

MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LA FRACTURA EN ENSAYOS BRASILEÑOS DE MATERIALES CERAMICOS A ALTA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

F. Gálvez Díaz-Rubio, D. Cendón Franco y V. Sánchez Gálvez

Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S.I. Caminos Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid c/ Prof. Aranguren s/n, 28040 Madrid

Resumen. En este trabajo se ha realizado un estudio mediante la modelización numérica en 3D del ensayo brasileño en condiciones dinámicas. Los cálculos pretenden reproducir los ensayos mecánicos de probetas cerámicas a velocidades de deformación similares a las que se obtienen en técnicas dinámicas como la barra Hopkinson. La modelización se ha llevado a cabo sobre probetas de materiales cerámicos utilizando los programas de cálculo numérico Autodyn y Ls-Dyna. El primer objetivo del trabajo es determinar cual es el estado tensional en la probeta y si de él se puede obtener una relación con la carga transmitida. El segundo objetivo es comprobar las hipótesis de los experimentos en barra Hopkinson, que requieren un equilibrio tensional previo a la fractura para que el ensayo pueda considerarse válido. Los resultados de las simulaciones muestran que el estado tensional es diferente en el interior y en la superficie, en la que las tensiones de tracción que abren la fisura alcanzan su máximo valor. Así mismo se ha comprobado que el material alcanza el equilibrio rápidamente y que el ensayo puede considerarse cuasiestático, pese a la alta velocidad de deformación alcanzada. Finalmente se ha comprobado que las trayectorias de fisuras que se obtienen en las simulaciones reproducen lo obtenido en los ensayos mecánicos. La fisura inicial aparece en el mismo lugar que en los ensayos reales, así como las secundarias que aparecen con posterioridad y marcan la geometría final de la probeta que resulta del ensayo.

Abstract. In this paper a 3D-numerical simulation of a dynamic splitting-test is presented. The aim of the calculations is focused on reproducing mechanical tests of ceramic specimens at strain rates similar to those obtained on Hopkinson bar tests. The simulation has been carried out using explicit integration finite difference codes such as Autodyn or LS-Dyna. The first step of the work has been the simulation of the specimen stress state and the computation of the transmitted load. Later, a comparison of the simulation results to the experiments has permitted to verify the assumptions of the Hopkinson test. A stress equilibrium state before fracture is needed for this kind of experiments. Results of the simulations show a difference between stress state in the bulk and on the surface of the specimen. On the surface, tensile stresses attain their maximum value and cause fracture. It has also been proved that the specimen achieves equilibrium quite fast and thus, in spite of the high strain rates, the test can be considered as quasi-static. Finally it has been shown that crack paths on numerical simulations predict with accuracy actual fissures obtained on mechanical tests. The first crack appears at the same location than in actual tests, as well as secondary cracks, showing up later, which define the geometry of the broken specimen.

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos de compresión diametral, también llamados ensayos brasileños, son uno de los métodos actualmente disponibles para la determinación de la resistencia a tracción de materiales frágiles. Consisten en someter un cilindro a compresión sobre un plano diametral. Debido al estado tensional del cilindro, la rotura se produce por tracción cuando las tensiones que aparecen en el plano de aplicación de las cargas alcanzan el valor de la resistencia a tracción del material. En ese instante el material comienza su fractura y ésta se propaga a lo largo del plano diametral mencionado. Sin embargo el estado tensional no es uniaxial, y el material soporta tensiones de compresión que son normales a las tensiones de tracción, con valores absolutos que sobrepasan en más de tres veces la resistencia a tracción en el momento de la fractura. En materiales con una

relación de resistencia a compresión/tracción alta, como son los materiales cerámicos o el hormigón, la fractura del material es debida a las tensiones de tracción mientras que se asume que las tensiones de compresión no producen daño alguno. Esta es la razón por la que los ensayos brasileños se presentan como una solución viable para la medida de la resistencia a tracción de materiales frágiles como hormigones o cerámicas [1].

