

90135

Water transfer and decay of granitic stones in monuments

Carlos Alves, Maria Amália Sequeira Braga and Claude Hammecker

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 323, série II a,
p. 397 à 402,
1996

C. A. and M. A. S. B. :
Dpt. Ciências da Terra, Univ. Minho,
4709 Braga CODEX, Portugal;

C. H. : ORSTOM, BP 1386, Dakar,
Sénégal;

C. A. : JNICT (92/95) and PRAXIS (95/96)
scholarship.

Abstract The pathologies of granitic stones on the monuments of Braga (NW Portugal) are associated with salt solutions whose source is external to the granitic stones. Measurements of water porosity, capillary rise and mercury porosimetry were carried out, as well as microscopical observation, in granitic rocks from the Braga region with different degrees of weathering. The development of stone pathologies and their distribution in the Braga monuments is related to the homogeneous and well-interconnected porous network responsible for the rapidity of capillary imbibition observed in the granites, in spite of very different porosity values.

Keywords: Environment, Stone decay, Granites, Weathering, Capillary transfer, Free porosity, Porosity structures.

Résumé Transfert d'eau et dégradation de monuments granitiques

Les dégradations des granites sur les monuments de Braga (NW du Portugal) sont associées à des transferts de solutions salées, d'origine externe au granite. Des mesures de porosité à l'eau, de cinétique d'imbibition capillaire, de porosimétrie au mercure et des observations microscopiques ont été réalisées sur des granites de la région de Braga, présentant des degrés d'altération divers. On a ainsi pu vérifier que le développement et la distribution des dégradations du granite sur les monuments de Braga ne sont pas liés à la porosité, mais à l'homogénéité et aux dimensions du réseau poreux qui détermine la cinétique d'imbibition capillaire.

Mots-clés : Environnement, Dégradation, Granite, Altération supergène, Cinétique d'imbibition capillaire, Porosité libre, Structures de porosité.

Version française abrégée

Il est reconnu que l'un des principaux facteurs de dégradation des roches sur les monuments est la cristallisation de sels solubles (Millot *et al.*, 1967 ; Winkler et Wilhelm, 1970 ; Winkler et Singer, 1972 ; Arnold, 1976 ; Jeannette, 1980 ; Amoroso et Fassina, 1983 ; Arnold et Zehnder, 1988). Cependant, ce sont les propriétés de transfert capillaire des roches qui conditionnent la cristallisation des sels et donc l'importance des dégradations subies par celles-ci. La cinétique d'imbibition capillaire a souvent été étudiée dans des roches sédimentaires (Dullien, 1979 ; Mertz, 1991 ; Jeannette et Hammecker, 1992 ; Hammecker, 1993 ; Dessandier, 1995) et récemment dans des granites (Castro *et al.*, 1988 ; Begonha *et al.*, 1994 ; Ortiz *et al.*, 1994 ; Pinto

et al., 1994 ; Garcia-Talegon, 1995 ; Iñigo, 1995).

Les granites de Braga et de Gondizalves (Ferreira *et al.*, 1993), principalement utilisés sur les édifices de Braga (NW du Portugal), ont été étudiés dans ce travail, car sur les monuments ils présentent des figures de dégradation (desquamation, désagrégation, efflorescences) associées à la présence de sels solubles (gypse, nitre, halite et thénardite). Le granite de Braga est un granite à deux nœuds, riche en biotite de texture fine, et le Granite de Gondizalves est un granite folié à deux micas, riche en muscovite, de texture un peu plus grossière. A l'affleurement, le granite de Braga présente un faciès sain de couleur gris bleuté et un faciès altéré marqué par un jau-

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: B* 16470 Ex: 1

Note

présentée par
Georges Pédro.

remise le 14 mai 1996,
acceptée le 3 juin 1996.

