ALTERAÇÃO EXPERIMENTAL DE ROCHAS – A CONTRIBUIÇÃO DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO*

The Experimental Alteration of Rocks – The Contribution of the Instituto Superior Técnico

por
A. MOURAZ MIRANDA**

RESUMO — Faz-se uma resenha dos trabalhos de alteração experimental de rochas rotinadas no Laboratório de Mineralogia e Petrologia do I.S.T.: ensaio com extractor de Soxhlet ensaio de percolação forçada, ensaio de percolação livre em circuito fechado, ensaios de abrasão mecânica e ensaio de fadiga térmica com secagem-molhagem.

SYNOPSIS — A brief survey of the experimental alteration tests of rocks under routine at the Laboratory of Mineralogy and Petrology of the Instituto Superior Técnico is hereby presented, which include: Soxhlet leaching, forced percolation, free percolation on closed circuit, mechanical abrasion and dry and wet thermal fatigue tests.

I. INTRODUÇÃO

Em Geotecnia a alteração das rochas é encarada normalmente no duplo aspecto da caracterização dos materiais por um lado, e na previsão do seu comportamento por outro, dentro da escala temporal das obras de engenharia. É nessa segunda vertente que se enquadram os estudos de alteração experimental de rochas. Procura-se com eles submeter as rochas a variações de condições ambientais cíclicas e quanto possível drásticas simulando-se de forma breve acções que requerem normalmente grandes intervalos de tempo, para que as suas consequências sejam perceptíveis.

Incluídos na literatura existem trabalhos de investigação no domínio da alteração experimental de rochas que seguem duas vias paralelas mas distintas. Uma dessas linhas procura esclarecer a interacção dos fluidos sobre as rochas na própria crosta e daí inferir sobre as condições de formação de jazigos minerais e de mobilização de

* Trabalho apresentado ao I.S.T. como estudo complementar para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Minas

** Engenheiro de Minas, Professor Auxiliar do I.S.T.

elementos químicos. A outra grande via de estudo orientada sobretudo para a Geotecnia procura esclarecer as grandes linhas de evolução da alteração das rochas nas condições prevalescentes nos ambientes exógenos em que se situam as obras de Engenharia. Tem sido esta segunda via aquela em que no Instituto Superior Técnico e em particular no Laboratório de Mineralogia e Petrologia (abrev. LAMPIST*) se tem prosseguido na última quinzena de anos. O presente trabalho constitui uma apresentação breve dos principais ensaios desenvolvidos apontando-se os resultados mais significativos já obtidos e com aplicações directas na Geotecnia.

Dada a especialização da matéria e as suas consequências em termos práticos procuraremos em outro artigo fazer uma apresentação integrada dos ensaios e dos estudos de alteração no seu aspecto de caracterização dos materiais.

II. ENSAIOS COM EXTRACTOR DE SOXHLET

II. 1 — *Descrição do extractor de Soxhlet*

O extractor de Soxhlet permite lixiviar as rochas ou minerais por água sempre destilada, simulando águas de precipitação atmosférica, com certo grau de dissociação (pH 5,8 a 6,2) (PEDRO, 1961 e 1964). De acordo com a Fig. 1 pode obter-se na experimentação com este dispositivo a simulação de:

a) uma atmosfera impregnada de humidade e a cerca de 60° C, onde se simula a precipitação atmosférica (chuva);
b) uma zona de flutuação do nível hidrostático, periódica e alternadamente imersa e emersa;
c) uma zona de depósito, de acumulação da maior parte dos produtos carregados da zona precedente.

No dispositivo esquematizado tem-se a reconstituição do ciclo hidrológico e do ciclo geoquímico. Quanto ao ciclo da água assiste-se à precipitação, infiltração e drenagem, acumulação e evaporação, para se reiniciar novo ciclo. Quanto ao ciclo geoquímico, a percolação do «maciço» dá origem a:

a) produtos eluviais (minerais de neoformação) sobre o maciço rochoso granulado do extractor;
b) hidrolisitos (na bacia de recepção, que é o balão receptor), e produtos aluviais.

* LAMPIST — Laboratório de Mineralogia e Petrologia do I.S.T.

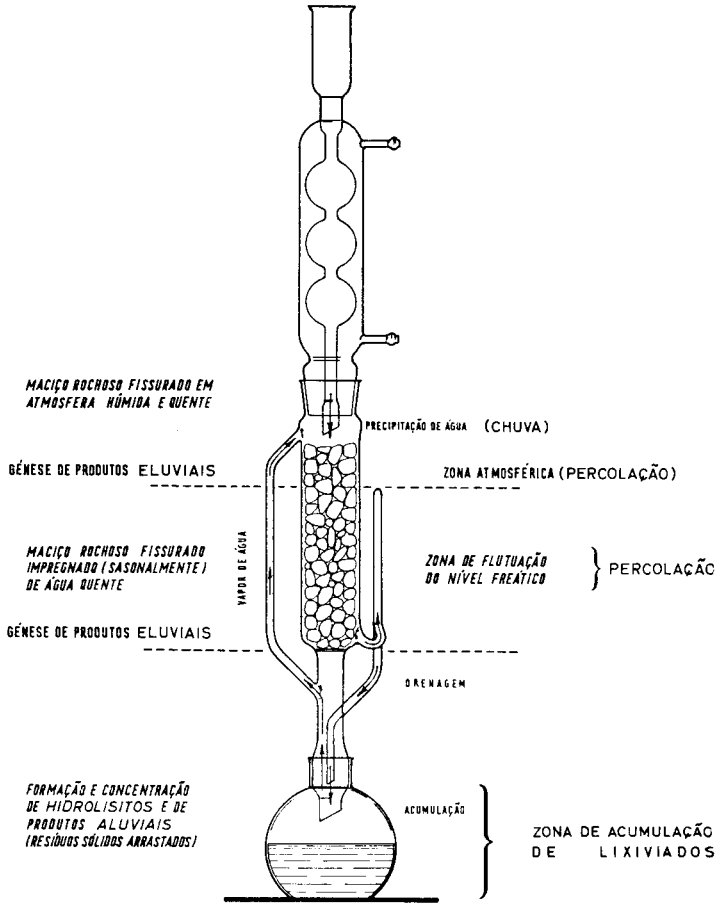

Fig. 1 — *Esquema de extractor de Soxhlet (Segundo esquema in Aires-Barros & Miranda, 1979)*

II. 2 — *Indicações sobre a condução de ensaios com extractor de Soxhlet*

Para os ensaios realizados com rochas, estas são fragmentadas em pedaços com peso médio de 25 g (∅ médio = 25 mm). O extractor é cheio com os fragmentos de rocha, tendo o cuidado de os arrumar de forma a permitir um gotejamento fácil da água. Simula-se assim um maciço rochoso com um sistema denso de diaclases e vazios, por onde a água de percolação se infiltra lixiviando os materiais.

Mantendo o extractor em funcionamento 10 horas/dia pode obter-se um gotejar correspondente a uma lâmina de precipitação atmosférica de 750 mm diários. A chuva

é quente (≃ 60° C), o que favorece o aceleramento do processo. Acresce que a humidade relativa no extractor é elevada aproximando-se da saturação.

As condições de ambiente no extractor são:

a) atmosfera fortemente impregnada de humidade;
b) água de percolação mais ácida e quente que a água normal da chuva.

O ambiente caracterizado corresponde a um clima hipertropical ou seja a um clima quente e húmido, com chuva abundante e atmosfera muito húmida (AIRES-BARROS & MIRANDA 1979).

II. 3 — *Ensaios de Soxhlet com diferentes tipos petrográficos*

Este ensaio consiste em submeter a tratamento diverso tipos de rochas e observar os produtos formados.

De forma a simplificar a nossa apresentação, remete-se a descrição das rochas ensaiadas para o APÊNDICE I.

APÉNDICE I
BREVE DESCRIÇÃO DAS ROCHAS SUBMETIDAS A ALTERAÇÃO EXPERIMENTAL

Tipo Petográfico	Descrição Mineralógico-Textural	Principais Características Físicas		
		Microdureza (kp/mm^2)	Porosidade Total (%)	Permeabilidade ao Ar ($dy\ 10^{-3}$)
GRANITO PORFIRÓIDE BIOTÍTICO (Serra da Estrela)	Feldspato+Quartzo+Plagioclase Ca/Na+Biotite+(apatite)	700 ± 200	1,10 — 1,80	5,50
GRANITO «RÓSEO» (Sintra)	Quartzo+Ortose+Oligoclase+ +Biotite+Minério+Apatite	757	1,08 - 1,05	1,14
SIENITO «RÓSEO» (Cabo da Roca)	Feldspato (solo-potássio)± ±(quartzo)	—	3,85 - 6,40	24,90
LAMPRÓFIRO BIOTÍTICO (Cabora-bassa)	Biotite+Feldspato+Horneblenda+ + Aeg.-Augite	—	0,74 - 4,13	—
DIORITO BIOTÍTICO (Malveira da Serra)	Plagioclase+Biotite+Diópsido+ +Horneblenda+Epídoto+Apatite + (Quarto)+(Esfena)	—	0,60 - 1,00	—
DIORITO (Leiria)	Plagioclase+Augite+Biotite+ +Magnetite	407	—	—
SIENITO NEFELÍNICO (Monchique)	Nefelina+Albite/Oligoclase+ +Aegirina	568	1,37 - 2,30	5,03
BASALTO OLIVÍNICO (Caxias)	Augite+Olivina+(Magnetite)	—	0,60 - 0,90	—
FOSFORITE (Cabinda, Angola)	Oolites e pisolitos de +(Carbonatos)+Quartzo	—	—	—
CALCÁRIO (Estremoz)	Calcite±(Quartzo)±Mica	155 ± 30	—	—
CALCÁRIO (Viana do Alentejo)	Calcite±Diópsido	170 ± 40	—	—

Tomando a densidade aparente de blocos colhidos do maciço rochoso ao longo do ensaio, e determinando a relação molecular de ONODERA *et al* (1974) $2Fe_2O_3/(2Fe_2O_3 + FeO)$ e marcando os pontos correspondentes a cada colheita em diagrama cartesiano (Fig. 2) aparecem claramente vincados dois alinhamentos de comportamento: um para as rochas félsicas e outro para as rochas máficas. Estas mesmas conclusões foram já relatadas por AIRES-BARROS e MIRANDA (1979) onde se mostra que:

a) a densidade diminui à medida que o processo de alteração vai progredindo;
b) nota-se a oxidação do ferro traduzida pelo aumento da relação molecular $2Fe_2O_3/(Fe_2O_3 + FeO)$;
c) a relação molecular mencionada constitui uma boa indicação da intensidade relativa da meteorização.

