

INICIACIÓN DE GRIETAS POR FATIGA A COMPRESIÓN EN CERÁMICAS TENACES

Jesús Solís, Carlos Lapetra y Jaime Domínguez.

E.T.S.I.I., Universidad de Sevilla.
Avda Reina Mercedes s/n, 41012-Sevilla

Resumen. Se presenta el procedimiento empleado para la iniciación de grietas mediante fatiga a compresión en el fondo de entallas de probetas de flexión de ZrO_2 parcialmente estabilizada con Y_2O_3 . La iniciación se obtiene aplicando compresión cíclica a probetas prismáticas con una entalla lateral. A partir de análisis numéricos de las tensiones en las proximidades de la entalla generada, se definen los niveles de carga a aplicar. Dicho análisis permitirá predecir de manera aproximada la longitud final a la que se producirá la detención de la grieta en compresión. Esta será función de la geometría y nivel de tensiones. Se analiza la variación de velocidad de crecimiento con la longitud de la grieta para diferentes geometrías y cargas máximas. Finalmente, se hacen algunas consideraciones prácticas sobre la geometría, la carga máxima a aplicar y el sistema de centrado para asegurar una buena distribución de la carga.

Abstract. In this work, the fatigue crack initiation and propagation of ZrO_2 partially stabilised with Y_2O_3 is analysed. The initiation is produced by applying fully compressive far field cyclic loads to a single edge-notched specimen. An analysis of the necessary conditions to produce the fatigue crack growth from the notch tip, considering the maximum compressive stresses at the notch root. The stress distribution at the front of the notch is studied and correlated with the maximum crack length that can be obtained for each geometry and far field compressive load. The crack grow rate variation with the length of the crack is also analysed for different notch geometries and maximum load. Some practical considerations about the specimen geometry, the maximum recommended far field load, and the system to assure a uniform far field stress distribution are done.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido un creciente interés por las aplicaciones de las cerámicas en ingeniería. Uno de los principales factores que han limitado el crecimiento de estas aplicaciones ha sido su fragilidad. No obstante, en los últimos años se ha producido el desarrollo de nuevos materiales cerámicos con tenacidades más altas, entre los que se incluyen las zirconias. Cerámicas que sufren transformación tenaz [1].

Entre las nuevas aplicaciones en ingeniería se han presentado casos en los que aparecen cargas cíclicas. El fallo más frecuente en estos casos es la fatiga. Se ha comprobado [2] que el límite de fatiga en probetas lisas de determinadas cerámicas tenaces es aproximadamente el 50% de la resistencia a tracción. Similarmente a lo que ocurre en los metales, las cargas cíclicas de determinada magnitud producen crecimiento estable de grietas. A diferencia de los materiales metálicos, en los cerámicos el crecimiento es intergranular. Con grietas de tamaño

suficientemente grande comparadas con las dimensiones microestructurales hay un factor de intensidad de tensiones umbral (ΔK_{th}), que es aproximadamente el 50% de K_{Ic} por debajo del cual no se produce crecimiento. La velocidad de crecimiento (da/dN) depende del factor de intensidad de tensiones de la misma manera que lo hacen los metales -ley de Paris o similar-, pero con exponentes de ΔK bastante mayores. Si la grieta tiene un tamaño del orden de las dimensiones microestructurales, el crecimiento puede producirse con valores de ΔK bastante inferiores al umbral.

Para determinar la velocidad de crecimiento con grietas grandes comparadas con la microestructura se suelen emplear probetas entalladas, preagrietadas, sometidas a flexión en tres o cuatro puntos, o tipo compact [3], aunque estas últimas son menos frecuentes. La dimensión de la grieta inicial debe ser al menos un orden de magnitud superior a las dimensiones microestructurales y suficientemente grande para que el borde quede fuera del campo de influencia

de la entalla, con lo que se eliminan factores que modifican el comportamiento.

El agrietado previo se puede realizar por varios procedimientos. A veces, sometiendo la probeta entallada a cargas cíclicas que produzcan tensiones de tracción hasta que se genera una grieta. Tan pronto como se detecta la existencia de la grieta hay que disminuir la carga para evitar el crecimiento inestable. Posteriormente, con cargas adecuadas, se continúa el crecimiento de la grieta hasta que sale del campo de tensiones de la entalla. Este método tiene el inconveniente de que se producen muchas fracturas no deseadas durante la primera fase al aparecer el crecimiento inestable antes de que se haya detectado la grieta [3].