Fonds Documentaire ORSTOM



010016470

nissement de la roche (Sequeira Braga *et al.*, 1990). Le granite de Gondizalves présente, quant à lui, un faciès uniformément altéré déjà à l'affleurement, marqué par une coloration blanc jaunâtre. Sur les monuments de Braga, il apparaît que le faciès gris bleuté du granite de Braga n'est pas ou que peu affecté par les phénomènes de dégradation, alors que la dégradation est beaucoup plus importante sur les roches du faciès jauni. Le granite de Gondizalves se dégrade sur les monuments, quelle que soit sa coloration. Le but de cet article est de déterminer les relations entre les structures de porosité de ces granites et leurs propriétés pétrophysiques qui conditionnent les transferts des solutions, ainsi que le développement des dégradations.

Pour caractériser ces propriétés pétrophysiques, on a mesuré : (1) la porosité librement accessible à l'eau en 48 h, lors d'une imbibition capillaire à la pression atmosphérique (N48) ; (2) deux paramètres de la cinétique d'imbibition capillaire : **A** et **B** qui correspondent respectivement à la prise de poids et à la migration de la frange capillaire en fonction de $\sqrt{\text{temps}}$ (Dullien, 1979 ; Zinszner et Meynot, 1982 ; Mertz, 1991). Les structures de porosité ont été étudiées par observation de lames minces pétrographiques, dont la porosité est injectée de résine colorée, et grâce à des mesures de porosimétrie au mercure (Zinszner et Meynot, 1982).

Hormis le faciès sain du granite de Braga, pour lequel la cinétique de migration capillaire est tellement faible qu'il est difficile de la mesurer (on l'estime à partir $B_{eq} = A * 100 / N48$, Hammecker *et al.*, 1993 ; Hammecker, 1993), ces granites présentent des propriétés de transfert capillaire assez élevées (tableau). Or,

malgré des valeurs de porosité différentes, le faciès altéré du granite de Braga et le granite de Gondizalves, présentent des cinétiques d'imbibition capillaire équivalente (fig. 1). Ceci est un indice de l'existence d'une géométrie de réseau poreux comparable.

Les spectres de répartition de taille des pores, obtenus par porosimétrie au mercure (fig. 2), montrent que le réseau poreux du granite de Braga sain est plurimodal, mais principalement interconnecté par des pores de 0,1 μm de rayon, alors que le faciès altéré, ainsi que le granite de Gondizalves, présentent des spectres de répartition unimodaux, interconnectés par des pores plus larges de 0,4 μm de rayon.

L'étude des lames minces montre que le réseau poreux du granite sain de Braga est lié à l'altération hydrothermale des plagioclases et, dans une moindre mesure, à la présence de fissures inter- et intra-granulaires. Le faciès altéré présente des structures de porosité liées à la kaolinisation des plagioclases et au développement d'un réseau de fissures inter- et intra-granulaires. Le réseau poreux du granite de Gondizalves est constitué d'un réseau de fissures droites, principalement intra-granulaires, ainsi que de fissures suivant les plans de clivage et de macles des plagioclases. Par contre, la kaolinisation des plagioclases n'y est pas aussi développée, ce qui explique la plus faible porosité. C'est donc l'existence d'un réseau fissural dans le granite de Braga altéré et dans le granite de Gondizalves qui détermine d'une part, la cinétique de transfert capillaire, d'autant plus rapide qu'il est plus homogène et plus large, et d'autre part l'intensité des dégradations sur les monuments, liées au transfert de solutions salines.

INTRODUCTION

Soluble salts are recognized decay agents of monuments made of several materials (Millot *et al.*, 1967; Winkler and Wilhelm, 1970; Winkler and Singer, 1972; Arnold, 1976; Jeannette, 1980; Amoroso and Fassina, 1983; Arnold and Zehnder, 1988). One of the main parameters controlling the decay action of soluble salts is the capillary rising

of solutions. The rates of solution transfer by capillarity have been frequently studied in sedimentary rocks (Dullien, 1979; Mertz, 1991; Jeannette and Hammecker, 1992; Hammecker, 1993; Dessandier, 1995). Recent works dealing with measurements of capillary transfer rates in granites have been by Castro *et al.* (1988), Begonha *et al.* (1994), Ortiz *et al.* (1994), Pinto *et al.* (1994), Garcia-Talegon (1995) and Iñigo (1995).

