CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DE CARACTERÍSTICAS
TECNOLÓGICAS DE MATERIAIS ROCHOSOS

Riuiti Yoshida

VOLUME I - TEXTO E APÊNDICES

Tese de Doutorado apresentada
ao Instituto de Geociências da
Universidade de São Paulo.

SÃO PAULO
1972

CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DE CARACTERÍSTICAS
TECNOLÓGICAS DE MATERIAIS ROCHOSOS

Riuiti Yoshida

Tese de doutoramento apresentada ao Instituto
de Geociências da Universidade de São Paulo

SÃO PAULO
1972

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005942

ÍNDICE

PÁGINA

VOLUME I - TEXTO E APÊNDICES	
AGRADECIMENTOS.....	1
RESUMO.....	3
I. - INTRODUÇÃO.....	5
II. - GENERALIDADES SOBRE AS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS....	7
III. - METODOLOGIA EMPREGADA.....	21
III.1 - Amostragem e métodos.....	21
III.2 - Procedimentos e tipos de amostras.....	23
III.3 - Aparelhagem.....	26
IV. - ENSAIOS FÍSICOS ESTUDADOS.....	28
IV.1 - Avaliação da resistência de rochas pelo emprego do esclerometro Schmidt.....	28
IV.2 - Resistência ao impacto em corpos de prova regulares.....	35
IV.3 - Resistência ao desgaste a umido de rochas....	40
V. - ENSAIOS DE ALTERAÇÃO.....	44
V.1 - Quadro experimental.....	44
V.2 - Procedimentos para comparação entre diferentes processos de alteração.....	45
A) Ensaios de alteração por lixiviação contínua	46
B) Ensaios de alteração por saturação em água e secagem em estufa.....	47
C) Ensaios de alteração por imersão em etileno glicol e secagem em estufa.....	48
D) Ensaios de alteração por imersão em solução saturada de sulfato de sódio e secagem em estufa.....	49

E) Ensaios de alteração por exposição natural	50
V.3 - Medida do comportamento mecanico.....	51
VI. - TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ALTERAÇÃO.....	56
VI.1. - Comparação entre os diferentes processos de alteração.....	56
VI.2 - Comportamento mecanico nos diferentes processos de alteração.....	65
VII. - CONCLUSÕES GERAIS.....	70
VIII. - RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	73
BIBLIOGRAFIA.....	75
APÊNDICE A - DESCRIÇÕES PETROGRÁFICAS E FOTOMICROGRAFIAS.	81
APÊNDICE B - MÉTODOS DE ENSAIOS PROPOSTOS.....	99
M-1 MÉTODO NÃO DESTRUTIVO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E ESTADO DE ALTERAÇÃO DE ROCHAS.....	99
M-2 MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPOS DE PROVA REGULARES.....	105
M-3 MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESGASTE A ÚMIDO.....	109
M-4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A ALTERAÇÃO EM EXTRATOR SOXHLET E MEDIDA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ROCHA.....	114
M-5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A ALTERAÇÃO COM SATURAÇÃO-SECA-GE E MEDIDA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ROCHA.....	120
M-6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A ALTERAÇÃO EM SOLUÇÃO DE ETILENOGLICOL E MEDIDA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ROCHA.	126

M-7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A ALTERAÇÃO EM SOLUÇÃO SATURADA DE SULFATO DE SÓDIO E MEDIDA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ROCHA.....	132
M-8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA A ALTERAÇÃO EM EXPOSIÇÃO NATURAL E MEDIDA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ROCHA.....	138
ANEXOS I E II - ESQUEMAS DO APARELHO DE DESGASTE A UMIDO E EXTRATOR SOXHLET.....	139 e 140
APÊNDICE C - PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO PARA DIMENSIONAMENTO DE AMOSTRAS, APLICABILIDADE DO MÉTODO DE ENSAIO E CORRELAÇÕES.....	146

AGRADECIMENTOS

Não teria sido possível o desenvolvimento da pesquisa e as conclusões expostas nesta monografia, sem a ajuda e a diretriz seguida por todos os membros da Diretoria da DIVISÃO DE MINAS E GEOLOGIA APLICADA DO INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS; - que nos seja permitido então, expressar inicialmente a nossa - mais viva gratidão à pessoa de seu Diretor, o geólogo Dr. Luiz Francisco Rielli Saragiotto.

Somos profundamente gratos ao Professor Doutor Viktor Leinz, que nos concedeu a honra de ser o orientador desta tese, sempre nos incentivando no caminho da pesquisa aplicada e de ter acompanhado passo a passo o desenvolvimento de nosso trabalho, que muito deve à sua experiência e bom senso.

Agradecemos aos geólogos Dr. Fernando Pires de Camargo e Dr. Guido Guidicini, pelo estímulo concedido, apreciação crítica dos objetivos da tese e confiança nos resultados.

Em especial, somos gratos às CENTRAIS ELÉTRICAS DE SÃO PAULO, que nos concedeu a permissão de publicar resultados de pesquisas efetuadas pelo convênio CESP-IPT.

Em particular, queremos expressar o nosso sincero reconhecimento ao Prof. Dr. José Eduardo Siqueira Farjallat, que durante o desenvolvimento deste trabalho, foi de uma disponibilidade e auxílio em todos os instantes, e cujas críticas e discussões foram de inestimável valia.

Dentre as inúmeras sugestões e críticas, que influenciaram esta pesquisa, estamos profundamente gratos aos Engenheiros, Dr. Carlos Manoel Nieble e Dr. Fernando Fujimura, que nos auxiliaram a encontrar um tratamento analítico adequado aos resultados.

Agradecemos também, pela colaboração eficiente e prestativa, nossos colegas, os geólogos Carlos Takashi Tatamiya, Luiz Geraldo Caruso, Ana Maria Pocciotti Giroldo e Ely Borges Frazão.

Uma tese exige uma grande quantidade de dados, obtidos a partir de ensaios, onde intervieram os nossos técnicos de laboratório Ivan Reis Librandi, José Carlos Delchiaro, Joaquim Ireno, José Antonio dos Santos e Luis Martins, e os assistentes alunos

/ Nelson Baltrusis, Diogo Correa Filho, Dirceu Pagotto Stein e
Waldir Renato Paradella, aos quais somos gratos.

Não esqueceremos enfim, de agradecer pela sua colaboração
preciosa, na confecção de gráficos e tabelas e no extenso traba-
lho datilográfico, respectivamente as Srtas. Mirna Mangini e
Claudete Maria Russo.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvida uma investigação experimental com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre caracterização tecnológica de materiais rochosos de construção, com ênfase no aspecto da alterabilidade. Foram estudadas rochas de 15 localidades representando os seguintes 11 tipos litológicos: basalto compacto, basalto vesicular, basalto microvesicular, diabásio, quartzito, calcário, granito, charnockito, piroxenito, migmatito e arenito. Os ensaios de laboratório foram conduzidos em corpos de prova cilíndricos, cúbicos e britados obtidos a partir das amostras enviadas, para determinação dos seguintes índices: massa específica aparente, porosidade aparente, absorção, abrasão - Los Angeles, resistência ao impacto em corpos de prova regulares, resistência ao impacto Treton, resistência ao esmagamento, resistência à compressão simples axial, índice esclerométrico, resistência ao desgaste a úmido e durabilidade. Foram executados quase 3000 ensaios para obtenção de índices fisicomecânicos e de durabilidade, por um período de aproximadamente 2 anos.

Todos os ensaios foram efetuados em amostras inicialmente lavadas, secas em estufa a 100-110°C por aproximadamente 10 horas e posteriormente, esfriadas à temperatura ambiente durante pelo menos 2-3-horas, antes de cada ensaio. Os seguintes ensaios novos foram introduzidos: índice esclerométrico, impacto em corpos de prova moldados e desgaste a úmido, com discussões a respeito de sua aplicabilidade.

Os resultados de cada grupo de corpos de prova em diferentes rochas, para estes ensaios novos, foram submetidos à análise estatística para obtenção de valores médios e coeficientes de variação para determinar a precisão e o número de ensaios necessários para cada uma destas propriedades. Os resultados médios foram submetidos à correlação estatística e análises de regressão pelo método dos mínimos quadrados, para os quais foram determinados os coeficientes de correlação simples, erros padrão de estimativa e relações funcionais para cada par selecionado de variáveis.

veis. Estas relações foram apresentadas graficamente para comparação visual com os correspondentes resultados de ensaios. A partir dos resultados obtidos quanto à precisão e reprodutibilidade dos ensaios e verificada sua aplicabilidade, foram elaboradas - propostas para métodos de ensaios.

Os ensaios de durabilidade, que constituem a segunda parte deste trabalho, foram executados nas rochas acima mencionadas, cujas amostras foram submetidas a ciclos sucessivos de, saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa, saturação em etilenoglicol e secagem em estufa, saturação em água e secagem - em estufa, lixiviação contínua no extrator Soxhlet e exposição - natural, em 2 séries de ensaios. A primeira série consistiu na comparação de processos de alteração e a segunda série, na investigação do comportamento mecânico dos materiais rochosos face a diferentes condições físicoquímicas de alteração artificial e natural. O parâmetro mecânico utilizado neste caso, foi a resistência ao impacto Treton.

Os resultados obtidos na primeira série, foram submetidos à análise de regressão, obtendo-se gráficos de comparação de linhas teóricas de velocidades de alteração pelos diferentes processos e, gráficos mostrando a influência do fator de escala no processo de alteração.

Os resultados da segunda série de ensaios, permitiram estabelecer 2 parâmetros numéricos: queda percentual de resistência mecânica e coeficiente de alterabilidade específica, que refletem a suscetibilidade das rochas a estes diferentes processos de alteração. A correlação estatística, entre estes parâmetros numéricos da alteração e a relação entre as tensões máximas de ruptura, no estado saturado e no estado seco, do ensaio de compressão simples axial, indicou ser esta relação, um índice promissor da alterabilidade de rochas.

Finalmente, discutida a validade destes índices, tendo em vista os resultados encontrados e a ausência na literatura de procedimentos adequados, que permitam classificar as rochas quanto ao comportamento mecânico face à alteração natural ou artificial, foram elaboradas propostas de métodos de ensaios, que poderão - preencher esta lacuna.

I. - INTRODUÇÃO

Os materiais rochosos em construção civil são destinados a servir de suporte de grandes estruturas, aumentar a resistência mecânica de concretos e pavimentos, servir de proteção a aterros de terra compactada, resistir às mais variadas condições de utilização e enfim, servir como fator econômico importante na redução de custos. Para desempenhar tais funções as rochas de vem antes de tudo possuir boa qualidade física.

Por outro lado, os materiais rochosos ocorrentes na superfície da crosta terrestre estão sujeitos a agentes naturais cu efeitos produzidos por atividades humanas, capazes de introduzir modificações mineralógicas e físicas envolvendo desagregação dos constituintes minerais e modificação da resistência me cânica. Portanto, as rochas para serem aprovadas como materiais de construção, devem apresentar além da qualidade física, uma certa durabilidade.

A qualidade e durabilidade de rochas são definidas por um conjunto de propriedades fisicomecânicas e químicas, que podem ser designadas genericamente de propriedades tecnológicas. Estas propriedades caracterizam por intermédio de índices numéricos, o comportamento de rochas face a diferentes solicitações de en saios. A execução de ensaios de caracterização tecnológica de rochas para sua aprovação como material de construção é controlada através das exigências enumeradas pelas diversas especificações de projeto existentes.

Entretanto, a determinação de propriedades tecnológicas em rochas envolve ainda uma série de problemas. Citamos abaixo al guns dos principais problemas:

1. Ausência de uma sistematização adequada para estudo de propriedades tecnológicas para as diversas finalidades.
2. Pouco conhecimento da dependência entre as propriedades tecnológicas e as características petrográficas.
3. Falta de uma representação matemática de propriedades físicas de rochas.
4. Ausência de um estudo detalhado de processos físicos - originados pela ação de diversos campos físicos naturais ou artificiais.

5. Não concordância de resultados devido a variabilidade - de padronizações adotadas.

6. Pequeno número de ensaios de caracterização adequados.

7. Falta de conhecimento quanto à validade e aplicabilidade de métodos de alteração de rochas em laboratório.

8. Duração demasiadamente elevada na execução de alguns ensaios.

Os objetivos principais deste trabalho resumem-se no seguinte:

1. Focalizar algumas propriedades tecnológicas de materiais rochosos, obtidas às custas de novos ensaios desenvolvidos ou adaptados.

2. Estudar, comparar e desenvolver métodos ou procedimentos para previsão ou avaliação da durabilidade de rochas.

II. - GENERALIDADES SOBRE AS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

A prática atual na determinação da qualidade de agregados, em bora tenha alcançado um estágio satisfatório de desenvolvimento, - em virtude da multiplicação de obras de grande porte, ainda deixa a desejar.

A utilização dos diferentes tipos de rochas, para as inúmeras finalidades da construção civil envolve possíveis problemas - das mais variadas naturezas tais como: baixas características mecânicas, alta velocidade de alteração e conseqüente queda de resistência mecânica e produção de finos, reatividade com os álcalis - do cimento, conteúdo elevado de matéria orgânica e de fragmentos friáveis, má adesividade a ligantes betuminosos, baixa aderência às argamassas, índices inadequados de forma após britagem, etc. Portanto, o emprego de agregados sem um conhecimento detalhado de seu comportamento tecnológico, poderá levar à construção de estruturas com más características funcionais, de durabilidade duvidosa ou requerer a utilização de elevados coeficientes de segurança e, por conseguinte, onerar os custos.

A execução de ensaios de caracterização tecnológica de rochas, para sua aprovação como material de construção, é controlada através das exigências enumeradas pelas diversas especificações existentes e que são adotadas frequentemente, sem uma avaliação criteriosa das reais condições de uso (53).

Um dos principais problemas existentes consiste no fato de que, frequentemente, é requerido um grande intervalo de tempo pelos ensaios, tornando praticamente impossível fornecer aos construtores e projetistas todas as informações referentes a todos os materiais tão rapidamente quanto se deseja. Consequentemente, estes são forçados a empregar tais dados de acordo com as disponibilidades e depender de comportamentos conhecidos através de materiais similares e presumivelmente de características tecnológicas próximas. Quando a finalidade é o emprego do agregado rochoso para concreto, as determinações de índices numéricos de qualidade - são geralmente efetuadas para a resistência mecânica e sanidade. Quando a finalidade é o emprego de materiais rochosos em misturas betuminosas, são efetuadas determinações de aderência preferencial do agregado ao betume ou água, além da resistência mecânica.

Paralelamente aos ensaios de qualidade, são efetuadas determinações da massa específica e absorção para fornecer dados para o dimensionamento de misturas ou em estimativas de quantidades requeridas para uso.

Justificando a prática rotineira em relação às determinações de qualidade de materiais rochosos, devemos lembrar que representam o desenvolvimento de técnicas de ensaio por mais de 50 anos. Durante este período, muitos métodos de ensaios foram tentados. Alguns foram aprovados e até hoje continuam sendo usados enquanto que outros foram abandonados, ou porque a significância das características determinadas se tornaram inadequadas pelas modificações no tipo ou uso pela construção, ou porque foram desenvolvidas técnicas mais representativas. Entretanto, todos estes métodos possuem uma característica geral que é o de tentar fornecer somente as informações requeridas pelas especificações, para determinar a aceitabilidade do material, executando as determinações no menor tempo e custo disponíveis. Não constitui objetivo desta apreciação apontar os melhores métodos de ensaios disponíveis, mas focalizar a importância dos estudos tecnológicos e suas atuais limitações, observando que na prática existe a idéia de uma premência muito maior na aceitação ou rejeição de um determinado material, mais do que a necessidade de um completo conhecimento de suas propriedades, levando frequentemente os interessados a práticas mais onerosas.

Em ensaios sobre rochas, para determinação de suas propriedades mecânicas, um grande número de métodos foram tentados, incluindo-se entre outros, métodos para determinação de dureza e, ou resistência à penetração superficial, tenacidade ou resistência ao impacto, resistência ao desgaste, resistência ao esmagamento ou britagem e resistência à abrasão. Muitas contribuições foram também efetuadas aos métodos de determinação da resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração e resistência ao cisalhamento (6-23-42-45).

Em todos estes ensaios, exceto para os ensaios de abrasão, desgaste e esmagamento, são utilizados geralmente corpos de prova regulares, que são restritos àqueles materiais a partir dos quais são obtidos os corpos de prova para ensaio. Embora até hoje se tenha

feito grande uso destes ensaios e apesar de inúmeras tentativas - de esclarecer os fatores influenciantes, não foi possível estabelecer um padrão universal satisfatório quanto ao equipamento e técnica. Consequentemente, torna-se difícil efetuar uma comparação significativa dos resultados obtidos em laboratórios diferentes. Como exemplo, citamos Sigvaldason (42) que mostrou que os resultados de ensaios de compressão uniaxial, em amostras de concreto idênticas, efetuados em oito laboratórios diferentes, apresentaram vastas discrepâncias de resultados, ainda que todos os ensaios tivessem sido realizados conforme os métodos da "British Standards" e da "American Society for Testing and Materials".

Para materiais britados, granulares, nas dimensões normalmente empregadas, foram desenvolvidos diversos métodos de ensaios. - Um dos principais ensaios mecânicos, que estão neste caso, é o ensaio de abrasão Los Angeles (ASTM C-131), reconhecido por todos e constando na maioria das especificações. Além de ser utilizado como método para determinar a qualidade de agregados para uso em concreto e pavimentação, encontra sua aplicação na escolha de materiais para filtros de percolação e enrocamento (4). Neste ensaio, o material rochoso é submetido tanto ao desgaste superficial como a impactos, com este último efeito causando provavelmente a maior parte da perda. Entretanto, em alguns empregos considerados para os materiais ensaiados por este método, eles não são frequentemente submetidos às forças causando desgaste superficial ou impacto sobre as partículas de agregados como por exemplo, em filtros de percolação e concretos de cimento portland.

A sanidade ou também conhecida impropriamente como resistência ao congelamento e degelo, tem-se constituído em um dos critérios principais para aprovação de agregados. Determinações desta propriedade tem sido efetuadas utilizando-se uma solução de sulfato de sódio ou magnésio, conforme descrito no método ASTM C88-69. Embora este método esteja atualizado e aceito, a principal dificuldade que apontamos é a aplicação dos resultados do ensaio, para um clima como o nosso. Aparentemente não existe correlação.

Os agregados rochosos empregados em misturas betuminosas devem possuir dois requisitos principais: serem suficientemente resistentes para aquela finalidade e devem ser capazes de manter a

cobertura betuminosa contra a ação da água, isto é, devem possuir boa adesividade. O ensaio de abrasão Los Angeles parece ser um meio satisfatório para determinar a resistência do agregado. O ensaio normal de adesividade, que consiste na imersão do agregado - coberto de betume em água e, observação do grau de retenção da película asfáltica por parte do agregado, é diretamente aplicada aos agregados para uso em pavimentos flexíveis. Entretanto, sua aplicabilidade é limitada porque é executada somente na fração grosseira de agregados. Além disso, possivelmente a deficiência - mais séria é que o resultado deve ser determinado por observação visual envolvendo então, alta dose de subjetividade. Em vista destas limitações sobre a aplicação direta dos resultados de adesividade, ocorre uma necessidade de se desenvolver um ensaio que possa medir o efeito da água em misturas betuminosas. Possivelmente, a determinação da resistência à compressão em corpos de prova de misturas betuminosas, que foram submetidas à ação da água e a comparação desta, com as resistências de corpos de prova secos, possa constituir-se em ensaio mais adequado para esta finalidade.

Muitos laboratórios de ensaios utilizam os serviços de um petrógrafo para identificar a composição mineral e o tipo de rocha encontrado em agregados. Embora este serviço seja de valor inestimável, acreditamos que o petrógrafo poderia, se solicitado, fornecer informações muito mais completas. Por exemplo, as propriedades petrográficas de uma rocha são caracterizadas pela:

1. Sua composição mineralógica que corresponde à porcentagem dos diferentes minerais que a constituem.

2. Sua estrutura, que definimos aqui como característica da dimensão, da forma e da fábrica dos minerais, assim como o fissuramento e as descontinuidades que possam existir na rocha.

São estas características que intimamente associadas, determinam em grande parte, as propriedades mecânicas das rochas. Torna-se então, cada vez mais desejável que propriedades como granulação, conteúdo em quartzo, grau de cimentação, tipo e grau de fraturamento, tipo e grau de alteração, possam ser determinadas - numericamente para que uma análise de regressão, possa determinar possíveis correlações analíticas entre estas propriedades geológicas e os índices tecnológicos.

Finalmente, quase todas as especificações emitidas a respeito do emprego de agregados rochosos em concretos e rodovias, apresentam itens quanto a forma dos fragmentos e presença de substâncias deletérias (sílica amorfa, impurezas orgânicas, sulfetos, materiais pulverulentos, etc.). Entretanto, raramente são apresentados os nomes destas substâncias deletérias e as porcentagens limites, admissíveis para estas e para os fragmentos achatados ou alongados.

Um critério bastante empregado e muito rigoroso, para fragmentos achatados ou alongados, é o limite de 5% em peso (4). Entretanto, não existe nenhum suporte teórico ou experimental para a fixação deste limite, senão a suposição de que tais fragmentos possam ser prejudiciais para o uso de agregados. Nos ensaios de abrasão Los Angeles, impacto Treton e esmagamento, a porcentagem de perda aumenta progressivamente com o aumento de fragmentos não cúbicos (52).

Observamos que no panorama apresentado, foi dada maior atenção àquelas características de agregados, cujos campos ainda estão sujeitos a modificações possivelmente radicais, principalmente - quanto aos procedimentos de ensaios.

O aspecto da alteração de rochas, merece um tratamento à parte.

A alteração no sentido imprimido por nós, é o conjunto de modificações sofridas pelas rochas na sua composição mineralógica, estrutura e propriedade, quando em uso, como resultado da interação de complexos processos fisicoquímicos. Difere portanto, das alterações deutéricas, hidrotermais, etc., comuns nos processos - igneometamórficos.

A importância da alteração e desagregabilidade dos materiais rochosos em Engenharia Civil, residiria principalmente nos seguintes efeitos (44):

1. Diminuição da resistência com ou sem produção de finos, ou seja, com ou sem perda de coesão. A resistência mecânica das rochas é uma das propriedades que mais vai interessar à Engenharia Civil, ao construtor. Em quaisquer casos, sejam enrocamentos, concretos, pavimentos, lastros de vias férreas, fundações, túneis, a

diminuição da resistência com a alteração constitui sempre um grave inconveniente.

2. Variação nas características mecânicas de deformabilidade. Sem dúvida, o comportamento geomecânico das rochas, ou na forma de maciço ou agregados, está bastante relacionado ao seu estado de alteração. A importância relativa das várias fases de deformação depende, não só das características físicas das rochas e das condições de ambiente a que está submetida, como da atuação das solicitações, da natureza destas e das leis que regem as suas variações.

A deformabilidade de uma rocha é devida de um lado, à deformabilidade do sistema constituído pelos seus grãos cristalinos e, por outro lado, à do sistema constituído pelas ligações entre estes grãos. Cada um destes sistemas contribuiria, ou mais ou menos, para o comportamento global da rocha. Como a alteração afeta tanto a natureza dos grãos minerais como as ligações entre eles, é de se esperar que afete também as características de deformabilidade da rocha.

3. Variação na porosidade e permeabilidade e portanto, na estanqueidade.

A porosidade e permeabilidade das rochas são propriedades reconhecidamente variáveis com a alteração, podendo aumentar ou diminuir (16 - 20 - 21). A variação destas propriedades é especialmente importante em obras onde a estanqueidade é fundamental: barragens, túneis e fundação.