Otro procedimiento empleado es el del puente de compresión [4]. En él, sobre una probeta lisa rectangular apoyada a lo largo de su longitud, se aplican en los extremos, perpendicularmente a la superficie de apoyo, dos cargas iguales de compresión, como se muestra en la Figura 1. El estado de tensiones generado es tal que se produce tracción longitudinal en el centro del lado largo no apoyado y aparece una grieta que progresa hacia la superficie de apoyo. Al ir avanzando la grieta, las tensiones longitudinales que encuentra el borde van disminuyendo de magnitud, hasta que pasan a ser de compresión o son suficientemente pequeñas para producir la detención. Jugando con el valor de las cargas aplicadas pueden obtenerse distintas longitudes de grieta. Este procedimiento lo está aplicando con resultados prometedores el grupo del Departamento de Ciencia de Materiales de la U.P. de Madrid.

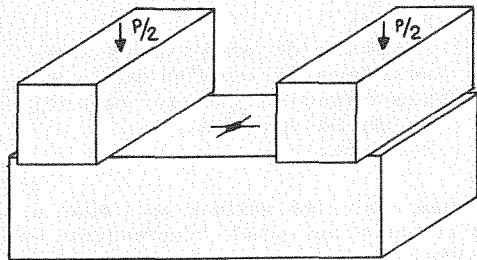


Fig.1 Puente de compresión

Un procedimiento que permite un mejor control de la longitud final de pregrieta es el de fatiga en compresión [5,6]. Consiste en aplicar carga cíclica de compresión a una probeta entallada de forma que se produzcan en el borde del concentrador tensiones máximas incluso superiores a la de rotura en compresión. Se genera así una grieta que crece de forma estable desde el fondo de la entalla y perpendicularmente a la tensión principal máxima. La grieta crece en un campo de tensiones residuales de tracción, disminuyendo la velocidad de crecimiento al ir alejándose del fondo de la entalla y reduciéndose por tanto la amplitud de tensiones y el valor de las residuales.

En este trabajo se muestra el procedimiento empleado para la iniciación de grietas por fatiga en compresión en el fondo de entallas de probetas de ZrO_2 parcialmente estabilizada con Y_2O_3 al 4 mol%.

2. CRECIMIENTO DE GRIETAS EN COMPRESION

Antes de explicar el método experimental empleado se harán algunas consideraciones sobre el crecimiento de grietas en compresión, y las razones por las que este se produce.

Cuando en el borde de la entalla se producen tensiones de compresión superiores a la de rotura, aparecen microgrietas intergranulares, dejando de ser el comportamiento lineal, disminuyendo la pendiente de la curva tensión-deformación [6]. Al descargarse la probeta, el material recupera de forma aproximadamente lineal, pero con una pendiente inferior a la producida durante el comportamiento lineal de carga en compresión, con un comportamiento del tipo mostrado en la Figura 2. Se generan así unas tensiones residuales de tracción, que serán mayores o menores, dependiendo de la pendiente indicada, y cuya distribución en la sección neta en el plano medio de la entalla será similar a la de la Figura 3.

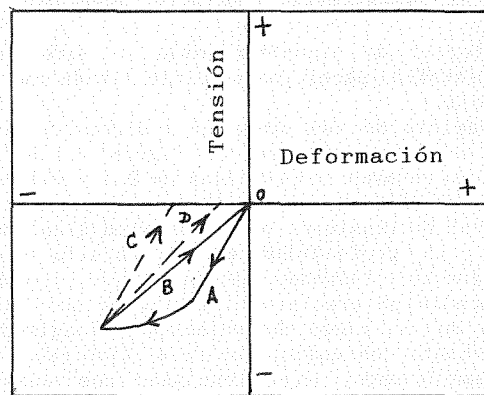


Fig.2 Esquema que describe la no linealidad tensión deformación durante cargas de compresión, y la linealidad en la descarga con o sin tensiones residuales.

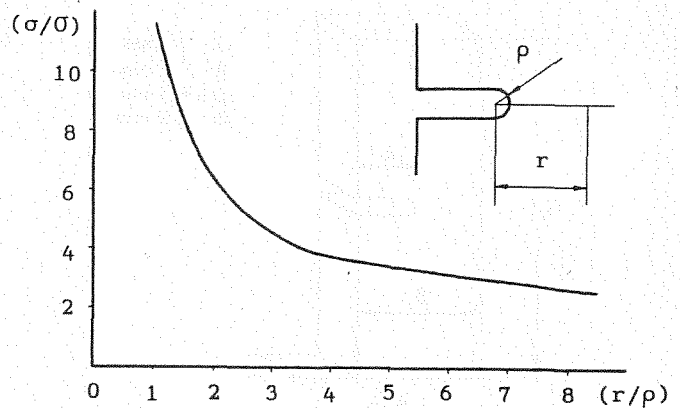


Fig.3 Distribución de tensiones en el plano medio de la entalla.

