

APLICACION DE LA TECNICA DE EMISION ACUSTICA AL ESTUDIO DE LA FRACTURA DE UN MATERIAL CERAMICO MULTIFASICO

C. BAUDIN*
F. CAMBIER**
L. DELAHEY***

- * INSTITUTO DE CERAMICA Y VIDRIO (C.S.I.C.)
Arganda del Rey (Madrid).
- ** CENTRE DE RECHERCHES DE L'INDUSTRIE BELGE DE LA CERAMIQUE
Mons (Bélgica).
- *** KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN, Dept. Metaalkunde en
Toegepaste Materiaalkunde.

En este trabajo se ha detectado la emisión acústica de tres materiales cerámicos tipo, con objeto de fijar las posibilidades de esta técnica a la hora de determinar los distintos mecanismos de reforzamiento que actúan durante la fractura de los materiales cerámicos a base de circonia.

In the present work it has been recorded the acoustic emission of three standard ceramic materials in order to fix the usefulness of these techniques to distinguish the different toughening mechanisms taking place during the fracture of zirconia-based ceramics.

1. INTRODUCCIÓN

Se puede definir emisión acústica (EA) de un material como las ondas de presión generadas en él durante los procesos dinámicos.

Dependiendo de la fuente responsable de la emisión, el rango de frecuencias de la EA se extiende desde el infrasónico (<16 Hz) hasta el ultrasónico (>16 kHz). Los sucesos conocidos de mayor longitud de ondas, los movimientos de tierra, se encuentran en el extremo inferior de la escala ($\sim 10^{-1} \cdot 10$ Hz). Las emisiones de frecuencias situadas en la zona audible provienen de sucesos microseismológicos como la fractura de las rocas, y la E.A. propiamente dicha cubre frecuencias desde el audible hasta la zona ultrasónica de altas frecuencias (fig. 1).

Históricamente fue la seismología la primera ciencia que utilizó la E.A. como técnica experimental. Las ondas elásticas producidas durante los movimientos de tierra se analizaban en términos de la energía disipada y servían para la localización de los movimientos. Los padres del estado actual de esta técnica son Joseph Kaiser y sus colaboradores los cuales, en 1950, utilizaron por primera vez instrumentación electrónica para detectar los sonidos producidos en los metales durante su deformación.

En la década de los 60 la E.A. pasó a ser una técnica utilizada en todo el campo de la ciencia de los materiales. Ha sido aplicada con éxito para diferenciar los procesos que ocurren durante la fractura de los metales tales como la deformación plástica, la formación de microgrietas a las transformaciones martensíticas (para una revisión bibliográfica ver ref. 1).

En el campo de los materiales compuestos reforzados con fibras es también posible diferenciar por medio de esta técnica procesos tales como la fractura de una fibra de la laminación de la matriz /2/.

La E.A. ha sido también utilizada para estudiar la formación de microfisuras y la propagación de fisuras principales en varias cerámicas estructurales tales como porcelana /3-5/, alúmina /6-10/, y carburo de silicio /8-9/; en vidrios /10/, y en materiales de arcilla cocida /11/ (ver T-I).

El material que nos ocupa ha sido preparado siguiendo una técnica denominada sinterización reactiva /12-17/. Está formada por un esqueleto mullítico en el cual están embebidas partículas de circonato de forma redondeada y matrices alumínicas. Existen pequeñas discontinuidades formadas por una fase vítrea siliciosa donde se encuentran partículas de circonato de forma angulosa y matrices alumínicas. Existen también partículas de alúmina y circonato parcialmente embebidas en la fase vítrea y parcialmente en la matriz mullítica (fig 2).

Los valores de factor crítico de concentración de tensiones de estos materiales son del orden de $4 \text{ MPa m}^{\frac{1}{2}}$, más del 100% mayores que los obtenidos para la mullita pura ($\sim 2 \text{ MPa m}^{\frac{1}{2}}$). Si se tiene en cuenta el exceso de alúmina, los valores obtenidos mediante cálculos /18/ son de $2.6 \text{ MPa m}^{\frac{1}{2}}$, también inferiores que los medidos experimentalmente.

Se ha observado que durante la fractura de estos materiales ocurren varios fenómenos /19/. La fractura atraviesa la matriz mullítica cambiando su dirección dependiendo de las distintas inclusiones encontradas. Las partículas pequeñas de circonato (<1 μm) presentan fractura intergranular, siendo únicamente las partículas de mayor tamaño las que se encuentran atravesadas por la grieta. Las submatrices alumínicas presentan una fractura principalmente intergranular. Por último, la fisura crece también a lo largo de las interfases fase vítrea-matriz mullítica.

