José Eduardo Siqueira Farjallat

ESTUDOS EXPERIMENTAIS SÔBRE A DEGRADAÇÃO DE ROCHAS BASÁLTICAS

Basaltos da Barragem de Capivara, Rio Paranapanema

Tese de Doutorado Apresentada ao Instituto
de Geociências e Astronomia da Universidade de
São Paulo

DEDALUS - Acervo - IGC

30900006028

São Paulo

1971

INDICE

	<u>PÁGINA</u>
INDICE DAS FIGURAS	1
RESUMO	3
I - INTRODUÇÃO	4
II - MÉTODOS DE ESTUDO	7
A. Métodos Analíticos	7
A.1. Microscopia Petrográfica	7
A.2. Análise Térmica Diferencial	7
A.3. Difratometria de Raios X	8
A.4. Análise por Microsonda Eletrônica	9
A.5. Análises Químicas	9
B. Ensaios Físico - Mecânicos	9
B.1. Massa específica aparente. Absorção d'água. Densi- dade	9
B.2. Resistência ao Impacto Treton	10
B.3. Resistência ao Esmagamento	11
B.4. Resistência a Compressão Simples Axial	11
B.5. Módulo de Elasticidade Estático e Coeficiente de Poisson	13
B.6. Resistência a Abrasão Los Angeles	14
B.7. Ensaios de Durabilidade	20
C. Sequência da Pesquisa.....	24
III - GEOLOGIA REGIONAL	26
IV - GEOLOGIA LOCAL	29
1. Generalidades	29
2. Mapa Geológico e Seção Geológica	30
V - CARACTERÍSTICAS DAS ROCHAS	33
1. Aspectos Gerais	33

	Página
2. Comportamento	34
3. Resultado dos Ensaio de Durabilidade	41
4. Absorção d'água e Densidade	49
5. Análise Petrográfica	57
a. Análise Microscópica	57
b. Análise Térmica Diferencial	67
c. Difractometria de Raios X	73
d. Análise por Microsonda Eletrônica	76
e. Análise Química	83
VI - PROPRIEDADES DAS ROCHAS VARIÁVEIS COM A ALTERAÇÃO	85
VII - ALTERAÇÃO POTENCIAL OU ALTERABILIDADE	87
a. O Conceito	87
b. Causas da Desagregação ou Degradação	88
VIII - AVALIAÇÃO DA ALTERABILIDADE POR LIXIVIAGEM CONTÍNUA	97
a. O Método	97
b. Coeficiente de Alterabilidade	104
c. Comparação com a Alteração em Exposição Natural	109
IX - INTERPRETAÇÕES DOS RESULTADOS.....	111
A. Mineralogia de Basaltos Desagregáveis	111
B. Absorção d'água e Densidade	112
C. Alterabilidade das Rochas	113
X - CONCLUSÕES GERAIS :.....	115
XI- AGRADECIMENTOS	117
XII- BIBLIOGRAFIA	118

<u>Índice das Figuras</u>	<u>página</u>
II. - Máquina de Impacto Treton	12
II.1 - Aparelho para ensaio de esmagamento	12
II.2 - Máquina Los Angeles	16
II.3 - Diagrama da sequência da Pesquisa	25
III.1 - Localização da barragem de Capivara	28
IV.1 - Mapa geológico local	31
IV.2 - Seção geológica local	32
V.1 - Basalto tipo C após 20 ciclos	35
V.2 - Basalto tipo C após 20 ciclos	36
V.3 - Basalto tipo B após 10 ciclos	37
V.4 - Testemunho de basalto após 48 horas de imersão	38
V.5 - Frações desagregadas após exposição natural	39
V.6 - Seção pelo eixo do vertedouro	40
V(7-12) - Porcentagens desagregadas e curvas granulométricas	43-48
V(13-16) - Absorção d'água e densidade	50-53
V(17-18) - Correlação entre densidade e absorção d'água	54-55
V.19 - Aspectos macroscópicos das rochas A, B e C.	61
V.20 - Seção polida rochas C desagregáveis e satisfatórias	62
V.21 - Fotomicrografia rocha A	63
V.22 - Fotomicrografia rocha B	64
V.23 - Fotomicrografia rocha C	65
V.24 - Fotomicrografia rocha C	66
V(25-27) - Termogramas da montronita	68-70
V(28-29) - Termogramas comparativos	71-72
V.30 - Difractogramas	74
V(31-40) - Fotografias da microanálise eletrônica	77-81
VIII. 1 - Extrator soxhlet - sifão normal	98
VIII.2a - Extrator soxhlet - sifão alto	100
VIII.2b - Amostra de rocha tipo C ensaiada em extrator de sifão alto	101
VIII.3 - Extrator soxhlet de grandes dimensões	102

VIII(4-7) - Gráficos de alterabilidade

105-108

VIII.8 - Fotografia de rocha tipo C após 4 meses de exposição natural.

109

RESUMO

Estudam-se neste trabalho basaltos do local da barragem de Capivara, tanto do ponto de vista de suas características físicas e petrográficas, como de seu comportamento face a solicitações de ensaios que procuram simular condições de intemperismo. Grande parte das rochas apresentou acentuada diminuição da resistência e de sagregação em fragmentos menores.

Os estudos experimentais permitiram comparar as rochas entre si do ponto de vista de sua alterabilidade ou alteração potencial, e comparar a velocidade de alteração natural com a experimental. O parâmetro do estado de alteração utilizado foi o da resistência a abrasão Los Angeles, escolhido graças a experiências preliminares e considerações teóricas.

I INTRODUÇÃO

Os materiais rochosos e minerais, ocorrentes na superfície da crosta terrestre, estão sujeitos a agentes naturais ou produzidos por atividades humanas, capazes de introduzir modificações mineralógicas e físicas, estas últimas envolvendo desagregação dos constituintes minerais e modificação da resistência mecânica.

O termo degradação, no consenso geológico e geomorfológico, significa erosão mecânica e desgaste da superfície terrestre. Tratando-se de agregados rochosos ou minerais, para utilização como material de construção, degradação significa quebra em pedaços ou partículas mais finas, ou diminuição da resistência mecânica dos fragmentos.

O intemperismo pode consistir em modificações mineralógicas sem produção de fraturas de qualquer espécie, ou consistir essencialmente de fraturamento, causando portanto degradação. No primeiro caso, sendo os minerais neoformados na sua maioria de natureza argilosa, ocorre via de regra uma diminuição da resistência mecânica dos agregados.

A degradação de um agregado natural pode ocorrer durante a estocagem, preparação, transporte e após a construção. Os agregados incluídos em estruturas, sejam concretos, pavimentos, lastros de ferrovia, enrocamentos de barragens, etc., tendo a sua resistência diminuída, tornarão as estruturas menos resistentes às solicitações dinâmicas ou estáticas para as quais foram inicialmente dimensionadas a suportar. Estas solicitações são as mais variadas, incluindo tráfego, carga nas fundações de uma barragem, empuxo da água, tensões cisalhantes, erosão por água, entre outras.

Os estudos sobre intemperismo e suas conseqüentes modifica-

ções mineralógicas já são extremamente volumosos e iniciaram-se há muitos anos. Citamos por exemplo as observações de Fournet na França, em 1833 (in Pêdro, 1969). As observações no campo e mesmo os estudos experimentais em laboratório encontram-se, a nosso ver, bastante avançados. No campo experimental os recentes trabalhos de Pêdro constituem um grande avanço, de longo alcance e múltiplas aplicações. Porém apenas nos últimos anos tem sido dedicada atenção a estudos de desagregação ou degradação, aos critérios e procedimentos de sua avaliação ou previsão, bem como aos efeitos e consequências da degradação de rochas.

A enorme quantidade de material rochoso utilizado anualmente para finalidades de construção demonstra, por si só, a obrigação do Geólogo em dedicar suas melhores atenções em fornecer dados para utilização adequada destes recursos naturais. Nas grandes obras da engenharia civil, os critérios de aceitação de agregados rochosos constituem um problema importantíssimo, sempre encarado com grande seriedade. As características mecânicas das rochas são dados fundamentais que o Engenheiro Civil deve considerar em seus projetos. Estas características estão ligadas ao estado de alteração do material, e são portanto mutáveis. O especialista deve considerar os efeitos da degradação dos materiais rochosos de modo a prever o futuro das estruturas construídas. Poder-se-ia assim aplicar medidas no sentido de reduzir os efeitos ao mínimo.

Os inúmeros tipos petrográficos comportam-se diferentemente face ao intemperismo. Há rochas cujos fragmentos permanecem expostos por séculos com pouquíssima modificação, e há outras, mesmo algumas duras e compactas, que não resistem a uma simples imersão em água durante alguns dias, sofrendo desagregação completa em fi

nas partículas. Existem todos os casos intermediários.

A importância da degradação ou desagregação das rochas é óbvia. Entre outros, pode-se salientar:

a. Aumento da superfície exposta aos agentes de intemperismo, acelerando as transformações mineralógicas, a produção de solos e evolução da paisagem.

b. Modificações físicas dos materiais utilizados em construção, decorrendo implicações econômicas, práticas, estéticas e de segurança.

Procuramos neste trabalho:

1. Apresentar métodos de estudo de rochas, do ponto de vista de suas características e resistência à degradação.

2. Apresentar idéias e conceitos sobre o assunto, coletados ou adaptados de diversas fontes, e também por nós desenvolvidos.

3. Aplicar os métodos e conceitos no problema específico dos basaltos da Barragem de Capivara, analisando os resultados obtidos.

Um esforço sincero foi feito no sentido de reduzir o volume do texto, utilizando-se, sempre que possível, gráficos, tabelas ou ilustrações dos dados obtidos. Preocupamo-nos também em apresentar as conclusões e observações mais seguras, deixando de lado as especulações mais inseguras.

Escolheu-se o enfoque experimental para tratamento do problema da degradação porque:

1- Recursos de laboratório permitem acelerar os processos da degradação.

2- Os parâmetros envolvidos podem ser medidos ou avaliados com maior facilidade que no campo.

3- Existe a necessidade premente de se conhecer o comportamento das rochas quanto a sua possível degradação, antes de sua utilização como material de construção.

II - MÉTODOS DE ESTUDO

A. - Métodos Analíticos

A1. Microscopia Petrográfica

A microscopia petrográfica foi feita segundo o procedimento normal: confecção de lâminas delgadas e exame ao microscópio petrográfico. O ângulo 2V do piroxênio foi avaliado em figura de eixo óptico e também através da platina de Fedorov. O plagioclásio foi determinado pelo ângulo de extinção de geminação albita e principalmente albita-Carlsbad. A análise modal foi feita por meio de um contator de pontos, contando-se cerca de 1000 pontos para cada lâmina, procurando-se aplicar os critérios de Chayes, transcritos por Jung (1959).

A2. Análise Térmica Diferencial

As análises térmicas diferenciais foram feitas num instrumento "Thermoflex Rigaku Denki, Cat. nº 8001". O aquecimento é mantido perfeitamente constante, sendo automáticos os registros das temperaturas e das temperaturas diferenciais Δt . Utilizamos um forno especial para microamostras, pesando estas em torno de 10mg. A análise em microamostras, além da vantagem do pequeno peso de amostra necessária, permite uma melhor resolução dos picos, que ocorrem em temperaturas ligeiramente mais baixas e mais próximas às reais, comparando-se com macroamostras. Porém apresenta a desvantagem de uma operação muito mais difícil e delicada, caracterizando-se por um desvio da linha de base, devido a diferença de capacidade calorífica entre a amostra e o padrão.

Os princípios da análise térmica diferencial são bem co

nhecidos, e portanto não entraremos em pormenores.

As análises efetuadas seguiram as seguintes condições:

Sistema porta amostras - Pt

Massa das amostras - ± 10 mg

termopares - Cromel-alumel

aquecimento - $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$

sensibilidade Δt (meia escala) - 100 microvolts.

padrão - alumina alfa

A3. Difractometria de Raios X

Os difratogramas apresentados foram obtidos em aparelho - "Geigerflex Rigaku Denki, cat. nº 2001", equipado com goniômetro - biplano, utilizado no caso em posição horizontal, contador proporcional, e registrador contínuo automático. As amostras são colocadas em lâminas de vidro especial, fornecidas pelo fabricante.

Os princípios de difratometria são bem conhecidos, e não serão descritos.

Os difratogramas foram obtidos segundo as condições:

Radiação - $K\alpha$ Cu - Filtro Ni

Potência - 35 KV - 15 m A.

Constante de Tempo (TC) - 1

Contagens por segundo - 1000

Velocidade de Varredura (V) - $1^{\circ}/\text{min}$ - 2θ

Segundo o fabricante, as melhores resoluções são obtidas quando $\frac{V \cdot (TC)}{\gamma} < 10$
sendo γ , a abertura angular do feixe.

No caso presente,

$$\frac{1.1}{0.15} = 66 \therefore \text{boa resolução.}$$

A4. Análise por Microsonda Eletrônica ("Microprobe")

Não vamos descrever os princípios da microsonda, devido a sua complexidade e por fugir ao escopo do trabalho. Uma boa referência sobre o método pode ser encontrada em Long (1967). As análises apresentadas foram realizadas por cortesia da "Japan Electron Optics Laboratory CO", no Japão, em um instrumento "JEOL JXA-5 Micro Probe Analyser".

A5. Análises Químicas

As análises químicas foram efetuadas pela Seção de Análises Inorgânicas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, sob a responsabilidade da Química Sylvia L. Moro. As análises de ferro bivalente foram realizados pelo Químico, Prof. Raphael Hypolito, do Instituto de Geociências e Astronomia.

B. - Ensaios Físico-Mecânicos

Apresentamos a seguir alguns métodos, quase todos normalizados pelo IPT.

B1. Massa específica aparente - Absorção d'água - Porosidade aparente. (Método de Ensaio IPT - M-47)

Os corpos de prova devem ser em número de cinco, no mínimo, e podem ter formas quaisquer. As suas dimensões devem estar compreendidas entre 2" e 3". Esses corpos são colocados em estufa a 100-110°C durante 24 horas, resfriados em ambiente seco e pesados (pêso A). A seguir devem permanecer imersos em água, CNPT, durante 48 horas. Uma vez completado o tempo de imersão devem ser pesados com suas superfícies enxutas por pano absorvente (pêso B). Após isso, os corpos de prova devem ser novamente pesados, agora

submersos em água (pêso C). Os cálculos dos resultados devem ser feitos individualmente para cada corpo de prova, da seguinte maneira:

1) $\gamma_{as} = \frac{A}{B-C}$ (massa específica aparente seca em g/cm³) ou simplesmente densidade.

