

VARIACION DE LA EXPANSION TERMICA EN ROCAS CRISTALINAS

L. CALLEJA Y V. G. RUIZ DE ARGANDOÑA

TRABAJOS DE
GEOLOGIA

Calleja, L. y Ruiz de Argandoña, V. G. (1985).—Variación de la expansión térmica en rocas cristalinas. *Trabajos de Geología*, Univ. de Oviedo, 15, 307-313. ISSN 0474-9588.



Se estudia la variación de la expansión térmica en tres rocas ígneas (granodiorita de Gondomar, epidiorita de Mellid y serpentinita de Moeche) en función de la variación de la temperatura y de la microfisuración inducida por ciclos térmicos previos. Se ha medido, además, la deformación longitudinal permanente producida por estos ciclos.

Ambos parámetros, expansión y deformación permanente, se han interpretado en función de las características petrográficas y fractográficas de las rocas.

Three igneous rocks (Gondomar granodiorite, Mellid epidiorite and Moeche serpentinite, from NW Spain) have been subjected to heating cycles. The variation in their thermal expansion, related to temperature and induced microfissuration, during one previous heating cycle, has been studied. The permanent longitudinal strain, after heating, has been also measured.

Both parameters, thermal expansion and permanent strain, have been petrographic and fractographically interpreted.

Lope Calleja y Vicente G. Ruiz de Argandoña, Departamento de Petrología y Geoquímica, Facultad de Geología, Universidad de Oviedo. Manuscrito recibido el 10 de enero de 1985.

INTRODUCCIÓN

Las tendencias en la moderna tecnología geológica para conseguir distintos tipos de aprovechamiento de los macizos rocosos: barreras naturales en la emigración de radionúclidos (almacenamiento de residuos radiactivos), acumuladores de energía (almacenamiento de agua caliente en cavernas en roca), o simplemente su uso como depósito de determinados combustibles (petróleo, gas natural, etc.), confieren una especial importancia a las propiedades térmicas de las rocas. Es por ello por lo que, independientemente del propio interés académico que representa todo conocimiento relativo al comportamiento de un medio rocoso en función de la temperatura a que está sometido, se trata de un aspecto de tratamiento ineludible cuando se planifica el uso industrial de un macizo rocoso.

Dentro de dicha problemática, en el presente trabajo se estudia la variación del coeficiente de expansión lineal térmica con la temperatura, en tres tipos de «matriz de roca» o «intact rock» (según terminología de la «International Society for Rock Mechanics», o sea volúmenes de roca

libres de discontinuidades de macizo) sometidas a microfisuración por ciclos de calentamiento a diferentes rangos de temperatura. Se trata de la granodiorita de Gondomar (serie de granitos calco-alcalinos tardíos de Pontevedra), epidiorita de Mellid (complejo de rocas básicas de Mellid, Lugo) y serpentinita de Moeche (complejo de rocas ultrabásicas de Cabo Ortegal, La Coruña).

Por otra parte dichas rocas constituyen unos materiales tipo en nuestra investigación básica; con ellos y con otras rocas que no se considerarán en este trabajo, se han realizado numerosos estudios académicos que sirven de fundamento para enmarcar y corroborar la validez de las interpretaciones petrofísicas que desde hace años viene realizando el Departamento de Petrología y Geoquímica de la Universidad de Oviedo.

En lo que se refiere al comportamiento físico de las rocas (de nuevo restringido al de la «intact rock»), debe considerarse, desde el punto de vista petrofísico, no sólo el comportamiento individual de sus minerales petrográficos, sino el de los restantes componentes de la roca, en-

tre los cuales las fisuras, los poros y la propia textura realizan un papel altamente condicionante (Montoto 1983).

En el caso concreto de la expansión térmica en rocas cristalinas poliminerálicas, con muy baja porosidad inicial, como dos de las aquí estudiadas, la influencia de la composición mineralógica resulta condicionante.

En general puede afirmarse que las diferencias que se observan en los valores del coeficiente de expansión térmica pueden achacarse a todos o algunos de los siguientes factores (Hockman y Kessler 1950; Richter y Simmons 1974; Hasan 1978; Bauer y Johnson 1979; Page y Heard 1981; Ehara *et al.* 1983; etc.):

- Composición química y mineralógica.
- Grado de alteración mineral.
- Textura y bordes de grano.
- Tamaño de grano.
- Fisuración y porosidad.
- Contenido en fluidos.
- Densidad de los minerales.
- Estructura de la red cristalina.
- Defectos cristalinos (densidad de dislocaciones).

