USP

Campus de São Carlos

"ÍNDICE DE ALTERAÇÃO E DE ALTERABILIDADE DE ROCHAS, APLICAÇÃO PARA AMOSTRAS DE BASALTO DA PEDREIRA BANDEIRANTES, SÃO CARLOS (SP)"

AUTOR: THULLA CHRISTINA ESTEVES DE GUZZI

ORIENTADOR: PROF.DR. ANTENOR BRAGA PARAGU

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ÍNDICES DE ALTERAÇÃO E DE ALTERABILIDADE DE ROCHAS. APLICAÇÃO PARA AMOSTRAS DE BASALTO DA PEDREIRA BANDEIRANTES, SÃO CARLOS (SP).

Thulla Christina Esteves de Guzzi

Orientador: Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassú
Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia

DEDALUS - Acervo - EESC
31100017984

São Carlos-SP
junho/1995

EESC - USP
Biblioteca
CAMPUS DE S. CARLOS

Class. Tese - EESC
Cutt. 2617
Tombo 084/95
Geotecnia
st 0742197

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

G993i

Guzzi, Thulla Christina Esteves de
Índices de alteração e de alterabilidade de rochas. Aplicação para amostras de basalto da pedreira bandeirantes / Thulla Christina Esteves de Guzzi. -- São Carlos, 1995.
68p.
Dissertação
~~Tese~~ (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1995.
Orientador: Antenor Braga Paraguassú

1. Alterabilidade de rochas. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

DISSERTAÇÃO DEFENDIDA EM 22/02/95
E APROVADA PELA COMISSÃO JULGADORA:

Prof.Dr. ANTENOR BRAGA PARAGUASSU (Orientador) - USP / São Carlos

Dr. JOSÉ EDUARDO SIQUEIRA FARJALAT - IPT

Dr. ELY BORGES FRAZÃO - IPT

Prof.Dr. José Carlos A. Cintra
Coordenador da Área de Geotecnia

Prof.Dr. Jurandyr Povinelli
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

ÍNDICES DE ALTERAÇÃO E DE ALTERABILIDADE DE ROCHAS. APLICAÇÃO PARA AMOSTRAS DE BASALTO DA PEDREIRA BANDEIRANTES, SÃO CARLOS (SP).

Thulla Christina Esteves de Guzzi

A Renivaldo, meu esposo, pelo constante apoio e

A Giovanna, minha filha, pela imensa alegria

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassú, pela orientação dada durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Nahor Neves de Souza Jr. pelo estímulo e apoio.

Ao Sr. Antônio e ao Vadinho, técnicos do Departamento de Geotecnia, pela grande ajuda durante a preparação das amostras e execução dos ensaios.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, pela execução da análise difratométrica.

SUMÁRIO

Resumo i

Capítulo 1. Introdução 1

1.1. Importância do Estudo 1

1.2. Objetivos do Estudo 1

Capítulo 2. Alteração de Rochas 3

2.1. Importância da Composição Mineralógica na Previsão do Comportamento 4

2.2. Classificação e Importância da Fissuração na Previsão do Comportamento 6

Capítulo 3. Índices Quantificadores do Estado de Alteração de uma Rocha 11

3.1. Índices Físicos 11

3.2. Ìndices Químicos 14

3.3. Índices Petrográficos 22

3.4. ÍndicesPetrográficos/Mineralógicos 29

3.5. Índices Geomecânicos 29

Capítulo 4. Alterabilidade de Rochas 31

4.1. Avaliação da Alterabilidade 32

Capítulo 5. Estudo Experimental 39

Capítulo 6. Material Estudado 50

6.1. Generalidades 50

6.2. Caracterização das Amostras 52

6.2.1. Caracterização Petrográfica 52

6.2.2. Caracterização das Propriedades Físicas e Mecânicas 54

Capítulo 7. Resultados e Conclusões 56

Capítulo 8. Considerações Finais 63

Capítulo 9. Sugestões para Trabalhos Futuros 64

Referências 65

SUMÁRIO

FIGURAS

1. Diagrama de intemperismo mostrando a distribuição dos minerais, segundo Kronberg e Nesbitt, 1981 (apud Almeida, 1978) 23

2. Relação entre porosidade e densidade de microfissuras, segundo Onodera et alii (1974) 26

3. Determinação do *Indice de fissuração* para cada cristal de acordo com o tipo de microfissuras, segundo Uriel e Dapena (1982) 28

4. Determinação do *Indice de transformação* para cada cristal de acordo com a proporção de superfície transformada, segundo Uriel e Dapena (1982) 28

5. Pilha de brita 3 (basalto tipo A) 40

6. Detalhe do basalto tipo A 40

7. Pilha de rejeito de onde foram coletadas as amostras de basalto tipo B 41

8. Porção do maciço rochoso denominada por *moleira* 42

9. Esquema sintético dos principais níveis de alteração e pedogênese sobre rochas básicas (Ribeirão Preto). Perfil laterítico completo, segundo Gonçalves (1987) 44

10. Gaiola utilizada no ensaio de meteorização 46

11. Tela utilizada para cobertura do fundo da gaiola de ensaio 46

12. Esquema geral do modo de distribuição das amostras em redes para execução dos ensaios de alteração 47

13. Redes com o basalto tipo A 48

14. Redes com o basalto tipo B 48

15. Pedreira Bandeirantes 51

16. Localização da Pedreira Bandeirantes, no Município de São Carlos (SP) 51

17. Dados e curvas experimentais da variação do *Indice de perda de massa* (IWL) com a ciclagem água-estufa para os basaltos A e B 57

18. Percentagem de perda de massa acumulada dos basaltos A e B durante o ensaio de ciclagem água-estufa 59

19. Percentagem acumulada de fragmentos trincados dos basaltos A e B durante o ensaio de ciclagem água-estufa 59

20. Dados e curvas experimentais da variação do *Indice de resistência ao impacto "treton"* (Irt) com a ciclagem água-estufa para os basaltos A e B 60

21. Variação da alteração no tempo para o *Indice de resistência* de uma rocha ácida e classificação geotécnica da rocha quanto ao seu estado de alteração, segundo Ladeira e Minette (1984a) 62

22. Curvas de alterabilidade de rochas ácidas, neutras e ultrabásicas, segundo Ladeira e Minette (1984a). 62

QUADROS

1. Limites de percentagens, de minerais secundários, tolerados em rochas a serem utilizadas como agregados, segundo Farjallat et alii (1972)..... 7

2. *Índice de alteração potencial* de Reiche, 1950 (apud Minette, 1982)..... 15

3. Séries de estabilidade à alteração, segundo Goldich, 1938 16

TABELAS

1. Emprego da rocha ou material rochoso em construção civil, segundo Yoshida et alii (1972)..... 2

2. Roteiro para avaliação preliminar do estado de alteração e do grau de coerência de rochas, segundo IPT (1990)..... 55

R E S U M O

Neste trabalho apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre índices de alteração e alterabilidade de rochas e uma avaliação da alterabilidade de amostras de basalto da Pedreira Bandeirantes, SãoCarlos (SP). ESta avaliação segue basicamente a metodologia apresentada por Ladeira e Minette (1984a).

As amostras estudadas foram coletadas em dois diferentes estágios de alteração (A e B) e submetidas a ensaios de alteração natural e acelerada. O ensaio de alteração acelerada escolhido foi de ciclagem água-estufa.

O grau de alteração das amostras foi avaliado através de dois diferentes índices, um físico (perda de massa) e um mecânico (resistência ao impacto "treton").

Observaram-se para os basaltos A e B velocidades de alteração natural anuais de respectivamente, 0.016Irt/ano e 0.175Irt/ano (valores relacionados ao índice mecânico de alteração).

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância do Estudo

A caracterização tecnológica, dos mais variados tipos de materiais rochosos utilizados em obras de Engenharia Civil, tem como principais funções a seleção e o melhor aproveitamento destes materiais. O resultado obtido é a economia de tempo e dinheiro para determinado tipo de utilização do material.

É o tipo de utilização do material que determina as características deste a serem estudadas, pois para cada utilização, estão relacionadas diferentes solicitações às quais o material estará submetido. As diversas solicitações da rocha ou materiais rochosos, por finalidade, podem ser observadas na Tabela 1, proposta por Yoshida et alii (1972). Nesta tabela, pode-se observar que a alterabilidade é uma característica que deve ser determinada para qualquer tipo de utilização do material. O interesse prático da avaliação da alterabilidade, objeto deste estudo, consiste na investigação do tempo de ruína da rocha e/ou da obra.

1.2. Objetivo do Estudo

Neste trabalho apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre a avaliação do estado de alteração e alterabilidade de materiais rochosos e, um estudo experimental para avaliar a alterabilidade de uma rocha basáltica aflorante no Município de São Carlos (SP).

TABELA 1 - EMPREGO DA ROCHA OU MATERIAL ROCHOSO EM CONSTRUÇÃO CIVIL, SEGUNDO YOSHIDA ET ALII, 1972

		SOLICITAÇOES	FUNÇÕES
"IN SITU"	FUNDAÇÕES	1 - Trações e compressões instantâneas-durante o desmonte por esplosivos na escavação da rocha. 2 - tensões de distribuição uniforme - devido ao peso das estruturas sobrejacentes. 3 - tensões de cisalhamento - resultante do empucho da água mais o peso da obra. 4 - alterabilidade - devido a exposição da rocha.	1 - suportar as cargas impostas pelas estruturas.
	TÚNEIS	1 - trações e compressões instantâneas - durante o desmonte por explosivos na abertura do tunel. 2 - distribuição de tensões - afetadas pelas descontinuidades da rocha durante a abertura construção e estabilização das paredes. 3 - alterabilidade - devido a água que passa pelas fendas ou poros da rocha.	1 - suportar as tensões naturais do maciço. 2 - suportar, parcial ou totalmemte as pressões internas em túneis sob pressão hidrostática.
MATERILAL ROCHOSO SEM LIGANTE	LASTRO DE VIAS FERREAS	1 - impacto, atrito, compressão e esmagamento - devido a passagens de cargas. 2 - alterabilidade - devido a secagem e umedecimento, expansões e contrações térmicas. 3 - "bombeamento do pavimento" - devido a extrusão da argila do subleito.	1 - suportar os dormentes, resistindo aos movimentos horizontais devido a ação do tráfego e às mudanças de temperatura dos trilhos. 2 - distribuir as cargas das rodas reduzindo a pressão sobre o leito. 3 - contituir um meio para drenagem da água sob os dormentes. 4 - constituir um meio próprio para o aplainamento da pista. 5 - permitir que os trilhos e os dormentes se movam verticalmente. 6 - retardar ou evitar o crescimento de vegetações.
	ENROCAMENTOS	1 - ciclos de saturação e secagens - devido a variação do nível da água. 2 - impacto - devido a ação mecânica das ondas. 3 - cargas concentradas de contato entre os agregados. 4 - alterabilidade - devido aos agentes de intemperismo	1 - proteção de aterros, barragens etc., contra erosão pela água. 2 - proteção contra impacto de ondas em aterro de terra compactada. 3 - constituir filtros de transição entre o enrocamento e o aterro para previnir o carreamento de particulas. 4 - construção de ensecadeiras. 5 - constituir o corpo de uma barragem de enrocamento por razões econômicas.
	FILTRO	1 - atrito mútuo, abrasão e impacto - durante a sua execução. 2 - alterabilidade - ataque pela água e seus componentes.	1 - purificação da água em barragens de abastecimento. 2 - aliviar as pressões neutras no maciço. 3 - dirigir o escoamento da água.
MATERIAL ROCHOSO COM LIGANTE	CANTARIA	1 - corte e desgaste - na fase de preparação. 2 - alterabilidade - devido a secagem e umedecimento, expanção e contração térmica e ação das águas de chuva.	1 - embelezamento de fachadas. 2 - proteção contra agentes intempéricos.
	CONCRETO	1 - atrito e impacto - por meio de betoneira, soquetes e vibradores. 2 - tração e compressão - devido ao peso da estrutura sobrejacente. 3 - alterabilidade - secagem e umedecimento, expanção e contração térmicas. "águas agressivas"	1 - construir com grãos capazes de resistir aos esforços solicitantes, ao desgaste e as ações das intempéries. 2 - contribuir para redução do custo do concreto. 3 - reduzir as variações de volume.
	PAVIMENTO (macadame e capa de rolamento	1 - abrasão e atrito mútuo - devido ao avanço das rodas de altomóveis ou niveladora. 2 - compressão e esmagamento - produzido pelo peso dos veículos. 3 - impacto - produzido pela aterrisagem das rodas de um aeroplano. 4 - alterabilidade - secagem e umedecimento, expansões e contrações térmicas, ação química e mecânica das chuvas e enxurradas.	1 - suportar e distribuir as cargas do tráfego, transferindo-as às camadas inferiores. 2 - resistir as ações abrasivas do tráfego. 3 - proteger o subleito das ações intempéricas, principalmente da ação mecânica da água.

2. ALTERAÇÃO DE ROCHAS

Rochas de diversas naturezas têm sido utilizadas, em larga escala, como material de construção e fundações de obras .

Apesar de tipos variados de rochas apresentarem características como alta resistência e durabilidade, na época de seu emprego, com o decorrer do tempo estas características sofrem modificações. Nascimento (1970) denominou por "alteração de uma rocha" a perda de resistência ou aumento da permeabilidade da rocha, ou ainda, modificações na textura e cor da superfície da rocha.

Os processos de alteração levam à degradação das rochas e os efeitos diretos dos processos na rocha são a perda de massa e o aumento da absorção.

O presente trabalho não tem por objetivo o estudo dos mecanismos de alteração da rocha, mas sim, da situação da mesma no respectivo processo de alteração, ou seja, seu "estado de alteração" (Nascimento, 1970) no momento de sua utilização .

Segundo Aires - Barros, 1969 (apud Farjallat, 1971) o grau de alteração (m) é função da inter-relação entre fatores intrínsecos (i) e extrínsecos (e) à rocha:

$$m = f(i,e)$$

Estes fatores são expressos da seguinte maneira:

$$m = f\,(\underbrace{n,\ s}_{i},\ \underbrace{T,\ pH,\ Eh,\ l,\ b}_{e})$$

Sendo:

i- fatores intrínsecos à rocha

n- natureza dos constituintes mineralógicos

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

e- fatores extrínsecos à rocha

T- temperatura

pH- potencial hidrogeniônico

Eh- potencial de oxi-redução

l- quantidade de água

b- forças bióticas

A estes fatores, Aires-barros (op.cit.), acrescenta o tempo (t), ficando a primeira expressão da seguinte forma:

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

Muitos trabalhos têm abordado a influência dos fatores: natureza dos constituintes mineralógicos e fraturamento, na alteração de rochas.

2.1- Importância da Composição Mineralógica na Previsão do Comportamento

Segundo Delgado Rodrigues (1977), a importância da composição mineralógica advém, exatamente, da presença de minerais já alterados ou mesmo de novos minerais formados após a consolidação da rocha (minerais secundários). A natureza e a quantidade desses minerais podem fazer com que uma rocha menos alterada seja mais suceptível à alteração do que uma inicialmente mais alterada, considerando-se a escala de tempo em engenharia. As rochas são frequentemente atingidas por alterações hidrotermais

que originam minerais secundários de natureza diversa. São freqüentes, por exemplo, a formação de esmectitas ou de caulinitas. A presença de esmectitas pode ser de tal modo decisiva que pequenas percentagens podem ser suficientes para provocar degradações importantíssimas das rochas, mesmo daquelas que exibem boas características mecânicas.

Segundo Frazão e Caruso (1983), a presença de minerais secundários originados por ação hidrotermal nos basaltos colocam este tipo litológico em desvantagem em relação aos granitos, quanto à alterabilidade, para as mesmas condições físico-químicas do meio. Dentre os minerais secundários dos basaltos, os argilo-minerais, talvez sejam os que mais contribuem para a alteração. Deve-se mencionar que constituintes vítreos, também comum nos basaltos, podem, por decomposição e conseqüente recristalização, originar argilo-minerais. Os argilo-minerais do basalto, que se formam por alteração hidrotermal e a partir do vidro, são com freqüência os do grupo das esmectitas (expansíveis em presença de água).

Farjallat et alii (1972) citam numerosos autores que apontam como uma das causas principais da desagregação de rochas basálticas o seu conteúdo em minerais argilosos expansivos, entre eles: Scott (1955); Mielenz (1961); Aughenbaugh e outros (1961); Day (1962); Collet Warnick e Hoffmann (1962); Ruiz (1963); Weinert (1964); Helm (1964); West e Aughenbaugh (1964); Smith (1967); Schneider & Pires da Rocha (1968); Struillou (1968); Farjallat (1970 e 1971); West (1970).

Segundo Ruiz, 1963 (apud Farjallat et alii, 1972) a desagregação da rocha se daria devido às pressões internas exercidas pelo conteúdo em minerais argilosos expansivos ao

entrar em contato com a água. Ele mediu as forças de expansão de uma argila rica em nontronita, ocorrente na Barragem de Bariri, Estado de São Paulo. Foram utilizadas células de adensamento próprias para o estudo dos solos, porém os ensaios foram encaminhados para leitura de expansão ao invés de adensamento. As pressões de expansão medidas chegaram a 200kg/cm^2.

Ainda em relação às pressões de expansão, Frazão (1981) detectou um valor de 0,76 MPa (7,71 kgf/cm^2) em ensaios com argila de composição predominantemente esmectítica para teor de umidade inicial de 0,6% e massa específica de 1.300 kg/m^3.

Farjallat et alii (1972) ainda apresentam alguns valores numéricos de limites de percentagem, de minerais secundários tolerados em rochas a serem utilizadas como agregados, definidos por diversos autores (Quadro 1).

Weinert, 1964 (apud Yoshida, 1972), relaciona o comportamento de agregados doleríticos utilizados em pavimentação na África do Sul, com o clima e conteúdo de minerais secundários.