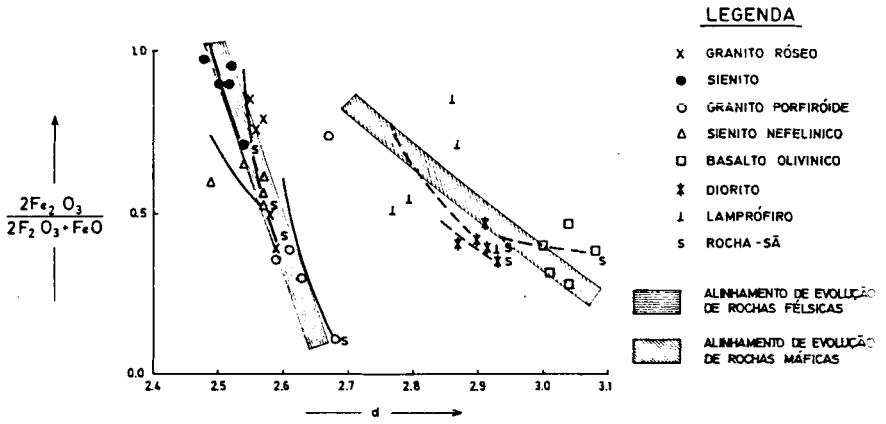

Fig. 2 — *Diagrama densidade aparente* versus *relação molecular* $2Fe_2O_3/(2Fe_2O_3 + FeO)$ *para os blocos colhidos em extractor de Soxhlet. Ensaio com diferentes tipos de rocha (retomado e adaptado de AIRES-BARROS e MIRANDA (1979).*

Da análise da Fig. 2 verifica-se que se podem delimitar dois tipos de rochas com comportamentos distintos:

a) as rochas félsicas, com densidades inferiores a 2,7, cujas curvas de evolução da alteração possuem um pendor elevado, verificando-se pequenas variações das densidade para amplas variações da relação geoquímica $2Fe_2O_3/(2Fe_2O_3 + FeO)$;

b) Nas rochas máficas, com densidade média superior a 2,9, verifica-se que para uma variação geoquímica $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3-}$ da mesma ordem de grandeza da observada nas rochas félsicas, se tem uma variação concomitante da densidade bastante mais ampla, do que a correspondente para o primeiro tipo de rochas.

Do ponto de vista das aplicações, a taxa geoquímica $2Fe_2O_3/(2Fe_2O_3 + FeO)$ afere modificação de uma grandeza: a densidade das rochas. Essa afecção é mais sensível para uma mesma variação da relação molecular nas rochas máficas do que nas rochas félsicas.

II. 4 — *Ensaios de extractor de Soxhlet com sienitos nefelínicos de diferentes granularidades*

São factores intrínsecos do estado de alteração de uma rocha na definição de AIRES-BARROS (1979): a composição mineralógica da rocha e o arranjo do grão dessa rocha, entendido este no sentido textural e estrutural. No ensaio com extractor de Soxhlet, que brevemente se indicou procurou-se demonstrar a influência da mineralogia, na evolução da alteração com diferentes tipos de rochas ígneas.

Dispondo, afortunadamente, de um tipo de litológico (sienito nefelínico) com diferentes tamanhos de grão, descreveu AIRES-BARROS (1972) ensaios com extractores de Soxhlet que demonstram, concludentemente, o efeito da granulidade na evolução da alteração. Nesse trabalho parte-se de três sienitos nefelínicos, com tipos texturais diferentes: um de grão grosseiro, outro de grão médio e um último de grão fino.

Passa-se de seguida em revista algumas das conclusões desse trabalho. Baseando-se nas determinações dos elementos carreados pelas águas de circulação verifica-se que é a rocha de granularidade fina, aquela que liberta mais fácil e prontamente os vários elementos químicos. Esta conclusão é claramente evidenciada pelas curvas de evolução dos teores de Na e Ca das águas de circulação (Figs. 3 e 4). Este mesmo efeito da mobilidade química é também evidenciado através das curvas de evolução do pH das águas de circulação dos extractores (Fig. 5).

A Fig. 6 mostra as curvas de evolução das resistividades eléctricas das mesmas águas de circulação.

O tipo estrutural de sienito nefelínico que mostra mais rápida subida de pH e queda de resistividade da água de circulação, o que consequentemente pode ser interpretado como maior mobilidade química, é a rocha de grão fino. Vem depois a rocha de grão grosseiro e só em último lugar a de grão médio.

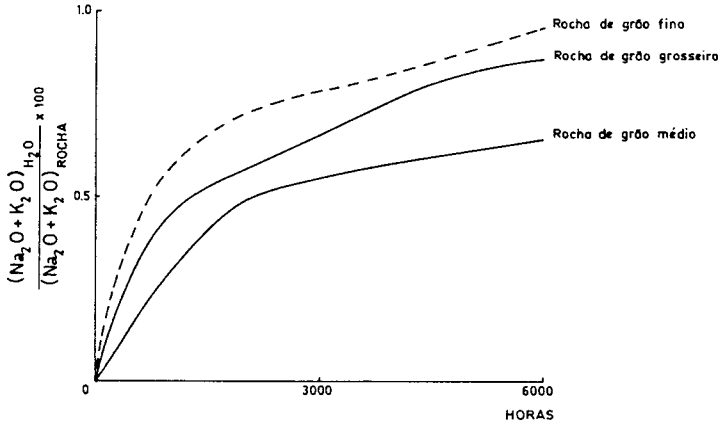

Fig. 3 — *Curvas de evolução do teor de Na nas águas de circulação dos extractores de Soxhlet, para os três tipos texturais de sienitos nefelínicos (retomado de AIRES-BARROS, 1972).*

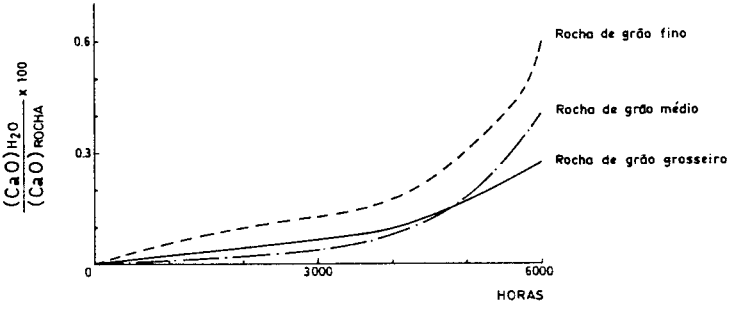

Fig. 4 — *Curvas de evolução do teor de Ca nas águas de circulação dos extractores de Soxhlet, para os três tipos texturais de sienitos nefelínicos (retomado de AIRES-BARROS, 1972).*

Numa interpretação dos resultados, refere AIRES-BARROS (1972) que:

a) a rocha de grão mais fino é a mais atacável, pois apresenta maior quantidade de limites de grão por unidade de volume;
b) a rocha de grão grosseiro, bastante microfissurada liberta mais facilmente catiões do que a rocha de grão médio, que se apresenta bem mais coesa.

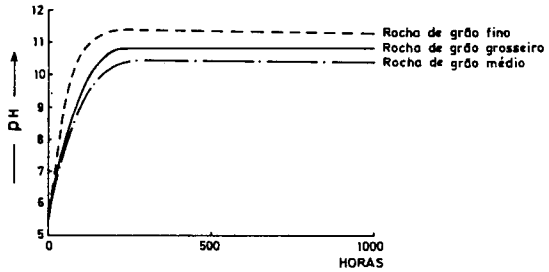

Fig. 5 — *Curvas de evolução do pH das águas de circulação dos extractores de Soxhlet para os três tipos de texturais de sienitos nefelínicos (retomado de AIRES-BARROS, 1972)*

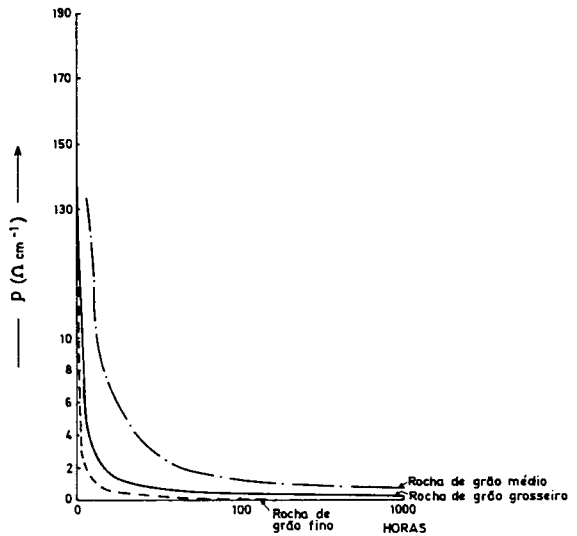

Fig. 6 — *Curvas de evolução da resistividade das águas de circulação dos extractores de Soxhlet para os três tipos de texturais de sienitos nefelínicos (retomado de AIRES-BARROS, 1972)*

Para compreender a aparente contradição das conclusões mencionadas nas alíneas anteriores, deve ter-se em conta o efeito da microfissuração. Com efeito, embora a rocha de grão médio tenha maior superfície de grão exposta por unidde de volume, a rocha de grão grosseiro, devido à fissuração, sobreleva o factor da granularidade. Esta explicação é corroborada pelas perdas de peso (percentuais) dos três tipos estruturais, a saber:

a) de 1,18% para a rocha de grão fino;
b) de 0,49% para a de grão médio;
c) de 13,29% para a rocha de grão grosseiro.

II. 5 — *Ensaio de minerais das rochas com extractores de Soxhlet*

Um dos ensaios com extractor de Soxhlet em que se depositaram grandes esperanças foi aquele em que diferentes minerais comuns das rochas foram submetidos a mais de 12 000 horas de circulação por água nos extractores. O futuro poderá trazer uma certa luz às conclusões esperadas ou uma reformulação eventual do método aplicado, uma vez que ainda os resultados deste estudo permanecem inéditos e em consequência, insusceptíveis de profundos comentários. Repescando alguns desses resultados para um pequeno lote de minerais petrográficos: biotite, feldspato alcalino, feldspato básico e olivivina, cujas composições químicas são apontados no APÊNDICE II, tomamos nesta apresentação os resultados das determinações de elementos químicos feitas nas águas de circulação dos extractores onde se ensaiaram os diferentes minerais.

Reparando nas curvas de evolução do sódio ao longo do ensaio (Fig. 7) para os quatro minerais nota-se que o teor cresce para todos ao longo do tempo. Para todos os minerais as curvas de evolução do sódio nas águas de circulação apresentam uma evolução por patamares. A um primeiro troço com declive acentuado, segue-se um patamar onde a concentração do elemento não sofre grande alteração. Findo um certo período de tempo a concentração volta a subir de forma súbita estacionando depois durante algum tempo noutro valor, e assim sucessivamente. Este fenómeno da evolução sugere que o avanço da alteração se dá por etapas em que só ultrapassando um certo limiar o fenómeno volta a evoluir. Este tipo de andamento verifica-se também para o potássio (Fig. 8).

A curva de evolução da concentração da sílica na água de circulação dos extractores de Soxhlet onde se ensaiaram os minerais petrográficos, mostra uma rápida subida inicial dos teores (nas primeiras 1000 horas), a que se segue uma segunda parte da curva em que a taxa de aumento de teores com o tempo é bastante menor (Fig. 9).

