

## ENSAIOS DE ALTERAÇÃO INTEMPÉRICA UTILIZANDO UM NOVO APARELHO: O INTEMPERIZADOR

por

*Raphael Hypólito*

*Departamento de Mineralogia e Petrologia*

### ABSTRACT

Results of experimental weathering of rocks using a new apparatus—the *intemperizador*—are presented. This apparatus very simple, permits quite reasonable control of the physico-chemical parameters acting during the experimental weathering which were conducted on fragments (2-6 mm) of two diabases with similar chemical and mineralogical compositions but showing different textures. The diabases were leached using 200 liters of saturated solution of CO<sub>2</sub> with average rate of precipitation: 569 mm (day) and the solutions collected daily. Detailed chemical analyses of these solutions permitted survey the behavior of the ions running out during the process. The analytical results were correlated to the grain size of the rocks, pH of the lixiviating waters and hydrogenionic consumption.

During the process has been possible to differentiated alteration phenomena which occurred in different levels of the apparatus. In the levels where the fragments suffered intermittent thermal and water action, results similar to weathering of basic rocks in dry weather has been obtained. In the levels where the fragments were permanently under the solutions, stronger alteration resulted.

The alteration under the described conditions has been more effectively in the fine grain diabase as resulted of the decomposition of the ferromagnesian minerals.

### RESUMO

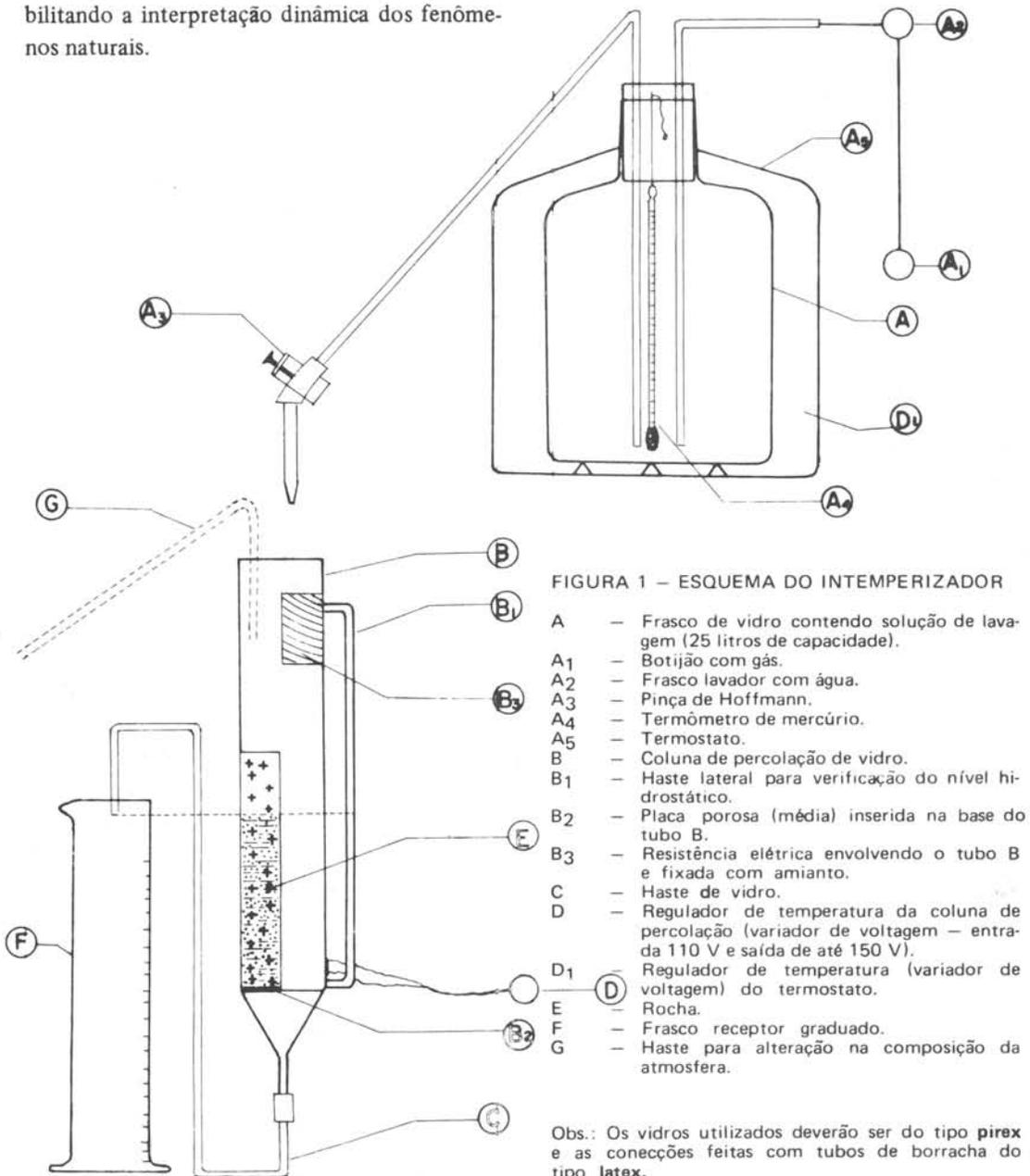
Este trabalho, apresenta os resultados de alteração intempérica experimental de rochas, utilizando-se equipamentos denominado *Intemperizador*. Este instrumento, bastante simples, permite razoável controle dos parâmetros físico-químicos; seu desempenho foi verificado em experiências nas quais fragmentos (2-6 mm) de dois diabásios de composição química e mineralógica semelhantes mas de texturas diferentes foram submetidos a uma lixiviação de 200 litros de solução saturada de gás carbônico (taxa de precipitação média de 569 mm/dia. As soluções foram coletadas diariamente e as análises destas soluções possibilitaram o estudo químico dos íons removidos durante todo o processo cujos resultados foram correlacionados com a granulação, pH das águas de lixiviação e consumo hidrogeniônico. Foi possível também diferenciar os fenômenos de alteração ocorridos em diferentes níveis do *intemperizador*. No nível em que os fragmentos sofreram intermitências térmicas e hídricas, obteve-se resultados semelhantes aos que ocorrem com rochas básicas sujeitas a climas secos. No nível onde os fragmentos estiveram imersos na solução percolante, onde favoreceram principalmente os fenômenos de hidrólise e precipitação, obteve-se alteração mais acentuada.

As experiências mostraram, de um modo geral, uma alteração em maior grau no diabásio de granulação fina constatada principalmente pela decomposição dos minerais ferromagnesianos.

## INTRODUÇÃO

Os processos de alteração intempérica de rochas que ocorrem na natureza são extremamente lentos, permitindo somente a apreciação estática dos fenômenos numa de suas etapas. Os estudos experimentais de alteração tem permitido, com razoável controle dos parâmetros físico-químicos, acelerar esses processos, possibilitando a interpretação dinâmica dos fenômenos naturais.

Os trabalhos experimentais de alteração de rocha tiveram grande impulso nas últimas décadas. Salientam-se neste campo as pesquisas que procuraram dar interpretação segura ao conjunto de fenômenos atuantes na formação de solos. Os trabalhos de Pedro (1964), por exemplo, baseados no extrator do tipo soxhlet, trouxeram novas perspectivas ao estudo dos fenômenos de alteração das rochas.



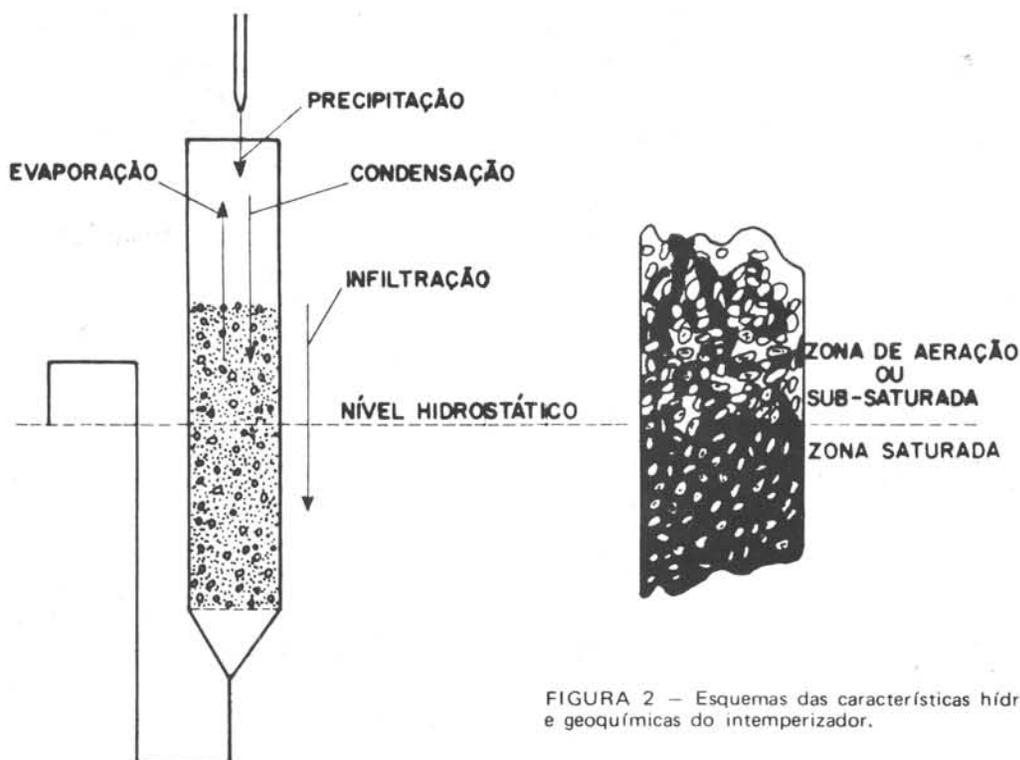
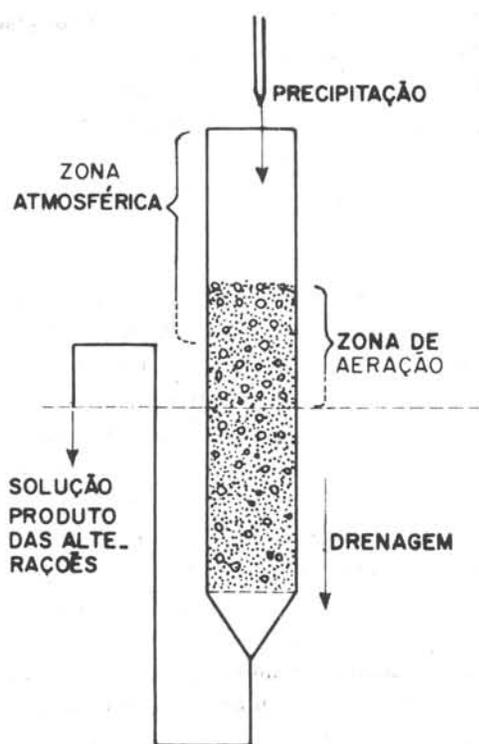