4. Diminuição nas características de aderência ou adesividade de tanto a ligantes hidráulicos como betuminosos.

As características de aderência e adesividade a ligantes hidráulicos e betuminosos, relacionam-se com o estado de alteração de agregado. A resistência da estrutura, naturalmente deverá relacionar-se com a eficiência desta ligação.

Quando se brita uma rocha, as ligações interatômicas são quebradas ao nível da superfície de ruptura. Nos silicatos, que são os principais constituintes das rochas, obtem-se em superfí - cie íons positivos (Ca^{++} , Na^{+} , K^{+} , Si^{++++} , Al^{+++} , Fe^{++} , Fe^{+++} , etc.)

e íons negativos (O^-). Em presença de água, os cations fixam OH^- e os íons O^- fixam H^+ , para a neutralização da superfície. Numa segunda etapa, os íons superficiais dos agregados tem tendência a entrar em solução. A dissolução de Ca^{++} , Na^+ e K^+ é mais rápida numa primeira etapa de lixiviação, que a dos ânions SiO_4^{----} . Assim, as superfícies silicatadas têm tendência a se enriquecer relativamente em sílica e em alumina, tornando-se cada vez mais ácidas, tendendo a uma composição silicosa.

As superfícies deste tipo são mais desfavoráveis a uma boa adesividade do betume, especialmente se os agregados estão úmidos no momento do lançamento. A acidificação progressiva das superfícies cristalinas conduz portanto, a riscos de má adesividade a curto ou médio prazo.

Paralelamente, os agregados constituídos de rochas semialteradas ou alteradas, podem conter hidróxidos de ferro livres ou minerais instáveis suscetíveis de fornecerem hidróxidos por lixiviação, por exemplo, de feldspatos ferruginizados ou da pirita contida. Os hidróxidos tem tendência a migrar para a superfície do agregado e aí se depositarem, constituindo uma película ferruginosa desfavorável a uma boa aderência entre a rocha e o ligante, sobretudo para os pré-misturados a frio.

De um modo geral, as causas que determinam a alteração pertencem a duas grandes categorias (11-14-38-44):

1. A primeira agrupa as causas ditas externas, que caracterizam o ambiente de alteração e se manifestam, qualquer que seja a natureza da rocha.

2. A segunda compreende as causas ditas internas, que são ligadas às características intrínsecas das rochas e determinam sua alterabilidade.

As causas externas são inicialmente processos físicos ligados sobretudo às variações de temperatura e umidade, e que conduzem a uma desagregação mecânica mais ou menos forçada das rochas. Esta desagregação mecânica é caracterizada por:

1. Fragmentação em blocos angulosos, de rochas coerentes: certos calcários, muitos basaltos e rochas cristalinas de granulação fina em geral.

2. Escamação de rochas em placas desde alguns centímetros a milímetros de espessura.

3. Esfarelamento em rochas granulares ou grãos de areia: algumas rochas cristalinas.

A partir do aparecimento destas descontinuidades é que intervem geralmente os processos químicos. Eles se traduzem por um ataque dos minerais das rochas por soluções mais ou menos agressivas, que penetram e circulam nos materiais, com tanto maior facilidade quanto maior for o efeito dos processos físicos. Às vezes, a alteração é ainda acentuada por fatores biológicos que atuam, ou diretamente por ação mecânica ou indiretamente aumentando a agressividade das soluções.

Uma rocha é definida por um certo numero de características, algumas ligadas à sua origem e outras resultantes de transformações sofridas ao longo de sua história geológica. Em condições ambientais idênticas, as rochas não se alteram da mesma forma. Cada uma delas é caracterizada por uma certa alterabilidade que depende:

1. Da natureza dos constituintes: composição química e mineralogia.

2. De suas características texturais, estrutura, granulação, grau de cimentação.

3. Das modalidades de penetração e circulação do agente líquido agressivo, ao interior da rocha, que dependem por sua vez, da porosidade e fissuração.

Como vimos, uma análise adequada das causas e mecanismos de alteração e seus efeitos nas propriedades fisicomecânicas, é extremamente importante para uma avaliação do estado de alteração e previsão do comportamento de rochas, seja como maciço rochoso seja como agregado. Nos casos rotineiros, esta avaliação tem sido usualmente efetuada de maneira bastante empírica, fornecendo somente uma idéia qualitativa do estado de alteração. A falta do estabelecimento de métodos quantitativos para a estimativa da alteração meteórica, tem permitido se chegar a determinações subjetivas e nem sempre corretas. Por esta razão, a tarefa de encontrar métodos quantitativos mais objetivos para estimar o grau de

alteração e alterabilidade de rochas se torna extremamente importante. Os principais problemas de um estudo de alteração de rochas e sua avaliação, consistem nos seguintes:

1. Procedimento de cálculo da variação da resistência e escolha do parâmetro mecânico.
2. Influência da granulometria para ensaio.
3. Correlações entre resultados obtidos em ensaios de laboratório e aqueles referentes à desagregação de rochas no campo.
4. Validade e aplicabilidade (significado físico dos ensaios de alteração).

Diversos procedimentos foram até hoje propostos para avaliar o comportamento de rochas face à alteração. A maioria deles determina a qualidade da rocha no momento da análise constituindo-se em avaliações qualitativas de seu estado atual, não fornecendo uma previsão quanto ao comportamento mecânico das rochas. Citaremos resumidamente alguns dos procedimentos mais importantes:

1. Morais Rego, L.F. e Souza Santos, T.D. (31) - sugeriram a porosidade aparente como índice de durabilidade. Em amostras de uma mesma rocha, a mais alterada deverá apresentar maior porosidade aparente, portanto menor durabilidade.

2. Pichler, E. (33) indica a análise petrográfica e o ensaio de absorção d'água sob pressão normal como critério de previsão da alterabilidade de rochas. Determina-se a porcentagem de água absorvida por amostras representativas. Se a análise petrográfica indicar a rocha como possuindo alteração pronunciada e o valor da absorção d'água superior a 0,5%, esta é de má qualidade e deve ser rejeitada.

3. Talobre, J.A. (45), sugere um ensaio de alteração acelerada em laboratório, como critério de avaliação da alterabilidade de rochas. Os ataques são acelerados em corpos de prova em pó e cilíndricos de 1 x 1 x 2 cm, por meio do ácido sulfúrico 10% a quente. As perdas de peso das rochas em pó e dos corpos de prova cilíndricos são determinadas após 1h, 3h, 5h e 7 h de ataque. São considerados como admissíveis perdas de 18% após 7 horas para o pó e de 100 mg sobre os corpos de prova cilíndricos.

4. Segundo Rocha, M. (38), no Laboratório Nacional de Engenharia

ria Civil (Lisboa), está sendo seguida técnica que consiste em moer a rocha, para uma dada granulometria, e em submetê-la a percolação contínua de água quente dentro do tubo extrator Soxhlet. Toma-se como critério de alterabilidade a perda em peso da rocha num dado tempo de ensaio.

5. Iliev, G.I. (25), examina a influência do intemperismo nas diferentes propriedades fisicomecânicas e recomenda usar a mais variável delas como indicadora da alteração, encontrando a velocidade de propagação de ondas ultrasônicas como o melhor índice. Introdz com base nesta propriedade, um coeficiente de alteração: $K = \frac{V_o - V_w}{V_c}$ (onde V_o e V_w são respectivamente a velocidade de propagação de ondas ultrasônicas em uma rocha fresca e alterada).

6. O Idaho Department of Highways (24) apresenta um método de ensaio para análise da desagregação de rochas. Consiste em um ensaio de abrasão modificado (sem carga abrasiva) e sob a ação de um compactador. A intensidade e tipo de desagregação são indicadas por mudanças nos valores do grau de seleção, limite de liquidez, índice de plasticidade e equivalente em areia em relação ao material original.

7. Scott, L.E. (in 14), recomenda a execução de análise petrográfica de agregados basálticos. Teores superiores a 20% de minerais secundários situariam a rocha fora de especificações.

8. Day, H.L. (11), propõe um método de ensaio para previsão da desagregação de rochas basálticas, baseado em valor Deval modificado e análise granulométrica dos finos obtidos. Propõe ainda uma classificação da qualidade de basaltos, tendo em vista o conteúdo em minerais de alteração verificado numa análise petrográfica: 0 a 15% - boa qualidade, 15-25% de transição e mais que 25% - de qualidade inferior.

9. Schneider e Pires da Rocha (41) propõem uma análise petrográfica para determinação das porcentagens de minerais secundários em rochas basálticas, com emprego em pavimentação asfáltica:

a. Se a rocha contiver menos de 5% (em volume) de minerais secundários deletérios, dispensa-se a execução de ensaios adicionais e a rocha pode ser aceita.

b. Se a rocha contiver de 5 a 10% de minerais secundários e

estes forem do tipo não expansivo (caulinita, ilita, etc.), pode a mesma ser utilizada, sem ensaios adicionais.

c. Se a rocha contiver de 5 a 10% de minerais secundários e esses forem do tipo expansivo, deve a mesma ser submetida a ensaaios.

d. Se a rocha contiver mais que 10% de minerais secundários, deverá a mesma ser submetida a uma série de ensaios.

10. Krauskopf, K.B. (in14), define numericamente o grau de alteração mineralógico ou geoquímico de uma rocha, utilizando-se de dados químicos:

$$K = \frac{\text{nº de moles (CaO+MgO+Na}_2\text{O+K}_2\text{O-H}_2\text{O)}}{\text{nº de moles (SiO}_2\text{+Al}_2\text{O}_3\text{+Fe}_2\text{O}_3\text{+CaO+MgO+Na}_2\text{O+K}_2\text{O)}}$$

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

11. Muitos autores são particularmente interessados no estudo de descontinuidades em rochas, que eles consideram como um fator primordial nos fenômenos de alteração (Goni, J et al-1968; - Thenoz, B. et al - 1966; Farran, J. et al-1965).

Eles classificam as descontinuidades em duas categorias principais: as fissuras que constituem a microfissuração matricial (espessura $\leq 1 \mu$) e são representadas pelas clivagens e fissuras intragranulares e às vezes fissuras intergranulares. É ao nível da microfissuração matricial que se situam essencialmente as grandes superfícies de contato entre uma rocha e um fluido. A segunda categoria inclui as fraturas, que são em muito menor número que as fissuras matriciais, distinguindo-se microfraturas (espessura $\leq 0,1 \text{ mm}$) e as macrofraturas (diaclasses, falhas).

O estudo do macrofraturamento se faz sobre a rocha "in situ", à escala do afloramento ou maciço rochoso, ao passo que, o do microfraturamento e da microfissuração matricial, resultam do exame microscópico de secções delgadas de corpos de prova previamente impregnadas por uma resina colorida. A partir dos resultados de ensaios de permeabilidade e porosidade relativa da rocha, pode-se calcular a superfície desenvolvida dessas descontinuidades. Esta superfície, relacionada à unidade de volume (ou de peso) do ma

terial considerado, é chamado de "superfície interna unitária" e constitui um critério de alterabilidade, para rochas com permeabilidade $> 0,1$ mdy.

12. West, T.R. e outros (50), propõem procedimentos incluindo análises petrográficas macroscópicas e microscópicas, ensaio de abrasão Los Angeles seco e úmido, congelamento e degelo. Estes ensaios são combinados conforme a natureza petrográfica e relacionados a um índice de alteração, fixado pelos autores e que varia de 0 a 10.

13. Aires-Barros, L.A. (1-2), estabelece o chamado índice de qualidade micropetrográfico, que é determinado a partir de uma relação entre minerais sãos e minerais alterados e relacionado a grandezas mecânicas como o módulo de elasticidade e a tensão máxima de ruptura.

14. Lockart, J.H. e Marchetti, C.F. (in 24) propõem um índice de degradação, para emprego de agregados de qualidade inferior em rodovias. O índice de degradação é a soma dos deslocamentos na curva granulométrica, após compactação, com um compactador giratório. O material aceitável para base deve possuir $ID \leq 7\%$.

15. Para Farran J. et al (16), o primeiro parâmetro determinante a levar em consideração é a permeabilidade da rocha e não a superfície interna que intervém somente em segundo lugar. Em função de sua alterabilidade, classificaram as rochas em duas grandes categorias:

a. Rochas muito compactas onde a circulação de água é impossível. Granitos desta categoria, quaisquer que sejam a sua superfície interna e sua alterabilidade, são praticamente inalteráveis.

b. Rochas menos compactas, no interior das quais as circulações de água são impossíveis. Para estas, a alterabilidade se revela então proporcional à superfície interna unitária.

A alterabilidade para estes autores, é definida pela alterabilidade específica que é a relação entre a porcentagem de argilo minerais expansivos e a velocidade de alteração (% perda em peso / tempo).

16. Struillou, R. (44) propõe o método de imersão de fragmentos de rocha de 10-20 mm em água oxigenada a 110 volumes, para

caracterizar a sensibilidade de uma rocha à desagregação. A porcentagem que passa na peneira de 8 mm, após ensaio, constitui o critério de previsão que se utilizará para comparar o material estudado com outros materiais empregados em obras equivalentes.

17. Weinert, H.H. (49) estabelece um fator climático (N), - que representa a expressão numérica das condições climáticas de uma determinada área. Este valor é obtido relacionando-se a evapotranspiração do mes de maior pluviosidade com a precipitação anual. Este fator climático é posteriormente relacionado à porcentagem de minerais secundários, obtendo-se uma linha que separa as rochas sãs das rochas alteradas, para efeito de aprovação de materiais para finalidades rodoviárias.

18. Hamrol, M. (22), sugere o processo da saturação de amostras de rochas em água como uma indicação de alteração. Estabelece dois parâmetros: i_I e i_{II} .

i_I = alteração excluindo fraturamento de qualquer natureza

i_{II} = alteração consistindo exclusivamente de fraturamento

O valor numérico de i_I é a % de água absorvida pela rocha em um ensaio de absorção, dividida pelo seu peso seco:

$$i_I = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \cdot 100 \quad \begin{array}{l} P_1 = \text{peso seco} \\ P_2 = \text{peso saturado} \end{array}$$

O valor numérico i_{II} é dado pela expressão:

$i_{II} = (\alpha x + \alpha y + \alpha z) 100$ onde αx , αy e αz representam as dimensões lineares das aberturas de diaclases ao longo de 3 eixos ortogonais, pela unidade de comprimento. Representa grosso modo, o índice de vazios.

Dividindo-se a mudança dos parâmetros i_I e i_{II} pelo intervalo de tempo considerado, obtém-se a alterabilidade das rochas.

19. Recentemente Farjallat, J.E.S. (14), propõe uma expressão matemática para exprimir a alterabilidade de uma rocha, dentro

de um intervalo de tempo Δt , representando este, o intervalo en
tre dois estágios de alteração natural ou experimental:

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

onde:

I = valor Los Angeles no tempo inicial do intervalo Δt , mais
% desagregada até então

F = valor Los Angeles no tempo final do intervalo, mais %
desagregada até então.

O valor 200 é utilizado como limite para o qual tende I e F.
O coeficiente de alterabilidade K pode variar no intervalo 0 a 1.
Quanto maior o seu valor, maior é a alterabilidade da rocha.

III. - METODOLOGIA EMPREGADA

III.1 - Amostragem e métodos

Tendo em vista as dificuldades na obtenção de grandes volumes de amostras necessárias para o desenvolvimento de uma pesquisa desta natureza, procurou-se estudar tipos litológicos característicos levando em conta sua disponibilidade em quantidades adequadas, bem como o interesse imediato existente sobre o conhecimento de suas propriedades tecnológicas, para seu aproveitamento como fontes naturais de materiais de construção. Assim, escolheu-se amostras características entre as rochas ígneas, metamórficas e sedimentares de pedreiras em franca exploração ou de locais de implantação de obras de grande porte.

As amostras estudadas constituíram-se de:

A) Fragmentos de rocha de dimensões variando de blocos de décimos de metros cúbicos a alguns centímetros cúbicos, provenientes de britagens primárias nos locais de origem.

B) Testemunhos de rocha de locais onde se estudam ou se constroem obras civis, obtidas a partir de sondagens rotativas de diversos diâmetros, com coroa de diamante.

C) Britas constituídas de diversas granulometrias obtidas na saída de britadores primários ou de silos de pedreiras.

Estes materiais após a recepção, foram separados a partir de uma observação macroscópica grosseira, conforme as suas características petrográficas, em unidades litológicas diferentes para efeito de ensaio. As amostras enviadas, consideradas macroscopicamente homogêneas, foram diretamente levadas para preparação de corpos de prova, infelizmente sem quarteamento, devido à quantidade restrita de materiais disponíveis em relação ao volume de ensaios. Para contornar este inconveniente, o nº de ensaios executados foi duplicado em relação ao nº de ensaios

prescrito pelos métodos seguidos. As dispersões observadas foram perfeitamente toleráveis (abaixo de 10%).

Os materiais recebidos sob a forma de blocos de pedra ou testemunhos de sondagem, permitiram obter corpos de prova prismáticos de 5 x 5 x 10 cm, cúbicos de 2,5 x 2,5 x 2,5 cm e cilíndricos, para os ensaios de compressão simples axial, impacto com o aparelho de impacto da ASTM e com o esclerômetro Schmidt. Essas serragens foram efetuadas em máquina de corte de pedra com discos de carborundum, que foram suficientemente eficientes para não causarem a ruptura nem o fissuramento dos corpos de prova. Os blocos de pedra permitiram, também, a obtenção de corpos de prova cilíndricos de diversas dimensões, com o emprego de uma perfuratriz de laboratório, da Acker Drill Co., Inc.

Para os demais ensaios, que requerem pedra britada, as graduações de ensaio foram obtidas por britagem manual das amostras recebidas.

Todas as rochas foram submetidas a uma caracterização tecnológica inicial que compreendeu os seguintes ensaios e métodos adotados (39):

A) Parâmetros de densidade: massa específica aparente, absorção d'água e porosidade aparente.

- Método de ensaio IPT M-47.

B) Resistência ao impacto Treton

- Método de ensaio IPT M-52.

C) Resistência ao esmagamento

- Método de ensaio IPT M-53

D) Resistência à compressão simples axial

- Método de ensaio IPT M-50

E) Resistência à abrasão Los Angeles

- Método de ensaio ABNT M-170

Para os ensaios com o esclerômetro Schmidt, o apa

relho de impacto ASTM D3-18 e o aparelho de desgaste a úmido, foram efetuadas uma série de ensaios com grande volume de amostras, para que os dados de reprodutibilidade do equipamento e dimensionamento de amostras tenham validade estatística, bem como suas possíveis correlações, com as demais propriedades, obtidas nos ensaios acima citados. Os resultados alcançados permitiram a elaboração de uma proposta de método para os ensaios de desgaste a úmido e ensaio com o esclerômetro Schmidt, bem como um método modificado para o ensaio com o aparelho de impacto D3-18.

III.2 - Procedências e tipos de amostras

Para facilitar a identificação durante o andamento dos estudos, as amostras foram simplesmente indicadas pela sua designação petrográfica e local de origem. A descrição petrográfica detalhada, efetuada pela Seção de Petrografia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

As amostras estudadas foram as seguintes:

AMOSTRA Nº 1

Basalto "A" da Barragem de Capivara, proveniente de pedreira da margem direita, Rio Paranapanema. A amostra é constituída de blocos de basalto compacto, de textura afanítica e cor cinza-médio esverdeado, do derrame I (14-15), do local da barragem.

AMOSTRA Nº 2

Basalto "B" da Barragem de Capivara, proveniente do local da escavação do vertedouro da barragem, no Rio Paranapanema. A amostra é constituída de blocos de basalto vesículo-amigdaloidal, característica de topo e base do derrame II (14), do local da barragem.

AMOSTRA Nº 3

Basalto "C" da Barragem de Capivara, proveniente do local da escavação do vertedouro da barragem, no Rio Paranapanema. A amostra é constituída de blocos e testemu

nhos de sondagens rotativas, de basalto microamigdaloidal com amígdalas preenchidas por minerais argilosos esverdeados a amarelados, do derrame II (14-15), do local da barragem.

AMOSTRA Nº 4

Basalto de Salto Osório, proveniente da pedreira da barragem de Salto Osório, Rio Iguaçu, Estado do Paraná. A amostra é constituída de blocos de basalto vesiculamigdaloidal, com amígdalas preenchidas por minerais argilosos esverdeados, quartzo e zeólitas, de textura afanítica e cor cinza acastanhado.

AMOSTRA Nº 5

Basalto de Olímpia, proveniente da Pedreira Jazida, em exploração, no Município de Olímpia, Estado de São Paulo. A amostra é constituída de blocos e pedra britada de basalto compacto, de textura afanítica e cor cinza esverdeado.

AMOSTRA Nº 6

Basalto da Serra de Brotas, proveniente de uma pedreira em exploração, entre os Municípios de Dois Córregos e Guarapuã, no Estado de São Paulo. A amostra é constituída de blocos e pedra britada de basalto compacto, de textura afanítica e cor cinza escuro a preto.

AMOSTRA Nº 7

Basalto da Ilha Solteira, proveniente da Pedreira B, da margem esquerda do Rio Paraná, nas proximidades da barragem de Ilha Solteira. A amostra é constituída de blocos e testemunhos de sondagens rotativas de basalto compacto, de textura afanítica e cor cinza escuro.

AMOSTRA Nº 8

Diabásio Campinas, proveniente da Pedreira Pedrabrasil, em exploração, no km 97 da via Anhanguera, Município de Campinas. A amostra é constituída de blocos de diabásio, de textura afanítica fina, de cor cinza escuro.

AMOSTRA Nº 9

Quartzito Jequitai, do local da barragem do Rio Jequitai, Município de Jequitai, Estado de Minas Gerais. A amostra é constituída de testemunhos de sondagens rotativas de quartzito maciço silicificado, de cor cinza claro.

AMOSTRA Nº 10

Calcário do Rio Grande do Sul, proveniente de uma pedreira no Estado do Rio Grande do Sul. A amostra é constituída de blocos de calcário de textura cristalina, de cor cinza claro.

AMOSTRA Nº 11

Calcário Apiai, proveniente de uma pedreira no Município de Apiai, no Estado de São Paulo. A amostra é constituída de blocos de calcário de textura cristalina, de cor cinza claro.

AMOSTRA Nº^S 12 e 13

Granito Anhanguera, (São e Alterado), proveniente da Pedreira Anhanguera, em exploração, no km 22 da Via Anhanguera, Cajamar, Estado de São Paulo. As amostras são constituídas de blocos de granito gnáissico são e levemente alterado, de textura por vezes orientada, de cores cinza claro e amarelado.

AMOSTRA Nº 14

Charnockito Ubatuba, proveniente da Pedreira do Perequê-Mirim, no Município de Ubatuba, Estado de São Paulo. A amostra é constituída de blocos de charnockito, de textura grossa, de cor cinza esverdeado.

AMOSTRA Nº 15

Piroxenito Niquelândia, proveniente de um afloramento no maciço de Canabrava, Município de Niquelândia, Estado de Goiás. A amostra é constituída de blocos de piroxenito, de textura média, de cor verde amarelado.

AMOSTRA Nº 16

Granito Sacos, proveniente da pedreira da barragem de Sacos, no Rio Formoso, Estado da Bahia. A amostra é constituída de testemunhos de sondagens rotativas de granito, de textura média, de cor rósea.

AMOSTRA Nº 17

Migmatito Jaborandi, proveniente da pedreira da barragem de Jaborandi, no Rio Formoso, Estado da Bahia. A amostra é constituída de testemunhos de sondagens rotativas de migmatito de textura fina a média, de cor cinza róseo.