As quantidades de sílica exportadas para as águas de circulação permitem seriar os minerais petrográficos considerados no que à alteração diz respeito da forma seguinte:

$$k\ \text{Olivina} > k\ \text{Feldspato básico} > k\ \text{Feldspato alcalino} > k\ \text{Biotite}$$

O comportamento do ferro é de certa forma comparável ao da sílica, e tomando os exemplos da olivina e da biotite, obaserva-se um acréscimo inicial muito rápido dos teores, até que a partir de certa altura os teores estabilizam não sofrendo quaisquer acréscimos (Fig. 10) à medida que o ensaio progride.

APÉNDICE II
COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MINERAIS ENSAIADOS
COM EXTRACTOR DE SOXLET

	FELDSPATO ALCALINO (Sienito Cabo da Roca)	FELDSPATO BÁSICO (Anortosito - Gambos Angola)	BIOTITE (Mangualde)	OLIVINA (Belas)
SiO_2	63,95	53,06	36,27	40,30
Al_2O_3	18,58	28,50	29,07	n.d.
Fe_2O_3	—		2,15	n.d.
FeO	—	0,50	19,40	8,20
MgO	0,50	1,01	1,32	50,20
CaO	0,56	12,06	0,50	
Na_2O	0,80	4,07	0,25	
K_2O	14,70	0,36	6,08	
TiO_2	0,07	0,10	0,77	
P_2O_5	0,02	0,07	0,07	
MnO	—	—	0,82	
CO_2	—	—	—	
H_2O^+	0,52	0,38	2,89	
H_2O^-	—			
TOTAL	99,70	100,11	99,59	n.d.

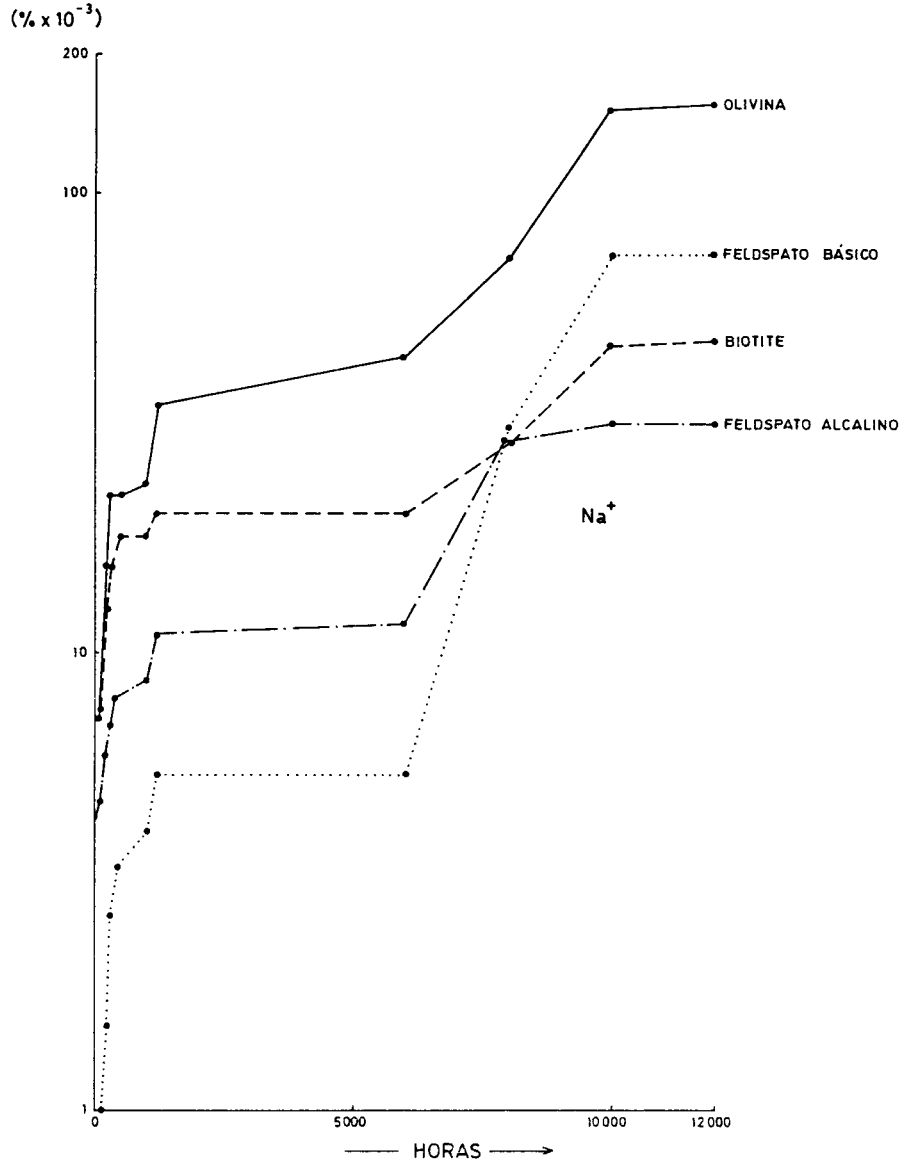

Fig. 7 — *Curvas de evolução da concentração de sódio nas águas de circulação dos ensaios com extractor de Soxhlet.*

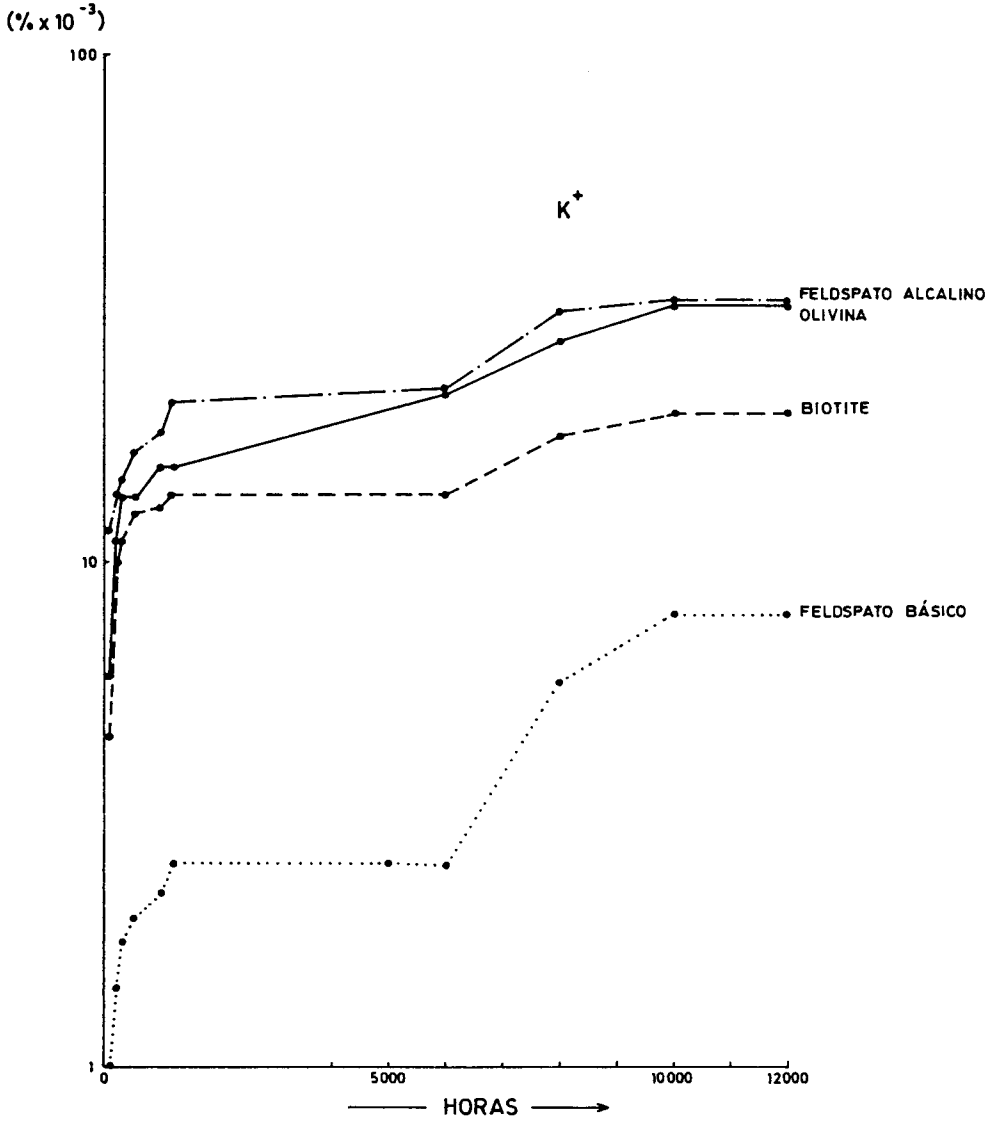

Fig. 8 — *Curvas de evolução da concentração do potássio nas águas de circulação dos ensaios com extractor do Soxhlet.*

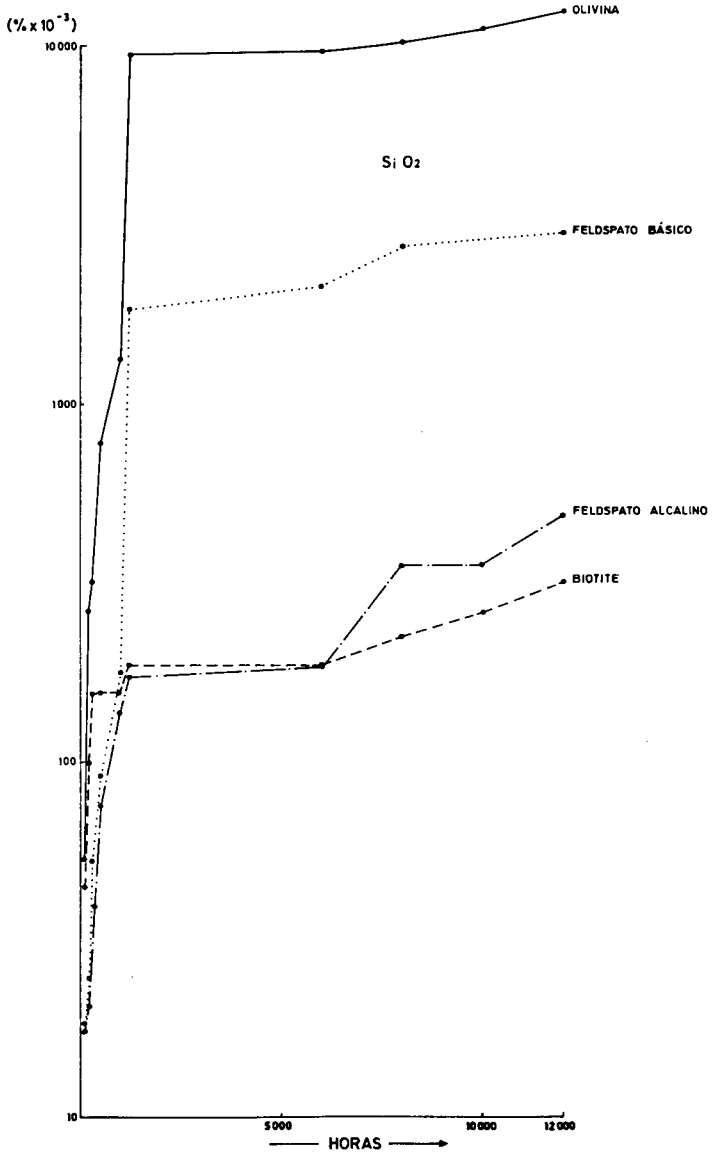

Fig. 9 — *Curvas de evolução da concentração da sílica nas águas de circulação dos ensaios com extractor de Soxhlet.*