2) $Ab = \frac{B-A}{A} \times 100$ (absorção de água em %)

3) $Pa = \frac{B-A}{B-C} \times 100$ (porosidade aparente em %)

A massa específica aparente seca vem a ser portanto a relação entre o peso seco do fragmento da rocha e seu volume externo total.

A absorção de água vem a ser a relação entre o peso da água absorvida em 48 horas de imersão em água, CNPT, e o peso seco, expressa em porcentagem.

A porosidade aparente vem a ser a relação entre o volume de vazios acessíveis à água em 48 horas de submersão em água, CNPT, e o volume externo total, expressa em porcentagem. Para efeito deste método de ensaio a massa específica da água é admitida ser igual a 1 g/cm³.

B2. Resistência ao Impacto Treton (Método de Ensaio IPT-M-52)

Consiste em se submeter 20 fragmentos de rocha entre as dimensões 3/4" e 5/8" (ASTM-E11), lavados e secos, em estufa a 100°C por 24 horas, a 10 impactos de um peso de 15,883 kg caindo em queda livre de uma altura de 384 mm, no Aparêlho Treton. Após ensaio, o material deve ser lavado em água corrente na peneira nº 12 (ASTM E11) até que suas superfícies estejam livres de pó. O material é, então, levado a estufa 100-110°C por 24 horas, resfriado e pesado. Para cada rocha a ser ensaiada devem ser feitas três determinações.

A Resistência ao Impacto Treton é a relação porcentual entre as diferenças de peso inicial e final pelo peso inicial:

$$T = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} \times 100$$

Deverá ser considerada a média dos três resultados.

B3. Resistência ao Esmagamento (Método de Ensaio IPT-M-53)

Consiste o método em se submeter um volume determinado de pedra britada de dimensões entre 1/2" e 3/8" (ASTM-E11) e peso conhecido, a uma compressão estática de 40 toneladas. A velocidade de carregamento deve ser da ordem de 4 toneladas/minuto. Esta compressão é feita por intermédio de um cilindro de paredes resistentes de 11,8 cm de diâmetro interno e de um êmbolo que se ajusta ao cilindro com folga mínima-Vide figura II.1. Após ensaio, o material deve ser removido e lavado em água corrente sobre a peneira nº 8 (ASTM - E11), levado à estufa, 100-110°C por 24 horas, resfriado e pesado. Para cada amostra de rocha devem ser efetuados dois ensaios. A resistência ao esmagamento é calculada pela relação da diferença dos pesos inicial e final, pelo peso inicial.

$$E = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} \times 100$$

Deve ser considerada a média das duas determinações.

B4. Resistência a Compressão Simples Axial (Método de Ensaio IPT-M-50)

Este método fixa corpos de prova de forma cúbica com 7 cm de aresta ou corpos de prova de forma cilíndrica onde a relação entre a altura do corpo de prova para o seu diâmetro deve estar compreendida entre 2 a 4 vezes. O método exige, ainda, que os carregamentos sejam efetuados com velocidade aproximada de 5 kg/cm²/s e

Fig. II - Máquina de Impacto Treton

Fig. II.1 - Aparelho para Ensaio de Esmagamento

que os corpos de prova sejam colocados na máquina de compressão - com almofadas de madeira compensada entre êstes e os pratos da prensa, para melhor distribuição das cargas aplicadas. Os ensaios devem, ainda, ser realizados com corpos de prova sêcos em estufa por 24 horas ou saturados d'água, assim considerados os corpos de prova imersos em água CNPT, por 48 horas.

A tensão de ruptura à compressão axial simples deve ser calculada pelo quociente da carga de ruptura pela área média da secção transversal.

$$\sigma = \frac{P_{\text{ruptura}}}{S_m}$$

B5. Módulo de Elasticidade Estático e Coeficiente de Poisson (Método de Ensaio IPT-M-54)

Este método fixa o procedimento para determinação do módulo de elasticidade estático e do coeficiente de Poisson de corpos de prova extraídos de rochas, através das medidas de deformações longitudinais e transversais, em ensaios de compressão simples axial. O processo para a medida dessas deformações tem sido aquêle que se utiliza de extensômetros elétricos de resistência, colocados aos corpos de prova. O módulo de elasticidade estático será a tangente trigonométrica do ângulo que a reta média da curva tensão-deformação forma com o eixo das abcissas, quando em ordenadas são representadas as tensões e em abcissas as deformações específicas longitudinais.

O coeficiente de Poisson é a relação entre as deformações específicas transversais e longitudinais, com o sinal trocado.

$$E_e = \frac{\sigma}{\epsilon l}; \nu = - \frac{\epsilon t}{\epsilon l}$$

B6. Resistência a abrasão Los Angeles

Método de Ensaio ASTM-C 131-55 e ABNT-M-170R

1. - Objetivo

1.1. Este Método fixa o processo para determinação da abrasão "Los Angeles" de agregados.

2. - Definições e Convenções

2.1. Abrasão "Los Angeles" de agregado é o desgaste sofrido - pelo agregado, quando colocado na máquina "Los Angeles" juntamente com uma carga abrasiva submetido a 500 revoluções desta máquina à velocidade de 30 a 33 r.p.m. O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem em pêso do material que após o ensaio passa pela peneira de malhas quadradas de 1,68mm (ASTM - E11).

2.2. Agregado - é, para efeito dêste Método, a pedra britada, o pedrisco e o pedregulho.

3. - Aparelhagem e Material

3.1. A execução dêste Método requer os materiais seguintes:

a) balança com capacidade de pelo menos 10 quilos, sensibilidade de 1 grama e respectivo jôgo de pesos;

b) esferas de ferro fundido com cêrca de 47,6mm de diâmetro , pesando cada uma entre 390 e 445 g, apresentando superfície uniforme e composição química de acôrdo com os limites seguintes:

carbono combinado	(Ccomb)	no min.	2,50%
grafite	(Cgraf)	no m <u>á</u> x.	0,25%
manganês	(Mn)	no m <u>á</u> x.	0,50%
enxôfre	(S)	no m <u>á</u> x.	0,08%
fósforo	(P)	no m <u>á</u> x.	0,25%
silício	(Si)	no m <u>á</u> x.	1,00%

c) estufa capaz de manter a faixa térmica de trabalho entre 105° e 110°C;

d) máquina "Los Angeles", de acôrdo com a foto em anexo; (Fig.II.2)

e) peneiras de malhas quadradas com caixilhos metálicos de 203mm de diâmetro e 50,8mm de altura, de acôrdo com a especificação ASTM: E 11. Devem estas peneiras ter as aberturas nominais seguintes (1):

76,2 - 63,5 - 50,8 - 38,1 - 25,4 - 19,1 - 12,7 - 9,52 - 6,35
4,76 - 2,38 e 1,68mm.

3.2. Para a execução normal do ensaio haverá ainda necessidade dos utensílios seguintes:

a) bandeja de fôlha de cêrca de 70 x 50 x 5 cm;

b) colher retangular ou pá de cabo curto;

c) escôva de fibra.

4. - Preparação da Amostra

4.1. Fixada a graduação a ser adotada no ensaio a amostra para a execução do ensaio deve ser a que, dentro das constantes do item 3.1, mais se aproximar da que vai ser utilizada na obra ou serviço. A solicitação do ensaio poderá determinar, entretanto, a escolha de outras graduações.

4.2. Fixada a graduação a ser adotada no ensaio a amostra deve ser preparada de acôrdo com as indicações que seguem:

a) coloca-se o agregado recebido nas bandejas e seca-se em estufa à temperatura de 105° a 110°C;

b) depois de sêco, peneira-se o agregado e quarteam-se as diferentes porções retidas nas diferentes peneiras para fornecer a

(1) Foram especificadas as peneiras da ASTM: E 11 atendendo ao fato de ser incompleta a relação da EB-22 e levando em consideração a nota do item 3, letra (c) desta mesma Especificação.

Fig. II.2 - Máquina Los Angeles

amostra de graduação escolhida;

c) determinam-se as massas das porções de graduação escolhida, com aproximação de uma grama, e tendo em vista a obtenção das massas especificadas na Tabela I (item 8), obedecendo-se às respectivas tolerâncias. Reunem-se, a seguir, as diversas porções da mesma graduação, mistura-se bem e somam-se as massas parciais correspondentes obtendo-se assim a "massa da amostra seca, antes do ensaio".

5. - Amostra para o Ensaio

5.1. A amostra para ensaio de cada uma das graduações A, B, C, D, E, F, e G deve ter a massa indicada na Tabela I.

6. - Carga Abrasiva

6.1. A carga abrasiva a ser usada para cada graduação deve ser a da Tabela II.

6.2. Deve-se verificar periodicamente se as esferas satisfazem às condições fixadas quanto a massa, dimensões e uniformidade de superfície.

7. - Processo

7.1. A execução dêste Método exige as operações seguintes:

a) Verificada a limpeza interna do tambor colocam-se no mesmo a amostra e respectiva carga abrasiva e fecha-se a seguir.

b) Faz-se girar o tambor com velocidade de 30 a 33 r.p.m. até completar 500 rotações.

TABELA I

Peneiras Abertura em mm								
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76,2	63,5	-	-	-	-	2500+50	-	-
63,5	50,8	-	-	-	-	2500+50	-	-
50,8	38,1	-	-	-	-	5000+100	5000+100	-
38,1	25,4	1250+25	-	-	-	-	5000+100	5000+100
25,4	19,1	1250+25	-	-	-	-	-	5000+100
19,1	12,7	1250+25	2500+50	-	-	-	-	-
12,7	9,52	1250+25	2500+50	-	-	-	-	-
9,52	6,35	-	-	2500+50	-	-	-	-
6,35	4,76	-	-	2500+50	-	-	-	-
4,76	2,38	-	-	-	5000+100	-	-	-
Massas totais em gramas		5000+100	5000+100	5000+100	5000+100	10000+200	10000+200	10000+200

19
TABELA II

Graduação	Número de esferas	Massa de carga em gramas
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15
E	12	5000 ± 25
F	12	5000 ± 25
G	12	5000 ± 25

c) Retira-se todo o material do tambor, separam-se as esferas da carga abrasiva, limpam-se as mesmas com a escôva e faz-se passar a amostra nas peneiras 2,38 e 1,68mm rejeitando-se o material que passa por esta última.

d) Lava-se o material nas próprias peneiras, reúne-se o mesmo a seguir e seca-se em estufa, à temperatura de 105°-110°, durante, no mínimo, 3 horas.

e) Retira-se o material da estufa, deixa-se esfriar e determina-se a sua massa com aproximação de 1 g, obtendo-se a "massa da amostra lavada e seca após o ensaio".

8. - Cálculo dos Resultados

8.1. A abrasão "Los Angeles" do agregado é calculada pela fórmula seguinte:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100$$

sendo

A_n = abrasão "Los Angeles" das graduações n, com aproximação de 1%;

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio;

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

m'_n = massa da amostra lavada e sêca após o ensaio.

9. - Resultado Final

9.1. Este método fornece o resultado final seguinte: Abrasão "Los Angeles" com aproximação de 1%.

NOTA: Quando este Método é aplicado a amostras constituídas de fragmentos escolhidos entre os de forma mais aproximada da cúbica, provenientes do britamento manual a partir de blocos de pedra, os resultados da abrasão são, em geral, mais favoráveis que os obtidos com agregados da mesma rocha, provenientes de britamento mecânico.

B7. Ensaio de Durabilidade (Ciclagem artificial, água-estufa ou saturação-secagem)

(Método em desenvolvimento pelo IPT, ainda não normalizado).

I. - Amostragem

1. A amostra retirada de poço ou escavação deverá ser constituída de aproximadamente 4 kg. de rocha.

2. A amostra obtida de testemunhos de sondagens deverá totalizar um comprimento aproximado de 1 m. Não deverão ser escolhidos testemunhos em que o fraturamento da rocha acuse peças menores que 4 cm de comprimento. Neste caso em que se usam amostras das caixas de testemunhos, deverão ser colocados, nas caixas, sarrafos (escritos com tinta indelével - "amostra retirada para ensaios de ciclagem") de comprimentos iguais aos das amostras retiradas.

3. Para cada amostra deverão ser anotados:

- a) local de onde foi coletada a amostra;
- b) profundidade de onde foi coletada a amostra;
- c) número da amostra;
- d) número do ensaio a ser executado;
- e) tipo do ensaio;
- f) nome da rocha;

II. - Preparação das Amostras

1. Britar a rocha com martelo até reduzi-la a fragmentos com dimensões entre 1 1/2" e 1".

2. Rejeitar os fragmentos com fraturas ou lascas

3. Lavar os fragmentos na peneira 1".

4. Separar os fragmentos em três grupos;

a) ciclagem artificial - 30 fragmentos

b) saturação permanente ou imersão - 15 fragmentos

c) ciclagem natural - 30 fragmentos

5. De cada amostra a ser submetida aos três tipos de ciclagem deverão ser arquivados três fragmentos de aproximadamente 3", que representem a rocha "in natura".

III. - Condições para a Ciclagem Artificial (30 Fragmentos)

1. Secar os fragmentos de rocha em estufa ventilada (100° - 110°C) por 12 horas (60-70°C para basaltos com argilas verdes).

2. Deixar os fragmentos de rocha esfriar naturalmente por 2 horas. Após isso, pesar o material já seco.

3. Imersão em água por 24 horas. Após isso, pesar o material saturado (superfície dos fragmentos enxugados com pano úmido).

4. Depois, iniciar a ciclagem artificial do material, sendo que cada ciclo é constituído pelo seguinte:

- a) secagem em estufa ventilada (110° - 110° C) por 12 horas.
- b) resfriamento do material por 2 horas.
- c) imersão em água por 24 horas.

5. Após 10 ciclos, dever-se-á seguir o seguinte processamento:

a) lavar na peneira 1" e anotar o número de fragmentos retidos nesta peneira.

b) secar em estufa ventilada (100° - 110° C) por 12 horas, o material em separado >1" e < 1".

c) deixar os fragmentos de rocha esfriar naturalmente por 12 horas. Após isso, pesar o material sêco >1" e < 1", em separado. O material <1", deverá ser submetido a um ensaio granulométrico.

d) imersão em água por 24 horas do material >1". Após isso, pesar o material saturado >1" (superfície dos fragmentos enxugados com pano úmido).

e) Juntar os fragmentos >1" e <1" e retornar à ciclagem.