El estado tensional de un cilindro sometido a una carga puntual sobre uno de sus diámetros es resoluble analíticamente si se considera un estado de deformación plana. Las tensiones de tracción que aparecen, son máximas y constantes en el plano de aplicación de las cargas, mientras que las tensiones de compresión no son homogéneas. La solución se muestra en la Fig. 1 y en la Fig. 2, en la que P es la carga aplicada, r la distancia al punto de aplicación de una de las cargas, L la longitud

de la probeta y D su diámetro. Las tensiones de tracción son constantes en el plano mencionado, mientras que las de compresión son variables a lo largo de él con un mínimo en el centro geométrico que es tres veces superior a las de tracción.

$$s_t = \frac{2P}{pLD} \quad (1)$$

$$s_c = \frac{2P}{pLD} \left(\frac{D^2}{r(D-r)} - 1 \right) \quad (2)$$

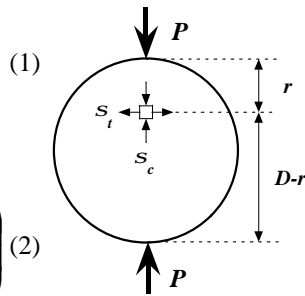


Fig. 1. Tensiones en el plano de simetría de un ensayo brasileño en un estado de deformación plana con carga puntual.

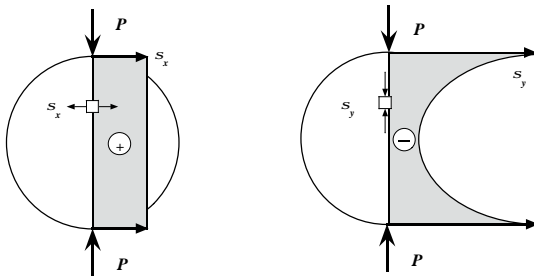


Fig. 2. Esquema de la distribución de tensiones en el plano de aplicación de la carga en un estado de deformación plana con carga puntual

En la práctica no es posible aplicar una carga puntual ideal, sino que ésta se distribuye sobre una superficie pequeña dando lugar a lo que se conoce como ancho de reparto. Si este ancho no es lo suficientemente elevado el análisis anterior sigue siendo válido excepto en una zona pequeña próxima a la zona de aplicación de las cargas, donde las tensiones de tracción disminuyen de valor. En estudios anteriores mediante modelizaciones estáticas en 2D se ha concluido que si la zona de aplicación de la carga es menor del 10% del diámetro, el error en la determinación de las cargas de tracción no supera el 2%, mientras que este error se reduce al 0.5% si la anchura de reparto es el 5% del diámetro [2].

Otro factor importante en la rotura de este tipo de probetas es el efecto de tamaño. En estudios previos se ha concluido que el tamaño de la probeta tiene una incidencia directa sobre las cargas transmitidas durante la fisuración secundaria aunque no sobre la primaria [3].

Este tipo de ensayos ha sido recientemente introducido en el campo de los ensayos dinámicos, como los experimentos en Barra Hopkinson, en los que la velocidad de deformación es elevada [4, 5, 6]. Sin

embargo, los resultados obtenidos mediante este tipo de ensayos no han sido exhaustivamente analizados hasta la fecha, de los que únicamente se conoce algún estudio mediante simulaciones numéricas en dos dimensiones [7, 8] mientras que los estudios en tres dimensiones [9] están enfocados al cálculo de la carga transmitida y la geometría de fisuración. Sin embargo no se conoce ningún trabajo que analice el estado tensional en el plano de aplicación de las cargas, por lo que no puede asegurarse que los resultados experimentales obtenidos mediante esta técnica estén plenamente justificados.

2. SIMULACIÓN NUMÉRICA.

En el presente trabajo las simulaciones numéricas se han realizado mediante los programas dinámicos Autodyn y Ls-Dyna en 3D. No se han obtenido diferencias fundamentales en los resultados entre ambos programas, de los que se extrajeron las mismas conclusiones. La discretización se ha llevado a cabo según la geometría de ensayos reales realizados por los autores con anterioridad [5, 6]. Se ha aprovechado uno de los planos de simetría para reducir el número de elementos a la mitad, que corresponde al plano vertical (Fig. 3). Sin embargo no se ha utilizado la simetría del plano horizontal, puesto que en él es donde se abre la fisura. La probeta, de 8 mm de diámetro y 4 mm de espesor se ha discretizado utilizando 112500 elementos. Las cargas se transmiten a través de dos apoyos prismáticos de 3x3x4 mm (Fig. 3) utilizando 2000 elementos en cada uno.