Las microgrietas generadas estarán sometidas al campo de tensiones residuales de tracción, produciéndose crecimiento intergranular de las mismas al aplicar una carga cíclica de compresión. Dicho crecimiento será estable debido a las barreras que suponen los distintos cristales entre los que va evolucionando. La variación de la orientación de las microgrietas para adaptarse al perfil intergranular y las diferentes tensiones residuales existentes entre los granos, producirán detenciones cada ciclo.

A medida que la grieta se aleja del borde de la entalla disminuyen las tensiones máximas de compresión, reduciéndose la cantidad de microgrietas producidas por la carga. Igualmente disminuyen las tensiones residuales de tracción. Todo ello ocasionará una reducción de la velocidad de crecimiento, llegándose a valores de longitud para los que se produce la detención total.

Estas grietas generadas mediante compresión tienen un borde con un campo de tensiones y deformaciones relativamente pequeño, lo que hace igualmente pequeño el daño sufrido por el material. Ello permite emplear estas probetas preagrietadas para la determinación de la tenacidad y para ensayos de crecimiento de grietas por fatiga [7,8].

3. METODO EXPERIMENTAL Y MATERIAL EMPLEADO.

El material de experimentación ha sido Zr O₂ policristalina parcialmente estabilizada con Y₂ O₃ al 4 mol%.

La geometría de las probetas y dirección de la carga se representa en la Figura 4. Se han realizado ensayos con entallas de 0.4 y 0.7 mm de ancho para analizar el efecto de este parámetro y del nivel de tensiones en la longitud final de la grieta. La profundidad de la entalla se ha seleccionado intentando que sea pequeña, de manera que permita un crecimiento posterior por fatiga dentro de un rango de relaciones longitud de grieta/canto con soluciones de K_I fiables, y que al mismo tiempo, bajo tensiones nominales no demasiado altas para hacer peligrar la integridad de la probeta, produzca niveles suficientemente altos de tensiones en el fondo.

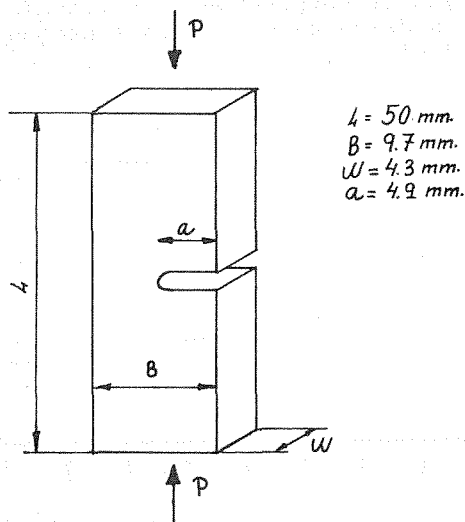


Fig.4 Geometría de las probetas ensayadas.

Las entallas se han obtenido con discos adiamantados de 0.4 y 0.7 mm de espesor. Estos discos producen fondos de entalla casi rectos, con los vértices redondeados. Para asegurar en el fondo de la entalla una zona central en la que se produzcan las tensiones máximas ha sido necesario redondearlos. Lo que se ha llevado a cabo con pasta de diamante, aplicada mediante una lámina del espesor de la entalla con los cantos redondeados.

Los ensayos se han realizado en una máquina dinámica hidráulica controlada numéricamente. En la figura 5 se representa la disposición de los elementos para el ensayo. Para eliminar cualquier efecto de flexión por falta de alineamiento o paralelismo entre las superficies, la carga de compresión se ha aplicado interponiendo dos rótulas axiales, el centro de cuyas superficies esféricas coincide con el de las superficies de la probeta. El centrado se ha realizado con un útil que asegura un error inferior a 0.05 mm. Este último aspecto es de vital importancia para garantizar un crecimiento estable de la grieta y evitar problemas para la integridad de la probeta.