FIGURA 2 — Esquemas das características hídricas e geoquímicas do intemperizador.



Apesar do mérito do uso do Soxhlet, aventou-se a possibilidade de dar maior ênfase aos materiais dissolvidos nas soluções de lixiviação. Para isso elaborou-se um aparelho cujo funcionamento foi objeto de comunicação preliminar (Hypólito, et al, 1970). Várias modificações foram posteriormente introduzidas que consistem sobretudo no aperfeiçoamento do sistema de armazenamento e tratamento de soluções e o sistema de percolação (interação solução-rocha), possibilitando o controle dos fenômenos experimentais e os estudos químicos das soluções de lixiviação, que se tornaram eficientes na explicação dos fenômenos ocorridos na alteração de diabásios.

#### O INTEMPERIZADOR

O intemperizador está esquematizado na figura 1. Consta essencialmente de dois conjuntos:

- a) Conjunto de preparação de fluido que irá percolar a rocha.
- b) Conjunto de interação fluido-rocha.

O primeiro conjunto é independente do resto do sistema, permitindo o controle da precipitação artificial e o armazenamento de soluções de natureza diversas, mesmo aquelas de baixa pressão de vapor.

O segundo constitui a parte essencial do sistema, pois é onde se dá a precipitação, a percolação, a acumulação e o ataque intempérico. Constam ainda deste conjunto os controles de temperatura e nível hidrostático. Este separa a zona saturada de água da zona de aeração. A fig. 2 mostra esquematicamente as características hídricas e geoquímicas deste conjunto.

#### FUNCIONAMENTO DO INTEMPERIZADOR

O material a ser atacado é colocado no tubo B, de modo a ocupar mais ou menos 3/4 de sua capacidade. A granulação deve ser adequada e os fragmentos devem ser lavados, secos e pesados. Ajusta-se o nível hidrostático através da haste C, liga-se o termostato, e borbulha-se gás carbônico (se for o caso), de modo que a corrente gasosa seja lenta para obter-se o máximo de dissolução. A seguir liga-se o variador de voltagem D, e uma vez estabelecido o equilíbrio térmico abre-se a pinça A3. A solução do frasco A é gotejada dentro do tubo B, percolando os grãos não imersos da rocha sendo parcialmente evaporada. Sua maior parte, no entanto, mistura-se com a solução que cobre a outra porção da amostra. A solução enriquecida de íons, produtos de alteração da rocha, atravessa a placa porosa, a haste C e goteja no frasco F.

#### PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Os parâmetros tratados a seguir foram

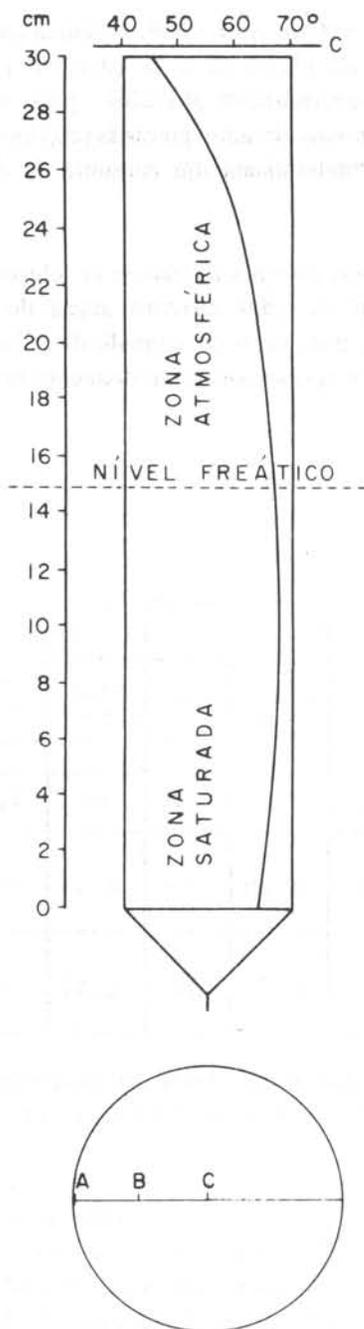
estabelecidos visando ressaltar os principais fatores de alteração intempérica. Desta maneira, os fatores climáticos, térmicos e hídricos, são aqui rigidamente controlados e ampliados com a finalidade de obterem-se as características dos processos. Assim, o estabelecimento dos parâmetros experimentais tenderam a simular condições climáticas comparáveis às de um clima tropical úmido.

#### Temperatura

As rochas, com as variações de temperatura da superfície durante o dia e a noite, sofrem constantes dilatações e contrações; estas variações também ocorrem na coluna de percolação B do intemperizador - durante o dia, com o aparelho em funcionamento, a temperatura foi ao redor de 65°C, e durante a noite, com o aparelho desligado, a temperatura foi a ambiental.

Além das variações de temperatura sofrida pela rocha durante o dia e a noite, os grãos situados nos primeiros centímetros da zona atmosférica sofrem choques térmicos intermitentes durante o funcionamento do aparelho, e a medida que os grãos da rocha se afastam da superfície, estas variações tornam-se menos acentuadas.

A temperatura da solução contida no frasco A é obtida pelo controle de um variador de voltagem; esta temperatura, lida em A4, uma vez alcançada, deverá permanecer inalterada até o final da experiência. A constância da temperatura neste ambiente, assegura uma concentração fixa nos casos em que se utilizam soluções de baixa pressão de vapor. A temperatura em B é determinada antes da colocação da rocha. Com o termostato ligado abre-se a pinça A3, ajusta-se o nível hidrostático e com um par termo-elétrico efetuam-se as leituras de temperaturas em várias alturas da coluna, ajustadas pelo variador de voltagem D. Uma vez conse-



ZONA ATMOSFÉRICA (16cm)	ZONA SATURADA (14cm)
$T_A = 71^{\circ}\text{C}$	$T_A = 65^{\circ}\text{C}$
$T_B = 68^{\circ}\text{C}$	$T_B = 64,5^{\circ}\text{C}$
$T_C = 63^{\circ}\text{C}$	$T_C = 64^{\circ}\text{C}$

guida as temperaturas desejadas, este variador de voltagem também não deverá mais ser alterado.

A figura 3 mostra as variações de temperaturas ao longo da coluna B, quando o equipamento está ligado e atingiu o equilíbrio térmico. Mostra, ainda, as variações em duas secções do tubo B, 14 e 16 cm, indicando o gradiente existente entre as paredes e o centro. Com estes valores de temperatura o ataque às rochas é acelerado sem produzir diferenças apreciáveis em relação às alterações ocorridas na natureza.

### Precipitação

No intemperizador a *água da chuva* apresentou elevado teor de gás carbônico dissolvido, e sua precipitação média diária foi 140 vezes maior que a apresentada na região onde foram coletadas as amostras.

No intemperizador teve-se uma precipitação de 10 litros em 2 semanas, numa área de  $12,56 \text{ cm}^2$ , fornecendo taxa de precipitação média de 569 mm/dia.

O regime pluviométrico foi caracterizado por ciclos semanais. Cada ciclo é constituído por cinco períodos de oito horas de precipitação contínua (100 mm/h), intercalados com cinco períodos de dezesseis horas sem precipitação. Cada um dos ciclos semanais é separado de outros por um intervalo de quarenta e oito horas sem precipitação.

A taxa de fluxo de solução: é controlada através da pinça A3 e o número de gotas por minuto, que deve ser mais ou menos constante, é determinado pela saída da solução na haste C.