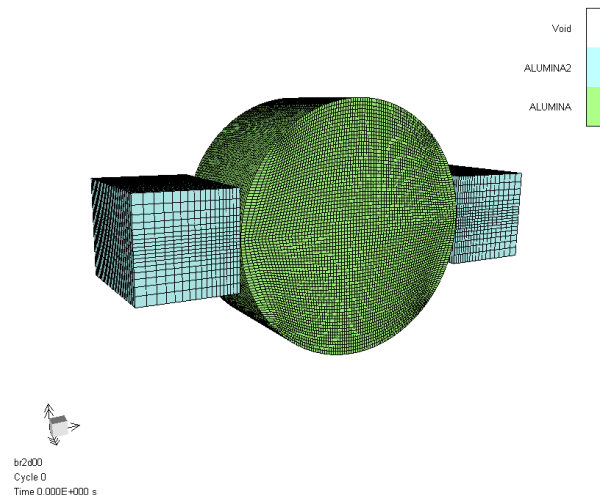


Fig. 3. Mallas utilizadas en los cálculos.

Las condiciones de contorno impuestas son de dos tipos, la condición de carga y la condición de acoplamiento con el equipo experimental. La condición para aplicar la carga a la probeta es una condición impuesta en velocidad en la cara externa del apoyo, según se muestra en la Fig. 4. Esta condición está tomada de los resultados que proporciona directamente el equipo experimental de la barra Hopkinson en ensayos reales, y simplificada por dos tramos lineales. Reproduce muy bien el desplazamiento de la barra incidente del equipo experimental en función del tiempo.

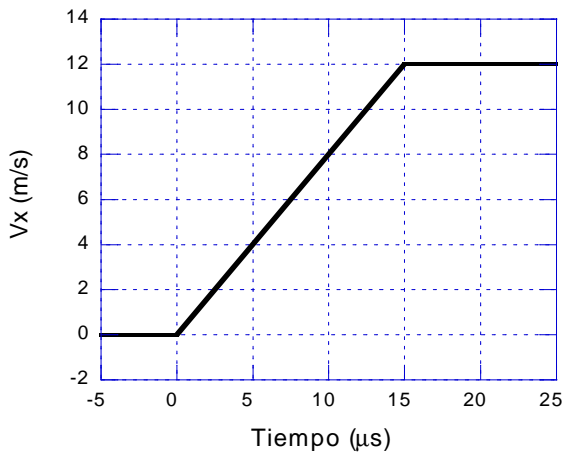


Fig. 4. Condición de contorno para aplicar la carga.

La segunda condición de contorno es una condición de acoplamiento con el dispositivo experimental de la barra Hopkinson. Consiste en la transmisión de las ondas a las barras del equipo experimental mediante el acoplamiento de impedancias. De esta forma no aparecen reflexiones en las caras externas de los apoyos, sino que las ondas que por ellos pasan se transmiten hacia lo que en el equipo experimental son las barras de carga.

Los ensayos mecánicos que se analizan fueron realizados sobre alúmina de 99.5% de pureza, en los que tanto la probeta como los apoyos utilizados son del mismo material. Los modelos de material que se han empleado han sido dos. En los primeros cálculos se utilizó un modelo de material del tipo Johnson-Holmquist, sin embargo con este modelo no se consiguió reproducir el comportamiento ni en tensiones ni en la geometría de fisuración. El segundo modelo de material ha sido un modelo elástico y lineal hasta rotura con el que se consiguió un mejor resultado. Para la alúmina de 99.5% de pureza, se utilizó un módulo elástico de 370 GPa y un coeficiente de Poisson de 0.23. El criterio de fallo elegido ha sido el de tensión principal máxima, que responde a un criterio en que la rotura es por tracción, mientras que las compresiones no afectan al daño del material. En las simulaciones se utilizó una resistencia a tracción de 200 MPa. Una vez alcanzada la condición de rotura el material sigue una ley de ablandamiento lineal en el que la energía de fractura utilizada en el cálculo se obtuvo a partir de un valor de la tenacidad de fractura de 4 MPa·m^{1/2} y junto con el valor del módulo elástico, resulta 70 J/m², que corresponde a un valor típico de la alúmina.