Todas las causas anteriormente citadas son intrínsecas al medio rocoso, pero existen otros factores ajenos al mismo y que condicionan el valor del coeficiente, como son:

- Temperatura.
- Velocidad de calentamiento.

Estos factores externos son invocados por buena parte de los autores anteriormente citados y por otros, como: Heard y Page (1982), Gascón y Balbas (1983), Homand-Etienne y Troalen (1984), etc., entre los más recientes trabajos que se ocupan de este tema.

En concreto, en este trabajo únicamente se plantea la influencia de la temperatura sobre la variación del coeficiente de expansión, ya que la velocidad de calentamiento se ha mantenido constante. Por otra parte, se relacionan asimismo los resultados obtenidos con las características mineralógicas y fractográficas de las rocas seleccionadas.

Finalmente, se puede señalar que la variación de este coeficiente con la temperatura se muestra claramente influenciada por anteriores ciclos térmicos a los que haya sido sometida la roca.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Se define el coeficiente de expansión lineal térmica como el incremento de longitud que experimenta un

material al elevarse su temperatura un grado, siendo sus unidades $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

En las rocas este coeficiente es función directa de la temperatura (ver, p. ej., Heuze 1983) de manera que aumenta con ésta, aunque los valores que pueden obtenerse son siempre muy bajos, del orden de 10^{-6} a 10^{-5} .

Se han determinado los coeficientes de expansión lineal térmica hasta 400°C , con el fin de estudiar su evolución con la temperatura. Además, y con el objeto de ver en qué medida este coeficiente es afectado por las consecuencias de un ciclo de calentamiento previo, también se han realizado medidas en muestras precalentadas (y enfriadas posteriormente) a 130, 230, 330 y 430°C ; la velocidad de calentamiento en todos los ensayos se ha mantenido constante a $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, y la de enfriamiento no ha superado en ningún caso $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Los ensayos fueron realizados en un dilatómetro automático THETA DILATRONIC-1, de un rango de temperatura entre 20 y 1.000°C , registrando en un equipo MPE-PLOTAMATIC 715 las curvas de porcentaje de alargamiento frente a la temperatura, gráficas a partir de las cuales se determinó el coeficiente de expansión lineal.

El procedimiento de ensayo es dinámico (subida lineal y constante de la temperatura a una velocidad máxima de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta 430°C), utilizándose como sistema de medida un módulo DILAFLEX sobre una varilla maciza de aleación INVAR. El tarado del aparato fue realizado con una muestra patrón de platino puro, obteniéndose, en todos los casos, un error máximo del 1 %.

Los ensayos se llevaron a cabo sobre muestras cilíndricas de 50 ± 2 mm de longitud y 10 mm de diámetro, utilizándose un mínimo de cinco muestras en cada caso. Las muestras fueron cortadas de manera tal que las bases fuesen paralelas entre sí y perpendiculares a la generatriz del cilindro. En el caso de la serpentinita de Moeche, y con el fin de estudiar la influencia de la anisotropía textural que la afecta, se realizaron medidas sobre probetas orientadas perpendicular y paralelamente a la dirección de la anisotropía.

Previamente a la realización del ensayo se midió la longitud de cada muestra, con el fin de determinar la existencia, o no, de una deformación permanente originada por el calentamiento. Para ello se volvieron a medir las muestras con posterioridad a los ensayos; estas medidas fueron realizadas un mínimo de 15 días después de cada ensayo. Los errores máximos a que están sujetos los valores obtenidos son de un 0,1 %.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

Las tres rocas estudiadas se caracterizan petrográficamente y fractográficamente por:

- *Granodiorita de Gondomar*. Compuesta mineralógicamente por cuarzo (31,5 %), micro-

clina (14,6 %), plagioclasa (An_{25-40}) (41,5 %), biotita (9,3 %) y moscovita (2,6 %), distribuidos en una textura granuda alotriomórfica, ligeramente heterogranular, de grano fino. Fractográficamente presenta fisuras transgranulares conectadas con otras intergranulares.