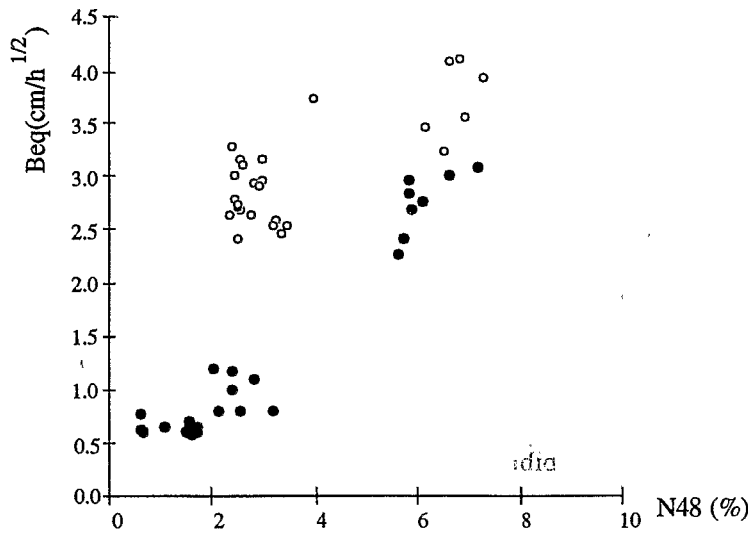


Fig. 1 Plot of B_{eq} vs. N48 values of samples: (●) Braga granite and (○) Gondizalves granite.

Représentation graphique de B_{eq} en fonction de N48 pour les granites de Braga (●) et de Gondizalves (○).

The Braga and Gondizalves granites (Ferreira *et al.*, 1993) frequently used in building of the monuments of Braga (NW Portugal) were studied. The Braga granite is a porphyritic two-mica granite, biotite-rich, fine to medium grained and the Gondizalves granite is a two-mica foliated granite, muscovite-rich and medium grained. In the weathering profiles of the Braga granite (Sequeira Braga *et al.* 1990), the unweathered rock presents a bluish-grey colour. The weathering front progresses from the joint network and it is marked by the yellowing of the rock. The Gondizalves granite presents a generalized weathering in the outcrops, marked by a yellowish-white colouration. In the monuments of Braga, the bluish-grey stones from Braga granite have little or no deterioration, while the decay is more pronounced in the yellowing

of the stones. The stones of Gondizalves granite present decay features in all their blocks, without regard to their colouration aspects. The most frequently soluble salts (gypsum, niter, halite and thenardite) are associated with the plates, flakes, granular disintegration and efflorescences.

The aim of this paper is to study the petrophysical properties (porosity and capillarity) and the porosity structures of two granitic types with different degrees of weathering, in order to characterize the solution transfer in those rocks, which influences the development of the stone pathologies.

MATERIALS AND METHODS

Petrographical, chemical and mineralogical studies by optical and scanning electron microscopy (SEM-EDS), using polished

Table Mean values of coefficient B and N48 from several rock types: *unweathered and slightly weathered granite; **weathered granite; n.m: not measurable. (1) Begonha *et al.* (1994); (2) Mertz (1991); (3) Jeannette and Hammecker (1992).

Valeurs moyennes du coefficient B et de N48 pour différents types de roches: *granite sain et légèrement altéré; **granite altéré; n.m.: non mesurable. (1) Begonha *et al.* (1994); (2) Mertz (1991); (3) Jeannette et Hammecker (1992).