FIGURA 3 - Gradiente térmico no perfil e na secção da coluna de percolação quando em funcionamento

### Composição química dos gases

As águas naturais apresentam um conteúdo em gás carbônico da ordem de 0,57 mg/l, mas a maior dissolução se dá no contato com o solo, onde este valor pode elevar-se 300 vezes (Feth, 1964, p.39; Pedro, 1964, p.134)

No frasco A a solução foi saturada com gás carbônico a uma temperatura constante, mas devido às variações de temperaturas durante o percurso da solução, o teor gasoso foi alterado, como se observa na tabela 1.

lação tem o pH médio 3,50; à medida que esta solução percola os grãos, os valores de pH vão sendo gradativamente alterados para valores cada vez mais elevados, graças às reações químicas que determinam um consumo de cátions  $H^+$ .

Estas soluções referem-se às soluções que percolam os grãos da zona acima do nível freático, pois na zona saturada da coluna, os íons  $H^+$  apresentam comportamento bastante diferente.

TABELA I

	T	CO <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>	
		ppm	%	ppm	%	ppm	%
Sol. carbônica em A	35° C	1099	100	-----	-----	-----	-----
Sol. no meio ambiente	25° C	1099	98,05	8,24	0,74	14	1,21
Sol. gasosa em B, zona atmosférica	50° C	737	100	0,19	-----	0,14	-----
Sol. gasosa em B, zona saturada	25° C	0,44	2	8,26	37	13,55	61

Ressalvadas as aproximações dos cálculos, pode-se admitir que durante o funcionamento do aparelho, predominou um ambiente inerte na coluna de percolação e quando o aparelho esteve desligado, o meio predominante foi oxidante.

A zona de aeração poderá ser neutra, oxidante, ou redutora, desde que se introduzam gases adequados pela haste G (fig. 1).

### Natureza das soluções das colunas de percolação

A solução que entra na coluna de perco-

Muitas águas naturais são tamponadas em certas extensões, e esta capacidade depende do teor carbônico dissolvido, estando relacionada à solubilidade e equilíbrios químicos dos minerais. Weber e Stumm (1963) estudaram o efeito tampão nas águas naturais e definiram o termo *capacidade tampão* como sendo a quantidade de ácido ou base necessária para produzir variação de uma unidade no pH da água.

Ao ser estabelecido um nível aquoso constante (através da haste C) no intemperizador, fez-se com que os fragmentos das rochas da região saturada estivessem em permanente contato com um meio tamponado, reproduzindo-se assim mais algumas condições próximas

das naturais.

Quanto às variações de pH, a coluna B do intemperizador está dividida em três regiões: a primeira corresponde à zona atmosférica seca, onde prevalece o pH ao redor de 3,50; a segunda, onde o pH está entre 3,50 a 5,46 corresponde à zona subsaturada; finalmente a última é a região correspondente à zona saturada, na qual o pH é do meio tampão, cujo valor foi determinado no decorrer da experiência como o pH de saída.

Procurou-se constatar os efeitos ocasionados pela alteração do pH de entrada e, para tanto, de 166° ao 176° litros a solução de lavagem não foi saturada de CO<sub>2</sub> apresentando pH médio de 4,50.

A amostra para a determinação do pH de entrada é coletada com um frasco de vidro, com capacidade de 30 ml, preso a um fio de linha e introduzido no interior da coluna B. O pH de saída é medido na amostra coletada na extremidade da haste C.

#### Quadro Geral das Condições Experimentais

1. Natureza da solução de lavagens – saturada de CO<sub>2</sub>
2. pH de entrada – valor médio 3,50
3. Temperatura média do reservatório A – 35°C
4. Temperatura média do tubo de percolação B – 65°C
5. Temperatura média da solução saída da haste C – 28°C
6. Pluviosidade média – 569 mm/dia
7. Taxa de fluxo – 25 gotas/minuto (1,15

ml/min)

8. Massas iniciais D 1 = 435,35 g; D 2 = 435,46g
9. Granulação das amostras britadas - 2 a 6mm

#### ENSAIOS COM O INTEMPERIZADOR

Afim de verificar experimentalmente o desempenho do intemperizador foram realizadas experiências utilizando-se amostras de diabásios coletadas na Pedreira Chapadão situada no Km 97,5 da Via Anhanguera, próximo à cidade de Campinas, SP.

Trata-se de um sill de diabásio, com exposição vertical de 20 m em cujo corpo de granulação fina encontram-se lentes de texturas mais grosseiras irregularmente distribuídas.

Foram escolhidos dois lotes de amostras: um deles é de diabásio de granulação fina, que será aqui denominado de D 1 enquanto que o outro de granulação grosseira será chamado de D 2.

O diabásio D 1 possui coloração cinza escura a negra, melanocrática, fanerítica, equigranular, granulação fina (0,1 a 1 mm), maciça coerente e aparentemente sem orientação. O diabásio grosseiro D-2, tem as mesmas características macroscópicas que o diabásio D 1, sendo entretanto, inequigranular com granulação média (1 a 10 mm), apresentando prismas de piroxênio e ripas de plagioclásio atingindo até 15 mm de comprimento.

#### DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA DAS AMOSTRAS

##### DIABÁSIO FINO D 1

Composição mineralógica: plagioclásio, au-

gita, pigeonita, olivina, quartzo, hornblenda, magnetita, ilmenita, mineral secundário argiloso, apatita e intercrescimento gráfico entre quartzo e feldspato alcalino.

Os plagioclásios possuem comprimento médio das ripas de 0,7 - 1 mm e apresentam geminação albita, albita carlsbad e periclinio. Vários cristais apresentam zoneamento. A composição média é de An 60.

Ocorrem dois tipos de clinopiroxênio: augita que é abundante, apresenta diâmetro médio entre 0,4 - 0,7 mm; a pigeonita, menos frequente, em cristais menores (0,2-0,4 mm) e mais idiomorfos.

Ocorrem ainda: olivina em pequenas quantidades e em geral parcialmente alterada em mineral argiloso verde; apatita, em forma de minúsculas agulhas inclusas nos feldspatos; hornblenda, como produto de alteração dos piroxênios; e, intersticialmente, quartzo e os intercrescimentos gráficos.

O mineral argiloso verde ocorre como produto de alteração de olivina e de piroxênio e existe também intersticialmente.

#### DIABÁSIO GROSSEIRO D 2

Composição mineralógica: plagioclásio, augita, pigeonita, quartzo, feldspato potássico, olivina, hornblenda, magnetita, ilmenita, apatita e mineral argiloso secundário.

Os plagioclásios ocorrem em dimensões variadas, desde fino intersticial (0,3 - 0,6 mm) até ripas de 3 mm (15 mm), com frequência maior de valores entre 1,5 - 2 mm. A composição mais comum é de An50-60. Alguns cristais apresentam zoneamento, e num caso foi possível determinar An60 no centro e An20 na borda.

Como acontece com D 1 aqui também

ocorrem dois tipos de piroxênios: augita e pigeonita, ambos levemente avermelhados (titaníferos). O primeiro tipo predomina sobre o segundo. Às vezes é visível a geminação segundo (100). Os piroxênios ocorrem intersticialmente, e nesse caso apresentam dimensões de 0,3 a 0,6 mm ou cristais maiores de 1 a 1,7 mm.

Intersticialmente existe quartzo isolado ou na forma de intercrescimento gráfico com feldspato potássico. A olivina é rara e o anfibólio (hornblenda possivelmente titanífera) aparece como produto de uralitização dos piroxênios. O mineral verde argiloso aparece nos interstícios ou substituindo olivina e piroxênio.

A tabela II apresenta a análise modal dos dois diabásios, obtida a partir de lâminas petrográficas.

TABELA II  
COMPOSIÇÃO MODAL

	D 1	D 2
	%	%
Plagioclásio	54,0	45,4
Piroxênio	29,8	25,6
Olivina	0,8	1,4
Opacos	7,6	7,8
Quartzo	1,0	4,0
Intercrescimento gráfico	0,4	7,4
Minerais argilosos (nontronita)	5,8	5,6
Apatita	0,2	0,2
Anfibólio	0,4	2,6

#### ANÁLISES QUÍMICAS

Foram efetuadas as análises químicas totais das amostras dos dois diabásios. Os dados obtidos são tabelados abaixo (Tabela III)

TABELA III

	D 1 *	D 2 *
	%	%
SiO <sub>2</sub>	49,62	48,70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,10	13,39
TiO <sub>2</sub>	2,90	3,17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,66	7,74
FeO	8,01	8,67
MnO	0,09	0,10
MgO	4,45	3,75
CaO	9,14	8,51
Na <sub>2</sub> O	2,45	2,75
K <sub>2</sub> O	1,19	1,79
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,80	0,90
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,01	0,01
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,11	0,09
TOTAL	99,53	99,57
P.E.	3,012	2,994

\*Média obtida a partir de oito análises.

## RESULTADOS

### ROCHAS ALTERADAS

Uma vez terminada a experiência os materiais das colunas de percolação foram retirados, e os grãos separados segundo duas posições que ocupavam no interior da coluna, ou seja, zona atmosférica e zona saturada.

Separaram-se ao acaso grãos de cada região, os quais foram destinados às análises petrográfica e química. O pó residual produzido pelo atrito entre os grãos foi submetido a análises mineralógicas por difração de raios X e A.T.D. Entretanto dada a escassez deste material os exames mineralógicos foram bastante limitados e foram utilizados como subsídios às conclusões obtidas quimicamente.