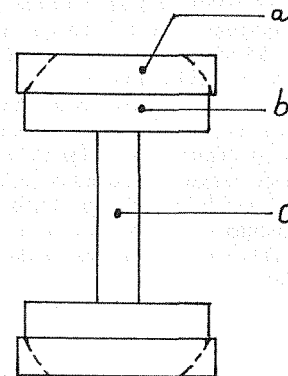


Fig.5 a) Rótula
b) Elemento de apoyo para asegurar que el centro de la rótula coincide con la superficie de la probeta.
c) Probeta.

Las tensiones nominales máximas aplicadas a las distintas probetas han estado comprendidas entre 165 y 210 MPa, con un coeficiente de asimetría de los ciclos (R) próximo a 10. Los coeficientes de concentración de tensiones correspondientes a estas entallas son y para las probetas de 0.4 y 0.7 mm de ancho de entalla, respectivamente.

4. RESULTADOS

Se han ensayado varias probetas. Dos con geometría algo distinta a la indicada previamente, con una entalla de 0.4 mm de espesor, pero sin redondear el fondo de la misma. La tensión nominal máxima aplicada ha sido 175 MPa y el coeficiente de asimetría R=10. El coeficiente de concentración de tensiones, referido a la sección sin entalla, producido con esta geometría es 23.1. En la Figura 6a se muestra una fotografía de la zona del fondo de la entalla de una de ellas, después de 300.000 ciclos con 152 MPa de valor máximo, sin que se produjera crecimiento apreciable, y 150.000 más con 175 MPa, durante los que el crecimiento fue el

mostrado. Puede apreciarse la existencia de dos grietas progresando al mismo tiempo. En la Figura 6b se muestra la evolución de la longitud de las dos grietas por una de las caras a partir de los 300.000 ciclos iniciales sin crecimiento.



Fig.6a 450000 ciclos(300000 ciclos sin grieta).

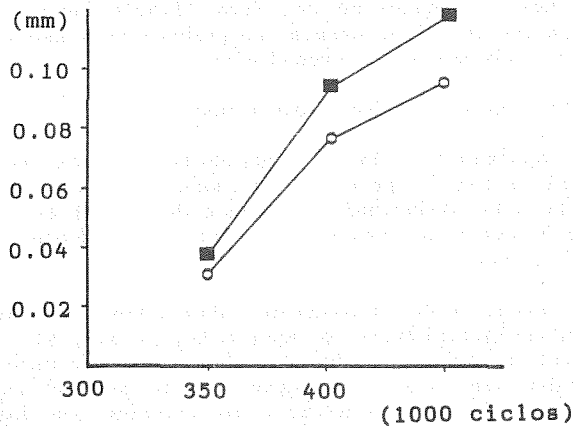


Fig.6b Evolución de la longitud de dos grietas en una de las caras de las probetas.

La geometría del fondo de entalla producido por el disco, con dos arcos unidos por una parte recta, hace que las tensiones máximas se produzcan en la zona de estos arcos en vez del centro de la ranura. En la Figura 7 se muestra la evolución de las tensiones en una línea prolongación del centro de la entalla y en otra prolongación de un radio trazado a 45 grados. Los valores corresponden a la solución elástica obtenida mediante el programa ANSYS.

Teniendo en cuenta que las grietas crecen al someter a las probetas a tensiones nominales de compresión, cualquier grieta existente, sea de mayor o menor longitud, se cerrará y no producirá ninguna descarga en el resto de ellas aunque sean más cortas. Al ser las tensiones residuales de tracción de carácter local, dos grietas a una distancia del orden de magnitud del radio de la entalla no interaccionarán entre ellas, con lo que la de mayor longitud de las dos tampoco producirá la descarga de la otra. Todo ello hace que, aunque una grieta pueda crecer más que otra, las dos

continúen haciéndolo independientemente.

Empleando probetas de 0.35 y de 0.2 mm de radio de entalla se han sometido a cargas cíclicas de compresión cinco probetas, tres de 0.35 y dos de 0.2 mm, con valores de R=10. En la figura 8 se muestra la evolución de tensiones en la sección neta de la probeta para ambas geometrías para una tensión nominal de 100 MPa.

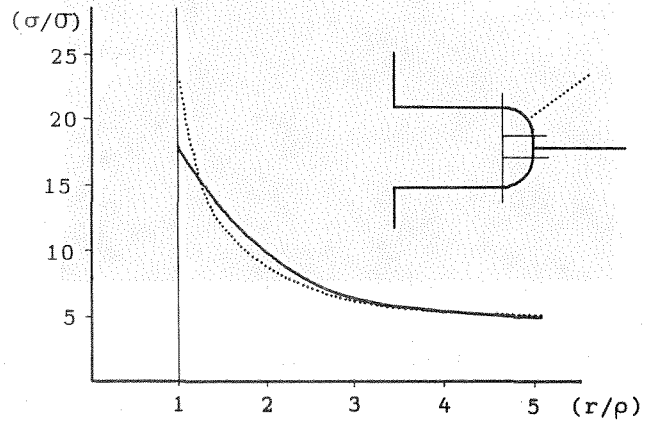


Fig.7 Distribución de tensiones según las dos direcciones indicadas en la figura.