6. Após os 20 ciclos deverá ser seguido o mesmo procedimento indicado para os 10 ciclos, com as seguintes variações:

a) o material todo (fragmentos >1" e <1") juntamente com a amostra "in natura", deverão ser colocados em uma caixa, sendo tudo perfeitamente identificado. Esta caixa deverá ser recolhida ao depósito de testemunhos de rocha da Obra.

b) ao se dar o recolhimento da caixa, atrás mencionada, ao depósito de testemunhos de rocha da Obra, deverão ser entregues - as folhas de ensaios e os resultados dos ensaios granulométricos

executados com fragmentos $< 1''$ (após 10 e 20 ciclos).

IV. - Resultados

1. Os resultados dos ensaios de ciclagem deverão ser resumidos em tabelas que contenham:

- a) nº da amostra e do ensaio
- b) tipo de ciclagem
- c) local de onde foi coletada a amostra
- d) profundidade onde foi coletada a rocha
- e) nome da rocha
- f) datas diversas da execução do ensaio
- g) procedimentos diversos da execução do ensaio
- h) nº de ciclos, dias de imersão, ou dias de exposição ao ar livre.
- i) horários dos diversos procedimentos da execução do ensaio
- j) peso saturado e peso seco dos fragmentos $> 1''$.
- l) nº de fragmentos $> 1''$.
- m) porcentagem retida na peneira $1''$.
- n) peso seco dos fragmentos $< 1''$.
- o) porcentagem que passa na peneira $1''$.
- p) observação com indicação do material que foi submetido a ensaio granulométrico.
- q) nome do encarregado do ensaio.

2. Os resultados dos ensaios granulométricos deverão ser apresentados em:

- a) tabela resumida com os pesos e as porcentagens obtidas em diversas peneiras.
- b) gráfico com a curva granulométrica.

V. - Observações

1. Os pêsos deverão ser determinados com precisão de 0,1 gr.
2. As amostras de rocha "in natura" deverão ficar arquivadas em caixas ou sacos, devidamente numerados, para que se evitem perdas acidentais.
3. As amostras para ensaios de ciclagem artificial serão colocados individualmente em recipientes metálicos, devidamente numerados, e não deverão estar sujeitas a contaminações ou perdas acidentais.
4. As amostras para ensaios de ciclagem por saturação permanente deverão ser colocadas em vidros, devidamente numerados, e não deverão estar sujeitas a contaminações ou perdas acidentais.
5. As amostras que serão colocadas ao ar livre (ciclagem natural), poderão ser colocadas dentro de caixas de madeira providas de tela, devidamente numeradas, e deverão ficar fora do alcance de curiosos para se evitar contaminações ou perdas acidentais.

C. - Sequência da Pesquisa

A execução experimental da pesquisa foi feita na sequência indicada no diagrama tipo PERT, apresentado em forma reduzida na - fig. II. 3, a seguir. Diagramas deste tipo permitem uma visualização e controle imediatos do andamento dos trabalhos.

- 1 - Amostragem
- 2 - Estocagem
- 3 - Revisão bibliográfica
- 4 - Preparação e fracionamento das amostras
- 5 - Preparação e execução das análises
- 6 - Preparação, montagem e execução dos ensaios físico-mecânicos
- 7 - Desenvolvimentos de novos ensaios
- 8 - Interpretação dos resultados
- 9 - Repetição eventual de 5
- 10 - Repetição eventual de 6
- 11 - Repetição eventual de 7
- 12 - Análise final dos dados
- 13 - Documentação e preparo do manuscrito

— Atividade real
 (consome tempo)
 - - - Atividade fictícia
 (não consome tempo)

Fig. II.3 - Diagrama PERT da sequência da pesquisa

III GEOLOGIA REGIONAL

As rochas objeto deste trabalho pertencem a extensa província magmática toleítica do Sul do Brasil. Esta província já foi estudada por muitos autores, sendo já razoavelmente conhecida, tanto do ponto de vista de extensão e volume de rochas.

($1,0 \times 10^6 \text{ km}^2$ e $6,5 \times 10^5 \text{ km}^3$, segundo Leinz et al, 1966) como do ponto de vista petrográfico e geoquímico, e também geocronológico.

A fase vulcânica principal ocorreu há cerca de 120 milhões de anos, extendendo-se os derrames basálticos além do território brasileiro, incluindo o Uruguai, Argentina e Paraguai. Citamos a seguir os trabalhos importantes mais conhecidos, mas que não serão discutidos neste trabalho, dado o seu objetivo específico.

(White, 1908; Woodworth, 1912; Baker, 1923; Englert, 1925; Freyberg, 1927; Du Toit, 1927; Guimarães, 1930 e 1933; Washburne, 1930; Oppenheim, 1934; Gutmans, 1943; Oliveira e Leonardos, 1943; Azambuja, 1944; Harrington, 1945; Almeida, 1946; Maack, 1947; Almeida, 1949; Leinz, 1949; Franco, 1952; Groeber, 1953; Almeida e Barbosa, 1953; Bich of 1956 a e b; Almeida, 1956; Maack, 1957; Almeida, 1958; Sanford e Lange, 1960; Melfi e Girardi, 1962; Ruiz, 1963 a e b; Ruiz e Souza Santos, 1963; Almeida, 1964 a e b, Schneider, 1964; Cordani, 1964; Creer, 1965; Ruegg e Vandoros, 1965; Mezzalana, 1965; Leinz et al, 1966; Amaral et al, 1966; Herz, 1966; Bowen, 1966; Melfi, 1967; Cordani e Vandoros, 1967; Maack, 1968; Leinz et al, 1968, Ruegg, 1969, entre outros).

Do ponto de vista tecnológico ou prático muito menos atenção tem sido dedicada ao estudo de nossos basaltos. Além disso sabemos que grande parte dos dados estão contidos em relatórios

privados de circulação muito restrita. Alguns manuscritos não obstante foram publicados e são do domínio público.

A experiência do autor com os basaltos do sul do Brasil envolve observações "in situ" nos Estados do Rio Grande do Sul, - Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso, (na Serra do Maracajú) e principalmente São Paulo. No Estado de São Paulo tivemos a oportunidade de nos dedicar mais aos basaltos do Sistema Hidroelétrico de Urubupungã (Barragem de Jupiã, Ilha Solteira e Canal de Pereira - Barreto), Barragem de Promissão no Rio Tietê, Xavantes, Água Vermelha no Rio Grande, e Capivara no Rio Paranapanema. A nossa atividade profissional no Instituto de Pesquisas Tecnológicas permitiu o exame de numerosas amostras para finalidades rodoviárias, - ferroviárias, concreto e represamento de água.

Um dos aspectos mais importantes no tocante ao aproveitamento das rochas como material de construção em geral é o da sua durabilidade. Neste sentido os basaltos de Capivara parecem-nos constituir um dos problemas mais interessantes. Grande parte das rochas não resistem a ensaios de durabilidade, desagregando-se com grande facilidade. Algumas amostras de rochas duras, compactas, sãs, não resistem mesmo a uma simples imersão em água durante dois dias, desagregando-se totalmente em fragmentos de granulação areia. Estes fatos levaram-nos a escolher o problema de Capivara para objeto deste manuscrito.

A figura IIII mostra a localização da Barragem de Capivara.

FIGURA - III.1
LOCALIZAÇÃO DA
BARRAGEM DE CAPIVARA

IV GEOLOGIA LOCAL

1. Generalidades

No ano de 1964 a "Usinas Elétricas do Paranapanema" - USELPA, contratou a elaboração dos projetos para as usinas no Baixo Paranapanema, entre as quais se inclui a Usina Capivara, cujos estudos preliminares foram efetuados no ano de 1956. No período de 1965 a 1966, o Comitê Regional do Comitê Coordenador dos Estudos Energéticos da Região Centro-Sul efetuou os estudos de viabilidade da Barragem de Capivara (Relatório da "Canambra Engineering Consultands Limited" - abril 1966 - "Feasibility of Capivara Project", Appendix nº 12) classificando-a como de construção prioritária. Finalmente em 1967 a "Centrais Elétricas de São Paulo S/A. CESP" retomou os estudos para a construção da Usina. Coube ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas, em convênio com a CESP, efetuar os estudos geológicos adequados.

Os estudos geológicos foram efetuados por Nery Oliveira (1970) e as rochas foram estudadas por Farjallat e Nery Oliveira (Congresso da Sociedade Brasileira de Geologia, 1971, inédito), - tanto do seu ponto de vista petrográfico, como tecnológico.

No local da Barragem de Capivara foram individualizados cinco derrames basálticos, perfeitamente reconhecíveis por sua estrutura e pela presença de rochas clásticas intertrapianas. Os derrames II, III e IV, numerados de cima para baixo, foram inteiramente atravessados pelas sondagens rotativas. Apresentam espessuras de 33, 16 e 22 metros, respectivamente. O derrame superior apresenta o seu topo erodido, e o inferior, derrame V, foi apenas parcialmente atravessado pelas sondagens.

Quatro categorias litológicas foram estabelecidas em Capivara, além dos depósitos sedimentares das Várzeas e do leito do rio, e denominadas: rocha A, rocha B, rocha C, e rocha D. As rochas A, B e C são basaltos e a D compreende os sedimentos intertrapianos.

2. Mapa Geológico e Seção Geológica.

Na figura IV.1 está desenhado um mapa geológico local e estão projetadas as linhas gerais da barragem. O vale do rio Parapanema no local da barragem assume forma em U, com ombreiras e encostas abruptas. Os solos provenientes da alteração das rochas basálticas, no topo das ombreiras, possuem uma espessura média de 5 m. Nas encostas estes solos são muito delgados, devido a sua forte declividade. A geologia local foi levantada por meios diretos no campo, com auxílio de sondagens rotativas e a percussão, e métodos geofísicos, principalmente sísmicos.

Na fig. IV.2 está representada uma seção geológica pelo eixo da barragem, individualizando os diversos derrames de basalto. A seção foi dividida em quatro zonas segundo a sua posição e constituição litológica, tendo em vista aplicações práticas que fogem ao escopo deste trabalho.

LEGENDA

ALUVIÃO

SOLO

TÔPO ROCHOSO

BASALTO COMPACTO

BASALTO VESICULAR E/OU AMIGDALOIDAL

BASALTO COMPACTO ESPECIALMENTE
CARACTERIZADO PELA PRESENÇA
DE INÚMEROS MINERAIS VERDES

ROCHAS CLÁSTICAS INTRATRAPIANAS

I - DERRAME I

II - DERRAME II

III - DERRAME III

IV - DERRAME IV

V - DERRAME V

FIGURA IV.2

SECÇÃO GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA
PELO EIXO DA BARRAGEM DE CA-
PIVARA.

OBRAS:
ASSUNTO:

DES. N.º

VER.

ESC.

Fl.

de

V CARACTERÍSTICAS DAS ROCHAS

1. Aspectos Gerais

Os basaltos denominados de rocha A em Capivara, são compactos, de textura afanítica e cor cinza-média esverdeada. Apresentam densidade em torno de 2,86, resistência a abrasão Los Angeles baixa, menor que 20%, resistência a compressão simples axial mínima de 950 kg/cm² e máxima de 1.150 kg/cm², a seco. O módulo de elasticidade estático varia de 684.460 a 728.860 kg/cm².

Os basaltos denominados rocha C também são compactos, - embora lembrem basaltos microamigdaloidais com amígdalas totalmente preenchidas por minerais argilosos esverdeados, ou tendendo a cremes. Apresentam textura fina e cor cinza esverdeada. A granulação deste tipo de rocha é superior a da rocha A, como também é superior o seu conteúdo em vidro intersticial e minerais argilosos. A densidade gira em torno de 2,84. Os valores de abrasão Los Angeles das rochas são, "in natura", estão situados em torno de 20%. A resistência a compressão simples axial é da ordem de 780 kg/cm².

Os basaltos vesiculares ou amigdaloidais, característicos do tipo e, secundariamente, da base dos derrames, são coletivamente designados em Capivara como rochas B. A densidade destas rochas é extremamente variável, dependendo sobretudo da porcentagem de vazios. O valor da abrasão Los Angeles está pouco acima de 20%, para as rochas sãs, "in natura". A resistência a compressão simples axial é baixa, geralmente menor que 600 kg/cm².

As rochas sedimentares intertrapianas são arenosas, siltosas e conglomeráticas, com proporções variáveis de seixos de basaltos vesiculares ou amigdaloidais. São conhecidas como rocha D

em Capivara. Estas rochas apresentam cimentação silicosa ou zeolítica com distribuição muito irregular. As características físicas destas rochas dependem sobremaneira da intensidade desta cimentação. Devido ao seu pequeno volume, as rochas D não foram tão estudadas quanto as outras variedades.

2. Comportamento das Rochas

Definiremos como de comportamento satisfatório, a rocha, que sendo submetida a ensaio de durabilidade, não apresente indicio de modificação essencial em suas características físicas. Por outro lado, comportamento desagregável, ou não satisfatório, implica em modificação considerável em suas características ou resistência física, podendo ser percebida por ensaios mecânicos, desagregação ou pressão dos dedos.

Quando submetidos aos ensaios de ciclagem, os basaltos tipo A apresentam um comportamento plenamente satisfatório, permanecendo inalterados ou produzindo uma fração desprezível de material desagregado.

Os basaltos tipo C apresentam um comportamento extremamente variável, a maioria das vezes desagregando-se face às solicitações das ciclagens. As fotografias das figuras abaixo ilustram aspectos desta desagregação.

Fig.VI Amostra de basalto tipo C após 20 ciclos de saturação-secagem. Observar a fração desagregada. Am.88 SR 44 - 15,20 a 16,20 m.

Fig.V.2 Amostra de basalto tipo C, após 10 ciclos de sa
turação-secagem. Am.83 Sr 42 - 32,60 a 33,60 m.

Fig.V. 3 Amostra de basalto vesicular tipo B, após 10 ciclos de saturação-secagem. Am.89 Sr 44 26,00 a 27,00 m.

Algumas amostras de rocha tipo C, sãs, não resistem a uma simples imersão em água pura por 48 horas, desagregando-se totalmente com produção de partículas finas. A fotografia da figura a seguir ilustra um dos ensaios efetuados.

Fig.V.4 Pedaco de testemunho de basalto tipo C, após 48 horas de imersão em água (Am.86 SP 43-19,30 a 20,30m). Notar aspecto esferoidal da amostra desagregada.

A maior parte das amostras deste tipo de rocha submetidas às solicitações intempéricas também sofrem desagregação rápida e intensa. A figura abaixo mostra as frações desagregadas de uma amostra.

Fig.V.5. - Amostra do basalto tipo C, derrame II, após 4 meses de exposição natural. Os fragmentos eram inicialmente de dimensões superiores a 2,5 cm (bandeja superior esquerda). 37% da amostra desagregou-se em fragmentos mais finos.