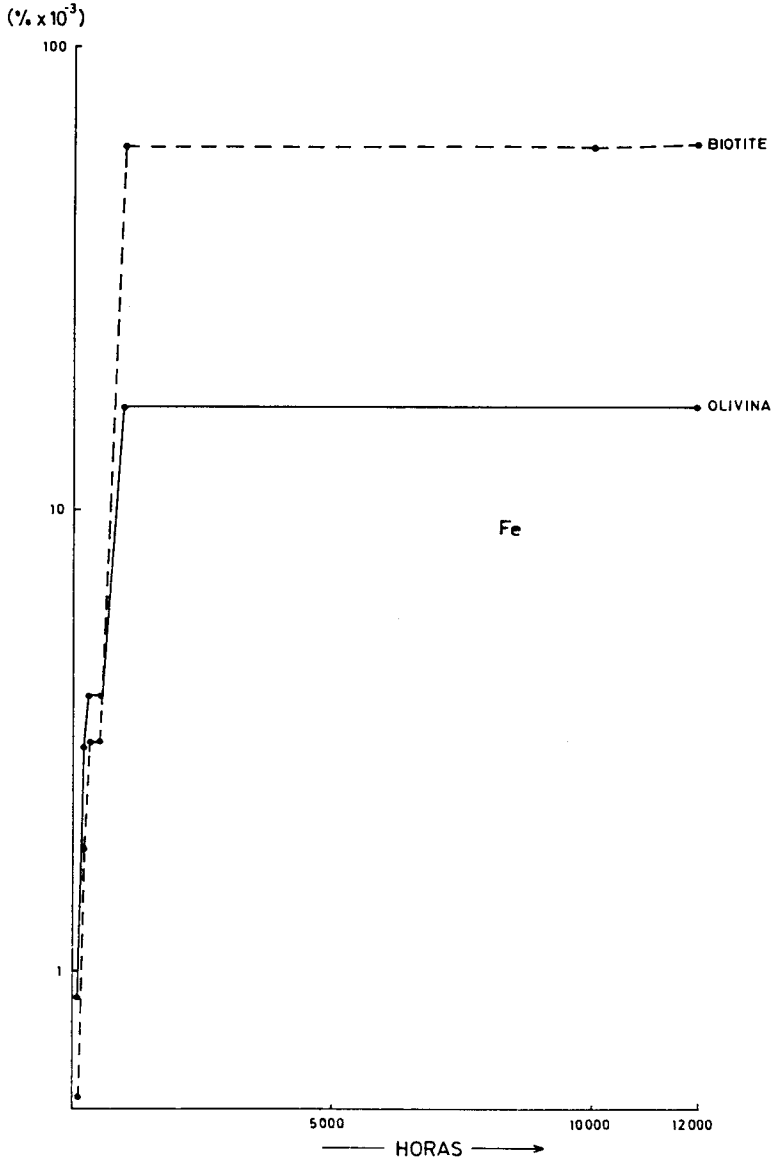

Fig. 10 — *Curvas de evolução da concentração do ferro nas águas de circulação dos ensaios com extractor de Soxhlet.*

III. ENSAIO DE PERCOLAÇÃO LIVRE EM CIRCUITO FECHADO

III. 1 — *Descrição geral do ensaio*

O ensaio de percolação livre em circuito fechado foi concebido de forma a simular um maciço rochoso submetido intermitentemente a condições de secagem--molhagem (regime sazonal) (AIRES-BARROS e GRAÇA 1971 a).

Na Fig. 11 apresenta-se em esquema a montagem utilizada para o ensaio de percolação livre em circuito fechado. A rocha submetida a ensaio, em granulado grosseiro, é submetida a um banho de aspersão por água corrente. A água (destilada) é mantida a uma temperatura constante durante o ensaio, e é bombada para o interior do porta-amostras. A entrada de água no porta-amostras é feita por meio de um crivo de modo que se obtenha uma aspersão tipo «chuva» sobre a amostra do «maciço rochoso». A água (ou solução aquosa) percolante é recolhida numa tina e é de novo usada no ciclo.

Após a fase de aspersão passa a dar-se a circulação de uma corrente de ar quente sobre o maciço rochoso, a temperatura pré-estabelecida (50° C). Há ainda uma terceira fase que é a de repouso, em que o maciço rochoso é trazido às condições de pressão e temperatura ambientes.

Após estas três fases, que constituem um ciclo, reinicia-se novo período de actuação da percolação da água, de passagem de corrente de ar quente e de repouso e assim sucessivamente. Os ciclos são contados automaticamente.

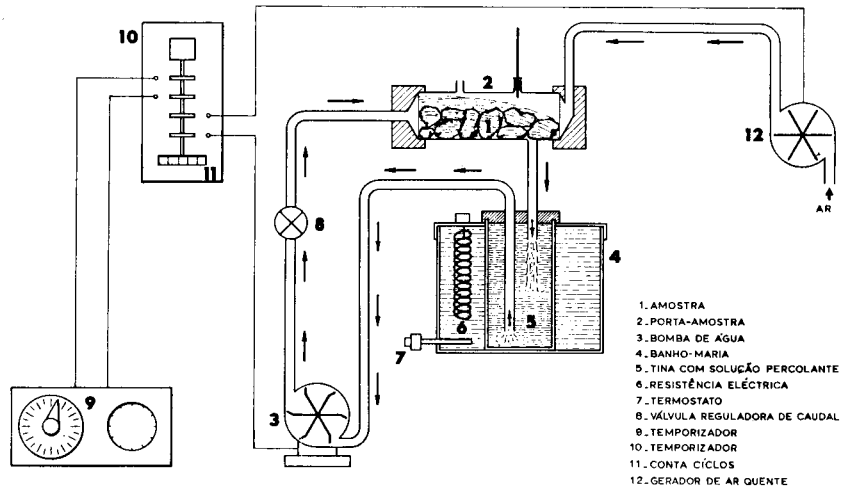

Fig. 11 — *Esquema de montagem para o ensaio de percolação livre em circuito fechado. (Extraído de AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 a).*

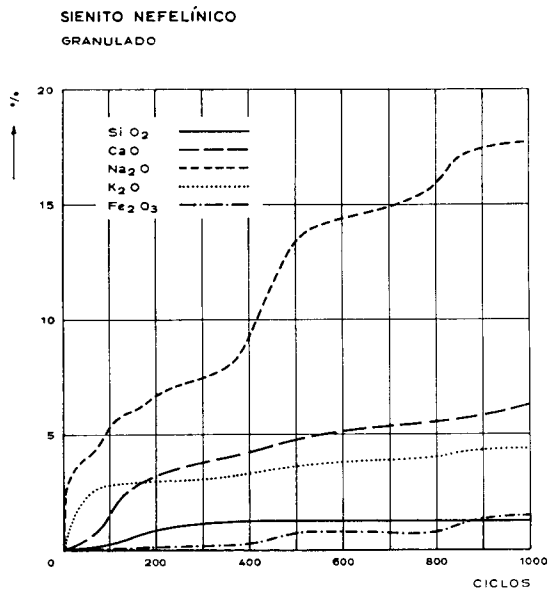

Fig. 12 — *Curvas de evolução das concentrações da sílica, potássio, sódio, cálcio e ferro nas águas de circulação de ensaio de percolação livre em circuito fechado, sobre maciço rochoso granulado de sienito nefelínico (Monchique). (Extraído de AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 a).*

III. 2 — *Ensaio de percolação livre com diferentes tipos petrográficos*

O primeiro relato de ensaios de percolação livre em circuito fechado foi feito por AIRES-BARROS e GRAÇA (1971 a). Nesse trabalho são apresentados os resulados do ensaio efecutado sobre maciços rochosos de sienito nefelínico de Monchique e de basalto olivínico do complexo Lisboa-Mafra. Nesse trabalho, os autores apresentam a evolução dos teores da sílica, do sódio, do potássio, do cálcio e do ferro nas águas de circulação ao longo do ensaio para os dois tipos de maciços rochosos (Figs. 12 e 13).

Da observação das curvas mencionadas, algumas conclusões podem ser avançadas. Tomando em primeiro lugar as curvas do ensaio do sienito nefelínico (Fig. 12), é possível ordenar os elementos químicos quanto à sua mobilidade relativa. O ordenamento dos elementos em termos da sua mobilidade relativa pode ser enunciado:

$$Na > Ca > K > Si \geq Fe$$

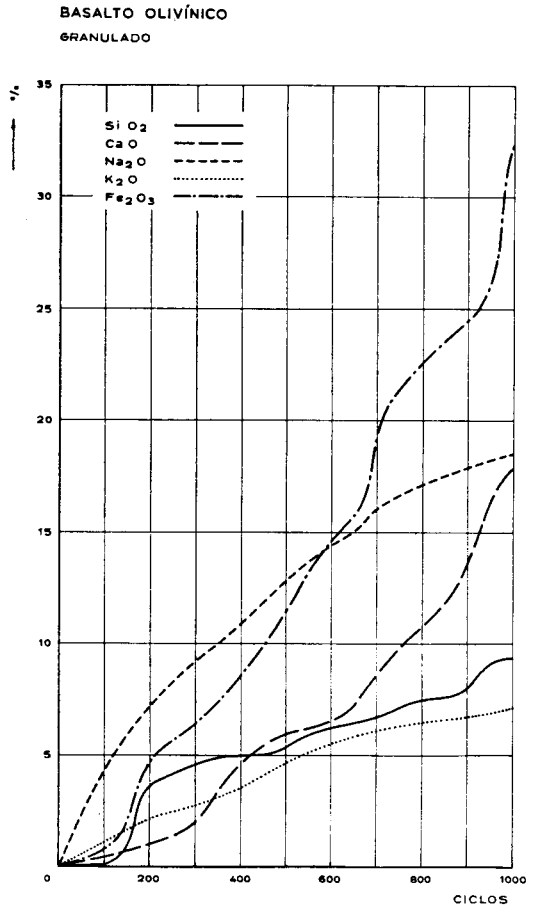

Fig. 13 — *Curvas de evolução das concentrações de sílica, potássio, sódio, cálcio e ferro nas águas de circulação de ensaio de percolação livre em circuito fechado, sobre maciço rochoso, granulado de basalto olivínivo. (Extraído de AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 a).*

A sequência de ordenação dos elementos quanto à sua mobilidade química relativa pode ser explicada tendo presente a composição mineralógica da rocha inicial:

a) A quantidade de Na mobilizado, pode provir de três dos minerais ricos desse elemento e presentes na rocha: albite e aegirina.
b) O Ca mobilizado provém do feldspato, de dolomite secundária e da esfena.
c) O K provém em grande parte do feldspato potássico.
d) O ferro mobilizado provém dos raros minerais máficos presentes na rocha: aegirina e magnetite.