	Granites			Sandstones (2)	Limestones (3)		
	Braga	Gondizalves	Porto (1)	Coarse	Fine		
N48 (% volume) ..	1.60*	6.10**	3.71**	2.31**	10.6	14.2	18.0
B (cm/√h)	n.m.	3.1**	3.5**	3.43**	2.78	1.74	3.2

thin sections in granitic cores from the quarries, were carried out. Some of these thin sections were impregnated with coloured resins for the study of porosity structures (Zinszner and Meynot, 1982). Thirty cores of the Braga granite and twenty-six of the Gondizalves granite, including unweathered and weathered rocks, were collected. According to Dullien (1979), Zinszner and Meynot (1982) and Mertz (1991), the following physical measurements, using cores with 40 mm (diameter) and 60 mm (maximum high) dimensions, were performed: (1) porosity freely invaded in 48 hrs. at atmospheric pressure (N48); (2) capillary imbibition with water at atmospheric pressure, estimated from capillary coefficient B (cm/ \sqrt{h}), by visual observation of the capillary fringe rise, and calculated from capillary coefficient A (g/cm $^2\sqrt{h}$), referring to the mass increment by unit area. Mercury porosimetry was performed with a micromeritics PoreSizer 9320, considering a contact angle of 130° and an interfacial tension of 0.485 N/m 2 .

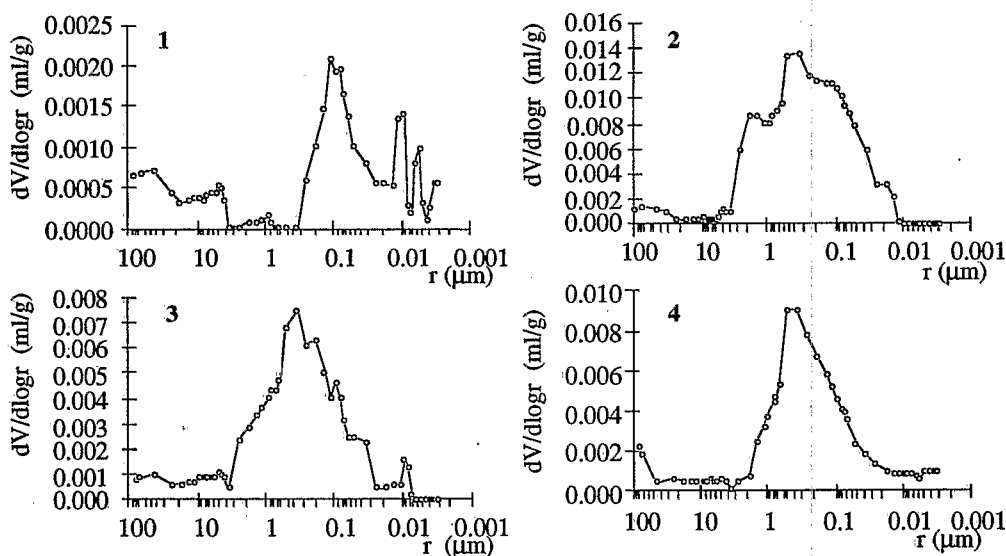
RESULTS AND DISCUSSION

The capillary coefficients B , measured in granites, are as high as those determined in more porous sedimentary rocks, like sandstones or limestones (table).

The coefficient B determination is troublesome in several granitic samples due to analytical difficulties related to low porosity values, slow capillary transfer, petrographical heterogeneities and the whiteness of the samples. The direct comparison of the coefficient A is not possible between samples with different porosities. Considering that a porous medium is formed by a bundle of capillaries with uniform section, we could write: $A/B = N48/100$ as was pointed out by Hammecker *et al.* (1993) and Hammecker (1993) for non-homogeneous and well sorted rocks, which lack sharp stratification planes and clay minerals. Then, a parameter of variation of equivalent height could be calculated by $B_{eq} = A \cdot 100/N48$ (cm/ \sqrt{h}). This parameter allows us to quantify the capillary transfer without regard to the petrographical features and to the porosity of the samples. Plotting the B_{eq} versus N48 data of the Braga and Gondizalves granites (fig. 1), it could be seen that: (1) Capillary transfer is slow ($0.6 \leq B_{eq} \leq 1.2$ cm/ \sqrt{h}) in the samples of the Braga granite with $N48 < 4\%$, becoming very fast in the more weathered samples ($5 < N48 \leq 7\%$; $2.3 \leq B_{eq} \leq 3.1$ cm/ \sqrt{h}); (2) The less weathered Gondizalves granite samples ($2 < N48 < 4\%$) present high capillary transfer rates ($2.4 \leq B_{eq} \leq 3.7$ cm/ \sqrt{h}) similar to the more weathered Braga granite samples, whilst the more weathered samples ($5 < N48$

Fig. 2 Mercury porosimetry curves of Braga granite: (1) unweathered and (2) weathered rocks, and of Gondizalves granite: (3,4) weathered rock. r : pore radius; V : mercury volume.