AMOSTRA Nº 18

Arenito Bauru, proveniente de um corte de estrada na ligação ferroviária Bauru - Garças, no Estado de São Paulo. A amostra é constituída de blocos de arenito calcífero maciço, de cor avermelhado claro.

III.3 - Aparelhagem

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram necessários os seguintes equipamentos:

A) Britador de mandíbulas com abertura mínima de 2,54 cm da Fábrica de Aços Paulista S.A.

B) Aparelho de extração de corpos de prova da Acker Drill Co., Inc., com jogo de corpos diamantadas de diversos diâmetros.

C) Serra para corte de rochas com discos de carbrundum.

D) Máquina Los Angeles conforme AASHO T96-56.

E) Máquina Treton do padrão DER: P81-52T.

F) Prensa Amsler de 200 toneladas para os ensaios de resistência ao esmagamento e compressão simples axial.

G) Máquina de impacto para corpos de prova moldados, construído pela Divisão de Mecânica, do Instituto de

Pesquisas Tecnológicas, conforme ASTM D-3-18.

H) Esclerômetro Schmidt, modelo RM-710 da Soil - test Inc.

I) Aparelho de desgaste a úmido, desenvolvido pelo Imperial College de Londres e fabricado nas oficinas da Divisão de Mecânica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, a partir dos dados constantes no trabalho de Franklin (17-18).

J) Microscópio petrográfico Ortholux da Leitz - Wetzlar.

K) Estufa ventilada da FANEM, modelo 315/5 com termostato com capacidade de manter uma temperatura constante de 105-110°C.

L) Conjunto extrator Soxhlet com manta aquecedora e regulador de voltagem.

M) Calculadora 9810 A HP da Hewlet - Packard, com capacidade para 500 steps (passos de programa) e 51 registros para armazenamento de dados os quais podem ser estendidos para 2036 steps e 111 registros através da extensão de memória (plaqueta colocada no interior do aparelho). - Apresenta ainda uma impressora (termo-sensível) e leitora de cartões magnéticos, ambos colocados no interior do aparelho. Consta de blocos encaixáveis nas suas tampas superiores (o bloco estatístico permite calcular os parâmetros estatísticos e efetuar a análise de regressão).

IV. - ENSAIOS FÍSICOS ESTUDADOS

IV.1 - Avaliação da resistência de rochas pelo emprego do esclerômetro Schmidt.

O esclerômetro Schmidt é um instrumento de campo empregado normalmente na determinação da resistência à compressão de concretos (27-28). Uma grande experiência foi acumulada por duas décadas existindo ainda discussões a respeito de seu emprego. Um recente apanhado da opinião internacional (28) estabeleceu que o esclerômetro fornece somente uma indicação grosseira da qualidade do concreto mas tem sido contudo, de grande utilidade nesta avaliação.

O instrumento consiste basicamente de um pistão com mola que é projetado contra uma pequena bigorna que está em contato com a superfície da amostra ensaiada. O pistão ao ricochetear após bater nesta bigorna, é travada por um botão, e a altura de retorno é indicada sobre uma escala graduada subdividida em intervalos iguais de 0 a 100, que é denominado de índice esclerométrico, dureza esclerométrica ou valor de retorno Schmidt.

A ação destes instrumentos tem sido considerada como uma boa simulação da ação de ferramentas de perfuração a percussão servindo, portanto, como indicadoras da perfurabilidade de rochas (51).

Alguns autores como White (51) e Deere (12), correlacionaram com certo sucesso, os resultados obtidos com estes instrumentos aos valores de resistência à compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, obtendo coeficientes de correlação da ordem de 0,7 a 0,9. O segundo autor acima citado, elaborou um gráfico a partir dos resultados de 28 rochas diferentes, que permite estimar a resistência à compressão e módulo de elasticidade de uma rocha, conhecidos os valores do índice esclerométrico e massa específica aparente, com no mínimo 75% de certeza, o que constitui uma razoável estimativa, dada as características de heterogeneidade destes materiais.

Como vemos, a aplicabilidade deste instrumento em

rochas, foi praticamente comprovada por estes autores. Além disso, trata-se de um ensaio bastante simples, não destrutivo, rápido, de boa reprodutividade e razoável precisão (da ordem de no máximo 15%).

Em nossos estudos procuramos testar esta aplicabilidade através da execução de diversos ensaios, que nos permitissem obter as variáveis de ensaio, afim de elaborar um método para emprego deste instrumento em ensaios rotineiros. Um outro objetivo é o da verificação da validade do índice esclerométrico como parâmetro do estado de alteração.

O instrumento empregado foi o esclerômetro Schmidt, modelo RM-710 da Soiltest, Inc., com energia de percussão de 0,225 kgm, cuja descrição detalhada encontra-se no Apêndice B deste trabalho.

As variáveis de ensaio investigadas foram: dimensões do corpo de prova, tipo de suporte, nº de leituras, precisão, sistema de ensaio e correlações com diversas propriedades tecnológicas.

O estudo da validade do índice esclerométrico como parâmetro do estado de alteração foi efetuado em laboratório, com a realização de ensaios em corpos de prova de diferentes rochas, submetidos à alteração por lixiviação contínua em extrator Soxhlet e, no campo, com a realização de leituras sistemáticas mensais, nas paredes da escavação da tomada d'água da barragem de Capivara.

Apresentamos a seguir, os procedimentos adotados e os resultados obtidos por partes:

A) Estudo das variáveis de ensaios

Através de serragem e com o auxílio da perfuratriz de laboratório, foram preparados corpos de prova de diversas dimensões, de diferentes rochas.

Para encontrarmos a dimensão mais adequada para o corpo de prova, foram efetuadas 30 leituras para cada 2 corpos de prova de dimensões variando de 2 cm a 8 cm de espessura e diâmetro constante 7,05 cm. As leituras foram tomadas nas faces transversais. Os resultados obtidos indicaram

que para espessuras maiores do que 7 cm não há interferência do tipo de suporte do corpo de prova para ensaio. As dispersões dos resultados sofreram uma queda sensível, com o aumento da espessura do corpo de prova (o coeficiente de variação caiu de 37% a 19%).

Chefdeville (8) utilizando o esclerômetro Schmidt - em concretos, verificou a existência de uma influência considerável do substrato de apoio dos corpos de prova, sobre os resultados obtidos. Este fato foi comprovado em nossos ensaios, efetuando-se 30 medidas em corpos de prova apoiados sobre o suporte da Soiltest (que acompanha o instrumento), e sobre apoios diferentes construídos em nossas oficinas (apoio de ferro fundido e apoio de madeira). A comparação entre as dispersões obtidas demonstrou que os ensaios sobre o apoio Soiltest apresentam um menor coeficiente de variação, da ordem de 5%.

A precisão ou grau de concordância entre resultados repetidos obtidos sob qualquer conjunto definido de condições, é geralmente expresso como um erro relativo. Um aumento na precisão implica em um decréscimo no seu valor numérico absoluto. Para a determinação da precisão de ensaio de um conjunto de resultados obtidos com o esclerômetro Schmidt foram efetuadas 30 medidas em corpos de prova prismáticos de diferentes rochas, nas faces transversais, distanciadas de 10 cm. O maior erro relativo da média obtido foi de 0,7, que corresponde a um coeficiente de variação de 14% e desvio padrão de 4,2. Para efeito de dimensionamento de amostras ou seja, o nº mínimo de ensaios necessários para se atingir 95% de confiança nos resultados, foi considerada esta dispersão máxima pois, os demais ensaios deverão provavelmente cair dentro desta faixa.

Eliminando-se a dispersão devido ao equipamento, obtida com a execução de 30 ensaios em corpos de prova teoricamente isotrópicos (gesso, calda de cimento, vidro), da dispersão acima obtida, calculou-se que são necessários no mínimo 5 leituras individuais, para se obter uma boa média representativa de um determinado ensaio, com um erro relati

vo inferior a 15% no valor da média.

As observações revelaram que poderão ocorrer 2 valores do índice esclerométrico possíveis de serem obtidos para uma determinada rocha, um valor inferior ou inicial e um valor superior ou máximo quando efetuamos diversos ensaios em um ponto. O valor inferior é o primeiro a ser obtido em um ponto de ensaio. A repetição de ensaios sobre este mesmo ponto mostrou frequentemente valores crescentes até que um máximo foi obtido. Este aumento de valores indicaria um endurecimento superficial do corpo de prova. Este aspecto não é apresentado devido à insuficiência dos dados que dispomos e deverá ser investigado oportunamente. Constituirá eventualmente, em um novo sistema de medida dos índices esclerométricos.

Obtidas as variáveis de ensaio, procedeu-se à determinação do índice esclerométrico de diversas rochas, cujos resultados estão apresentados na tabela 1.

B) Análise dos resultados

Estes resultados foram analisados através do método de regressão pelos mínimos quadrados, para determinação de relações porventura existentes entre índice esclerométrico e outras propriedades tecnológicas. As equações de correlação encontradas, considerando-se sempre o índice esclerométrico como variável independente, encontram-se na tabela 2.

A seguinte codificação foi estabelecida para as equações de regressão:

- IE - Índice Esclerométrico
- γ - Massa Específica Aparente
- A - Absorção d'água
- PA - Porosidade Aparente
- ALA - Abrasão Los Angeles
- E - Esmagamento
- IT - Impacto Treton
- CSA - Compressão Simples Axial

Foram calculadas para cada equação de correlação, os

respectivos coeficientes de correlação e erros padrão de estimativa. O coeficiente de correlação fornece uma indicação da correlação relativa entre variáveis e o erro padrão de estimativa constitui uma medida da variância em torno da linha de regressão. Maiores detalhes sobre o procedimento estatístico adotado, encontram-se no Apêndice C.

Os valores dos índices esclerométricos em relação às propriedades tecnológicas, foram colocadas em gráficos e encontram-se nas figs. 1 e 2, onde foram traçadas a linha de regressão com os respectivos limites obtidos pelos erros padrão dos valores estimados. Escolheu-se a relação linear pela maior facilidade de interpretação e pela proximidade dos valores dos coeficientes de correlação das várias relações.

Os resultados da análise de regressão indicam que existem poucas correlações entre o índice esclerométrico e as propriedades tecnológicas. Existe uma correlação significativa entre o índice esclerométrico e os valores da abrasão Los Angeles e os da Compressão Simples Axial. Esta última correlação é significativamente melhorada quando multiplicamos o valor do índice esclerométrico com a massa específica aparente, o que concorda com os resultados obtidos por Deere (12).

C) Parâmetro do estado de alteração

A aplicabilidade do ensaio com o esclerômetro Schmidt, como medida do estado de alteração de rochas, foi estudada da seguinte maneira:

1. Laboratório

Foram preparados inicialmente 4 corpos de prova prismáticos de 5 x 5 x 10 cm de cada rocha estudada, sendo que em 2 deles foram efetuadas 10 medidas em 10 pontos de uma face, e 10 a 20 medidas repetidas em diversos pontos das demais faces. Obtivemos assim, uma média dos 10 pontos iniciais e uma outra média (geralmente mais elevada), resultante das medidas repetidas em cada ponto. A seguir, os 2 corpos de prova restantes, foram submetidos a 30 ciclos de lixiviação contínua no extrator Soxhlet e posterior secagem -

em estufa a 100-110°C. O material seco, após alteração, foi submetido ao mesmo procedimento com o esclerômetro Schmidt, obtendo-se da mesma maneira, 2 médias diferentes menores para cada caso descrito acima.

2. Campo

Os ensaios com o esclerômetro Schmidt no campo, foram efetuados pela Seção de Geologia Aplicada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, nas paredes da escavação da tomada d'água e tubulação, da barragem de Capivara. O procedimento adotado foi o seguinte:

Inicialmente foram escolhidas áreas de 1 m² em diversas paredes constituídas de basaltos do tipo "C" e "B", onde foram locados 25 pontos em cada área. A seguir, foram executados mensalmente, 5 ensaios em cada ponto, perfazendo um total de 125 pontos por área, para se ter uma média do índice esclerométrico para cada área. As observações indicaram que ocorreu uma queda nas médias obtidas, de aproximadamente 1% ao mês, aliada à visível alteração superficial das paredes.

Como vemos, ocorre uma queda sistemática tanto no campo como em laboratório, do valor do índice esclerométrico, quando as rochas são submetidas à alteração. Este fato indica que o ensaio com o esclerômetro Schmidt poderá constituir-se em um método promissor para a obtenção de um parâmetro do estado de alteração. Entretanto, somente após a padronização de um sistema mais adequado de medida, é que poder-se-á aplicar este índice em caracterizações tecnológicas rotineiras. Para tal, elaborou-se um método que poderá comparar os resultados destes procedimentos (Apêndice B).

D) Conclusões

As conclusões preliminares para emprego do esclerômetro Schmidt em rochas, podem ser resumidas da seguinte maneira:

1. A reprodutibilidade de leituras em um esclerômetro e entre esclerômetros (comparando-se com os resultados de outros autores), é muito boa.

2. Discrepâncias nas estimativas de resistência a compressão e abrasão Los Angeles são igualmente da ordem de 30%.

3. Poderá constituir-se em excelente ensaio para medida do estado de alteração de rochas dada as suas características de rapidez, facilidade de execução, baixo custo, - boa precisão e reprodutibilidade.

E) Recomendações

As seguintes recomendações são sugeridas para completar este estudo:

1. Todas as análises e conclusões foram praticamente baseadas em resultados de ensaios de laboratório. É essencial que o valor deste índice seja substanciado através de maior quantidade de ensaios de laboratório e de campo, em uma grande variedade de rochas.

2. Enquanto não for comprovado um sistema mais adequado de medida, a aplicabilidade do aparelho é restringida.

3. Resultados de alguns poucos ensaios, evidenciaram que as condições superficiais (seca ou úmida), tem uma influência significativa no resultado dos ensaios, como ocorre nos ensaios de compressão simples axial (seco e saturado). Deverão ser obtidos valores de índices esclerométricos para amostras secas e saturadas.

4. Estudo de correlações do índice esclerométrico com o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para rochas.

F) Observações

Alguns aspectos, importantes para uma padronização do ensaio, surgiram durante a execução destes ensaios e merecem registro, a saber:

1. Os ensaios deverão ser executados sempre perpendicularmente à superfície de ensaio.

2. O esclerômetro deve ser calibrado frequentemente, ou com o emprego da bigorna que pode acompanhar o instrumento ou por comparação com um esclerômetro ajustado ou, com qualquer objeto de superfície dura, de valor esclerométrico previamente determinado.

3. A superfície de impacto do instrumento deverá ser previamente uniformizada (polimento com carborundum, p.ex:) e limpa.

4. O ponto de impacto deverá ser mantido pelo menos a 2 cm da extremidade do corpo de prova. As extremidades - sempre fornecem leituras inferiores.

5. Nos ensaios em laboratório, deve-se usar sempre o mesmo suporte de apoio, caso não se disponha de corpos de prova com espessuras maiores do que 8 cm.

6. Os corpos de prova para ensaio em laboratório devem estar bem acabadas e sem trincas.

7. Ensaios em corpos de prova de uma determinada rocha, devem sempre levar em conta a sua estrutura. Em uma rocha xistosa por exemplo, deve-se efetuar ensaios paralela e perpendicularmente a esta feição.

8. Os corpos de prova devem ser convenientemente fixados, para evitar qualquer deslocamento durante o impacto.

9. O esclerômetro Schmidt para concreto possui uma energia de impacto elevada fraturando os corpos de prova de rochas. A energia de impacto do esclerômetro utilizado por Deere e Miller é de 0,075 kgm.

IV.2 - Resistência ao impacto de corpos de prova regulares

O ensaio de impacto descrito no método ASTM D3-18, - constitui um ensaio físico bastante simples, desenvolvido - para fornecer uma medida quantitativa do comportamento da rocha ao impacto. O valor obtido será importante nos casos onde a rocha é submetida a impactos repentidos, seja como - material solto, seja com ligantes. Os principais campos de aplicação constituem, portanto, a escolha de materiais ro -

chosos para pavimentos de rodovias e pistas de aeroportos e lastros para vias férreas. Em concretos, o ensaio é restrito pois a aplicação da carga instantânea é puntiforme, fornecendo somente uma idéia qualitativa do comportamento de rochas.

A resistência ao impacto de rochas é influenciada - primariamente, pelas suas características petrográficas - (9-36): mineralogia e textura. Em rochas ígneas e metamórficas não xistosas, os grãos cristalinos estão, em geral, fortemente interligados constituindo uma textura densa ocasionando elevadas resistências ao impacto. Por outro lado, em rochas sedimentares quartzosas, embora os grãos constituintes sejam muito duros (quartzo), a coesão da rocha depende da substância cimentante, que pode ser pouco resistente. Um fator adicional, que influencia o comportamento mecânico de rochas cristalinas face a essas solicitações, é o tamanho dos grãos. O aumento desta granulação ocasiona a diminuição da superfície específica dos mesmos, enfraquecendo as ligações intergranulares, além de tornar as fraquezas estruturais intragranulares como microfraturamento, clivagem, planos de geminação, etc, bastante importantes.

Para a determinação da resistência ao impacto de rochas, existem na literatura diversos procedimentos e equipamentos, sendo os mais importantes, o ensaio de impacto Treton pelo método DER M26-52T, o método BS-812 e o método - ASTM D3-18.

O ensaio de impacto em rochas pelo método ASTM D3-18, foi desenvolvido para medir a tenacidade de rochas em corpos de prova cilíndricos. Este método foi revisto em - 1961 e continuou até hoje sem modificações. Como se trata de um ensaio relativamente simples e de fácil execução, e como dispomos de poucos meios conhecidamente precisos para se medir características tecnológicas de rochas, procuramos avaliar a aplicabilidade deste método para utilização rotineira. Para isto, foi desenvolvido nas oficinas da Seção de Mecânica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, o instru -

mento de ensaio, conforme prescrito pelo método. O esquema do instrumento é apresentado no apêndice B.

Com o equipamento construído, procurou-se estabelecer as características das variáveis de ensaio: forma dos corpos de prova e procedimento. Posteriormente foram determinados a precisão dos ensaios, nº de ensaios para 95% de confiabilidade e correlações dos valores obtidos em diferentes rochas, com diversas propriedades tecnológicas.

O procedimento experimental e os resultados atingidos, obedeceram a seguinte sequência:

A) Estudo das variáveis de ensaio

Através de britagem, serragem e com o auxílio da perfuratriz de laboratório, foram preparados corpos de prova cúbicos, cilíndricos e irregulares de 2,5 cm de dimensão linear.

Para cada forma de corpo de prova após secagem em estufa, foram executados 50 ensaios em uma única rocha e com o mesmo procedimento, isto é, a cada queda de um peso padronizado, acrescentou-se 1 cm na altura de queda até ruptura do corpo de prova. Considerou-se a altura final como medida da resistência ao impacto, em centímetros.

Os resultados encontrados apresentaram as seguintes dispersões:

Corpo de prova cúbico	S = 1,8 cm	Cv = 23%
" " cilíndrico	S = 1,8 cm	Cv = 23%
" " irregular	S = 4,0 cm	Cv = 35%

Além do procedimento acima descrito, foram investigados 2 outros sistemas: o primeiro deles considerou o nº de golpes necessários para se romper o corpo de prova, caindo o peso de uma altura constante pré-fixada. Os resultados para 30 medidas nas alturas constantes de 5,7 e 10 cm, deram coeficientes de variação da ordem de 45 a 60%. Para alturas maiores, a grande maioria das rochas ensaiadas rompeu-se com apenas 1 golpe e para alturas menores do que 5 cm o procedimento obrigou a execução de um nº exaustivo de en

saos para se romper o corpo de prova. O outro sistema de medida, consistiu numa modificação do sistema de altura final, computando-se o resultado como sendo, a soma das alturas de queda do peso até a ruptura do corpo de prova. Para este procedimento, o coeficiente de variação foi da ordem - de 47%.

Para a determinação do erro relativo da média, foram ensaiados 30 corpos de prova de um basalto vesículo amigdaloidal, que apresentou o maior valor de dispersão, que foi de 0,3, que corresponde a um coeficiente de variação de 22% e desvio padrão de 1,8 cm.

O nº mínimo de ensaios, para se obter uma boa média representativa com 95% de confiança e erro relativo inferior a 15% no valor da média, foi calculado a partir da dispersão total $S=1,8$ cm, subtraindo-se a dispersão obtida em corpos de prova isotrópicos (cálculos efetuados com as variâncias). O resultado encontrado foi de 7 ensaios necessários, para preencher estes requisitos de confiabilidade.

Conhecidas as variáveis de ensaios, procedeu-se à determinação da Resistência ao impacto em corpos de prova cilíndricos de diferentes rochas, cujos resultados encontram-se na tabela .

B) Análise dos resultados

Os resultados obtidos foram analisados pelo método de regressão pelos mínimos quadrados, para se determinar eventuais correlações com outras propriedades tecnológicas. As equações de correlação encontradas, considerando-se sempre o valor da resistência ao impacto (código IC) como variável independente, bem como os respectivos valores do coeficiente de correlação e erro padrão da estimativa encontram-se na tabela 3 e nas figs. 4 e 5. Para a confecção dos gráficos de correlação escolheu-se a relação linear pela maior facilidade de interpretação e traçado, bem como pela pequena diferença existente nos valores dos coeficientes de correlação.

Apesar do pequeno número de resultados, a análise de

regressão revela que existem boas correlações entre a resistência ao impacto determinado por este método e as propriedades tecnológicas. Ocorre uma correlação significativa entre a resistência ao impacto e os resultados de ensaios de impacto Treton, abrasão Los Angeles e compressão simples axial. As linhas de regressão obtidas para estes casos (figs 4 e 5), mostram que estão razoavelmente ajustadas aos pontos obtidos.

C) Conclusões

As conclusões sobre a aplicabilidade do método podem ser resumidas da seguinte maneira:

1. O método ASTM D3-18 apresenta-se vago quanto à confiabilidade para os 3 ensaios requeridos. O nº mínimo de ensaios requeridos para se ter uma boa média representativa (para 95% de confiança), com erro relativo inferior a 15% é de 7.

2. A aplicabilidade do instrumento é limitada, com um coeficiente de variação da ordem de 22%, sendo muito inferior ao do ensaio Treton (6%).

3. Poderá constituir-se em ensaio expedito para estimativa de algumas propriedades mecânicas como resistência a compressão simples axial, abrasão Los Angeles e a própria resistência ao impacto Treton. As discrepâncias nas estimativas destas propriedades são respectivamente da ordem de: 30%, 30% e 40%.

4. Os resultados indicaram que os corpos de prova cúbicos, apesar da maior dificuldade na sua confecção, são tão adequados quanto os corpos de prova cilíndricos.

5. O procedimento de ensaio adotado pelo método ASTM D3-18 é o mais adequado, para este tipo de equipamento.

D) Recomendações

Dado o pequeno número de tipos litológicos ensaiados e os resultados promissores alcançados pelas correlações re

comenda-se:

1. Execução de maior número de ensaios para uma maior variedade de rochas.

2. A determinação da resistência ao impacto poderá ser efetuada para os vários casos que a rocha apresentar. Assim sendo, poder-se-á determinar a resistência ao impacto perpendicular ao plano de xistosidade, paralelo ao plano de xistosidade (ou estratificação), seco, saturada, etc.

3. Poderá ser efetuado um estudo para aplicação deste ensaio na determinação do estado de alteração de rochas, tendo em vista que a resistência ao impacto é uma propriedade de bastante dependente das características petrográficas e portanto deverá ser sensivelmente mutável.

