

DETERMINACION EXPERIMENTAL DEL UMBRAL DE MICROFISURACION TERMICA DE LA «ROCA MATRIZ» O «INTACT ROCK»

V. G. RUIZ ARGANDOÑA, L. CALLEJA Y M. MONTOTO

TRABAJOS DE
GEOLOGIA



Ruiz de Argandoña, V. G., Calleja, L. y Montoto, M. (1985).—Determinación experimental del umbral de microfisuración térmica de la «roca matriz» o «intact rock». *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 15, 299-306. ISSN 0474-9588.

Tres variedades petrográficas de «roca matriz» o «intact rock» (granodiorita, epidiorita y serpentinita), han sido sometidas a calentamiento externo, en horno eléctrico, desde temperatura ambiente hasta 330° C, bajo gradientes de 0,7, 2 y 6° C/min auscultándose la emisión acústica (E.A./A.M.) generada. Asimismo se ha determinado la porosidad desarrollada.

A partir de los datos obtenidos se han definido los umbrales de microfisuración térmica (U.M.T.) de estas rocas: granodiorita de Gondomar 110-115° C, epidiorita de Mellid 130-135° C y serpentinita de Moeche 230-235° C.

Three petrographic types of «intact rock» (granodiorite, epidiorite and serpentinite) have been heated in electric oven up to 330° C under different heating-gradients (7, 2 y 6°/min), monitoring the so generated acoustic emission/microseismic activity (A.E./M.A.). The variations in their porosity were also evaluated.

Their thermal microfissuration threshold have been determined: Gondomar granodiorite 110-115° C, Mellid epidiorite 130-135° C and Moeche serpentinite 230-235° C.

V. G. Ruiz de Argandoña, L. Calleja y M. Montoto, Departamento de Petrología y Geoquímica, Facultad de Geología, Universidad de Oviedo. Manuscrito recibido el 10 de enero de 1985.

INTRODUCCION

En los países industrializados existe una creciente tendencia a almacenar determinadas sustancias en el seno de formaciones geológicas, tanto por razones económicas como de seguridad. En el caso concreto de aquellas sustancias que, como los residuos radiactivos de alta actividad, son capaces de generar calor durante prolongados períodos de tiempo (cientos a miles de años), el problema adquiere una dimensión multidisciplinar especial, en cuyo estudio están involucradas las comunidades científicas de todos los países desarrollados.

Esta utilización industrial de formaciones rocosas profundas, con un almacenamiento de sustancias capaces de contaminar gravemente la biosfera, plantea unas nuevas exigencias en tecnología geológica, ya que debe en todo momento poderse garantizar tanto la estabilidad como la estancidad del medio rocoso donde se

ha construido la caverna almacén (Montoto 1981). En especial dichas garantías deben cumplirse durante los anormalmente largos períodos de servicio de la obra, lo que a su vez plantea mayor rigurosidad en los procedimientos mediante los cuales se controla la seguridad del producto almacenado.

Desde el punto de vista geológico, dichos controles se centran en la auscultación permanente de la estabilidad geomecánica de la propia caverna y la del medio geológico, el cual se haya sometido a situaciones tensionales de procedencia múltiple (residuales tectónicas, de construcción de la obra y térmicas por la desintegración continuada de los combustibles radiactivos almacenados). Asimismo debe contemplarse en estos estudios la posibilidad de un accidente capaz de desarrollar un gradiente térmico anormalmente alto en el medio rocoso. En especial debe poderse predecir la variación de la situación tensional interna en la roca con

dicho incremento térmico, a fin de poder evaluar la microfisuración que se desarrollaría, los incrementos subsiguientes en la permeabilidad, etc.

Todo ello plantea en Petrofísica la necesidad de una interpretación más rigurosa de los mecanismos de deformación y fisuración que se desarrollan en el seno de la «roca matriz» o «intact rock», cuando se la somete a tensiones térmicas.

Para solventar estas específicas cuestiones se desarrollan nuevas tecnologías geológicas con las que, de forma indirecta, permanente y automatizada, poder auscultar la seguridad de la caverna almacén. Entre dichas tecnologías destacan actualmente aquellas basadas en los fenómenos de emisión acústica/actividad microsísmica que tiene lugar en todo tipo de materiales cuando se hallan sometidos a tensión. La realidad de estos fenómenos en las formaciones geológicas ha sido ampliamente constatada y explicada (Hardy 1981), así como interpretada petrofísicamente (Montoto *et al.* 1983).

Desde el punto de vista fractográfico, en el momento en que se inicia la fisuración en la roca, se produce una liberación repentina de energía que genera ondas elásticas, E.A./A.M., las cuales se transmiten a través del medio rocoso y pueden ser captadas mediante un transductor.