– *Epidiorita de Mellid*. Textura intergranular subidiomórfica de grano fino, compuesta esencialmente por plagioclasa (An_{35}) (66,5 %), pigeonita (11,3 %), clorita (15,5 %), anfíboles (2,3 %) y óxidos de hierro (3,4 %). Fractográficamente apenas presenta fisuración. Únicamente existe porosidad de poro en las plagioclasas.

– *Serpentinita de Moeche*. Compuesta mineralógicamente por un 77,2 % de serpentina, 13,5 % de magnesita y un 9,3 % de óxidos de

hierro, talco e hidromicas. La serpentina presenta una textura mesh, criptocristalina, mientras que la magnesita aparece, junto con el resto de los minerales, en vetas subparalelas con textura granuda poligonal. Fractográficamente presenta fisuras abiertas asociadas a las vetas de magnesita.

Una descripción más amplia de estas rocas puede verse en Calleja *et al.* (1984).

RESULTADOS OBTENIDOS. INTERPRETACIÓN

En la Fig. 1 a, b y c se han representado las curvas de variación del coeficiente de expansión térmica entre 20 y 400°C, correspondientes a las muestras que no habían sido sometidas a ningún ciclo previo de calentamiento. Para las

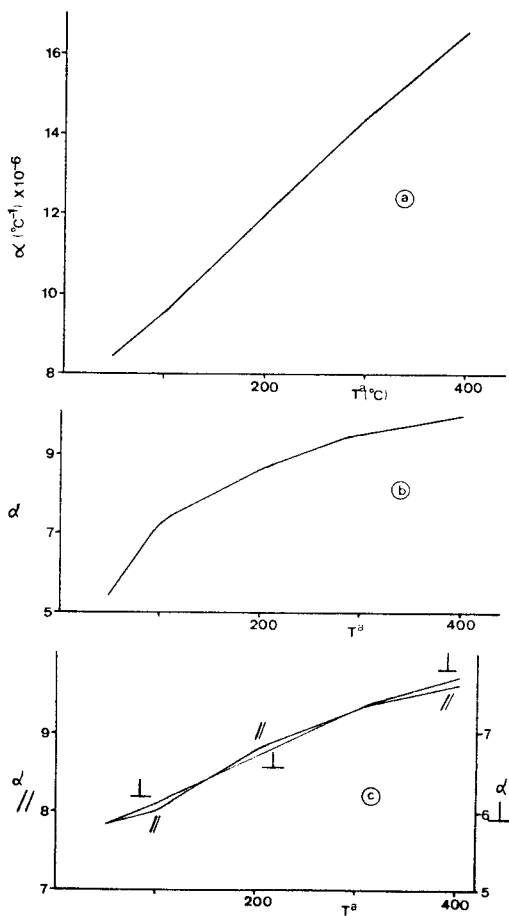


Fig. 1.—Variación del coeficiente de expansión lineal térmica (α) con la temperatura (T°) en muestras no precalentadas: a) granodiorita de Gondomar, b) epidiorita de Mellid, c) serpentinita de Moeche.

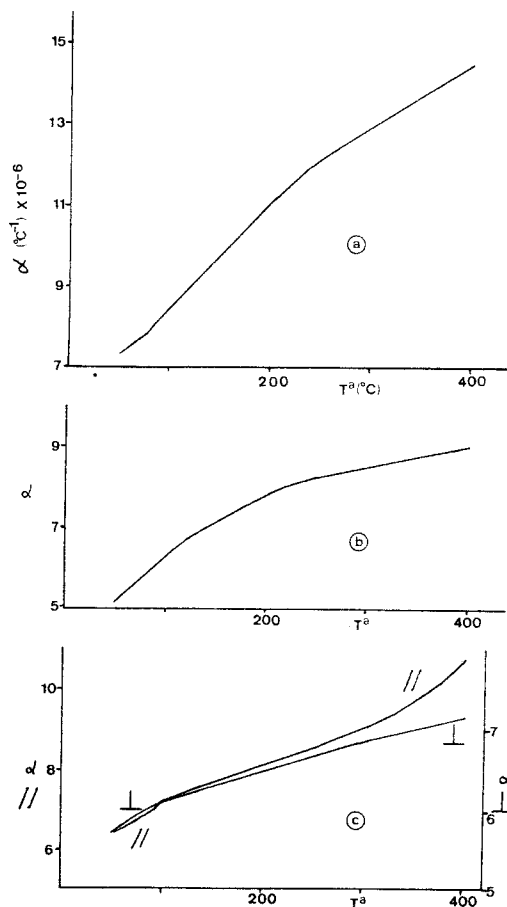


Fig. 2.—Variación del coeficiente de expansión térmica lineal (α) con la temperatura (T°) en muestras precalentadas a 430°C: a) granodiorita de Gondomar, b) epidiorita de Mellid, c) serpentinita de Moeche.