Para los materiales cerámicos a base de circonato se han propuesto dos mecanismos de reforzamiento basados en la transformación mar

tensítica (tetragonal → monoclínica) de la circona; ésta tiene lugar, durante el enfriamiento, a partir de 1200°C y lleva consigo un apreciable aumento de volumen (3-5%):

1) Transformación de las partículas de circona, retenidas en forma tetragonal durante el enfriamiento, en el campo de tensiones de la grieta principal.

2) Nucleación de las microgrietas, creadas debido a la transformación de las partículas durante el enfriamiento, en el campo de tensiones de la grieta principal. (para revisión ver ref. /20-21/).

En este trabajo se ha utilizado la E.A. como técnica para diferenciar los distintos fenómenos que ocurren durante la fractura de un material multifásico preparado por sinterización reactiva. Para ello se ha comparado la emisión procedente de este material durante la fractura con la emisión procedente de materiales patrón de microestructuras más sencillas.

2. MATERIALES PATRÓN

Se han utilizado como materiales patrón circona tetragonal policristalina y alúmina pura.

La circona tetragonal policristalina es un material formado por granos muy pequeños de circona retenida a temperatura ambiente bajo forma tetragonal. Existen dos factores que contribuyen a la estabilización de la circona: Por una parte, la adición de un 3% (en moles) de Y_2O_3 produce una estabilización química; y, por otra, existe también una estabilización mecánica debida a la presión que ejercen unos granos sobre otros. Hoy día se acepta que la mejora de sus propiedades mecánicas (respecto a las de la circona cúbica o monoclínica) se debe a la transformación de las partículas de circona en el campo de tensiones creado por el frente de la fisura /20-21/.

La alúmina es un material policristalino cuya expansión térmica se produce de forma altamente anisotrópica /6-7/, /24-26/. Su tenacidad aumenta al aumentar el tamaño de grano y alcanza un máximo, para tamaños del orden de 60 μm , a partir del cual empieza a disminuir al crecer el grano. La dilatación térmica anisotrópica durante el enfriamiento produce tensiones residuales, que dan lugar al desarrollo de microgrietas en el campo de tensiones de la fisura principal. Así se ve reducida la energía de deformación disponible para la propagación de la fisura principal. Este efecto es mayor para tamaños de grano mayores. Cuando el tamaño de grano es muy grande, se produce un crecimiento de la grieta principal por unión de ésta con las microfisuras lo cual conduce a un debilitamiento del material.

3. PARTE EXPERIMENTAL

Se ha registrado la emisión procedente de los materiales durante la penetración de una punta de diamante piramidal (V-136) a una velocidad de 0.05 mm/min en superficies previamente pulidas. La máquina utilizada fue una Instron. Las cargas máximas utilizadas fueron 10 y 40 Kg.

La salida del amplificador de la célula de carga se conectó al equipo de E.A. la cual permitía la representación de la E.A. en función de la carga aplicada.

Los detectores fueron cristales de circona parcialmente estabilizada (Philips PXE5) de 5 mm de diámetro y 1 mm de espesor, con ambas caras metalizadas. La frecuencia de resonancia de estos cristales era de 1 MHz. Para mejorar el acoplo mecánico entre la muestra y el detector se utilizó grasa.

Las señales acústicas fueron previamente amplificadas y filtradas con un preamplificador AET (modelo 160 B) cuya ganancia era de 60 dB y su banda de frecuencias de 250 a 500 kHz.

La unidad de procesamiento fue un amplificador AET 5000 de ganancia ajustable entre 0 y 40 dB y un microprocesador el cual permitía tanto representaciones de la E.A. en tiempo real como el procesamiento posterior de la señales.

Con objeto de evitar los ruidos de fondo y los procedentes del acoplamiento material-indentor se realizaron ensayos a cargas débiles, a las cuales no se producía grieta y se caracterizaron las señales registradas. Este tipo de emisión fue eliminado en los ensayos posteriores.

Para caracterizar la emisión registrada se escogió la representación de la distribución de energías de los sucesos. Esta es calculada por el microprocesador a partir de la amplitud máxima del suceso y su duración

$$10 \log \frac{V}{V_0}$$

Energía = máx. amplitud + 10 log (duración)

donde las unidades de la amplitud son dB y las de duración microsegundos.

El óxido de aluminio se preparó utilizando polvos RC172DBM a los cuales se añadieron pequeñas cantidades de MgO con objeto de evitar el crecimiento de grano exagerado y enaltecer el proceso de sinterización. El polvo fue prensado isostáticamente (200 MPa) y recibió un tratamiento térmico de una hora a 1600°C.