Por otra parte dicha emisión acústica o actividad microsísmica, permite también valorar, no sólo la situación tensional a que está sometida la «intact rock», sino también los máximos valores tensionales que la han afectado durante episodios térmicos previos, (Ruiz de Argandoña *et al.* 1984).

Se confirma, una vez más, que las técnicas basadas en la captación y registro de la E.A./A.M. se han manifestado como un método eficaz para auscultar los procesos de deformación y rotura que suceden en el seno de las rocas.

En el caso de los residuos radiactivos de alto nivel, almacenados en cavidades en roca, el gradiente térmico continuo que genera su desintegración, desarrolla tensiones en el medio rocoso circundante, las cuales son potencialmente capaces de provocar su microfisuración interna, con la consiguiente degradación de sus propiedades geomecánicas y más peligroso incremento de su permeabilidad.

Es por ello por lo que resulta esencial conocer, para los diferentes tipos petrográficos sus-

ceptibles de ser utilizados como roca almacén, las temperaturas a las que se inicia la microfisuración de su «roca matriz» o «intact rock» (según terminología de la Int. Soc. Rock Mech. referente a un volumen de roca carente de discontinuidades de macizo). Consecuentemente procede poner a punto una tecnología geológica con la que poder interpretar, en remoto, la situación fractográfica real del medio geológico inaccesible donde se encuentra la cavidad.

METODO DE TRABAJO

El calentamiento experimental de estas rocas ha sido realizado en un horno eléctrico, utilizando probetas cúbicas de 50 mm de arista, en las cuales se ha hecho una perforación de 2 mm de diámetro desde el centro de una cara hasta el centro geométrico del cubo; en dicho interior, se ha instalado un termopar de tipo J (hierro-constantán), con el fin de determinar la evolución de la temperatura en el centro del cubo, respecto a la del interior del horno.

Las probetas así preparadas han sido sometidas a un incremento térmico lineal, desde temperatura ambiente hasta 330° C midiéndose la emisión acústica generada.

Las velocidades de calentamiento del horno, han sido 0,7, 2 y 6° C/min, reguladas por medio de un emisor-regulador de programa Jumo-Optomat, con detección opto-electrónica.

Una vez alcanzada la temperatura máxima en el interior del cubo, ésta se ha mantenido constante hasta que no se detectaba emisión acústica.

A continuación, en cada ensayo, se ha procedido al enfriamiento de la muestra con una velocidad siempre inferior a 1° C/min, con el fin de no producir choque térmico.

Posteriormente al calentamiento a 2° C/min, se han medido las porosidades total y abierta según el método propuesto por Belikov *et al.* (1967).

Para poder registrar la emisión acústica generada durante los ensayos térmicos, se ha diseñado un accesorio de vidrio Pyrex («wave guide») sobre el cual, y en el exterior del horno, se acopló el transductor (Fig. 1). El equipo utilizado para el análisis de la E.A./A.M. fue el modelo 204 GR de «Acoustic Emission Technology» (CA, USA), con un rango de frecuencias de 100 a 300 kHz en cuentas (counts), en períodos de 10 segundos y con una amplificación de 92 decibelios (dB).

CARACTERISTICAS PETROGRAFICAS

GRANODIORITA DE GONDOMAR

Es una roca de color gris claro, con textura ligeramente heterogranular de grano fino,

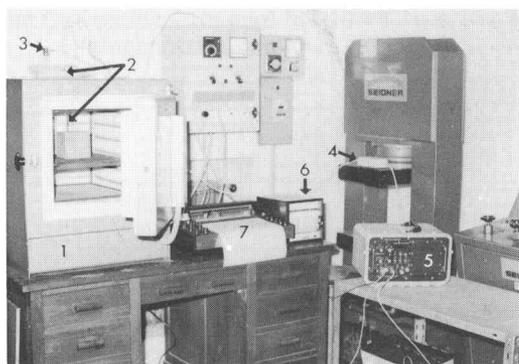


Fig. 1.—Equipo experimental: (1) horno eléctrico, (2) varilla de vidrio, (3) transductor, (4) preamplificador, (5) sistema de amplificación y registro de la emisión acústica, (6) programador, (7) registro gráfico.

siendo su tamaño medio 1,5 mm. Esporádicamente, se aprecian algunos cristales de feldespato cuyo desarrollo puede alcanzar hasta 8 mm.

La composición mineralógica modal es la siguiente: cuarzo (31,5 %); microclina (14,6 %); plagioclasa (An_{25-40}) (41,5 %); biotita (9,3 %) y moscovita (2,6 %).