rocas que ya habían sido calentadas, se representan, a modo de ejemplo, en la Fig. 2 a, b y c las correspondientes a las que fueron sometidas a 430°C, ya que su morfología no varía apenas de unas a otras; no así los valores máximos, que pueden verse en las Tablas I, II, III y IV, donde se han expresado los coeficientes correspondientes a 50, 100, 200, 300 y 400°C, obtenidos para todas y cada una de las rocas ensayadas.

En estas Tablas puede observarse que en to-

dos los casos, independientemente del tipo de roca, o de que esta haya sido o no previamente calentada, el coeficiente aumenta al aumentar la temperatura.

Es también notable el hecho de que en la granodiorita y la epidiorita, los coeficientes determinados a cualquier temperatura, son menores en las probetas que han sufrido un ciclo previo de calentamiento, que en las no calentadas. A su vez, y dentro de las previamente

TABLA I.—Coeficientes de expansión lineal térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$) en la granodiorita de Gondomar

	No calen.	Precal. 130° C	Precal. 230° C	Precal. 330° C	Precal. 430° C
50°C	8,43	8,25	8,00	7,80	7,30
100°C	9,45	9,10	8,80	8,65	8,20
200°C	12,16	11,70	11,70	11,30	11,00
300°C	14,35	13,75	13,70	13,70	13,00
400°C	16,60	16,24	15,40	15,35	14,50

TABLA II.—Coeficientes de expansión lineal térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$) de la epidiorita de Mellid

	No calen.	Precal. 130°C	Precal. 230°C	Precal. 330°C	Precal. 430°C
50°C	5,62	5,97	5,40	5,24	5,15
100°C	7,35	7,30	7,07	6,68	6,35
200°C	8,63	8,51	8,38	8,11	7,80
300°C	9,63	9,42	8,76	8,63	8,31
400°C	10,02	9,84	9,54	9,35	9,05

TABLA III.—Coeficientes de expansión lineal térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$) en las muestras de serpentinita de Moeche perpendiculares a la anisotropía textural

	No calen.	Precal. 130°C	Precal. 230°C	Precal. 330°C	Precal. 430°C
50°C	5,7	6,0	5,9	5,8	5,7
100°C	6,1	6,3	6,3	6,2	6,1
200°C	6,7	7,2	7,2	7,1	6,5
300°C	7,3	7,7	7,6	7,5	7,1
400°C	7,7	8,0	8,2	8,1	7,9

TABLA IV.—Coeficientes de expansión lineal térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$) en las muestras de la serpentinita de Moeche paralelas a la anisotropía textural.

	No calen.	Precal. 130°C	Precal. 230°C	Precal. 330°C	Precal. 430°C
50°C	7,7	7,8	7,8	7,9	6,3
100°C	8,0	8,4	8,3	8,4	7,3
200°C	8,6	9,1	8,9	9,4	7,9
300°C	9,3	9,8	9,8	9,8	8,8
400°C	9,6	10,5	10,4	10,6	9,3

calentadas, dichos coeficientes son menores cuanto mayor había sido la temperatura del ciclo previo, salvo en el caso del coeficiente determinado a 50°C en las muestras de epidiorita precalentadas a 130°C.

Esto se explica por la interdependencia que existe entre la expansión térmica y la fisuración inicial de la roca. En la Fig. 3 a, b y c se han representado los coeficientes de expansión lineal determinados a 50°C en las muestras no calentadas y precalentadas a las distintas temperaturas de referencia, calculada según el método propuesto por Belikov *et al.* (1967). Puede observarse que en el caso de la granodiorita y la epidiorita la relación es claramente inversa, de manera tal que cuanto mayor es la porosidad inicial, se obtienen menores valores de expansión térmica. Esta misma relación, aunque quizás no tan claramente definida, puede observarse (Fig. 3 c) para la serpentinita en las determinaciones realizadas perpendicularmente a la dirección del veteado, mientras que, en esta misma roca, la tendencia de los valores correspondientes a las secciones paralelas a las vetas no está nada clara.