As observações de campo confirmam este comportamento. Os materiais extraídos dos poços de inspeção abertos transformavam-se em material pulverulento, em questão de semanas, meses no máximo. Em segundo lugar, não são observáveis na área de Capivara afloramentos de rochas tipo C, indicando a sua pouca resistência às intempéries.

Um mesmo derrame apresenta zonas com rocha tipo C desagregável e rocha tipo C satisfatória, e com distribuição muito irregular vertical e horizontalmente. A figura a seguir é um perfil retificado pelo eixo do vertedouro da barragem (referir a figura IV.1.)

OBS : - NÃO ESTÃO MARCADAS ESPESURAS DE SOLO E ROCHA ALTERADA , POIS POIS TÔDAS AS SONDAGENS FORAM PROJETADAS PARA A CONSTRUÇÃO DO PERFIL.

ESCALA : HORIZONTAL 1 2000
VERTICAL 1 1000

LEGENDA

SIGLA	DERRAME	RO ROCHA
A	I	BASALTO COMPA/OMPACTO
B	II III IV V	BASALTO VESICUESICULAR E/OU AMIGDALOIDAL
C	II III IV	BASALTO COMPACTO ESPECIALMENTE CARACTERIZADO ZADO PELA PRESENÇA DE INÚMEROS MIN. MINERAIS VERDES
D	-	ROCHAS CLÁSTICAS INTRATRAPANAS

35 o AMOSTRA CICLADA ARTIFICIALMENTE COM RESULTADO : SATISFATÓRIO

36 o AMOSTRA CICLADA ARTIFICIALMENTE COM RESULTADO : DESAGREGOU

PERFIL GEOLÓGICO AO LONGO DO DO VERTEDOURO, MOÍMOSTRANDO ROCHAS DESAGREGÁVEIS E NAO DESAGREGÁVEIS

mostrando a irregularidade na distribuição das rochas.

As rochas tipo B, basaltos vesiculares e amigdaloidais, apresentam em Capivara um comportamento também variável, satisfatório algumas vezes e não satisfatório outras vezes.

Os sedimentos intertrapianos, rochas tipo D, também apresentam comportamento variável, frequentemente resistindo às solicitações da saturação-secagem, devido ao seu cimento silicoso ou zeolítico.

3. Resultado dos Ensaios de Durabilidade (Ciclagens)

Sistematicamente, as amostras obtidas de poços, escavações, ou sondagens rotativas foram submetidas a ensaios de ciclagem artificial água-estufa, imediatamente após a amostragem. Os ensaios foram executados segundo o procedimento indicado no capítulo sobre métodos.

Cêrca de 110 amostras foram ensaiadas desta maneira, estando os resultados resumidos na tabela a seguir.

Tabela VI. Resultado dos ensaios de ciclagem água-estufa (ciclagem artificial ou saturação-secagem).

Rocha	Derrame	Nº de ensaios	Desagregou Nº de ensaios	Não Desagregou Nº de ensaios
A	I	13	0	13
B	II	14	14	0
	III	5	4	1
	IV	6	0	6
C	II	42	28	14
	III	20	6	14
	IV	5	0	5
D	II	5	2	3
	V	2	0	2

As figuras a seguir fornecem as porcentagens desagregadas de cada amostra e a granulometria das frações desagregadas. - Os números sem indicação nos gráficos são os números das amostras.

OBRA:
ASSUNTO:

DES. N.º
VER.
ESC.
FI.
de

ROCHA TIPO A - DERRAME I

CURVAS GRANULOMÉTRICAS - MATERIAL DESAGREGADO (FRAÇÃO MENOR QUE 1")

HISTOGRAMA - PORCENTAGEM DESAGREGADA DA AMOSTRA

FIGURA V.7

ROCHA TIPO B - DERRAME II

CURVAS GRANULOMÉTRICAS - MATERIAL DESAGREGADO (FRAÇÃO MENOR QUE 1")

HISTOGRAMA - PORCENTAGEM DESAGREGADA DA AMOSTRA

FIGURA V.8

OBRA:
ASSUNTO:

DES. N.º
VER.
FL. de
ESC.

OBRA:

ASSUNTO:

DES.

VER.

DES. N.º

ESC.

Fl.

de

ROCHA TIPO B - DERRAME III

CURVAS GRANULOMÉTRICAS - MATERIAL DESAGREGADO (FRAÇÃO MENOR QUE 1")

HISTOGRAMA - PORCENTAGEM DESAGREGADA DA AMOSTRA

OBRA:	DES.	ECO.
ASSUNTO:	VER.	FL.
	DES. N.º	de

ROCHA TIPO C - DERRAME II

CURVAS GRANULOMÉTRICAS - MATERIAL DESAGREGADO (fração menor que 1")

HISTOGRAMA - PORCENTAGEM DESAGREGADA DA AMOSTRA

FIGURA V.10

ROCHA TIPO C - DERRAME III

CURVAS GRANULOMÉTRICAS - MATERIAL DESAGREGADO (FRAÇÃO MENOR QUE 1")

HISTOGRAMA - PORCENTAGEM DESAGREGADA DA AMOSTRA

FIGURA V-11

OBRA:
ASSUNTO:

DES. N.º
VER.
ESC.
FI.
de

ROCHA TIPO C - DERRAME IV

CURVAS GRANULOMÉTRICAS - MATERIAL DESAGREGADO (FRAÇÃO MENOR QUE 1")

HISTOGRAMA - PORCENTAGEM DESAGREGADA DA AMOSTRA

FIGURA V-12

OBRA:	DES.	ESC.
ASSUNTO:	VER.	FL.
	DES. N°	de

4. Absorção d'água e Densidade

Os valores de absorção d'água e densidade das amostras foram obtidos segundo os procedimentos descritos no capítulo sobre métodos. Os resultados obtidos são bastante variáveis e estão representados nas quatro figuras a seguir. No eixo vertical estão - figuradas as porcentagens e no horizontal o número da amostra.

○ - AMOSTRAS SATISFATÓRIAS
 + - AMOSTRAS DESAGREGÁVEIS

Fig. V.13 - Valores de absorção d'água

C II

o - AMOSTRAS SATISFATÓRIAS

+ - AMOSTRAS DESAGREGÁVEIS

Fig. V.14 - Valôres de absorção d'água

B III

• - não ensaiado

C III

• - AMOSTRAS SATISFATÓRIAS

+ - AMOSTRAS DESAGREGÁVEIS

Fig. V.15 - Valores de absorção d'água

B IV

C IV

o - AMOSTRAS SATISFATÓRIAS

Fig. V.16 - Valores de absorção d'água

Na tabela seguinte estão representados os valores médios de absorção d'água e densidade, separadamente para as amostras desagregáveis e satisfatórias.

A tabela indica que as rochas desagregáveis possuem, em média, valores mais altos de absorção d'água e menor densidade - que as rochas não desagregáveis ou satisfatórias.

TABELA V.2

Tipo de Rocha Derrame	Média Absorção		Média Densidade	
	Satisf. (o)	Desag. (+)	Satisf. (o)	Desag. (+)
A - I	0,51	-	2,86	-
B - II	-	6,58	-	2,46
C - II	0,82	5,20	2,75	2,71
B - III	2,40	8,33	2,76	2,41
C - III	-	2,08	-	2,81
B - IV	3,12	-	2,50	-
C - IV	1,76	-	2,67	-

Os dois gráficos a seguir procuram correlacionar os valores de absorção d'água e densidade para as rochas do tipo C, derrame II, sobre as quais dispomos de maior número de dados.

Fig.V17 Rochas tipo C, derrame II, satisfatórias.

Observa-se pela figura acima, uma certa correlação, nítida, entre as duas variáveis. As rochas de maior densidade possuem menor valor de absorção d'água e vice-versa.

Fig.V.13 Rochas tipo C, derrame II, desagregáveis.

A figura acima mostra uma grande dispersão de pontos, indicando uma correlação muito frouxa. As rochas de maior valor de absorção d'água possuem as densidades mais baixas.

5. Análise Petrográfica

A caracterização petrográfica das rochas de Capivara foi feita por meio de análises microscópicas, incluindo análises modais, análises químicas, análises por difratometria de raios X e térmica diferencial para os minerais de argila, e análise por - microsonda eletrônica ("electron microprobe").

a. Análise Microscópica

Os basaltos tipo A são afaníticos, de textura granular, microcristalina e oligoialina (hipocristalina). Os plagioclásios (labradorita An 60) são ripiformes, euédricos e subédricos, normalmente geminados segundo a lei da albita e albita-Carlsbad. Os piroxênios (augita - 2 V ~50°) são subédricos a anédricos, intergranulares. Os cristais são submilimétricos (0,1 a 0,2 mm), - ocorrendo alguns cristais milimétricos de plagioclásio e piroxênio. Minerais de natureza argilosa e cõr verde abacate ocorrem - preenchendo interstícios ou "microvesículas". Ocupam uma mesma si tuação textural que vidro. Observa-se também um material vítreo - isótropo ou parcialmente desvitrificado. O mineral acessório é - magnetita ou titano-magnetita, euédrica e subédrica, e também esquelética. Apatita acicular ocorre associada aos feldspato, vidro e argila.

Os basaltos tipo C são relativamente semelhantes aos basaltos A, tanto em textura e composição mineralógica, porém a granulometria é nítidamente superior, variando de 0,4 a 0,7 mm. A labradorita e a augita apresentam as mesmas características - ópticas. O conteúdo em minerais argilosos mais o vidro é superior ao das rochas A. Em algumas amostras foram observadas zeólitas, -

associadas às argilas, e identificadas como heulandita.

Os basaltos vesiculares ou amigdaloidais, rocha B em Capivara, são hipocristalinos, de granulação fina, inequigranulares, microporfiríticos. Microfenocristais de plagioclásio, piroxênio, e alguma olivina alterada, com cerca de 0,8 mm de diâmetro, ocorrem em uma massa de plagioclásio e piroxênio principalmente, com 0,3 mm de diâmetro. Vidro desvitrificado, magnetitas e óxidos de ferro secundários são observáveis. As amígdalas são preenchidas por zeólitas (heulandita), quartzo e calcita, principalmente.

As tabelas a seguir resumem análises modais feitas para os basaltos A, B e C. As linhas correspondentes aos componentes minerais argilosos e vidro foram propositadamente salientadas, pois devido a atividade e reatividade com a água destes elementos, acreditamos serem importantes e em grande parte responsáveis pelo comportamento tecnológico destas rochas basálticas.

As fotografias das fig.V(19-24), logo em seguida as tabelas, ilustram aspectos macroscópicos e microscópicos das rochas.

C II

C II

C III

C IV

COMPORTAMENTO	SATISFATÓRIO							DESAGREGA							DESAGREGA	SATISFATÓRIO
AMOSTRA MINERAIS	31	37	63	64	85	87	Média	32	62	82	83	86	88	Média	41	43
Augita	42.0	32.0	39.2	29.8	36.4	35.2	35.8	29.4	24.0	30.2	32.4	36.2	30.8	30.5	29.2	28.0
Labradorita	33.1	39.4	38.2	43.6	39.4	35.2	36.5	38.8	36.6	33.6	36.0	38.0	45.2	38.1	32.2	42.4
Argilosos verdes nontronita?	8.3	1.2	2.6	10.6	3.8	12.2	6.6	15.8	10.2	3.4	10.4	10.4	9.5	10.0	26.6	13.4
Vidro	7.0	18.4	10.6	8.6	11.8	9.0	9.1	10.2	19.8	26.8	10.8	11.0	5.0	13.9	8.2	12.4
Magnetita	5.7	9.0	9.4	5.6	7.6	5.4	6.5	5.8	8.6	6.0	8.4	4.2	7.6	6.8	3.8	3.4
Zeólitas Calcedônia +	tr.												1.8			
Limonita e Goetita	5.3	- alguns %			1.8	1.8		tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.		tr.	tr.

Tabela V3- Composição mineralógica modal de Rochas tipo C.

		A I	C II	C II	B II	B III	B III	B IV
COMPORTAMENTO		SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO	DESAGREGA	DESAGREGA	SATISFATÓRIO	DESAGREGA	SATISFATÓRIO
AMOSTRA								
MINERAIS		média	média	média	45	65	40	42
1. Augita		37,2	35,8	30,5	20,8	20,2	21,2	27,0
2. Labradorita		38,7	36,5	38,1	30,2	31,0	39,4	42,4
3. Argilosos verdes (Nontronita ?)		15,2 *	6,6	10,0	34,0	2,6	10,4	0,6
4. Vidro		3,5	9,1	13,9		25	23,6	21,6
5. Magnetita		5,4	6,5	6,8	9,2	7,0	5,2	6,0
6. Zeólitas(+ calcedônia)		-			5,8	14,0		2,4
7. Limonita e Goetita		tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.	tr.

* - mais vidro devitrificado

Granulação - mm

Augita	~0,12	~0,4	~0,4	~0,25	~0,18	~0,2	0,12
Labradorita	~0,18	~0,7	~0,7	~0,5	~0,5	~0,6	0,4

Tabela V-4 - Composição mineralógica modal de rochas tipo A,B e C de Capivara.

FigV.19 Testemunhos de basalto tipo A, B e C.

Notar a diferença textural entre os tipos A e C.

FigV.20.Seção polida de rochas tipo C. As amostras - da direita, cores avermelhadas, são de comportamento satisfatório; as da esquerda, mais esverdeadas, são rochas fàcilmente desagregáveis.

Fig.V.21 Fotomicrografia de lâmina de basalto tipo A, 170 aumentos, nicois semicruzados. Os minerais argilosos intersticiais aparecem com cores acastanhadas. Augita, alto relêvo, castanha. Labradorita, prismas claros, baixo relêvo.

FigV.22.Fotomicrografia de lâmina de basalto tipo B, 60 aumentos, nicois descruzados. Notar minerais argil_losos verdes e óxidos secundários de ferro, pigmentan_ldo a rocha. Labradorita, prismas claros.

Fig.V23.Fotomicrografia de lâmina de basalto tipo C, desagregável, 60 aumentos, nicois descruzados. Amostra 32 - SR 22 - 33,10 a 36,00 m. Notar minerais argilosos verdes, localmente zonados. Augita, alto relêvo, côres castanhas. Labradorita, prismas claros, baixo relêvo.