Las observaciones mediante microscopía óptica de fluorescencia y SEM, permiten constatar la baja densidad microfisural existente en esta roca y su escasa coalescencia. No obstante, existe una fisuración abierta de tipo transgranular conectada a fisuras abiertas intergranulares, que se localizan generalmente en los contactos cuarzo-feldespato.

En los feldespatos puede observarse una marcada porosidad de poro, que en ocasiones afecta a una gran parte del mineral.

EPIDIORITA DE MELLID

Roca de color verde, con textura intergranular subidiomórfica de grano fino, siendo su tamaño medio 1,1 mm; todos sus minerales están afectados por un proceso de alteración química importante.

La composición mineralógica modal es la siguiente: plagioclasa (An_{35}) (66,5 %); pigeonita (11,3 %); clorita (15,5 %); óxidos de hierro (3,4 %) y anfíbol como producto de alteración de los piróxenos (2,3 %).

Presenta una escasa o nula fisuración, predominando la porosidad de poro debida fundamentalmente a la alteración química, que puede localizarse alineada en los bordes de grano o

bien en los cristales de feldespato. No existe, a nivel global, ningún tipo de orientación de dicha porosidad.

SERPENTINITA DE MOECHE

Roca de color verde, con pequeñas vetas grises intercaladas que corresponden a carbonatos y yesos. Presenta una marcada foliación planar en bandas de espesor variable, pero nunca mayores de unos pocos milímetros.

Microscópicamente presenta dos texturas claramente diferenciadas: una, perteneciente a los minerales del grupo de la serpentina, criptocristalina; otra, localizada en las bandas, formadas esencialmente por carbonatos, que dan lugar a una textura granuda poligonal.

Mediante difracción de Rayos X, se ha obtenido la composición modal: antigorita, magnetita y talco, por este orden, de mayor a menor porcentaje.

No presenta una red microfractográfica bien desarrollada. No obstante, mediante la microscopía óptica de fluorescencia, localmente se observan fisuras transgranulares desarrolladas paralelamente a la foliación de la roca. Estas fisuras están asociadas a las vetas de carbonatos.

La cuantificación de la porosidad de la «matriz de roca» o «intact rock», se ha realizado según el método propuesto por Belikov *et al.* (1967), obteniéndose los siguientes resultados:

Granodiorita de Gondomar: porosidad abierta (n_0) = 0,73 %, porosidad total (n) = 1,37 %.

Epidiorita de Mellid: porosidad abierta (n_0) = 0,55 %, porosidad total (n) = 1,78 %.

Serpentinita de Moeche: porosidad abierta (n_0) = 2,2 %, porosidad total (n) = 3,78 %.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

GRANODIORITA DE GONDOMAR

Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 2. En ella puede observarse como en el calentamiento hasta 330° C a 2° C/min, se registra un valor máximo de emisión acústica de 970 counts/10 s, que comienza a manifestarse cuando la temperatura del horno es de 110-115° C, coincidente con la detectada por Ruiz de Argandoña y Calleja (1984) y Ruiz de Argandoña *et al.* (1984) en ensayos sobre el efecto Kaiser térmico en esta roca. Asimismo, puede observarse cómo en el calentamiento a 0,7° C/min se inicia el registro importante de la emi-

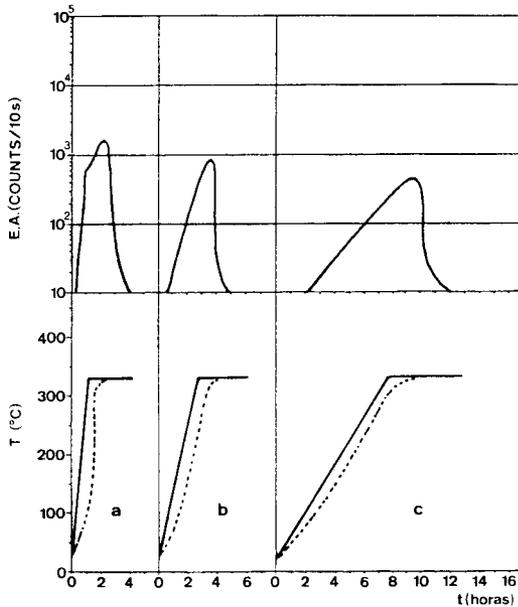


Fig. 2.—Evolución de la emisión acústica (E.A./A.M.) frente a la temperatura (T) en la granodiorita de Gondomar a diferentes velocidades de calentamiento: (a) 6°C/min, (b) 2°C/min y (c) 0,7°C/min. La línea continua corresponde a la temperatura del horno; la discontinua a la del interior de la probeta.