3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Una de las hipótesis necesarias para la validez de los ensayos de barra Hopkinson, es que haya un equilibrio cuasiestático en la probeta. Por ello es necesario asegurar que en el instante en que se produce la rotura exista un equilibrio tensional en la probeta. Es frecuente

asumir en ensayos de compresión que este estado se alcanza en un tiempo equivalente al que necesitan las ondas elásticas en recorrer unas cuatro veces la longitud de la probeta. En este caso la longitud del sistema es la suma de la probeta más los apoyos, aproximadamente 14 mm de longitud. Puesto que la alúmina tiene una velocidad de propagación de las ondas elásticas de 10000 m/s, el tiempo necesario para el equilibrio se estima en 6 µs. Para comprobarlo, se calculó el estado tensional de la probeta en diferentes tiempos. En la Fig. 5 se muestra la distribución de la tensión principal mayor σ_1 en tracción a los 3 µs después de aplicar la carga, donde se aprecia que aún no se ha alcanzado el equilibrio. Sin embargo en la Fig. 6, que corresponde a los 9 µs se puede afirmar que ya existe un estado de equilibrio. Este equilibrio es anterior al inicio de la fisuración, que ocurre a los 13 µs.

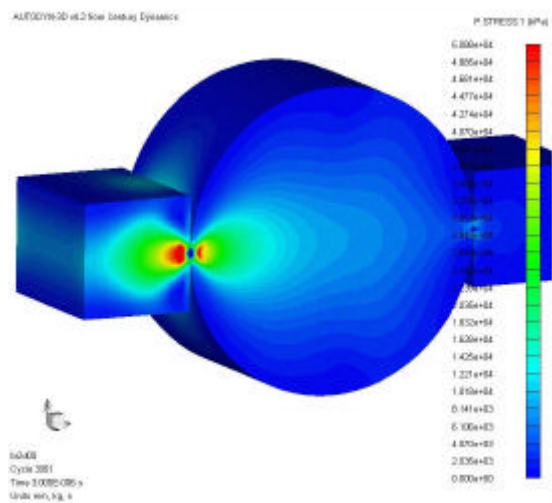


Fig. 5. Distribución de la tensión σ_1 a los 3 µs. La probeta no ha alcanzado aún el equilibrio.

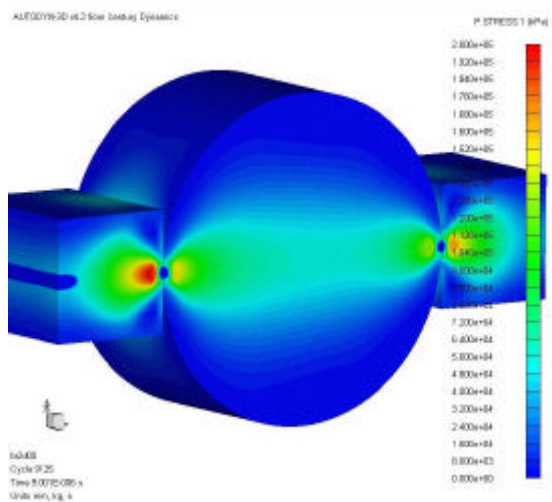


Fig. 6. Distribución de la tensión σ_1 a los 9 µs. La probeta ya ha alcanzado un estado de equilibrio cuasiestático.