La circona tetragonal policristalina se preparó a partir de polvos comercializados por la firma TOYOSÓDA (Japón). Los polvos de partida se prensaron isostáticamente (200 MPa) y recibieron un tratamiento de una hora a 1500°C.

Las propiedades generales de los materiales patrón utilizados se resumen en la tabla II.

4. RESULTADOS

Las características principales de la emisión detectada son las siguientes:

1.- La emisión empezó a detectarse a partir de cargas pequeñas (~1 Kg) para la alúmina y el material preparado por sinterización reactiva. En el caso de la circona tetragonal la primera emisión ocurrió para cargas de 3-4 Kg.

2.- Para la alúmina y el material preparado por sinterización reactiva la emisión se producía de forma continua, incrementándose gradualmente, alcanzando un estado estacionario durante la carga y cesando al terminar ésta. La forma de la emisión en el caso de la alúmina fue más regular.

Para la circona tetragonal la emisión se incrementaba de forma brusca, siendo mayor a cargas bajas (<20 Kg). También en este caso tuvo lugar únicamente durante la carga, cesando bruscamente al terminar ésta.

3.- El material más activo acústicamente fue el preparado por sinterización reactiva y el menos activo la circona tetragonal policristalina.

Es interesante remarcar que, en general, el número de sucesos registrado para un material y carga máxima dadas fue mayor en las experiencias en las cuales el tamaño de la fisura era menor.

La reproducibilidad de las experiencias fue buena en los casos alúmina y circona tetragonal policristalina. Para el material preparado por sinterización reactiva se encontró dispersión en los resultados; ésta está ligada posiblemente a la mayor irregularidad en la forma de las huellas realizadas sobre este material.

La fig. 3 muestra ejemplos típicos de las distribuciones de sucesos en función de la energía de éstas obtenidas para los tres ma-

teriales en experiencias en las cuales la carga máxima aplicada fue 40 Kg. Los hechos más significativos a resaltar son los siguientes:

1.- En el caso de la circona tetragonal policristalina la distribución empieza en aproximadamente 22 dB y tiene su máxima entre 61 y 76.

-Para el óxido de aluminio la distribución va de 18 dB a 73 dB y tiene un pico pronunciado entre 33 y 38. Es posible dividir la distribución en dos partes; una de ellas entre 18 y 43 dB, cuyo máximo se situaría en 28 dB y otra entre 30 y 73, con el máximo situado en 38 dB. El pico central procedía en este caso de la adición de las dos subdistribuciones.

-En el material compuesto la distribución tiene su máximo entre 23 y 33 dB y puede dividirse en tres partes. En las experiencias realizadas utilizando 20 Kg como carga máxima hay dos picos claramente diferenciados: uno va de 23 a 28 dB y el otro de 30 a 48 dB; en las experiencias en las que la carga máxima fue 40 Kg la zona central entre estas dos subdistribuciones crece, haciendo que la separación entre ellas sea menos clara (fig. 4). Por último, existe un tercer pico situado a energías mayores que 63 dB, claramente diferenciado en las experiencias en las que la carga máxima fue 40 Kg.

Es interesante resaltar que el pico situado entre 30 y 48 dB se encuentra también en las experiencias realizadas en alúmina.

2.- Para todos los materiales, al aumentar la carga, el número de sucesos de baja energía crece más rápido que el de los de alta (fig. b3-4).

5. DISCUSIÓN

Dado el tipo de experiencias realizado no es posible diferenciar los fenómenos que ocurren durante la fractura del material en términos temporales, esto es: se detectan a la vez los fenómenos subcríticos y el crecimiento de la fisura principal.

El aumento del número de sucesos al disminuir el tamaño de la fisura para un material y una carga máxima dados puede ser debido a la ocurrencia de un mayor número de sucesos subcríticos, lo cual emplearía energía que en otro caso estaría disponible para el crecimiento de la fisura principal.

El que no se detecte emisión a cargas inferiores a 4 Kg en el caso de la circona tetragonal, está de acuerdo con que hasta 4 Kg no comienza la fractura. En los otros dos materiales ya se forman fisuras radiales a la huella cuando se utilizan cargas del orden de 1 Kg, lo cual está de acuerdo con que haya emisión desde el principio de la carga (dentro de los límites de error experimentales).