sión acústica a 110-115° C, alcanzándose un máximo de 550 counts/10 s, cuando toda la muestra se encuentra a 330° C. Este mismo hecho se produce cuando se efectúa el calentamiento a una velocidad de 6° C/min. Llegándose a registrar un valor máximo de 1.512 counts/10 s. A esta temperatura, que coincide con un notable incremento en el registro de la emisión acústica, se la denomina umbral de microfisuración térmica (U.M.T.). No obstante, hasta dicha temperatura, existe un registro de valores de E.A./A.M. de escaso valor y muy separados en el tiempo, que algunos autores lo asocian a reajustes internos dentro de la roca (Perami 1971; Todd 1973; Cooper y Simmons 1977).

Como puede observarse, independientemente de la velocidad de calentamiento ensayada, una vez alcanzado el máximo de emisión acústica, que coincide cuando la temperatura del horno y del interior de la muestra se hacen iguales, el enfriamiento de la muestra se realiza de forma paulatina y similar.

Las porosidades total $n(\%)$ y abierta $n_0(\%)$, determinadas en la roca ensayada a 2° C/min, se expresan en la Tabla I. Representando los valores de las porosidades frente a la temperatura (Fig. 3), se observa cómo, de acuerdo con

TABLA I.—Porosidad total (n) y abierta (n_0) en la granodiorita de Gondomar

T°C	20	110	330
n (%)	1,37	1,30	1,74
n_0 (%)	0,73	0,70	1,10

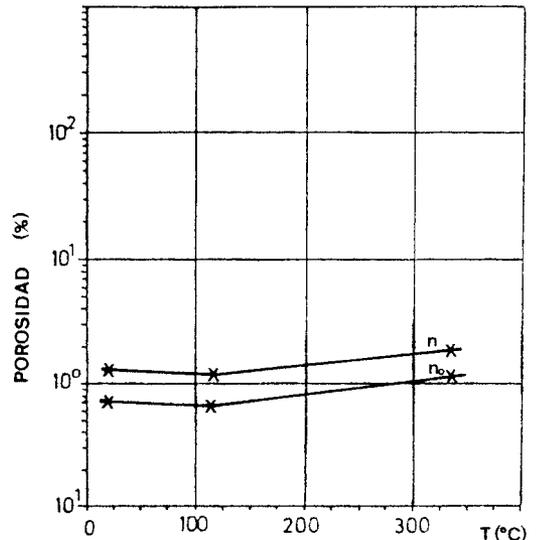


Fig. 3.—Variación de la porosidad total (n) y abierta (n_0) con la temperatura (T) en la granodiorita de Gondomar.

Simmons y Cooper (1978), el volumen total las fisuras depende exponencialmente del máximo de temperaturas. No obstante, estudiando en detalle el comportamiento que expresa la Fig. 3, puede observarse como hasta 110-115°C se produce un cierre parcial de la porosidad preexistente. Esto es debido a que, aún existiendo una expansión térmica diferencial de los minerales que constituyen la roca (Fig. 4), no se supera el límite de resistencia a la rotura de las uniones intergranulares y, por tanto, no se genera nueva fisuración. La porosidad preexistente absorbe la expansión térmica generada hasta la superación del límite elástico de estos minerales en su contexto petrográfico. A este cierre parcial de la porosidad se le pueden asociar, por lo tanto, los escasos valores registrados de emisión acústica hasta el correspondiente valor del umbral de microfisuración térmica. Este mismo fenómeno ha sido claramente demostrado en rocas graníticas alteradas y con elevada porosidad ($n = 5,21\%$), sometida a tensiones mecánicas uniaxiales (Montoto *et al.* 1983). A partir de esta

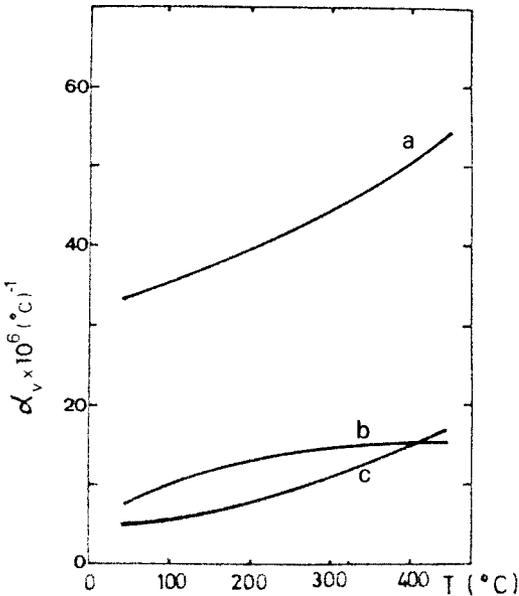


Fig. 4.—Variación de los coeficientes de expansión térmica volumétrica (α_v) con la temperatura (T): (a) cuarzo, (b) plagioclasa, (c) feldespato potásico. (Skinner 1966).

temperatura se produce un notorio aumento en la porosidad abierta.