Fig.V.24 Fotomicrografia de lâmina de basalto tipo C de comportamento satisfatório. Amostra 63 - SR 23 - 3,60 a 4,60 m. 60 aumentos, nicois descruzados. As - cores acastanhadas são devido a óxidos e hidróxidos de ferro secundários. Augita, alto relêvo, cores acastanhadas. Labradorita, prismas claros, baixo relêvo.

b. Análise Térmica Diferencial

A análise térmica diferencial foi executada em amostra dos minerais argilosos verdes, praticamente puros, coletados sob a lupa, a partir de amostra moída, sã, de rocha C do derrame II. Devido a pequena quantidade de amostra obtida, utilizamos uma câmara especial para microamostras, da ordem de 10 miligramas. Os desvios de linha de base, devido as diferenças em capacidade calorífica entre a amostra e o padrão (alumina alfa), foram corrigidos por um controle especial do aparelho e, principalmente, variando-se a massa da amostra em relação ao padrão.

Os termogramas a seguir correspondem aos melhores que obtivemos. Para efeito de comparação são colocados termogramas de smectitas tipo nontronita, nacionais e estrangeiras.

ROLOGRAFICA

NO. BRAS

Fig. V.27 - Termograma da argila verde de Capivara. Notar picos pouco intensos e desvio da linha de base.

Placas verdes do
basalto de Bariri
A.T.D. nº 1053

Placas verdes do
basalto de Bariri
A.T.D. nº 1053

Fig. V.23 - Termogramas de argila verde (contorno-
nítica de Bariri (Sp) (Souza Santos e Ruiz, 1962)

Fig. V.29a. - Termogramas de nontronita
(in Caillière e Hénin, 1963)

I - Marcognac (Haute Vienne)
II - Madagascar

Fig. V.29b. - Termograma de nontronita de
Arkansas (Grim, 1968 e Scifax DTA Data Index)

c. Difractometria de Raios X

A amostra de argila verde do derrame II rocha C , praticamente pura, foi estudada por difratometria de raios X, conforme condições expostas no capítulo sobre métodos. A amostra foi montada em lâmina de vidro adequada, procurando-se não introduzir orientações preferenciais dos grãos. Foram obtidos os difratogramas logo adiante representados.

Fig.V.30 - Difractogramas da argila verde de Capivara. Notar elevação da linha base.

A tabela abaixo compara as raias de interferência
obtidas com algumas da literatura:

Nontronita Bariri (Souza Santos e Ruiz)	Argila Verde Capivara			Nontronita (Molloy e Kerr, ASTM)			
"in natura" glicolada	"in natura" glicolada	aquecida 550°		glicolada	"in natura"	aquecida a 550°C.	
15,0 7 17,7	15,2 f 16,7 9,5			15,4 100B	13,1 } 13,5 }	100 9,6 40	
	8,90 (?)					5,70 70	
4,93 4				4,51 }			
4,51 10	4,49 ↓ f 4,50 4,50			4,49 } 55	4,51 60	4,49 30B	
4,31 7							
				3,29 50		3,51 30	
				3,18 45	3,49 50	3,16 40B	
2,63 4						2,84 25	
2,56 7	2,63 } 1 2,56 1 2,56 1			2,59 50B		2,57 25B	
2,501 5	2,36 }					2,47 25	
1,508 3	1,50 m 1,50 1 -			1,69 40	1,79 40	1,74 20	

f - forte

m - média

l - larga

d. Análise por Microsonda Eletrônica

Uma amostra de basalto tipo C, derrame II, desagregável, foi examinada por microsonda eletrônica. Três fases minerais foram examinadas: a magnetita, a borda verde mais clara de uma zona argilosa verde, e a parte central desta zona. Estão incluídos a seguir apenas as imagens de elétrons "backscattered" e as imagens de raios X para alguns elementos.

A interpretação das fotografias, associada à leitura de espectrogramas não incluídos neste texto, permitem resumir a composição química de cada fase, conforme tabela abaixo:

Elemento	Magnetita	Borda da Fase Argilosa	Centro da Fase Argilosa
K	X	XXX	X
Na	XX	XXX	XX
Mg	X	XX	XXX
Fe	XXX	X	XX
Ti	XXX	-	-
Ca	X	XX	XXX
Al	XX	XXX	XX
Si	XX	XXX	XX

XXX - muito XX - médio X - pouco

Fig. V.31 Imagem de elétrons "backscattered"
Topografia
 270 aumentos

Fig. V.32 Imagem de elétrons "backscattered"
Composição
 1. Magnetita - 2. Zona de minerais
 argilosos (borda) - 3. Zona de
 minerais argilosos (parte central)
 270 aumentos

Fig. V.33 Imagem de raios X - K - $K\alpha$
270 aumentos

Fig. V.34 Imagem de raios X - Na - $K\alpha$
270 aumentos

Fig. V.35 Imagem de raios X - Mg - K α
270 aumentos

Fig. V.36 Imagem de raios X - Fe - K α
270 aumentos

Fig. V.37 Imagem de raios X - Ti - K α
270 aumentos

Fig. V.38 Imagem de raios X - Ca - K α
270 aumentos

Fig. V.39 Imagem de raios X - Al - K α
270 aumentos

Fig. V.40 Imagem de raios X - Si - K α
270 aumentos

O estudo óptico, a análise térmica diferencial , difratometria de raios X e a análise por microsonda eletrônica permitem inferir:

- a. A magnetita é uma titanomagnetita.
- b. Os minerais argilosos verdes são smectitas expansivas, ricas em ferro, magnésio e cálcio, tratando-se seguramente de uma nontronita, desordenada ou mal cristalizada.
- c. A borda mais clara das zonas argilosas intersticiais são mais ricas em silício, alumínio e álcalis que a zona central, sugerindo associação com zeólitos e sílica.

e. Análise Química

As análises químicas foram efetuadas em amostras quarteadas para as rochas A e C e amostra escolhida para a rocha vesicular B. Procurou-se neste caso selecionar fragmentos com um mínimo de material preenchendo as vesículas.

Transcrevemos abaixo os resultados.

	<u>A</u>	<u>C</u>	<u>B</u>
Perda ao fogo	0,26	0,62	3,68
SiO ₂	50,6	49,4	46,3
Al ₂ O ₃	12,4	14,7	14,7
Fe ₂ O ₃ (ferro total)	15,5	14,9	15,6
FeO	(5,55)	(6,80)	-
TiO ₂	3,10	3,00	2,96
Ca O	8,93	8,35	7,51
Mg O	5,40	5,50	5,93
Na ₂ O	2,32	2,12	1,84
K ₂ O	1,21	1,06	1,12
P ₂ O ₅	0,29	0,32	0,35
	<hr/> 100,01	<hr/> 99,97	<hr/> 99,99

Para melhor caracterização petrológica, foram calculadas as normas para as rochas A e C.

<u>Rocha A</u>		<u>Rocha C</u>	
Ilm	5,93	Ilm	5,78
Ap	0,67	Ap	0,67
Mag	8,58	Mag	11,83
Hem	3,84	Ort	6,67
Ort	7,23	Ab	17,82
Ab	19,91	An	27,24
An	19,74	Wo	5,22
Wo	9,63	Ens	13,80
Ens	13,50	Hy (ferrossilita)	0,66
Qz	10,62	Qz	9,78
H ₂ O	0,26	H ₂ O	0,32
	<hr/> 99,91		<hr/> 99,79

Comparando-se os dados químicos das rochas estudadas, com os histogramas de frequência, de 104 análises apresentadas por Rüegg (1969), observa-se que a rocha A e C situam-se nas classes de maior frequência. A rocha B situa-se nas classes frequentes, porém é um pouco pobre em Si O₂. De uma maneira geral, situam-se tôdas as rochas próximo aos valores médios químicos dos basaltos toleíticos do Bacia do Paraná.

VI PROPRIEDADES DAS ROCHAS VARIÁVEIS COM A ALTERAÇÃO

Numa rocha cristalina, é idéia universal que, de uma maneira geral, todos os tipos de resistência física-mecânica devem diminuir com o progresso da alteração intempérica. É possível, entretanto, ocorrer um aumento de resistência em um estágio de alteração mais avançado que outro. Por exemplo, a alteração de minerais ferromagnesianos pode liberar óxidos e hidróxidos de ferro que cimentem os outros constituintes minerais, aumentando a resistência físico-mecânica da rocha.

Iliev (1966) estudou algumas propriedades de um monzonito na Bulgária, e a sua variabilidade com a meteorização. As propriedades foram classificadas, de acordo com a ordem de grandeza de variação, em: fortemente variáveis, moderadamente, e fracamente variáveis, conforme tabela abaixo:

Fortemente Variáveis	Moderadamente Variáveis	Fracamente Variáveis
Volume dos poros	Densidade aparente	Peso específico dos grãos
Velocidade ultrassônica	Coefficiente de Poisson	
Módulo de elasticidade		
Módulo de deformação		
Tensão máxima de ruptura		

Procuramos neste trabalho estudar algumas características tecnológicas das rochas de Capivara que variassem com a alteração intempérica. Separamos amostras britadas representativas -

das rochas A, B e C e deixamos expostas a sol e chuva durante 7 meses em São Paulo. Em seguida estudamos a variação da porosidade, - absorção d'água, resistência a esmagamento, resistência a abrasão Los Angeles, e resistência a impacto Treton. Os valores denominados inicial na tabela abaixo correspondem à amostra "in natura" e o final à amostra após os 7 meses de alteração

	Porosidade %		Absorção d'água %		Esmagamento %		Treton %		Los Angeles %	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
ROCHA A	4,5	3,6	1,5	1,2	7	9	10	8	14	15
ROCHA B	14,2	16,4	5,8	6,9	23	24	17	26	20	37
ROCHA C	2,4	5,5	2,5	1,9	ñ	ñ	11	13	20	38
	1		2		3		4		5	

ñ - não ensaiado.

Interpretação:

1. Variou pouco, inclusive fornecendo resultado invertido.
2. Variou pouco, inclusive fornecendo resultado invertido.
3. Variou pouco, quase dentro da precisão do ensaio.
4. Resultado invertido para rocha A, variou bastante para a rocha B, pouco para a rocha C.
5. Variou pouco para a rocha A, muito para a rocha B e C.

VII ALTERAÇÃO POTENCIAL OU ALTERABILIDADE

a. O Conceito

O termo alteração está sendo empregado neste trabalho como sinônimo das modificações físicas, químicas e mineralógicas - decorrentes do intemperismo ou meteorização, diferindo portanto de alterações deutéricas, hidrotermais, etc, comuns nos processos magmáticos.

É um problema difícil comparar quantitativamente os estados de alteração das rochas, ou graus de alteração. O assunto pode ser encarado sob dois pontos de vista:

a. Ponto de vista mecânico.

Um certo volume de uma dada rocha é dito mais alterado que um outro volume da mesma rocha, se os valores das características mecânicas do primeiro são mais baixas (Hamrol, 1962). O primeiro volume da rocha possuiria um grau de alteração maior que o - segundo.

Iliev (1966) introduziu o conceito de coeficiente de alteração K , como sendo.

$$K = \frac{V_o - V_w}{V_o}$$

onde V_o e V_w são as velocidades de ultrassom em uma rocha fresca e em uma rocha alterada.

b. Ponto de vista mineralógico ou geoquímico.

Um certo volume de uma dada rocha é dito mais alterado que um outro volume da mesma rocha se apresentar uma porcentagem

maior de minerais mais alterados e, conseqüentemente, uma porcentagem maior de minerais de alteração. Numêricamente, o grau de alteração mineralógico ou geoquímico de uma rocha pode ser referido - por diversas expressões, utilizando-se dados químicos da rocha. Citamos, por exemplo, a expressão sugerida por Krauskopf (1967):

$$\frac{n^{\circ} \text{ de moles } (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O})}{n^{\circ} \text{ de moles } (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})}$$

O valor da expressão diminui a medida que a alteração aumenta na rocha.

O conceito de alteração potencial de uma rocha ou alterabilidade (do inglês "weatherability" e do francês "altérabilité") pode ser enunciado da seguinte maneira: "Uma rocha é dita mais alterável, ou com maior alterabilidade, que outra rocha, se, tendo sido ambas submetidas aos mesmos agentes de intemperismo durante o mesmo tempo, o grau de alteração é mais avançado na primeira".

Observamos que, tanto os conceitos de grau de alteração mineralógico ou mecânico com o conceito de alterabilidade são relativos, isto é, são referidos por comparação com um outro estado de alteração da mesma rocha.

b. Causas da Desagregação e Degradação

Poucos são os trabalhos sistemáticos feitos sobre desagregação e degradação experimental de rochas, mesmo em escala mundial. Citaremos apenas os trabalhos de nosso conhecimento, mais diretamente relacionados com o assunto: Demolon e Bastisse (1936 e 1946, in Millot, 1964), Pichler (1942), Scott (1955), Erickson (1959), Hamrol (1962), Collet e outros (1962), Day (1962), Bjerrum e outros (1963), Ruiz (1963), Pêdro (1964), Farran e Thenoz (1965),

Brekke (1965), Iliev (1966), Schneider e Pires da Rocha (1968), Pêdro (1969), Aires Barros (1969), Struillou (1969), Aires Barros (1970), Prevosteau (1970), Farjallat (1970), Farjallat (1971, inédito), Melfi e outros (1971, inédito), Farjallat e Nery (1971, inédito). Farran e Thenoz (1965) resumem o mecanismo e os parâmetros da alteração sugerindo que o efeito da alteração E pode ser expresso por uma função, necessariamente empírica, da superfície desenvolvida das descontinuidades acessíveis no seio da rocha, da reatividade entre esta e água, do parâmetro de utilização e, enfim, do tempo.

$E = f$ (superfície desenvolvida das descontinuidades - acessíveis, reatividade água-rocha, parâmetro de utilização, tempo)

Segundo Aires Barros (1969), o grau de alteração de uma rocha (m) é função de:

$$m = f \left(\underbrace{n, s}_i, \underbrace{T, pH, Eh, l, b}_e \right)$$

Sendo:

i- fatores intrínsecos a rocha

n - natureza dos constituintes mineralógicas

s - fraturamento e vazios, ou seja, a superfície exposta ao ataque intempérico.

e- fatores extrínsecos

T - temperatura

pH - potencial hidrogeniônico

Eh - potencial de oxi-redução

l - quantidade de água

b - forças bióticas

O conceito de alterabilidade m_l , ou seja, a aptidão - para a alteração em função do tempo seria definido por:

$$m_l = f(i, e, t)$$

t = tempo

ou seja, a alterabilidade m_l , será em relação a alteração m , a taxa desta em função do tempo, d'onde:

$$m_l = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

As causas e os mecanismos da desagregação ou degradação das rochas são bastante variadas.