2.2- Classificação e Importância da Fissuração na Previsão do Comportamento

Farran e Thénoz, 1965 classificaram as descontinuidades em:

a) *microfissuras* (microfissuração matricial) - são descontinuidades caracterizadas por uma pequena espessura ($e \leq 1\mu$) e por dimensões longitudinais da ordem de grandeza dos cristais. A microfissuração é essencialmente constituída por fissuras localizadas nas clivagens, assim como por fissuras

Scott (1955) - minerais secundários < 20% - pequeno efeito 20 - 35% - algumas falhas na utilização >35% - insucesso
Oregon State Highway Department - minerais secundários <20% - rocha adequada
Day (1962) - minerais secundários 0 - 15% - basaltos de boa qualidade 15 - 25% - basaltos de transição >25% - basaltos de qualidade inferior
Schneider e Pires da Rocha (1968) - minerais secundários <5% - rochas adequadas 5 - 10% (não expansivos) - rochas adequadas 5 - 10% (expansivos) - ensaios de durabilidade recomendados >10% - ensaios de durabilidade recomendados

Quadro 1. Limites de percentagens, de minerais secundários, tolerados em rochas a serem utilizadas como agregados, segundo Farjallat et alii (1972).

intergranulares. É neste nível que se situam, eventualmente, as grandes superfícies de contato entre a rocha e o fluido.

b) *fraturas* - elas são em muito menor número que as fissuras matriciais, mas de dimensões consideravelmente mais importantes. A distribuição de sua orientação é limitada a um pequeno número de direções. Incluem as:

-*microfraturas* - e ≤ 0,1mm

-*macrofraturas* - e > 0,1mm (às vezes abertas, frequentemente preenchidas por minerais de alteração). Ex:Diáclases, falhas e etc.

A observação das macrofraturas depende essencialmente do exame da rocha "in situ". A observação da microfissuração matricial pode ser feita através de lâminas petrográficas . A área das microfissuras, medida por unidade de volume da rocha ou unidade de peso, pode ser calculada a partir de ensaios com permeâmetros e porosímetros especiais baseando-se, ainda, na esquematização de um modelo geométrico regular.

Farran e Thenóz (op. cit.), estudando um grande número de amostras graníticas, de alterabilidade conhecida pela utilização no campo, e considerando principalmente a permeabilidade ao ar e a microfissuração, dividiram as rochas em duas grandes classes:

a) *rochas muito compactas* onde a circulação de água é impossível, ou seja, rochas com permeabilidade ao ar, ao redor ou menor que 0,1 mdcy. Os granitos desta categoria, qualquer que seja a sua superfície unitária interna, são praticamente inalteráveis.

b) *rochas menos compactas* onde a circulação de água é possível. A alterabilidade se revela neste caso proporcional à superfície interna unitária (desde que os minerais sejam passíveis de alteração).

Farjallat (1975) estudando o comportamento da permeabilidade ao ar de rochas basálticas em amostras não confinadas, sob confinamento lateral e triaxial e, sob compressão uniaxial, chegou às seguintes conclusões:

- a permeabilidade ao ar é um parâmetro facilmente mensurável e índice importante da qualidade da rocha como material de construção e como suporte de fundações. Para rochas efusivas compactas, permeabilidades consideráveis constituíriam indício de má qualidade e de alterabilidade não desprezível. Baixas permeabilidades, abaixo de 0,1 mdcy, sugerem rochas praticamente inalteráveis;
- pressões laterais reduzidas podem influir grandemente no fechamento da rede de microfissuras. Esta influência mostrou-se mais acentuada em rochas pouco porosas e permeáveis e menos acentuada em rochas mais porosas e permeáveis. Este efeito, sem dúvida relacionado à alterabilidade das rochas, explicaria a existência em profundidade de zonas mais alteradas nos maciços rochosos;
- os valores das tensões do início da microfissuração ou abertura das fissuras no ensaio de compressão uniaxial constituem índices de qualidade notáveis e são sugeridos como valores a serem considerados cuidadosamente nos projetos. Esses valores podem se situar próximos às tensões de ruptura (indício de rocha de boa qualidade) ou a valores muito abaixo (indício de má qualidade), ou a qualquer valor intermediário;
- devido à importância indiscutível da permeabilidade na qualidade da rocha, na sua alterabilidade e no condicionamento geológico de grandes obras civis, sugerem-se investigações cuidadosas do

comportamento dos vários aspectos da permeabilidade já nas fases iniciais dos projetos.

Ladeira (1984) em um estudo sobre a instabilidade de taludes rochosos provocada por rápido intemperismo conclui que a falta de controle do uso de explosivos foi a causa principal da instabilização dos taludes estudados. A detonação provoca uma onda de choque dinâmica que supera em muito a resistência à tração da rocha, provocando a sua micro e macrofraturação, aumentando deste modo os caminhos de percolação das águas e consequentemente a ação química de íons OH^-. A micro e macrofissuração aumentam a superfície específica interna da rocha pela grande quantidade de canais provocados e consequentemente favorecem certas reações de hidrólise, hidratação, expansão ou outras.O desmonte por explosivos pode levar a um rápido intemperismo, principalmente, se a rocha já se encontra num grau de alteração avançado. Recomenda, o autor, para taludes, fundações e outras obras, onde a rocha ficará "in situ" exposta aos agentes de intemperismo, o uso de desmonte estrutural por técnicas de "pre-spliting" ou "smooth-blasting". Caso não se utilizem tais técnicas ou por dificuldades econômicas ou porque haja necessidade de utilização da rocha fragmentada, devem ser executados ensaios de alterabilidade acelerada em laboratório após o desmonte, para poder quantificar-se a alterabilidade da rocha.

Deve-se considerar que, o autor acima citado, não chega a citar a quantificação da microfissuração causada pela detonação, ou seja, sua real extensão e influência na alteração.

3. ÍNDICES QUANTIFICADORES DO ESTADO DE ALTERAÇÃO DE UMA ROCHA

Através do cálculo da variação de um índice de alteração no tempo, é possível se definir a *velocidade de alteração natural* de uma rocha, V_{nv} (Ladeira e Minette, 1984b):

$$V_{nv} = \Delta I_v / \Delta t \qquad \text{onde,}$$

ΔI_v = variação de um índice de alteração e

Δt = diferença de tempo.

Os índices quantificadores da alteração têm sido propostos com base nas propriedades físicas, químicas e mecânicas das rochas.

3.1- Índices Físicos

São propostos com base na variação das propriedades físicas da rocha.

Moraes Rego e Souza Santos, 1938 (apud Frazão 1993) em um estudo da porosidade aparente para um mesmo tipo petrográfico concluíram que quanto maior a porosidade mais alto o grau de alteração da rocha.

Pichler, 1942 (apud Yoshida, 1972) utilizando-se da análise petrográfica e da determinação da absorção de água de rochas, concluiu que, se a petrografia indicar alteração pronunciada e a absorção for maior que 0,5%, a rocha deve ser rejeitada (indicador físico-petrográfico).

O *índice Ultrassônico* foi proposto por Illiev (1966) em um estudo feito com monzonitos, e é definido pela expressão:

$$K = \frac{V - Vw}{V}, \qquad 0 < K < 1$$

0 - rocha sã

1 - rocha completamente alterada

K = índice ultrassônico ou coeficiente de intemperismo

V = velocidade ultrassônica na rocha sã

Vw = velocidade ultrassônica na rocha alterada

Saito (1981) faz um estudo da variação de algumas propriedades físicas de rochas (quartzo-diorito, andesito, dacito e basalto) em quatro diferentes estágios de alteração observando:

- diminuição dos valores de velocidade de onda longitudinal e transversal (Km/s) com o aumento do grau de alteração das rochas;
- diminuição dos valores de massa específico aparente seca (g/cm^3) com o aumento do grau de alteração;
- aumento da porosidade efetiva (%) com o aumento do grau de alteração;
- diminuição da resistência com o aumento do grau de alteração.

Além destas propriedades físicas o autor comparou os valores de resistência à compressão simples (Kgf/cm^2) das amostras em quatro diferentes graus de alteração e observou uma diminuição dos valores da resistência com o aumento do grau de alteração das rochas (indicador mecânico).

Ladeira e Minette (1984b), em pesquisada realizada com amostras de uma pedreira de diorito, situada na Tijuca, no Estado do Rio de Janeiro, definiram os seguintes índices físicos de alteração:

índice de massa específica aparente

$$I\gamma a = \frac{(\gamma 0 - \gamma w)}{\gamma 0}$$

$0 < I\gamma a < 1$ 0 - rocha considerada geotecnicamente sã
1 - rocha completamente alterada

$\gamma 0$ - massa específica aparente da rocha considerada geotecnicamente mais sã no local da amostragem.

γw - massa específica aparente da rocha alterada.

índice de absorção

$$IA = \frac{(Aw - A0)}{Aw}$$

$0 < IA < 1$ 0 - rocha considerada geotecnicamente sã
1 - rocha completamente alterada

Aw - absorção da rocha em um certo estado de alteração.

$A0$ - absorção da rocha considerada geotecnicamente sã, ou aquela menos alterada no local da coleta.

índice de porosidade aparente

$$In a = \frac{(nw - n0)}{nw}$$

$0 < In a < 1$ 0 - rocha considerada geotecnicamente sã
1 - rocha completamente alterada

nw - porosidade aparente da rocha num certo estado de alteração.

$n0$ - porosidade aparente da rocha considerada geotecnicamente como sã, ou aquela menos alterada no local de coleta.

índice de perda de massa

$$IwL = \frac{(mo - m1)}{mo}$$

$0 < IML < 1$ 0 - rocha considerada geotecnicamente sã
1 - rocha completamente alterada

mo - massa de rocha seca, no seu estado original, menos alterado e antes de qualquer ensaio.

m1 - massa de rocha após um ou mais ciclos de qualquer ensaio de alteração.

3.2- Índices Químicos

Estes índices levam em consideração a diferença de mobilidade dos elementos, com o processo de alteração.

Um dos primeiros índices químicos a ser definido foi o *fator de lixiviação*

$$F = \frac{(K_2O + Na_2O) / SiO_2}{(K_2O + Na_2O) / SiO_2}$$ onde,

o numerador apresenta o horizonte alterado e o denominador o material de origem (Jenny, 1941 apud Birkeland, 1974).

O *índice potencial do intemperismo* (W.P.I.) e o *índice do produto do intemperismo*(P.I.)foram definidos por Reiche, 1943 (apud Almeida, 1987). São representados pelas seguintes equações:

índice potencial do intemperismo(W.P.I.) =

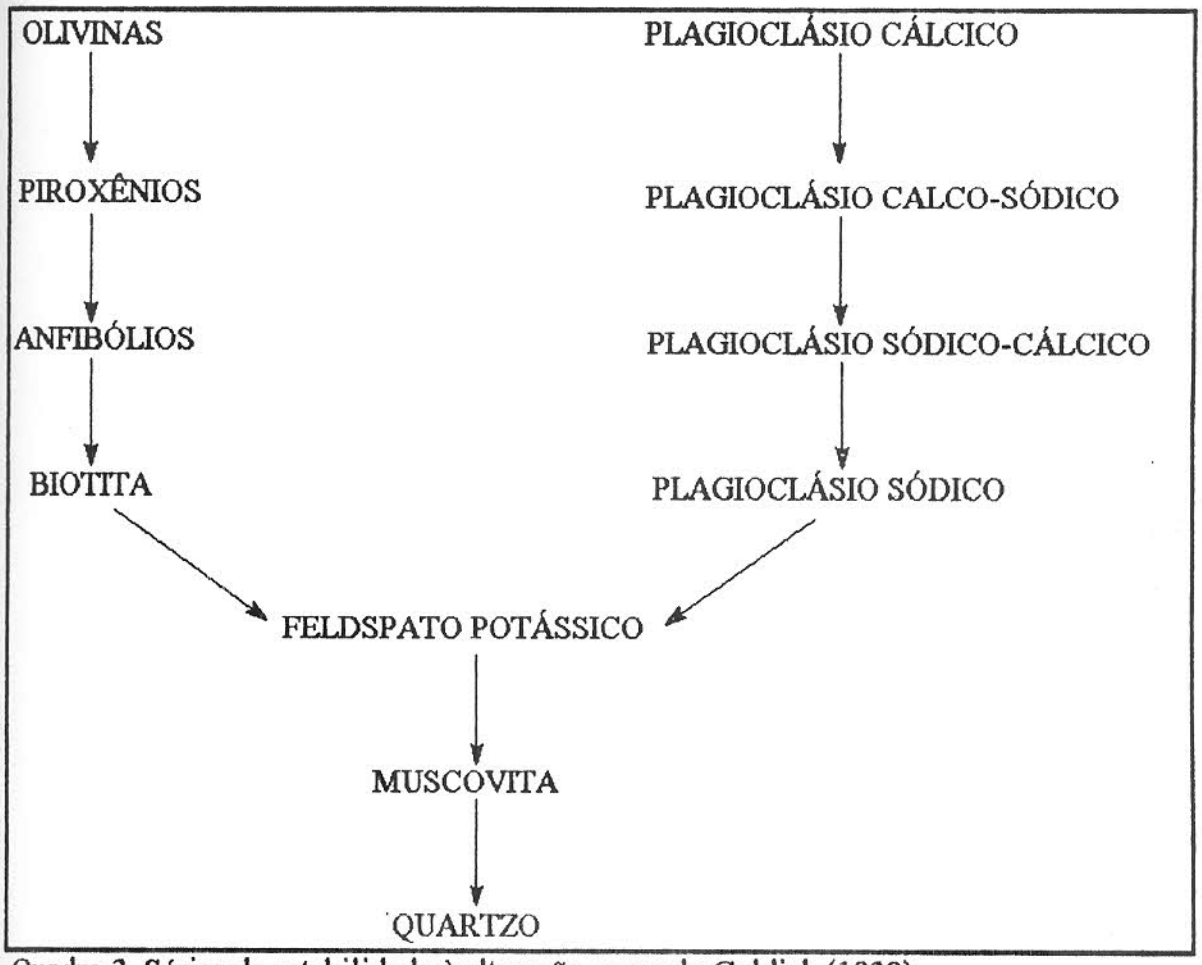
$$= \frac{100 \times moles\ (K_2O + Na_2O + CaO + MgO - H_2O)}{moles(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2 + FeO + CaO + MgO + NaO + K_2O}$$

- quanto menor o valor de W.P.I , maior será o grau de alteração . Um valor alto de W.P.I está associado a rochas de baixa estabilidade. Quando o intemperismo prossegue, o índice deve decrescer e os produtos alterados tornam-se, relativamente, mais estáveis com relação ao intemperismo adicional. O decréscimo no valor de W.P.I está associado ao decréscimo dos cátions móveis e o aumento de água combinada (H_2O). Este índice é calculado através dos dados obtidos da análise química total da rocha.

Minette (1982) apresenta uma tabela com alguns valores médios de W.P.I ou I.A.P (Índice de Alteração Potencial) de alguns minerais e rochas mais importantes (Quadro 2) e faz uma comparação com as Séries de Alteração de Goldich (1938) - Quadro 3.

MINERAL/ROCHA	I.A.P. MÉDIO
OLIVINA	54
AUGITA (PIROXÊNIO)	39
HORNBLENDA (ANFIBÓLIO)	36
BIOTITA	22
MUSCOVITA	10
LABRADORITA	20
ANDESINA	14
OLIGOCLÁSIO	15
ALBITA	13
QUARTZO	1
GRANITO	7
ORTOCLÁSIO E MICROCLINA	12
BASALTO	20

Quadro 2. *Índice de Alteração Potencial* de Reiche, 1950 (apud Minette, 1982).



Quadro 3. Séries de estabilidade à alteração, segundo Goldich (1938).

Através desta comparação verificou-se que existe uma boa concordância entre elas, pode-se dizer que minerais menos estáveis têm maior valor de W.P.I. (I.A.P.) e vice-versa, o que pode ser extrapolado para as rochas em cuja composição eles existam. Deve-se ressaltar que os valores de W.P.I.(I.A.P.) apresentados para as rochas, como no exemplo do basalto, não podem ser generalizados, pois se considerarmos um basalto de composição aproximda 50% labradorita e 50% augita obteremos um valor distinto do apresentado no Quadro 2.Loughnan (1969) aponta anomalias na aplicação deste índice para minerais. A analcita, um dos menos estáveis minerais silicáticos, possui um índice menor do que a muscovita e o quartzo.

índice do produto de intemperismo (P.I.)

$$P.I. = \frac{100 \times SiO_2}{(SiO_2 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + Al_2O_3)}$$

Um baixo valor de P.I. está associado a um decréscimo de SiO_2.

Barth, 1948 (apud Minette, 1982) mostrou que se a composição de uma rocha fresca é comparada com a composição da mesma rocha alterada, a quantificação da alteração é facilmente determinada. Esta quantificação é baseada na "célula padrão" de uma rocha, a qual é tomada como constituída de 160 íons de oxigênio. O número de cátions, (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Mn, Ti), associado à "célula padrão" é de aproximadamente 100. A quantificação da alteração, segundo a "célula padrão", é determinada sobre as porcentagens em peso das análises químicas totais, verificando-se que o número de cátions corresponde aproximadamente às porcentagens de óxidos de elementos que formam as rochas. Minette, em seu trabalho, dá um

exemplo de quantificação da alteração de rochas através da "célula padrão".

Em 1961, Short (apud Almeida, 1987) propôs uma modificação para o W.P.I. definindo assim um novo índice, denominado *índice de intemperismo.* Este índice nada mais é que o W.P.I. da rocha calculado para um horizonte qualquer dividido pelo W.P.I. da rocha original. O novo índice, *índice de intemperismo*(W.P.), varia de 0 a 1 e fornece as seguintes classes de alteração:

0,00 - 0,20 - rocha intensamente alterada

0,20 - 0,40 - rocha fortemente alterada

0,40 - 0,60 - rocha moderadamente alterada

0,60 - 0,80 - rocha suavemente alterada

0,80 - 1,00 - rocha levemente alterada

Krauskopf (1972) propôs um índice denominado *índice de climatização* definido pela expressão:

$$K = \frac{\text{moles } (CaO + MgO + Na_2O + K_2O - H_2O)}{\text{moles } (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O)}$$

O valor desta expressão diminui à medida que a alteração da rocha aumenta. Conforme o material climatizado perde Ca, Mg, Na e K e parece ganhar Al e Fe, a fração evidentemente diminuirá.

Ruxton, 1968 (apud Almeida, 1987) define o grau de alteração pela relação SiO_2/Al_2O_3. Sexquióxidos ou óxidos de alumínio e ferro, com ou sem titânio, podem ser empregados no lugar da alumina, sendo tipos variantes desta relação. Com a

possível quantificação deste índice de alteração em diversas amostras, poder-se-á avaliar a alteração de cada uma, correlacionando-se posteriormente com os parâmetros físicos e geomecânicos. Esse índice possui limitações uma vez que se baseia no fato que os sexquióxidos permanecem constantes com o processo de alteração.