EPIDIORITA DE MELLID

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5. En ella puede verse cómo en el calentamiento a 2°C/min , la emisión acústica significativa se empieza a registrar a una temperatura de $130\text{--}135^\circ\text{C}$, llegándose a un máximo de 63 counts/10 s aproximadamente cuando la temperatura del horno es de unos 200°C . A continuación la E.A./A.M. comienza a descender paulatinamente, aunque la muestra continúe calentándose, hasta que la temperatura del horno sube hasta unos 300°C , comenzando en este punto una ligera recuperación, alcanzando 40 counts/10 s cuando la temperatura de toda la muestra es de 330°C .

La explicación a este fenómeno experimentado en la epidiorita, debe buscarse en la variación con la temperatura de los coeficientes de expansión térmica de sus minerales petrográficos. Así, en esta roca la causa principal del inicio de la microfisuración térmica, reside en la diferencia existente entre los coeficientes de expansión volumétrica de sus piroxenos y plagioclasas (Fig. 6), lo que genera fuertes tensiones internas en la roca, preferentemente locali-

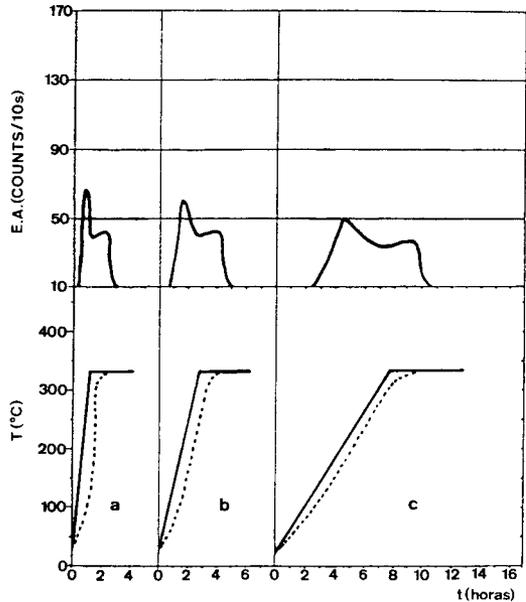


Fig. 5.—Evolución de la emisión acústica (E.A./A.M.) frente a la temperatura (T) en la epidiorita de Mellid a diferentes velocidades de calentamiento: (a) 6°C/min , (b) 2°C/min y (c) 0.7°C/min . La línea continua corresponde a la temperatura del horno; la discontinua a la del interior de la probeta.

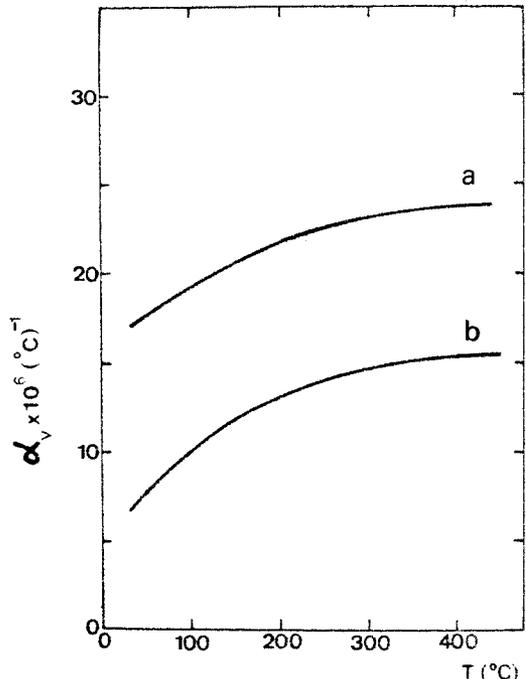


Fig. 6.—Variación de los coeficientes de expansión térmica volumétrica (α_v) con la temperatura (T): (a) piroxeno, (b) plagioclasa. (Skinner 1966).

zadas en posiciones intergranulares, que llegan a superar el límite de resistencia de los bordes de grano.

Si se estudia con mayor detalle la evolución con la temperatura de dichos coeficientes (Skinner, 1966), se reconoce que el incremento de los coeficientes de expansión volumétrica de la pigeonita y de la plagioclasa (An_{35}), es mayor entre 20 y 200° C que el que experimentan estos mismos coeficientes entre 200 y 400° C.