#### Observações Petrográficas

##### a) Diabásio D-1

Zona atmosférica:- observou-se o desenvol-

vimento de uma película amarelo-avermelhada nos contornos preservados dos grãos. Nos casos em que os bordos são constituídos por plagioclásio, essa película é mais fina, maior no caso de piroxênio e maior ainda no caso de opacos como magnetita.

Outro aspecto observado é a pigmentação vermelha nos contatos entre os cristais, sobretudo quando estes têm ligação direta com as bordas dos grãos.

A rocha fresca possui uma alteração incipiente denotada por núcleos de cor amarela ou esverdeada. Na lâmina da rocha alterada observa-se a transformação dessas cores para tonalidades avermelhadas, mesmo na parte mais interna dos grãos.

Zona saturada:- nota-se na periferia dos grãos uma película ferruginosa bem mais espessa que na zona atmosférica.

Os minerais opacos que se acham nos limites externos se encontram quase que totalmente alterados.

Os feldspatos mostram uma impregnação mais intensa de materiais ferruginosos ao longo de três direções: planos de clivagem, de geminação e linhas de inclusões aciculares de apatita.

A alteração, ao longo dos planos de clivagem dos piroxênios da periferia do fragmento é muito nítida, bem como, ao longo dos limites entre os cristais, sobretudo quando estes são de olivina e piroxênio.

Outro fato observado é a abertura de faixas de alteração que partem de minerais opacos internos e emergem nas bordas. Nesse caso essas faixas podem dividir até cristais de plagioclásios, sem que haja coincidência com a clivagem.

## b) Diabásio D-2

Zona atmosférica:- nesta zona alguns grãos apresentam uma fina película de alteração ferruginizada nas bordas. Observa-se também uma impregnação relativamente intensa de material ferruginoso no interior dos grãos, principalmente nos opacos e nos contatos entre indivíduos cristalinos.

Ressalta-se ainda uma impregnação com materiais ferruginosos acentuada na área, principalmente em zonas irregulares derivadas de núcleos de opacos, e ao longo de planos de clivagem de alguns minerais.

Zona saturada:- os fragmentos desta zona apresentam película ferruginosa superficial mais bem desenvolvida que na zona atmosférica, sem penetração interna nos grãos.

Essa alteração é intensa nos opacos, nos contatos entre cristais, nos planos de geminação e clivagem. É de levar-se em conta também a alteração nas zonas contendo argila pré-existente e nas zonas onde processou-se uralitização.

amostras de soluções de lavagem em pequenos intervalos de tempo, o que torna possível acompanhar passo a passo as variações dos conteúdos iônicos das soluções saídas após a percolação.

Coletaram-se diariamente amostras de um litro e, dada a importância da acidez das águas naturais no intemperismo, este foi um dos agentes controlado exaustivamente no decorrer da experiência.

Amostras de dois litros, aciduladas com ácido clorídrico, foram concentradas a 100 ml e destinadas às determinações químicas.

As análises químicas restringiram-se aos principais constituintes:



Os gráficos que seguem mostram os resultados do comportamento individual dos elementos lixiviados, expressos sob forma iônica, em miligrama contidos em cada 2 litros de solução conforme foram efetuadas as análises.

As figuras de número 4 a 9 referem-se ao comportamento individual dos elementos dosados na solução de lixiviação do diabásio fino, enquanto que as de número 10 a 15 correspondem às soluções do diabásio grosseiro.

### ESTUDOS DAS SOLUÇÕES DE LIXIVIAÇÃO

O intemperizador possibilita a coleta de

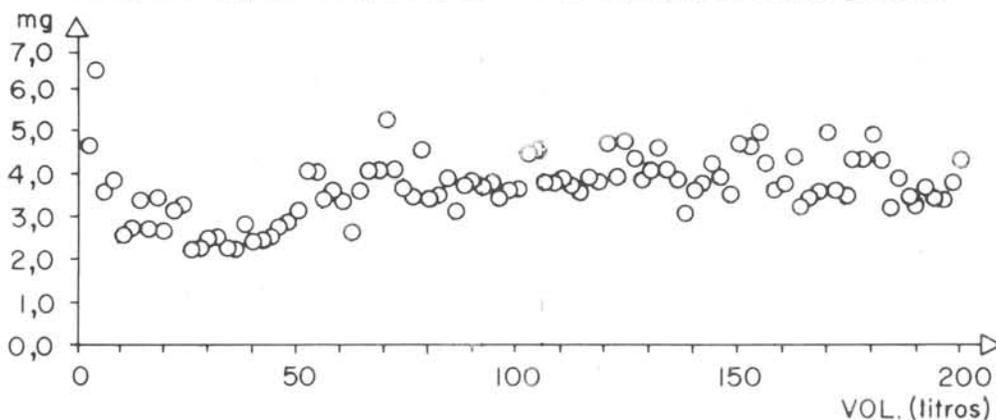


FIGURA 4 — Comportamento do  $\text{Si}^{4+}$  na solução de lavagem do diabásio de granulação fina (D 1)

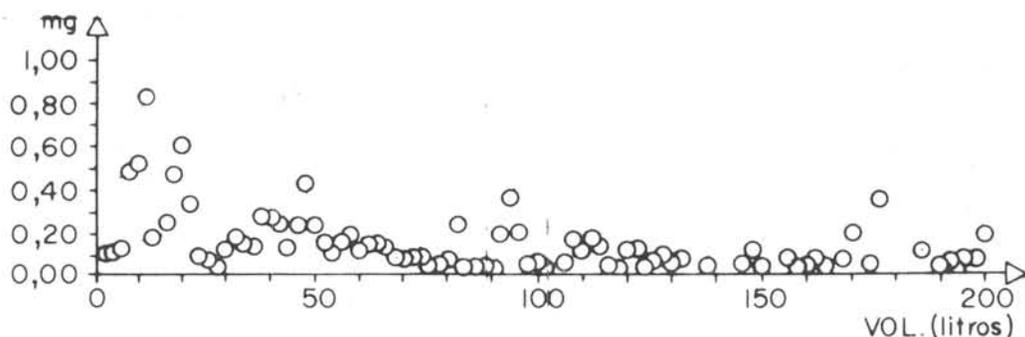


FIGURA 5 – Comportamento do  $Fe^{3+}$  na solução de lavagem do diabásio de granulação fina (D 1)

### pH das Águas de Lixiviação

O pH foi particularmente um dos parâmetros químicos mais controlado no decorrer destes estudos.

Os valores de pH, na entrada da coluna de percolação, não sofreram dispersões significativas, graças ao uso de um termostato, sendo seu valor médio 3,50, com excessão do intervalo entre o 166º e 176º litros, quando houve interrupção da corrente de gás carbônico.

O pH de saída sofreu variações, e as médias aritméticas dessas variações em cada dois litros acham-se representadas nas figuras 17 e 18.

Em todo o processo o pH de saída foi superior ao pH de entrada, podendo-se portanto representar o conteúdo hidrogeniônico consumido pelas diferenças entre o pH de saída e o pH de entrada.

$$\Delta \text{pH} = \text{pH (saída)} - \text{pH (entrada)}$$

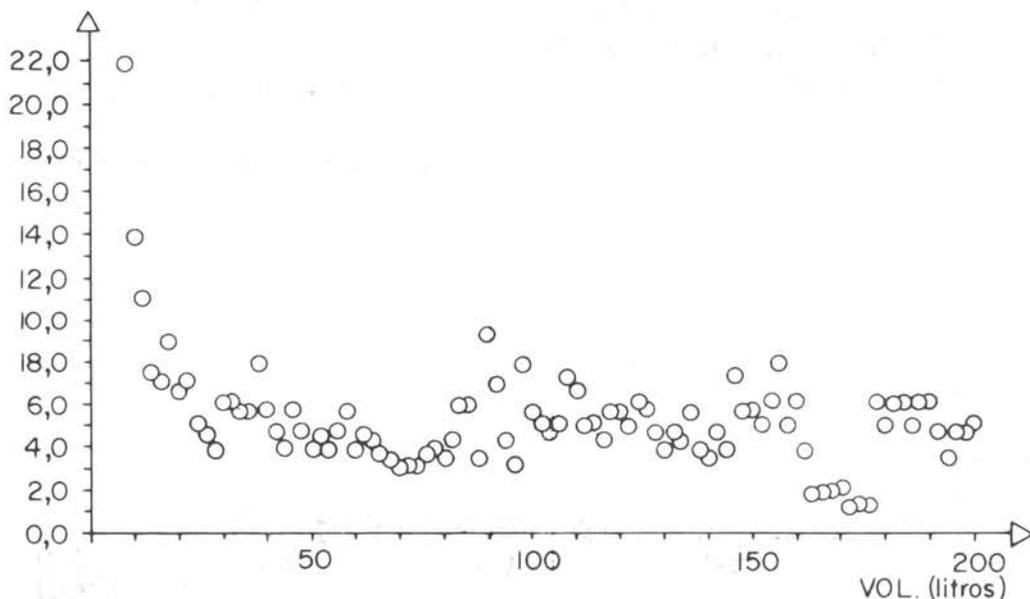


FIGURA 6 – Comportamento do  $Ca^{2+}$  na solução de lavagem do diabásio de granulação fina (D 1)