Grant, 1969 (apud Birkeland, 1974), utiliza o pH abrasivo de materiais alterados como método para se avaliar a alteração de rochas, como mostra a seguinte expressão:

$$\text{pH de abrasão} = \frac{f\ Na + K + Ca + Mg}{\text{minerais argilosos}},$$

com o aumento da alteração temos uma diminuição no valor do pH de abrasão. Malomo (1980) também utiliza este índice pra avaliar a alteração de amostras de granito.

Parker (1970) definiu o *índice de proporções de metais alcalinos e alcalinos terrosos* presentes na amostra:

$$I = \frac{(Na)_a}{(Na - O)_b} + \frac{(Mg)_a}{(Mg - O)_b} + \frac{(K)_a}{(K - O)_b} + \frac{(Ca)_a}{(Ca - O)_b} \times 100, \quad \text{onde}$$

$(X)_a$ indica a proporção atômica do elemento X, definida como a percentagem atômica dividida pelo peso atômico ;

$(X - O)_b$ é a resistência da ligação do elemento X com o oxigênio .

Através desse índice pode-se medir o grau de alteração alcançado em relação à rocha original, e também a sua susceptibilidade a uma alteração adicional. Esse índice é aplicável às rochas ígneas ácidas, intermediárias e básicas, e deve ser válida em todas as situações onde a hidrólise é a principal reação no processo de decomposição. Os valores deste índice diminuem com o aumento do

grau de alteração, quando não ocorre um enriquecimento temporário dos elementos.

Moniz et alii (1973) fazem um estudo comparativo entre o grau de alteração da rocha e a relação Sílica/Alumínio (Ki) em basaltos e concluem que, quanto maior os valores de Ki menor o grau de alteração.

Birkeland (1974) define o *índice de relações molares entre óxidos*, que compara as relações molares entre óxidos encontradas na rocha sã e na rocha alterada. São calculadas as seguintes relações:

- Sílica : Alumina SiO_2 / Al_2O_3 ;
- Sílica : Óxido de Ferro SiO_2 / Fe_2O_3;
- Sílica : Sexquióxidos $SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$;
- Bases : Alumina $(K_2O + Na_2O + CaO + MgO) / Al_2O_3$.

Em geral, estas relações decrescem com a alteração.

Miura, 1975 (apud Aires-Barros, 1978) apresenta um índice com a seguinte expressão:

$$DACHEF = \frac{\left(\dfrac{FeO + MnO + MgO + CaO + Na_2O + K_2O}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + H_2O} \right) \textit{rocha alterada}}{\left(\dfrac{FeO + MnO + MgO + CaO + Na_2O + K_2O}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + H_2O} \right) \textit{rocha sã}}$$

DACHEF = degree of absolute chemical freshness

Aires-Barros (1978) faz uma comparação entre o índice de Miura e o índice definido por Parker (1970), onde percebe-se que, enquanto que o DACHEF reflete um quadro do estado de alteração, o índice de Parker mede também o potencial de alterabilidade.

Aires Barros (1979) apresenta um índice geoquímico baseado na oxidação do Fe^{+2} em Fe^{+3}, como expresso a seguir: $\frac{2\ Fe_2O_3}{2Fe_2O_3 + FeO}$

Segundo Minette (1982) algumas proposições entre os índices apresentados por Aires Barros (1979) e Ruxton (1968) são frequentemente utilizadas:

$$I.A = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad , \quad I.A = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO}$$

Sendo I.A = Índice de Alteração

Schellmann, 1981 (apud Schuck e Formoso, 1991) atribui graus ao processo de intemperismo das rochas pela expressão :

$$rw = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad ,$$

aos valores obtidos para rw está relacionada uma classificação para basaltos que varia de saprólito à laterita. Esta expressão é uma das associações entre os índices propostos por Aires Barros (1979) e Ruxton (1968). Schellmann (op.cit.) aplica este a diferentes horizontes do manto de alteração de rochas do planalto Sul Rio Grandense.

O Diagrama de Kronberg e Nesbitt, 1981 (apud Almeida, 1987), é definido pelas expressões:

$$\frac{(CaO + Na_2O + K_2O)}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)} \quad (1) - \text{eixo Y}$$

(1) medida do grau de alteração do feldspato, que é acompanhada pela formação de minerais secundários,

$$\frac{(SiO_2 + CaO + Na_2O + K_2O)}{(Al_2O_3 + SiO_2 + Na_2O + K_2O)} \quad (2) - \text{eixo X}$$

(2) - medida do enriquecimento dos óxidos de Al e Si com o processo, representado pela caolinita, gibsita e quartzo. Acredita-se que, quando o autor se refere ao acúmulo de SiO_2, significa que este SiO_2 está sob a forma de quartzo e que tende a aumentar sua porcentagem na amostra em decorrência da alteração de outros constituintes.

Através deste diagrama (Figura 1) , nota-se que os minerais primários ocupam posições mais altas, os minerais secundários ocupam posições intermediárias e os minerais residuais posições mais baixas. A remoção de Na , Mg , K, e Ca é representada pelo decréscimo do valor da ordenada, que se aproxima de zero quando os minerais cauliníticos se tornam mais comuns. Com a continuação do processo de decomposição, esses minerais devem ser enriquecidos em óxidos de alumínio, transformando-se em gibsita, que representa o produto final do intemperismo químico.

3.3- Índices Petrográficos

São índices que utilizam técnicas rotineiras da microscopia óptica, pelas quais pode-se determinar o "fábrica" da rocha, seus constituintes primários e secundários, modos de ocorrência e microfissuras.

Lumb, 1962 definiu um índice denominado por *grau de decomposição* (Xd):

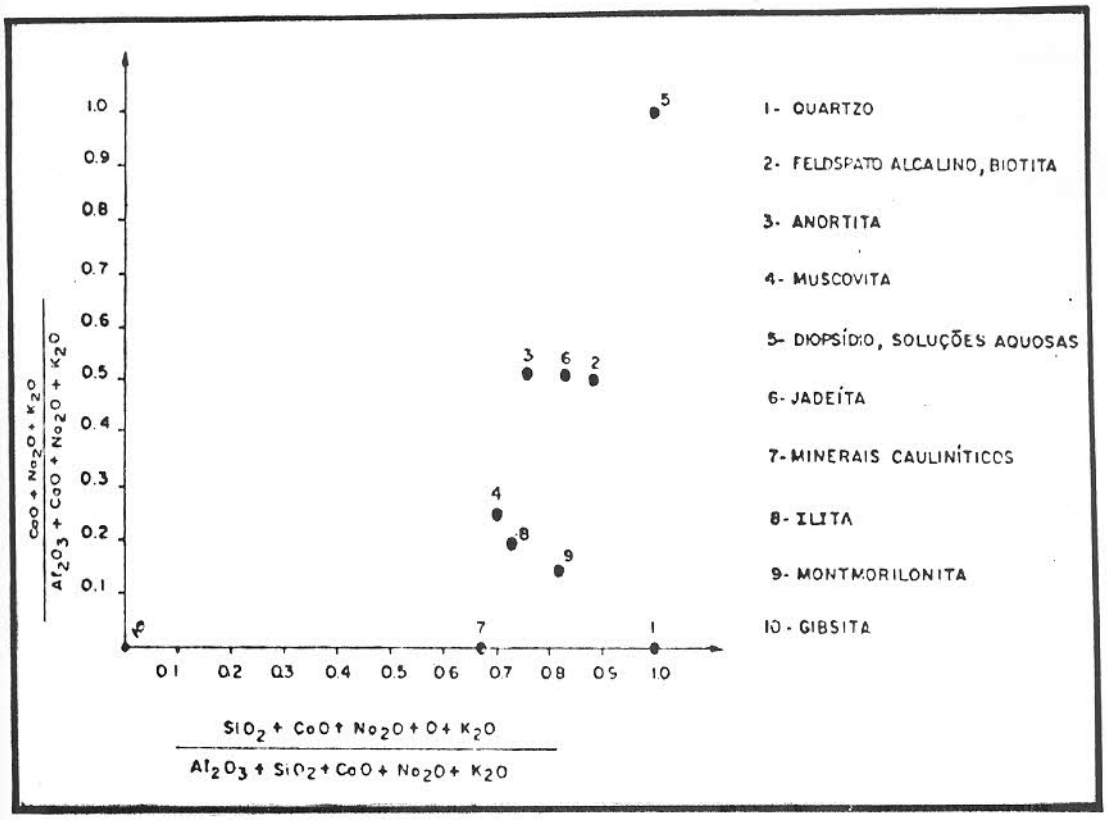


Figura1. Diagrama de intemperismo mostrando a distribuição dos minerais, segundo Kronberg e Nesbitt, 1981 (apud Almeida, 1987).

$$Xd = \frac{(Nq - Nqo)}{(1 - Nqo)} \qquad 0 < Xd < 1 \quad \text{onde,}$$

Nqo - é a relação do peso do quartzo e o peso do quartzo mais o feldspato da rocha sã ;

Nq - é a relação do peso do quartzo e o peso do quartzo mais o feldspato da amostra (solo).

Este índice foi proposto a partir do estudo das propriedades de um granito decomposto de uma região de Hong Kong. O valor de Nq é determinado separando-se os grãos (fração retida na BSS 100), manualmente, através de uma lupa binocular, e pesando-se em seguida. Uma média, aproximadamente 1/3 do valor, é tomado para Nqo, pois , naturalmente, é impossível se saber ao certo o peso do quartzo na amostra original.

Aires Barros, 1969 (apud Frazão 1993), apresenta o *índice micropetrográfico de alteração* :

$$Kp = \frac{\%\ \text{minerais sãos}}{\%\ \text{minerais alterados} + \%\ \text{minerais secundários} + \%\ \text{vazios}}$$

quanto maior o valor de Kp, menor o grau de alteração. O autor relaciona o índice com o módulo de elasticidade de rochas graníticas, mostrando haver correlação, embora fraca.

O índice de alteração denominado por *densidade de microfissuras* foi proposto por Onodera et alii (**1974**) e é definido pela expressão:

$$\rho cr = \frac{100 \times \text{dimensão total da largura de microfissuras}}{\text{comprimento da linha medida}}$$

Este índice foi definido a partir de estudos petrográficos de

lâminas de rochas graníticas e sua relação com a porosidade efetiva é mostrada na Figura 2 .

Irfan e Dearman, 1978b (apud Almeida, 1987), apresentam os seguintes índices petrográficos de alteração:

a) *índice micropetrográfico*

Ip = % constituintes inalterados / % constituintes alterados

Esta relação mostra que, quanto maior o valor de Ip, maior será o grau de sanidade da rocha.

b) *índice de microfratura*

Ift = No / 10mm sendo,

No = número de microfraturas considerando uma linha transversal da lâmina.

O índice total de microfraturas (Ift) pode ser dividido em : índice de microfraturas alteradas e índice de microfraturas sãs. O valor do Ift aumenta com o processo de intemperismo.

A partir de análises petrográficas em granitos e gnaisses, Catroli, **1979** (apud Almeida, 1987), definiu três índices de alteração:

a) *índice de alteração em relação aos plagioclásios*

Ipp = % de plag. inalterados / % de plag. alterados

b) *índice de alteração em relação aos alcali-feldspatos*

$$Ipa = \frac{\text{\% alcali-feldspatos inalterados}}{\text{\% alcali-feldspatos alterados}}$$

c) *índice de alteração em relação aos feldspatos*

Ifp = % de feldspatos inalterados / % de feldspatos alterado

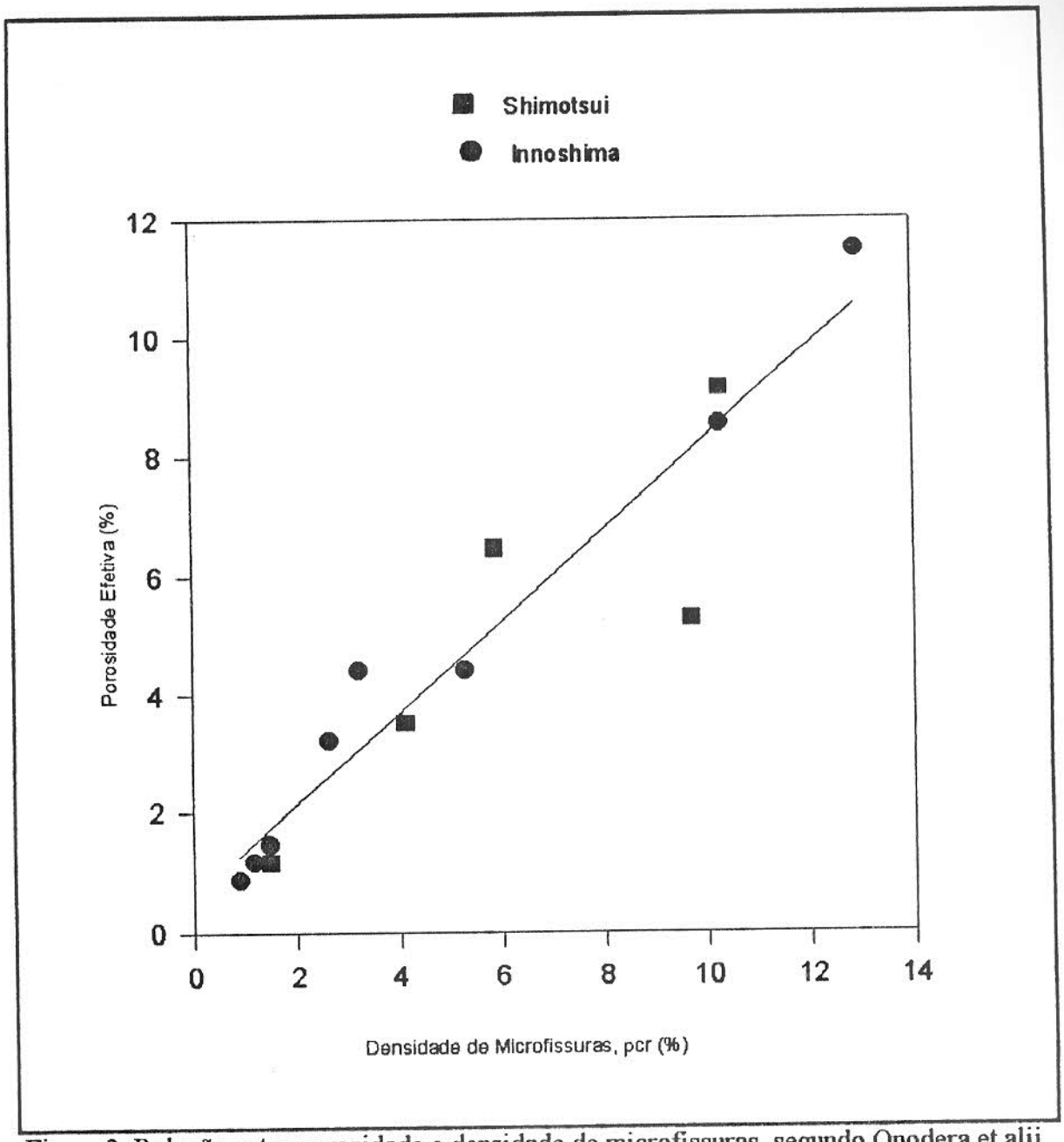


Figura 2. Relação entre porosidade e densidade de microfissuras, segundo Onodera et alii (1974).

Dapena e Uriel (1982) a partir de um estudo com 10 amostras de granito definiram dois índices petrográficos de alteração:

a) *índice de fissuração do mineral*

Este índice está relacionado com o tipo de microfissura observada. O estato de fissuração de cada cristal é classificado em 5 categorias, assumindo os números-índice de 0 a 4 (Figura 3), seguindo o critério de Esbert e Ordaz (1975) utilizado em cristais de quartzo.

b) *índice de transformação do mineral*

Este índice é também classificado em 5 categorias (0-4), de acordo com a proporção de superfície transformada em relação à superfície total observada no microscópio petrográfico. O estado de transformação do mineral é também representado por uma média dos índices definidos para cada cristal. A Figura 4 apresenta as cinco categorias definidas para este índice.

O maior valor entre os dois índices é denominado *índice de alteração do mineral*. Este, multiplicado por 25 (vinte e cinco) é denominado *grau de alteração mineral* (D.M.A.). O *grau de alteração mineral ponderado* (D.R.A.) é obtido a partir da multiplicação do D.M.A. pela percentagem do mineral na composição total, dividido por 100.

Christaras et alii (1991) propõem um índice de alteração denominado W.I., baseado na porcentagem de minerais secundários e microfissuras. Esse índice foi proposto com base em estudos com granitos e é definido pela expressão:

$$W.I. = \frac{\text{\% de minerais alterados + microfissuras}}{\text{\% de minerais não alterados}}$$

CARACTERÍSTICAS DA MICROFISSURAÇÃO DO CRISTAL				ÍNDICE DE FISSURAÇÃO
DENSIDADE	TAMANHO	INTERLIGAÇÕES	SUBINDIVIDUALIZAÇÃO	
NENHUMA	-	-	-	0
BAIXA	MENOR	NÃO	NÃO	1
BAIXA	MESMO	NÃO	NÃO	2
ALTA	MAIOR	SIM	NÃO	3
ALTA	MAIOR	SIM	SIM	4

Figura 3. Determinação do *Índice de Fissuração* para cada cristal de acordo com o tipo de microfissuras, segundo Uriel e Dapena (1982).

% DO CRISTAL QUE APARECE TRANSFORMADA	ÍNDICE DE TRANSFORMAÇÃO
0	0
0 - 25	1
25 - 50	2
50 - 75	3
75 - 100	4

Figura 4. Determinação do *Índice de Transformação* para cada cristal de acordo com a proporção de superfície transformada, segundo Uriel e Dapena (1982).

3.4- Índices Petrográficos/Climáticos

Weinert, 1964 e 1968 (apud Yoshida, 1972) estabelece um fator climático N, que representa a expressão numérica das condições climáticas de uma determinada área. Este fator é obtido relacionando-se a evapotranspiração do mês de maior pluviosidade com a precipitação anual. Este fator climático é posteriormente relacionado à porcentagem de minerais secundários. Os resultados obtidos se aplicam às finalidades rodoviárias.