Común a todas las experiencias es un aumento del número de sucesos de baja energía al aumentar la carga, este tipo de sucesos ha sido relacionado con crecimiento subcrítico de las fisuras /7/. En nuestro caso este crecimiento subcrítico puede ser debido a ramificaciones de la fisura principal (a veces estas ramificaciones se ven incluso en la superficie, principalmente en el material preparado por sinterización reactiva), lo cual originaría los sucesos de baja energía antes mencionados.

El fenómeno de ramificación de la fisura principal es más importante en el material preparado por sinterización reactiva ya que es mayor el número de discontinuidades que ésta encuentra (p.e. los bordes de grano mullita-fase vítrea), también es mayor el número de sucesos de baja energía encontrado en este caso.

Al aumentar la carga es más importante este fenómeno. Por un lado, la fisura principal es mayor lo cual hace que haya un mayor número de puntos susceptibles de ser origen de fisuras secundarias; por otro, al ser la carga mayor, pueden desarrollarse fisuras a par

tir de defectos de menor tamaño.

Las distribuciones de sucesos en función de la energía de éstos obtenidas en las experiencias realizadas en la circonita tetragonal policristalina son estrechas y centradas en las altas energías (fig. 4-5-6). Esto es imagen de una forma de fractura bastante uniforme, llevada a cabo a base de sucesos iguales y muy energéticos. La primera característica está de acuerdo con la homogeneidad de la microestructura de este material y la segunda con su alta tenacidad.

Para la alúmina las distribuciones de sucesos por energía son más anchas que en el caso anterior, la división de éstas en dos subdistribuciones puede estar relacionada con los dos tipos de fenómenos que ocurren durante la fractura de la alúmina. Por un lado, el desarrollo de las fisuras alrededor de las partículas podría ser responsable de los sucesos de alta energía (>30 dB); la coalescencia de estas fisuras, proceso menos energético que el anterior, daría origen a la emisión de bajas energías (~18-43 dB).

En el material compuesto alúmina-mullita-circonita, las distribuciones antes mencionadas son mucho más complejas. En este caso hay al menos tres tipos de procesos que tienen lugar durante la fractura:

1.- Crecimiento de la fisura a lo largo de la interfase mullita-fase vítrea. Este fenómeno es el menos energético y no tiene lugar ni en la alúmina ni en la circonita, la gran cantidad de sucesos de baja energía (<30 dB) detectados en este material puede ser debida a él.

2.- Crecimiento de la fisura a través de las submatrices aluminicas. Este proceso podría ser el origen de la subdistribución de sucesos encontrada para el material mullita-alúmina-circonita, la cual coincide con la distribución encontrada para la alúmina (figs. 4-5).

3.- Crecimiento de la fisura en la matriz mullítica. La trayectoria de la fisura en la matriz mullítica no es regular, cambia su dirección dependiendo de las distintas inclusiones que encuentra. Así pues, su propagación está dividida en varios "saltos", cada uno caracterizado por una cantidad de energía disipada distinta.

El factor crítico de concentración de tensiones de una mullita reforzada con circonita es $3.3 \text{ MPa m}^{\frac{1}{2}}$, así pues, para la misma cantidad de fisura formada, la cantidad de energía dispersada en este caso es ligeramente menor que en el caso de la alúmina (ver T-II). Sin embargo, debido a la trayectoria de la fisura en este caso (cada extensión de la fisura tienen distinta longitud ya que depende de las inclusiones que encuentre), es de esperar la ocurrencia de sucesos de variadas energías. Esto podría ser responsable de las anchas distribuciones encontradas para este material y de la extensión de éstas hacia las altas energías (>30 dB).

5. CONCLUSIONES

Ha quedado demostrada la posibilidad de diferenciar los procesos que ocurren durante la fractura de un material multifásico por medio de la emisión acústica procedente de ellos.

La técnica de la indentación posee dos características que la hacen idónea para estos estudios: reproductibilidad y facilidad de realización.