Por raciocínio perfeitamente análogo, e tendo como base as curvas da Fig. 13, é possível estabelecer uma sequência de migração dos elementos químicos para o basalto olivínico:

$$Fe \simeq Na \geq Ca \geq Si \geq K$$

III.3 *Ensaio de percolação livre com o mesmo tipo petrográfico e diferentes soluções percolantes*

Um outro tipo de simulação é relatado por AIRES-BARROS & GRAÇA (1972). Neste trabalho os autores comparam o comportamento de um fosforito submetido a percolação por água destilada e em ensaio paralelo o líquido percolante é uma solução salina de NaCl de 35 g/l.

O objectivo inicial do ensaio era o de procurar avaliar o comportamento do fosforito como enrocamento de uma obra marítima. O enrocamento ficaria submetido a períodos de emersão e imersão.

Na Fig. 14 apresentam-se as curvas de evolução das concentrações de Ca e P nas soluções de percolação à medida que o ensaio avança. Na mesma figura também se indica a evolução das perdas de peso dos "blocos de enrocamento" ensaiados.

A análise da figura permite avançar algumas conclusões:

a) o fosforito ensaiado tende a exportar mais Ca em presença de uma solução salina do que em presença da água destilada;
b) a libertação de P é ligeiramente superior no ensaio com a solução salina relativamente ao ensaio com água destilada;
c) a perda de peso é praticamente idêntica quer em presença da água destilada, quer em presença da solução salina.

IV. ENSAIO DE PERCOLAÇÃO FORÇADA

IV.1 — *Breve introdução ao ensaio de percolação forçada*

O ensaio de percolação forçada implementado na LAMPIST e descrito em AIRES-BARROS e GRAÇA (1971 b) baseia-se na aplicação do método proposto por FARRAN e THÉNOZ (1965) para o estudo da reactividade rocha-água.

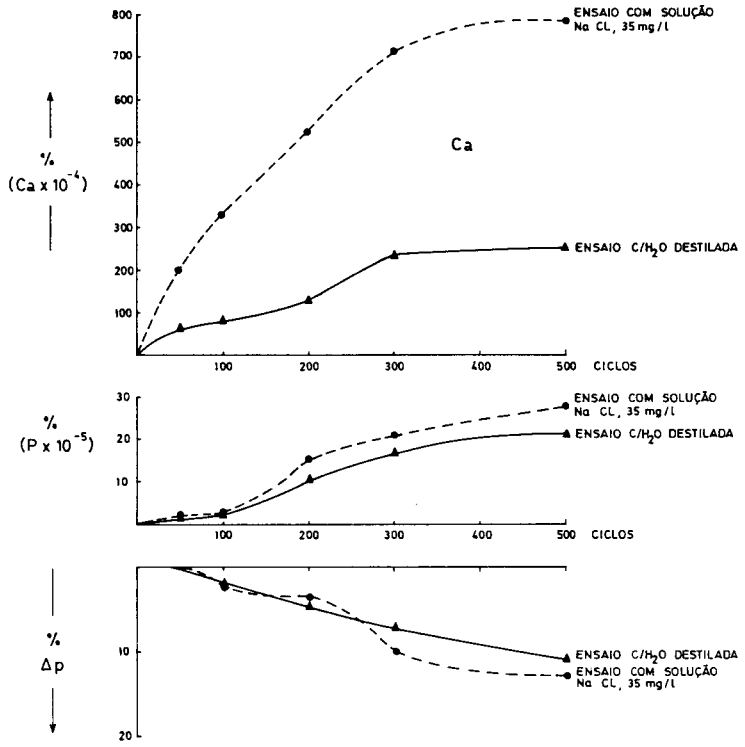

Fig. 14 — *Curvas de evolução das concentrações de Ca e P nas soluções percolantes dos ensaios de percolação livre com fosforito e das respectivas perdas de peso. (Elaborado com bases nos elementos de AIRES-BARROS e GRAÇA, 1972).*

No método de percolação forçada, que permite conhecer elementos de grande interesse para o estudo da reactividade água-rocha, há que considerar:

a) as variações de débito de água de percolação em função da duração da filtração.
b) as análises químicas dos filtrados.

A análise do primeiro quesito impõe-se pois que as modificações da permeabilidade (k) ao longo do ensaio indicam reactividade entre a rocha e a água percolante. estas reacções podem provocar a deposição de produtos nos canais ou apenas o

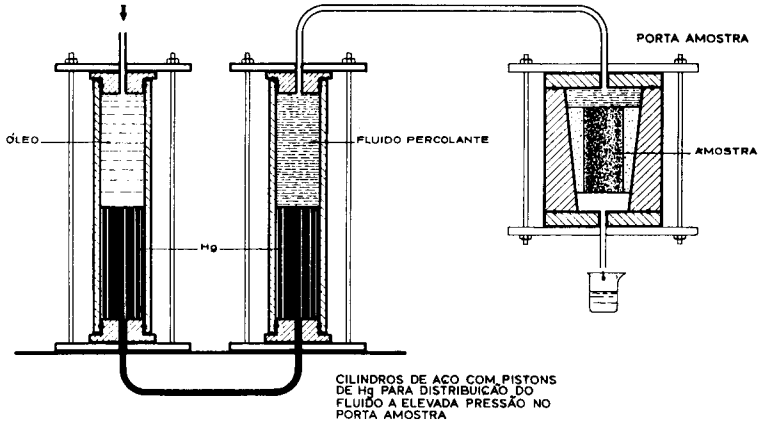

Fig. 15 — *Esquema de montagem para o ensaio de percolação forçada (de AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 b).*

entumescimento de alguns minerais. Podem originar lixiviações com a concomitante remoção de material, quer por arrastamento, quer em solução. Seja qual for a causa das modificações da permeabilidade, a variação da percolação com o tempo é um critério de reactividade.

Quanto ao segundo quesito, o doseamento dos elementos químicos arrastados e presentes nas diferentes tomas de percolado permite saber se eles provêm de:

a) preenchimento de discontinuidades que se vão esgotando, à medida que a percolação forçada se realiza.
   Neste caso a lavagem deverá conduzir, com o tempo, ao esgotamento desse produto de preenchimento e o teor dos elementos químicos constituintes, tenderá para zero à medida que o número de percolações aumenta, pois se dá o esgotamento do induto que colmata os canais. Neste caso o preenchimento das microfracturas e microfissuras correspondentes a uma alteração passada e acabada. A rocha «sara» nesse estádio.
b) lixiviação actual e activa dos minerais constituintes da rocha. Neste caso assiste-se a um aumento das concentrações dos elementos químicos doseados à medida que se realizam os ensaios de percolação. Está-se aqui em presença de casos de reactividade mais ou menos intensa dos minerais com a água e que progride com o tempo.

O ensaio realiza-se sobre uma amostra talhada com forma de tarolo cilíndrico e envolvida por um revestimento de resina epóxida, tronco-cónica adaptável ao interior de um porta-amostras, também ele tronco-cónico (Fig. 15). O fluido percolante é

injectado por uma das bases do cilindro da amostra e é recolhido na base oposta após atravessar a amostra. O fluido é forçado, por efeito de um complexo sistema de pressurização: pneumático de comando, óleo-hidráulico e mercúrico.

As altas pressões desenvolvidas e o elevado poder de corrosão dos líquidos usados implicam cuidados particulares de montagem, exigindo para o seu manuseamento operador adestrado e uma manutenção muito frequente e assídua.

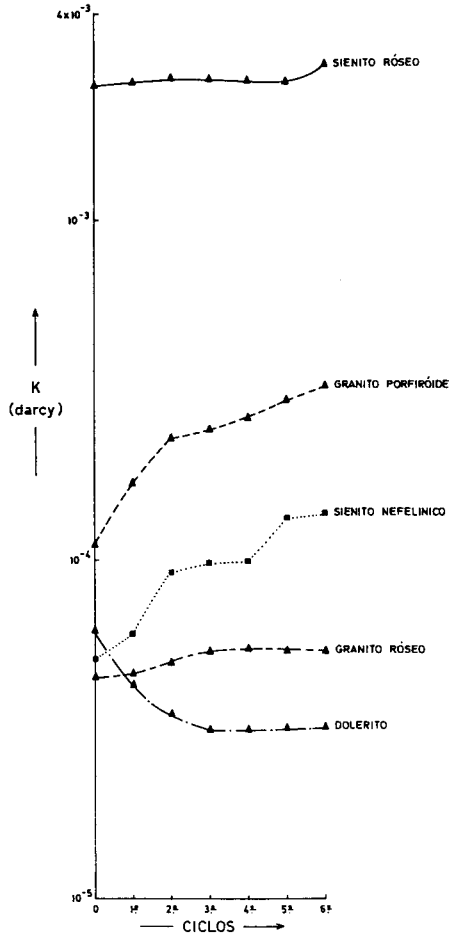

Fig. 16 — *Curvas de evolução da permeabilidade ao ar das rochas submetidas a ensaio e percolação forçada (segundo dados de AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 b)*

IV.2 — *Resultados de ensaios de percolação forçada sobre alguns tipos petrográficos*

São ainda escassos os resultados obtidos com este ensaio de percolação forçada, residindo a explicação para este facto em meras dificuldades operatórias.

Num dos primeiros trabalhos, AIRES-BARROS e GRAÇA (1971 b) apresentam os resultados de ensaios realizados com cinco tipos petrográficos granito róseo da serra de Sintra, sienito róseo do cabo da Roca, granito pseudo-profiróide da serra da Estrela, sienito nefelínico da serra de Monchique e dolerito de Leiria.

As Figs. 16 e 17 apresentam, respectivamente, a evolução da permeabilidade ao ar das rochas ao longo do ensaio e a curva cumulativa da quantidade de líquido percolante recolhido ao longo do ensaio.

O primeiro conjunto de curvas (Fig. 16) de evolução da permeabilidade ao ar das amostras, permite reconhecer que só o dolerito diminui esta característica à medida que o ensaio evolui, mostrando como que uma colmatação das fissuras e microfissuras por materiais arrastados pelo líquido percolante. O granito porfiróide e o sienito nefelínico pelo contrário mostram maior tendência à lixiviação, aumentando francamente a permeabilidade ao ar. Aliás são estas mesmas rochas as que maior quantidade de líquido deixam passar ao longo do ensaio (Fig. 17).