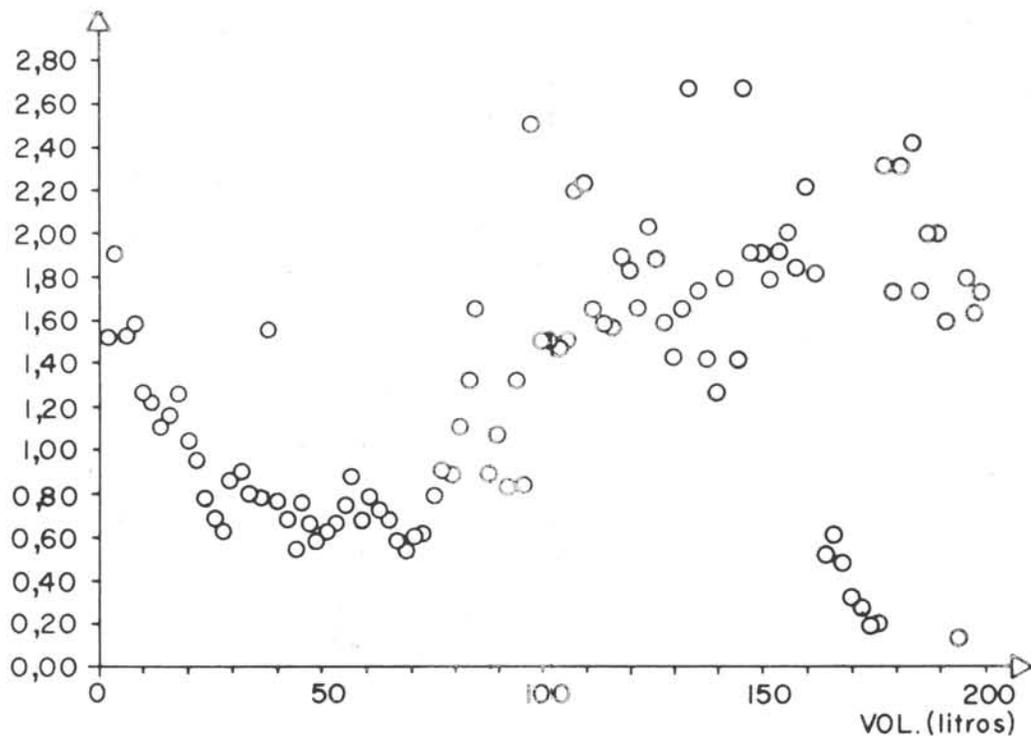


FIGURA 7 – Comportamento do Mg<sup>2+</sup> na solução de lavagem do diabásio de granulação fina (D 1)

Nas figuras 19 e 20 estão projetados os valores médios de  $\Delta$  pH de cada dois litros de solução em função do volume.

## DISCUSSÕES

### ALTERAÇÃO DAS ROCHAS

O exame microscópico das seções delga-

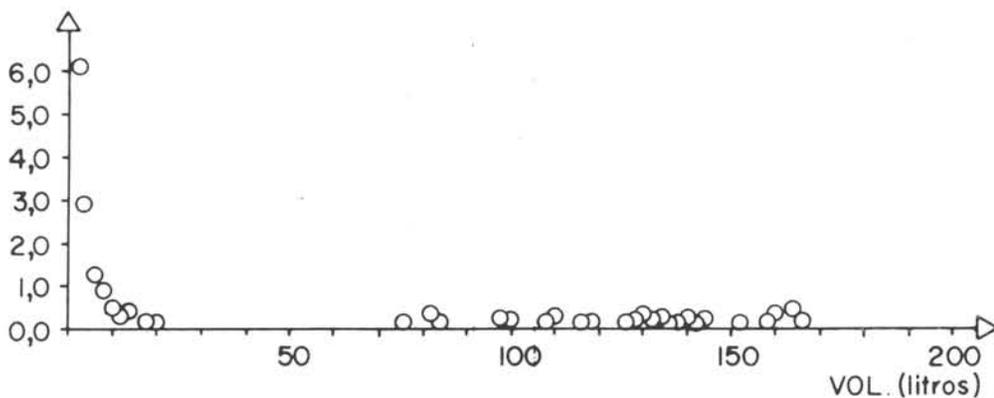


FIGURA 8 – Comportamento do Na<sup>+</sup> na solução de lavagem do diabásio de granulação fina (D 1)

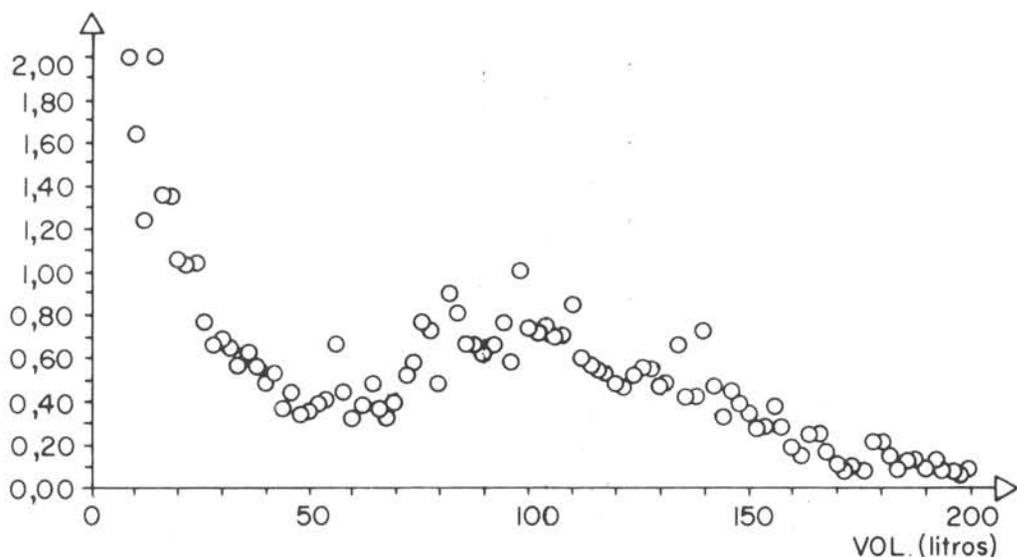


FIGURA 9 – Comportamento do  $K^+$  na solução de lavagem do diabásio de granulação fina (D 1)

das dos grãos dos diabásios D 1 e D 2 coletados nos dois níveis do intemperizador, após o término das experiências, revelou que as alterações mais nítidas foram ditadas pelo comportamento dos minerais que contém ferro.

No diabásio D 1 os fragmentos da zona de aeração e saturada apresentaram precipitação periférica mais intensa que no diabásio D 2, provavelmente devido ao fenômeno de flo-

culação ocorrido na zona saturada do intemperizador.

Quanto às regiões mais internas dos grãos, verificou-se que em ambos os diabásios houve uma alteração mais eficaz nos fragmentos situados na zona saturada.

As causas deste maior ataque no topo, talvez sejam motivadas pelas variações de tem-

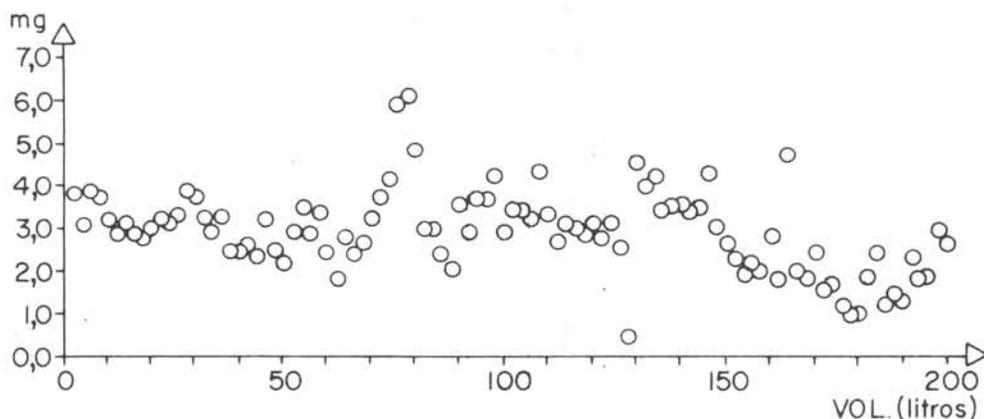


FIGURA 10 – Comportamento do  $Si^{4+}$  na solução de lavagem do diabásio de granulação grosseira (D 2)