REFERENCIAS

- /1/ Wadley, H.N.G, Mehrabian, R. Mat. Sci. Eng., 65. (1984), 245.
- /2/ Wevers, M., Verpoest, I., Aernoudt, E., de Meester, P., "Analysis of Fatigue Damage in CFR composites by means of Acoustic Emission: Setting up a Damage Accumulation Theory", presentado en "The 2nd International Conference on Acoustic Emission", Lago Tahoe, Stateline, Nevada (EE.UU.), 1985.
- /3/ Kirchoff, G., Pompe, W., Bahr, H.A., J. Mat. Sci., 17. (1982), 2809.
- /4/ Evans, A.G., Wiedharn, S.M., Linzer, M., Fuller J-R, E.R., Ceram. Bull, 54, (6), (1975), 20-
- /5/ Evans, A.G., Linzer, M., J. Amer. Ceram. Soc., 56, (11), (1973) 575.
- /6/ Evans, A.G., Linzer, M., Russell, L.R., Mat. Sci. Eng. 15, (1974), 253.
- /7/ Dagleish, B.J., Pratt, P.L., Rawlings, R.D., Fakhr, A., Mat. Sci. Eng., 45. (1980), 9.
- /8/ Cooke, R.G., en "Science of Ceramics, 10", Publ: Deutsche Keramische Gesellschaft, ed: H. Hausner 1980, 449.
- /9/ Hoeller, H.H., Powers, T., Petrak, D.R., Coulter, J.E., SAMPE Quaterly, 16, (4), (1985), 44.
- /10/ Dagleish, B.J., Farkhr, A., Pratt, P.L., Rawlings, R.D., J. Mat. Sci., 14. (1979), 2605.
- /11/ Wilshaw, T.R., Rothwell, R., Nature Phys. Sci., (London), 229, (1971), 156.
- /12/ Claussen, N., Jahn, J., J. Amer. Ceram. Soc., 63, (1980), 228.
- /13/ Anseau, M.R., Leblud, C., Cambier, F., J. Mat. Sci. Letters, 2. (1983), 366.
- /14/ Pena, P., Moya, J.S., de Aza, S., Cardinal, E., Cambier, F., Leblud, C., Anseau, M.R., J. Mat. Sci. Letters, 2, (1983), 772.
- /15/ Pena, P., Miranzo, P., Moya, J.S., de Aza, S., J. Mat. Sci., 20, (1985), 2011.
- /16/ Miranzo, P., Pena, P., Moya, J.S., de Aza, S., ibid 1702.
- /17/ Melo, M.F., Moya, J.S., Pena, P., de Aza, S., ibid 2711.
- /18/ Baudin, C., Leblud, C., Leriche, A., Cambier, F., Anseau, M.R., J. Mat. Sci. Letters, 4. (1985), 1099.
- /19/ Baudin, C., Cambier, F., Delacy, L., aceptado para publicación en J. Mat. Sci.
- /20/ Marshal, D.B., Evans, A.G., Drory, M., en "Fracture mechanics of Ceramics", vol. 6, Ed: R.C. Bradt, Plenum Press, New York-London, 289.
- /21/ Claussen, N., Rülhe, M., en "Science and Technology of Zirconia", Advances in Ceramics vol. 3, Ed: A.H. Heuer, L.W. Hobbs, 1981.
- /22/ Lange, F.F., J. Mat. Sci., 17, (1982), 240.
- /23/ Rice, R.W., Freiman, S.W., Becher, P.F., J. Amer. Ceram. Soc., 64, (6), (1981), 345.
- /24/ Mussler, B., Swain, M.V., Claussen, N., J. Amer. Ceram. Soc., 65, (11), (1982), 566.
- /25/ Evans, A.G., J. Amer. Ceram. Soc., 58, (5-6), (1975), 239.
- /26/ Dappra, L., Comunicación Personal.
- /27/ Leriche, A., Comunicación Personal.
- /28/ Osendi, M.I., Moya, J.S., J. Mat. Sci., 19, (1984), 2909.

TABLA I.- Revisión de las experiencias de Emisión Acústica realizadas en Materiales Cerámicos.

MATERIAL	TIPO DE EXPERIENCIA	UMBRAL DE DETECCION	FRECUENCIA DE RESONANCIA DEL TRANSDUCTOR	PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL
PORCELANA	-Doble tensión ⁵ (en agua)	-Cero cuando la carga se aplica en la parte no prefisurada de la muestra.	160 kHz	-Amplificador de 80 dB -Filtro de frecuencias -Contador de pulsos individuales y acumulados
	-Flexión ⁵	-Cero cuando la carga se aplica sobre una muestra no emisora (vidrio)		
	-Ciclo de calentamiento y enfriamiento ³		240 kHz	-Preamplificador -Filtro de frecuencias -Contador de sucesos y de cuentas
	-Sobrecarga de aisladores ⁴		180 kHz	
ALUMINA	-Doble tensión ⁶	-Cero cuando la carga se aplica en la parte no prefisurada de la muestra	160 kHz	-Amplificador de 8 dB -Filtro de frecuencias -Contador de pulsos individuales y acumulados
	-Flexión en 4 puntos con especímenes preparados ⁶ -Flexión en 4 puntos ⁶	-Cero cuando la carga se aplica sobre una muestra no emisora		
	-Localización lineal (2 detectores) del frente de fisura en experiencias de doble torsión ⁹		500 kHz	-Contador de sucesos -Posibilidad de establecer t entre la emisión recibida por dos detectores
	-Comparación de distintos métodos de medida de propiedades mecánicas (DCB, DT, SENB) y distintas microestructuras ⁵			-Contador de sucesos y de cuentas -Distribución de sucesos por amplitud y anchura