3.5- Índices Geomecânicos

Esses índices fazem referência às propriedades mecânicas da rocha em vários estágios de alteração, que podem ser expressos através do módulo de elasticidade, resistência à compressão simples e resistência ao cisalhamento.

Ladeira e Minette (1984 c) apresentam os seguintes índices geomecânicos para a caracterização do estado de alteração das rochas:

a) *índice de elasticidade* (I_E)

Este índice é definido pela seguinte equação:

$$I_E = \frac{E_o - E_w}{E_o} \qquad \text{com} \qquad 0 < I_E < 1$$

E_o - módulo de elasticidade da rocha sã;

E_w - módulo de elasticidade da rocha alterada.

O valor de $I_E = 0$ indica uma rocha sem alteração ($E_w = E_o$) e o valor 1, indica uma rocha completamente alterada ($E_w = 0$).

O módulo de elasticidade das rochas diminui com o seu grau de alteração.

b) *índice de resistência* (I_R)

Este índice é definido pela seguinte equação:

$$I_R = \frac{R_o - R_w}{R_o} \quad \text{com} \quad 0 < I_R < 1$$

R_o - resistência à compressão simples da rocha sã,

R_w - resistência à compressão simples da rocha alterada.

Valor de $I_R=0$ indica uma rocha sem alteração ($R_w = R_o$) e o valor 1 indica uma rocha completamente alterada ($R_w = 0$).

A resistência de uma rocha diminui com o grau de alteração.

c) *índice de cisalhamento* (I_s)

Este índice é definido pela expressão abaixo:

$$I_s = \frac{S_o - S_w}{S_o} \quad \text{com} \quad 0 < I_s < 1$$

S_o - resistência ao cisalhamento da rocha sã

S_w - resistência ao cisalhamento da rocha alterada

O valor $I_s=0$ indica uma rocha sem alteração ($S_w = S_o$) e o valor 1 indica uma rocha completamente alterada ($S_w = 0$).

A resistência ao cisalhamento diminui com o grau de alteração da rocha.

Irfan & Dearman (1978) apresentam valores da resistência a compressão simples, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, para um granito e m cinco estágios diferentes de alteração. Esses valores comportam-se de forma decrescente com o processo de alteração.

4. ALTERABILIDADE DE ROCHAS

O termo alterabilidade tem sido definido por diversos autores, dentre eles: Struillou (1969), Nascimento (1970), Delgado Rodrigues (1978) e Ladeira & Minette (1984a) como sendo "a taxa de evolução do estado de alteração da rocha". Tomando-se o parâmetro i para caracterizar o estado de alteração, chamar-se-á alterabilidade j a relação:

$$j = \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Sendo Δi a variação sofrida pelo parâmetro i no intervalo de tempo t. A alterabilidade terá um valor numérico se o parâmetro i puder ser quantificado, e se a variação do seu valor no intervalo de tempo Δt atingir um valor mensurável (Delgado Rodrigues, 1978).

O interesse na quantificação da alterabilidade está no cálculo do tempo de ruína da obra. Se a alterabilidade for constante ao longo de toda a vida da obra (o que se considera apenas como uma primeira aproximação) e se "io" e "ir" forem os estados de alteração inicial e na ruína, ter-se-ia que o tempo de ruína da obra, seria dado por:

$$tr = \frac{io - ir}{j}$$

Portanto, como é evidente, quanto maior for a alterabilidade, menor será o tempo de ruína da obra (Nascimento, 1970).

4.1- Avaliação da Alterabilidade

Hamrol, 1962 (apud Yoshida,1972), obtém a alterabilidade das rochas através da divisão da mudança de dois parâmetros definidos como iI e iII pelo intervalo de tempo considerado, sendo:

iI= (peso saturado - peso seco / peso seco) x 100, o valor numérico deste parâmetro é a % de água absorvida pela rocha em ensaio de absorção, dividida pelo seu peso seco

iII= (α x + α y + α z) x 100 onde,

α x, α y e α z são as dimensões lineares das aberturas de diaclases ao longo de três eixos ortogonais, pela unidade de comprimento, a grosso modo seria o índice de vazios.

Farran e Thenoz (1965) avaliam a alterabilidade pela alterabilidade específica da rocha, que é a relação entre a porcentagem de argilominerais expansivos e a velocidade de alteração, definida pela expressão: % de perda de peso/ tempo.

Talobre, 1967 (apud Yoshida, 1972) sugere um ensaio de alteração acelerada em laboratório, como critério de avaliação da alterabilidade de rochas. O ensaio consiste no ataque, por meio de ácido sulfúrico 10% a quente, a corpos de prova cilíndricos e a rocha pulverizada. As perdas de peso das rochas em pó e dos corpos de prova cilíndricos são determinadas após 1h, 3h, 5h e 7h de ataque. São considerados como admissíveis num período de 7 horas, perdas máximas de 18% para amostras em pó e de 100g para corpos de prova cilíndricos.

Struillou (1969) propõe procedimentos específicos na avaliação da alterabilidade, para cada tipo de degradação:

- condições de dissoluções sofridas por materiais silicáticos

ácidos em meios: complexantes, ácidos, básicos e laterizantes;

- condições de lixiviação "supostas perigosas" ;
- condições de degradações ligadas à expansões.

Farjallat (1971) propõe uma avaliação da alterabilidade com ensaios de lixiviação contínua (alteração) e Los Angeles (mecânico) para amostras da Barragem de Capivara (Rio Paranapanema). Define o coeficiente de alterabilidade como:

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

Sendo :

I - valor "Los Angeles" no tempo inicial do intervalo de tempo Δt, mais percentagem desagregada até então;

F - valor "Los Angeles" no tempo final do intervalo de tempo Δt, mais percentagem desagregada até então.

Esse critério procura compatibilizar os valores de perdas na ciclagem com os de abrasão. Dessa forma, uma rocha que, por exemplo, apresente 100% de perdas de ciclagem tenderia a apresentar 100% de perdas por abrasão ou vice-versa. Por essa razão é adotado o número 200, o qual significa a soma dos limites máximos de perdas, o que equivale ao máximo enfraquecimento da rocha no processo de alteração. Quanto maior o valor de K, maior a alterabilidade da rocha.

Yoshida (1972) propõe uma variante do índice proposto acima:

$$Rf = \frac{(100-P)\ R}{100}$$

onde:

100 = limite para % máxima de perdas;

Rf = índice de resistência à alteração;

P = % de perdas em um dado intervalo de tempo (ou a um dado estado de alteração);

R = resistência mecânica do material a um dado tempo (ou a um dado estado de alteração);

Este índice varia de zero (rocha totalmente alterada) a R (rocha sã ou em um certo estado de alteração).

Yoshida (1972) propõe, ainda, calcular a queda percentual de resistência, em relação à resistência mecânica inicial, para o intervalo de tempo considerado, através da seguinte expressão:

$$\Delta R = \frac{Ri - Rf}{Ri} \times 100$$

onde:

ΔR = queda percentual de resistência (%);

Ri = resistência mecânica inicial (%);

Rf = resistência mecânica ao final do intervalo de tempo considerado (%).

O intervalo de ΔR varia de zero (ausênsia de queda de resistência) a 100 (queda total de resistência).

Rocha, 1971 (apud Yoshida, 1972), propõe uma técnica que consiste em moer a rocha, para uma dada granulometria, e submetê-la a percolação contínua de água no extrator Soxhlet. Toma-se como critério de alterabilidade a perda em peso da rocha num dado tempo de ensaio.

Buzatti (1975,1987) apud Frazão, 1993 propõe o índice de degradação - ID - para avaliar a alterabilidade e utiliza o ensaio "Los Angeles" como parâmetro mecânico. Este índice é definido pelo somatório dos afastamentos, em percentagem acumulada em cada

peneira, em relação à distribuição granulométrica da própria graduação de abrasão "Los Angeles". É expresso da seguinte forma:

$$ID = \frac{\Sigma \Delta i}{N}$$

onde:

ID= índice de degradação;

Δi= afastamento da curva para a peneira considerada;

N = quantidade de peneiras da graduação escolhida.

Delgado Rodrigues(1978)consegue resultados quantitativos para a alterabilidade, a partir do estudo da variação da velocidade de propagação de ondas logitudinais com o tempo:

$$\frac{VLi - VLf}{18 \text{ anos}} = \text{Alterabilidade média para os blocos em m/s/ano}$$

Os blocos ficaram expostos nas ruas por 18 anos.

Aires Barros (1978) faz um estudo comparativo entre índices de alteração obtidos para amostras de rochas submetidas a ensaios de laboratório e para amostras não submetidas. O índice de alterabilidade é definido pela seguinte expressão:

$$K = K_{min} + g_j K_{min}$$

K = índice de alterabilidade

K_{min} = densidade da rochas nos diferentes estágios de alteração

g_j = quantidade de óxidos lixiviados (dados obtidos em tabela)

As conclusões apresentadas foram as seguintes:

- $K_{(SR)}$ lab. úmido = $K_{(MAR)}$ natural

SR - rocha sã
MAR - parcialmente alt.
VAR - muito alterada

- $K_{(MAR)}$ lab. seco = $K_{(VAR)}$ natural

Ladeira e Minette (1984a) propõem uma metodologia para a quantificação da alterabilidade para qualquer tipo de rocha. Em uma exemplificação da metodologia com amostras de diorito, os autores utilizam como índice de alteração o I_E (Módulo de Elasticidade) e como ensaio de envelhecimento o extrator Soxhlet. A metodologia é transcrita a seguir:

"1- Coletar rocha em diferentes estágios visuais de alteração e determinar o índice de alteração natural para cada estágio, a partir, evidentemente da rocha mais sã, encontrada no local; supondo que a rocha se encontra nos estágios A, B e C de alteração, determina-se por exemplo o índice de Resistência(I_R), com base na rocha visualmente mais sã, encontrada no local;

2- Colocar pedaços de rocha (britas ou corpos de prova) com os estados de alteração pré-determinados em:

a) exposição aos agentes atmosféricos,

b) ensaios de alteração laboratorial acelerada; a exposição aos agentes atmosféricos deve ser de pelo menos 6 (seis) meses, em clima tropical úmido, para levar a rocha de A para A´, de B para B´ e de C para C´, no caso de três diferentes estágios de alteração; os ensaios de alteração acelerada deverão produzir a curva completa de alteração (a partir de um certo estágio) ou então uma curva que apresente pelo menos uma redução de 60 a 80% do valo inicial, de uma determinada propriedade (resistência à compressão simples, por exemplo); à medida que o ensaio de

alteração laboratorial acelerada prossegue devem-se ensaiar a cada número pré-fixado de ciclos, corpos de prova para determinar a propriedade de interesse;

3- Calcular o índice de alteração natural para essa propriedade e calcular a velocidade de alteração natural anual (V_{NW}) ao final de seis ou mais meses, para cada estágio e verificar, se para o maciço rochoso interessa utilizar a velocidade mínima, máxima, intermediária ou a média das velocidades; por vezes interessa utilizar mais que uma velocidade, porque após um mapeamento do maciço, podem existir zonas destes, com diferentes estágios de alteração; esta decisão é extremamente importante para a quantificação da alterabilidade.

4- Determinar o índice de alteração laboratorial para aquela propriedade, em cada número de ciclos pré-estabelecido e plotar num sistema de eixos retangulares esse índice em ordenadas e o número de ciclos em abcissas; plotar a curva que melhor se ajuste aos dados obtidos; a precisão do traçado da curva, influência grandemente o resultado da quantificação da alterabilidade;

5- Marcar na curva experimental a variação anual da velocidade de alteração natural dessa rocha e tomar nota do número de ciclos correspondentes na abcissa; é de extrema importância não esquecer a velocidade considerada, para saber qual o trecho da curva que interessa considerar;

6- Calcular para os restantes ciclos realizados, o número de anos que a rocha foi submetida a ensaio laboratorial e plotar abaixo do eixo das abcissas um novo eixo dos tempos, em anos. Ter-se-á assim quantificada a alterabilidade de uma rocha."

Frazão (1986) executa uma revisão dos estudos de alterabilidade de rochas basálticas, bem como a aplicação de metodologia de ensaio de alteração, desenvolvida no IPT na década de 70. A metodologia foi aplicada aos basaltos da obra de Três Irmãos e permitiu, através de ensaios de alteração água-estufa, acompanhados de ensaios de abrasão "Los Angeles", discriminar 4 tipos litológicos quanto à sua potencialidade de desagregação. A quantificação da alterabilidade foi determinada pelo "Coeficiente de Alterabilidade" proposto por Farjallat, 1971.

Frazão (1993) testa índices para a previsão da alterabilidade propostos por Farjallat (1971), Yoshida (1972), Buzatti (1975 e 1987) e um índice baseado no módulo de finura e sugere uma metodologia de ensaios, baseada em critérios já rotineiros, como meio de previsão da alterabilidade.

5. ESTUDO EXPERIMENTAL

A etapa experimental deste trabalho visa avaliar a alterabilidade de uma rocha basáltica, da Formação Serra Geral (J-K), coletada na Pedreira Bandeirantes situada no Jd. Beatriz, Município de São Carlos (SP). A maior parte da produção da pedreira (65%) é destinada ao consumo da pavimentadora pertencente a mesma.

A metodologia utilizada segue todas as etapas apresentadas no trabalho de Ladeira e Minette (1984a) para a avaliação da alterabilidade de rochas, etapas estas, mostradas a seguir:

1- Coleta de rocha em diferentes graus visuais de alteração e determinação do índice de alteração natural para cada estágio, a partir da rocha mais sã encontrada no local. Foram coletados dois tipos de basaltos denominados por A e B:

tipo A - fragmentos coletados diretamente na pilha do britador para "pedra 3"(Figura 5 e 6) que foram denominados de "sãos".

tipo B - amostras de mão, com dimensões aproximadas de 12x4x6cm, coletadas em pilha de rejeito (Figura 7) que foram denominadas de "alteradas". O material da pilha de rejeito já se encontrava em exposição natural por um tempo de aproximadamente 4 anos.

O local de onde foi retirado o basalto tipo B, denominado por "moleira", posiciona-se na porção superior do maciço rochoso (Figura 8). Pode-se observar nesta parte do maciço pequenos blocos de rocha empilhados, que mantém a estrutura original. Devido a estas características pode-se posicionar esta porção dentro de um esquema sintético dos principais níveis de alteração

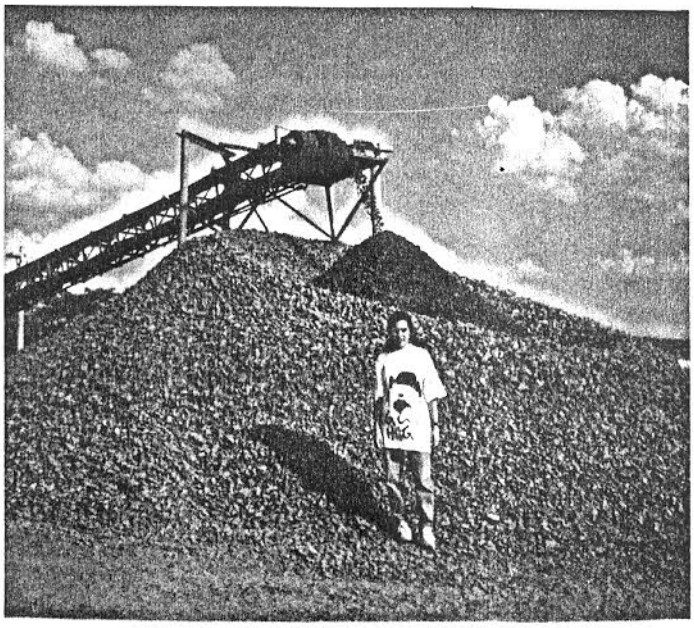


Figura 5. Pilha de brita 3 (basalto tipo A).

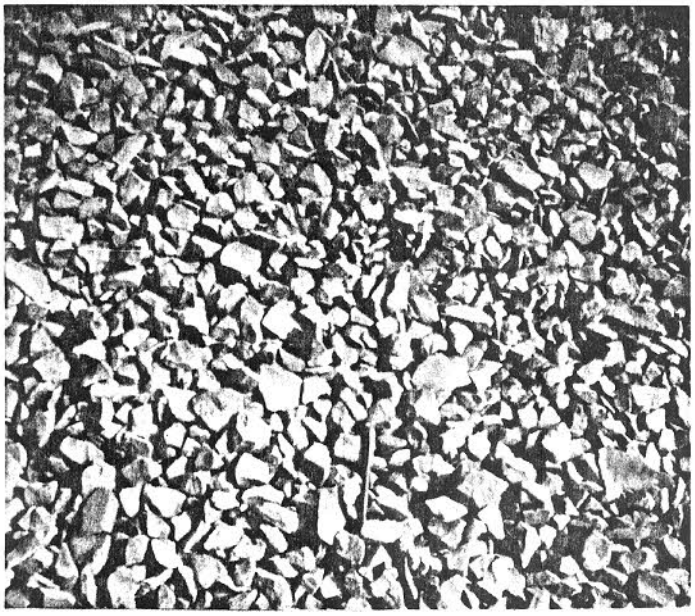


Figura 6. Detalhe do basalto tipo A.

Figura 7. Pilha de rejeito de onde foram coletadas as amostras de basalto tipo B.