IV.3 - Resistência ao desgaste a úmido de rochas

Para um melhor aproveitamento de testemunhos de sondagens Franklin e outros (17) desenvolveram o aparelho de desgaste a úmido (figura e descrição no Apêndice B), que mede a velocidade de fragmentação de uma rocha, quando submetida a um ciclo padronizado de secagem e umedecimento. O procedimento consiste na colocação de 10 fragmentos de rocha, cada um pesando 40-60 g, previamente secos em estufa e colocados em um tambor de ensaio. O tambor é então imerso pela metade em um tanque com água e girado lentamente por 10 minutos. Os finos produzidos por este processo de desgaste passam através dos crivos da malha que forma o corpo do tambor. O índice de desgaste a úmido é calculado como:

$$RDU = \frac{\text{peso a seco da rocha retida no tambor}}{\text{peso a seco da rocha antes do ensaio}} \%$$

Este índice pode variar deste modo, de 0% quando a rocha se desintegra totalmente a 100% de resistência quando não ocorre desintegração. Segundo os autores (17), os resultados dos ensaios seriam colocados em um perfil de sondagem e expressariam o comportamento da alteração "in situ", con-

sistindo portanto, em um ensaio de durabilidade.

Tendo em vista, a simplicidade do equipamento, a rapidez de execução do ensaio, sua alta reprodutibilidade (5%) dentro do ensaio e a possibilidade de obter novos parâmetros mecânicos do estado de alteração, conseguimos a partir dos dados divulgados sobre o mesmo, desenvolver um equipamento semelhante nas oficinas da Seção de Ensaaios Mecânicos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

Construído o equipamento, o próximo passo foi a determinação das variáveis de ensaio, que possibilitaria a elaboração de um método padronizado. As variáveis de ensaio investigadas foram: número, peso e granulometria dos corpos de prova, precisão, tempo de ensaio e número de ciclos. Posteriormente, os resultados obtidos para diversas rochas foram submetidos à correlação estatística através da análise de regressão pelo método dos mínimos quadrados, com as várias propriedades tecnológicas determinadas.

O procedimento adotado para determinação das variáveis de ensaio, que ainda se encontra em andamento, obedeceu a seguinte sequência:

A) Estudo das variáveis de ensaio

Após britagem, lavagem e secagem em estufa, foram preparados corpos de prova de diferentes rochas, com pesos variando de 10 a 60 g, que foram submetidos a ensaio, por um tempo fixo de 10 minutos de rotação, mantendo também fixo o número de 10 fragmentos. Os resultados obtidos mostraram que ocorre um aumento progressivo da perda até 30-35 g estabilizando a seguir por volta do peso de 60 g.

Considerando-se o peso ideal dos fragmentos na faixa de 40-60 g e variando-se o tempo de ensaio de 5 a 70 minutos, dentro do tambor, verificou-se que ocorre um aumento linear da perda com o tempo.

Considerando-se o peso ideal dos fragmentos também na faixa recomendada por Franklin (18) de 40-60 g, o tempo de ensaio de 10 minutos, variou-se o nº de fragmentos de 5

a 20. Ocorreu um aumento progressivo na perda com o aumento do nº de fragmentos ensaiados até se estabilizar por volta dos 20 fragmentos.

Os resultados parciais para vários ciclos, isto é, - ciclos alternados de rotação no tambor por 10 minutos e subsequente secagem em estufa a 100-110°C por aproximadamente 10 horas, demonstraram que ocorre um aumento progressivo da perda com o número de ciclos.

Para a determinação da precisão dentro do ensaio foram efetuados 30 ensaios, considerando-se o tempo de 10 minutos de rotação e corpos de prova de 40-60 g, como padronizados. O erro padrão da média obtido foi de 0,1 para um desvio padrão de 0,6 e coeficiente de variação de 0,6%.

Tendo em vista os resultados ainda incompletos acerca das variáveis deste ensaio, optou-se pelas recomendações estabelecidas pelos autores deste equipamento, para determinação da resistência ao desgaste a úmido de diversas rochas. Para um melhor aproveitamento e conhecimento das limitações deste instrumento, foi elaborado um plano de pesquisa (EPC-7), cujo método de ensaio proposto, consta no Apêndice B deste trabalho (o procedimento adotado foi o de Franklin e outros).

A análise de regressão efetuada entre os valores de resistência ao desgaste a úmido (da tabela 4) e as diversas propriedades tecnológicas indicaram que poderá haver uma correlação razoável com a resistência a abrasão Los Angeles (figs. 5 e 6).

B) Conclusões

Embora os estudos estejam ainda em andamento, algumas conclusões preliminares podem ser adiantadas:

1. O tempo desejável de rotação do instrumento durante ensaio, não concorda com o tempo estabelecido pelos autores (18). O tempo mínimo adequado deverá ser representado por um máximo de desgaste, a partir do qual não deverá ocorrer modificações sensíveis na perda.

2. As solicitações imprimidas por este ensaio em rochas diferentes mostram que trata-se de um ensaio muito pouco sensível.

3. Os resultados preliminares parecem indicar que fragmentos de 30 a 35 g são os que fornecem valores de resistência ao desgaste com maior sensibilidade, dentro de um dado intervalo de tempo.

4. Embora Franklin tenha encontrado como adequado 10 fragmentos para ensaio, os resultados obtidos parecem indicar maior sensibilidade da aparelhagem com 15 fragmentos.

5. Estudos realizados no sentido de definir o número ideal de ciclos de ensaio, indicam a conveniência de se utilizar vários ciclos para aumentar sua sensibilidade.

6. O instrumento poderá ser aplicável para distinção de rochas de características tecnológicas pobres.

C) Recomendações

1. Embora a precisão obtida tenha sido elevada, o instrumento não apresenta a sensibilidade desejada. Possivelmente a intercalação de fases de alteração artificial - neste ensaio, poderão ser de valia na investigação de sua aplicabilidade.

2. Deverão ser efetuados um maior volume de ensaios em uma maior variedade de rochas tanto para o dimensionamento de amostras para ensaio, quanto para o estudo de correlações estatísticas.

V. - ENSAIOS DE ALTERAÇÃO

V.1 - Quadro experimental

Os sistemas de observação puramente qualitativos podem fornecer uma impressão útil do conjunto não permitindo entretanto, senão conclusões muito subjetivas sobre os valores apresentados pelas diversas rochas à ação de diferentes agentes. Existem na literatura diversos procedimentos experimentais para acelerar os processos de alteração da natureza: imersão em etilenoglicol, saturação em água e secagem em estufa, lixiviação contínua com o extrator Soxhlet, congelamento e degelo, alternância de aquecimento e resfriamento a seco, imersão em água oxigenada, alternância de saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa, etc. Entretanto, todos estes procedimentos apesar de consagrados, são utilizados na maioria dos casos sem o conhecimento de suas limitações, seja quanto à simulação das condições atmosféricas, seja quanto à interpretação e aplicabilidade dos resultados. A aceitação de materiais rochosos com base nos resultados obtidos com os ensaios citados, fica quase que exclusivamente na dependência de limites empíricos, variáveis conforme a responsabilidade da obra.

Assim, nós procuramos estudar de um lado a comparação entre diferentes processos de alteração acelerada em laboratório com a alteração natural e por outro lado, o comportamento mecânico de diversas rochas face a essas diferentes solicitações fisicoquímicas, com a finalidade de escolher um método mais adequado e de encontrar parâmetros numéricos que permitam prever o comportamento e estado de alteração de rochas.

Os ensaios de alteração comparados foram: ensaio de alteração por lixiviação contínua com o extrator Soxhlet, ensaio de alteração por saturação em água e secagem em estufa, ensaio de alteração por imersão em etilenoglicol e secagem em estufa, ensaio de alteração por imersão em solução saturada de sulfato de sódio e secagem em estufa e ensaio de alteração por exposição natural.

Para a execução deste estudo, foram adotados dois tipos de procedimentos de ensaio: o primeiro deles consistiu na execução destes ensaios de alteração em dez frações granulométricas diferentes de uma única rocha, em diversos ciclos de alteração; o segundo procedimento consistiu na execução destes ensaios de alteração para diversas rochas e medida de seu comportamento mecânico a cada determinado número de ciclos. Para este último procedimento, o parâmetro mecânico escolhido foi o ensaio de impacto Treton, tendo em vista que:

1. O valor de impacto Treton é bastante conhecido e muito usado em especificações principalmente para aprovação de agregados rochosos para pavimentação e concreto.
2. Trata-se de um ensaio de fácil execução, rápido, de alta reprodutibilidade (coeficiente de variação até 6%) e ótima precisão (1%).
3. Necessita de pequenas quantidades de amostras, o que permite realizar um grande número de ensaios.
4. Finalmente, a pouca disponibilidade de materiais para ensaio.

Dada as características de elevada suscetibilidade às condições de alteração, demonstrada por Nery, J.A.N. e Farjallat, J.E.S. (15) e Farjallat, J.E.S. (14), escolheu-se o basalto "C" da barragem de Capivara (derrame II), para a comparação entre os processos de alteração acima citados e medida do comportamento mecânico.

V.2 - Procedimentos para comparação entre diferentes processos de alteração

Após britagem, lavagem em água e secagem em estufa a $100-110^{\circ}\text{C}$, as amostras de basalto tipo C da barragem de Capivara, foram peneiradas e separadas em dez frações granulométricas: $3"-2\frac{1}{2}"$, $2\frac{1}{2}"-2"$, $2"-1\frac{1}{2}"$, $1\frac{1}{2}"-1"$, $1"-3/4"$, $3/4"-1/2"$, $1/2"-3/8"$, $3/8"-N^{\circ}3$, $N^{\circ}3-N^{\circ}4$ e $N^{\circ}4-N^{\circ}8$. A seguir, foram pesadas diferentes quantidades nas diversas frações, de tal forma que a superfície total

dos fragmentos ("superfície específica") oferecida aos processos de alteração seja a mais próxima possível (tabela 5).

Conhecidas as quantidades de amostras necessárias nas diferentes frações, os procedimentos adotados para os diferentes processos de alteração foram os seguintes:

A) Ensaios de alteração por lixiviação contínua

Para o estudo da avaliação da alterabilidade de rochas por lixiviação contínua, foi utilizado um conjunto de extratores Soxhlet (descrição e figura no Apêndice B),

A alteração experimental de rochas em laboratório, utilizando extratores deste tipo foi descrita no trabalho de G. Pedro (32), que descreveu os aspectos mineralógicos e geoquímicos da alteração experimental, isto é, o comportamento dinâmico dos elementos químicos e neoformações de minerais. O instrumento Soxhlet tenta simular no laboratório as condições naturais de alteração, mas em velocidade muito maior, graças à temperatura mais elevada (cerca de 70°C) e velocidade de percolação de água também muito maior. No "clima" deste aparelho podemos distinguir duas regiões: zona atmosférica, onde as amostras não estão submersas e onde a velocidade de percolação da água é muito grande; e zona de flutuação do nível da água, onde as amostras se apresentam alternadamente imersas e emersas. Corresponderia segundo G. Pedro, a um clima tropical oceânico exagerado.

Os ensaios para avaliação da alterabilidade de rochas, submetidas ao processo de lixiviação contínua, tiveram o seguinte procedimento:

Após cada 10 ciclos no extrator Soxhlet a partir de 20 ciclos, as amostras em diversas frações, foram secas em estufa a 100-110°C por aproximadamente 16 horas, esfriadas à temperatura ambiente e peneiradas durante 5 minutos com as mesmas peneiras nas quais tinham sido retidas antes do ensaio. A seguir, os materiais retidos foram pesados, computando-se as perdas em porcentagem em relação ao peso inicial. Este procedimento foi adotado até se completar 100

ciclos no extrator (correspondendo a 20 dias de ensaio), obtendo-se as porcentagens de perdas acumuladas para os diversos ciclos, nas diferentes frações. Os resultados obtidos encontram-se relacionados na tabela 6 e colocados em gráficos do tipo porcentagem de perda acumulada versus nº de ciclos (fig. 7) e porcentagem de perda acumulada versus superfície específica (fig. 8).

B) Ensaios de alteração por saturação em água e secagem em estufa.

A água pode ocasionar uma ação mecânica direta nos fenômenos de alteração: o impacto das gotas de água da chuva e as águas de rolamento são capazes de arrastar fragmentos de rochas. Mas, esta ação não é de nosso interesse pois implica que as rochas estejam previamente desagregadas. Muito mais importante são suas ações indiretas ligadas às variações de temperaturas e às alternâncias de saturação e secagem.

O coeficiente de dilatação da água é muito superior ao das rochas, o que pode fazer com que as variações de temperatura da água aprisionada nos poros possa provocar uma certa desagregação. Por outro lado, as variações de umidade por si só, tem o poder de separar os cristais pela transformação da película de água intergranular em gotículas, o que modifica as tensões superficiais. Mas, o máximo de efeito destruidor sobre as rochas só é obtido pela combinação dos dois fatores: a variação de temperatura e umidade (P.Birot in C.Javey).

O estudo de avaliação da alterabilidade de rochas sob o efeito de alternâncias de ciclos de saturação e secagem - foi efetuada da seguinte maneira:

Após cada 7 ciclos de saturação em água durante 16 horas e secagem em estufa a 100-110°C por aproximadamente 8 horas, a partir do 5º ciclo, as amostras em diversas frações foram esfriadas à temperatura ambiente e peneiradas durante 5 minutos com as mesmas peneiras nas quais tinham sido retidas antes do ensaio. A seguir, as amostras retidas foram pesadas, computando-se as perdas em % em relação ao

peso inicial. Este procedimento foi adotado até se completar 55 ciclos de saturação e secagem, obtendo-se as % de perda acumuladas para os diversos ciclos, nas diferentes frações. Os resultados obtidos encontram-se relacionados na tabela 9 e colocados em gráficos do tipo % de perda acumulada versus nº de ciclos (fig. 11) e % de perda acumulada versus superfície específica (fig. 12).

C) Ensaios de alteração por imersão em etilenoglicol e secagem em estufa.

Sabemos que o etilenoglicol tem a propriedade de produzir uma expansão reticular de minerais argilosos do grupo das montmorillonitas e em algumas cloritas expansivas. Devido à sua alta polaridade e tensão superficial, acreditamos que este líquido provoque também, ao penetrar nas microdescontinuidades de rochas, contrações e expansões nas suas paredes.

Ensaios de alteração de rochas com este líquido foram até hoje efetuados com a simples imersão de fragmentos de rochas na fração granulométrica 1" - 3/4", durante 15 dias. Decorrido este tempo, as amostras ensaiadas eram comparadas com amostras não ensaiadas da mesma rocha. Este é o procedimento denominado "Olson test", adotado pela "U.S. Corps of Engineers" e seguido por diversos laboratórios de ensaios.

Para a avaliação da alterabilidade de rochas com imersão em etilenoglicol e secagem em estufa, escolheu-se a priori, dois tempos diferentes de imersão: 1 hora e 6 horas.

Após cada ciclo de imersão em etilenoglicol (1 e 6 horas), e secagem em estufa durante pelo menos 8 horas, as amostras nas diversas frações foram esfriadas à temperatura ambiente e peneiradas durante 5 minutos com as mesmas peneiras nas quais tinham sido retidas antes do ensaio. A seguir, as amostras retidas foram pesadas, computando-se as perdas em % em relação ao peso inicial. Este procedimento foi adotado até se completar para o caso de 1 hora de imersão, 18 ciclos e, para o caso de 6 horas de imersão, 11 ciclos, obtendo-se as % de perdas acumuladas para os diversos ciclos, nas diferentes frações. Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas 12 ((1) = 1 hora de imersão) e 15 ((2) = 6 ho-

ras de imersão), e colocados em gráficos do tipo % de perda acumulada versus nº de ciclos (figs. 15 e 19) e % de perda acumulada versus superfície específica (figs. 16 e 20).

D) Ensaios de alteração por imersão em solução saturada de sulfato de sódio e secagem em estufa.

Os fenômenos de cristalização de sais e o crescimento de cristais, resultam de processos quase sempre físicos e por vezes químicos pois, é efetuada a partir de soluções. - Segundo W. Correns (in C. Javey 26), podem ocorrer três casos possíveis:

a) Formação de cristais hidratados. O exemplo típico é a cristalização de gipso a partir da anidrita. Essa transformação necessita 2 moléculas de água e provoca um aumento de volume importante, que desenvolve uma pressão de 1100 atmosferas.

b) Cristalização de um sal a partir de sua solução saturada. As pressões que ela ocasiona são tais que se fala em efeito explosivo de cristalização.

c) O crescimento de cristais pode desenvolver pressões importantes mas é necessário que a tensão superficial da solução permita que esta última penetre nas microdescontinuidades.

As alterações devidas à cristalização de sais são frequentes em ambientes desérticos, mediterrâneos e tropicais (26). A resistência de rochas à desagregação por cristalização de sais, segundo G. Pedro (32) e M. Robert (37) é mais relacionada à sua estrutura petrográfica que à sua composição química e é função de sua compactidade. As rochas porosas que possuem superfícies externas rugosas, fazem com que os cristais se desenvolvam nos poros e pequenos vazios provocando um estilhaçamento e uma desagregação superficial contínua. Uma rocha compacta apresentará superfícies relativamente lisas sobre os quais os cristais irão simplesmente se depositar.

Conforme G. Pedro (32), não ocorre sob a ação da cris-

talização de sais, rupturas internas de um bloco rochoso em um certo número de fragmentos de pequenas dimensões; o que acontece é uma ação superficial marcante, seja por uma regularização das rugosidades superficiais, seja por descalçamento de minerais no caso de rochas granulares.

A determinação dos efeitos da cristalização de sais sobre uma rocha foi efetuada com o auxílio do método ASTM C 88:69 no qual, se provoca artificialmente a cristalização de sulfato de sódio. Após cada 2 ciclos de imersão em solução saturada de sulfato de sódio e secagem em estufa a 100-110°C, a partir do 1º ciclo, as amostras nas diversas frações foram esfriadas à temperatura ambiente e peneiradas durante 5 minutos com as mesmas peneiras nas quais tinham sido retidas antes do ensaio. A seguir, as amostras retidas foram pesadas, computando-se as perdas em % em relação ao peso inicial. Este procedimento foi adotado até se completar 21 ciclos, obtendo-se as % de perdas acumuladas para os diversos ciclos, nas diferentes frações. Os resultados obtidos, encontram-se relacionados na tabela 18, e colocados em gráficos do tipo % de perda acumulada versus nº de ciclos (fig. 23) e % de perda acumulada versus superfície específica (fig. 24).

E) Ensaio de alteração por exposição natural

As únicas referências existentes a respeito de ensaios de alteração por exposição natural, com controle periódico, são as experiências de A. Demolon e E. Bastisse, efetuado em Versailles (in M. Robert 37). Em 1930, estes autores instalaram 800 kg de granito, previamente britados, em caixas lisimétricas, expostas aos agentes atmosféricos. As observações foram efetuadas no fim de 5, 15 e 30 anos. O resultado após 30 anos mostrou que a constituição física do granito foi profundamente modificada, para um material pulverulento, enquanto que a alteração química foi praticamente nula. Desta forma, em condições onde não age normalmente nenhum fator físico (geio ou calor), mas simplesmente fatores climáticos, que em geral produzem uma evolução tipicamente

química, obteve-se um efeito considerável de desagregação.

Usualmente, em estudos de alteração de rochas por exposição natural, nos locais de obras, os materiais rochosos de interesse para aproveitamento são simplesmente expostos às intempéries sob a forma de brita, observando-se o comportamento durante intervalos de tempo determinado, ou executando-se ensaios de peneiramento para a obtenção da curva granulométrica após ensaio. A % de perda determinada ou peneiras empiricamente estabelecidos e a observação visual, - constituem os critérios de aprovação de materiais quanto à alterabilidade.

Neste trabalho, apresentamos um novo procedimento para se determinar a alterabilidade de rochas face à exposição natural. Os ensaios de alteração por exposição natural foram executados pelo geólogo J.A.N. de Oliveira, na barragem de Capivara, em basaltos dos tipos A, B e C. O procedimento adotado para o basalto C, pode ser resumido da seguinte forma: amostras de rochas britadas e peneiradas na fração 1 1/2" - 1", foram submetidas à alteração natural durante um ano. Para cada mes de exposição, eram computadas as porcentagens desagregadas nas peneiras nas quais tinham sido retidas antes do ensaio. Obteve-se assim, as % de perdas acumuladas para os diversos tempos de exposição. Os resultados obtidos foram relacionados na tabela 21 e colocados em gráficos do tipo % de perda acumulada versus tempo de exposição em meses ou dias (fig. 27).

V.3 - Medida do comportamento mecânico

O controle do comportamento mecânico face às diferentes solicitações impostas pelos ensaios de alteração, foi efetuado utilizando-se o ensaio de impacto Treton (método IPT M-52) como parâmetro mecânico, para 18 rochas de procedências e naturezas litológicas diferentes.

O ensaio de impacto Treton consiste em se submeter 20 fragmentos de rocha entre as dimensões de 3/4" e 5/8", lavados e secos, em estufa a 100-110°C por 24 horas, a 10 impactos de um peso de 15,88 kg caindo em queda livre de uma altura de 38,4 cm, no aparelho Treton. Após ensaio, o mate -

rial deve ser lavado na peneira nº 12 (abertura de 1,68mm), até que as superfícies estejam livres de pó. O material é então, levado à estufa a 100-110°C por 24 horas, resfriado e pesado. Para cada rocha a ser ensaiada devem ser efetuadas 3 determinações. O valor de impacto Treton é a relação percentual entre as diferenças de peso inicial e final pelo peso inicial, sendo que é considerada a média de 3 resultados. A relação entre o peso final, retido na peneira nº 12 e o peso inicial, expresso em %, é a resistência ao impacto Treton do material (que constitui uma outra forma de expressar o resultado do ensaio e representa o complemento da forma anterior, para 100%). Os valores da resistência ao impacto Treton das 18 rochas estudadas, antes dos ensaios de alteração, encontram-se na tabela 23.

O procedimento adotado para todos os ensaios de alteração efetuados, com exceção do ensaio de alteração por exposição natural, foi o seguinte:

Após britagem, as amostras foram lavadas e secas na estufa a 100-110°C e peneiradas, após resfriamento, na peneira do ensaio Treton. Do material separado, foram tomadas tantas amostras quantos foram os ensaios mecânicos intermediários efetuados, para um determinado número de ciclos. Decorrido o intervalo de ciclos pré-estabelecido, uma das amostras de cada rocha foi retirada para medida da resistência mecânica, continuando as demais amostras até o próximo número de ciclos requerido. A amostra retirada deve ser lavada e seca a 100-110°C e peneirada durante 5 minutos com a mesma peneira na qual tinha sido retida antes do ensaio. A seguir, foi pesado o material retido de cada fração, constituindo o material passante nas peneiras, a perda em peso devido ao ensaio de alteração, correspondendo à parte mais desagregável, de resistência mecânica nula. O material retido, pesado, foi levado para o ensaio de impacto Treton, pelo método IPT M-52, correspondendo o valor obtido à resistência mecânica do material que resistiu ao ensaio de alteração.

Os fragmentos de basaltos dos tipos A, B e C, submeti

dos à exposição natural durante quase um ano, na barragem de Capivara, na granulação de 1 1/2 - 1", foram britados para a granulação do ensaio Treton, lavados e secos em estufa a 100-110°C e ensaiados pelo método IPT M-52, correspondendo o valor obtido à resistência mecânica do material que resistiu ao ensaio de alteração. A % de perda do ensaio de alteração, de resistência nula, foi obtida inicialmente, através dos ensaios de exposição natural, descrito no item anterior.