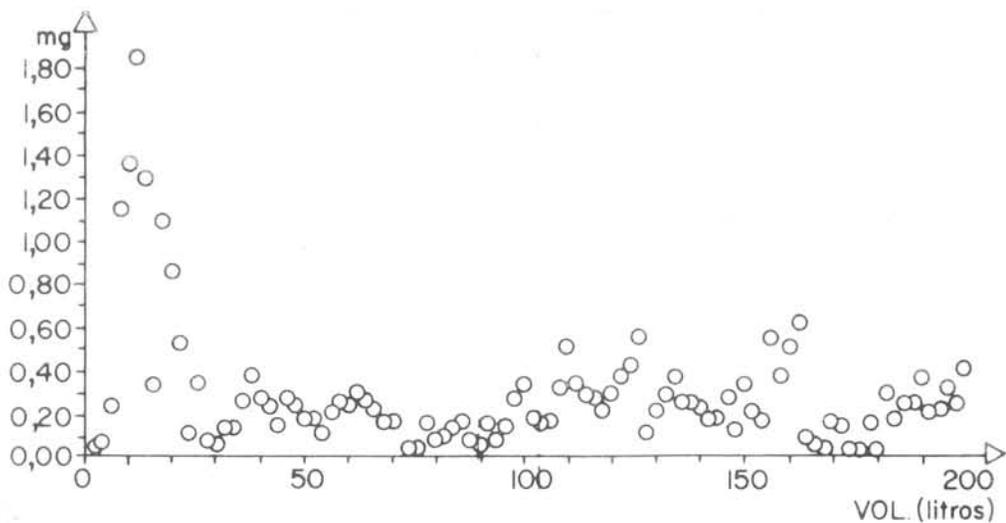


FIGURA 11 – Comportamento do  $\text{Fe}^{3+}$  na solução de lavagem do diabásio de granulação grosseira (D 2)

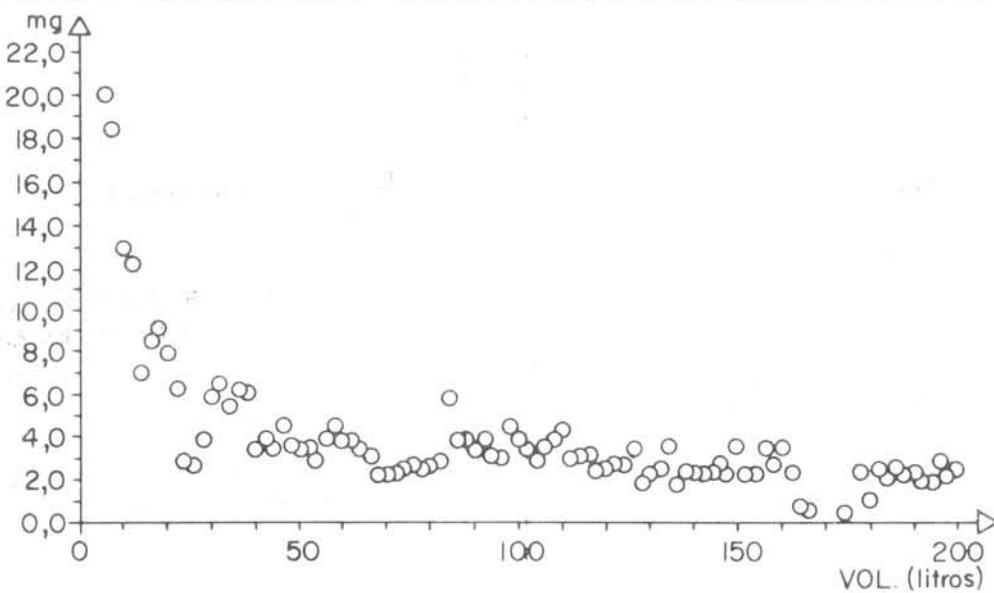


FIGURA 12 – Comportamento do  $\text{Ca}^{2+}$  na solução de lavagem do diabásio de granulação grosseira (D 2)

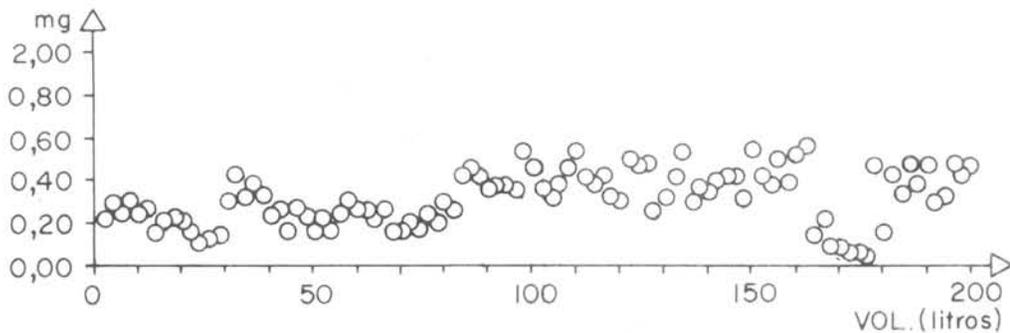


FIGURA 13 – Comportamento do  $\text{Mg}^{2+}$  na solução de lavagem do diabásio de granulação grosseira (D 2)

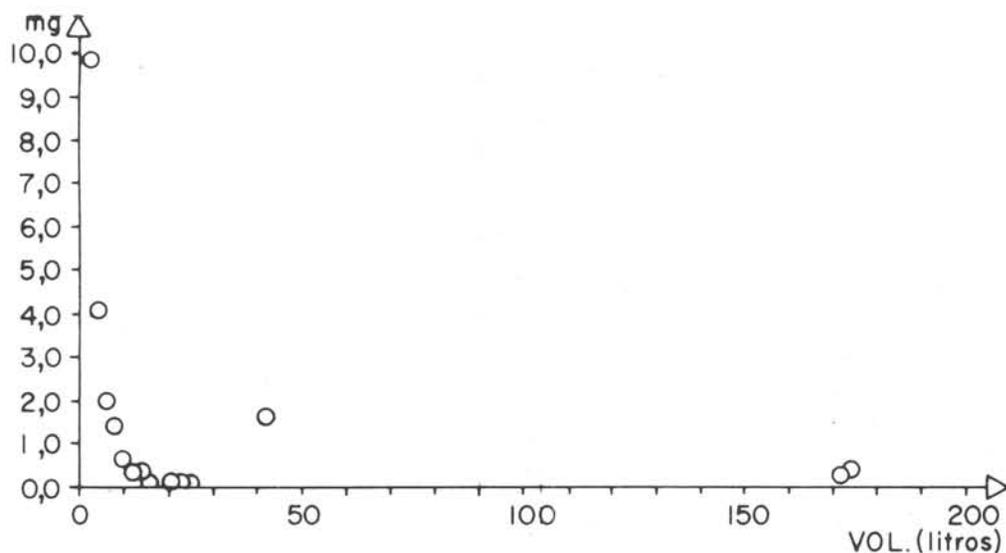


FIGURA 14 — Comportamento do  $\text{Na}^+$  na solução de lavagem do diabásio de granulação grosseira (D 2)

peratura nessa zona que provocaram fissuras mais largas e mais profundas.

A microfissuração tem origem, em geral, nos processos de resfriamento e consolidação das rochas, podendo também resultar da dinamitação da pedra e na britagem das amostras.

Os núcleos dos grãos das zonas secas apresentaram maior alteração que os núcleos

dos grãos da zona saturada e parece trazer subsídio à interpretação da influência da variação de temperatura ocorrida nas condições experimentais.

Concorreram também para a alteração mais interna dos grãos, a hidrólise de minerais ferrosos e ferromagnesianos (que se dá com aumento de volume, propiciando a abertura de fendas ou fissuras que facilitam a penetração

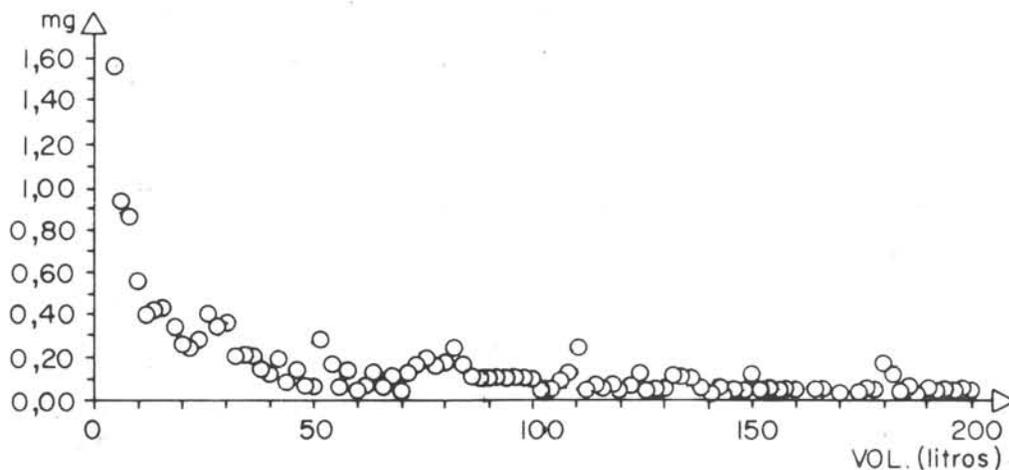


FIGURA 15 — Comportamento do  $\text{K}^+$  na solução de lavagem do diabásio de granulação grosseira (D 2)