Segundo Struillou (1969) as causas da degradação seriam:

- a. Enfraquecimentos e desagregação em consequência de dissoluções sofridas pelos materiais silicáticos - ácidos, em meios complexantes, ácidos, básicos e laterizantes.
- b. Fenômenos ligados a aumento de volume e expansões.
 1. Enfraquecimento e desagregação devido a fixação de água por minerais argilosos e hidróxidos.
 2. Esfoliações
 3. Congelamentos
 4. Cristalização de evaporitos
- c. Fenômenos característicos de agregados utilizados em misturas betuminosas.
 1. "Golpe de chama" (choque térmico) nos secadores industriais.
 2. Segregação ("Sopa") do ligante e do agregado.
 3. Acidificação superficial dos fragmentos
 4. Deposição de hidróxidos fêrricos na superfície dos agregados.

Numerosos autores tais como Pichler (1942), Scott (1955), Day (1962), Ruiz (1963), Collet, Warnick e Hoffmann (1962) Erickson (1959), Schneider e Pires da Rocha (1968), Farjallat (1970) Struillou (1969), West et al (1970), entre outros apontam, como uma das causas principais de desagregação ou degradação de rochas basálticas, o conteúdo em minerais argilosos expansivos.

O mecanismo de desagregação segundo Ruiz (1963) seria o da ruptura da rocha por tração, devido as pressões internas exercidas pelo conteúdo de minerais argilosos expansivos ao entrar em contato com a água.

A repetição sucessiva das pressões exercidas introduziria um efeito de fadiga, enfraquecendo as ligações entre os outros constituintes minerais causando ruptura, ou a abertura de microfissuras já existentes, e consequente desagregação natural ou por solicitações humanas.

Farjallat (1970) sugeriu que a desvitrificação ou recristalização de vidro vulcânico intersticial sob condições intempéricas, pode ocorrer com aumento de volume, produzindo também pressões expansivas, adicionando-se às pressões de expansão dos minerais argilosos, acelerando o processo de desagregação.

Ruiz (1963) mediu as forças de expansão de uma argila rica em nontronita ocorrente na Barragem de Bariri. Utilizou-se Ruiz de células de adensamento próprias para estudo de solos, porém encaminhando o ensaio para leitura de expansão ao invés de adensamento. As pressões de expansão medidas chegaram a 200 kg/cm^2 , entre tanto, por extrapolação de valores obtidos, estas pressões chegam a 450 kg/cm^2 , para pressões de moldagem correspondentes a 2.000 kg/cm^2 .

c. Critérios de Previsão ou Avaliação de Alterabilidade.

Em vista do exposto surge inevitavelmente a questão:-
"como prever ou avaliar a alterabilidade de uma rocha?".

Diversos procedimentos foram propostos para avaliar a durabilidade de agregados face à alteração. Eles se baseiam na maioria em estudar características físicas e mineralógicas dos agregados, e verificar se os valores obtidos dos ensaios caem dentro de especificações fixadas segundo critérios variados. Alguns procedimentos baseiam-se na degradação sofrida pelas amostras, quando submetidas a ensaios destrutivos.

Vamos citar alguns procedimentos ou critérios, porém sem descrevê-los em pormenor. A maioria dos procedimentos não cita especificamente alteração com o tempo ou alterabilidade, mas referem-se apenas à qualidade da rocha no momento da análise.

1. Absorção de água a pressão normal (Pichler, 1942).
Determina-se a porcentagem de água absorvida por amostras representativas. Se as análises petrográficas indicarem o agregado como sendo de alteração pronunciada, e o valor da absorção d'água superior a 0,5%, a rocha é de má qualidade e deve ser rejeitada.

2. Scott (1955), recomenda a execução de análise petrográfica dos agregados basálticos. Teores superiores a 20% de minerais secundários situariam a rocha fora das especificações.

3. Day (1962) - Propõe método de ensaios para prever a tendência à desagregação de agregados basálticos, baseando em valor Deval modificado sobre amostra agitada com água, durante 16 horas, e análise granulométrica dos finos obtidos. Propõe uma classificação da qualidade de basaltos, tendo em vista o conteúdo em minerais de alteração obtido da análise petrográfica: de zero a 15% - boa qualidade.

15 a 25% - transição
mais que 25% - qualidade inferior.

4. Schneider e Pires da Rocha (1969) - Propõem o seguinte procedimento para estudo das rochas basálticas, porém referindo-se a emprêgo em pavimentação asfáltica:

4.1. Reconhecimento geológico da ocorrência (pedreira ou afloramento) e coleta de amostras representativas em quantidade suficiente para a realização dos ensaios recomendados (cêrca de - 20 Kg de cada tipo de rocha a ser estudado).

4.2. Análise petrográfica com determinação rigorosa - das percentagens de minerais secundários.

4.2.a. - se a rocha contiver menos de 5% (em volume) de minerais secundários deletérios, são dispensáveis outros ensaios e a rocha pode ser aceita.

4.2.b. - se a rocha contiver de 5 a 10% de minerais secundários e êsses forem do tipo não expansivo (caulinita, - ilita, etc.), pode a mesma ser utilizada, sem ensaios adicionais.

4.2.c. - se a rocha contiver de 5 a 10% de minerais secundários e êsses forem do tipo expansivo; deve a mesma ser submetida aos ensaios indicados.

4.2.d. - se a rocha contiver mais que 10% de minerais secundários, deverá a mesma ser submetida aos ensaios indicados.

4.3. Análise difratométrica (raios-X), dos minerais - secundários, para determinação precisa de sua natureza.

4.4. Ensaio de absorção de água, realizado com a rocha pulverizada, de finura tal que passe na peneira de 200 malhas, em instrumento de Enslin-Schmidt. Valores de absorção de água,-

para 1.000 minutos de ensaio, superiores a 50% (em relação ao peso seco da amostra) indicam presença de minerais expansivos e tendência acentuada à desagregação.

5. Ensaio de sanidade ("soundness-test"), (ASTM - C-88 61T).

5.a - se as perdas (média ponderada) forem inferiores a 10%, a rocha pode ser aceita, salvo se a análise petrográfica revelar silicificação secundária e houver teor de minerais secundários expansivos em teor superior a 10%.

5.b - se as perdas (média ponderada) forem superiores a 10%, a rocha deve ser rejeitada.

5. Struillou (1969) - propõe procedimentos específicos - para cada tipo de degradação. Vamos resumir alguns:

1. Para degradações devido a dissoluções sofridas pelos materiais silicáticos ácidos em meios complexantes, ácidos, básicos e laterizantes, o autor propõe estudar a diminuição dos módulos de finura das amostras submetidas a ensaios com britadores, - "in natura", após aquecimento a 450°C, e após aquecimento a 700°C.

Sendo:

$$m = \frac{100 (M3-M2)}{M0} \quad \text{onde}$$

M0 - módulo de finura com amostra "in natura"

M3 - módulo de finura após ensaio com o britador da amostra aquecida a 450°C.

M2 - módulo de finura após ensaio com o britador da amostra aquecida a 700°C.

Segundo o autor, a relação m significa o papel mecânico, em porcentagem, das zonas feldspáticas destrutíveis dos agregados.

dos.

Sendo:

$\underline{n}$ - a porosidade dos agregados (em %)

$\underline{d}$ - diâmetro médio equivalente dos agregados (em metros)

$\underline{Fe}$ - teor em ferro não incluído nos retículos cristalinos ferromagnesianos (em %).

Struillou propõe utilizar, para previsão de alterabilidade, em condições de lixiviações supostas perigosas, as relações da tabela abaixo. (se $m < 5$ as rochas são praticamente insensíveis às dissoluções).

Critérios de Previsão	
Meios orgânicos e biológicos	$C1 = (m-5) \cdot n \cdot \frac{1}{d}$
Meios muito básicos $pH > 9$	$C2 = (m-5) \cdot n \cdot \frac{1}{d} \cdot 2^{(pH-9)}$
Meios ácidos $pH < 7$ com feldspatos ácidos ferruginizados	$C3 = (m-5) \cdot n \cdot Fe \cdot \frac{1}{d}$
Meios laterizantes	$C1, C2$ ou $C3$ segundo as condições

Para previsão de degradações ligadas a expansões e aumentos de volume, Struillou (1969) propõe o tratamento de amostras com H_2O_2 a 110 volumes, durante um dia, e análise das porcentagens desagregadas.

6. A Divisão de Minas e Geologia Aplicada do IPT tem utilizado como critério de previsão diversos procedimentos, combinados conforme as condições. Incluem análises petrográficas, ensaios de absorção d'água, ensaios de sanidade, ensaios mecânicos, ensaios de ciclagem água-estufa, saturação em etilenoglicol, entre outros.

7. West e outros (1970) propoem procedimentos incluindo análises petrográficas macroscópicas e microscópicas, ensaio de abrasão Los Angeles sêco e úmido, congelamento e degêlo. Estes ensaios são combinados conforme a natureza petrográfica.

VIII AVALIAÇÃO DA ALTERABILIDADE POR LIXIVIAGEM CONTÍNUA

a. O Método

Para estudo da avaliação da alterabilidade de rochas resolvemos utilizar o processo de lixiviação contínua com aparelhos soxhlet. A alteração experimental de rochas em laboratório, utilizando extratores deste tipo, foi descrita no excelente trabalho do pesquisador francês Georges Pédro (1964). Preocupou-se Pédro com os aspectos mineralógicos e geoquímicos da alteração experimental, isto é, com o comportamento dinâmico dos elementos químicos e neo-formações de minerais.

Neste trabalho ocupamo-nos dos aspectos mecânicos do processo de alteração experimental, porém tendo em mente que estes aspectos estão ligados aos aspectos mineralógicos da alteração.

Um extrator soxhlet consta essencialmente de (fig.VIII.1) balão, tubo extrator, e unidade de condensação. A água evaporada no balão, graças a uma unidade de aquecimento controlável, - condensa-se, precipita-se sobre a amostra e infiltra-se nos fragmentos. Quando a água atinge o nível do sifão, é sifonada de volta para o balão, recomeçando o ciclo da água. No "clima" deste aparelho podemos distinguir duas regiões (fig. VIII.1).

1. Zona Atmosférica.

Amostras nunca submersas, velocidade de percolação da água muito grande.

2. Zona de Flutuação do Nível Freático

Amostras alternadamente imersas e emersas.

Introduzimos, a título experimental em alguns aparelhos, uma terceira zona:

fig. VIII - 1 EXTRATOR SOXHLET - SIFÃO NORMAL

3. Zona de Saturação Permanente (Fig.VIII.2 a e b).

Amostras permanentemente imersas.

O instrumento Soxhlet tenta simular no laboratório as condições de alteração, mas em velocidade muito maior, graças a temperatura mais alta (cêrca de 70°C) e velocidade de percolação de água também muito maior que na natureza. O "clima" no instrumento, como bem demonstrou Pêdro, é semelhante a um clima tropical oceânico, com os exagêros acima citados, e reproduz o ciclo do intemperismo de Polinov (in Pêdro, 1969).

Além de podermos trabalhar com água pura, pode-se introduzir no sistema, CO_2 , H_2S , ácido acético, etc., simulando outros processos de intemperismo da natureza. O gás sulfídrico ajudaria a reproduzir condições de alteração em ambientes com pouco oxigênio ou euxínicos, redutores. O ácido acético ajudaria a reproduzir condições de alteração em zonas frias da Terra, onde a destruição da matéria orgânica é bem mais lenta que em regiões quentes, produzindo assim ácidos carboxílicos ou fenolíticos ativos. A geoquímica e mineralogia destes diversos processos de alteração experimental são diferentes, e consequentemente, a variação do comportamento mecânico das rochas também será diferente.

Para avaliação da alterabilidade (ponto de vista mecânico) propomos o seguinte critério: "acelerar em laboratório os processos naturais de alteração e comparar com os próprios processos naturais". Adotamos o processo de lixiviagem contínua de Pêdro com algumas modificações (tamanho do extrator e introdução de uma zona permanentemente submersa). Resolvemos adotar o ponto de vista mecânico porque:

1. Pequena variação química ou mineralógica pode produzir grande variação no comportamento mecânico, sendo portanto as

fig.VIII-2a

EXTRATOR SOXHLET — SIFÃO ALTO

Fig. VIII.2b - Amostra de basalto tipo C, após 3 meses de alteração no extrator como da figura VIII.2a. A porção inferior da bandeja - corresponde a zona de saturação permanente. Ocorreu grande modificação física na amostra, nas três zonas do extrator.

variações mecânicas mais facilmente detectáveis que as químicas.

2. As variações das características mecânicas são mais importantes no estudo tecnológico de rochas, que as químicas ou mineralógicas.

A nossa preocupação com os aspectos mecânicos da alteração, levou-nos a construir um instrumento Soxhlet de grandes dimensões (fig. VIII.3), de modo a se poder trabalhar com uma -

Fig.VIII.3 - Extrator Soxhlet de grandes dimensões.

quantidade maior de material (mais que 17 kg de amostra britada).

Resolvemos aplicar como parâmetro do estado de alteração das rochas, o valor de abrasão Los Angeles porque:

1. a resistência a abrasão Los Angeles depende da te-

nacidade e abrasividade das rochas, propriedades seguramente muito ligadas à alteração;

2. o valor Los Angeles foi o que mais variou nas experiências iniciais de alteração natural (capítulo sobre propriedades variáveis com a alteração), e também variou de modo mais coerente;

3. o ensaio Los Angeles mede a resistência de um conjunto de fragmentos, portanto de amostras mais representativas;

4. é ensaio relativamente fácil de executar e universalmente conhecido;

5. o valor Los Angeles é muito usado em especificações de agregados rochosos para pavimentação, concreto, etc.

Amostras representativas das rochas A, B e C de Capivara foram quarteadas a partir de centenas de quilos de rocha, britadas e colocadas para experiência de alteração experimental no grande extrator soxhlet. Utilizou-se apenas água pura.

A cada número determinado de ciclos no extrator, 10, 20 e 30 para as rochas B e C, e 30, 60 e 90 para a rocha A, as amostras foram retiradas, quarteadas, executando-se sobre elas ensaios Los Angeles. Uma fração das amostras desagregou-se no extrator, pesando-se e computando-se as suas porcentagens.

Os resultados dos ensaios estão representados nas três figuras a seguir. A quarta figura representa um estudo sobre a heterogeneidade dos maciços rochosos face a sua alterabilidade. A amostra representada é rocha tipo C, derrame II, amostrada também em poço profundo, em cota semelhante, porém a centenas de metros de distância da amostra C da terceira figura. O comportamento face a experiência é semelhante porém as variações mecânicas são de valores bem diferentes, maiores no caso.