O cálculo da resistência mecânica final do material, para um determinado número de ciclos ou tempo de ensaio, é efetuado ponderando-se as resistências mecânicas dos materiais passante e retido após o ensaio, através da expressão:

$$R_f = \frac{X \cdot R_p + (100 - X) R_r}{100}$$

onde:

X = % de perda no ensaio de alteração

100-X = % de material que resistiu à alteração

R_p = resistência mecânica do material passante

R_r = resistência mecânica do material retido

R_f = resistência mecânica final para um determinado número de ciclos ou tempo de ensaio de alteração.

Como R_p = 0 (material desagregado), a expressão acima fica reduzida a:

$$R_f = \frac{(100 - X) R_r}{100}$$

Os resultados obtidos da resistência mecânica final, após os diferentes ensaios de alteração, para as 18 rochas estudadas, encontram-se na tabela 23. Com exceção de alguns casos, somente para os basaltos foram efetuadas 2 a 3 medidas intermediárias de resistência, no decorrer dos ensaios. Os valores obtidos encontram-se relacionados na tabela 24, sob a forma de % de perda, tanto para os ensaios mecânicos, como para os ensaios de alteração e, em gráficos do tipo % de perda versus nº de ciclos (figs. 30

a 57).

Calculados os valores da resistência mecânica final, é possível determinarmos a queda porcentual de resistência, em relação à resistência mecânica inicial, dos diversos materiais, submetidos às diferentes condições de alteração, - através da seguinte expressão, que é válida para o intervalo de ciclos ou tempo de ensaio considerado:

$$\Delta R = \frac{R_i - R_f}{R_i} \cdot 100$$

onde:

ΔR = queda percentual da resistência mecânica

R_i = resistência mecânica inicial

R_f = resistência mecânica final, para um determinado nº de ciclos ou tempo de ensaio.

A relação entre a queda percentual de resistência mecânica e a resistência mecânica inicial, fornece um índice que pode exprimir a suscetibilidade de uma dada rocha em sofrer uma queda na sua resistência quando submetida a ensaios de alteração. Este índice, proposto neste trabalho, foi denominado de coeficiente de alterabilidade específica K (onde $K = \frac{\Delta R}{R_i}$), cujo valor mínimo é diferente de zero e valor máximo igual a unidade. Isto significa que quanto mais próximo da unidade, maior será a alterabilidade da rocha.

Os valores dos coeficientes de alterabilidade específica calculados para as 18 rochas estudadas, nos diferentes ensaios de alteração, encontram-se na tabela 25, com exceção dos ensaios de exposição natural, onde temos somente os valores para os basaltos de Capivara.

Observa-se que para a medida e comparação do comportamento mecânico durante alteração foram considerados os seguintes intervalos de ensaios: ensaio de alteração via Soxhlet (30 ciclos), ensaio de alteração por saturação-secagem (30 ciclos), ensaio de alteração com etilenoglicol (15 dias de imersão), ensaio de alteração com sulfato de sódio (15 ciclos) e ensaio de alteração por exposição natural (6 me -

ses). O ensaio de alteração com o etilenoglicol, para diversas rochas, foi efetuado com a imersão de amostras durante 15 dias e posterior secagem em estufa, em vez do procedimento adotado no item V.2.C., para que houvesse apenas a influência deste reagente.

VI. - TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ALTERAÇÃO

Neste capítulo, os resultados experimentais dos ensaios de alteração são examinados estatisticamente, fornecendo as correlações dentro dos ensaios efetuados e com novos parâmetros introduzidos.

VI.1 - Comparação entre os diferentes processos de alteração

Os resultados dos ensaios por diferentes processos de alteração, efetuados em diversas granulometrias do basalto tipo C da barragem de Capivara, evidenciaram um comportamento bastante similar em todos os casos, como se pode verificar nas curvas obtidas relacionando a % de perda acumulada e o nº de ciclos ou tempo de ensaio. Vejamos separadamente cada processo de alteração:

A) Ensaio de alteração com o extrator Scxhlet

As linhas identificadas de A a J da fig. 7, representam curvas de alterabilidade nas diferentes granulometrias ensaiadas, respectivamente de 3" - 2 1/2" a Nº 4 - Nº 8, conforme a tabela 6. Verifica-se em todas as curvas que ocorre uma perda acentuada nos primeiros ciclos, para em seguida estabilizarem aproximando-se assintótica e quase paralelamente em direção à desagregação total. Se considerarmos este comportamento em termos de velocidade de alteração, que seria a relação entre a % de perda e o intervalo de ciclos ou tempo considerado, podemos dizer que a velocidade decresce com o tempo e a função entre estas variáveis é do tipo não linear.

Do mesmo modo, relacionando-se a superfície específica dos fragmentos com a % de perda acumulada, verifica-se que a função entre estas variáveis é do tipo não linear (fig. 8). A % de perda acumulada aumenta com a diminuição da granulometria, para um mesmo nº de ciclos ou tempo de ensaio. As linhas identificadas de C₂₀ a C₁₀₀, representam curvas de perda no ensaio de alteração, respectivamente

para 20 a 100 ciclos. Este gráfico demonstra portanto, a influência do tamanho dos fragmentos no ensaio de alteração, principalmente em fragmentos maiores do que 1 1/2", diminuindo em torno da fração 3/4" - 1/2" em direção às granulações menores.

As tabelas 7 e 8 apresentam os resultados da análise de regressão pelo método dos mínimos quadrados, respectivamente das relações: % de perda acumulada versus nº de ciclos e % de perda acumulada versus superfície específica. Foram obtidas as equações e coeficientes de correlação para as funções exponencial e potencial, verificando-se que em todos os casos, a melhor correlação é obtida em funções do tipo potencial, que podem ser expressas genericamente por:

$$P_i = a_i C_i^{k_i}$$

$$C_i = b_i S_i^{m_i}$$

onde:

P_i = % de perda acumulada para um determinado nº de ciclos

C_i = nº de ciclos considerado

S_i = superfície específica de uma dada fração

a_i, b_i = constantes para cada equação das curvas de alteração.

k_i, m_i = coeficientes angulares das tangentes às curvas de alteração em cada ponto.

Representando-se as funções potenciais num gráfico bilogarítmico, obtemos as linhas teóricas para as relações acima citadas (figs. 9 e 10). Para a relação entre % de perda acumulada e o nº de ciclos, verifica-se que ocorre uma nítida convergência de alterabilidade de todas as frações, sendo que a alteração é maior nos ciclos iniciais para as frações menores do que 2" - 1 1/2" (P3), diminuindo no decorrer do nº de ciclos ou tempo de ensaio de alteração. Nas frações maiores do que 1 1/2", a alteração se processa muito mais lentamente nos ciclos iniciais, devendo prosse-

guir até a desagregação total. A queda na inclinação das linhas de alterabilidade das frações maiores para as frações menores, demonstra que a alteração se processa rapidamente nas granulações inferiores a $1\frac{1}{2}$ " ao passo que, nas frações maiores é mais lenta, se desenvolvendo continuamente - até a desagregação total, se o processo não for interrompido. O fato da linha P10 (fração Nº 4 - Nº 8), estar situada entre as linhas P7 (fração $1\frac{1}{2}$ " - $3\frac{3}{8}$ ") e P8 (fração $3\frac{3}{8}$ " - Nº 3), pode indicar que estamos próximo à granulação final da alteração ou seja, a granulação para a qual tendem as demais frações, no processo de desagregação.

O gráfico da relação entre % de perda acumulada e a superfície específica dos fragmentos, mostra nitidamente - que quanto maior a granulação, mais lentamente se processará a sua alteração (isto é, serão necessários mais ciclos - de ensaio para se atingir a mesma % de perda), e que a medida que aumentamos o tempo de ensaio, diminui a influência - do efeito de escala. Esta influência pode ser avaliada tomando-se por exemplo, a linha C₂₀, onde para um fragmento - de superfície específica $0,1\text{ cm}^{-1}$, temos 1,5% de perda e para um fragmento de superfície específica 10 cm^{-1} , temos 60% de perda, para o mesmo tempo de ensaio, ou seja, 20 ciclos.

B) Ensaio de alteração por saturação-secagem

As linhas identificadas de A a J da fig. 11, representam curvas de alterabilidade nas diferentes granulometrias ensaiadas, respectivamente de $3"$ - $2\frac{1}{2}"$ a Nº4 - Nº 8, conforme a tabela 9.

Observa-se em todas as curvas, que ocorre uma perda bastante rápida nos primeiros 20 ciclos, para em seguida se tornarem quase constantes, aproximando-se assintótica e quase paralelamente em direção à desagregação total. Assim, a velocidade de alteração decresce com o tempo e a função - que exprime a dependência entre estas variáveis é também do tipo não linear, como no ensaio anterior.

A fig. 12 apresenta várias curvas que relacionam a

% de perda acumulada e a superfície específica, correspondentes aos diversos ciclos de ensaio de alteração por saturação-secagem. As linhas identificadas de C5 a C48, representam curvas de perda no ensaio, respectivamente de 5 a 48 ciclos. Do mesmo modo, estas curvas mostram que a relação entre estas variáveis é do tipo não linear, e a influência da granulometria no ensaio, diminui em torno da fração $3/4"$ - $1/2"$ para grãos inferiores.

As equações de regressão obtidas, relacionando-se a % de perda acumulada e o nº de ciclos, e a % de perda acumulada e a superfície específica dos fragmentos, encontram-se respectivamente nas tabelas 10 e 11. Os coeficientes de correlação para ambos os casos, demonstram que a melhor correlação é representada pelas funções do tipo potencial, cuja expressão geral é a mesma da descrita no item anterior.

As linhas teóricas das relações acima, encontram-se nas figs. 13 e 14. Para a relação entre % de perda acumulada e o nº de ciclos, verifica-se também que ocorre uma nítida convergência de alterabilidade de todas as frações. Do mesmo modo que no ensaio de alteração via Soxhlet, a queda na inclinação das linhas de alterabilidade, das frações maiores para as menores, mostra que a alteração se processa rapidamente nas granulações inferiores a $1\ 1/2"$, ao passo que nas frações maiores é mais lenta se desenvolvendo continuamente até a desagregação total, caso o processo não seja interrompido.

Para a relação entre % de perda acumulada e a superfície específica dos fragmentos, observamos que a influência do efeito de escala torna-se praticamente semelhante a partir do 4º ciclo, diminuindo sensivelmente. Este fato é demonstrado pela aglomeração das curvas C4, C5, C6 e C7 e pela queda na inclinação das curvas.

C) Ensaio de alteração com etilenoglicol

As linhas identificadas de A a J das figs. 15 e 19, representam curvas de alterabilidade nas diferentes granulometrias ensaiadas, respectivamente de $3"$ - $2\ 1/2"$ a Nº 4 -

Nº 8, conforme as tabelas 12 e 15. O tempo de imersão no etilenoglicol, afetou consideravelmente o comportamento durante o ensaio pois, no caso (1), imersão de 1 hora, foram necessários 18 ciclos para que a % de perda fosse semelhante ao caso (2), imersão de 6 horas, onde foram necessários apenas 12 ciclos, para uma desagregação quase total. Entretanto, devido ao maior nº de fases de aquecimento e resfriamento para o caso da imersão de 1 hora, a perda nos primeiros ciclos é mais rápida que no caso da imersão de 6 horas. No primeiro caso, até a estabilização das curvas são necessários apenas 3 a 7 ciclos enquanto que, para o segundo caso, são necessários 3 a 10 ciclos.

Apesar destas diferenças iniciais, a configuração das curvas em ambos os casos é a mesma, mostrando que a velocidade de alteração decresce com o tempo e a função que exprime a dependência entre estas variáveis é também do tipo não linear, como nos processos de alteração vistos anteriormente.

As figs. 16 e 20, apresentam diversas curvas que relacionam a % de perda acumulada e a superfície específica, correspondentes aos diversos ciclos de alteração por saturação em etilenoglicol e secagem em estufa. As linhas identificadas de C_1 a C_{18} (1 hora de imersão) e C_1 a C_{11} (6 horas de imersão), representam curvas de perda no ensaio, respectivamente de 1 a 18 ciclos e de 1 a 11 ciclos. O fato da configuração das curvas no caso da imersão de 1 hora, se apresentar muito mais irregular do que no caso da imersão de 6 horas, pode ser interpretada como uma saturação incompleta no primeiro caso, que depende da maior ou menor facilidade de acesso do etilenoglicol nas microdescontinuidades; o que só poderia ser efetuada por uma saturação mais completa. Em ambos os casos, entretanto, a relação entre estas variáveis é do tipo não linear, e a influência da granulometria no ensaio diminui em torno da fração $1" - 3/4"$ em direção às frações menores.

As equações de regressão obtidas, relacionando-se a

% de perda acumulada com o nº de ciclos e, a % de perda acumulada com a superfície específica dos fragmentos, encontram-se respectivamente nas tabelas 13, 16 e 14, 17. Os coeficientes de correlação encontrados para estas relações, demonstram que a melhor correlação é representada pelas funções do tipo potencial, cuja expressão geral é a mesma da que se encontra no item A. Além disso, invariavelmente este coeficiente é mais elevado para o caso da imersão durante 6 horas, demonstrando que as curvas das relações encontradas são melhor ajustadas aos valores obtidos. As linhas teóricas destas correlações encontram-se nas figs. 17, 21 e 18, 22. Para a relação entre % de perda acumulada e o nº de ciclos, verifica-se em ambos os procedimentos, uma ótima convergência na alterabilidade de todas as frações sendo entretanto, melhor para o caso da imersão durante 6 horas. A diminuição da declividade das curvas de alterabilidade das frações maiores para as menores, demonstra que decorridos os ciclos iniciais, onde a alterabilidade é maior nas frações menores, ocorre uma diminuição das velocidades de alteração para os ciclos subsequentes, com a diminuição do tamanho dos fragmentos.

Para a relação entre % de perda acumulada e a superfície específica dos fragmentos, as curvas teóricas evidenciam que a influência do efeito de escala se torna semelhante e diminui, para o caso de 1 hora de imersão a partir do 8º ciclo e, para o caso de 6 horas de imersão, a partir do 6º ciclo. Este fato é demonstrado pela aglomeração e queda na inclinação das linhas, em ambos os casos.

D) Ensaio de alteração com sulfato de sódio

As linhas identificadas de A a J da fig. 23, representam curvas de alterabilidade nas granulometrias ensaiadas, respectivamente de 3" - 2 1/2" a Nº 4 - Nº 8, conforme a tabela 18. Observa-se em todas as curvas, que ocorre uma perda bastante rápida nos primeiros 7 ciclos, para em seguida se tornarem quase constantes aproximando-se assintótica e quase paralelamente, em direção à desagregação total, e a velocidade de alteração decresce com o tempo

através de uma função do tipo não linear.

A fig. 24 apresenta diversas curvas que relacionam a % de perda acumulada e a superfície específica dos fragmentos, correspondentes aos ciclos de ensaio de alteração por saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa. As linhas identificadas de C_1 a C_{17} , são as curvas de perda no ensaio, respectivamente de 1 a 17 ciclos. Verifica-se também que a relação entre estas variáveis é do tipo não linear e a influência das dimensões dos fragmentos diminui a partir da peneira $1\frac{1}{2}'' - 1''$, em direção às granulações inferiores. Apesar de seguir a mesma tendência das demais curvas, a irregularidade da curva C_7 é explicada pela heterogeneidade das amostras ensaiadas pois, cada ponto indicado na mesma, representa amostras diferentes da mesma rocha.

As equações de regressão obtidas, relacionando-se as variáveis acima, encontram-se nas tabelas 19 e 20. Os coeficientes de correlação para ambos os casos, demonstram que a melhor correlação é representada pelas funções do tipo potencial, cuja expressão geral é a mesma dos ensaios anteriores. As linhas teóricas obtidas a partir destas equações encontram-se nas figs. 25 e 26. Com exceção de algumas diferenças na ordem de distribuição das linhas de alterabilidade, o comportamento total é semelhante ao dos ensaios anteriores, para ambas as correlações. A queda mais acentuada na inclinação das linhas de alteração se processa a partir da fração $1'' - \frac{3}{4}''$ em direção às granulações inferiores e o efeito de escala torna-se praticamente semelhante a partir do 6º ciclo, diminuindo em seguida. As divergências observadas em algumas destas linhas são devidas essencialmente à heterogeneidade das amostras ensaiadas.

E) Ensaio de alteração por exposição natural

Os ensaios de alteração por exposição natural, efetuados em uma única fração ($1\frac{1}{2}'' - 1''$), no basalto tipo C da barragem de Capivara, evidenciaram nitidamente dois comportamentos (média de 6 amostras cada uma), como se pode ve

rificar na tabela 21. As linhas identificadas como D_1 e D_2 da fig. 27, representam as curvas de alterabilidade obtidas. A curva D_1 representa a curva da rocha mais alterada. Em ambas as curvas, observa-se que ocorre uma perda bastante rápida nos primeiros 2 a 4 meses de exposição, para em seguida se estabilizarem tornando-se quase constantes - mas, aproximando-se assintótica e quase paralelamente em direção à desagregação total, sendo que a velocidade de alteração decresce com o tempo através de uma função do tipo não linear.

A análise de regressão pelo método dos mínimos quadrados, para as variáveis, % de perda acumulada e tempo de exposição, demonstrou que a melhor correlação é representada pelas funções do tipo potencial, que pode ser expressa - da mesma forma genérica dos ensaios anteriores. As equações obtidas encontram-se na tabela 22, e as linhas teóricas obtidas a partir das mesmas, na fig. 28. As linhas P_1 e P_2 deste gráfico, representam o comportamento das 2 amostras diferentes de uma mesma rocha (D_1 e D_2). Também neste caso, ocorre uma convergência na alterabilidade das duas amostras em diferentes estados de alteração, com o tempo. Isto é devido ao aumento da velocidade de alteração com o tempo de exposição, da amostra D_2 em relação à amostra D_1 - (apesar de ambas as velocidades decrescerem no decorrer do ensaio). A amostra D_1 estaria mais próxima do equilíbrio - com as condições naturais possuindo portanto, menor velocidade de alteração.

F) Comparação entre os resultados

Obtidas as linhas teóricas de regressão das relações entre % de perda acumulada e o nº de ciclos ou tempo de ensaio, foi construído o gráfico da fig. 29, que permite a comparação entre os resultados de diferentes procedimentos de ensaio de alteração. Como o ensaio de alteração por exposição natural foi efetuado em uma única granulação, e como a alteração depende da granulometria considerada, para um determinado intervalo de tempo (efeito de escala), tomamos

os resultados da mesma fração em cada processo de alteração (fração 1 1/2" - 1"), para tornar possível a comparação. - Além disso, como para os ensaios de alteração por saturação-secagem, por imersão em etilenoglicol e com o emprego da solução saturada de sulfato de sódio, cada ciclo tem aproximadamente 1 dia de duração, foi feita a equivalência: 1 dia = 1 ciclo. Para o ensaio de lixiviação contínua com o extrator Soxhlet, a equivalência efetuada foi de: 1 dia = 5 ciclos, pois este instrumento efetua 5 ciclos de lixiviação por dia. Desta forma, cada ciclo neste gráfico, representa também um dia de ensaio por exposição natural.

Considerando-se a mesma % de perda acumulada para todos os processos de alteração, por exemplo 50%, verifica-se que são necessários aproximadamente 2 ciclos de saturação em solução de sulfato de sódio, 3 ciclos de 6 horas de imersão em etilenoglicol, 4 ciclos de saturação em água, 4 a 5 ciclos de 1 hora de imersão em etilenoglicol, 10 ciclos de lixiviação no extrator Soxhlet e, 320 dias ou ciclos de alteração por exposição natural, para o caso do basalto C da linha P₂, que é o que foi ensaiado em todos os procedimentos, para se atingir a mesma % de perda acumulada citada. Portanto, o ensaio de alteração com a solução de sulfato de sódio apresentou-se como o processo mais eficaz de desagregação para esta rocha. O maior paralelismo entre as linhas de alteração via Soxhlet e do ensaio de alteração por exposição natural, poderia ser uma indicação do grau de simulação das condições naturais imprimidas pelo processo de lixiviação contínua, o que constituiria em mais um argumento a favor de G. Pedro (32). Entretanto, a comprovação deste fato está na dependência da execução destes mesmos ensaios em diferentes rochas.

Derivando-se a equação geral, válida para todos os processos de alteração, obtém-se teoricamente as velocidades imprimidas pelos mesmos:

$$P_i = a_i C_i^{k_i}$$

$$\frac{dP}{dC} = a_i k_i (C_i)^{k_i-1} \quad (\text{equação geral da velocidade de alteração}).$$

Os resultados obtidos relacionando-se as velocidades de alteração com o tempo ou nº de ciclos, encontram-se na fig. 58. Neste gráfico, observa-se nitidamente que a velocidade de alteração em todos os processos, diminui com o tempo e que, excetuando-se o caso do ensaio com etileno glicol (1), de validade limitada, a maior velocidade é imprimida pelo ensaio com a solução saturada de sulfato de sódio.

VI.2 - Comportamento mecânico nos diferentes processos de alteração

Os gráficos das figs. 30 a 57 ilustram o comportamento mecânico de todos os basaltos estudados, submetidos aos diferentes processos de alteração. De um modo geral, - ocorreu uma maior ou menor queda de resistência mecânica, - (aumento da % de perda), decorridos um determinado nº de ciclos, em todos os processos. O aparente aumento da resistência mecânica registrado em alguns casos, se deve única e exclusivamente à heterogeneidade da própria rocha pois, cada ponto de medida, corresponde a amostras diferentes de uma mesma rocha. Vejamos separadamente o comportamento de cada basalto estudado:

O basalto "A" da barragem de Capivara não sofreu modificações no ensaio de lixiviação contínua mas, foi sensivelmente afetado pelos demais processos, sendo o mais eficaz a alteração por ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa.

Os basaltos "B" e "C" de Capivara foram quase que totalmente desagregados em todos os processos de alteração - com excessão do ensaio por lixiviação contínua. Este fato se deve a presença nestas rochas, de feições potencialmente favoráveis ao progresso da alteração (vesículas, amígdalas, minerais argilosos expansivos), identificadas na análise pe

trográfica.

O basalto de Salto Osório se mostrou extremamente suscetível à alteração com sulfato de sódio e, praticamente não foi afetada pelos demais ensaios. A sua desagregação se processou por fragmentação, evidenciando uma abertura força da de suas vesículas e amígdalas bem como de eventuais microdescontinuidades, pela cristalização deste sal.

O basalto de Olimpia passou quase incólume pelos processos de alteração por lixiviação contínua, etilenoglicol e saturação-secagem, sendo sensivelmente afetada pela alteração com sulfato de sódio. Como se trata de uma rocha extremamente compacta, este fato poderia ser explicado por uma menor capacidade em resistir às variações termométricas, fazendo com que as alternâncias de dilatações e contrações originem pequenas descontinuidades, favorecendo a percolação e cristalização da solução salina.

O basalto da Serra de Brotas comportou-se satisfatoriamente nos ensaios de alteração por lixiviação contínua e sulfato de sódio, sendo medianamente afetado pelos ensaios de saturação-secagem e etilenoglicol. A presença de uma quantidade razoável de vidro ($\sim 30\%$) e de argilas expansivas poderia explicar este comportamento.

O basalto da Ilha Solteira resistiu razoavelmente bem a todos os processos de alteração a que foi submetido, com excessão do ensaio com sulfato de sódio, onde foi medianamente afetado. A mesma interpretação emitida para o basalto de Olimpia deverá ser aplicável para este caso.