TABLA I (Continuación)

MATERIAL	TIPO DE EXPERIENCIA	UMBRAL DE DETECCION	FRECUENCIA DE RESONANCIA DEL TRANSDUCTOR	PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL
CARBURO DE SILICIO	<p>-Flexión en 3 puntos sobre especímenes prefisurados y no prefisurados ⁶</p> <p>-Localización lineal (2 detectores) del frente de fisura en experiencias de doble torsión ⁹</p>		180 kHz	<p>-Preamplificador de 60 dB.</p> <p>-Amplificador de 20 dB</p> <p>-Integrador</p> <p>-Contador de sucesos</p> <p>-Posibilidad de establecer Δt entre la emisión recibida por 2 detectores</p>
VIDRIO ¹⁰	-Raspado	-Por encima del ruido del contador	120 kHz	-Filtro, amplificador, contador de pulsos
ARCILLA + ARENA ¹¹	-Flexión en 3 puntos sobre especímenes prefisurados y no prefisurados.			
CERAMICAS A BASE DE ARCILLA ⁸	-Flexión en 3 puntos sobre especímenes prefisurados y no prefisurados			
CERAMICAS FINAS ⁸				

TABLA II - Propiedades generales de los materiales patrón utilizados.

<r> (μm)	E (GPa)	K _{IC} (MPa m ^{1/2})			H (GPa)		Material
		SNEB (4P)	IND (Evans)	IND (Lawn)	Q < 20 Kg	Q > 20 Kg	
<0.8	194±4	7.8±9 ²⁶	5.6 ²⁶	5.6 ²⁶	~12	~12	Circona tetragonal policristalina
~2.3	373±22	3.8 ²⁷	-	-	~40	~30	Alúmina

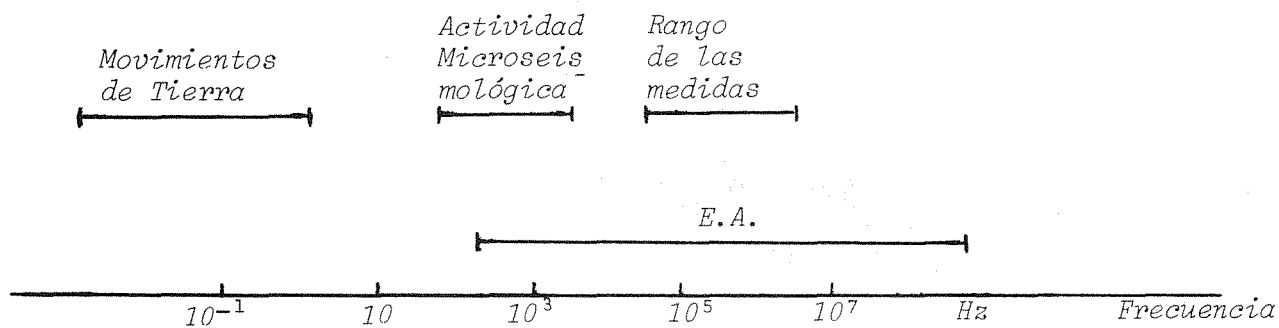


Fig. 1.- Rango de frecuencias de los fenómenos acústicos.