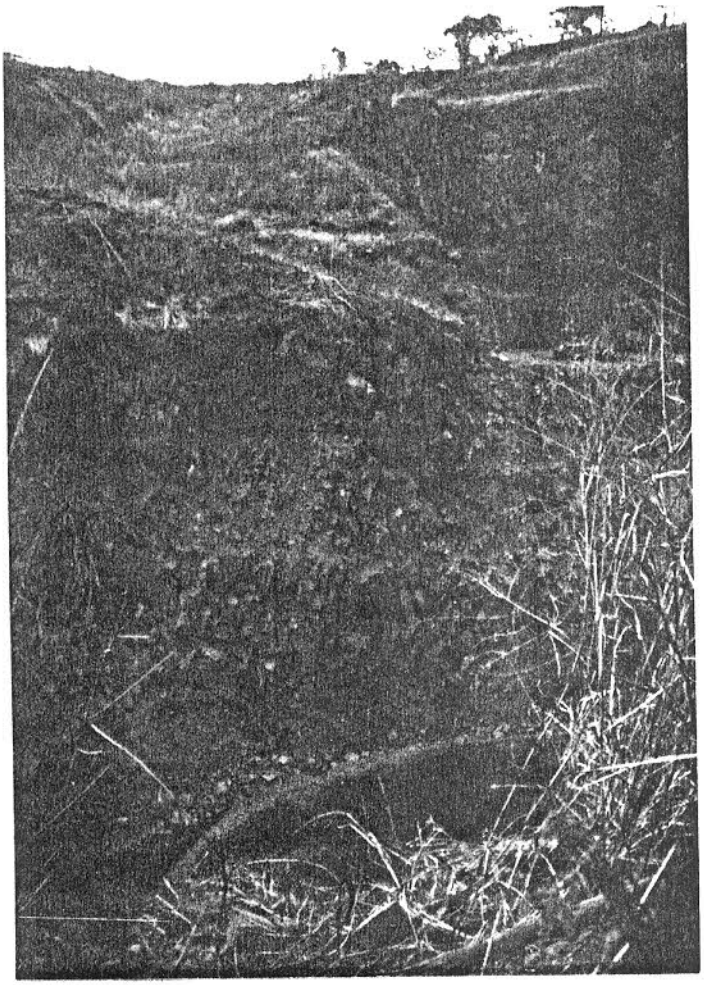


Figura 8. Porção do maciço rochoso denominada por *moleira*.

e pedogênese de rochas básicas, apresentado por Gonçalves (1987)em um estudo feito na região de Ribeirão Preto (SP) -Fig.9. Dentre os níveis descritos, a "moleira" pode ser relacionada com o primeiro nível de alteração do esquema, observado sobre a "rocha-mãe". A caracterização destas amostras se encontra no Capítulo 6.

Após a coleta, os basaltos A e B foram reduzidos manualmente à dimensões entre 19mm e 16mm - ABNT NBR 5734 (EB22) para o ensaio de impacto "Treton" (ABNT MB 964).

Este ensaio foi escolhido, como parâmetro mecânico, pelas seguintes razões:

- por ser bastante conhecido e utilizado em especificações para aprovação de agregados rochosos para pavimentação e concreto (caso do material estudado neste trabalho);
- por ser de fácil execução ;
- por fornecer um índice sensível às variações do estado de alteração de rochas basálticas como já demonstrado em trabalhos anteriores, como por exemplo, Yoshida (1972).

Considerando o basalto tipo A como rocha sã, foram determinados dois índices de alteração, o índice de resistência ao impacto "Treton" (I_{rt}) e o índice de perda de massa (I_{wL}). A forma para o cálculo destes índices já foi descrita no Capítulo 3.

3- Os fragmentos dos basaltos tipo A e B, com dimensões entre 19mm e 16mm e com o estado de alteração pré-determinado através dos índices Irt e IwL, foram submetidos a:

a) exposição aos agentes atmosféricos (ensaio de meteorização - CESP MRL-01). Usou-se na exposição natural aproximadamente 180 fragmentos do Basalto A e o mesmo número do basalto

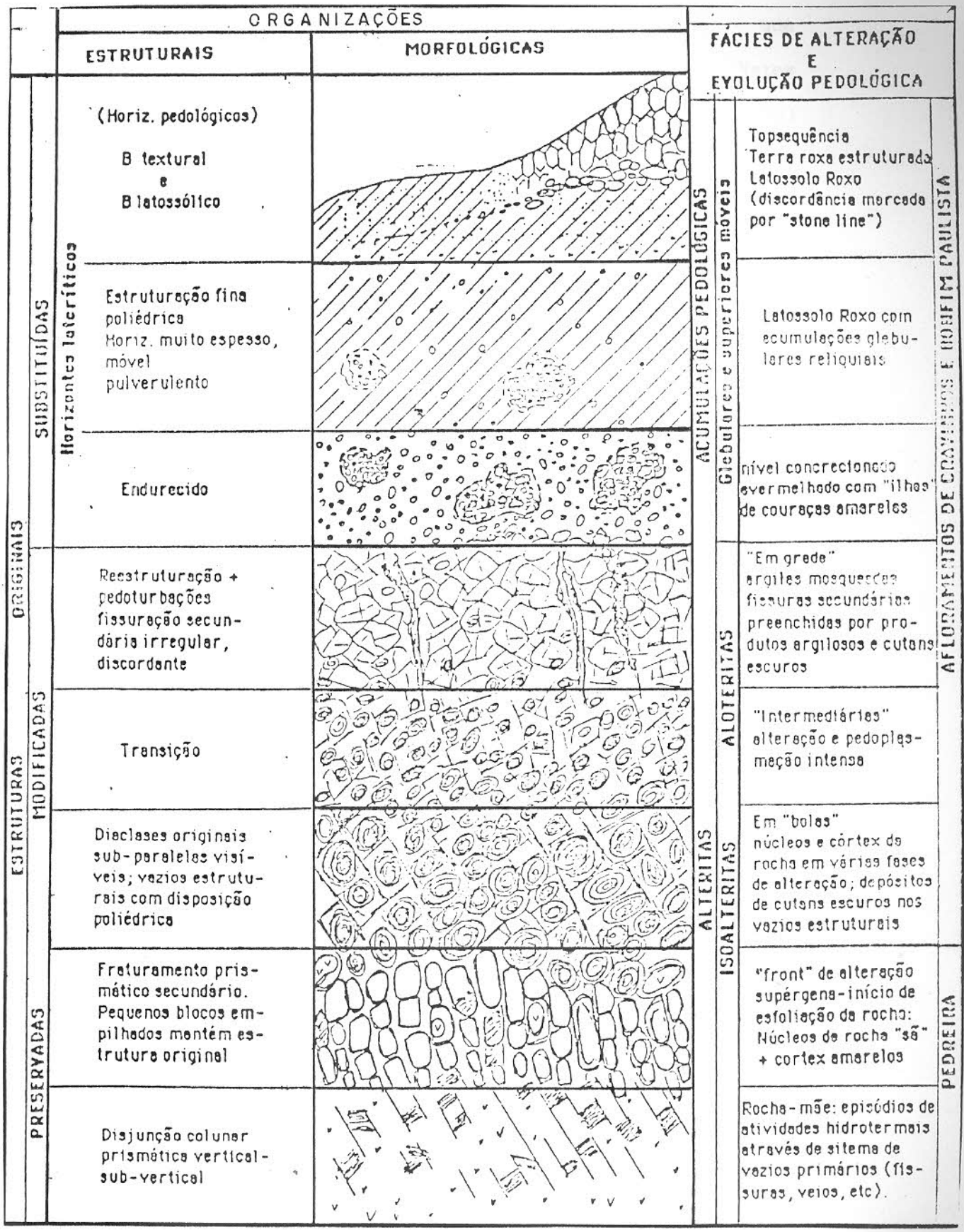


Figura 9. Esquema sintético dos principais níveis de alteração e pedogênese sobre rochas básicas - Ribeirão Preto. Perfil laterítico completo, segundo Gonçalves (1987).

tipo B. Cada porção de 180 fragmentos foi subdividida em duas outras porções de aproximadamente 90 fragmentos, que tiveram seus pesos previamente determinados. Estes fragmentos foram colocados dentro de uma gaiola (Figura 10) que possuía seu fundo coberto por uma tela com diâmetro de aproximadamente 5mm (Figura 11) para que não houvesse perda de fragmentos.A princípio, o objetivo era fazer-se duas determinações os índices de alteração durante o ensaio de meteorização, uma, próxima de 12 meses (realizada aos 9 meses de ensaio) e outra, aos 18 meses (não realizada). O esquema utilizado na separação dos fragmentos para os ensaios de meteorização e de alteração acelerada (descrito a seguir) pode ser observado na Figura 12.

b) ensaio de alteração laboratorial acelerada . Foi escolhido o de saturação em água e secagem em estufa (CESP MRL-02). Foram ensaiados o mesmo número de fragmentos para os tipos A e B, 360 fragmentos para cada tipo de basalto. Esses fragmentos,como no ensaio anterior, também possuíam as dimensões exigidas para a execução do ensaio de impacto " Treton" . Os 360 fragmentos do basalto A foram divididos em 4 porções, separadas em redes de arame, como mostra a Figura 13 . O mesmo procedimento foi adotado para os fragmentos do basalto B (Figura 14). A escolha deste ensaio de alteração se deve a sua facilidade de execução e por permitir boa simulação das condições naturais.

4- Cálculo dos índices de alteração natural (I_{WL} e I_{rt}) e velocidade de alteração natural (V_{NW}) aos nove meses de ensaio.

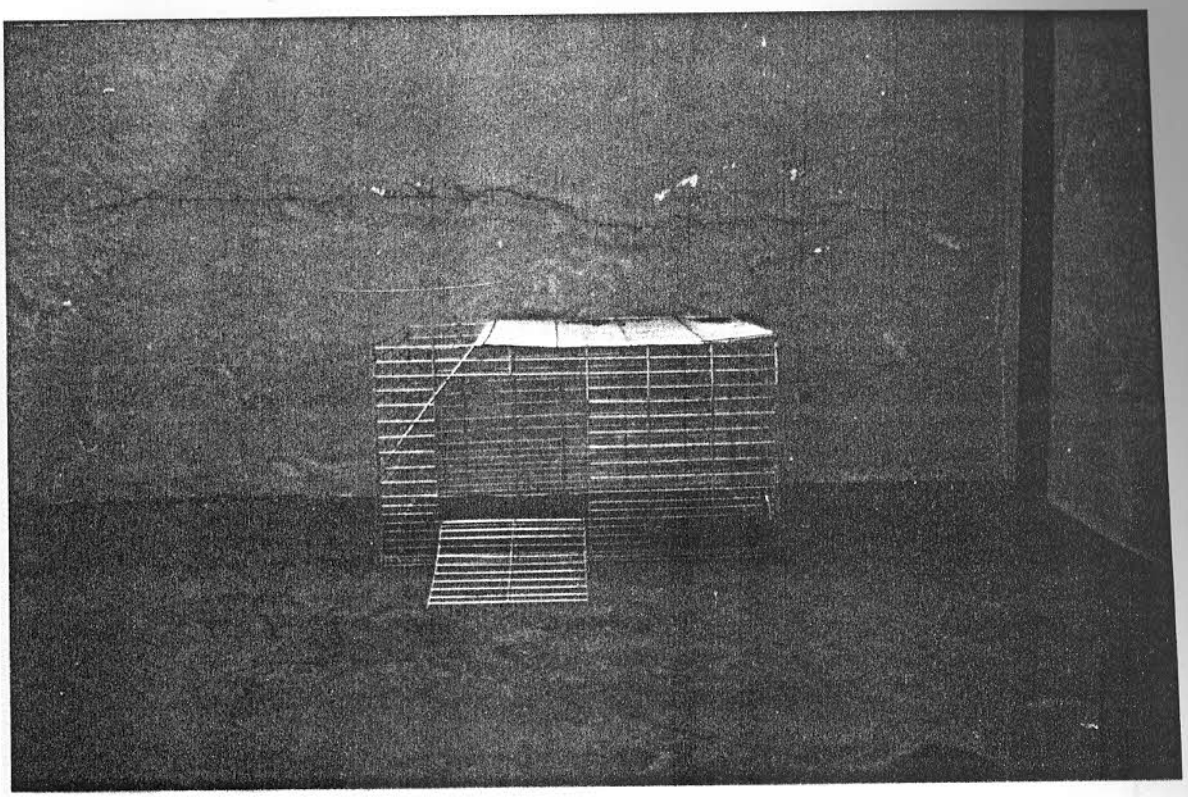


Figura 10. Gaiola utilizada no ensaio de meteorização.

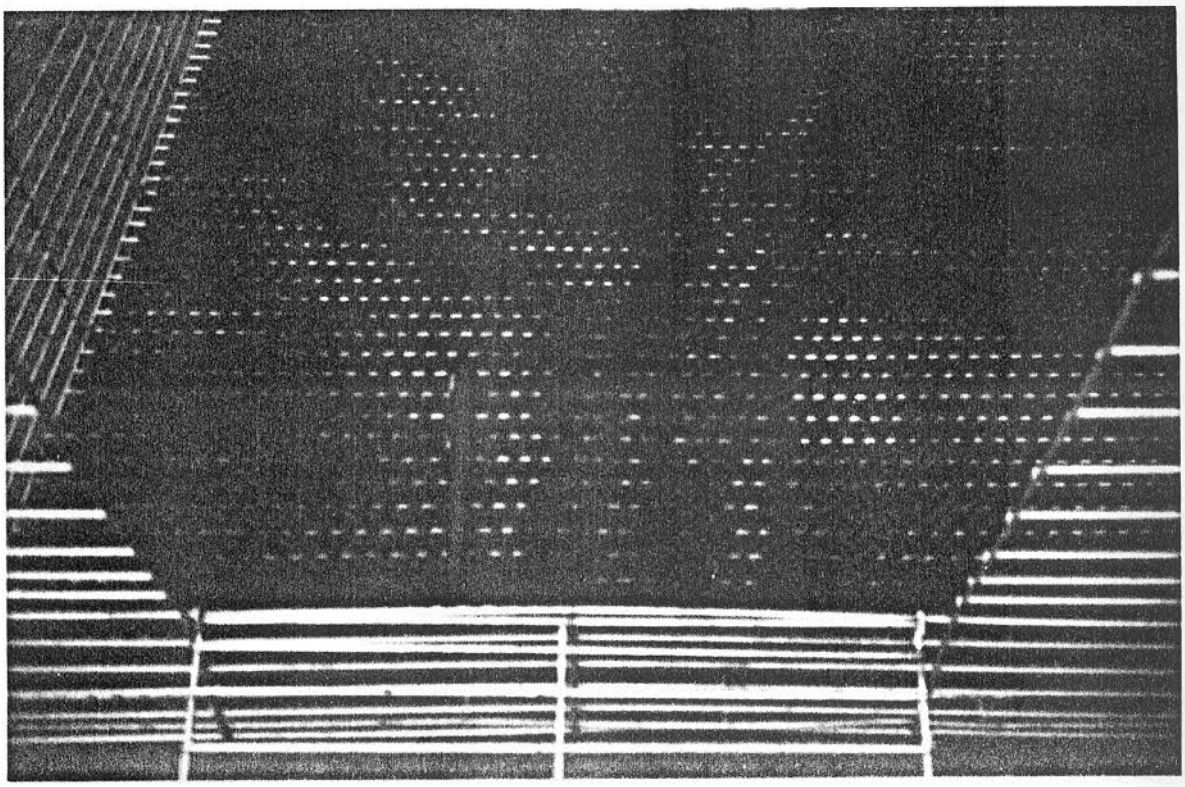
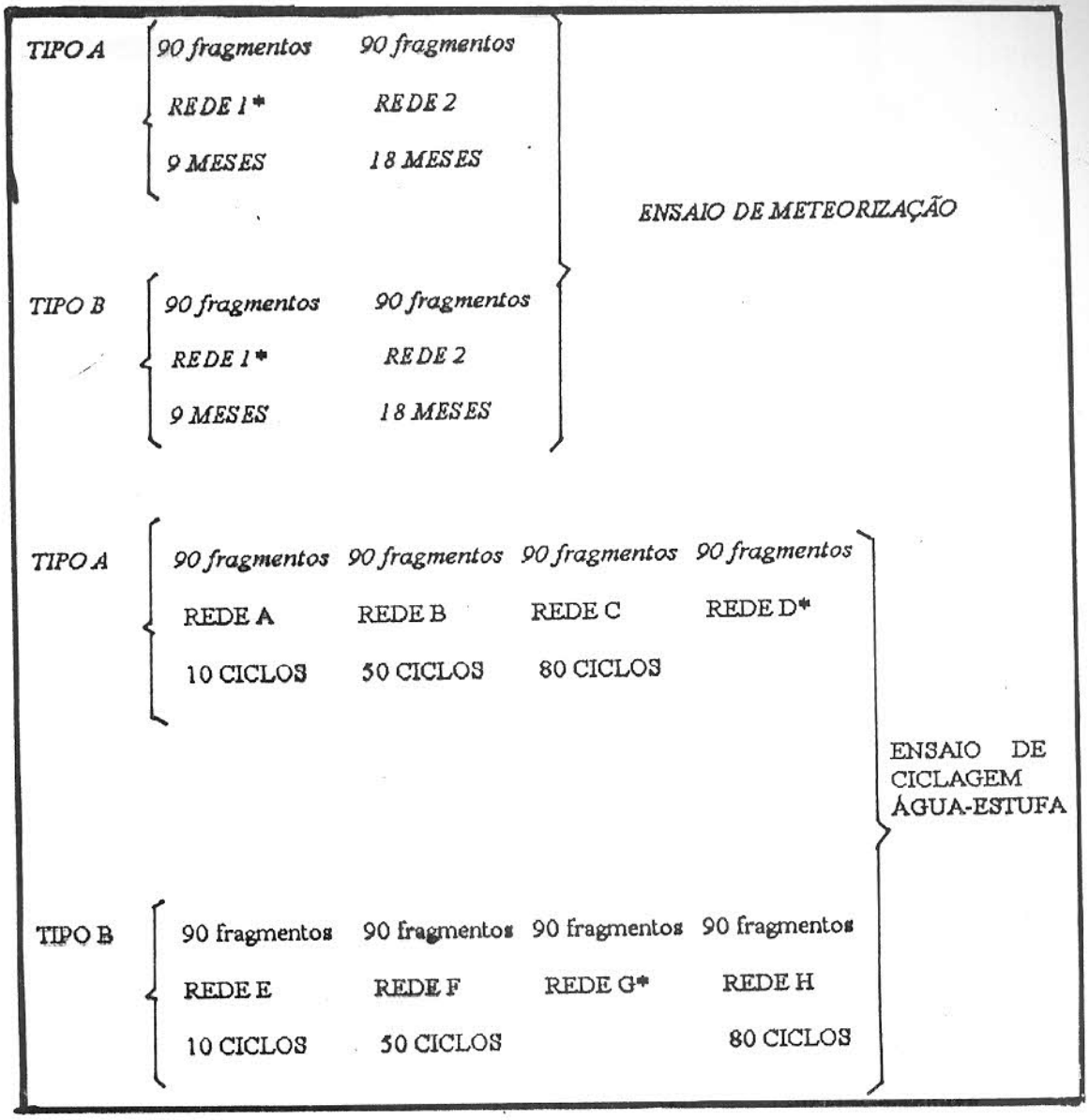


Figura 11. Tela utilizada para cobertura do fundo da gaiola de ensaio.