Por todo ello, si se tiene en cuenta que el «Umbral de microfisuración térmica» (U.M.T.) se sitúa entre 130 y 135°C y que la porosidad de la roca precalentada a 130°C es menor que la inicial (Calleja y Ruiz de Argandoña 1984), queda claro por qué el valor del coeficiente a 50°C de las muestras de epidiorita precalentadas a 130°C, es mayor que el determinado en la roca no calentada.

La relación existente entre la expansión térmica y la porosidad se explica al considerar el carácter anisótropo del coeficiente en los minerales que constituyen las rocas. Esta anisotropía se refiere, tanto a las diferencias que presentan los coeficientes de unos minerales respecto de otros, como las que existen dentro de una misma especie mineral al considerar sus distintas orientaciones cristalográficas. Así, según Skinner (1966), el coeficiente de expansión lineal del cuarzo, prácticamente se duplica según se mida en secciones perpendiculares o paralelas respecto del eje «c», existiendo también diferencias, a veces tan importantes o incluso mayores, para el resto de los minerales petrográficos que no pertenezcan al sistema cúbico.

La expansión térmica diferencial genera una serie de tensiones en las interfases cristalinas, tanto en los contactos de minerales diferentes, como en los bordes de grano homofásicos

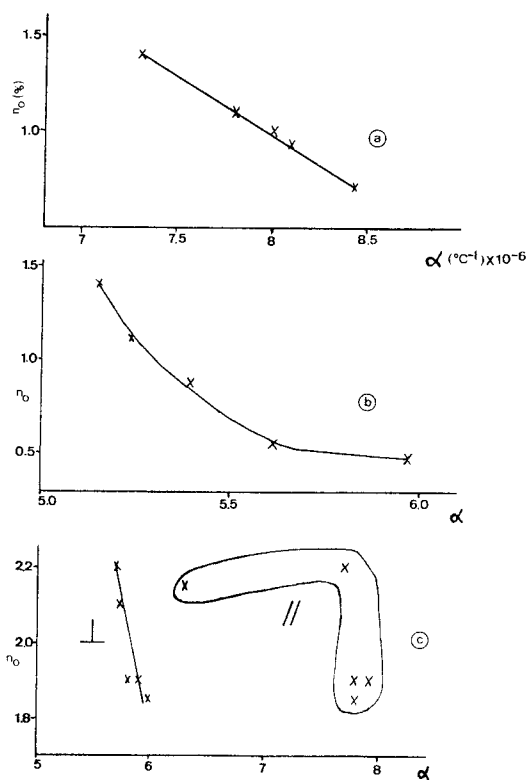


Fig. 3.—Relación entre la variación de la porosidad abierta (n_0) y la del coeficiente de expansión lineal a 50°C (α) en función de los ciclos previos: a) granodiorita de Gondomar, b) epidiorita de Mellid, c) serpentinita de Moeche.

cuando los cristales tienen diferente orientación. La acumulación de tensiones tiene lugar hasta que se alcanza la temperatura del U.M.T., a partir de la cual se produce la apertura de alguno de los bordes de grano, dando lugar al aumento de la porosidad. La porosidad de este modo generada, junto con la ya preexistente, es la que hace que, al calentar de nuevo la roca, el coeficiente de expansión sea menor que el determinado en la misma roca con porosidad inicial menor. Puesto que el coeficiente de los minerales de la roca, considerados individualmente, es el mismo, al ser la misma la mineralogía de la roca, la única causa que justifica el decrecimiento de la expansión de la roca, es que parte de la expansión de los minerales que la forman queda absorbida por el incremento de fisuración experimentado en los ciclos previos.

Asimismo, el decrecimiento de la porosidad al ser calentada la roca a una temperatura inferior a su U.M.T., está también relacionado con

la expansión mineral que, en un primer estado, cierra poros y/o fisuras preexistentes en la roca.