Avaliação Geral dos Elementos Removidos  
Curvas Acumulativas

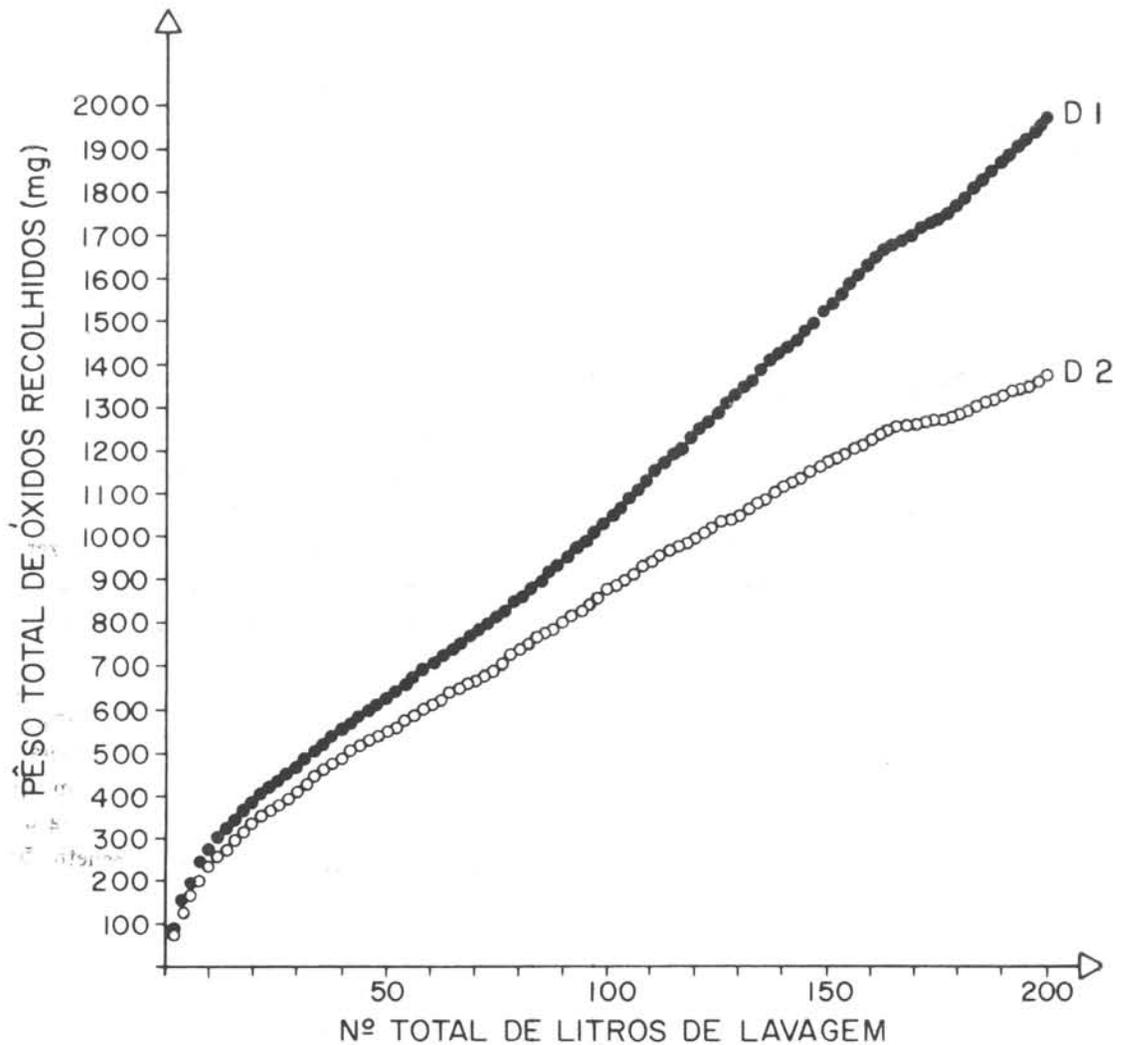


FIGURA 16 – O gráfico acima mostra os resultados do total dos óxidos analisados nas soluções de lixiviação em função do número acumulativo de litros de lavagem dos diabásios de granulação fina (D 1) e de granulação grosseira (D 2)

de fluidos) e a ação da cristalização de sais nos espaços abertos.

Segundo o *U.S. National Bureau of Standards* a desintegração de rochas às custas da cristalização de sais provenientes de soluções é cerca de cem vezes mais eficiente que os fenômenos de dilatação e contração.

Na zona atmosférica seca do intemperizador, ocorreram tanto variações térmicas bruscas como cristalização de sais. As variações térmicas foram motivadas por duas causas: pelo gotejamento de solução fria sobre os fragmentos aquecidos e pelas variações sofridas pela ciclagem de funcionamento do intemperizador.

Na zona saturada não se verificou o gotejamento, e as variações térmicas motivadas pelos períodos diurnos e noturnos foram atenuadas pela presença da solução de percolação.

A presença de íons em solução pode ter um papel importante na dissolução dos constituintes das rochas, na nucleação, no aperfeiçoamento cristalino dos minerais neoformados, e podem também influir nas solubilidades. A influência destes fenômenos com um volume de percolação relativamente baixo, não foi quan-

tificado como era de se esperar. Entretanto, não deixa de ser um fator que merecerá maiores atenções em próximos trabalhos.

#### Comportamento Geral dos Elementos Removidos

Considerando-se as massas de óxidos eliminados em função do volume de lixiviação, os

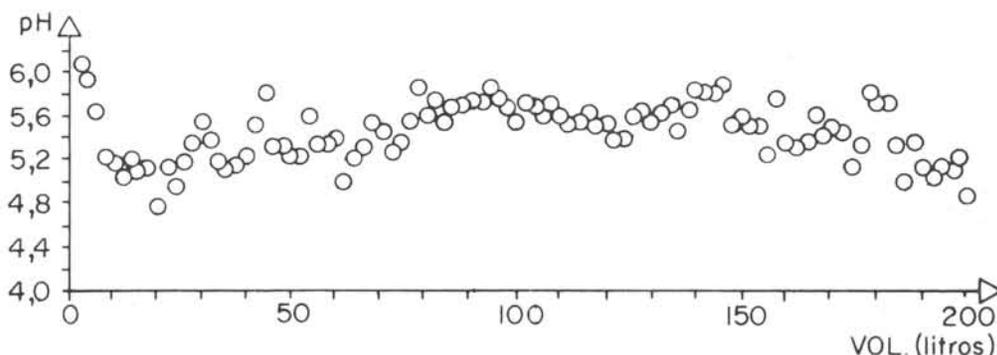


FIGURA 17 — pH de saída das soluções de lixiviação do diabásio de granulação fina (D 1)

dois diabásios apresentaram um comportamento com características paralelas: remoção iônica mais intensa nos dez primeiros litros de lixiviação com correlação linear praticamente perfeita (coeficiente de correlação  $\approx 1$ ) a partir do 20º litro de lavagem.

Os diabásios tiveram também um compor-

tamento comum no que diz respeito às lavagens com soluções não saturadas com gás carbônico, ocasião em que ambos forneceram menores quantidades de íons em solução.

De modo geral verifica-se que o diabásio D 1 forneceu sempre mais íons para a solução que o diabásio D 2. Além disso, a partir do 80º

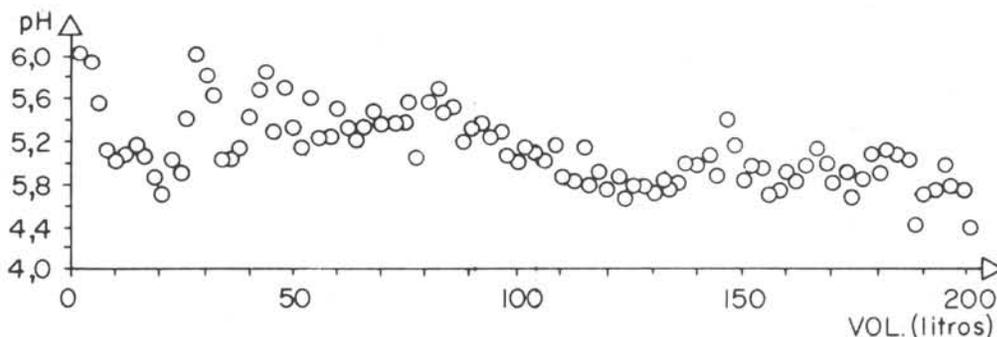


FIGURA 18 — pH de saída das soluções de lixiviação do diabásio de granulação grosseira (D 2)

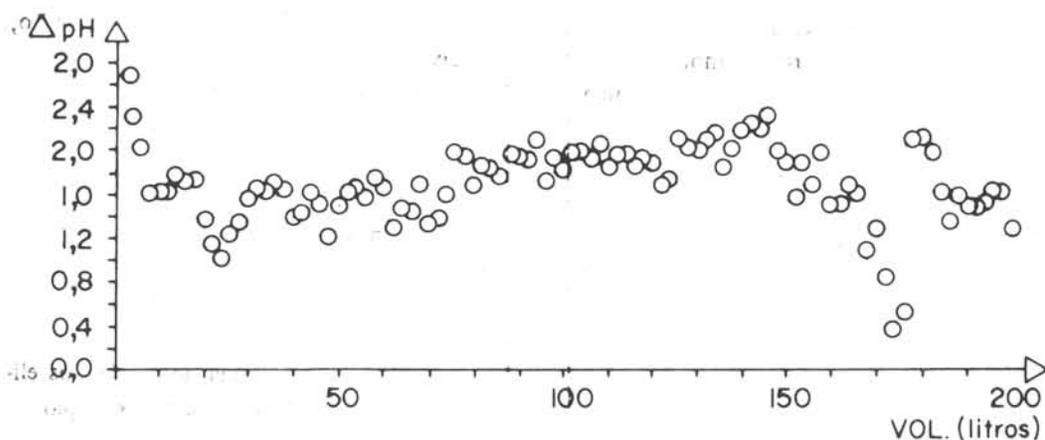


FIGURA 19 – Consumo hidrogeniônico do diabásio de granulação fina (D 1)