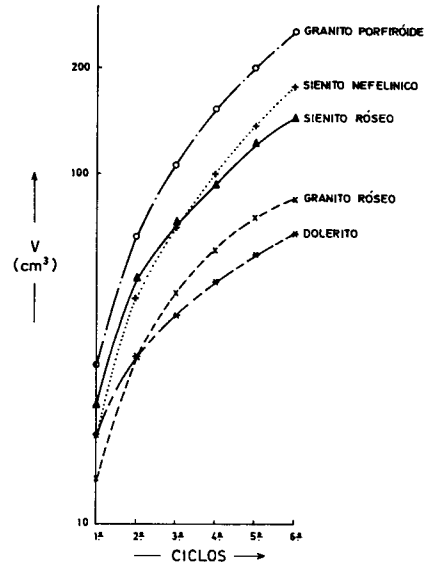

Fig. 17 — *Curvas cumulativas da quantidade de líquido percolante recolhido ao longo do ensaio de percolação forçada. (Segundo dados de AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 b).*

V. ENSAIO DE ABRASÃO MECÂNICA

V.1 — *Descrição do ensaio*

O dispositivo empregue para este ensaio consta de um sistema rotativo envolvendo quatro prateleiras, que suportam recipientes paralelepipédicos de polietileno (Fig. 18). Nestes recipientes, contendo determinado volume de água destilada, de pH e resistividade eléctrica conhecido, são imersos fragmentos, de granulometria afim ($\varnothing_m$ = 35 mm), das rochas a ensaiar (AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 c). O ensaio é normalmente conduzido com três ciclos distintos, durante os quais o engenho rodando a 22 r.p.m. não é parado. Os períodos de tempo de cada ciclo podem variar de 50 a 1500 h. Antes de se iniciar cada novo ciclo o líquido de imersão é renovado e os materiais residuais são recolhidos.

O mecanismo rotativo permite o desgaste dos fragmentos de rocha por rolamento e fricção, e também por percussão, resultando em parte da forma paralelepipédica dos contentores.

Os fragmentos da rocha vão rolando e batendo nas paredes dos contentores, sincopadamente, 4 vezes por rotação. Os ensaios realizados em meio aquoso permitem além disso avaliar da aptidão para a reactividade água-rocha.

A renovação da água do ensaio permite minimizar a capacidade de ataque da água ao longo do ensaio.

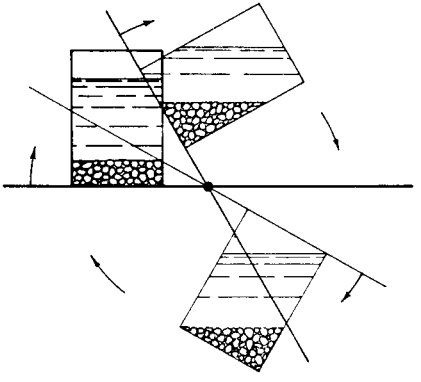

Fig. 18 — *Esquema de montagem do ensaio de abrasão mecânica (AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 c)*

V.2 — *Alguns resultados de ensaios de abrasão mecânica*

Uma visão rápida, pelos resultados publicados e referidos a este ensaio é uma maneira de ver até que ponto ele permite seriar as rochas quanto à sua tendência para a alteração e, prever de que forma se comporta a rocha em presença da água.

AIRES-BARROS e GRAÇA (1971 c) apresentam os principais resultados. Na Fig. 19 indicam-se as perdas de peso no ensaio para o conjunto de rochas até agora considerado (APÊNDICE I).

A Fig. 20 mostra a evolução da concentração em Na+ das soluções com avanço do ensaio.

Finalmente e para a grande maioria das rochas apresenta-se de forma resumida a granulometria dos resíduos do ensaio (Fig. 21).

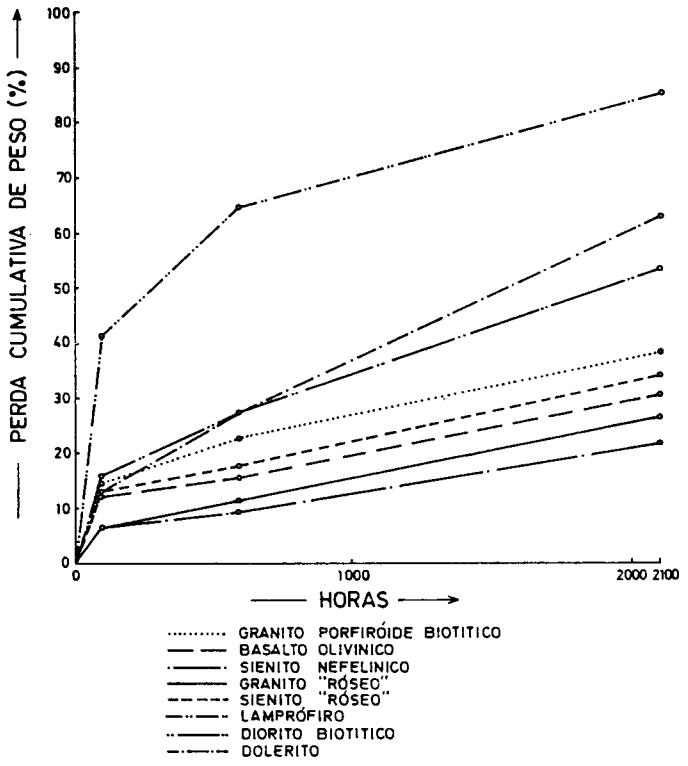

Fig. 19 — *Curvas de perda de peso cumulativas no ensaio de abrasão mecânica para diferentes tipos de rochas (AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 c)*

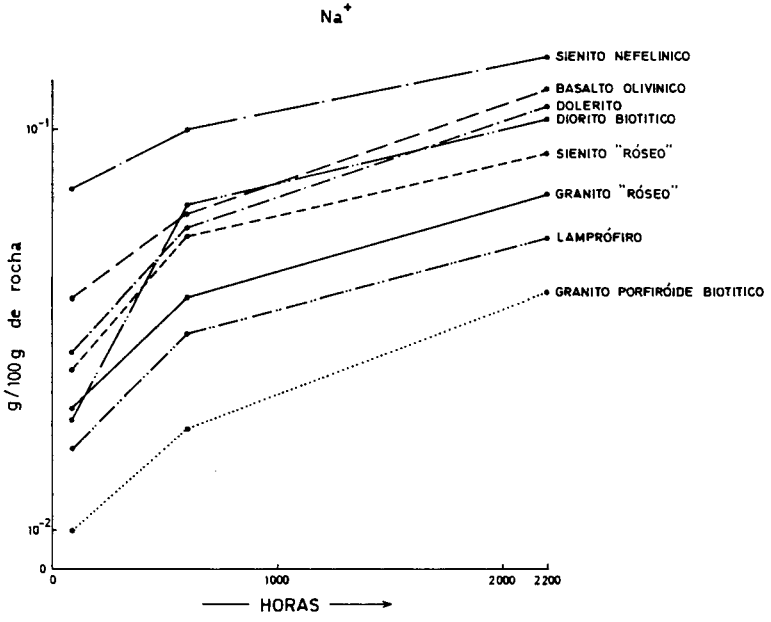

Fig. 21 — *Diagrama da granulidade dos resíduos dos ensaios de abrasão mecânica. (Com base nas curvas granulométricas de AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 c).*

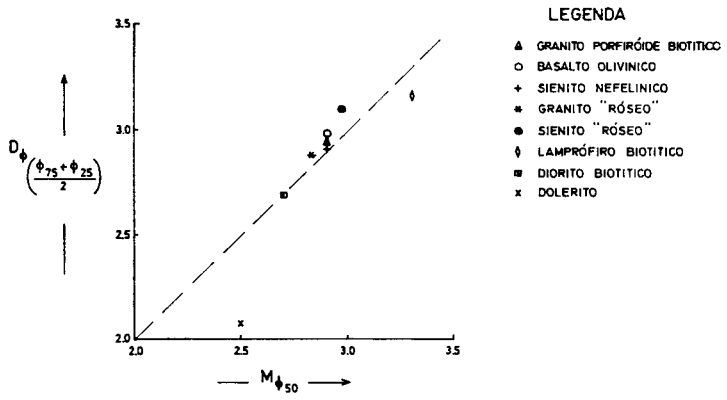

Fig. 20 — *Curvas de evolução das concentrações de Na nas soluções de imersão — Ensaios de abrasão mecânica (segundo elementos de AIRES-BARROS e GRAÇA, 1971 c).*

VI. ENSAIO DE FADIGA TÉRMICA COM SECAGEM-MOLHAGEM

VI.1 — *Descrição do ensaio*

Partindo dos trabalhos de GRIGGS (1936) sobre ensaios laboratoriais de fadiga térmica de rochas, desenvolveu-se no LAMPIST um curioso aparelho para a realização de ensaios de fadiga térmica com secagem-molhagem. Dado que a descrição está já feita por AIRES-BARROS *et al* (1975) retemos aqui, tão somente, o diagrama geral da montagem (Fig. 22). A amostra é submetida a condições de «insolação» por uma lâmpada de infravermelhos. A lâmpada é colocada a cerca de 20 cm de uma amostra de forma cilíndrica com geratriz menor do que o diâmetro da base, e em que um dos topos do cilindro é tratado como uma superfície polida, sendo essa face submetida directamente à acção da luz. Findo o período de insolação a amostra ou arrefece ao ar ou é mergulhado numa tina, com água (ou qualquer outra solução) agitada.

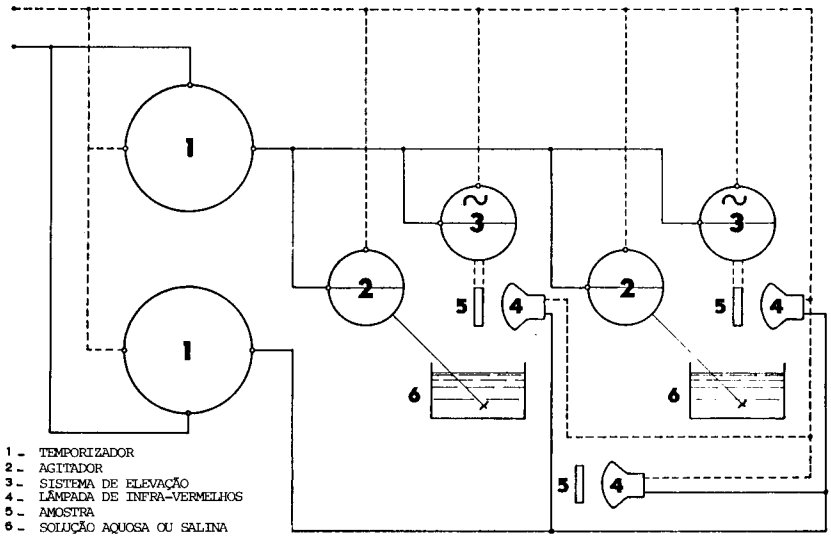

Fig. 22 — *Diagrama geral da montagem do ensaio de fadiga térmica com secagem-molhagem* (in *AIRES-BARROS* et al, *1975)*

VI.2 — *Parâmetros de controlo do ensaio de fadiga térmica com secagem-molhagem*

Como parâmetros de controlo utiliza-se:

a) a perda de peso da amostra;
b) a titulação de iões na solução das tinas;
c) a observação da superfície polida, com controlo fotográfico ao microscópico de luz reflectida;
d) controlo do poder reflector da superfície polida;
e) determinação da microdureza Vickers de pontos da superfície polida à medida da progressão do ensaio.