Este proceso ha sido ya constatado por algunos autores, y así, Bauer y Johnson (1970) determinaron que el aumento de la fisuración en rocas graníticas, calentadas por debajo de la temperatura de transición de cuarzo α -cuarzo β (573°C), es debido a la diferente expansión térmica del cuarzo y los feldspatos, manifestándose, según estos autores, el aumento de la porosidad, como un incremento de la interconexión de las fisuras ya existentes y en la aparición de nuevas fisuras. Las fisuras térmicas se producen por dos mecanismos fundamentales (Sprunt y Brace 1974); por una parte, por la interconexión de poros aislados preexistentes, y por otra, por la superación de la energía de borde de grano, que se produce por la expansión térmica diferencial, y que origina la apertura de los mismos a partir del U.M.T. En el mismo sentido se pronuncian Homand-Etienne y Troalen (1984), señalando además que en rocas carbonatadas la apertura de bordes de grano es el mecanismo principal de fisuración, y que ésta ocurre por encima de los 200°C, lo que es acorde con los resultados obtenidos para la serpentinita de Moeche, en la que el U.M.T. se sitúa por encima de los 230°C, estando la fisuración localizada en las vetas de magnesita (Calleja y Ruiz de Argandoña 1984).

Además de la diferente expansión de los minerales y de su distinta orientación, las tensiones internas que generan la porosidad vienen también provocadas por el gradiente térmico (Hockman y Kessler 1950). Así, el calentamiento externo de una roca provoca una expansión desigual entre las zonas más superficiales (más calientes) y las más internas (más frías) que origina tensiones entre microvolúmenes planares de roca. Es evidente que este efecto actúa simultáneamente al anterior y sumándose

a él, mientras no se alcance la homogeneización de la temperatura en todo el volumen de roca, y siempre que la velocidad de calentamiento sea mayor que la conductividad térmica; se trata, en concreto, de un notable efecto de escala.

Además del coeficiente de expansión lineal, y en las mismas probetas, se han determinado los porcentajes de deformación longitudinal permanente después de un ciclo hasta 400°C, tanto en las muestras no calentadas, como en las que ya habían sufrido un ciclo previo a las distintas temperaturas de referencia. Los valores obtenidos aparecen en la Tabla V, siendo el porcentaje de error máximo de 0,1 %. Como puede observarse en esta Tabla, en la granodiorita, epidiorita y serpentinita paralela al veteado, el máximo incremento de deformación residual tiene lugar en el ciclo realizado hasta 430°C en la roca no precalentada, puesto que en las precalentadas sólo aumenta ligeramente (en la epidiorita sólo en la que había sufrido el ciclo previo a 430°C, y en la granodiorita en todas las muestras precalentadas, es mayor en 0,05 unidades) o no varía, como es el caso de la serpentinita en muestras paralelas al veteado. En las muestras de serpentinita ensayadas perpendicularmente a las vetas de carbonato, el comportamiento no se corresponde con el de las rocas anteriores, ya que, de no sufrir deformación residual en la roca no calentada al ser sometida al ciclo hasta 430°C, alcanza el 0,20 % de deformación permanente en todas las muestras que ya habían sido calentadas anteriormente, independientemente de la temperatura del ciclo previo.

CONCLUSIONES

El coeficiente de expansión lineal térmica es función de varios factores:

- a) Temperatura.

TABLA V.—Porcentajes de deformación residual permanente en las rocas estudiadas, después de un ciclo hasta 430°C, en función de que la roca hubiese sido o no precalentada a una temperatura previa.

	Granodiorita	Epidiorita	Serpentinita vetas./vetas	
Roca no precal.	0,25 %	0,20 %	0,00 %	0,10 %
Precal. 130°C	0,30 %	0,0 %	0,0 %	0,10 %
Precal. 230°C	0,30 %	0,20 %	0,20 %	0,10 %
Precal. 330°C	0,30 %	0,20 %	0,20 %	0,10 %
Precal. 430°C	0,30 %	0,25 %	0,20 %	0,10 %

b) Microfisuración inicial y su distribución en la roca.

c) Composición mineralógica.

a) Al aumentar la temperatura aumenta el coeficiente de expansión, independientemente del tipo de roca y de su porosidad inicial.

b) Cuando se microfisura térmicamente una muestra rocosa por calentamiento a diversas temperaturas, el coeficiente de expansión lineal térmica varía inversamente con el cambio experimentado por la fisuración.