*** redes utilizadas no cálculo do IWL**

Figura 12. Esquema geral do modo de distribuição das amostras em redes para execução dos ensaios de alteração.

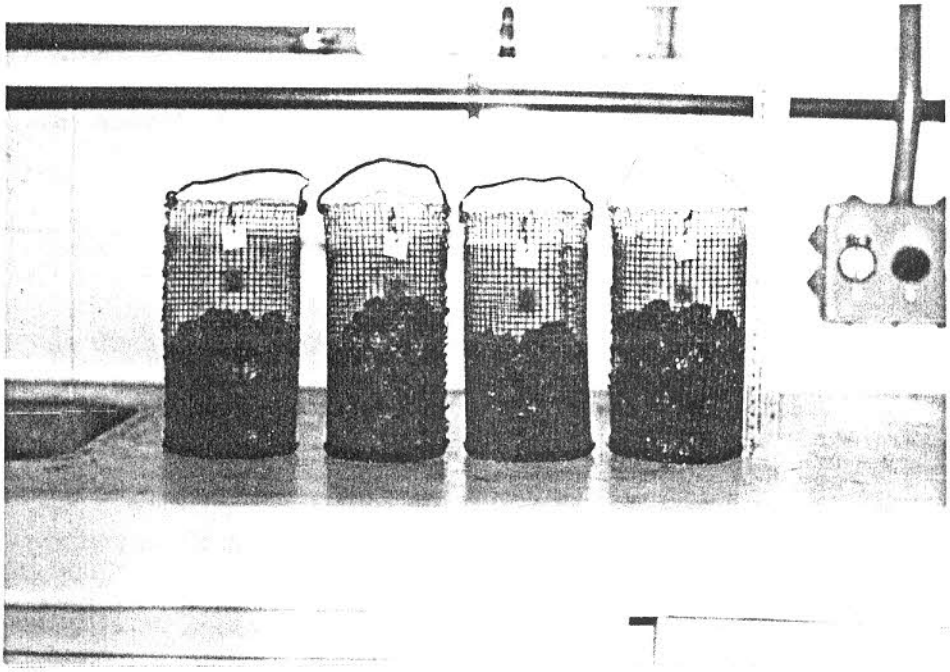


Figura 13. Redes com o basalto tipo A

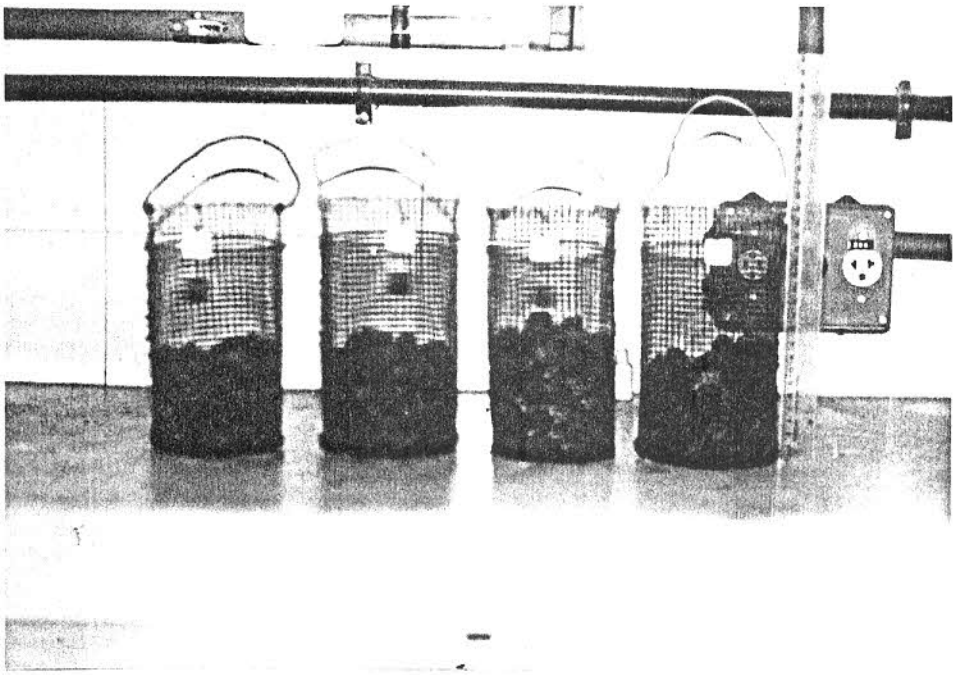


Figura 14. Redes com o basalto tipo B.

5- Cálculo dos índices de alteração acelerada (I_{wL} e I_{rt}) para um determinado número de ciclos(*). Após estes cálculos, os dados foram dispostos num sistema de eixos ortogonais, onde os índices de alteração ocupam as ordenadas e o número de ciclos as abcissas.

(*) número de ciclos referente ao ensaio de saturação em água e secagem em estufa.

6- Obtidas as curvas experimentais (I_{wL} x número de ciclos e I_{rt} x número de ciclos) foram marcadas as variações anuais das velocidades de alteração natural dessa rocha e anotados os números de ciclos correspondentes nas abcissas.

7- Abaixo dos eixos das abcissas foi traçado um eixo dos tempos, em anos, obtendo-se assim, a alterabilidade da rocha.

6. MATERIAL ESTUDADO

6.1- Generalidades

O afloramento que será estudado neste trabalho (Figura 15), pertence à Formação Serra Geral (J-K) e localiza-se no Município de São Carlos - SP, no Jardim Beatriz, e ocupa aproximadamente 9 alqueires (Figura 16).

A Formação Serra Geral compreende um conjunto de derrames basálticos toleíticos entre os quais se intercalam arenitos com as mesmas características dos pertencentes à Formação Botucatu. Associam-se-lhes corpos intrusivos de mesma composição, constituindo sobretudo diques e *sills*. Esta Formação é recoberta em discordância angular, geralmente muito disfarçada, pelas várias formações que constituem o Grupo Bauru, ou depósitos cenozóicos.

A Formação Serra Geral, por sua grande expressão areal e volumétrica, atraiu e continua atraindo a atenção de muitos pesquisadores, das mais variadas áreas de estudo.

Petrograficamente os basaltos da Formação Serra Geral apresentam composição mineralógica muito simples, essencialmente constituídos de labradorita zonada associada a clinopiroxênios (augita e às vezes também pigeonita). Acessoriamente mostram-se titano-magnetita, apatita, quartzo e raramente olivina ou seus produtos de transformação. Matéria vítrea ou produtos de desvitrificação podem ser abundantes, sobretudo às bordas dos derrames. A textura é predominantemente intergranular, fina à muito fina, às vezes microlítica, com estrutura fluidal podendo manifestar-se. Nos diques e *sills* há granulação mais grossa, são holocristalinos e frequentemente apresentam textura ofítica. Nas

EESC - USP Biblioteca Campus de S. Carlos

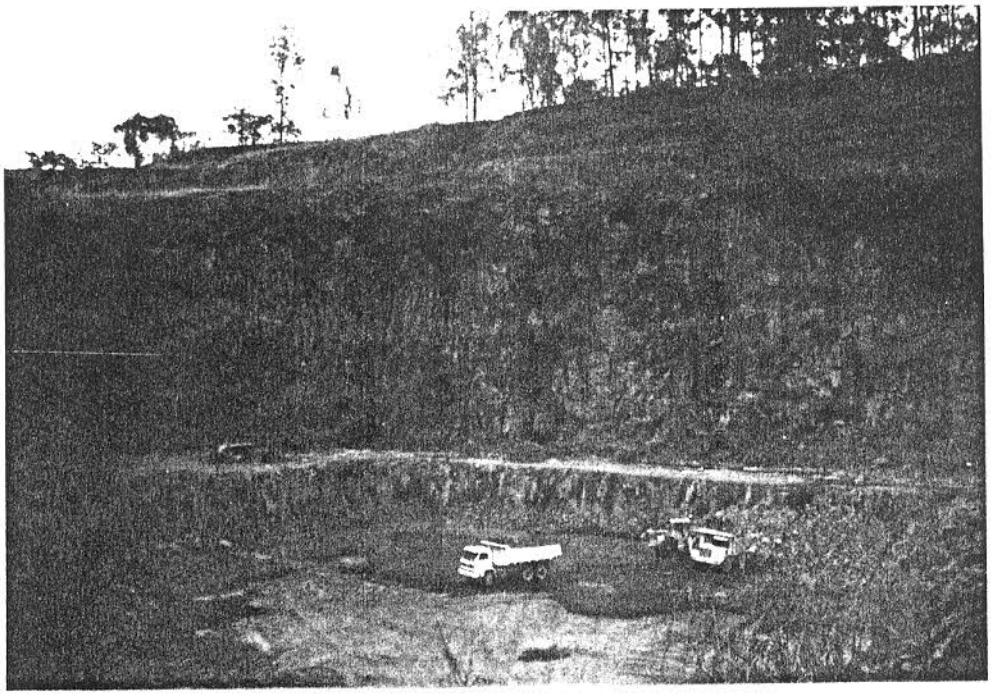


Figura 15- Pedreira Bandeirantes

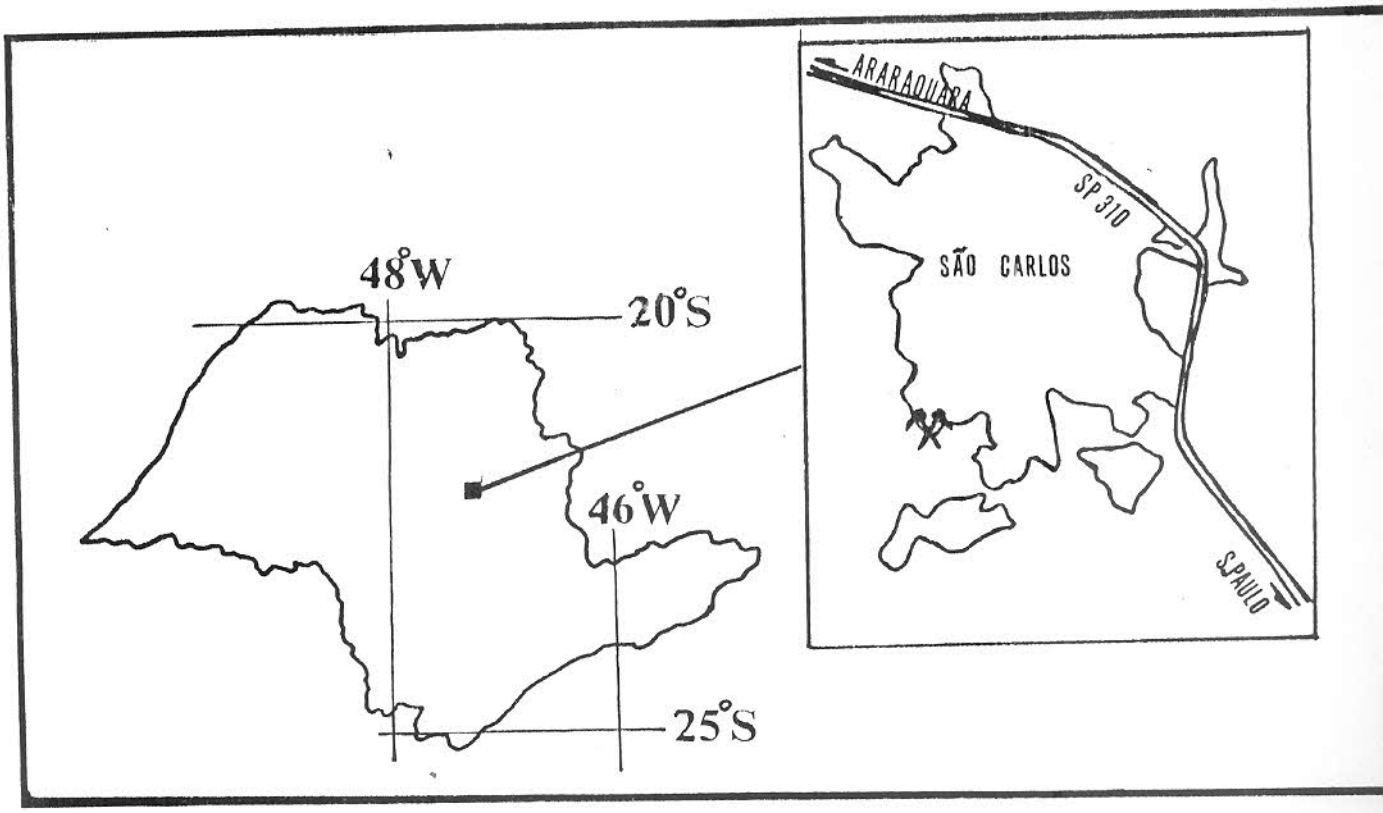


Figura 16- Localização da Pedreira Bandeirantes, no Município de São Carlos (SP).

bordas, contudo, texturas e estruturas semelhantes às dos derrames são às vezes observadas.

Geomorfologicamente os derrames de basalto correspondem à região natural designada, normalmente, por "Planalto Meridional" (Monteiro, 1969 apud Carvalho et alii, 1981), o qual se apresenta ligeiramente inclinado, seja em direção ao rio Paraná, seja em direção ao sul da Bacia. As altitudes vão de 200m nas barrancas do rio Paraná até 1.200m (ou mais ainda na Serra Geral) no Rio Grande do Sul.

6.2- Caracterização das Amostras

6.2.1- Caracterização Petrográfica

O basalto do tipo A é compacto, cinza escuro e o do tipo B é também compacto e sua cor varia de cinza médio a castanho avermelhado.

A análise modal, corresponde à média de três amostras para cada um dos tipos de basalto estudados, é apresentada a seguir:

	A	B
Plagioclásio	49,2%	47,7%
Piroxênio (Augita)	34,9%	32,8%
Opacos	09,0%	10,0%
Argilo-minerais (Esmectitas)	04,0%	08,3%
Apatita	02,9%	01,2%

Os cristais de plagioclásio são ripiformes, microfissurados intragranularmente, em média submilimétricos (0,5mm), podendo ocorrer alguns cristais milimétricos (2mm). A disposição dos cristais é aleatória.

Os cristais de piroxênio variam de anhedrais a subeuhedrais, com formas prismáticas sempre corroídas e não pleocróicos. Os cristais são em média submilimétricos, podendo-se encontrar mega cristais de até 1,5mm.

Os minerais opacos estão associados ao piroxênio com contatos, geralmente, retos.

Os argilo-minerais se apresentam em agregados maciços, verdes constituindo material de preenchimento. Podem estar adjacentes ao piroxênio, preenchendo fraturas ou intersticial ao plagioclásio. O tipo do argilo- mineral foi definido por análise difratométrica.

A apatita aparece como pequenos cristais aciculares ou hexagonais dispostos aleatoriamente, bem distribuídos e abundantes.

Material desvitrificado pode ser observado em algumas lâminas de basalto dos tipos A e B variando entre 1,2% à 6,4%.

Tanto o basalto A como o basalto B apresentam microfissuramento intenso. Todos os minerais presentes na lâmina se mostram microfissurados intragranularmente, indicando grande superfície de contato rocha/fluido. As microfissuras estão preenchidas geralmente por argilo-minerais (do grupo das esmectitas) e são mais desenvolvidas nos piroxênios, porém aparecem em maior número nos plagioclásios. O microfissuramento nos piroxênios facilita o processo de alteração resultando numa decomposição de parcial a total dos cristais que pode ser observada na forma de halos, permanecendo somente os maiores cristais intactos. Nas amostras do basalto A se encontram intactos apenas 17,70% dos cristais de plagioclásio e 4,9% dos cristais de piroxênio e no basalto B, apenas 15,52% dos cristais de plagioclásio e 2,55% dos cristais de

piroxênio estão intactos.

São várias as causas que dão origem ao microfissuramento neste tipo de rocha sendo que o "induzido" através de desmonte torna-se importante, principalmente, por este desmonte visar apenas a maior fragmentação da rocha para maior produtividade. Uma melhor avaliação deste microfissuramento, causado pelo desmonte, poderia ser feita através de ensaios de absorção antes e após a detonação.

6.2.2. Caracterização das propriedades físicas e mecânicas das amostras

As amostras estudadas apresentaram os seguintes resultados após a execução dos ensaios físicos (ABNT, MB-893) e mecânicos preliminares:

amostra	absorção(%)	porosidade(%)	massa esp.ap. seca (kg/m^3)	"Treton"(%) (*)
A	0,516	1,501	2,915	90,44
B	3,175	8,190	2,694	82,55

(*) valor complementar para 100

Seguindo-se um roteiro para avaliação preliminar do estado de alteração e do grau de coerência de rochas, sugerido pelo IPT (1990), podemos classificar os basaltos A e B, respectivamente como (Tabela 2):

tipo A - são (A1) e coerente (C1)

tipo B - medianamente alterado (A3) e de Medianamente coerente (C2) a pouco coerente (C3)

Tabela 2. Roteiro para avaliação preliminar do estado de alteração e do grau de coerência de rochas , segundo IPT (1990).

PARÂMETRO	ROCHA	SIGLA	CARACTERÍSTICA
ALTERAÇÃO	SÃ	A1	MACROSCÓPICAMENTE NÃO HÁ INDÍCIOS DE ALTERAÇÕES FÍSICAS E/OU QUÍMICAS DOS MINERAIS. OS MINERAIS APRESENTAM BRILHO.
	POUCO ALTERADA	A2	A ALTERAÇÃO DOS MINERAIS É INCIPIENTE E, EM GERAL, A ROCHA EXIBE POUCA DESCOLORAÇÃO.
	MEDIANAMENTE ALTERADA	A3	OS MINERAIS SE APRESENTAM MEDIANAMENTE ALTERADOS E GERALMENTE NÃO APRESENTAM BRILHO. ROCHA BASTANTE DESCOLORIDA.
	MUITO ALTERADA	A4	MINERAIS MUITO ALTERADOS, POR VEZES PULVERULENTOS E FRIÁVEIS, TOTALMENTE SEM BRILHO
COERÊNCIA	COERENTE	C1	QUEBRA COM DIFICULDADE AO GOLPE DO MARTELO PRODUZIN-DO POUCOS FRAGMENTOS DE BORDAS CORTANTES. SUPERFÍCIE DIFICILMENTE RISCÁVEL POR LÂMINA DE AÇO.
	MEDIANAMENTE COERENTE	C2	QUEBRA COM RELATIVA FACI-LIDADE AO GOLPE DO MARTELO, PRODUZINDO FRAGMENTOS COM BORDAS QUEBRADIÇAS POR PRESSÃO DOS DEDOS. SUPERFÍCIE RISCÁVEL COM LÂMINA DE AÇO, DEIXANDO SULCOS LEVES.
	POUCO COERENTE	C3	QUEBRA COM MUITA FACILIDADE AO GOLPE DO MARTELO (ESFARE-LA) PRODUZINDO FRAGMENTOS QUE PODEM SER PARTIDOS MANUALMENTE. SUPERFÍCIE RIS-CÁVEL COM LÂMINA DE AÇO, DEIXANDO SULCOS PROFUNDOS.
	INCOERENTE	C4	QUEBRA FACILMENTE COM PRESSÃO DOS DEDOS , DESAGREGANDO-SE. PODE SER CORTADA COM LÂMINA DE AÇO

7. RESULTADOS E CONCLUSÕES

As curvas experimentais da variação do índice de perda de massa (IWL) com a ciclagem água-estufa para os basaltos tipo A e B, assim como os dados experimentais utilizados na construção destas curvas, são apresentados na Figura 17.