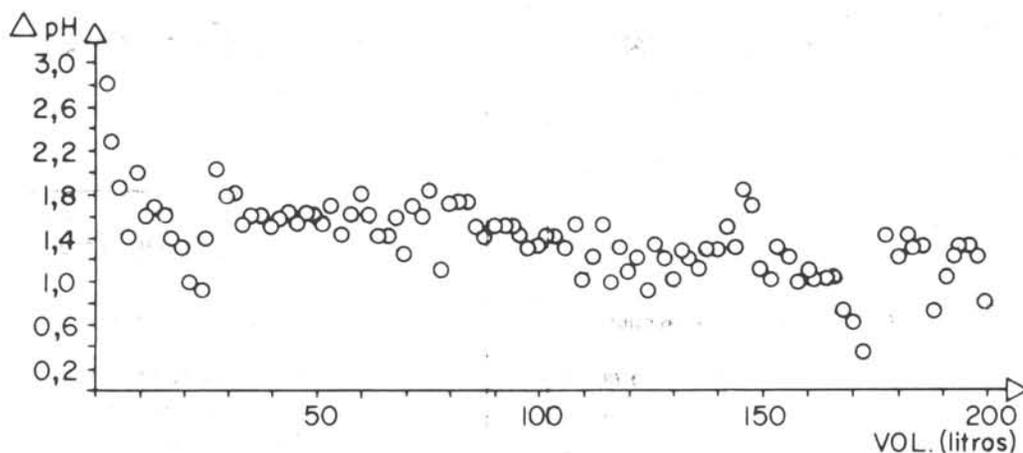


FIGURA 20 – Consumo hidrogeniônico do diabásio de granulação grosseira (D 2)

litro, as soluções D 1 apresentaram um incremento de seu conteúdo iônico, o que é indicado pelo aumento do coeficiente angular da reta a partir desse volume.

Uma análise dos dados da fig. 16 leva a concluir, primeiramente, que o diabásio de granulação fina sofreu alteração mais intensa, determinada pela maior quantidade de elementos eliminados.

Em segundo lugar pode-se averiguar que a presença de solução coloidal (ao redor do 30º litro) no diabásio D 1 influiu de maneira notável na eliminação iônica, visto que se obteve uma

remoção maior depois da floculação. Não houve floculação em D 2.

Ao redor de 80º de percolação deve ter ocorrido em ambos os diabásios uma modificação no equilíbrio químico, não somente no diabásio D 1, onde se verificou a floculação, mas também em D 2. Esta alteração no sistema de D 2 é evidenciada principalmente pela remoção anômala de sílica (fig. 10).

As etapas importantes ocorridas em D 1, de maneira geral, são bem visíveis e correlacionáveis: uma etapa inicial até o 30º litro; outra, na presença de solução coloidal (do 30º ao

80º litro); finalmente uma posterior à floculação, deslocada entre os 166º e 176º litros, quando houve diminuição do teor carbônico na solução.

Os fenômenos ocorridos em D 2 são mais discutíveis e ao mesmo tempo mais complexos. Sua etapa inicial é semelhante à do diabásio D 1, e a partir daí parece, num primeiro exame, ter tido um comportamento constante na presença de solução coloidal. No entanto, nota-se que após o período de ausência de CO<sub>2</sub> na solução os resultados não têm a mesma continuidade (fig. 16). Por outro lado, ligeiras mudanças de declividade dos pontos acima do 30º litro poderiam refletir discretos desequilíbrios parciais, que talvez explicassem a diferença de mobilidade ou dispersão na saída dos íons (Hypólito, e Valarelli, 1973).

#### Influência do pH

A concentração hidrogeniônica da solução na entrada da coluna de percolação não sofreu variações significativas devido ao uso contínuo de um termostato. No entanto, os pHs na saída da coluna sofreram dispersões que envolvem, além da contribuição de H<sup>+</sup> da solução carbônica, os íons H<sup>+</sup> fornecidos e consumidos como consequência das reações químicas dos minerais da rocha com a solução.

É dado ao H<sup>+</sup> a responsabilidade do início da alteração das rochas, considerando-se a sua maior ou menor decomposição como uma função de sua concentração. Pelas relações entre os pHs de entrada e de saída, ou seja, pelos valores de  $\Delta$  pH, pode-se afirmar que o processo de alteração dos diabásios se deu com um contínuo consumo de cátions hidrogênio, sendo que para o diabásio D 1 este consumo foi superior.

Nas regiões correspondentes às lixiviações com soluções não saturadas de gás carbônico (166º a 176º litros), os pHs de saída pratica-

mente não sofreram mudanças, enquanto que refletiu intensamente nos valores de  $\Delta$  pH (Fig. 19 e 20), evidenciando que os grãos da zona saturada permaneceram, durante as experiências, em contato com uma solução tampão.

#### CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da alteração dos dois diabásios, realizado com o intemperizador, evidenciou diferenças de comportamento com relação à textura, taxa de precipitação e condições hídras. Permitiu também estudo químico dos íons removidos pelas soluções de lixiviação (Hypólito, e Valarelli, 1973)

Os dados químicos e petrográficos das rochas residuais, associadas ao total dos elementos analisados nas soluções de lixiviação, possibilitaram concluir que o diabásio de granulação fina foi mais alterado que o de granulação grosseira, e que a alteração de ambos foi caracterizada principalmente pela decomposição dos minerais que contém ferro.

Na zona atmosférica seca obtiveram-se resultados semelhantes aos que ocorrem com rochas básicas sujeitas a clima seco como é o caso da formação de crostas e concreções calcárias a partir de basalto que ocorrem nas regiões de Piauí, Ceará.

Na zona saturada os fragmentos estiveram imersos na solução percolante, favorecendo os fenômenos de hidrólise, precipitação, envelhecimento dos materiais precipitados e uma maior tendência ao equilíbrio químico. Nesta zona a alteração dos diabásios foi bem maior que nas outras duas. Como predominaram alterações e precipitações na periferia dos grãos, D 1 apresentou-se bem mais alterado.

Os grãos da zona subsaturada apresentaram características de decomposição interme-

diária, comparadas com as das outras duas regiões.

O comportamento global dos íons liberados (e em muitos casos, também o comportamento individual) analisados nas soluções de lixiviação sofreu grande influência dos fenômenos ocorridos com o ferro em solução. A partir do 30º litro de lixiviação, diminuiu consideravelmente a saída dos íons, graças ao fenômeno de adsorção, que por sua vez, se deve à presença de partículas coloidais na solução. As soluções que percolaram os grãos de D 2 estiveram permanentemente em contato com estas soluções. As soluções coloidais de hidróxido de ferro da coluna de percolação de D 1 flocularam a partir de 80º litro, refletindo intensamente na diferença de comportamento de remoção dos íons.

Somente em função da quantidade de íons eliminados, foi possível avaliar o balanço volumétrico porcentual da alteração, uma vez que a granulação dos fragmentos (2-6mm) dificultou a determinação da quantidade total alterada. A utilização de fragmentos maiores associados a um tempo de percolação maior, permitirão, em outras experiências, um balanço

mais rigoroso.

Este novo aparelho, o intemperizador, abre novos horizontes para o estudo do intemperismo artificial, graças ao domínio dos parâmetros experimentais. Partindo de amostras monominerálicas pode-se estudar melhor os mecanismos da alteração, bem como, permitir-se uma interpretação mais segura das relações entre material original, material alterado e material eliminado.

Algumas modificações podem ser introduzidas no intemperizador, como mudança do sistema de gotejamento, ampliação da zona saturada, variedade da natureza da solução de lavagem, percolação em meio oxidante ou redutor, modificações do regime pluviométrico, e ação de uma única zona hídrica.

#### AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível graças à concessão de auxílio por parte do Conselho Nacional de Pesquisas, e aos Profs. Drs. José Vicente Valarelli e Adolpho José Melfi pelo incentivo e sugestões.

---

#### BIBLIOGRAFIA

FETH, J.H., ROBERSON, C.E., and POLZER, W.L. — 1964 - Sources of mineral constituents in water from granite rocks, Sierra Nevada, California and Nevada. U.S. Geol. Survey Water — Supply Paper 1535 -I, 70.

HYPOLITO, R., LEVI, F., MELFI, A.J. — 1970 - **Alteração experimental de rochas por análises intemperogravimétricas.** Resumos na XXII Reunião Anual da S.B.P.C. Bahia, Brasil, seção D-79.

HYPOLITO, R., VALARELLI, J.V. - 1973 -

**Ordem de Remoção de Elementos Lixiviados em Experiências de Alteração.** Boletim I.G. Instituto de Geociências, USP. 4: 47-51.

PEDRO, G. — 1964 — **Contribution a l'étude expérimentale de l'alteration géochimique des roches cristallines.** Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, 345 pp.

WEBER, W.J., STUMM, W. — 1963 — **Buffer system of natural fresh waters.** Jour.Chem. and Eng. Data, 8: 464-468.