Obtidos os valores das resistências ao impacto Treton final das diversas rochas, submetidas aos diferentes processos de alteração, foram calculados os valores dos coeficientes de alterabilidade específica, que se encontram na tabela 25. Os valores deste coeficiente variaram de 10^{-3} a 1, o que permitiu diferenciar as diversas rochas quanto à maior ou menor suscetibilidade face às diferentes solicitações impostas pelos ensaios, que podem ou não se manifestar em um determinado ambiente.

De um modo geral, rochas com resistências mecânicas iniciais elevadas aproximadamente 90%, se mostraram resistentes a todos os processos de alteração efetuados, como se pode verificar na fig. 59. Dos ensaios de laboratório, o ensaio de alteração com sulfato de sódio se revelou como o mais ativo, enfraquecendo a grande maioria das rochas. O ensaio de alteração com etilenoglicol se mostrou mais sensível às rochas portadoras de argilominerais expansivos, como era de se esperar. Entretanto, aparentemente, nas rochas não portadoras de argilominerais expansivos, este ensaio atuou semelhantemente ao ensaio de alteração por saturação-secagem. O ensaio de alteração via Soxhlet se mostrou, de um modo geral, como o processo mais lento de alteração acelerada.

Os valores de suscetibilidade das rochas aos diferentes processos de alteração permitem ainda observar que, as particularidades texturais das rochas, além de sua mineralogia, devem relacionar-se com as suas resistências à alteração. De um modo geral, rochas compactas, menos microfissuradas e de granulação fina com grãos bem imbricados, apresentaram comportamentos satisfatórios perante a alteração ($K = 10^{-3}$ a 10^{-2}). Por outro lado, rochas de granulação média a grossa, xistosas ou estratificadas, ou com cimento, apresentaram coeficiente de alterabilidade específica da ordem de $K=10^{-2}$ a 1, portanto, de comportamento médio a não satisfatório ($K=1$, rocha totalmente alterada e portanto, de resistência mecânica nula).

Em todos os processos de alteração estudados, a água deve ter sido um dos agentes que afetaram em maior ou menor grau, os resultados dos ensaios. A reatividade das rochas x água resulta da reatividade de cada constituinte mineralógico à água e da interação das diversas reações na matriz rochosa. A análise geoquímica do processo, embora imprescindível na compreensão dos mecanismos de alteração, não será abordada neste trabalho pois, um dos objetivos principais foi a avaliação mecânica da alteração, qualquer que seja o

agente responsável. Assim, um índice que reflete mecanicamente a interferência da água no seu valor, é a relação entre a resistência à compressão saturada e a seco, que é conhecido impropriamente como coeficiente de enfraquecimento (40-48). Este coeficiente varia de 0 a 1. Quando for igual a zero, a resistência a compressão saturada é igual a zero e quando for igual a unidade, a resistência a compressão saturada é igual a resistência a compressão seca.

Tendo em vista a importância da água nos processos de alteração, nas condições de utilização e mesmo nos ensaios de alteração efetuados, procurou-se correlacionar os valores dos coeficientes de alterabilidade específica das rochas para os diferentes processos de alteração, com os coeficientes de enfraquecimentos calculados, com a finalidade de encontrar um novo parâmetro que permita estimar a alterabilidade de rochas. Do mesmo modo, foi efetuada a correlação entre os coeficientes de enfraquecimento e a resistência Treton inicial, para se complementar aquelas relações.

Os resultados obtidos através da análise de regressão pelo método dos mínimos quadrados para estas correlações, encontram-se relacionados na tabela 26. Os coeficientes de correlação encontrados indicam que a melhor correlação para estas variáveis é basicamente a relação linear. As retas de regressão, traçadas a partir das equações, entre os coeficientes de alterabilidade específica e os coeficientes de enfraquecimento, permitem observar que (figs. 60 a 63):

1. Quanto maior o coeficiente de enfraquecimento, menor é a alterabilidade da rocha, isto é, quanto menor for a suscetibilidade à água da rocha, menor será sua suscetibilidade aos processos de alteração.

2. O ajuste da linha teórica aos pontos obtidos é melhor para rochas de coeficiente de enfraquecimento elevado (acima de 0,7).

3. O melhor ajuste da linha teórica foi obtida para o coeficiente de alterabilidade específica do ensaio de al-

teração por lixiviação contínua ($r = 0,85$ e $S_{yx} = 0,05$).

A relação entre o coeficiente de enfraquecimento e a resistência Treton inicial (fig. 64), indica que apesar do baixo coeficiente de correlação e do elevado erro padrão da estimativa, os pontos acham-se razoavelmente ajustados à linha teórica. Entretanto, esta análise necessita de maior volume de dados para confirmação.

VII. - CONCLUSÕES GERAIS

As conclusões mais importantes e observações pertinentes obtidas como resultado desta pesquisa apresentam-se resumidas nos seguintes parágrafos:

1. Os resultados desta investigação indicam que os ensaios com o esclerômetro Schmidt podem ser aplicáveis a rochas, como estimativa de suas resistências mecânicas. Sua aplicabilidade é indicada pela:

a. Suas relações com propriedades constantemente citadas em especificações para emprego de rochas: resistência à compressão uniaxial e resistência à abrasão Los Angeles.

b. Sua simplicidade, baixo custo e rapidez na determinação

c. Sua reprodutibilidade

2. O método de ensaio de impacto em corpos de prova regulares, ASTM D3-18, sofreu modificações quanto à forma do corpo de prova e nº mínimo de corpos de prova. Possivelmente, a aplicabilidade deste ensaio na estimativa da resistência à compressão uniaxial de rochas poderá ser melhorada com maior volume de dados.

3. O ensaio de desgaste a úmido proposto por Franklin, J.A. e outros (17), revelou-se muito pouco sensível, devendo ser aplicável para rochas de características tecnológicas mais pobres. Além disso, para uma padronização adequada deste ensaio é necessário um melhor conhecimento de suas variáveis, tendo em vista algumas discordâncias encontradas em relação à duração e nº de ciclos.

4. Os ensaios de alteração devem ser efetuados sempre que possível na granulação de uso do material (devido ao fator de escala). Caso contrário, pode-se ensaiar em outras frações desde que se conheça a lei de variação.

5. A comparação de diferentes ensaios de alteração em laboratório, mostrou que o ensaio que imprime maior velocidade de alteração é o de alteração com sulfato de sódio, que afetou praticamente todas as rochas.

6. De um modo geral, rochas de alta resistência mecânica -

inicial, são pouco afetadas pelos processos de alteração.

7. O coeficiente de enfraquecimento ($CE = \sigma_{sat}/\sigma_{seco}$), apresenta-se como um índice promissor para estimativa da alterabilidade de rochas, tendo em vista as razoáveis correlações obtidas na análise de regressão.

8. A resistência ao impacto Treton revelou-se um índice sensível às variações do estado de alteração.

9. O coeficiente de alterabilidade específica permite distinguir as rochas quanto à maior ou menor suscetibilidade em resistir aos processos de alteração, em 3 categorias:

- a. $K = 10^{-3}$ a 10^{-2} → rochas de baixa alterabilidade
- b. $K = 10^{-2}$ a 10^{-1} → rochas medianamente alteráveis
- c. $K = 10^{-1}$ a 1 → rochas muito alteráveis.

10. Quanto à validade dos ensaios de alteração acelerada, observou-se que ocorre uma atuação seletiva em rochas de naturezas diversas (uns põem a trabalhar mais a composição mineralógica, outros mais a estrutura). Para exemplificar, citamos o caso de rochas de alterabilidade quase nula para um determinado processo, em relação a um outro: enquanto um dos processos de alteração acelerada pode atuar positiva e eficazmente sobre uma determinada rocha, um outro processo poderá não ter quase nenhuma influência sobre a mesma rocha. Nestas condições, considerando a conclusão do item 6., podemos dizer que: os diferentes processos de alteração acelerada só poderão ser comparados na medida que refletirem as mesmas ações ou condições fisicoquímicas. Além disso, a não reprodução de condições naturais não invalida um determinado processo de alteração. Estes processos, deverão antes de tudo serem encarados como simples métodos de ensaios destinados a solicitar as rochas em seus aspectos mais suscetíveis, seja a composição mineralógica, seja o seu estado de fraturamento, que poderão ser ativados por condições particulares (representados pelos ensaios), e que poderão ou não se manifestar em um determinado ambiente.

11. De acordo com o que foi verificado, pode-se concluir que uma análise petrográfica detalhada, e um ensaio mecânico como o ensaio de impacto Treton serão excelentes guias para a esco

lha do melhor ensaio de alteração para aquela rocha. Caso o resultado no ensaio mecânico seja elevado (evidenciando praticamente a ausência de qualquer fraqueza estrutural), o ensaio de alteração escolhido deverá solicitar de alguma forma a composição mineralógica daquela rocha.

12. Considerando os resultados de ensaios fisicomecânicos e os coeficientes de alterabilidade específica, as rochas seguramente aprovadas para material de construção em geral são: basalto de Olimpia, basalto Serra de Brotas, diabásio de Campinas, migmatito de Jaborandi, basalto de Ilha Solteira, granito são de Anhanguera e Calcário Apiaí. As rochas de características intermediárias, de emprego restrito são: basalto "A" de Capivara, quartzito Jequitai, calcário do Rio Grande do Sul, granito Sacos, basalto de Salto Osório, charnockito de Ubatuba, granito alterado de Anhanguera e piroxenito de Niquelandia. Finalmente, as rochas não recomendáveis para qualquer finalidade são: arenito Bauru e os basaltos "B" e "C" de Capivara.

VIII. - RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Inumeras sugestões para estudos futuros surgiram durante o desenvolvimento deste trabalho. Algumas destas, podem constituir-se numa continuação natural do presente estudo, enquanto que outras, são observações isoladas, que podem ser desenvolvidas. As recomendações sugeridas encontram-se comentadas nos parágrafos seguintes:

1. São necessários ensaios adicionais sobre uma maior quantidade de rochas para os novos índices investigados: índice esclerométrico, resistencia ao impacto e resistência ao desgaste a umido. Os novos resultados poderão auxiliar na verificação ou modificação das curvas de regressão de forma a aumentar o nível de significancia.

2. Existem atualmente diversos métodos para estudo de propriedades físicas de rochas mas, frequentemente, os valores determinados são inconsistentes. O objetivo da tecnologia de rochas é então, o de encontrar métodos comuns para a determinação de características tecnológicas. Os principais requisitos desejáveis de tais métodos são os seguintes (40):

a. Possibilitar a determinação de propriedades a partir de grandes corpos de prova.

b. Possibilitar a determinação de um número máximo de propriedades a partir de um número mínimo de amostras.

c. Possibilitar uma combinação de operações em um único corpo de prova para determinar diferentes propriedades.

d. Possibilitar a determinação de propriedades em condições de diferentes campos externos (naturais e artificiais).

3. Como vimos, as descontinuidades de rochas em quaisquer dimensões, desempenham papel fundamental nos processos de alteração. Possivelmente uma correlação estatística entre os valores que definem o campo microfissural e os valores de alterabilidade específica encontrados neste trabalho, poderá constituir-se em um teste de validade para estes parametros.

4. O ensaio de resistencia ao impacto Treton mostrou-se sensível às variações do estado de alteração. Entretanto, para que tenhamos uma lei geral de comportamento mecanico face à al

teração, é necessário efetuar ensaios comparativos utilizando - se vários parâmetros mecânicos.

5. Já vimos que um dos fatores que afetam sensivelmente os resultados dos ensaios de alteração é o fator de escala. As curvas de % de perda acumulada x superfície específica permitem solucionar em parte este problema, através da extrapolação de resultados tanto para amostras de granulometrias maiores quanto - para as menores. Entretanto, o limite de validade destas extra-polações para amostras de grandes dimensões fica indeterminado e o ensaio se torna impraticável. Possivelmente a execução de ensaios sísmicos "in situ", medindo-se a queda da velocidade de propagação de ondas com a alteração poderá contornar este inconveniente.

6. Até o momento, todos os ensaios de alteração, como são entendidos por nós, são destinados a evidenciar as fraquezas - das rochas nos seus aspectos mais suscetíveis. No entanto, pouco se sabe sobre o efeito real da desagregação de rochas colocadas em diferentes condições de serviço. Para isto, a realização de ensaios de alteração e medida do comportamento mecânico em corpos de prova confeccionados para estruturas (concretos e pavimentos), com agregados rochosos de características tecnológicas conhecidas, poderá contribuir grandemente nos critérios de escolha e dimensionamento de quaisquer volumes de rochas para vá - rias finalidades.

BIBLIOGRAFIA

1. Aires Barros, L. (1970) - "Note preliminaire sur un indice d'altérabilité" - 1st Intern. Cong. of the Intern. Assoc. of Eng. Geol., Tome I, theme 4, pp. 573-577, Paris.
2. Aires Barros, L. (1971) - "Alteração e alterabilidade de rochas ígneas" - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1971.
3. ASTM D-3-18 (1918) - "Resistência ao impacto" - American Society for Testing Materials, Philadelphia.
4. ASTM (1948) - "Symposium on mineral aggregates" - American Society for Testing Materials, Fifty-First Annual Meeting, Detroit.
5. ASTM-C88-69 (1969) - "Soundness test" - American Society for Testing Materials, Philadelphia.
6. Bernaix, J. (1967) - "Etude geotechnique de la roche de Malpasset" - Dunod, Paris.
7. BS 812 (1967) - "Methods for sampling and testing of mineral aggregates" - British Standards Institution, London.
8. Chefdeville, J. (1955) - "La resistance à la compression du béton, sa mesure par la méthode d'auscultation dynamique" - Annales du I.T.B.T.P. N° 95, Paris.
9. Chevassu, G. (1969) - "Influência das características petrográficas de várias rochas sobre a resistência ao atrito" - Bull. Liaison Labo. Routiers P. et Ch. n° 39, julho-agosto, 1969.
10. Considine, D.M. e Ross, S.D. (1964) - "Handbook of Applied Instrumentation" - McGraw-Hill Book Company, New York.
11. Day, H.L. (1962) - "A progress report on studies of degrading basalt aggregate bases" - HRB Bulletin 344, pp. 8-16.

12. Deere, D.U. e Miller, R.P. (1966) - "Engineering classifica
tion and index properties for intact rock" -
Air Force Weapons Lab., Technical Report-AFWL-
TR-65-116, Kirtland, New Mexico.
13. DNER (1971) - "Métodos de ensaios" - Divisão de Pesquisas Tec
nológicas do Departamento Nacional de Estradas
de Rodagem, Rio de Janeiro.
14. Farjallat, J.E.S. (1971) - inédito - "Estudos experimentais
sobre a degradação de rochas basálticas" - Ins
tituto de Geociências - USP, São Paulo.
15. Farjallat, J.E.S. e Nery de Oliveira, J.A. (1972) - inédito -
"Experimental studies on the weatherability of
the Capivara Dam basalts, Rio Paranapanema,
Brazil" - Bull. of the Intern. Ass. of Eng.
Geol., Paris.
16. Farran e Thenoz (1965) - "L'alterabilité des roches, ses
facteurs, sa prevision" - Annales I.T.B.T.P.,
Novembre, 1965 - Paris.
17. Franklin, J.A.; Brock, E. e Walton, G. (1971) - "Logging the
mechanical character of rock" - Trans. Inst.
Min. Metall. 80, A1-A10.
18. Franklin, J.A. e Chandra, R. (1972) - "The slake-durability
test" - Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 9,
pp. 325-341, Pergamon Press, Great Britain.
19. Gitahy, H.S. (1960) - "Controle estatístico da qualidade do
concreto" - Instituto de Pesquisas Tecnolôgi
cas, Bol. nº 49, São Paulo.
20. Goni, J.; Ragot, J.P. e Sima, A. (1968) - "Méthodes d'étude
du champ microfissural des minéraux et des
roches et possibilités d'application en
géologie" - Bulletin du B.R.G.M. (deuxième sé
rie), Section II nº 4, 1968, p.51-92.
21. Habib, P. e Bernaix, J. (1966) - "La fissuration des roches"-
Proc. 1st Congress of the Int. Soc. Roc. Mech.

Vol. 1, pp.185-190.

22. Hamrol, A. (1962) - "A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks" - 5th Intern. Conf. Soil. Mech., Vol.2, pp.771-774, Paris.
23. Hawkes, I. e Mellor, M. (1970) - "Uniaxial testing in rock mechanics" - Engineering Geology, vol. 4, nº3, julho de 1970.
24. HRB (1970) - "Degradation of aggregates" - nº 51, Highway Research Board, Washington.
25. Iliev, I.G. (1966) - "An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties" - Proceedings of the first Congress of the Intern. Soc. Rock Mechanics, pp.109-114, Lisboa.
26. Javey, C. (1972) - "L'altération des roches et des monuments Étude documentaire" - Bull. B.R.G.M. (2) III, 1, pp.39-66.
27. Kolek, J. (1968) - "Using the Schmidt rebound hammer" - Concrete, vol.2, nº10, October.
28. Kolek, J. (1969) - "Analysis of answers to Rilem questionnaire on the Schmidt Rebound Hammer" - Matériaux et Constructions, Juillet-août, nº10.
29. Leme, R.A.S. (1965) - "Curso de Estatística" - Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro.
30. L'Hermite, Robert (1966) - "Methodes générales d'essai et de controle en laboratoire" - Institut Technique de Batiment et Travaux Publics, I.T.B.T.P., Paris.
31. Morais Rego, L.F. e Souza Santos, T.D. (1938) - "Contribuição para o estudo dos granitos da Serra da Cantareira" - Bol. nº 18, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, junho 1938, São Paulo.

32. Pêdro, G. (1964) - "Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines" - Ann. Agro. 2-3-4, 344 p.
33. Pichler, E. (1942) - "A petrologia e os ensaios tecnológicos de rochas" - Bol. Dep. Estradas de Rodagem, São Paulo.
34. Prevosteau, J.M.; Ragot, J.P. e Sima, A. (1970) - "Le spêctre de porosité des roches-critère possible de leur degré d'alteration et de leur alterabilité" - I^o Int. Congr. Inst. Ass. Eng. Geology, pp. 548-560, Paris.
35. Programa EPC-7 (1972) - "Usina de Água Vermelha - proposta para um ensaio de durabilidade de materiais rochosos" - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.
36. Ramsay, D.M. (1965) - "Factors influencing aggregate impact value in rock aggregate" - The Quarry Managers' Journal, April 1965, pp. 129-134.
37. Robert, M. (1970) - "Etude experimentale de la desagregation du granite et de l'evolution des micas" - Faculté des Sciences de Paris.
38. Rocha, M. (1971) - "Mecânica das Rochas" - Lab. Nac. Eng. Civil, Lisboa.
39. Ruiz, M.D. (1966) - "Características tecnológicas de rochas do Estado de São Paulo" - Bol. n^o 50, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.
40. Rzhovsky, Y. e Novik, G. (1971) - "The physics of rocks" - Mir Publishers, Moscow.
41. Schneider, A.W. e Rocha, F.X.P. (1968) - "Emprego de basaltos em pavimentação rodoviária" - Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 433, 42 p., Rio de Janeiro.
42. Sigvaldason, O.T. (1964) - "The influence of the testing machine on the compressive strength of concrete"

- Proc. Symp. Concrete Control, 1st, Imperial College, pp.62-171, London.
43. Spiegel, M.R. (1971) - "Schaum's outline of theory and problems of estatistics" - Tradução Pedro Consentino, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltd., Rio de Janeiro.
44. Struillou, R. (1969) - "Prevision de l'alterabilité des matériaux employés en Génie Civil" - Colóque de Géotechnique, Mars-1969, pp. 35-46, Toulouse.
45. Talobre, J.A. (1967) - "La mécanique des roches" - Ed. Dunod, Paris.
46. Thénos, B. (1966) - "Contribution a l'étude de la perméabilité des roches et de leur altérabilité" - Application a des roches granitiques, Faculté des Sciences de l'Université de Toulouse.
47. Vollmer, E. (1967) - "Encyclopaedia of hydraulics, soil and foundation engineering" - Elsevier Publishing Company.
48. Vorobiev, V. (1967) - "Matériaux de construction" - Édition Mir, Moscow.
49. Weinert, H.H. (1964) - "Basic igneous rocks in road foundations" - National Institute for Road Research, Bull. n.5, Pretoria, South Africa.
50. West, T.R.; Johnson, R.B. e Smith, N.M. (1970) - "Test for evaluating degradation of base course aggregates" - National Cooperative Highway Research Program, Report 98, 92 p., Washington.
51. White, C.G. (1969) - "A rock drillability index" - Quarterly of the Colorado School of Mines, vol. 64,nº2.
52. Yoshida, R.; Frazão, E.B. e Girolão, A.M.P. (1972) - "Revisão crítica dos métodos de ensaios de forma de fragmentos" - Anais da IV Semana Paulista de

Geologia Aplicada, 1972, São Paulo (no prelo).

53. Yoshida, R.; Farjallat, J.F.S.; Caruso, L.G. e Frazão, E.B.
(1972) - "Sugestão de roteiro e escolha de en
saios tecnológicos" - Anais da IV Semana Paulista
ta de Geologia Aplicada, 1972, São Paulo, (no
prelo).

APÊNDICE A

DESCRIÇÕES PETROGRÁFICAS E FOTOMICROGRAFIAS
DE SECÇÕES DELGADAS DAS ROCHAS ESTUDADAS

Fotomicrografia - 170 x, nicóis cruzados
 AMOSTRA Nº 1 - BASALTO "A" DA BARRAGEM DE CAPIVARA

Basalto compacto, afanítico, homogêneo, não orientado, de cor cinza escuro esverdeado. As amostras estudadas não apresentavam fraturas macroscopicamente visíveis. A textura é granular, microcristalina e oligohialina (hipocristalina). O plagioclásio (labradorita ~ An60) é ripiforme, normalmente idiomorfo, finamente geminado segundo albita e albita-Carlsbad. Os piroxênios (augita 2 Vx ~ 50°) são hipidiomorfos e xenomorfos, intergranulares. Os cristais são submilimétricos (0,1 a 0,2 mm) ocorrendo alguns cristais milimétricos de plagioclásio e piroxênio. Observa-se também um material vítreo ou parcialmente desvitrificado. Minerais esverdeados identificados como nontronita ocorrem preenchendo os interstícios, ocupando a mesma situação textural que o vidro. O mineral acessório é magnetita ou magnetita titanífera idiomorfa e também esquelética. Ocorre apatita acicular associada ao feldspato, vidro e argila.

A análise modal, média de 3 amostras, apresentou:

Augita	-	37,2%
Labradorita	-	38,7%
Nontronita (+ vidro)	-	15,2%
Vidro	-	3,5%
Magnetita	-	5,4%

Rocha com alteração apenas incipiente.

Fotomicrografia - 170 x, nicóis cruzados
AMOSTRA Nº 2 - BASALTO "B" DA BARRAGEM DE CAPIVARA

Os basaltos tipo B são basaltos vesiculares e/ou amigdaloidais característicos do topo de derrames. As amígdalas ou vesículas são de dimensões variáveis de milímetros a alguns centímetros. Ocupam em volume 20-25% da rocha. A rocha estudada é afanítica, de cor cinza escuro a castanho avermelhado. As amígdalas são preenchidas por zeólitas, quartzo, calcita, calcedônia e montmorillonita.

A análise modal típica apresenta:

Augita	- 20,8%
Labradorita	- 30,2%
Minerais argilosos verdes (+ vidro)	- 34,0%
Magnetita	- 9,2%
Zeólita e calcedônia	- 5,8%

A textura é mal definida, tendendo a vitrofírica. A granulação varia principalmente no intervalo 0,25 - 0,5 mm.

A rocha é pouco alterada, caracterizando-se a alteração principalmente por limonitização.