Courbes de porosimétrie au mercure du granite de Braga: (1) sain et (2) altéré, et du granite de Gondizalves: (3,4) roche altérée. r : rayon d'accès aux pores; V : volume de mercure injecté.



≤ 7%) present the highest capillary transfer rates ($3.2 \leq B_{eq} \leq 4.1 \text{ cm}/\sqrt{h}$).

Granitic rocks with very different values of porosity present similar capillary transfer velocities (table), which suggest similarities of the geometric features of the porous media.

The pore size distribution obtained by mercury porosimetry (fig. 2) shows that the porous media of the unweathered Braga granite is plurimodal but mainly interconnected for pores with an access radius of 0.1 μm , whilst the weathered Braga and Gondizalves granites have unimodal distributions interconnected by the pores with an access radius larger than 0.4 μm .

The microscopical study of polished thin sections impregnated with colour resin allows us to characterize the petrographical aspects of the porosity structures: (1) the initial porosity, in the unweathered Braga granite samples, is mainly associated with the hydrothermal alteration of the plagioclase (oligoclase-andesine) and to a lesser degree with inter and intragranular fissures. From the weathering front, the porosity structures are associated with the kaolinization of the plagioclase and the development of the fissural network with intra, inter and transgranular fissures; (2) in the Gondizalves granite,

the porosity structures are associated with a network of fissures, mainly transgranular, rather straight and with angular intersections. In plagioclase (albite-acid oligoclase), thin intergranular fissures following the cleavage and twinning planes are also observed.

CONCLUSIONS

The Braga granite shows high capillary transfer rates ($B = 3.1 \text{ cm}/\sqrt{h}$) for the more weathered samples with porosity of 6 %. The increasing of the values of those parameters is marked by the yellowing of the rock. The Gondizalves granite presents similar results of capillary transfer ($3.5 \text{ cm}/\sqrt{h}$) with lower values of porosity (3.7%) and a less marked colour change. The plagioclase kaolinization, being more intense in the Braga granite, explains its higher porosity data, while the fissural network explains similar rates of capillary transfer in both granites. The development of the stone pathologies is therefore explained by the existence of a homogeneous and well connected porous medium, allowing a fast solution transfer in granites in spite of their different porosities and petrographical characteristics.

Acknowledgments: Thanks are due to the JNICT and the EC STEP-CT-90-0101 project for financial support and also to the staff of the Centre de Géochimie de la Surface- Strasbourg for their assistance, specially to Mr. D. Jeannette.