Nas quatro figuras a seguir, representa-se nas abcissas o número de ciclos e nas ordenadas, as porcentagens do valor - de Abrasão Los Angeles, as porcentagens desagregadas no extrator e a soma destes dois valores, a cada número de ciclos anteriormente determinado. (Figs. VIII.4 a VIII.7).

b. Coeficiente de alterabilidade

Propomos a seguinte expressão matemática, para exprimir o coeficiente de alterabilidade de uma rocha, dentro de um intervalo Δt , representando este, o intervalo entre dois estágios de alteração natural ou experimental:

$$K (\Delta t) = \frac{(200 - I) - (200 - F)}{(200 - I)} = 1 - \frac{200-F}{200-I}$$

I - valor Los Angeles no tempo inicial do intervalo - Δt , mais porcentagem desagregada até então.

F - valor Los Angeles no tempo final do intervalo, mais porcentagem desagregada até então.

Obs - a. Utilizamos o número 200 porque é o limite para o qual tendem I e F.

b. K pode variar no intervalo fechado de 0 a 1.

Quanto maior o seu valor maior é a alterabilidade da rocha.

Vamos aplicar o coeficiente para os gráficos anteriores: (Figs. VIII.4 a VIII.7)

Rocha A: $\Delta t \rightarrow 0 - 30$ ciclos $\rightarrow K_A(0-30) = 0,02$

$\Delta t \rightarrow 0 - 90$ ciclos $\rightarrow K_A(0-90) = 0,05$

$\Delta t \rightarrow 60 - 90$ ciclos $\rightarrow K_A(60-90) = 0,03$

Rocha B: $\Delta t \rightarrow 0 - 30$ ciclos $\rightarrow K_B(0-30) = 0,07$

Rocha C: 1 - $\Delta t \rightarrow 0 - 30$ ciclos $\rightarrow K_C(0-30) = 0,20$

2 - $\Delta t \rightarrow 0 - 30$ ciclos $\rightarrow K_C(0-30) = 0,38$

BASALTO TIPO A

LEGENDA

VALOR DE ABRASÃO LOS ANGELES

PERDA POR DESAGREGAÇÃO NO EXTRATOR

SOMA DAS PERDAS + VALOR LOS ANGELES

fig. VIII - 4

LEGENDA

VALOR DE ABRASÃO LOS ANGELES

PERDA POR DESAGREGAÇÃO NO EXTRATOR

SOMA DAS PERDAS + VALOR LOS ANGELES

fig. VIII - 5

BASALTO TIPO C

LEGENDA

VALOR DE ABRASÃO LOS ANGELES

PERDA POR DESAGREGAÇÃO NO EXTRATOR

SOMA DAS PERDAS + VALOR LOS ANGELES

fig.VIII-6

LEGENDA

- SOMA DAS PERDAS + VALOR LOS ANGELES
- VALOR DA ABRASÃO LOS ANGELES
- PERDA POR DESAGREGAÇÃO NO EXTRATOR

fig. VIII - 7

c. Comparação com a Alteração em Exposição Natural

Duas amostras representativas da rocha tipo C, (a rocha de maior coeficiente de alterabilidade) da mesma amostragem - que as rochas utilizadas no grande extrator, foram expostas a sol e chuva durante quatro e oito meses em São Paulo, entre dezembro de 1970 a julho de 1971. As amostras foram britadas na graduação B (19,1 - 12,7 mm e 12,7 - 9,52 mm) e colocadas em caixas de madeira para alteração. A foto abaixo mostra a amostra após quatro meses:

Fig.VIII.8- Amostra de rocha tipo C após quatro meses de exposição natural. Notar a fração desagregada.

Após o quarto e o oitavo mês as amostras foram colhidas, pesadas as frações desagregadas, quarteadas e ensaiadas por abrasão Los Angeles com o seguinte resultado:

	4 meses				8 meses		
	Porcentagem Desagregada %	Los Angeles %	Soma %		Porcentagem Desagregada %	Los Angeles %	Soma %
Amostra 1	30,3	39	69,3	↓ uma amostra	57	29	86
Amostra 2	36,8	28	64,8				

Para produzir esta mesma diminuição da resistência mecânica, o extrator soxhlet de grandes dimensões teria gasto apenas cerca de uma semana em funcionamento contínuo. Oito meses correspondem a 34 semanas de exposição. Portanto o extrator soxhlet, para o clima de São Paulo de dezembro de 70 a julho de 71, acelerou a diminuição de resistência mecânica mais que 30 vezes.

O coeficiente de alterabilidade seria:

$$K_C (0-4 \text{ meses}) = 0,23$$

$$K_C (0-8 \text{ meses}) = 0,33$$

Clima de São Paulo de dezembro de 1970 a julho de 1971:

Precipitação - 1156 mm

Temperatura média - 20,3°C

Umidade relativa média - 80,8%

Fonte- DAEE-SP

Características do grande extrator:

Velocidade de percolação da água - 0,8-1 l/h

Tempo gasto em cada ciclo - 5 - 6 horas

Temperatura média - 70°C

IX. - INTERPRETAÇÕES DOS RESULTADOS

A. - Mineralogia de Basaltos Desagregáveis.

1. A partir de dados obtidos pode-se inferir, para os basaltos de Capivara, a existência de uma certa correlação entre os teores de minerais argilosos mais vidro, e sua alterabilidade ou alteração potencial, visto que as rochas de comportamento satisfatório pertencentes a um mesmo tipo de derrame, apresentaram estes teores em valores significativamente menos elevados. Universalmente, estes teores não podem ser aplicados em valores absolutos, pois:

a. A determinação quantitativa precisa é de difícil solução, e valores obtidos são variáveis conforme a técnica empregada.

b. As forças de expansão dos minerais argilosos, supostos principais responsáveis pela desagregação, dependem de particularidades mineralógicas das argilas, tais como: granulação, cristalinidade, capacidade de troca iônica, capacidade de absorção d'água, etc. Deve-se levar em conta que estas propriedades variam grandemente entre os tipos de argilas expansivas e nas ocorrências locais de cada tipo.

c. Podem ocorrer neoformações de minerais argilosos expansivos a partir da meteorização de minerais pré-existent e constituintes amorfos da rocha, conforme já documentado por Ross e Hendricks (1945). Estas neoformações dependem das condições locais de meteorização e da composição mineralógica inicial, conforme informação generalizada da literatura.

d. As forças de expansão dos minerais argilosos produzem efeitos diferentes em rochas com características diferentes. Assim,

por exemplo, em muitas rochas tipo C do derrame II, ocorre uma pequena quantidade de óxidos e hidróxidos de ferro que ajudam a cimentar os constituintes minerais, diminuindo os efeitos da expansão. Além disso, estes óxidos e hidróxidos diminuem a porosidade e permeabilidade da rocha, diminuindo portanto a penetração da água e consequente expansão.

e. Particularidades de textura da rocha devem relacionar-se com a sua resistência à expansão dos minerais argilosos. Em Capivara, observa-se que os basaltos tipo A, perfeitamente satisfatórios, apresentam granulometria menor e aparente maior imbricamento dos minerais que os basaltos tipo C, petrográficamente não muito diferentes. A rocha A apresenta também resistência à compressão muito maior, indicando possivelmente menor microfissuração e/ou imbricamento mais coeso dos grãos minerais.

2. O teor em minerais argilosos expansivos, mais o teor em vidro, das rochas A e C II satisfatórias, é menor que o das rochas C II desagregáveis. As rochas C II satisfatórias apresentam óxidos e hidróxidos de ferro em teores de alguns por cento ou traços, porém nitidamente superiores aos das rochas C II desagregáveis. Para as outras rochas as considerações sobre teores e comportamento aplicam-se também, porém os valores são de ordem de grandeza diferente dos das rochas A e C II.

3. Os minerais argilosos expansivos presentes foram identificados como uma montmorilonita. Este mineral ter-se-ia formado em condições hidrotermais, evidenciadas pela textura das rochas e distribuição constante nas rochas sãs e em profundidade.

B. - Absorção d'água e Densidade

1. Para um mesmo tipo de rocha, as amostras com baixo valor de absorção d'água apresentam em geral comportamento mais satisfatório face a desagregação. Esta condição é necessária porém não é suficiente, pois, rochas de comportamento não satisfatório também podem apresentar baixos valores de absorção. Por outro lado, se este valor para um mesmo tipo de rocha, é comparativamente elevado, deve-se suspeitar da rocha mais facilmente desagregável.

2. Os valores de absorção d'água, pelas razões expostas, devem ser considerados separadamente para cada tipo de rocha e derrame. - Não é possível fixar valores limites separando rochas desagregáveis e não desagregáveis.

3. A densidade (aparente) das rochas relaciona-se de uma certa maneira com a absorção d'água. Para rochas de um mesmo tipo, as de maior valor de absorção d'água apresentam normalmente menor densidade. Não obstante, a correlação é frouxa.

C. - Alterabilidade das Rochas

1. Entre as características físico-mecânicas das rochas, a resistência a abrasão Los Angeles, pelos argumentos anteriormente expostos, foi a característica que mais variou (e de modo mais coerente) com a alteração. A porcentagem desagregada e o valor de abrasão Los Angeles são progressivos com a alteração.

2. A alterabilidade das rochas pode ser avaliada quantitativamente por ensaios de laboratório. O procedimento por lixiviação contínua em extratores Soxhlet apresenta a vantagem de simular razoãvelmente bem as condições de alteração na natureza.

3. As experiências realizadas permitiram comparar as rochas quanto a sua alterabilidade. A rocha A apresenta a menor alterabilili

dade, dentro do intervalo da experiência $-K_A(0-30) = 0,02$; a rocha C é a mais alterável pois seu $K_A(0-30)$, alcançou valores 0,20 e 0,38, respectivamente para duas amostras.

4. Em uma fase da experiência, pode ocorrer um aparente aumento da resistência do material não desagregado após experiência no extrator, dando um menor valor de abrasão Los Angeles. Isto poderia ser explicado tendo-se em vista que o ensaio Los Angeles mede a resistência de um conjunto de fragmentos, no caso extraído de um conjunto maior, onde um certo número de fragmentos desagregou-se parcial ou totalmente. A resistência dos fragmentos remanescentes poderia ser, portanto, maior que a resistência em um estágio de alteração anterior, uma vez que foram eliminados os fragmentos mais alteráveis, que contribuiriam para um maior valor de abrasão Los Angeles. É exatamente devido a isto que foram adicionadas as porcentagens desagregadas, aos respectivos valores Los Angeles, nas Figs. VIII (4-7).

5. Comparando-se mecanicamente a alteração natural e experimental, verifica-se que o extrator de grandes dimensões acelerou o processo de alteração mais que 30 vezes, para o clima de São Paulo de dezembro de 70 a julho de 71.

6. Os derrames estudados são heterogêneos quanto a sua alterabilidade. A desagregação das rochas, sob as mesmas solicitações, produzem porcentagens desagregadas e granulometrias variáveis para cada amostra.

X - CONCLUSÕES GERAIS

1 - O teor em minerais argilosos expansivos é fator importante na degradação de rochas basálticas. O conteúdo em vidro, - textura, cimentação secundária por óxidos de ferro, atuam também de maneira decisiva no comportamento das rochas.

2 - Rochas com características mineralógicas semelhantes podem apresentar comportamento tecnológico diferente, isto é, resistir ou não às solicitações de ensaios simulando condições de in temperismo.

3- Entre as rochas de um mesmo corpo rochoso, as de maior densidade e menor valor de absorção d'água são normalmente as de maior durabilidade.

4 - A alterabilidade das rochas pode ser prevista ou avaliada por ensaios de laboratório. O processo por lixiviação contínua apresenta a vantagem de simular razoavelmente bem as condições naturais de alteração.

5 - A alterabilidade pode ser expressa numericamente por um coeficiente K , obtido pela variação de um parâmetro de resistência medido num conjunto de fragmentos irregulares.

6 - A utilização das rochas de Capivara é problemática, devido à distribuição irregular dos tipos satisfatórios e desagregáveis, podendo causar deformação excessiva em enrocamentos, diminuição do ângulo de atrito e da resistência ao cisalhamento, conforme exposto por Cruz e Nieble (1970) e Nieble e Cruz (1970). O material a ser extraído das escavações do vertedouro da barragem, se puder ser utilizado no enrocamento, propiciará grande economia.

7 - A utilização de materiais desagregáveis em pavimentos é problemática. Os valores Los Angeles aumentam facilmente, situando

do o agregado fora de especificações (máximo valor usualmente tolerado é de 40%, menor em casos especiais). Estes agregados enfraquecidos não resistiriam ao trabalhamento do tráfego, causando a ruptura do pavimento e consequente esburacamento. Em concretos o problema é semelhante, e a consequência esperada é uma diminuição da resistência.

8 - A observação "in situ" do comportamento das rochas durante as escavações, abertura de pedreiras, poços, afloramentos, espessura de solos, drenagem, etc., fornece dados importantes para o estudo físico do comportamento dos maciços rochosos e também do seu aproveitamento tecnológico. O estudo petrográfico auxilia grandemente as investigações e fornece as explicações porventura aplicáveis.

9 - Este trabalho absolutamente encerra os assuntos da degradação ou alterabilidade. Pelo contrário, cremos que apenas ajuda a abrir entre nós, um campo de pesquisa experimental, já há alguns anos em desenvolvimento por pesquisadores nacionais.

XI - AGRADECIMENTOS

Consignamos nossos melhores agradecimentos a "Centrais Elétricas de São Paulo - CESP", pois sob os auspícios de seu espírito esclarecido esta pesquisa foi em grande parte efetuada.

Agradecemos profundamente ainda:

- aos colegas Evaristo Pereira Goulart e João Alberto Nery de Oliveira, pela indispensável colaboração nos aspectos preliminares da pesquisa.

- a Química Sylvia L. Moro do Instituto de Pesquisas Tecnológicas e ao Químico, Professor Raphael Hypolito, do Instituto de Geociências e Astronomia da USP, pelas análises químicas efetuadas.

- ao Prof. Dr. Adolfo J. Melfi, pela orientação.

- aos colegas da Divisão de Minas e Geologia Aplicada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, pelas críticas e sugestões.

- a "Japan Electron Optics CO.", pelas análises por microsonda eletrônica.

- e a todos os outros, que direta ou indiretamente nos auxiliaram.