Fotomicrografia - 60 x, nicóis semi-cruzados
 AMOSTRA Nº 3 - BASALTO "C" DA BARRAGEM DE CAPIVARA

Basalto compacto, fanerítico, granulação fina, cor cinza médio esverdeado. A labradorita e a augita apresentam características ópticas semelhantes aos da rocha tipo A. A granulação da rocha é um tanto variável, indo de 0,4 a 0,7 e mesmo 1 mm. A textura é semelhante à da rocha tipo A. A quantidade de nontronita é variável, alcançando até 35% em volume, porém os valores mais comuns estão próximos a 10-15%.

A análise modal, média de 12 amostras, apresentou:

Augita	- 33,1%
Labradorita	- 38,3%
Nontronita	8,3%
Vidro	11,5%
Magnetita	6,7%

Ocorre uma quantidade pequena e variável de minerais secundários, principalmente zeólitas, calcedônia e óxidos de Fe secundários.

A rocha é mineralogicamente pouco alterada, caracterizando-se a alteração principalmente por limonitização a partir da magnetita e do piroxênio.

Fotomicrografia - 425 x, nicóis semi - cruzados
AMOSTRA Nº 4 - BASALTO DE SALTO OSÓRIO

Basalto vesículo-amigdaloidal, cor castanho avermelhado, afanítico. As amígdalas e vesículas são de dimensões variáveis, desde milimétricas até alguns centímetros. A dimensão média está em torno de 0,5-0,8 cm. A forma das vesículas e amígdalas é normalmente esférica ou ovalada, raramente alongada. Preenchem as amígdalas os seguintes minerais: zeólitas, calcedônia e filossilicatos (clorita, montmorillonita e camada mista de clorita e montmorillonita).

A rocha apresenta poucas macrofraturas preenchidas e soldadas por minerais hidrotermais, principalmente calcedônia e zeólitas. Os constituintes primários são:

1. Plagioclásio - 40-50% (labradorita) - praticamente apenas uma só geração, ripiformes, muitas vezes geminados e segundo albita e albita-carlsbad, granulação média (0,1-0,15 mm).

2. Clinopiroxênio - $\pm$ 20% (Augita) - uma só geração, intergranulares, elevada tendência a xenomorfismo, dimensões médias em torno de 0,03 mm.

3. Magnetita ou magnetita titanífera - 5-7% - hábito variável, alongada e isodiamétrica, esquelética; dimensões variáveis, os alongados próximos ao plagioclásio e os não alongados próximos ao piroxênio.

4. Vidro e minerais secundários - 20-25% - vidro desvitrificado em cristalitos não identificados e magnetita esquelética; minerais secundários são zeólitas (heulandita?), calcedônia, filossilicatos e óxidos de ferro (limonita e goethita).

Fotomicrografia - 170 x, nicóis cruzados
AMOSTRA Nº 5 - BASALTO DE OLÍMPIA

Basalto compacto, homogêneo, afanítico, cor cinza-escuro.
Não se notam fraturas nas amostras em blocos.

Os minerais constituintes são:

1. Plagioclásio - 35-45% - Labradorita ($\sim$ An 60) - uma geração, idiomorfos, ripiformes, finalmente geminados (albita e albita-Carlsbad) - 0,15 - 0,2 mm.
2. Piroxênio - 35-45% - augita e traços de pigeonita - hábito variável, normalmente alotriomorfos dimensões próximas às do plagioclásio.
3. Magnetita ou mag.titanífera - $\sim$ 5% - tendência idiomórfica porém grãos parcialmente reabsorvidos.
4. Vidro - $\sim$ 10% - acastanhado, isótropo, apenas parcialmente recristalizado.
5. Minerais secundários verdes - 5 $\sim$ 10% - 2 tipos: pseudomorfos de olivina (traços mineral serpentínico ?) intersticial - mineral montmorillonítico.

Alteração - minerais praticamente são.

Textura - variável de subofítica a intergranular.

Fotomicrografia - 170 x, nicóis cruzados
AMOSTRA Nº 6 - BASALTO DA SERRA DE BROTAS

Basalto compacto, homogêneo, afanítico, de cor cinza escuro, quase preto. Apresenta fraturas soldadas por minerais secundários.

Os minerais constituintes são:

1. Plagioclásio - 30 a 35% - (An 50-60) - Labradorita - idiomorfa, ripiforme, finamente geminado; apenas uma geração de microcristais; dimensão próxima a 0,12 - 0,15 mm.
2. Piroxênio - 20 a 30% - praticamente apenas augita intergranular, alotriomorfa; dimensões ligeiramente inferiores às do plagioclásio.
3. Magnetita (titanífera ?) - 3 a 5% - idiomorfa, isodiamétrica.
4. Vidro ~ 30% - desvitrificado, acastanhado, quase opaco, rico em magnetita esquelética e cristalitos.
5. Minerais secundários verdes - 5 a 10% - na sua maioria constituídos de argilas 2:1 expansivas, mas também pseudomorfos de olivina. Ocorre normalmente de forma intersticial.

Alteração - piroxênio e plagioclásio praticamente são. O vidro apresenta-se alterado e desvitrificado - traços de óxidos de Fe dispersos na rocha.

Textura - variável de intergranular a vitrofírica.

Fotomicrografia - 170 x, nicóis cruzados

AMOSTRA Nº 7 - BASALTO DA ILHA SOLTEIRA

Basalto compacto, homogêneo, afanítico, de cor cinza escuro esverdeado. As amostras estudadas não apresentaram fraturas - macroscopicamente visíveis.

Os minerais constituintes são:

1. Plagioclásio - 35 a 45% (labradorítico) - composição pouco variável em torno de An 60; ocorre como microfenocristais (poucos grãos) e como microcristais; estes são idiomorfos, ripiformes, finamente geminados; dimensão média em torno de 0,07 mm.

2. Piroxênio - 30 a 40% (augita e traços de pigeonita) - a augita tem tendência a xenomorfismo, porém a pigeonita muitas vezes é idiomórfica; dimensões semelhantes à do plagioclásio.

3. Magnetita (titanífera) ~ 5 a 7% - grãos isodiamétricos, com tendência a idiomorfismo, porém com reabsorção.

4. Vidro ~ 3-5% - desvitrificado em cristalitos não identificados; cor acastanhada.

5. Minerais secundários verde acastanhados ~ 5% - ocorrem 2 tipos:

a. Pseudomorfos de olivina (mineral serpentínico ?).

b. Filossilicato expansivo 2:1 (montmorillonita)

Alteração - rocha com alteração incipiente, caracterizando-se por limonitização de óxidos de Fe, alteração do vidro .

Textura - variável de subofítica a intergranular

Fotomicrografia - 60 x, nicóis cruzados
AMOSTRA Nº 8 - DIABÁSIO CAMPINAS

Rocha de cor cinza escuro a preto, compacta, homogênea, não orientada, fanerítica, granulação fina a média.

Segundo Hypolito () é constituída de:

Plagioclásio (An 55 - 60)	- 45,4%
Piroxênio (Augita e pigeonita)	- 25,6%
Olivina	- 1,4%
Opacos (magnetita titanífera)	- 7,8%
Intercrescimento gráfico	- 7,4%
Minerais argilosos (nontronita)	- 5,6%
Apatita	- 0,2%
Anfibólio	- 2,6%

A granulação é um pouco variável, com maior frequência de valores entre 1,5 - 2 mm, porém ocorrem fenocristais com até 15mm. A textura é variável de subofítica a intergranular.

Alteração - alteração deutérica pouco acentuada, caracterizando-se pela formação de anfibólio; alteração intempérica incipiente.

Fotomicrografia - 60 x, nicóis semi - cruzados
AMOSTRA Nº 9 - QUARTZITO JEQUITAI

Rocha mal orientada, compacta, granulação muito fina, cor cinza claro a creme. Apresenta fraturas de pequena extensão, muitas delas soldadas por quartzo.

A textura é granoblástica, equigranular, com interpenetração acentuada dos minerais. A rocha é constituída essencialmente de quartzo com extinção ondulante, de diâmetro médio próximo a 0,25 mm. Possui ainda 3-5% de feldspato sericitizado e 1-2% de outros acessórios, incluindo um mineral opaco e zircão.

Fotomicrografia - 60 x, nicóis cruzados
AMOSTRA Nº 10 - CALCÁRIO DO RIO GRANDE DO SUL

Rocha compacta, homogênea, não orientada, granulação fina, cor cinza claro. A rocha em blocos apresenta algumas fraturas - normalmente soldadas pelo próprio carbonato. A análise química - expedita pelo aparelho de Chittick mostrou 81% de carbonato e 19% de resíduo insolúvel.

A textura é grancblástica. Com excessão do anfibólio que se apresenta normalmente idioblástico, alongado, os outros minerais são xenoblásticos.

Os minerais constituintes são:

Calcita	-	9%
Dolomita	-	72%
Tremolita-actinolita	-	19%
Traços de mineral opaco		

A granulação média está em torno de 0,15 mm, porém é bastante variável na rocha, alcançando até 2 mm.

Fotomicrografia - 170 x, nicóis cruzados
AMOSTRA Nº 11 - CALCARIO APIAI

Rocha compacta, bastante homogênea, não orientada, granulação fina, cor cinza médio. Os blocos de rocha apresentam fraturas soldadas por calcário mais claro, em distribuição irregular por toda a rocha.

A textura é granoblástica, equigranular, a granulação média estando próxima a 0,12 - 0,15 mm.

A análise química expedita por meio do aparelho de Chittick forneceu 56% de calcita e 8% de dolomita. O resíduo insolúvel (36%) é constituído de: quartzo, tremolita-actinolita, muscovita e biotita e minerais opacos (pouco). Destes, apenas o quartzo é xenoblástico, sendo os outros minerais normalmente idioblásticos.

Fotomicrografia - 60 x, nicóis semi-cruzados
AMOSTRA Nº 12 - GRANITO SÃO DA ANHANGUERA

Rocha granitóide, compacta, fanerítica, leucocrática de cor cinza claro. A grande maioria da rocha é equigranular, porém apresenta alguns poucos cristais maiores de feldspato alcançando 2-3cm. No campo, observam-se cavidades miarolíticas completamente preenchidas. Macroscopicamente apresenta uma pequena orientação, mal desenvolvida evidenciada pelos minerais micáceos. Os minerais principais são:

Plagioclásio (oligoclásio ~ An 20-30) ~ 40%

Feldspato potássico (pertita) ~ 20%

Quartzo 15-20%

Muscovita (e alguma biotita) 5-10%

Clorita, granada, zircão, epídoto, apatita - traços

A textura é do tipo hipidiomórfica granular. A granulação é média, a maior parte dos grãos entre 1,2 e 1,5 mm. O plagioclásio domina sobre o feldspato potássico, situando a rocha como "Adamelito" ou mesmo "Granodiorito".

A alteração da rocha é incipiente, notando-se apenas descoloração da biotita; ocorre alguma sericitização ou caulinitização de feldspato e alteração hidrotermal ou deutérica fraca, formando clorita e epidoto.

Fotomicrografia - 60 x, nicóis semi-cruzados
AMOSTRA Nº 13 - GRANITO ALTERADO DA ANHANGUERA

O granito da pedreira Anhanguera mais alterado (amostras - mais superficiais) apresenta cor creme amarelado.

A alteração caracteriza-se por uma argilização mais acentuada dos feldspatos e a coloração é devida aos óxidos de ferro em pequena quantidade. A biotita apresenta-se mais descolorida.

Fotomicrografia - 60 x, nicóis semi-cruzados
AMOSTRA Nº 14 - CHARNOKITO DE UBATUBA

Rocha fanerítica, de granulação grossa, leucocrática, cor cinza esverdeado, aparentemente não orientada. Apresenta numerosas fraturas e fissuras, perceptíveis macroscopicamente mesmo à escala dos cristais.

A textura é duvidosa, granoblástica ou granítica (hipídio - mórfica granular). A granulação é variável alcançando os feldspatos dimensão centimétrica. Os minerais constituintes são: feldspato potássico perítico, plagioclásio sódico-cálcico (oligoclásio), quartzo e intercrescimento gráfico, biotita e acessórios - (hornblenda e anfibólios, hiperstênio - bronzita, mineral opaco, apatita e zircão).

A rocha apresenta alteração mineralógica apenas incipiente, caracterizando-se por pequena liberação de óxidos de ferro dos minerais ferromagnesianos e alteração deutérica ou hidrotermal, caracterizada pela formação de anfibólios fibrosos a partir de piroxênios.

Fotomicrografia - 60, nicóis semi-cruzados
AMOSTRA 15 - PIROXENITO DE NIQUELÂNDIA

Rocha compacta, homogênea, não orientada, granulação média, fanerítica, melanocrática, cor esverdeado claro. A amostra estudada apresenta manchas de óxidos de ferro avermelhadas e escuras, de distribuição irregular algumas vezes localizadas em fraturas irregulares.

A textura é holocristalina, hipidiomórfica granular. A granulação é variável, a média dos grãos estando próxima a 2 mm.

Os minerais constituintes são: ortopiroxênio (hiperstênio), clinopiroxênio (provavelmente augita ou diopsídio) e mineral opaco.

Os dois piroxênios ocorrem em proporções equivalentes (Websterito ?).

A rocha apresenta-se pouco alterada, caracterizando-se a alteração pela liberação de óxidos de ferro.

Fotomicrografia - 60 x, nicóis semi-cruzados
AMOSTRA Nº 16 - GRANITO DE SACOS

Granito gnáissico, compacto, de granulação média, cor rósea, com gnaissificação pouco desenvolvida, dada por minerais ferromagnesianos. As amostras estudadas não apresentam fraturas desenvolvidas mas apenas fissuras na escala dos cristais.

A textura é granoblástica, fracamente lepidoblástica. Os cristais são inequigranulares, estando a granulação média em torno de 1,0 - 1,2 mm.

Os minerais constituintes são:

Microclínio pertítico	~	50-60%
Plagioclásio sódico	~	5 -10%
Quartzo	~	15-20%
Hornblenda	~	10-15%
Biotita	~	5%
Titanita	~	2%

Apatita e opacos - traços

A rocha se apresenta com alteração incipiente ou praticamente sã.

Fotomicrografia - 60 x, nicóis cruzados
AMOSTRA Nº 17 - MIGMATITO DE JABORANDI

Rocha gnáissica de composição adamelítica, estrutura em bandas normalmente mal definidas e nebulíticas. A rocha apresenta-se compacta, com granulação média a fina, e cor cinza médio. As vezes distinguem-se faixas mais claras, mais pobres em minerais ferromagnesianos.

A textura é granoblástica, normalmente xenoblástica, com excessão da biotita que algumas vezes é idioblástica. A granulação é um pouco variável, estando a média dos grãos próximo a 0,6 - 0,7 mm.

As amostras estudadas não apresentavam fraturas macroscopicamente reconhecíveis.

Os minerais constituintes são: microclínio pertítico (muitas vezes zonado), plagioclásio sódico - cálcio (cligoclásio ?), quartzo, biotita, minerais opacos, apatita e zircão.

O microclínio e o plagioclásio ocorrem em proporções equivalentes. O plagioclásio apresenta-se parcialmente alterado em sericita, material argiloso e algum epidoto. O feldspato potássico apresenta-se são. A rocha no seu conjunto apresenta-se praticamente são.

Fotomicrografia - 60 x, nicóis cruzados
AMOSTRA Nº 18 - ARENITO BAURU

Rocha mal estratificada, bastante porosa e friável, de cor creme acastanhado. É constituída predominantemente (80-90%) de grãos de quartzo subarredondados a subangulosos, normalmente iso diamétricos, com boa seleção granulométrica e diâmetro médio próximo a 0,25 mm. Observam-se ainda: microclínio (pouco alterado), epídoto, muscovita, turmalina e mineral opaco.

A matriz da rocha é de natureza argilosa (sericita-ilita) , associada a óxidos de Fe. Ocorre ainda uma pequena quantidade de cimento calcífero.

APÊNDICE B

MÉTODOS DE ENSAIOS PROPOSTOS

ENSAIOS MECANICOS E DE DURABILIDADE

M-1

MÉTODO NÃO DESTRUTIVO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E ESTADO
DE ALTERAÇÃO DE ROCHAS

1. - OBJETIVO

Este método tem por finalidade definir um sistema de medi-
das, que possibilite a aplicação do esclerômetro Schmidt na ava-
liação da resistência mecânica e estado de alteração de rochas,
tanto no campo como em laboratório.

2. - APARELHAGEM

Os equipamentos necessários consistem basicamente no seguin-
te:

2.1 - Esclerômetro Schmidt com energia de percussão de
0,225 kgm, conforme figura em anexo.

2.2 - Suporte de corpos de prova em aço ou ferro fundido, -
com placas e parafusos de fixação reguláveis e dotado de
haste guia para manter o esclerômetro na vertical.

2.3 - Bigorna de calibração com índice esclerométrico conhe-
cido.

2.4 - Estufa ventilada capaz de manter uma temperatura de
105°C (ou 70°C) com uma variação definida para um período
de pelo menos 10 horas.

3. - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.1 - Laboratório

Os corpos de prova para ensaio em laboratório deverão
ser prismáticos com pelo menos uma dimensão de 10 cm, ou ci-
lindricos de 10 cm de comprimento. As faces de ensaio, deve-
rão permitir pelo menos 10 leituras em pontos com espaçamen-
to mínimo de 1 cm. O nº mínimo inicial de corpos de prova -
nestas condições, deverá ser de 6 em perfeitas condições, is-
to é, com faces planas, horizontais e sem trincas nem imper-
feições. Para os ensaios de alteração, o nº de corpos de

prova necessários será: o nº de ensaios a serem efetuados - durante e após alteração vezes 3 e soma-se 3.

3.2 - Campo

Delimita-se inicialmente áreas em paredes rochosas, de tal modo que abranja uma superfície uniforme quanto à natureza petrográfica. Se a superfície for relativamente uniforme, a área escolhida poderá ter aproximadamente 1 m^2 , e dividida na vertical em 2 partes: A e B. Na parte A, demarcam-se tantas linhas paralelas verticais, espaçadas de no mínimo 2 cm, quantos forem os meses de observação a serem efetuados. A seguir, em cada uma destas linhas locam-se no mínimo 30 pontos distribuídos conforme a regularidade da superfície (espaçamento mínimo de 2 cm). Na outra metade da área escolhida, locam-se 30 pontos afastados entre si de pelo menos 2 cm. Deve-se tomar o cuidado para que os pontos de ensaio escolhidos sejam em superfícies localmente planas, sem trincas ou fraturas. As imperfeições deverão ser eliminadas com uma lixa ou pastilha de carborundum.

4. - PROCEDIMENTO

Após a seleção de amostras de rocha, nas quais empregaremos o esclerômetro, o instrumento é removido de seu estojo e a ponteira de impacto é deslocada de sua posição fixa e ajustada contra a superfície da rocha. O esclerômetro é colocado perpendicularmente à superfície, no ponto de ensaio e a ponteira é comprimida pela aplicação gradual de pressão até seu impacto. A seguir, pressiona-se o botão da trava e anota-se a leitura na escala lateral do instrumento. Este botão nunca deve ser pressionado durante a queda da ponteira.

Uma leve pressão sobre a ponteira deverá destravá-la e, quando inteiramente distendida, o instrumento está automaticamente preparado para o ensaio seguinte.

O sistema de tomada de leituras é variável conforme o ensaio seja executado no campo ou laboratório:

4.1 - Laboratório

Em 3 corpos de prova, nas condições do item 3.1., efe

tuam-se 30 leituras. Nos demais 3 corpos de prova, executam-se diversas leituras em 30 pontos, até que haja uma estabilização nos valores obtidos. Caso isto não ocorra, executam-se no máximo 30 leituras.

Para os ensaios de alteração, para cada determinado número de ciclos procede-se analogamente.

4.2 - Campo

Inicialmente, efetua-se uma leitura em cada ponto da primeira linha vertical, da parte A, perfazendo um total de 30 leituras. Na parte B, efetua-se diversas leituras em cada um dos 30 pontos, até que haja uma estabilização nos valores obtidos. Procede-se analogamente nos meses subsequentes, somente que, na parte A, passa-se para as linhas consecutivas seguintes, de tal forma que nunca ocorra uma repetição de ensaios num mesmo ponto.

5. - CÁLCULO DOS RESULTADOS

Após a realização das leituras através dos procedimentos descritos, comparam-se os resultados, calculando-se as médias e dispersões. O procedimento que apresentar o menor coeficiente de variação deverá ser o mais adequado. Para o cálculo da média no caso do procedimento de impactos repetidos em um mesmo ponto, adota-se o último resultado ou a média dos últimos, como valor do índice esclerométrico, quando ocorrer estabilização nas leituras. Caso isto não aconteça, até um máximo de 30 leituras, o resultado para aquele ponto deverá ser abandonado. Considera-se uma estabilização de leituras, quando ocorrer uma repetitividade de valores seguidos, ou intercalados com uma diferença máxima de 15%.

Para avaliação da resistência mecânica antes e após alteração, transportam-se os resultados do melhor procedimento para os ábacos obtidos por Deere e Miller, que acompanham o instrumento, desde que seja conhecida a massa específica seca aparente da rocha ensaiada (antes e após alteração).

A seguir, adota-se o procedimento descrito para cálculo da queda percentual de resistência mecânica e coeficiente de altera

bilidade, dos ensaios de alteração.

6. - RELATÓRIO

O relatório deverá incluir os seguintes dados:

6.1 - Dimensões dos corpos de prova ou esquema da área da parede com os pontos locados.

6.2 - Média e dispersões obtidas para cada procedimento.

6.3 - Tabela de observações periódicas.

6.4 - Estimativa da resistência mecânica após cada série de ensaios.

6.5 - Queda percentual de resistência e o coeficiente de alterabilidade específica.

6.6 - Observações macroscópicas sobre o estado de alteração após ensaio.

6.7 - Considerações a respeito do método e durabilidade da rocha.

7. - OBSERVAÇÕES

7.1 - As superfícies de paredes rochosas deverão ser previamente limpas com escovas antes de cada ensaio.

7.2 - Para os ensaios de alteração em laboratório, utiliza-se o procedimento descrito nos métodos de alteração, com os corpos de prova obtidos.

7.4 - Caso se disponha de amostras, poderá ser tentada uma correlação dos índices esclerométricos com os índices de compressão puntiforme.

7.5 - Em laboratório, aconselha-se utilizar o ensaio de alteração com o extrator Soxhlet. Os demais ensaios de alteração, poderão destruir muito rapidamente os corpos de prova confeccionados.

7.6 - Em rochas de estrutura vesicular, os pontos de ensaio não deverão estar sobre as vesículas.

7.7 - Modificações no ponto de ensaio como trincamento ou lascamento farão com que este ponto seja abandonado, computando-se até o penúltimo valor obtido.

SEÇÃO LONGITUDINAL DO ESCLERÔMETRO SCHMIDT

M-2

MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE CORPOS DE
PROVA REGULARES (Método ASTM D3-18 modificado)

1. - OBJETIVO

Este método tem por finalidade determinar a resistência que uma rocha oferece ao impacto de um peso que cai de uma certa altura. Vem expresso pela altura de queda de um peso padrão para fraturar o corpo de prova.

2. - APARELHAGEM

2.1 - Qualquer equipamento de impacto pode ser usado desde que possua (figura em anexo):

a) Uma base de concreto pesando não menos de 50 kg, firmemente fixada sobre fundação sólida.

b) Um peso de 2 kg que caia livremente entre guias.

c) Um êmbolo de aço duro, pesando 1 kg arranjado de tal modo que deslize verticalmente, livremente, sendo sua parte inferior esférica convexa de raio 1 cm.

d) Meios para elevar o peso e deixá-lo cair sobre o êmbolo de uma altura especificada desde 1 até não menos de 75 cm, e meios para medir a altura de queda até 1 mm.

e) Meios para segurar o corpo de prova na bigorna sem suportes laterais rígidos e sob o êmbolo de maneira tal que os centros coincidam durante o ensaio e a parte superior do corpo de prova seja tangente à parte mais baixa, esférica do êmbolo.