Para determinar el desplazamiento relativo entre los dos extremos de la probeta sobre los que se aplican las cargas, se realizó un estudio en velocidades. El desplazamiento al que se somete la probeta se calculó mediante las velocidades con las que se mueven los apoyos:

$$d = \int (V_a - V_b) dt$$

donde V_a representa la velocidad con la que se mueve la cara en contacto con la probeta del primer apoyo y V_b la homóloga del segundo apoyo. La evolución de ambas velocidades, así como el desplazamiento buscado se muestran en la Fig. 7. En ella se aprecia que los apoyos se mueven a velocidad constante, por lo que el desplazamiento aplicado a la probeta es lineal con el tiempo. La velocidad de desplazamiento que se aplica a la probeta resulta constante y de valor 2.4 m/s. Este resultado justifica que el ensayo se realiza a velocidad de deformación constante, tal y como se obtiene en los experimentos en barra Hopkinson.

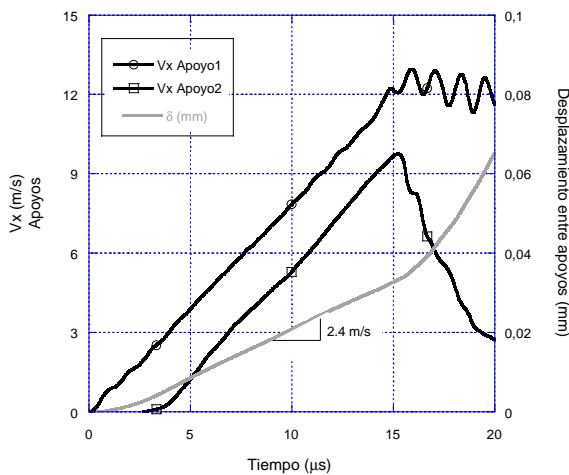


Fig. 7. Velocidades de los apoyos y desplazamiento entre los puntos de aplicación de la carga de la probeta.

El tercer aspecto analizado es la distribución de tensiones de tracción en el plano de aplicación de las cargas. Estas son las tensiones responsables de la rotura del material y que abren las fisuras.

En la Fig. 8 se muestran las tensiones perpendiculares al plano de aplicación de las cargas, σ_{yy} , a los 8 μ s, anterior al comienzo de la rotura, en el que la probeta ya se encuentra en situación de equilibrio. En ella se representan las tensiones mencionadas en función de la posición del diámetro y para diferentes profundidades, siendo $z=0$ el diámetro central interior o de simetría y $z=2$ el diámetro en la superficie de la probeta. En esta figura se muestra que las tensiones presentan un valor prácticamente constante en la mayoría del plano. Sin embargo el máximo de las tensiones de tracción no se encuentra en el centro de la probeta, sino que se

distinguen dos zonas en las que la concentración de tensiones es importante. Estos lugares se encuentran localizados en la superficie, en los que los valores de tensión llegan a duplicar a los valores de tensión del centro de la probeta. Este efecto tiene una incidencia directa en la forma en que se inicia la rotura en el material, pues es en estos lugares donde comienza la fisuración pues en ellos las tensiones de tracción son máximas.

Esta distribución de tensiones se aprecia con más claridad en la Fig. 9, en la que se representan las tensiones de tracción en función de la coordenada x (diámetro) y la coordenada z (espesor). En ella se muestra el instante correspondiente a 11 μ s en el que las tensiones máximas son muy cercanas a la tensión de rotura del material, lo que indica el lugar de iniciación de la fractura.

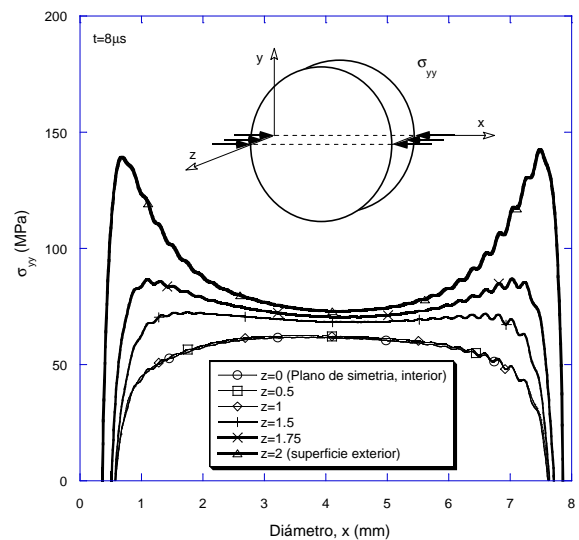


Fig. 8. Distribución de las tensiones de tracción perpendiculares al plano de aplicación de las cargas para diferentes profundidades.