XII- BIBLIOGRAFIA

- Aires Barros, L. - 1969 - A Análise modal e a definição de um índice de qualidade micropetrográfica. Bol. Soc. Port. Ciên. Nat. Vol. XII pp. 105-116 - Lisboa.
- Almeida, F.F.M.de, - 1946 - Basaltos do Planalto de Maracaju - Tese apresentada ao II Congresso Panamericano de Engenharia de Minas e Geologia, Petrópolis, Brasil.
- Almeida, F.F.M.de, - 1949 - Relêvo de cuesta na Bacia Sedimentar do Rio Paraná Bol. Paulista Geog. 3: 21-33.
- Almeida, F.F.M. de e Barbosa, O., - 1953 - Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro - Estado de São Paulo - Dept. Nac. Prod. Min., Div. Geol. Min. Bol.
- Almeida, F.F.M. de, - 1956 - O planalto basáltico da Bacia do Paraná - Bol. Paulista Geog., 24: 3-34.
- Almeida, F.F.M. de, - 1958 - Estudos na orla dos derrames basálticos em São Paulo e Minas Gerais - in Rel. Anual-Diretor Dept. Nac. Prod. Min. Div. Geol. Min. (1957, 88-93.
- Almeida, F.F.M. de, - 1964 - Fundamentos geológicos do Relêvo Paulista - in Geologia do Estado de São Paulo, Inst.Geog. Geol. 41: 167-263 - São Paulo.
- Amaral. G., Cordani. U.G., Kawashita, J.H., - 1966 - Potassium - argon dates of basaltic rocks from southern Brazil-Geochim. et Cosmochim. Acta, 30: 159-189.
- Azambuja. J.J.R.A., - 1944 - Arenito vulcano - clástico intertrapiano de Irai. RS - Miner. Metal., 7: 361-364.
- Baker, C.H.L., - 1923 - The lava field of the Paraná Basin, South America J. Geol., 31. (1): 66-79.
- Bischoff, G. e Schonenberg, R., - 1956 - "Über das Emwandern des basischen en Magmor in ortho - und parageosynklinale - Ramuc - N Jb. Geol. Pal. Heft. 11: 497-505.

- Bjerrum and others - 1963 - Some Norwegian studies and experiences with swelling material in rock gouges. Rock Mech. Engng. Geol. Vienna, Vol. 1, Pt. 1 (on Publ. Norw. Geotech. - Inst. 57, 1964)...
- Bowen, R.L., - 1966 - The Parana basin flood lavas and their structural relations with the Ponta Grossa - Arch. in Guide book of the International - Fied. Institute. Brasil. - 1966, 5 p. - ed Amer, Geol. Inst., Washington.
- Brekke, T.L., - 1965 - The potential swellability of montmorillonite in rocks in Norway. - Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 2 n° 2 - July 1965 pp. 156-165.
- Caillière, S. e Hénin, S. - 1963 - Minéralogie des Argiles - Masson et Cie Éditeurs - Paris
- Canambra Engineering consultants Limited - abril 1966 - "Feasibility of Capivara project.," appendix n° 12.
- Collet, F.R., Warnick, C.C., Hoffman, D.S. - 1962 - Prevention of degradation of basalt Aggregates used in highway base construction. - Highway Research Board Bull. 344, 1-8.
- Cordani, U.G., 1964 - Idade dos basaltos do sul do Brasil - XVIII Cong. Bras. de Geologia, Soc. Bras. Geol., Poços de Caldas, MG, Brasil.
- Cordani, U.G. e Vandroos, P., - 1967 - Basaltic rock of the Parana Basin, in problems in Brazilian gondwana geology: 207-229 Curitiba, Brasil.
- Creer, K.M., Miller, J.A. e Gilbert Smith, A., - 1965 - Radiometric age of the Serra Geral formation - nature, 207: 282 - 283.
- Cruz, P.T. e Nieble, C.M. - 1970 - Engineering Properties of Residual Soils and Granular Rocks Originated from Basalts-Capivara Dam - Brazil - Avulso IPT s/n São Paulo.
- Day, H.L., 1962 - A progress report on studies of degrading basalt aggregate bases - Highway Research Board Bull. 344.

- Dejou, J. et Pedro, G. - 1967 - A propos de la formation des "arênes" dans les pays tempérés et de la presence de kaolinite au sein de la zone d'altération. Bulletin de l'Association Francaise pour l'Etude du Sol - n° 1 - pp.4.
- Du Toit, A.L., - 1927 - A geological comparison of South America - With South - Africa -Carnegie Inst. Wash. Public., 381 158 p., mapas, ilust. Washington.
- Englert, L., 1925 - Bosqueijos mineralógicos e geológicos-Egatea, - rev. da Esc. Engenharia de Porto Alegre, tomo X, 2 Brasil.
- Erickson, L.F. - 1959 - Degradation of aggregates used in base courses and bituminous surfacings - Report to HRB, D-1, Miner. Aggregate.
- Farjallat, J.E.S. - 1970 - Observações sobre a desagregação do basalto compacto usado no enrocamento do aterro da ponte do rio Sucuriú. - Instituto de Pesquisas Tecnológicas publicação n° 902 - pp. 5 - São Paulo.
- Farjallat, J.E.S. - 1971 - inédito - Critério da Avaliação da Alterabilidade de Rochas - 7º Simpósio de Pesquisas Rodoviárias - GB.
- Farjallat, J.E.S. e Nery Oliveira, J.A. - 1971 - inédito - Observações sobre a desagregação dos basaltos de Capivara. 25º Congr. da Soc. Bras. Geologia - SP.
- Farran, J. e Thenoz, B. - 1965 - L'Altérabilité des roches, ses facteurs, sa prévision. - Annales de L'Institut du bâtiment et des travaux publics - n° 215.
- Franco, R.R., - 1952 - Zeólitos dos basaltos do Brasil Meridional (Gêneses e Parageneses) - Bol. Fac. Filos. Ciên. Letr. Univ. São Paulo, 150; Mineralogia 10, 69 p., São Paulo
- Freyberg, B. von, - 1927 - Observaciones geológicas en la región - de las ágatas de la Serra Geral (R.G.do Sul, Brasil) - Acad. Nac. de Ci., Bol. 30: Cordoba, Argentina.

- Grim, R.E. - 1968 - Clay Mineralogy - McGraw-Hill Book. Co. New York - 596 pp.
- Groeber, P., - 1953 - Mesozoico - in Geografia de la Republica Argentina, tomo II, Buenos Aires.
- Guimarães, D., - 1930 - Província magmática do Roraimã - Serv. - geol. e mineral, Brasil, Bol. 45: 1-57, Rio de Janeiro.
- Guimarães, D., - 1933 - A província magmática do Brasil Meridional - Serv. Geol. e Mineral, - Brasil Bol. 64: 70 p., Rio de Janeiro.
- Gutmans, M., - 1943 - Rochas - mater da "terra roxa" - Bragantina, 3: 271-322 - Inst. Agrônômico de Campinas, Estado de São Paulo, Brasil.
- Hamrol, A., - 1967 - A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks. 5.th Int. Conf. Soil Mech. Vol. 2, Paris - pp. 771 - 774.
- Harrington, H.J., - 1945 - Algunas observaciones sobre el sistema de Gondwana en el Uruguay - Inst. Panamer. Ing. de Minas y Geol. Soc. Argentina, primeira reunião de comunicaciones: 5: 19, Buenos Aires.
- Herz, N., - 1966 - Tholeiitic and alkalic volcanism in southern Brazil. Guide book of the International Field. Institute, Brazil, 1966, Amer. Geol. Inst., 6 p. Washington.
- Iliev, I.G., - 1966 - An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico - Mechanical properties. - in Proceedings of the first Congress of the Int. Soc. Rock Mechanics - Lisboa - pp - 109 - 114.
- Issler, R.S., - 1970 - Os problemas dos toleifitos, séries toleifíticas e a série toleifítica da Bacia do Paraná. Boletim nº 18 - Escola de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - P. Alegre - 39 pp.

Jung, J. et Brousse, R. - 1959 - Classification modale des roches
Masson e Cie. - Paris - pp. - 117.

Krauskopf, K.B. - 1967 - Introduction to Geochemistry - MacGraw-Hill
Book CO. N.York.

Leinz, V., 1949 - Contribuição à geologia dos derrames basálticos
do sul do Brasil - Bol. Fac. Filos. Ciên. Letr. Univ.
São Paulo, 103: Geologia nº 5, 61 p., São Paulo.

Leinz, V., Batorelli, A., Sadowski, G.R. e Isotta, C.A.L. - 1966-
Sobre o comportamento espacial do trapp basáltico da
Bacia do Paraná - Bol. Soc. Bras. Geol., 15(4): 79-91

Leinz, V., Bartorelli, A. e Isotta, C.A.L. - 1968 - Contribuição
ao estudo do magmatismo basáltico mesozóico da Bacia
do Paraná - An. Acad. Bras. Ci., 40 (suplemento):167-
181.

Long, J.V.P. - Electron Probe Microanalysis - in

Zussman, J. - 1967 - Physical methods in de determinative minera-
logy - Academic Press - London and New York - pp.215-
260.

Maack, R., - 1947 - Breves notícias sobre a geologia dos Estados
do Paraná e Santa Catrina - Arq. Biol. Tecnol., 516 :
197-230 - Curitiba, Brasil.

Maack, R., - 1957 - Die Entwicklung der Gondwana - Schichten Sued
brasiliens und ihre beziehungen zur Karro - Formation
suedafrikas - 19º Int. Geol. Congr. Alger. Symp. Sur.
les series de Gondwana: 339-372.

Maack, R., - 1968 - Einige Varlaenfige Mitteilungen ueber dan
Gondwana - Vulkanismus - An. Acad. Bras. Ci., 4º (su-
plemento): 159-166.

Melfi, A.J. e Girardi, V.A.V. - 1962 - Ocorrência de um "sill" de
diabásio no arenito Botucatu - Município de Igarapava,
S.P. Bol. Soc. Bras. Geol. 11 (2): 55-70.

Melfi, A.J., - 1967 - Potassium - argon ages for core samples of
basaltic rocks from southern Brazil - Geochim. et Cos-
mochim. Acta, 31: 1079-1089.

- Melfi, A.J., Levi, F. e Farjallat, J.E.S. - 1971 - inédito - Influência da textura na Alteração Experimental de Diábasios. 25º Congr. da Soc. Bras. Geologia - S.P.
- Mezzalira, S., 1965 - Descrição geológica e geográfica das fôlhas de Piracicaba e São Carlos, SP - Inst. Geogr. Geol. , 43: 41 p., São Paulo.
- Millot, G. - 1964 - Géologie des Argiles. - Masson et Cie, Éditeurs Paris - 499 p.p.
- Nery Oliveira, J.A. - 1970 - Geologia da Barragem de Capivara, Rio Parapanema, Estados de São Paulo e Paraná. An. 1ª - Sem. Paul. Geol. Aplicada - pp. IV-1 a IV-14 - São Paulo.
- Nieble, C.M. e Cruz, P.T. - 1970 - An Interesting Case of Stability in a Man Made Rock Slope. Avulso IPT s/n São Paulo
- Oliveira, A.I. e Leonardos, O.H., 1943 - Geologia do Brasil, 2ª ed, Serv. Inf. Agric. 813 p. (Serie Didática nº 2) Rio de Janeiro.
- Pêdro, G. - 1964 - Contribution a l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Ann. Agro. 2-3-4, 344 p.
- Pêdro, G. - 1969 - A alteração de rochas em condições superficiais (perimorfismo) caracterização geoquímica dos processos fundamentais. Noticia geomorfológica V-9-nº 17 pp. 3-14 - Campinas, Brasil.
- Pichler, E. - 1942 - A Petrologia e os ensaios tecnológicos de rochas. Bol. Dep. Estradas de Rodagem São Paulo.
- Prevosteau, J.M., Ragot, J.P., Sima, A. - 1970 - Le spectre de porosité des roches, critère possible de leur degré d'altération e de leur alterabilité. pp. 548-560 - Iº - Int. Congr. Int. Ass. Eng. Geology, Paris.
- Ross, C.S. and Hendricks, S.B. - 1945 - Minerals of the montmorillonite group. United States Department of the interior-Geological Survey Professional paper - 205-B - Washington - 71 pp.

- Rüegg, N.R. - 1969 - inédito - Aspectos geoquímicos mineralógicos e petrográficos de rochas basálticas da Bacia do Paraná. Tese de Doutorado.
- Rüegg, N.R. e Vandomos, P., - 1965 - o diabásio de Laranjal Pau - lista, SP - Ciência e cultura, 17(2): 128-129.
- Ruiz M.D., 1963a - Geologia Aplicada à barragem de Jupia (Sistema Urubupungá). Inst. Pesq. Tecnol. 696, 10 p., São Paulo.
- Ruiz, M.D. - 1963 - Mecanismo de Desagregação de rochas basálticas semi alteradas. Anais II Congresso Panamericano - de Mecânica dos Solos e Eng. de Fundações. Vol. I. - São Paulo - pp. 533 - 543.
- Ruiz, M.D. - 1966 - Características Tecnológicas de rochas do Estado de São Paulo . Instituto de Pesquisas Tecnológicas - Boletim nº 50. - pp. 121 - São Paulo.
- Schneider, A.W., 1964 - Contribuição à Petrologia dos derrames basálticos da Bacia do Paraná - Univ. R.G. do Sul, Esc. Eng., Avulsa, 1, 76 p. Porto Alegre - Brasil.
- Schneider, A.W. e Rocha , F.X.P. - 1968 - Emprêgo de basaltos em pavimentação rodoviária. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - Publicação 433 - Rio de Janeiro - 42 pp.
- Sanford, R.M. e Lange, F.W. 1960 - Basin - study approach to oil evolution of Parana Miogeosyncline of South America - An. Ass. Petrol. Geol., 44 (8): 1316 - 1370.
- Santos, P.S. e Ruiz, M.D. - 1962 - Composição mineralógica de um material em forma de placas de cor verde, de enchimento de diáclases de rochas, basálticas da Barragem de Bariri. - Pesquisa do IPT nº 78 (interno) - São Paulo 36 pp.
- Scott, L.E. - 1955 - Secondary minerals in rocks as a cause of pavement and base failure: HRB Proceed., 34, 412-417.

Struillou, R. - 1969 - Prévision de L'Altérabilité des matériaux em ployés en génie civil. Colloque de géotechnique. - Toulouse - mars - 1969 - pp. - 35-46.

West, T.R., Johnson, R.B. and Smith, N.M. - 1970 - Tests for evalua ting degradation of base course aggregates. National - cooperative highway research program report 98. - Was - hington - pp - 92.

White, I.C. - 1908 - Relatório final da comissão de estudos das mi nas de carvão de pedra do Brasil - Impr. Nac. 617 p. - Rio de Janeiro.