Por otra parte, en la Fig. 5 puede observarse, cómo la tendencia en la evolución de la emisión acústica a las distintas velocidades es similar. Así, a 0,7° C/min, se inicia la emisión acústica importante a 130-135° C, alcanzándose un máximo valor de 50 counts/10 s a una temperatura del horno de 200° C, registrándose a los 330° C un valor de 30 counts/10 s. De la misma manera, en el calentamiento a 6° C/min, se inicia la E.A./A.M. significativa a 130-135° C, alcanzándose 75 counts/10 s a los 200° C del horno y 56 counts/10 s cuando toda la muestra alcanza los 330° C. Se determina así un umbral de microfisuración térmica para la epidiorita de Mellid de 130-135° C, aunque como en el caso de la granodiorita de Gondomar, se registran algunas emisiones de escaso valor y separadas en el tiempo, antes de dicho umbral.

En todos los ensayos efectuados, una vez alcanzado el máximo de emisión acústica correspondiente a los 330° C, que coincide cuando la temperatura del interior de la muestra y del horno se hacen iguales, el descenso es similar y paulatino.

Las porosidades total $n(\%)$ y abierta $n_0(\%)$ determinadas con posterioridad al calentamiento a 2° C/min, se expresan en la Tabla II. Como en el caso anterior de la granodiorita de Gondomar, existe cierre parcial en la porosidad abierta hasta la superación del U.M.T., mecanismo que se puede asociar a los valores de emisión acústica registrados hasta dicha temperatura. Al representar los valores de las porosidades frente a la temperatura Fig. 7, se observa de nuevo como el volumen de las nuevas fisuras

TABLA II.—Porosidad total (n) y abierta (n_0) en la epidiorita de Mellid.

T°C	20	130	330
n (%)	1,78	1,43	1,95
n_0 (%)	0,55	0,48	1,10

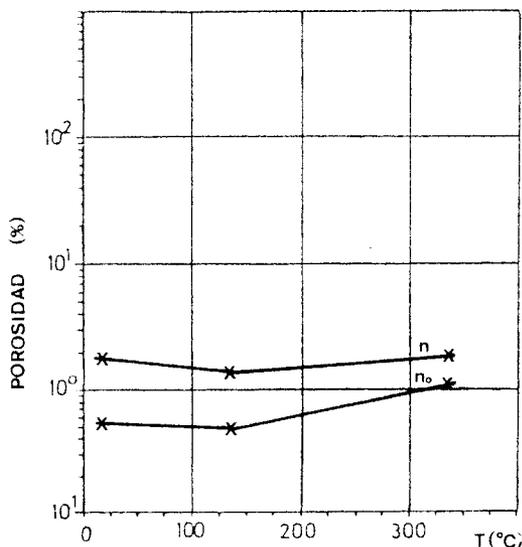


Fig. 7.—Variación de la porosidad total (n) y abierta (n_0) con la temperatura en la epidiorita de Mellid.

depende exponencialmente del máximo de temperatura (Simmons y Cooper, 1978).

SERPENTINITA DE MOECHE

Los resultados se representan en la Fig. 8. En ella puede verse cómo en el calentamiento hasta 330° C a 2° C/min, la emisión acústica importante, se inicia aproximadamente a 230-235° C, alcanzándose un máximo de 108 counts/10 s aproximadamente cuando se homogeneiza la temperatura del horno (exterior de la probeta) y la del interior de dicha probeta. A continuación comienza a descender paulatinamente para desaparecer a unas 5 horas de comenzado el ensayo. En el calentamiento a 0,7° C/min, el inicio de la E.A./A.M. significativa se inicia, como en el caso anterior, entre 230-235° C, alcanzándose un valor máximo 85 counts/10 s. Asimismo, a 6° C/min se determina el inicio de la emisión acústica en 230-235° C, registrándose un máximo de 132 counts/10 s cuando la temperatura del horno y del interior de la probeta es de 330° C. Se ha determinado pues un umbral de microfisuración térmica para la serpentinita de Moeche de 230-235° C.

En todos los ensayos efectuados, una vez alcanzado el máximo valor de E.A./A.M., la evolución en el registro de la misma es similar.