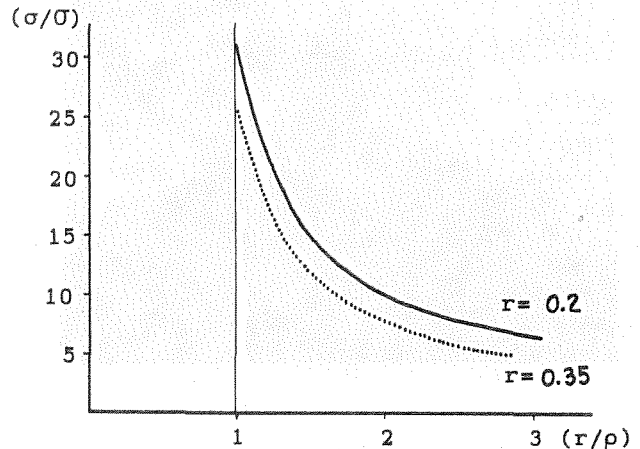


Fig.8 Distribución de tensiones en la sección neta de dos probetas de radio de entalla 0.2 y 0.35 mm.

En las probetas de 0.35 mm de radio de entalla, se comenzó aplicando tensiones no excesivamente elevadas, para controlar el crecimiento. Se comprobó que en cada caso era necesario alcanzar un nivel distinto de tensiones para obtener la iniciación de la grieta después de un número suficientemente alto de ciclos. Esta diferencia entre uno y otro caso llegó a ser del orden del 20%. Igualmente, para una carga determinada, suficientemente alta para hacer crecer la grieta, la longitud final alcanzada al detenerse varía apreciablemente de un caso a otro. Ello puede ser debido a tres razones: aleatoriedad en el comportamiento del material; diferencias en el alineamiento; y aleatoriedad en la geometría. Esta última causa se produce por el desgaste que se origina en la lámina generadora del radio. Ello hace que, de una probeta a otra, varíe apreciablemente la geometría del fondo de la

entalla. En la figura 9 se muestran dos fotografías de la evolución de la grieta en una las probetas de radio 0.35 mm.

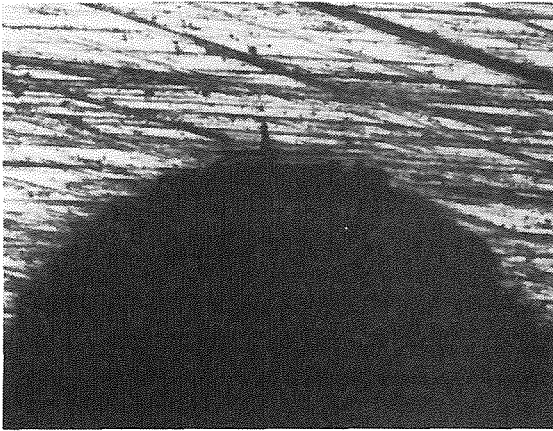
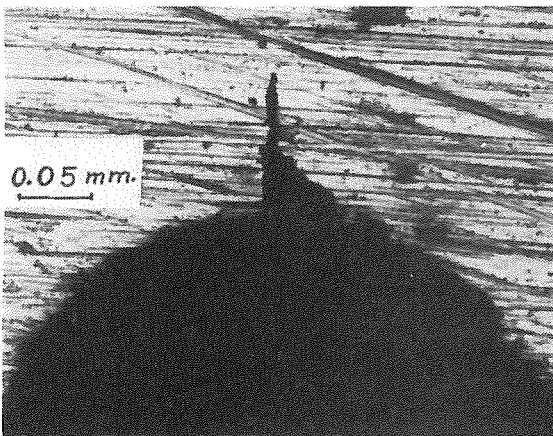


Fig.9 Hasta los 300000 ciclos.



Hasta los 800000 ciclos.

