltd., London (1983).
- [19] Bucknall, C.B., en Toughened Plastics Applied Science Publishers Ltd., London, (1977).