La fisuración térmica de esta roca es debida a la expansión anisótropa de los carbonatos que

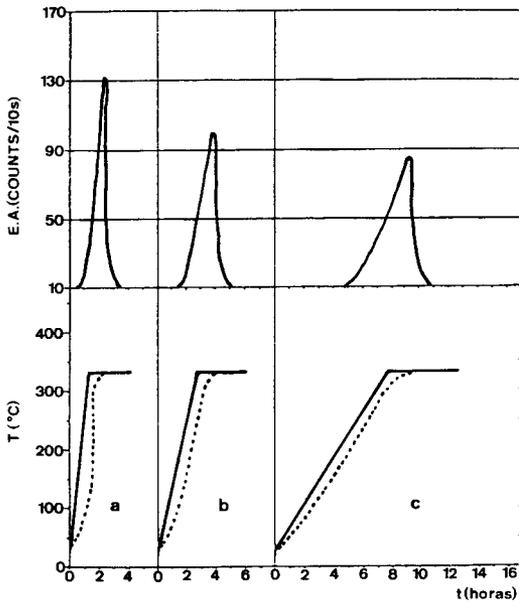


Fig. 8.—Evolución de la emisión acústica (E.A./A.M.) frente a la temperatura (T) en la serpentinita de Moeche a diferentes velocidades de calentamiento: (a) 6°C/min, (b) 2°C/min y (c) 0,7°C/min. La línea continua corresponde a la temperatura del horno; la discontinua a la del interior de la probeta.

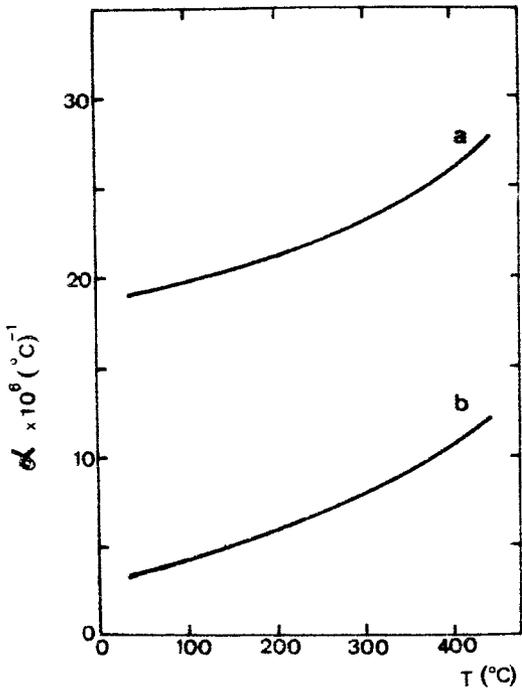


Fig. 9.—Variación de los coeficientes de expansión térmica lineal de la magnesita (α) con la temperatura (T): (a) perpendicular al eje «c», (b) paralelo al eje «c». (Skinner 1966).

componen la roca, cuyos coeficientes de expansión lineal aumentan con la temperatura (Fig. 9).

Los valores de porosidad total $n(\%)$ y abierta $n_0(\%)$ medidos con posterioridad al calentamiento efectuado a 2° C/min, se expresan en la Tabla III. Si se representan los valores de las porosidades frente a la temperatura (Fig. 10), el volumen de nuevas fisuras depende exponencialmente del máximo de temperatura alcanzada (Simmons y Cooper 1978).

TABLA III.—Porosidad total (n) y abierta (n_0) en la serpentinita de Moeche

T°C	20	230	330
n (%)	3,78	4,32	4,50
n_0 (%)	2,20	1,90	1,90

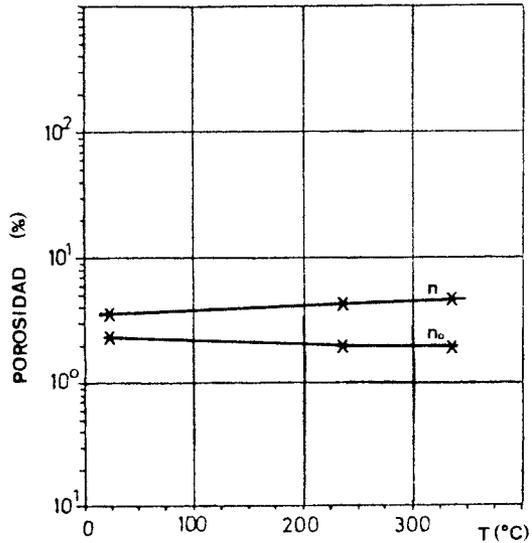


Fig. 10.—Variación de la porosidad total (n) y abierta (n_0) con la temperatura (T) en la serpentinita de Moeche.

No obstante, en esta roca (y debido al calentamiento que muestran las variaciones de sus porosidades total y abierta, con la temperatura (Fig. 10)), no es posible determinar el U.M.T. a partir de dichas variaciones; sin embargo, queda perfectamente fijado por medio del registro de la emisión acústica.