- AMOROSO, G.G. and FASSINA, V., 1983. Stone Decay and Conservation, *Materials Science Monograph 11*, Elsevier, 453 p.
- ARNOLD, A., 1976. Behaviour of Some Soluble Salts in Stone Deterioration, *2nd Intern. Symp. on the Deterioration of Building Stones*, Athens, 1976, pp. 27-36.
- ARNOLD, A. and ZEHNDER, K., 1988. Decay of stony materials by salts on humid atmosphere, *Proc. 6th Int. Congr. Deterior. Conserv. Stone*, Torun, 1988, pp. 138-148.
- BEGONHA, A., JEANNETTE, D., HAMMECKER, C. and SEQUEIRA BRAGA, M.A., 1994. Physical characteristics of the Oporto granite related to stone decay in monuments, *Proc. 3rd. Intern. Symp. The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*, Venice, 1994, pp. 541-546.
- CASTRO, E., RODRIGUES, J.D. and CRAVO, M.R.T., 1988. Étude du nettoyage d'un monument en granite, *Memória nº 715*, LNEC, Lisboa, 10 p.
- DESSANDIER, D., 1995. Étude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine. Application à la durabilité des pierres en œuvre, *Thesis*, Univ. Tours, 279 p.
- DULLIEN, F.A.L., 1979. *Porous media: Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, 574 p.
- FERREIRA, N., DIAS, G., LETERRIER, J. and NUNES, J.E.L., 1993. Rochas ígneas hercínicas da região de Braga-Vieira do Minho (NW de Portugal): Cartografia geológica, tipologia granítica e petrogénese, *Mem. Mus. Lab. Min. Geol. da Fac. Ciências da Univ. Porto*, nº 3, NORONHA, F., MARQUES, M. and NOGUEIRA, P., Eds., pp. 45-49.
- GARCIA-TALEGON, J.G., 1995. Paleoalteraciones y alteraciones actuales de rocas silíceas: implicaciones en el paisaje y su comportamiento como materiales de construcción, *Thesis*, Univ. Salamanca, 379 p.
- HAMMECKER, C., 1993. Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en œuvre, *Thesis*, Univ. Louis-Pasteur, Strasbourg, 254 p.
- HAMMECKER, C., MERTZ, J.D., FISCHER, C. and JEANNETTE, D., 1993. A Geometrical Model for Numerical Simulation of Capillary Imbibition in Sedimentary Rocks, *Transport in Porous Media*, 12, pp. 125-141.
- IÑIGO, A.C.I., 1995. Respuesta de rocas graníticas a procesos de envejecimiento acelerado y al tratamiento con productos básicos de conservación, *Thesis*, Univ. Salamanca, 229 p.

REFERENCES

39

- JEANNETTE, D., 1980. Les Grès du Château du Landsberg : Exemple d'Évolution des « Grès Vosgiens » en milieu rural, *Sci. Géol. Bull.*, 33, pp. 111-118.
- JEANNETTE, D. and HAMMECKER, C., 1992. Facteurs et mécanismes des altérations, *La Conservation de la pierre monumentale en France*, Presses du CNRS, pp. 73-81.
- MERTZ, J.D., 1991. Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès, *Thesis*, Univ. Louis-Pasteur, Strasbourg, *Sci. Géol. Mém.*, 90, 149 p.
- MILLOT, G., COGNÉ, J., JEANNETTE, D., BESNUS, Y., MONNET, B., GURI, F. and SCHIMPF, A., 1967. La maladie des grès de la Cathédrale de Strasbourg, *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 20, pp. 131-157.
- ORTIZ, A.P., ORDAZ, J., ESBERT, R.M. and ALONSO, F.J., 1994. Microfissuring evolution of the granite from the Axeitos dolmen along the salt crystallization test, *Proc. 3rd. Intern. Symp.: The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*, Venice, 1994, pp. 115-119.
- PINTO, A.P.F., RODRIGUES, J.D. and COSTA, D.R., 1994. Assessment of the efficacy and harmfulness of water repellents in granite, *Proc. 3rd. Intern. Symp. The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*, Venice, 1994, pp. 883-889.
- SEQUEIRA BRAGA, M.A., NUNES, J.E.L., PAQUET, H. and MILLOT, G., 1990. Climatic zonality of coarse granitic saprolites (« Arènes ») in Atlantic Europe from Scandinavia to Portugal, *Proc. IXth Intern. Clay Conf.*, Strasbourg, 1989, in *Sci. Géol. Mém.*, 85, pp. 99-108.
- WINKLER, E.M. and WILHELM, E.J., 1970. Salt Burst by Hydration Pressures in Architectural Stone in Urban Atmosphere, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 81, pp. 567-572.
- WINKLER, E.M. and SINGER, P.C., 1972. Crystallization Pressure of Salts in Stone and Concrete, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 83, pp. 3509-3514.
- ZINSZNER, B. and MEYNOT, Ch., 1982. Visualisation des propriétés capillaires des roches réservoir, *Rev. Inst. Fr. Pétrole*, 37, pp. 337-361.

« fest
 « 1992
 « automne
 1992