Foi para estes três últimos parâmetros de controlo que se desenvolvem métodos específicos e que brevemente indicamos.

A superfície polida (amostra) é montada sobre a platina do microscópico de luz reflectida, equipado com dispositivo coordinatógrafo. É possível referenciar um ponto dessa superfície por duas coordenadas x e y, através de simples marcação da superfície. O mesmo sistema de coordenadas foi utilizado com um porta-amostras e serviu para determinar o poder reflector e a microdureza. A maioria dos resultados apontados referem as médias ponderadas dessas grandezas para uma superfície polida, tal como descrito em AIRES-BARROS *et al* (1974).

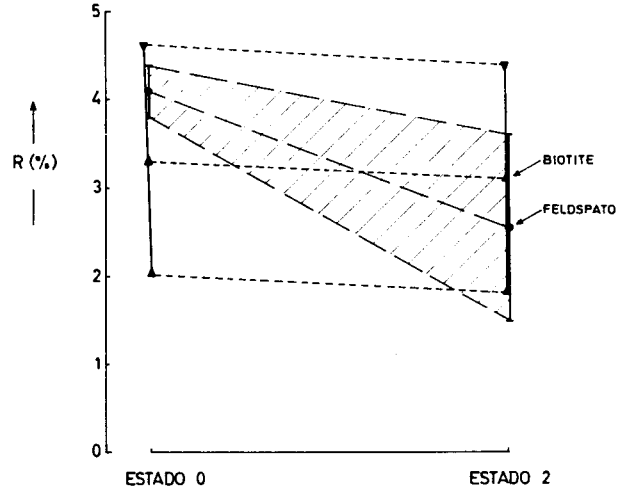

Fig. 23 — *Evolução do poder reflector da biotite e do feldspato entre dois estádios no ensaio de fadiga térmica*

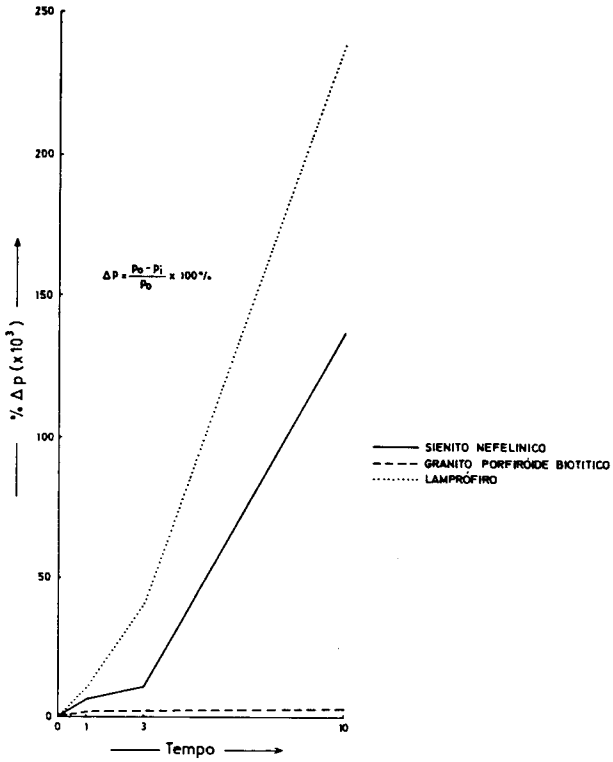

Fig. 24 — *Curvas de evolução de perda de peso das amostras submetidas a ensaio de fadiga térmica com secagem-molhagem (in* AIRES-BARROS *et al*, 1975)

Em ensaios preliminares comparou-se num granito (róseo) a evolução do poder reflector dos seus constituintes: feldspato e biotite. Resulta da análise da Fig. 23, que o poder reflector médio diminui em ambos os minerais, mas de forma bem mais acentuada no feldspato. É também neste mineral que a dispersão dos valores mais aumenta com a evolução do processo da alteração.

VI.3 — *Ensaio de fadiga térmica com rochas ígneas*

Num primeiro ensaio e relatado em AIRES-BARROS *et al* (1975) foram apresentados os resultados com três rochas:

(*a*) granito porfiróide biotítico
(*b*) sienito nefelínico
(*y*) lamprófiro

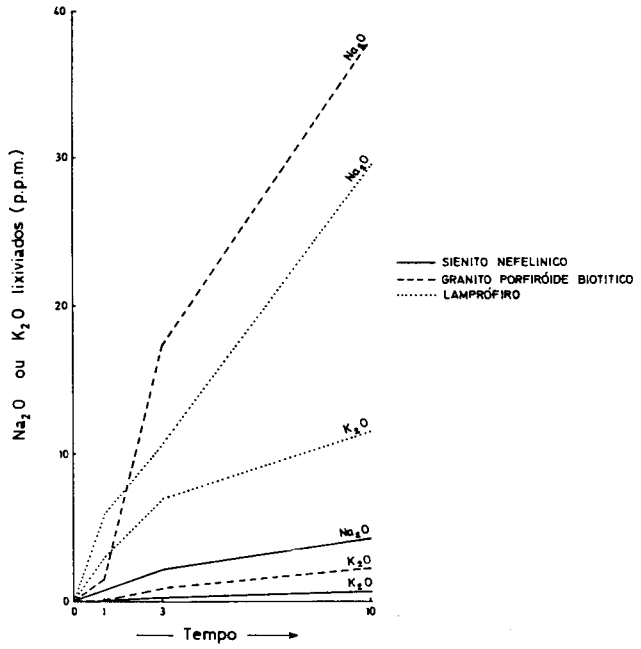

Fig. 25 — *Evolução das concentrações de Na e K nas soluções de ensaio de fadiga térmica com secagem-molhagem de algumas rochas ígneas. (in* AIRES-BARROS *et al*, 1975).

A Fig. 24 apresenta as curvas de perda de peso das amostras ensaiadas com imersão em água destilada. A Fig. 25 dá a concentração de Na+ e K+ na solução ao longo do ensaio.

A partir dos resultados indicados concluem os autores que as rochas ensaiadas se podem ordenar quanto à alterabilidade (K) da forma seguinte:

$$K_{\text{lamprófiro}} > K_{\text{sienito nefelínico}} > K_{\text{granito}}$$

VI.4 — *Ensaio de fadiga térmica com rochas carbonatadas*

Continuando a rever resultados do ensaio de fadiga térmica um dos mais curiosos casos é referido em AIRES-BARROS (1977). Diz o trabalho respeito a um ensaio com diversos tipos de calcários: desde um calcário compacto, passando por um calcário cristalino, incluindo um calcário argiloso quase uma marga, e mesmo um calcário dolomítico.

A Fig. 26 mostra a perda de peso em função do avanço do ensaio. Nessa figura também se mostra a evolução da concentração Mg++ e Ca++ nas soluções de molhagem. A Fig. 27 apresenta as curvas de evolução do poder reflector médio das amostras ao longo do ensaio, bem assim como da microdureza.

Tendo por base os resultados apresentados, AIRES-BARROS (1977) avança conclusões quanto à alterabilidade (K) das rochas calcárias ordenando-as da maneira que se segue:

K calcário margoso > K calcário colítico > K calcário cristalino >
> K calcário compacto > K calcário dolomítico

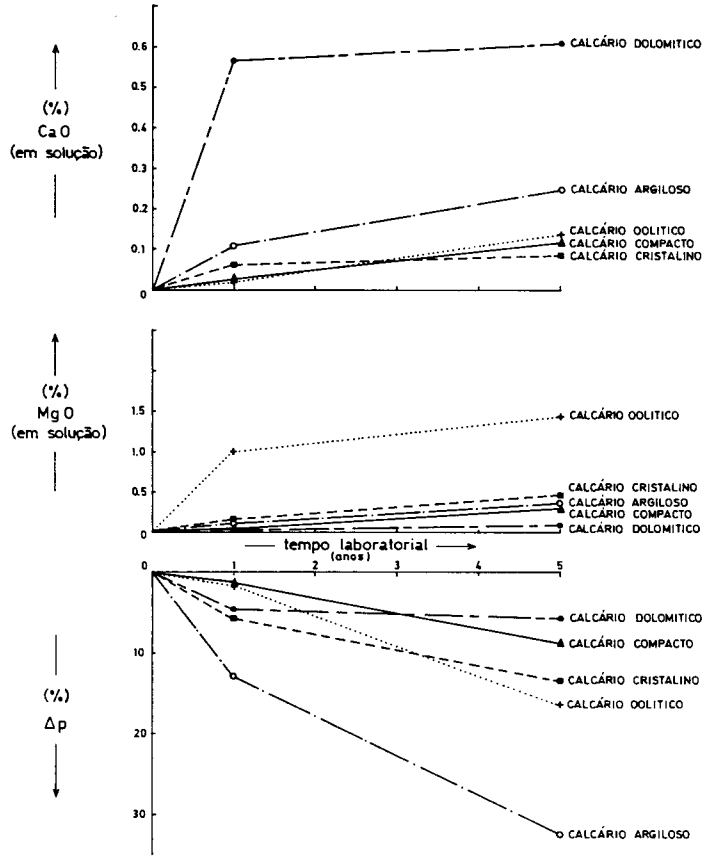

Fig. 26 — *Curvas de evolução da perda de peso das amostras, das concentrações de Mg e Ca nas soluções de molhagem de ensaios de fadiga térmica com secagem-molhagem com rochas carbonatadas (in* AIRES-BARROS, 1977).