CONCLUSIONES

En condiciones de calentamiento uniforme para las tres variedades ensayadas de «matriz

de roca» («intact rock»), existe una clara dependencia entre la temperatura alcanzada y la emisión acústica registrada a las diferentes velocidades de calentamiento.

Esta emisión acústica se origina, fundamentalmente, por la propagación y desarrollo de microcracks debidos a la expansión térmica diferencial de los minerales constituyentes de las rocas. Mediante el análisis de la E.A./A.M. y la variación de los valores de porosidad (salvo en la serpentinita, en la que existe una marcada indeterminación entre n y T) se ha podido determinar los umbrales de microfisuración térmica (U.M.T.): granodiorita de Gondomar 110-115° C, epidiorita de Mellid 130-135° C y serpentinita de Moeche 230-235° C.

Las diferentes velocidades de calentamiento

utilizadas en los ensayos no influyen en los valores de dichos umbrales.

En todos los ciclos térmicos, una vez que se alcanza el máximo valor de emisión acústica, ésta empieza a descender paulatinamente aunque se mantenga la temperatura constante. Esto es debido a que, a pesar de que toda la roca se encuentra a la máxima temperatura, coincidente con el máximo de emisión, ésta todavía no ha alcanzado el estado de configuración de equilibrio de crack para dicha temperatura (Johnson *et al.*, 1978; Kurita y Fujii, 1979).

Los procedimientos de auscultación y registro de la E.A./A.M., constituyen una adecuada tecnología geológica para la detección y valoración de los procesos de fisuración que se desarrollan en el seno de la «roca matriz» o «intact rock» sometida a tensiones térmicas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto 4.447/79, subvencionado por la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica: «Microfisuración térmica

en macizos rocosos por almacenamiento de residuos radioactivos: estudio petrofísico y auscultación microsísmica».

BIBLIOGRAFIA

- Belikov, B. P., Zalesskii, B. V., Rozanov, Y. A., Sanina, E. A. y Timchenko, I. P. (1967).—Methods of studying the physicommechanical properties of rocks. In: *Physical and mechanical properties of rocks*. Israel program for scientific translations, 152 pp., Jerusalem.
- Cooper, H. W. y Simmons, G. (1977).—The effect of crack on the thermal expansion of rocks. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 36, 404-412.
- Hardy, H. R., Jr. (1981).—Applications of acoustic emission techniques to rock and rock structures: A state-of-the-art Review. In: *Acoustic emission in geotechnical engineering practice*. STP 750, A.S.T.M., 4-22.
- Johnson, B., Gangi, A. F. y Handin, J. (1978).—Thermal cracking of rock subjected to slow, uniform temperature changes. *Proc. 19th U. S. Symp. on Rock Mech.*, 259-267.
- Kurita, K. y Fujii, N. (1979).—Stress memory in crystalline rocks in acoustic emission. *Geophys. Res. Lett.*, 6, 1, 9-12.
- Montoto, M. (1981).—Almacenamiento de residuos radioactivos: planteamiento geológico. *Simp. Uso industrial del subsuelo*, 2, 155-158. Madrid.
- , Suárez del Río, L. M., Khair, A. W. y Hardy, H. R., Jr. (1983).—Acoustic emission in uniaxially loaded granitic rocks in relation to their petrographic character. *3rd. Conf. on Acoustic emission/microseismic activity in geologic structures and materials*. The Pennsylvania State University. U.S.A., Oct. 5-7, 1981, Clausthal, Trans Tech. Publ.
- Perami, R. (1971).—Contribution à l'étude expérimentale de la microfissuration des roches sous action mécaniques et thermiques. *Thesis. Univ. Paul Sabatier*, Toulouse, France.
- Ruiz de Argandoña, V. G. y Calleja, L. (1984).—Determinación del umbral de microfisuración térmica mediante emisión acústica/actividad microsísmica. *Proc. VIII Simp. Nac. Soc. Esp. Mec. Rocas: Reconocimiento de Macizos Rocosos*, 1, Comunicación 2-7. Madrid.
- , —, Montoto, M. y Suárez del Río, L. M. (1984).—Efecto Kaiser en rocas sometidas a tensiones térmicas. *Proc. I Congreso Español de Geología*, III, 477-483.
- Simmons, G. y Cooper, H. W. (1978).—Thermal cycling cracks in three igneous rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 15, 145-148.
- Skinner, B. J. (1966).—Thermal expansion. En: *Handbook of physical constants*. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 97, 75-96.
- Todd, T. (1973).—Effect of cracks on elastic properties of low porosity rocks. *Ph. D. Thesis*, M.I.T., Cambridge, Mass., U.S.A.