En las probetas con entallas de 0.2 mm de radio se ha hecho un seguimiento más detallado de la grieta durante el crecimiento. En la figura 10 se aprecia la evolución de la misma en las dos caras de una probeta, sometida al nivel de tensión nominal indicado. Se presentan las longitudes en función del número de ciclos. Puede apreciarse la disminución de la velocidad de crecimiento a medida que avanza la grieta en el campo de tensiones hacia zonas en las que los niveles son más bajos. También se aprecia una diferencia importante en la longitud final de la grieta en las dos caras, fenómeno producido en mayor o menor grado en prácticamente todos los casos estudiados. Ello puede ser debido a las mismas razones indicadas previamente: aleatoriedad del crecimiento; diferencia entre la geometría de la entalla en uno y otro lado; y, sobre todo, falta de centrado de la carga, que, aunque pequeño, puede ser importante.

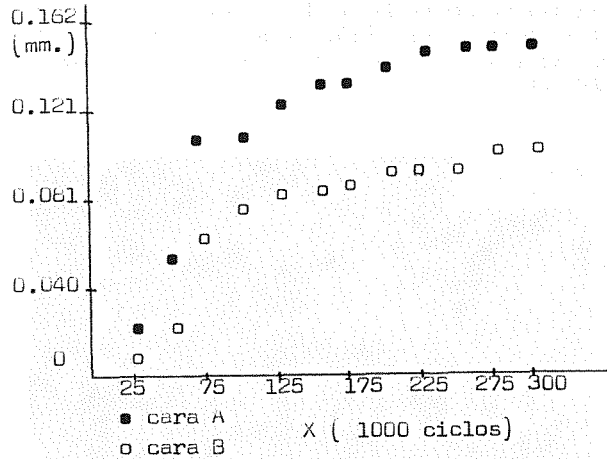


Fig.10 Evolución de la grieta por las dos caras para un radio de entalla de 0.2 mm.

5. CONCLUSIONES

El trabajo presentado es un primer paso para la determinación de las características a fatiga de cerámicas tenaces de una forma fiable, ensayos para los que es necesaria una probeta previamente agrietada por algún procedimiento.

Entre las conclusiones puede decirse:

Es importante cuidar el centrado de la carga, que hará crecer la grieta longitudes distintas por cada lado. Reduciendo el tamaño de la rótula un mismo error de centrado reducirá los momentos producidos.

La obtención de un fondo de entalla semicircular sin irregularidades es importante, ya que, si el nivel de tensiones es alto las irregularidades pueden dar lugar a la aparición de más de una grieta, de forma similar a lo ocurrido con las primeras probetas ensayadas.

Dado que la grieta final a obtener por fatiga en compresión debe ser suficientemente larga para que el borde esté fuera de la zona de influencia de la entalla, será importante la definición de la geometría y del nivel de carga a aplicar en cada caso.

6. REFERENCIAS

- [1] Evans A.G. y Heuer A.H., "Review-Transformation Toughening in Ceramics: Martensitic Transformations in Crack-Tip Stress Fields", J. Am. Ceram. Soc., 63, 241-248 (1980).
- [2] Steffen A.A., Dauskardt R.H. y Ritchie R.O., "Cyclic Fatigue-Crack Propagation in Ceramics: Long and Small Crack Behavior", en Fatigue 90 (Ed Kitagawa H. y Tanaka T.) pp 745-752, MCE Publications Ltd.
- [3] Dauskardt R.H. y Ritchie R.O., "Cyclic Fatigue Crack Growth Behavior in Ceramics", Closed Loop, 17, 7-17 (1989).

- [4] Warren R. y Johannesson B., "Creation of Stable Cracks in Hardmetals Using 'Bridge' Indentation", Powder Metallurgy, 27, 25-29 (1984).
- [5] Ewart L. y Suresh S., "Dynamic Fatigue Crack Growth in Polycrystalline Alumina Under Cyclic Compression", Journal of Mat. Science Letters, 5, 774-778 (1986).
- [6] Ewart L. y Suresh S., "Crack Propagation in Ceramics Under Cyclic Loads", Jou. of Mat. Science, 22, 1173-1192 (1987).
- [7] Suresh S., Ewart L., Maden W.S., Slaughter S. y Nguyen M., "Fracture Toughness Measurements in Ceramics: Pre-Cracking in Cyclic Compression", Jou. of Mat. Science, 22, 1271-1276 (1987).
- [8] Davidson D.L., Campbell J.B. y Lankford J., "Fatigue Crack Growth Through Partially Stabilized Zirconia at Ambient and Elevated Temperatures", Acta Metall. Mater., 39, 1319-1330 (1991).