La orientación de la fisuración anisótropa condiciona la variación del coeficiente de expansión térmica. Así, al medir la expansión en muestras de serpentinita con los planos de fisu-

ración dispuestos perpendicularmente a la dirección de expansión, ésta queda absorbida parcialmente por los huecos, mientras que con las medidas realizadas cuando las fisuras están orientadas en paralelo respecto de la expansión, se obtienen valores más altos del coeficiente.

c) A una misma temperatura, el coeficiente de expansión lineal térmica es función de la composición mineralógica de la roca, independientemente de su porosidad.

Finalmente, se ha reconocido una deformación permanente en todas las rocas calentadas. Esta deformación, que puede alcanzar un 0,25 % de incremento lineal, tiene lugar, preferentemente, durante el primer ciclo de calentamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto 4447/79, subvencionado por la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica: «Microfisuración térmica en macizos rocosos por almacenamiento de residuos radioactivos: estudio petrofísico y auscultación micro-sísmica».

Queremos expresar nuestro agradecimiento al personal del Centro de Investigación de Cristalería Española de Avilés (C.I.D.A.) por las facilidades dadas para la realización de los ensayos de expansión térmica.

BIBLIOGRAFIA

- Bauer, S. J. y Johnson, B. (1979).—Effects of slow heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites. *Proc. 20th U. S. Symp. on Rock Mechanics*, 12 pp. Austin (Texas).
- Belikov, B. P., Zaleski, B. V., Rozanov, Y. A., Sanina, E. A. y Timchenko, I. P. (1967).—Methods of studying the physico-mechanical properties of rocks. In *Physical and mechanical properties of rocks*. Israel Program for Scientific Translation, 152 pp., Jerusalem.
- Calleja, L. y Ruiz de Argandoña, V. G. (1984).—Variación de la porosidad y características dinámicas en rocas sometidas a incrementos térmicos. *Proc. VIII Simp. Nac. de la Soc. Esp. Mec. Rocas: Reconocimiento de macizos rocosos*. 1, comunicación 2-6. Madrid.
- , —, Suárez del Río, L. M. y Rodríguez Rey, A. (1984).—Conductividad térmica en rocas ornamentales de Galicia. *Proc. I Cong. Español de Geología*. 3, 401-411, Segovia.
- Ehara, S.; Terada, M. y Yanagidani, T. (1983).—Thermal properties of stressed rocks. *Proc. Symp. Intern. on Rock Mechanics*, 1, E. 137-140, Melbourne.
- Gascón, F. y Balbas, M. (1983).—Dilatación lineal térmica del granito. *Bol. Geol. y Min.*, 94-5, 441-447, Madrid.
- Hasan, S. E. (1978).—Thermophysical properties of rocks. *Proc. 19th U. S. Symp. on Rock Mechanics*, 1, 210-214, Stateline (Nevada).
- Heard, H. C. y Page, L. (1982).—Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of two granites to 350°C an 55 MPa. *Jour. of Geophys. Res.*, 87 (B 11), 9340-9348.
- Heuze, F. E. (1983).—High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks. A Review. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 20 (1), 3-10.
- Hockman, A. y Kessler, D. W. (1950).—Thermal and moisture expansion studies of some domestic granites. *Jour. of Res. of the Nat. Bureau of Stand.*, 44, 395-410.
- Homand-Etienne, F. y Troalen, J. P. (1984).—Behavior of granites and limestones subjected to slow and homogeneous temperature changes. *Engineering Geology*, 20, 219-233.
- Montoto, M. (1983).—Petrophysics: The petrographic interpretation of the physical properties of rocks. *Proc. 5th Cong. Int. Soc. Rock Mechanics*. Sec. B, 93-98, Melbourne (Australia).
- Page, L. y Heard, H. C. (1981).—Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of Climax Quartz monzonite and Sudbury Gabbro to 500°C an 55 MPa. *Proc. 22nd. U. S. Symp. on Rock Mechanics*, 1, 97-104, M.I.T., U.S.A.
- Richter, D. y Simmons, G. (1974).—Thermal expansion behavior of igneous rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 11, 403-411.
- Skinner, B. J. (1966).—Thermal expansion. En: *Handbook of physical constants*. *Geol. Soc. Am., Mem.* 97, 75-96.