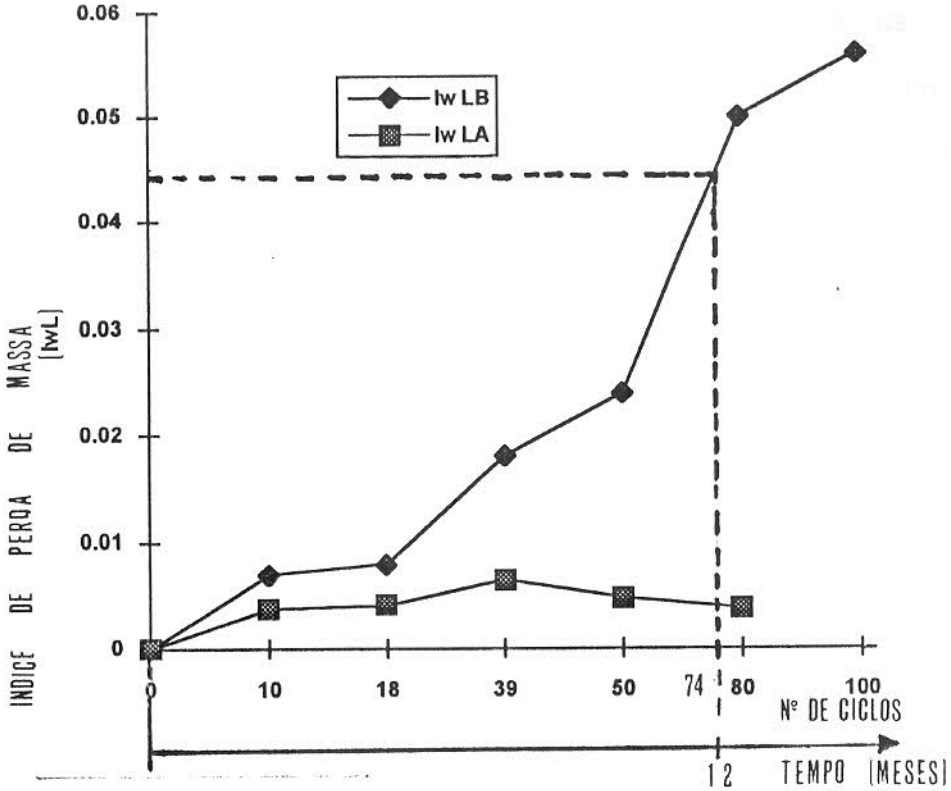
O índice de perda de massa (IWL) para o basalto tipo B após 9 (nove) meses de alteração natural foi de 0,033 e a respectiva velocidade de alteração natural anual foi de 0,044 IWL/ano. Este valor de velocidade corresponde a 74 ciclos de saturação em água e secagem em estufa. Quer dizer que 74 ciclos de laboratório corresponderá a 1 (um) ano de alteração natural. Para os 100 ciclos teremos 1 (um) ano e 4 meses de alteração natural.

Para o basalto tipo A não foi possível fazer as mesmas determinações, pois as amostras reservadas ao ensaio de meteorização, acidentalmente, foram misturadas durante o período de ensaio.

Do Vigésimo ao Quinquagésimo ciclo observou-se para o basalto A um aumento de peso ao invés de redução. Este fato pode ter várias explicações, dentre elas, a oxidação do Fe^{+2} em Fe^{+3} ou, o fato da secagem das amostras na estufa não ser suficiente para promover a total remoção da água absorvida durante a fase de saturação das amostras.

Para a perda de massa o ensaio de alteração laboratorial produziu uma redução total (basaltos A e B) de 31,5%.

Em relação ainda a perda de massa ocorrida durante o ensaio de alteração água-estufa, pode-se observar que a % perdida pelo basalto B foi bem superior àquela verificada para o basalto A, aproximadamente 8 (oito vezes) - Figura 18. Fato semelhante observa-se com a % de fragmentos trincados durante o ensaio



			IwL = (mO - m1)/mO O<IwL<1 LADEIRA E MINETTE, 1984	
Nº DE CICLOS	PESO A (g) REDE D	PESO B (g) REDE G	IwL A	IwL B
0	1.268,73	919,71	0	0
10	1.263,90	912,85	0,0038	0,007
18	1.263,47	911,90	0,0041	0,008
39	1.260,47	902,94	0,0065	0,018
50	1.262,70	897,20	0,0048	0,024
80	1.263,70	873,46	0,038	0,050
100	-	867,98	-	0,056
TEMPO (MESES)	PESO A (g) REDE 1	PESO B (g) REDE 1	IwL A	IwL B
0	1.217,15	920,53	0	0
9	-	890,15	-	0,033

VELOCIDADE DE ALTERACAO NATURAL P/ B = 0,044 IwL/ANO

Figura 17. Dados e curvas experimentais da variação do índice de perda de massa (IWL) com a ciclagem água-estufa para os basaltos A e B.

(Figura 19). O basalto A apresentou, no máximo, 8% de seus fragmentos trincados, enquanto que, o basalto B, apresentou 30%.

As curvas experimentais da variação do índice de resistência ao impacto "treton" (Irt) com a ciclagem água-estufa para os basaltos A e B, assim como os dados experimentais utilizados para a elaboração destas curvas, são representados na Figura 20.

As velocidades de alteração natural anuais encontradas para os basaltos A e B foram respectivamente, de: 0,016Irt/ano e 0,175 Irt/ano. Para o basalto B, nove meses de alteração natural representou o equivalente a 68 ciclos água-estufa, enquanto que, para o Basalto A, seria necessário a continuação da ciclagem (mais de 80 ciclos) para a alteração se equiparar à obtida em nove meses. Este fato pode ser relacionado às características distintas da água-de-chuva e da água distribuída na rede pública. Por comparação podemos citar o pH, que da água - de - chuva da região está em torno de 5.0-5.5, favorecendo principalmente à formação de óxidos de Fe) enquanto que o pH da água distribuída na rede pública está em torno de 8.3-8.5. No período em que foi realizado o ensaio de meteorização a precipitação natural acumulada foi de 982,5 mm.

Ao final do ensaio de alteração acelerada obteve-se uma redução da propriedade em estudo (resistência ao impacto "treton") de 22,71% para a rocha.

Para se obter uma redução de 60% das propriedades estudadas seriam necessários, no mínimo, mais 190 ciclos água-estufa para a perda de massa e 264 ciclos para a resistência, ou seja, mais um ano de ensaio de alteração laboratorial.

Ladeira e Minette (1984a) sugerem que os ensaios de alteração acelerada produzam uma curva completa de alteração (a

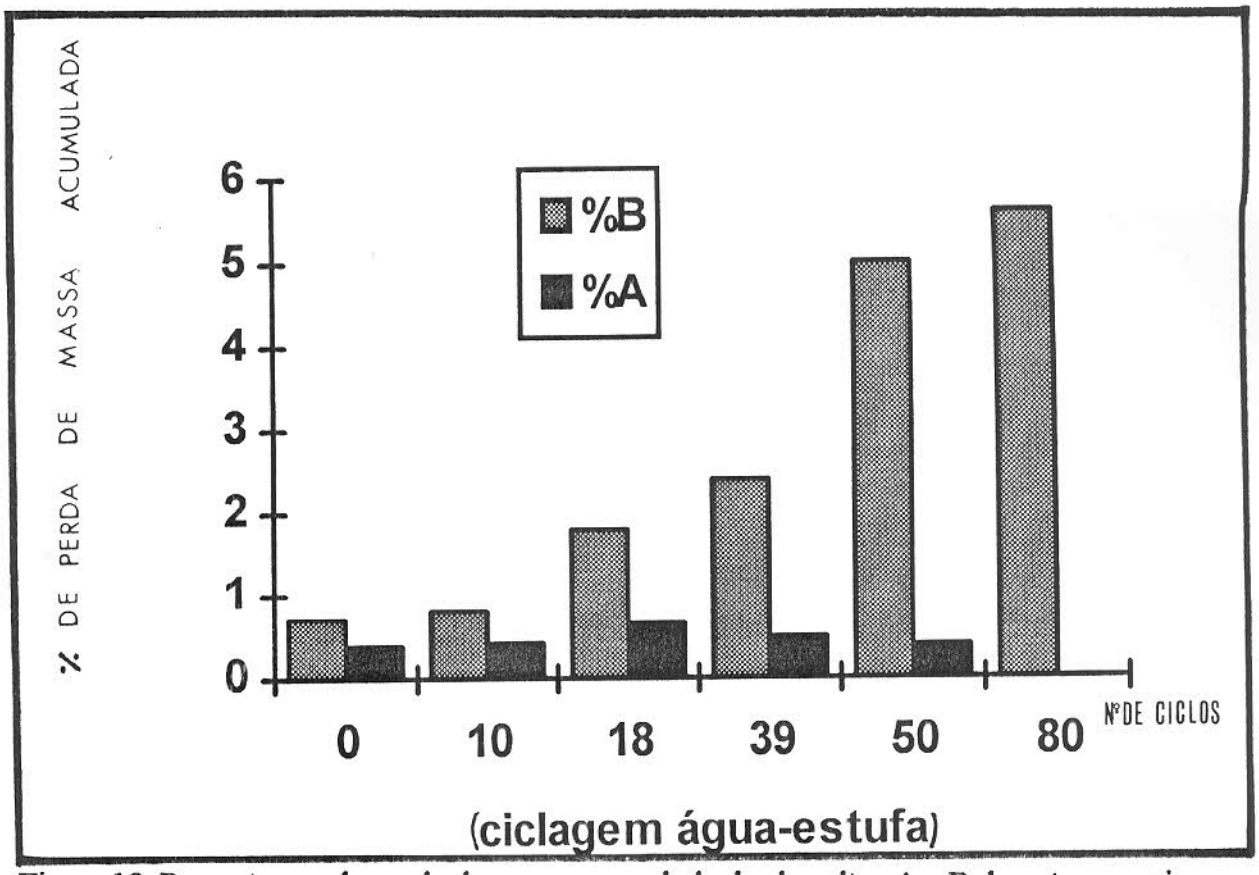


Figura 18. Percentagem de perda de massa acumulada dos basaltos A e B durante o ensaio de ciclagem água-estufa.

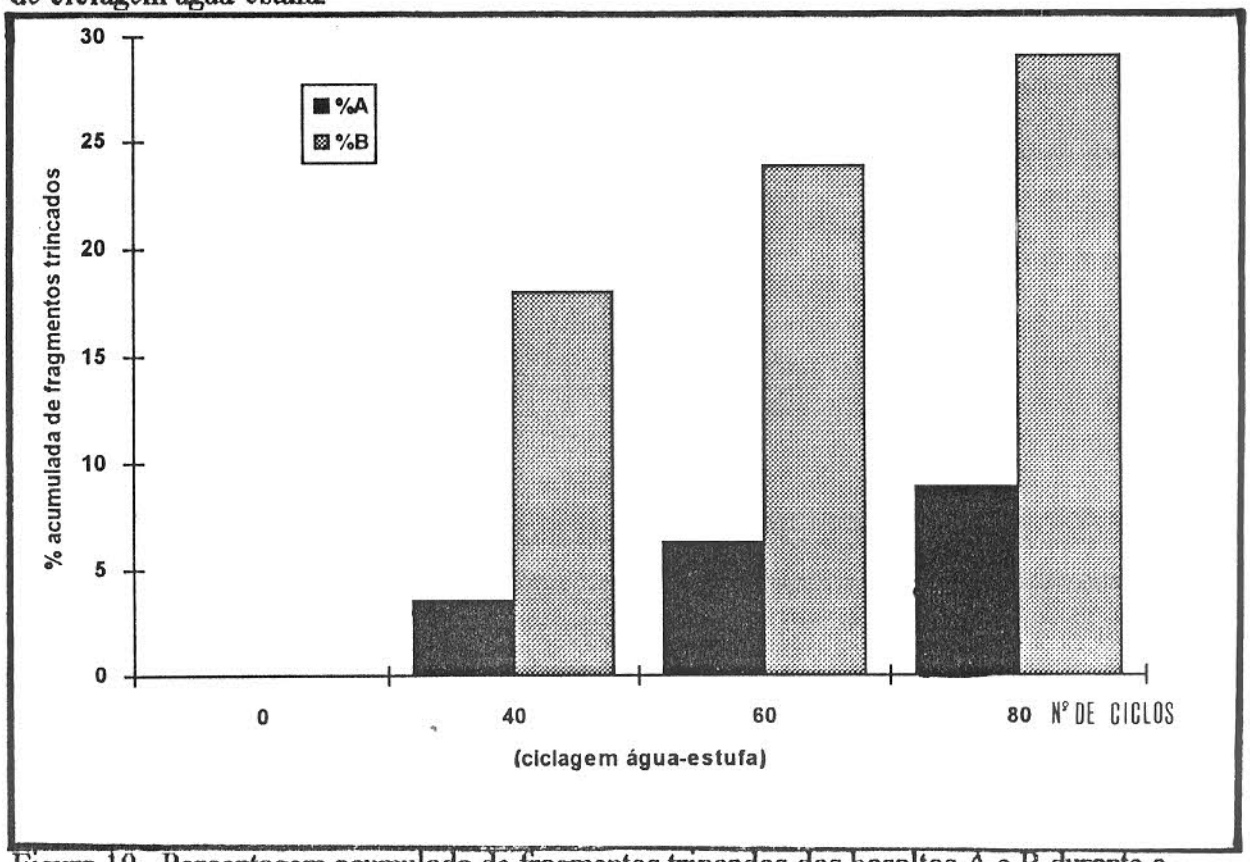
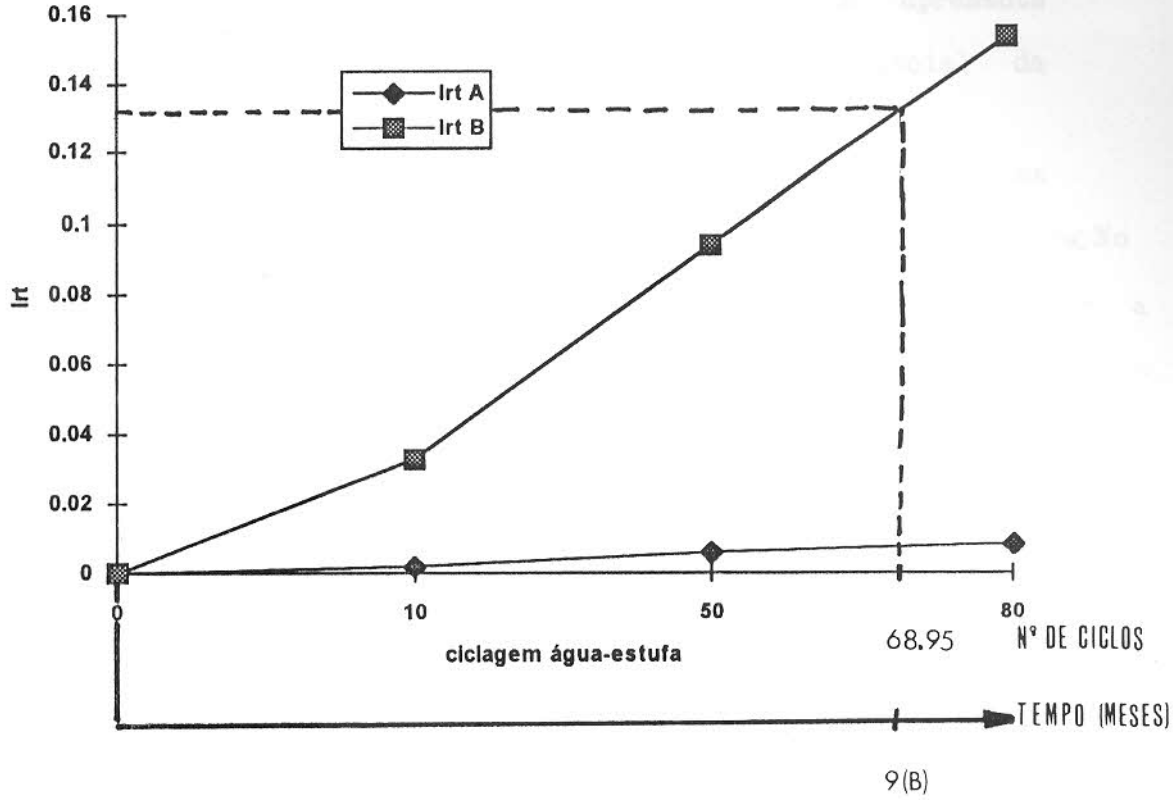


Figura 19. Percentagem acumulada de fragmentos trincados dos basaltos A e B durante o ensaio de ciclagem água-estufa.



Nº DE CICLOS	RESISTENCIA AO IMPACTO TRETON (%) A	RESISTENCIA AO IMPACTO TRETON (%) B	Irt=ti-tf/ti 0<Irt<1 IrtA	IrtB
0	90,44	82,55	0	0
10	90,25	79,85	0,0021	0,033
50	89,90	74,75	0,0060	0,094
80	89,69	69,90	0,0083	0,153
TEMPO (MESES)				
0	90,44	82,55	0	0
9	89,34	71,70	0,012	0,131

VELOCIDADE DE ALTERACAO NATURAL = 0,016Irt/ANO - A

0,175Irt/ANO - B

Figura 20. Dados e curvas experimentais da variação do índice de resistência ao impacto *treton* (Irt) com a ciclagem água-estufa para os basaltos A e B.

partir de um certo estágio) ou então, uma curva que apresente pelo menos uma redução de 60 a 80% do valor inicial da propriedade em estudo.