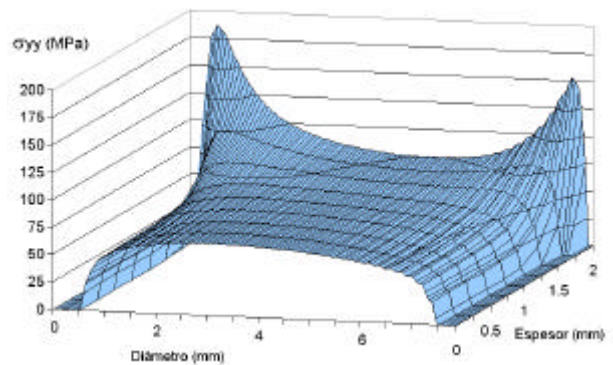


Fig. 9. Distribución espacial de las tensiones de tracción en el plano de aplicación de las cargas, responsables de la rotura a los 11 μ s. Se representa media probeta, en la que el espesor $z=0$ corresponde al interior y $z=2$ es la cara exterior.

Como consecuencia de esta distribución de tensiones, la carga transmitida por la probeta no puede determinarse directamente mediante la expresión (1). Esto es debido a que las tensiones medias de tracción en el plano de aplicación de las cargas son muy diferentes de aquellas que producen la rotura del material. Sin embargo sí puede afirmarse que el valor de las tensiones de tracción en el centro de la probeta puede utilizarse para obtener la carga transmitida utilizando la ecuación (1) con bastante fiabilidad, según se muestra en la Fig. 10. En ella hay que tener en cuenta que los tiempos en que se representa están desplazados $2 \mu s$, que es el tiempo que necesitan las ondas para recorrer el espacio entre el centro de la probeta y el extremo del apoyo que transmite la carga.

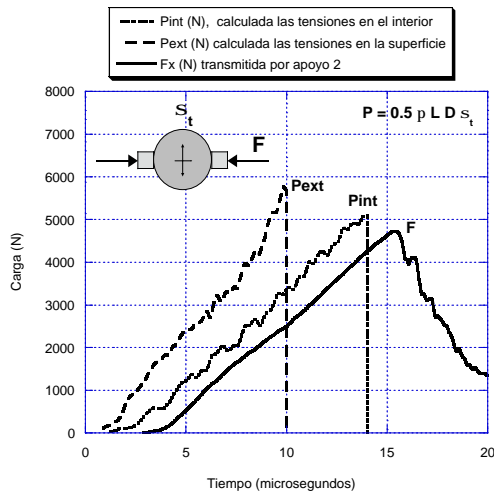


Fig. 10. Cargas transmitidas por los apoyos (F) y fuerzas obtenidas mediante la tensión de tracción en el centro de la probeta (P_{int}) y en la superficie (P_{ext}).

El proceso de fisuración del material comienza en aquellos puntos en los que las tensiones de tracción alcanzan los valores de la resistencia del material. Esto ocurre en la superficie en los lugares que corresponden con los máximos de la Fig. 9. En la Fig. 11 se muestra el estado del material a los $13 \mu s$ en el que se identifican los lugares en los que se inicia la fisuración.

La evolución del proceso de rotura se muestra en diferentes instantes. A los $15 \mu s$ (Fig. 12) comienza a propagarse la fisura principal, a una velocidad media de unos 5000 m/s , próxima a la mitad de la de las ondas elásticas. Esto hace que identificar en ensayos reales la posición en la que comienza la fisuración sea una labor muy difícil. Debido a ello no puede asegurarse que en ensayos reales la rotura comience en el centro de la probeta o en los lugares próximos a los apoyos.