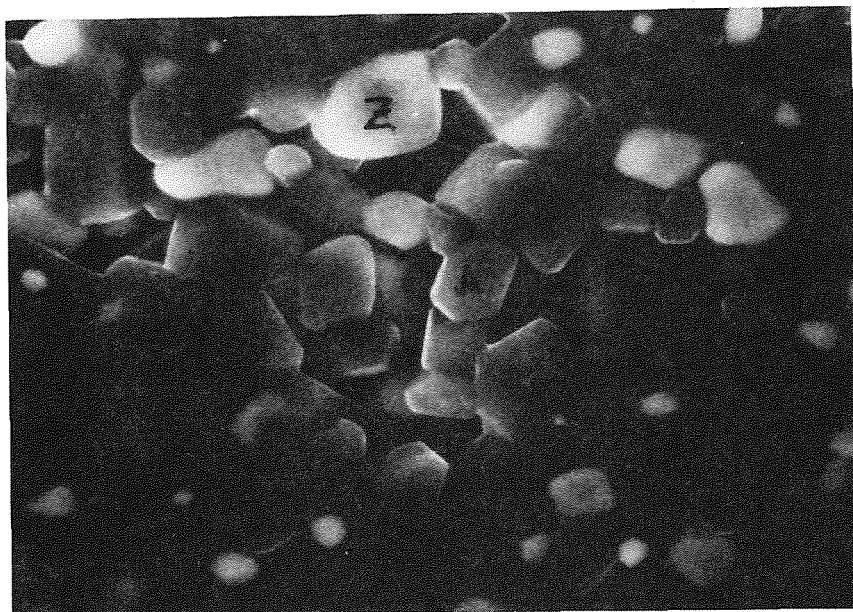


Fig. 2.- Microestructura del material compuesto mullita-alúmina-circona preparado por sinterización reactiva.

M: Mullita
 A: Alúmina
 Z: Circona

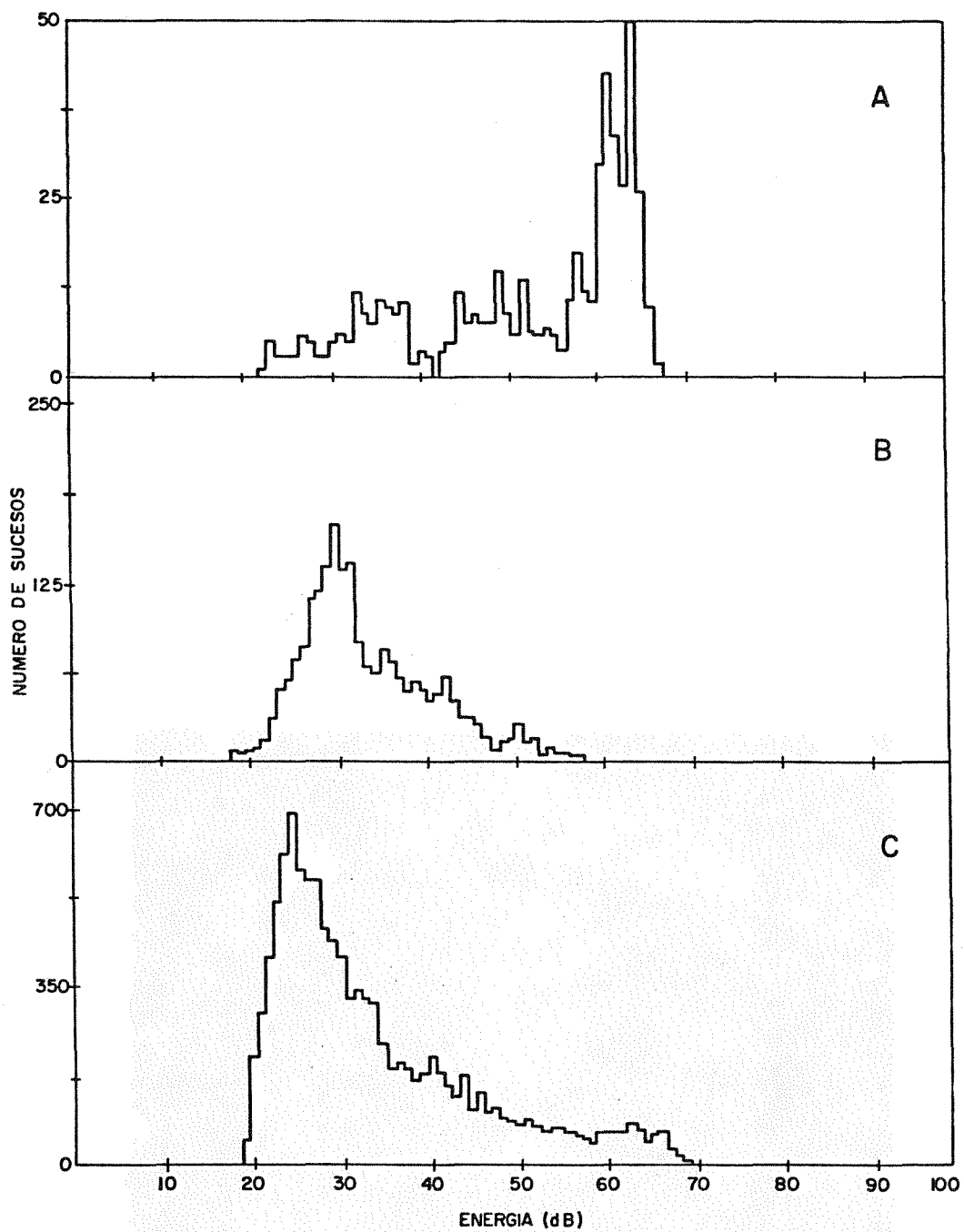


Fig. 3.- Distribución por energías de los sucesos registrados en experiencias realizadas utilizando una carga máxima de 40 Kg:

- a: Material compuesto mullita-alúmina-circona
- b: Alúmina
- c: Circona tetragonal policristalina

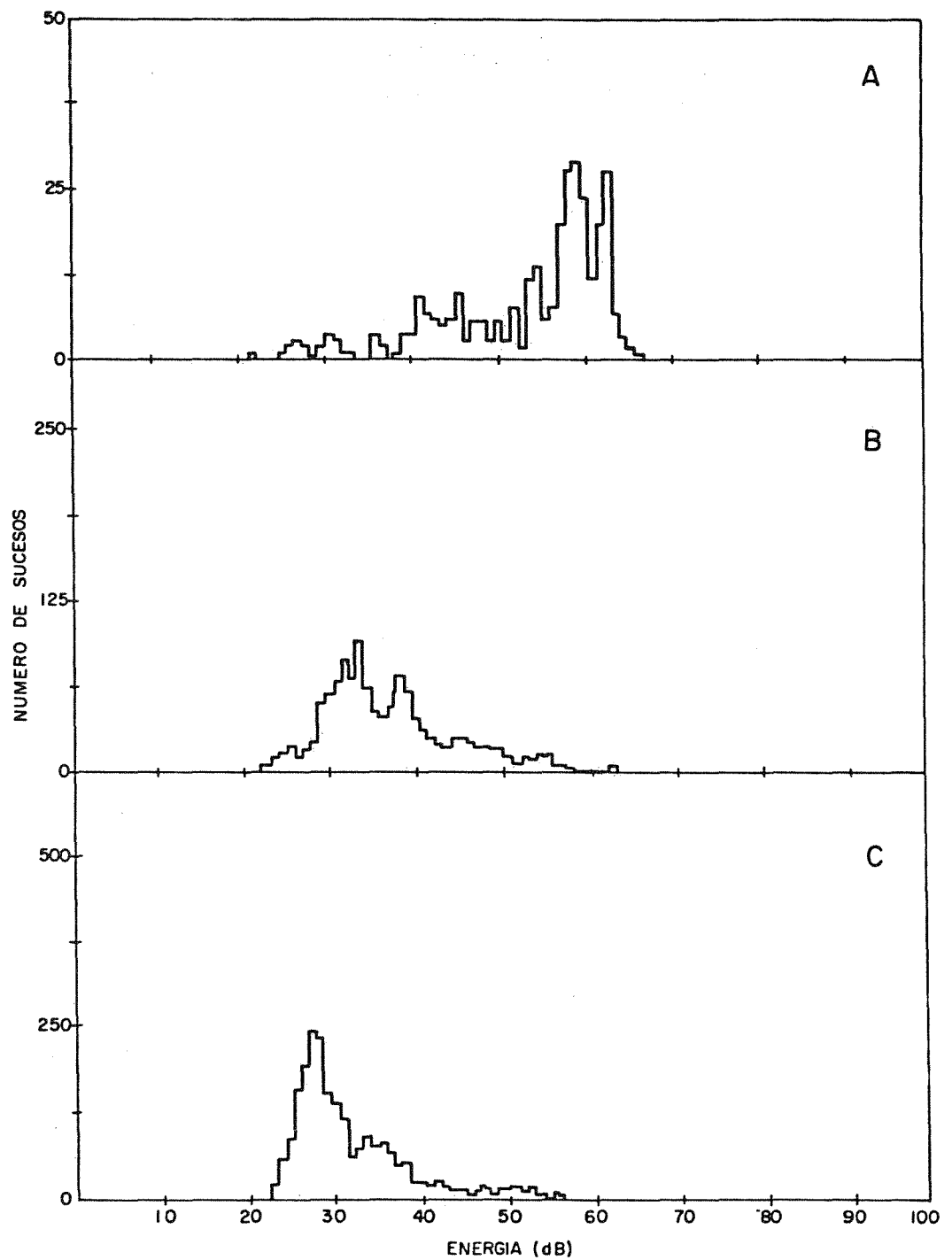


Fig. 4.- Distribución por energías de los sucesos registrados en experiencias realizadas utilizando una carga máxima de 20 Kg:

- a) Material compuesto mullita-alúmina-circona
- b) Alúmina
- c) Circona tetragonal policristalina