Ladeira e Minette (op.cit.) apresentam uma curva de variação da alteração no tempo com o índice de resistência de uma rocha ácida e fazem a classificação geotécnica da rocha quanto ao seu estado de alteração (Figura 21). Os traçados das curvas de alterabilidade para rochas ácidas, neutras e básicas são semelhantes, porém o tempo total de alteração para uma rocha básica é muito menor que o tempo de alteração para uma rocha ácida (fato diretamente relacionado á mineralogia apresentada por cada tipo rochoso). A Figura 22 faz uma comparação destas três curvas hipotéticas.

Tomando-se o basalto tipo A como referência do estado inicial da rocha e o basalto B como um estado intermediário, a velocidade máxima de alteração natural pode ser obtida quando a rocha passa do estado B para B´ e a velocidade mínima quando a rocha passa do estado A para o estado A´. Como esta rocha é extraída como agregado para pavimento e concretos, o mais interessante seria se utilizar nesta avaliação, de alterabilidade, uma média das velocidades de alteração, que no caso seria de 0,095 Irt/ano. Deve-se salientar que esta é uma decisão de extrema importância para a quantificação da alterabilidade.

Por outro lado, quando o maciço rochoso se destina à construção de obras de engenharia o mais adequado seria a utilização de mais de uma velocidade de alteração ou a velocidade máxima de alteração, para a obtenção de valores mais confiáveis.

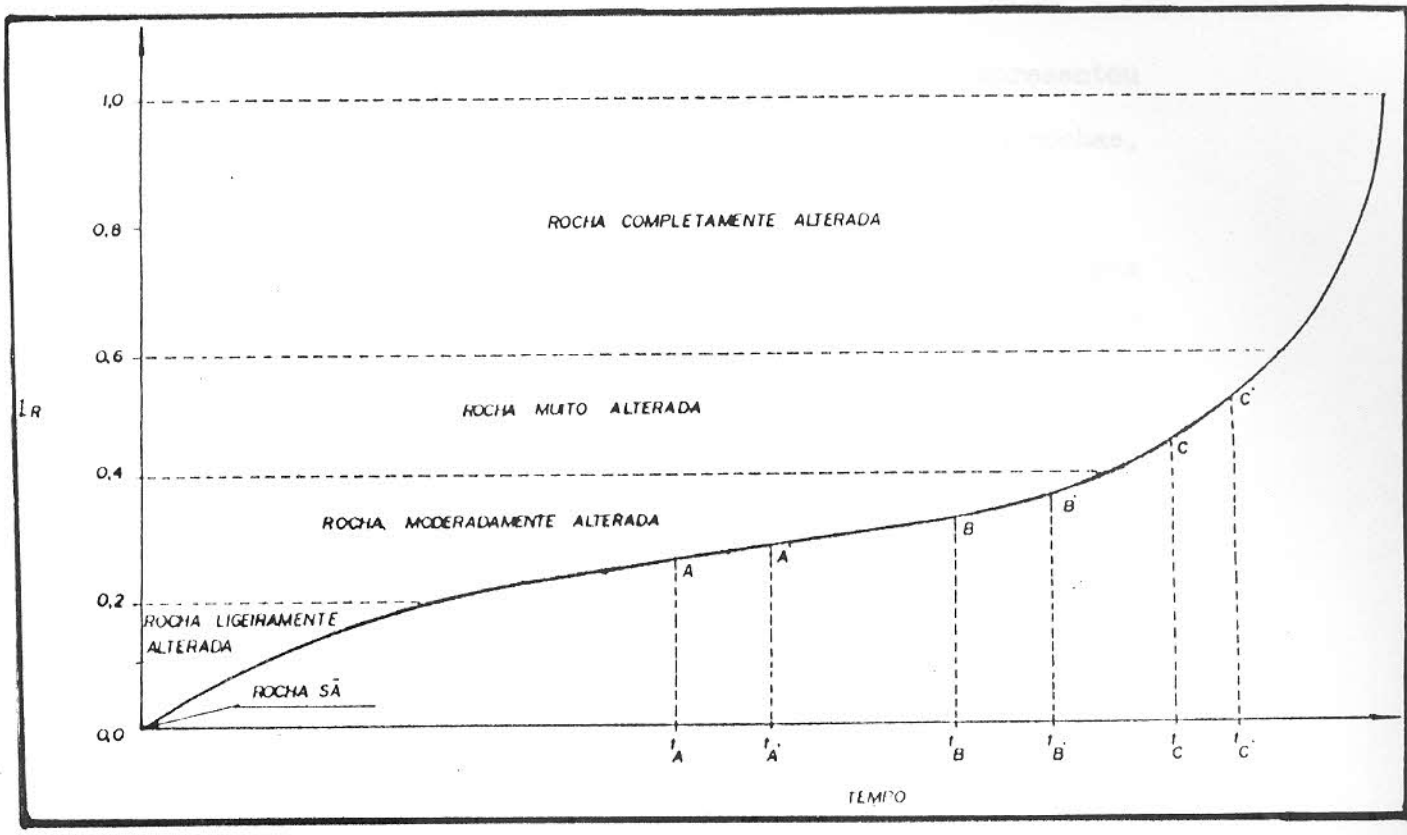


Figura 21. Variação da alteração no tempo para o índice de resistência de uma rocha ácida e classificação geotécnica da rocha quanto ao seu estado de alteração, segundo Ladeira e Minette, 1984a.

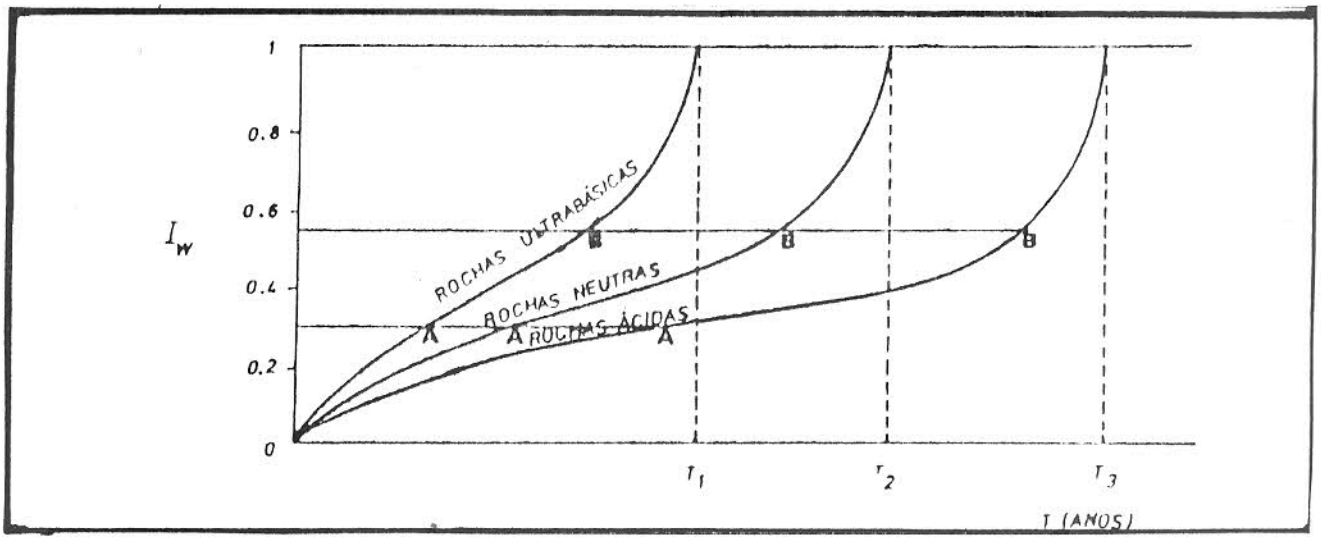


Figura 22. Curvas de alterabilidade de rochas ácidas, neutras e ultrabásicas, segundo Ladeira e Minette (1984a).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaio de resistência ao impacto "Treton" apresentou índice sensível às variações do estado de alteração das rochas, sendo adequado à metodologia utilizada.

O ensaio de alteração laboratorial escolhido, ciclagem água-estufa, mostrou-se, dentro do tempo disponível, lento, para a redução das propriedades estudadas. As condições naturais se mostraram mais severas do que as simuladas pelo ensaio.

Levando-se em consideração que:

- o material utilizado é produto de desmonte e este, ser realizado sem um estudo específico para o controle do microfissuramento;
- as características petrográficas peculiares a cada tipo rochoso e
- os fatores extrínsecos à rocha como: temperatura, pH, Eh, quantidade de água e forças bióticas,

deve-se considerar quaisquer resultados obtidos neste trabalho como pontuais.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1- Comparação de resultados obtidos com indicadores químicos, aplicados a esta mesma rocha, já que no presente trabalho comparou-se apenas um índice físico (I_{WL}) e um índice mecânico (Irt).

2- Utilização de um mesmo índice de alteração para a avaliação da alterabilidade de basaltos diferentes quanto ao microfissuramento, porém de composição mineralógica semelhante.

3- Utilização de um mesmo índice de alteração para a avaliação da alterabilidade, em basaltos distintos quanto a % e/ou tipo de argilo-minerais presentes.

4- Comparação dos afloramentos de basalto que já tiveram sua alterabilidade avaliada, quanto à sua mineralogia, microfissuramento e metodologias utilizadas nesta avaliação.

5- Execução do ensaio de ciclagem água-estufa com água de características semelhantes à da água-de-chuva da região.

6- Utilização dos indicadores de alteração aos pares, para posterior comparação entre n de ciclos (ensaio de alteração laboratorial)/anos (ensaio de alteração natural).

R E F E R Ê N C I A S

- ABNT . (1978): Determinação da resistência ao choque. 3p. MB 964).

- ABNT .(1988): Peneiras para ensaios; especificações. Rio de Janeiro. (NBR, 5734).

- AIRES-BARROS,L.(1978):Comparative study between rates of experimental laboratory weathering of rocks and their natural environmental weathering decay. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, N°18:169-174.

- ALMEIDA,M.R.C.S.do.(1987): Propriedades mecânicas de rochas associadas ao grau de intemperismo. Rio de Janeiro. (Mestrado - Depto. de Engenharia Civil-PUC).

- BIRKELAND, P. W. (1974): Pedology, Weathering and GeomorphologicalResearch. New York, Oxford University Press, London.

- CARVALHO, A; CHAUVEL, A; GUIMARÃES, J. E. P.; MELFI, A. J.; NÓBREGA,M.T.(1981):Caracterização mineralógica, morfológica e geotécnica de alguns solos lateríticos desenvolvidos sobre basalto na Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA. Rio de Janeiro. Vol.1:340-381

- CHRISTARAS, B. (1991): Méthode D'Évaluation de L'Altération et Modification des Propriétés Mécaniquesdes Granites en Gréce Du Nord. Bulletin of the I.A.E.G., nº43, p.21-26.

- CESP - Métodos de Ensaio - Ensaio de Meteorização de Rochas (MRL - 01)

- CESP - Métodos de Ensaio - Ensaio de Alteração de Rochas Água-Estufa (MRL - 02)

- DAPENA,J.E. E URIEL,S.(1982): Towards a more exact quantification of the alteration of a granitic rock by the circulation of atmosfhericwater. In: CONGRESS INT. ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 4 .*Proceedings*. V.II, Theme 1, New Delhi.

- DELGADO ROGRIGUES,J.(1977): Previsão da alterabilidade de materiais rochosos naturais. Revista Portuguesa de Geotecnia, 20.

- _____(1978): Sobre a determinação quantitativa da alterabilidadede rochas - um caso de aplicação. Revista Portuguesa de Geotecnia 24: 29-42.

- FARJALLAT,J.E.S.(1971): Estudos Experimentais sobre a degradação de rochas basálticas: basaltos da Barragem de Capivara. Rio Paranapanema. São Paulo (Doutorado - Instituto de Geociências e Astronomia da Universidade de São Paulo).

- _____(1975): Algumas implicações tecnológicas de

medidas da permeabilidade ao ar: amostras confinadas e não confinadas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 10. Tema: I. Curitiba.

- FARJALLAT,J.E.S.;MONTEZZO NETO,V.;RATTI,G.(1972): Relação entre teores de minerais argilosos expansivos e desagregação de rochas basálticas. In:SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA,4. *Anais,* p.123-143. São Paulo.

- FARJALLAT,J.E.S.;TATAMIYA,C.T.;YOSHIDA,R.(1979): An Experimental Evaluation of rock weatherability. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2. IV-30.1 a IV-30.9.

- FARRAN,J. E THÉNOZ,B.(1965): L´alterabilté des roches, ses facteurs, sa prévision. Annales de L´Inst. Tech. et des Trav. Pub., nº 215, Série 78. Toulouse.

- FRAZÃO,E.B.(1981): Contribuição à metodologia para determinação da pressão de expansão em solos e rochas. (Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências /USP). São Paulo.

- _____(1986): Revisão dos estudos sobre alterabilidade de rochas basálticas - Projeto de Desenvolvimento Tecnológico n 8110.01.3 - IPT, Relatório nº 23.120, 80p.

- _____(1993): Metodologia para avaliação da alterabilidade de rochas à partir de estudo experimental em amostras de basaltos da U.H.E de Três Irmãos- Estado de São Paulo. (Doutorado - EESC - USP).

- FRAZÃO,E.B. E CARUSO,L.G.(1983): Síntese do conhecimento sobre alterabilidade de rochas basálticas como material de construção em algumas barragens da Bacia do alto Paraná.In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ, separata, p.21-32.

- GAMA Jr.E.;BANDEIRA Jr.,A.N.;FRANÇA,A.B.(1982): Distribuição espacial e temporal das unidades litoestratigráficas paleozóicas na parte central da Bacia do Paraná.

- GOLDICH,S.S.(1938): A study in rock weathering. J. Geology, Vol.46: 17-58.

- GONÇALVES,N.M.M.(1987): Transformações mineralógicas e estruturais relacionadas à alteração hidrotermal e intempérica de rochas vulcânicas básicas da Bacia do Paraná Setentrional - (Região de Ribeirão Preto- S.P.- Brasil). São Paulo. 212p. (Doutorado - Área de Concentração: Geologia Geral e de Aplicação - USP).

- ILLIEV,I.G. (1966): An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties. In: CONGRESS OF THE INT. SOCIETY OF ROCK MECHANICS,1. Lisboa.V.1:109-114.

- IPT (1981): Mapa Geológico do Estado de São Paulo, Escala 1:500.000. São Paulo. Monografias.

- ____(1990):Alterabilidade de basaltos-Mecanismos e procedimentos para caracterização. Relatório Interno. 1990.

- IRFAN,T.Y. E DEARMAN,W.R.(1978): Engineering classification and index properties of weathered granite. Bulletin Int. Assoc. Eng. Geol. 17: 79-90.

- KRAUSKOPF, K. B. (1972): Introdução à geoquímica. São Paulo. Polígono, Editora da USP.

- LADEIRA,F.L.(1984):Instabilidade em taludes rochosos provocada por rápido intemperismo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4. Belo Horizonte. Vol.3:377-382.

- LADEIRA,F.L. E MINETTE,E.(1984a): A quantificação da alteração e da alterabilidadede rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4. Belo Horizonte. Vol.3: 351-358.

- _____(1984b): Índices Físicos de alteração na quantificação da alterabilidade de rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4. Belo Horizonte. Vol.3: 359-366.

- _____(1984c): Índices geomecânicos de alteração na quantificação da alterabilidadede rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4. Belo Horizonte. Vol.3: 367-370.

- LOUGHNAN, F.C.(1969): Chemical Weathering of the Silicate Minerals. Nova York. American Elsevier Publishing Company Inc. 154p.

- LUMB,P.(1962): The properties of decomposed granite. Géothéchnique.The Int.Journal of Soil Mechanics. Vol.XII (3).

- MALOMO,S.(1980): Abrasive pH of feldspars as an engineering index for weathered granite. Bulletin of the Int. Ass. of Eng. Geology. Krefeld. Nº 22: 207-211.

- MINETTE,E.(1982): Quantificação Geomecânica e de alterabilidade de um diorito. PUC - Depto. de Eng. Civil. (Dissertação de Mestrado).

- MONIZ,A.C.;NASCIMENTO,A.C.;PAIVA NETTO,J.E.de.(1973): Mobilidade dos constituintes de rochas básicasde São Paulo durante o intemperismo. Revista Brasileira de Geociências, V.3:201-213.

- NASCIMENTO, U.(1970): O problema da alterabilidade das rochas em engenharia civil. Lisboa. LNEC. Memória nº 363.

- ONODERA,T.F.; YOSHINAKA,R.;ODA,M.(1974): Weathering and its relation to mechanicalproperties of granite. In: CONGRESS INT. SOC. ROCK MECH., 3. *Proceedings*. Denver, Vol.2A:71-78.

- PARKER,A.(1970): An index of weathering for silicate rocks. Geological Magazine. Vol.107, n 6:501-504.

- SAITO,T.(1981): Variation of physical properties of igneous rocks in weathering. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WEAK ROCK. *Proceedings*. Tokyo, p.191-196.

- SCHUCK,M.T.G.O. E FORMOSO,M.L.L. (1991):Grau de intemperismo do manto de alteração de rochas do Planalto Sul-RioGrandense. 3 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUIMICA. SBGq. Sociedade Geológica de Portugal. Resumos, Vol.1:15-18.

- SOUZA JR.,N.N.de.(1993): O Entablamento em derramesbasálticos da Bacia do Paraná: aspectos genéticos e caracterização geotécnica. São Carlos. EESC - USP. (Doutorado).

- STRUILLOU,R.(1969): Previsão da alterabilidade dos materiais empregados em Engenharia Civil. Colloque de Geotechnique. Toulouse,p:35-46.

- YOSHIDA,R.(1972): Contribuição ao conhecimento de características tecnológicas de materiais rochosos. São Paulo. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 159p.(Doutorado).

- YOSHIDA,R.; FARJALLAT,J.E.S.; CARUSO,L.G.; FRAZÃO,E.B. (1972): Sugestão de roteiro de escolha de ensaios tecnólogicos de rochas. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4:199-222.