A los $17 \mu s$ (Fig. 13) la fisura principal ya se ha propagado completamente y comienzan a iniciarse las fisuras secundarias. Finalmente, a los $20 \mu s$ (Fig. 14) la fisuración secundaria ya está prácticamente concluida y su geometría es la que define el estado de la probeta tras

el ensayo y la geometría de los fragmentos de la probeta.

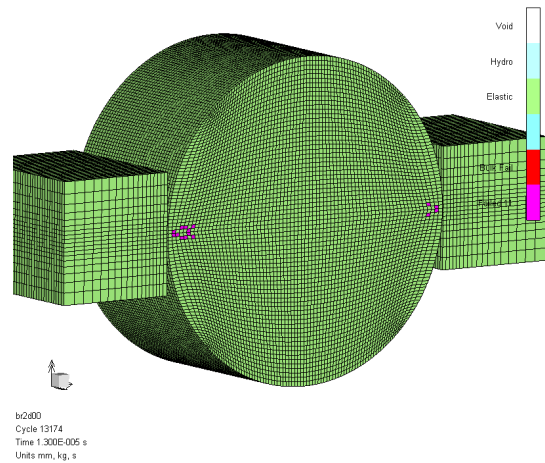


Fig. 11. Instante en que se inicia la rotura de la probeta, a los $13 \mu s$. La fisuración comienza en los lugares en que la tensión de tracción es máxima.

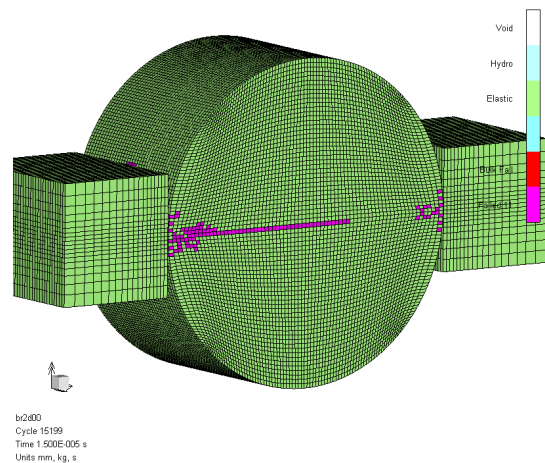


Fig. 12. Fisuración en la probeta a los $15 \mu s$. Se propaga la fisura central o principal.

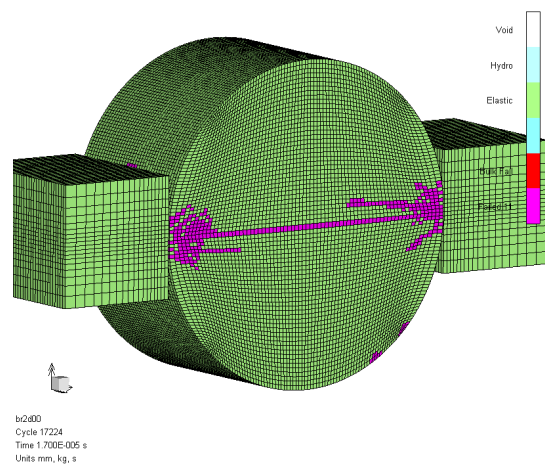


Fig. 13. Fisuración en la probeta a los $17 \mu s$. Una vez propagada la fisura principal, se inician las secundarias.

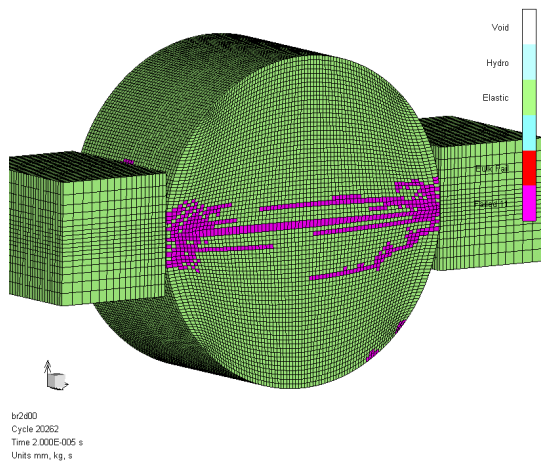


Fig. 14. Estado de la fisuración a los 20 μ s. Se propagan las fisuras secundarias que definen la geometría final de los fragmentos.

4. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se ha llevado a cabo una modelización de los ensayos brasileños en 3D y en condiciones dinámicas similares a las del equipo experimental de la barra Hopkinson. Los resultados de la simulación muestran que la probeta alcanza el equilibrio antes de que comience la rotura. En particular el tiempo necesario para el equilibrio tensional se estima en la mitad del necesario para llegar a rotura. Este resultado hace que este tipo de ensayos sean viables mediante la técnica experimental de la barra Hopkinson, que requiere que se alcance un equilibrio tensional durante el proceso de carga y régimen elástico y previo a la rotura del material. Las simulaciones numéricas también demuestran que el desplazamiento relativo entre los extremos de la probeta crece de forma lineal con el tiempo, lo que implica una velocidad de deformación constante durante el ensayo. Este resultado es determinante en el análisis de la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas, pues se asegura que durante el ensayo la velocidad de deformación permanece constante, lo que simplifica el análisis de resultados.

En el trabajo también se muestra que la tensión de tracción en el centro de la probeta y perpendicular al plano de aplicación de las cargas se puede relacionar directamente con la carga transmitida por la probeta mediante la ecuación (1). Además este valor de las tensiones coincide con el valor medio de las tensiones de tracción en dicho plano. Sin embargo, el valor máximo de la carga transmitida no se puede relacionar directamente con la resistencia a tracción del material, debido a las concentraciones de tensiones localizadas en la superficie del material. Este efecto hace que los resultados de los ensayos brasileños en condiciones dinámicas tengan que ser analizados con más detalle en trabajos posteriores. En ellos es necesario determinar si este efecto es propio de las condiciones dinámicas o se presenta también en ensayos estáticos. También es

necesario determinar si este efecto está relacionado directamente con el tamaño de la probeta o la relación longitud/diámetro de ésta.

Finalmente los resultados de las trayectorias de las fisuras concuerdan con bastante exactitud con los resultados de ensayos mecánicos reales publicados previamente.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia y tecnología por la financiación recibida a través del proyecto MAT2002-3538.

REFERENCIAS.

- [1] Ovri J.E.O., Davies T. J. "Diametral compression of silicon nitride". *Materials science and engineering*. 96, pp 109-116, 1987
- [2] C. Rocco, Influencia del tamaño y mecanismos de rotura del ensayo de compresión diametral. Tesis Doctoral. ETSI Caminos Canales y Puertos, UPM 1996.
- [3] C. Rocco, G. Guinea, J. Planas, M. Elices, Ensayo brasileño: Efecto de tamaño y mecanismos de rotura. *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 13, pp. 203 - 209, 1996.
- [4] J. Rodríguez, C. Navarro, V. Sánchez Gálvez, Splitting tests: An alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials, *Journal de Physique IV*, pp.101- 106, 1994.
- [5] F. Gálvez, J. Rodríguez, V. Sánchez-Gálvez, Tensile Strength Measurements of Ceramic Materials at High Rates of Strain. *Journal de Physique IV*, pp.151-156, 1997.
- [6] F. Gálvez, J. Rodríguez, V. Sánchez Gálvez, Influence of the strain rate on the tensile strength in aluminas of different purity, *Journal de Physique IV*, pp. 323-328, 2000
- [7] J. Rodríguez, C. Navarro, V. Sánchez Gálvez, Numerical assessment of the dynamic tension test using the split Hopkinson bar, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 22, No. 4, pp. 335-342, 1994
- [8] J. Rodríguez, R. Cortés, M.A. Martínez, V. Sánchez Gálvez, C. Navarro, Numerical study of the specimen size effect in the split Hopkinson pressure bar tests, *Journal of Materials Science*, Vol. 30, pp. 4720-4725, 1995
- [9] G. Ruiz, M. Ortiz, A. Pandolfi, Three-dimensional simulation of dynamic diametral compression tests on concrete cylinders. *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 16, pp. 298-303, 1999.