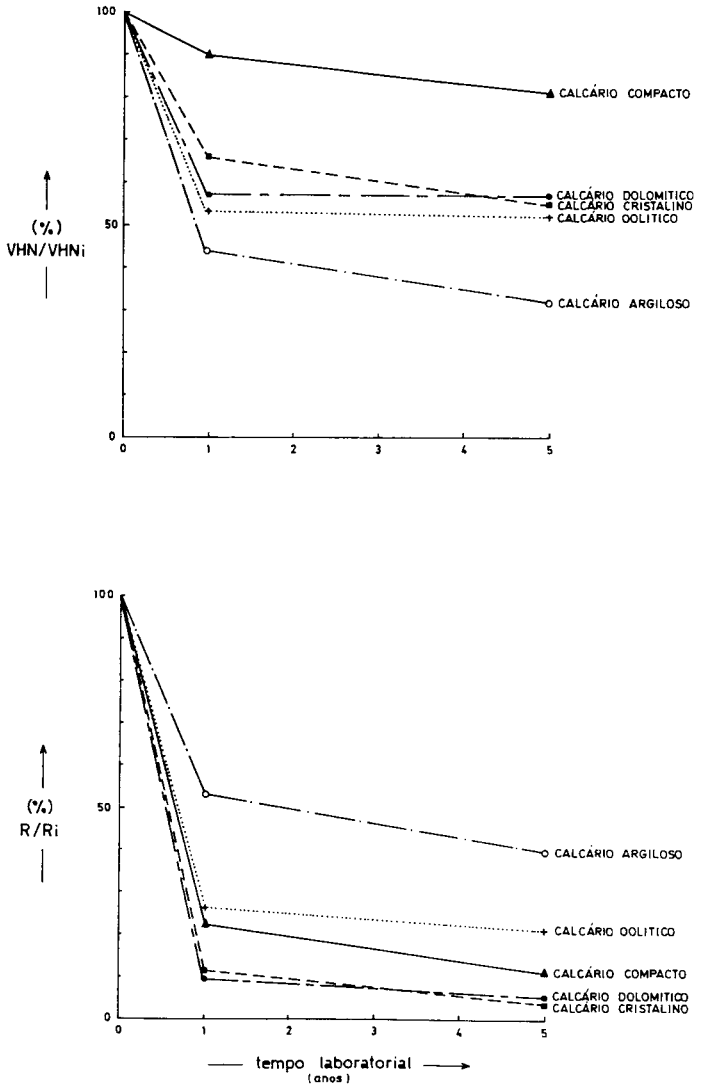

Fig. 27 — *Curvas de evolução do poder reflector* (*R*/Ri) e microdureza média (VHN/VHN_i) para ensaio de fadiga térmica com secagem-molhagem de rochas carbonatadas (*in* AIRES-BARROS, 1977).

VI.5 — *Ensaio de fadiga térmica com secagem-molhagem de mármores*

Um dos mais interessantes projectos de aplicação da alteração experimental de rochas diz respeito à previsão do comportamento dos materiais pétreos como materiais de construção. Um dos mais clássicos materiais de revestimentos de construção é o mármore. Não constitui novidade dizer-se que o país é um grande produtor de mármore.

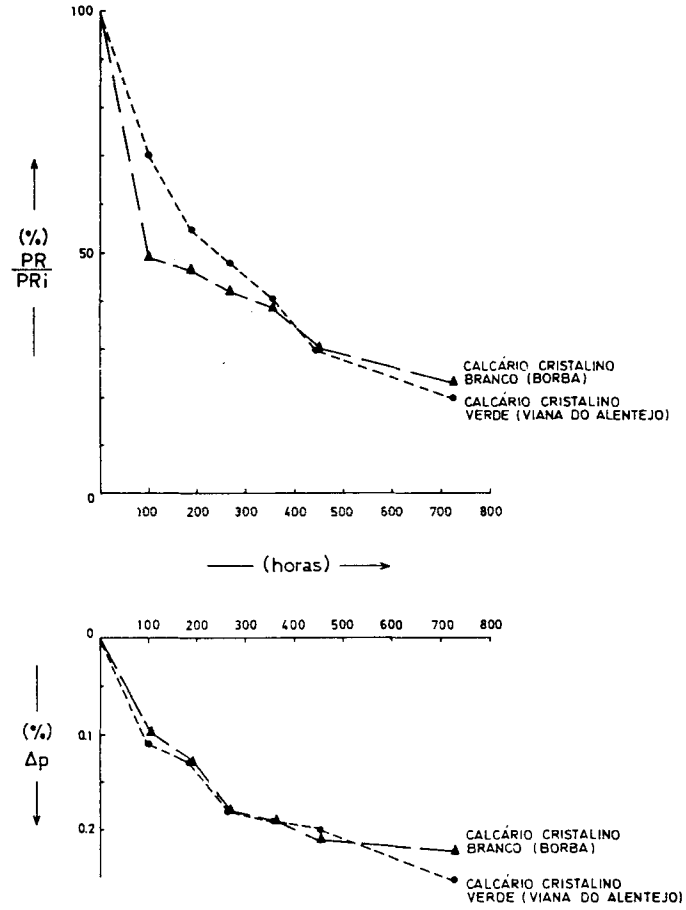

Fig. 28 — *Curvas de evolução da perda de peso* (Δp) e da reflectividade (PR/PR_i) em ensaio de fadiga térmica com secagem-molhagem de calcários cristalinos.

Não admira, portanto, que no LAMPIST se tenha tido a preocupação em estudar o comportamento à alteração dos calcários cristalinos portugueses e particularmente dos provenientes dos maciços alentejanos de Vila Viçosa-Estremoz e de Viana do Alentejo.

A Fig. 28 mostra a evolução das perdas de peso e da reflectividade de dois calcários cristalinos: mármore branco de Borba e verde de Viana do Alentejo. Note-se que o andamento é muito próximo para os dois mármores considerados, podendo contudo dizer-se que o calcário de Viana tem uma tendência ligeiramente superior à alteração, quando comparado com o calcário branco de Borba:

$$K_{\text{calcário cristalino de Viana}} \geq K_{\text{calcário cristalino de Borba}}$$

QUADRO I

QUADRO RESUMO DOS PRINCIPAIS ENSAIOS DE ALTERAÇÃO EXPERIMENTAL DE ROCHAS EXECUTADOS NO LABORATÓRIO DE MINERALOGIA DO I.S.T.

TIPO DE ENSAIO	OBJECTIVO	PARÂMETROS	DURAÇÃO DO ENSAIO
EXTRACTOR TIPO SOXHLET	— Determinação do comportamento de uma rocha quando sujeita um intenso regime pluvioso hipertropical	— Composição química da água de percolação — pH e resistividade da água de percolação — Composição química e mineralógica da rocha ensaiada — Perda de peso e densidade dos materiais ensaiados	Milhares de horas (≅6000 h-12 000 h)
PERCOLAÇÃO «LIVRE» EM CIRCUITO FECHADO	— Determinação do comportamento da rocha quando sujeita a molhagem intermitente ou a percolação por água	— Composição química da água de percolação — Perda de peso da amostra ensaiada	100 h - 1200 h
PERCOLAÇÃO FORÇADA DE ÁGUA A ALTAS PRESSÕES	— Reactividade água-rocha — Alterabilidade das rochas	— Composição química da água — Permeabilidade da amostra ensaiada	Escassas horas a centenas de horas (6 a 200 h)
ABRASÃO MECÂNICA	— Abrasão entre fragmentos rochosos — Reactividade água-rocha	— Composição da água de ensaio — Perda de peso da amostra — Granulometria do material residual	100 h - 2100 h
FADIGA TÉRMICA POR SECAGEM-MOLHAGEM	— Fadiga térmica — Reactividade água-rocha	— Perda de peso da amostra — Observação da superfície de rocha — Reflectividade e microdureza — Composição química da água da molhagem	100 a 500 h

VII — CONCLUSÕES

Da sumária apresentação dos ensaios de alteração experimental de rochas conduzidos ao longo de mais de uma década no LAMPIST, evidencia-se por um lado que através deles se pode conhecer como uma dada rocha se comporta em presença de um dado ambiente. Mais importante é a possibilidade que fica aberta à previsão do comportamento das rochas à escala das obras de engenharia em termos de duração das propriedades mecânicas dos materiais pétreos e previsão do seu comportamento no tempo.

O grande óbice a todos os trabalhos de alteração experimental de rochas é sem dúvida o tempo necessário para conseguir resultados minimamente aceitáveis (QUADRO I).

De uma forma resumida (QUADRO I), mas não menos prática apresentam-se os principais ensaios realizados no LAMPIST, os principais objectivos desses ensaios, os parâmetros de controlo e o tempo necessário à obtenção de resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES-BARROS, L. (1969) *A Análise Modal e a Definição de um Índice de Qualidade Micropetrográfico* Bol. Soc. Port. Ciências Naturais, 2.ª série, Vol. XII, pp. 105-116.

AIRES-BARROS, L. (1972) *Análise Laboratorial de Influências da Granularidade na Alterabilidade das Rochas* Técnica, 417, pp. 65-70

AIRES-BARROS, L. (1977) *Experiments on Thermal Fatigue of Non-Igneous Rocks* Engineering Geology, 11, pp. 227-238

AIRES-BARROS, L. e GRAÇA, R. C. (1971 a) *Laboratory Test on Cyclic «Closed Circuit» Percolation of Rocks* Técnica, 408, pp. 417-422

AIRES-BARROS, L. e GRAÇA, R.C. (1971 b) *A Percolação Forçada de Água Através das Rochas e a Previsão da Alterabilidade* Técnica, 412, pp. 59-72

AIRES-BARROS, L. e GRAÇA, R. C. (1971 c) *Test on Accelerate Abrasion and Chemical Mobilization of Rocks* Bull. IAEG, 3, pp. 56-68

AIRES-BARROS, L. e GRAÇA, R. C. (1972) *Ensaios Laboratoriais Sobre a Alterabilidade de Fosforitos* Rev. Fac. Ciências de Lisboa, 2.ª série, C, Vol. XVIII, pp. 59-71

AIRES-BARROS, L.; MELLO-MENDES, F.; MOURAZ-MIRANDA, A. (1974) *Microindentation Hardness in the Characterization of Rock Sawing* Proc. 3rd Int. Congress ISRM, Denver, 6, pp. 1471-1475

AIRES-BARROS, L.; GRAÇA, R. C. ; VELEZ, A. (1975) *Dry and Wet Laboratory Tests and Thermal Fatigue of Rocks* Engineering Geology, 9, pp. 249-265

AIRES-BARROS, L., MOURAZ-MIRANDA, A. (1979) *A Alteração Laboratorial de Rochas pelo Extractor de Soxhlet e a Repercussão na Oxidação* $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ *e na Variação da Densidade Aparente* Com. Serv. Geol. Port., T. LXIV, pp. 243-256

DECARREAU, A. (1977) *Études Experimentales d'Altération en Systéme Ouvert de Matériaux Geologiques Naturels. Approche Expérimentale des Mécanismes d'Altération. Comportement Geochimique des Éléments Majeurs et en Traces.* Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr. 100, pp. 289-301

FERRAN, J.; THÉNOZ B. (1965) *L'Alterabilité des Roches ses Facteurs, sa Prévisition.* Ann. Int. Techn. Bat. Trav. Publ., 215, pp. 1534-1548

GRIGSS D. T. (1936) *The Factor of Fatigue in Rock Exfoliation* Jour. Geol., 44, pp. 783-796

ONODERA T. F.; YOSHINAKA, R.; ODA, M. (1974) *Weathering and its Relation to Mechanical Properties of Granite* Proc. 3rd Int. Congre. Rock Mechanics, Denver, Vol. II(A), pp. 71-78

PEDRO, G. (1961) *Prémiers Resultats sur la Génese des Laterites par Voie Experimentale* Proc. Int. Geol. Congr., Copenhague, p. XXIV

PEDRO, G. (1964) *Contribution à l'Étude Expérimentale de l'Altération Geōchimique des Roches Cristallines* Thèse, Univ. Paris