2.2 - Serra para corte de rochas com discos de carborundum e perfuratriz de laboratório com coroa diamantada de 2,5 cm de diâmetro.

2.3 - Estufa ventilada capaz de manter uma temperatura de 105°C (ou 70°C), com uma variação definida para um período de pelo menos 10 horas.

3. - PROCEDIMENTO

Os corpos de prova deverão ser cúbicos de 2,5 cm de aresta ou cilíndricos de 2,5 cm de altura e 2,4 a 2,5 cm de diâmetro, em nº de 7, de eixos retos formando ângulo de 90° com as superfícies planas. Caso haja anisotropia nítida (como planos de fraqueza), deverão ser preparados 7 corpos de prova com estes planos perpendiculares ao eixo e 7 paralelos ao mesmo. Se não for evidente tal anisotropia, deverão ser preparados por torneamento ao acaso. Durante a preparação, deverão ser tomados cuidados para que os corpos de prova não sejam submetidos a tensões indevidas, que causem trincas ou rupturas.

Após a preparação dos corpos de prova, estes deverão ser lavados e secos em estufa a $100-110^{\circ}\text{C}$, durante aproximadamente 10 horas. A seguir, retiram-se os corpos de prova da estufa e deixa-se esfriar por aproximadamente 2 horas, quando estarão preparados para ensaio.

Colocado o corpo de prova sob o êmbolo, deixa-se cair o peso sobre o êmbolo de 1 cm de altura. Acrescenta-se 1 cm em cada nova queda até a ruptura do corpo de prova. A altura da queda que causa a ruptura será a resistência ao impacto da rocha.

Para que se obtenha uma boa média representativa (para 95% de confiança), com um erro relativo inferior a 15%, efetua-se ensaios em 7 corpos de prova e extrai-se a média dos valores obtidos, quando não houver planos de fraqueza.

4. - RELATÓRIO

O relatório deverá incluir os seguintes dados:

4.1 - Os valores encontrados e a média dos mesmos.

4.2 - Quando houver planos de fraqueza, relatar os valores para os ensaios efetuados paralela e perpendicularmente aos mesmos com as respectivas médias.

4.3 - Qualquer anomalia nos corpos de prova deve ser relatada, como por exemplo, fraturas, planos de xistosidade, etc.

5. - OBSERVAÇÕES

5.1 - Os corpos de prova deverão ser bem acabados, com faces planas e paralelas, bem horizontais. O acabamento pode ser efetuado em politriz de disco com esmeril ou carborundum 500.

5.2 - Dada as dimensões reduzidas dos corpos de prova, as amostras deverão ser representativas da rocha estudada.

5.3 - Corpos de prova com irregularidades de confecção como trincas e lascas, deverão ser eliminados.

1. Parafuso de fixação do su-
porte lateral
2. Arruela
3. Plataforma superior
4. Suporte lateral
5. Pêso
6. Haste guia graduada
7. Êmbolo
8. Presilha do corpo de pro-
va
9. Plataforma inferior
10. Barra de fixação (reforço)
11. Rosca de fixação
12. Corpo de prova

ESQUEMA DO APARELHO DE IMPACTO EM CORPOS DE PROVA REGULARES

Corte AA

MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESGASTE A ÚMIDO

1. - OBJETIVO

Este ensaio é executado para indicar a resistência apresentada por uma amostra rochosa ao enfraquecimento e desintegração por atrito mútuo quando submetida a modificações no conteúdo de água.

2. - EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

Os equipamentos necessários consistem basicamente no seguinte:

2.1 - Um tambor de ensaio onde a geratriz é constituída por um cilindro crivado em uma malha de 2 mm de abertura, com uma base sólida fixa. Este tambor é dotado de uma tampa sólida removível. Tanto o tambor quanto a tampa sólida removível é manufaturada em latão, que resiste a uma temperatura de 105°C, é fácil de ser trabalhada e é suficientemente resistente para não se deformar durante o uso. O tambor de ensaio deve ter 100 mm de comprimento e 140 mm de diâmetro. Deve-se tomar o cuidado para que a malha do cilindro esteja sempre desobstruída;

2.2 - Um recipiente de acrílico transparente, para conter o tambor de ensaio que é montado de forma a permitir um vão livre de 40 mm, entre o recipiente e a base da malha. O tambor é sustentado por um eixo horizontal que repousa sobre mancais de ebonite e grafite que cobrem as calhas dos lados do recipiente, permitindo uma rotação livre. O recipiente que deverá conter o líquido de hidratação até um nível de ± 20 mm abaixo do eixo do tambor, tem as seguintes dimensões: 190 mm de comprimento, 149 mm de largura e 120 mm de altura.

2.3 - Um motor com redutor com as seguintes características:

- a. Rotação de saída do redutor: 20 rpm
- b. Tensão: 110 v
- c. Motor de indução monofásico, protegido contra penetração de água.
- d. Frequência da rede: 60 Hz
- e. Torque: a 16 kgf cm (na saída do redutor 8 para cada lado).
- f. Saída do eixo do redutor para os 2 lados.

Este dispositivo motorizado deverá ter a capacidade de girar 2 ou 4 tambores a uma velocidade de 20 revoluções por minuto, mantendo a velocidade constante dentro de um período de 10 minutos.

O equipamento montado encontra-se na fotografia, e no esquema, em anexo.

2.4 - Uma estufa ventilada capaz de manter uma temperatura de 105°C (ou 70°C) com uma variação definida para um período de pelo menos 10 horas.

2.5 - Uma balança adequada para pesar o tambor mais a amostra com uma precisão de 0,5 a 1,0 g.

3. - PREPARO DO CORPO DE PROVA E PROCEDIMENTO DE ENSAIO

3.1 - Seleciona-se uma amostra representativa composta de 10 fragmentos, pesando entre 40-60g, para dar um peso total entre 450 a 550 g. Os fragmentos deverão ser afeiçoados para que tenham formas aproximadamente equidimensionais.

3.2 - A amostra é colocada em um tambor previamente limpo e é seca até a constância de peso a uma temperatura de 105°C (ou 70°C), durante geralmente 5 a 10 horas na estufa.

3.3 - A seguir, registra-se o peso do tambor mais amostra : peso A.

3.4 - Recoloca-se a tampa e o tambor é montado no recipiente e acoplado ao motor.

3.5 - Preenche-se o recipiente com um líquido de hidratação

até um nível de ± 20 mm abaixo do eixo do tambor e a seguir gira-se o mesmo a 20 revoluções por minuto durante um período de 10 minutos.

3.6 - Remove-se o tambor do recipiente, retira-se a tampa do mesmo e este, mais a porção retida da amostra são secados até um peso constante a 105°C (ou 70°C).

3.7 - O peso do tambor mais a porção retida da amostra é registrado (B).

3.8 - Registra-se por fim, o peso C do tambor limpo e seco.

4. - CÁLCULOS

O índice de durabilidade à hidratação é calculado como a relação percentual entre os pesos secos inicial e final de uma amostra rochosa submetida a ciclos padronizados de secagem e umedecimento.

$$\text{Índice de desgaste a úmido} \quad \text{Id} = \frac{B - C}{A - C} \times 100\%$$

(Índice de durabilidade à hidratação)

onde:

A = peso do tambor + amostra seca antes do ensaio (em g).

B = peso do tambor + amostra seca retida (em g).

C = peso do tambor limpo e seco (em g).

5. - ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO

Para cada ensaio realizado, deverão constar as seguintes informações:

5.1 - O índice de desgaste a úmido, com precisão de 1%

5.2 - A natureza do líquido de hidratação

5.3 - Observações sobre os fragmentos retidos e sobre o material passante na malha do tambor.

6. - NOTAS

6.1 - Os ensaios poderão ser executados com 1 ou mais tambores (até 4).

6.2 - Amostras de rochas sãs poderão ser previamente submetidas a ciclos de alteração artificial (Soxhlet, etilénoglicol, água-estufa), tendo-se o cuidado de se conhecer os valores de desgaste a úmido, antes de qualquer ciclagem.

6.3 - O ensaio poderá ser executado com outros líquidos de hidratação além da água, como por exemplo, água destilada, água salgada, água com ácidos diluídos ou pode-se empregar agentes expansivos como o etileno-glicol ou água oxigenada (30 volumes).

6.4 - Materiais que apresentam grande desagregação, a fração passante na malha do tambor poderia ser submetida aos ensaios de classificação de solos (p. ex., ensaio de expansão em pastilhas).

Equipamento para determinação do índice de desgaste a úmido

- 1 - Tambor de ensaio confeccionado em latão. Dimensões: 100 mm de comprimento e 140 mm de diâmetro.
- 2 - Recipiente de acrílico transparente
- 3 - Motor e redutor com duas saídas laterais
- 4 - Quantidade de amostra para ensaio de cada tambor
- 5 - Calhas dos recipientes de acrílico reforçadas com mancais de ebonite e grafite.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ALTERAÇÃO EM EXTRATOR SOXHLET E MEDIDA
DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ROCHA

1. - OBJETIVO

Este método tem por finalidade determinar a resistência à alteração de rochas, submetidas a uma lixiviação contínua em extrator Soxhlet, que reproduz razoavelmente bem, determinadas condições da natureza. Este método permite também uma previsão da queda de resistência mecânica, principalmente de agregados suscetíveis à ação química da água.

2. - APARELHAGEM

A aparelhagem necessária constitui basicamente no seguinte:

2.1 - Uma estufa ventilada capaz de manter uma temperatura de 105 a 110°C (ou 60-70°C), com uma variação definida para um período de pelo menos 10 horas.

2.2 - Para pesar o agregado miúdo ou pequenas quantidades de agregado graúdo, uma balança com capacidade de no mínimo 500 g e sensibilidade de 0,1 g, e para o graúdo uma balança com capacidade de no mínimo 5000 g e sensibilidade de 1 g.

2.3 - Bandejas metálicas de folhas de dimensões adequadas, para secagem dos materiais na estufa.

2.4 - Manta aquecedora com regulador de voltagem.

2.5 - Extrator Soxhlet de sifão baixo, conforme a figura do anexo II.

2.6 - Peneiras de malhas quadradas com caixilhos metálicos de 203,2 mm de diâmetro, 50 mm de altura, de acordo com a especificação ASTM: E11-39, de aberturas nominais respectivamente de 19,1 a 15,9 mm e 1,68 mm para o ensaio de impacto Treton, de 19,1 mm a 9,46 mm e 1,68 mm para o ensaio de abrasão Los Angeles, de 38,1 mm a 25,4 mm para o ensaio de desgaste a úmido.

2.7 - Aparelho Treton, do padrão DER: P81-52T.

2.8 - Máquina de abrasão Los Angeles, conforme MB-170 do DER.

2.9 - Aparelho de desgaste a úmido, conforme descrito na pesquisa EPC-7 e ilustrado no anexo I.

3. - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a britagem, peneirar o material a ser ensaiado em frações individuais conforme a série de peneiras mencionada.

Toma-se tantas amostras de cada fração quantos forem os ensaios mecânicos a serem executados, para um determinado nº de ciclos. Desta maneira, o peso de cada fração deve concordar com o indicado a seguir, para um único ensaio mecânico a ser executado após um determinado nº de ciclos. Os pesos de cada fração a ser ensaiada, deverão ser multiplicados por 2,3,.....,n, se o nº de ensaios mecânicos intermediários de controle for respectivamente 1,2,.....,n-1.

Granulação (mm)	Peso da amostra para ensaio (kg)
38,1 a 25,4	1,2
19,1 a 15,9	1,5
19,1 a 12,7	5,0
12,7 a 9,5	5,0

Observa-se que as amostras obtidas devem ser bem lavadas e secas até um peso constante.

4. - PROCEDIMENTO

Após lavagem e secagem em estufa a 100-110°C até atingir peso constante, separa-se a amostra em diferentes frações conforme o item 2.6, por peneiramento. Pesam-se as quantidades nas diferentes frações, que são colocadas separadamente dentro do extrator Soxhlet, onde sofrerão um processo de lixiviação contínua.

Um extrator Soxhlet (fig.), consta essencialmente de um

balão, tubo extrator, e uma unidade de condensação. Um ciclo no extrator constitui-se basicamente no seguinte: a água evaporada no balão, graças a uma unidade de aquecimento controlável (manta aquecedora com regulador de voltagem), 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 interior deste aparelho distingue-se 2 regiões:

A. Zona atmosférica

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

B. Zona de flutuação do nível da água

Amostras alternadamente imersas e emersas.

Para que as condições de alteração sejam aproximadamente uniformes, a quantidade de amostra nunca deverá ultrapassar a altura do sifão, no tubo extrator.

Após cada 30 ciclos no extrator, retira-se uma das amostras de cada fração para medida de sua resistência mecânica. As demais amostras deverão continuar até os próximos ciclos requeridos.

5. - ANÁLISE QUANTITATIVA

A análise quantitativa é efetuada da seguinte forma:

A amostra retirada deve ser lavada e seca na estufa a 100-110°C. Durante o período de secagem, retiram-se as amostras da estufa, esfriam-se à temperatura ambiente e pesam-se a intervalos de 3 horas após pelo menos 8 horas na estufa. Após ter sido atingido o peso constante, esfriam-se as amostras (por aproximadamente 3 horas), que são peneiradas durante 5 minutos com a mesma peneira na qual tinham sido retidas antes do ensaio. A seguir, pesa-se o material retido de cada fração com a precisão de 0,1g.

O material passante nas peneiras, constitui a perda em peso devido à ciclagem, correspondente à parte mais desagregável, de resistência mecânica nula. O material retido, pesado, das frações consideradas, é ensaiado da seguinte forma:

Granulação (mm)	Ensaio	Método
19,1 a 15,9	impacto Treton	IPT M-52
19,1 a 12,7 12,7 a 9,5	abrasão Los Angeles	MB-170
38,1 a 25,4	desgaste a úmido	Descrito na pesquisa EPC-7

O cálculo da resistência mecânica final do material, para um determinado nº de ciclos é efetuado ponderando-se as resistências mecânicas dos materiais passante e retido após a ciclagem, através da fórmula:

$$R_f = \frac{X \cdot R_p + (100-X) R_r}{100}$$

onde:

X = % de perda na ciclagem

100-X = % de material que resistiu à ciclagem

R_p = Resistência mecânica do material passante

R_r = Resistência mecânica do material retido

R_f = Resistência mecânica final para um determinado nº de ciclos.

Como R_p = 0, a fórmula acima fica reduzida a:

$$R_f = \frac{(100-X) R_r}{100}$$

A queda percentual da resistência mecânica inicial, válida para o intervalo de ciclos considerado, pode ser expressa como:

$$\Delta R = \frac{R_i - R_f}{R_i} \cdot 100$$

onde:

ΔR = queda percentual da resistência mecânica inicial

R_i = Resistência mecânica inicial

R_f = Resistência mecânica final para um determinado nº de ciclos.

A relação entre a queda percentual de resistência mecânica e a resistência mecânica inicial fornece um índice que exprime a suscetibilidade de uma determinada rocha em sofrer uma queda na sua resistência mecânica quando submetida a ciclos de lixiviação no extrator Soxhlet. Este índice é designado coeficiente de alte

rabilidade específica K, obtido pela fórmula:

$$K = \frac{\Delta R}{R_i}$$

6. - ANÁLISE QUALITATIVA

A análise qualitativa deverá constar de observações periódicas sobre o aparecimento de fragmentos desagregados, trincados, fragmentados; modificações na cor dos fragmentos; acompanhamento fotográfico e exame petrográfico antes do ensaio e após cada determinado nº de ciclos, caso se mostrem afetados. Somente fragmentos maiores que 3/8" (9,51 mm), são adequados para esta análise.

7. - RELATÓRIO

O relatório deve incluir os seguintes dados:

7.1 - Peso de cada fração de cada amostra antes do ensaio.

7.2 - Porcentagem de perda para cada peneiramento efetuado. A peneira usada na determinação da perda deverá ser a própria peneira da granulação do ensaio de alteração.

7.3 - Resistência mecânica do material retido após cada determinado nº de ciclos.

7.4 - Resistência mecânica final após cada determinado nº de ciclos.

7.5 - A queda percentual de resistência mecânica e o coeficiente de alterabilidade específica.

7.6 - Fotografias de acompanhamento e análise petrográfica com fotomicrografias.

7.7 - Observações macroscópicas sobre o estado de alteração após ensaio.

7.8 - Se possível, execução da difratometria de raios X antes do ensaio e após, no pó formado pela alteração, para determinação da natureza do produto e, principalmente das pro

porções dos argilominerais presentes.

7.9 - Considerações a respeito da durabilidade da rocha.

8. - OBSERVAÇÕES

Utiliza-se diferentes tipos de ensaios mecânicos neste método, para verificar se:

A. Tanto a tenacidade como a resistência à abrasão, podem - constituir-se em parâmetros mecânicos do estado de alteração.

B. Como o cálculo dos valores nos ensaios mecânicos citados segue a mesma diretriz, os índices de alterabilidade deverão ser aplicáveis para todos.

C. Conforme a quantidade de material disponível, pode-se em pregar qualquer um dos parâmetros citados.

M-5

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ALTERAÇÃO COM SATURAÇÃO-SECAGEM E MEDIDA
DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ROCHA

1. - OBJETIVO

Este método tem por finalidade determinar a resistência à alteração de rochas, submetidas a ciclos sucessivos de saturação em água à temperatura ambiente e secagem em estufa a 100-110°C. Este método permite também uma previsão da queda de resistência mecânica de agregados submetidos a condições particulares de uso, principalmente variações de temperatura e umidade.

2. - APARELHAGEM

A aparelhagem necessária constitui basicamente no seguinte:

2.1 - Uma estufa ventilada capaz de manter uma temperatura de 105 a 110°C (ou 60-70°C), com uma variação definida para um período de pelo menos 10 horas.

2.2 - Para pesar o agregado miúdo ou pequenas quantidades - de agregado graúdo, uma balança com capacidade de no mínimo 500 g e sensibilidade de 0,1g, e para o graúdo uma balança - com capacidade de no mínimo 5000 g e sensibilidade de 1 g.

2.3 - Bandejas metálicas de folhas de dimensões adequadas, - para secagem dos materiais na estufa.

2.4 - Tanques abertos para saturação das amostras em água.

2.5 - Peneiras de malhas, quadradas com caixilho metálico - de 203,2 mm de diâmetro, 50 mm de altura, de acordo com a especificação ASTM: E11-39, de aberturas nominais respectivamente de 19,1 mm a 15,9 mm e 1,68 mm para o ensaio de impacto Treton, de 19,1 mm a 9,46 mm e 1,68 mm para o ensaio de desgaste a úmido.

2.6 - Aparelho Treton, do padrão DER: P81-52T.

2.7 - Máquina de abrasão Los Angeles, conforme MB-170 do DER.

2.8 - Aparelho de desgaste a úmido, conforme descrito na pesquisa EPC-7 e ilustrado no anexo I.

3. - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a britagem, peneirar o material a ser ensaiado em frações individuais conforme a série de peneiras mencionada.

Toma-se tantas amostras de cada fração quantos forem os ensaios mecânicos intermediários de controle a serem executados, para um determinado nº de ciclos. Desta maneira, o peso de cada fração deve concordar com o indicado a seguir, para um único ensaio mecânico a ser executado após um determinado nº de ciclos. Os pesos de cada fração a ser ensaiada, deverão ser multiplicados por 2,3,...n, se o nº de ensaios mecânicos intermediários de controle for respectivamente 1,2,...,n-1.

Granulação (mm)	Peso da amostra para ensaio (kg)
38,1 a 25,4	1,2
19,1 a 15,9	1,5
19,1 a 12,7	5,0
12,7 a 9,5	5,0

Observa-se que as amostras obtidas devem ser bem lavadas e secas até um peso constante.

4. - PROCEDIMENTO

Após lavagem e secagem em estufa a 100-110°C, até atingir peso constante, separa-se a amostra em diferentes frações conforme o item 2.5, por peneiramento. Pesam-se as quantidades nas diferentes frações, que são colocadas separadamente em bandejas identificadas e levadas à imersão, até saturação completa em água por 16 horas.

Após o período de imersão, removem-se as amostras de agregado e levam-se à estufa a 100-110°C até que seja atingido um peso constante. Durante o período de secagem, retiram-se as amostras da estufa esfriam-se à temperatura ambiente e pesam-se a interva

los de 3 horas após pelo menos 8 horas na estufa. Após ter sido atingido o peso constante, esfriam-se as amostras (por aproximadamente 3 horas), à temperatura ambiente, quando estarão preparadas para nova imersão na água.

Repete-se o processo de saturação e secagem alternada até o que o nº requerido de ciclos seja atingido.

5. - ANÁLISE QUANTITATIVA

A análise quantitativa é efetuada da seguinte forma:

Após cada 10 ou 20 ciclos, retiram-se amostras para a medição de sua resistência mecânica. Para isto, ao ser atingido o nº de ciclos requerido e após resfriamento, retira-se uma das amostras de cada fração. As demais amostras deverão continuar até o próximo nº de ciclos requerido. A amostra retirada deve ser lavada e secada a 100-110°C e peneirada durante 5 minutos com a mesma peneira na qual tinham sido retidas antes do ensaio. A seguir, pesa-se o material retido de cada fração com a precisão de 0,1g.

O material passante nas peneiras, constitui a perda em peso devido à ciclagem, correspondente à parte mais desagregável, de resistência mecânica nula. O material retido, pesado, das frações consideradas, é ensaiado da seguinte forma:

Granulação (mm)	Ensaio	Método
19,1 a 15,9	impacto Treton	IPTM-52
19,1 a 12,7 12,7 a 9,5	abrasão Los Angeles	MB-170
38,1 a 25,4	desgaste a úmido	Descrito na pesquisa EPC-7

O cálculo da resistência mecânica final do material, para um determinado nº de ciclos, é efetuado ponderando-se as resistências mecânicas dos materiais passante e retido após a ciclagem, através da fórmula:

$$R_f = \frac{X \cdot R_p + (100-X) R_r}{100}$$

onde:

X = % de perda na ciclagem

100-X = % de material que resistiu à ciclagem

Rp = Resistência mecânica do material passante

Rr = Resistência mecânica do material retido

Rf = Resistência mecânica final para um determinado nº de ciclos

Como Rp = 0, a fórmula acima fica reduzida a:

$$R_f = \frac{(100-X) R_r}{100}$$

A queda percentual da resistência mecânica inicial, válida para o intervalo de ciclos considerado, pode ser expressa como:

$$\Delta R = \frac{R_i - R_f}{R_i} \cdot 100$$

onde:

ΔR = queda percentual da resistência mecânica inicial

Ri = Resistência mecânica inicial

Rf = Resistência mecânica final para um determinado nº de ciclos.

A relação entre a queda percentual de resistência mecânica e a resistência mecânica inicial fornece um índice que exprime a suscetibilidade de uma determinada rocha em sofrer uma queda na sua resistência mecânica quando submetida a ciclos alternados de saturação em água e secagem em estufa. Este índice é designado - coeficiente de alterabilidade específica K, obtido pela fórmula:

$$K = \frac{\Delta R}{R_i}$$

6. - ANÁLISE QUALITATIVA

A análise qualitativa deverá constar de observações periódicas sobre o aparecimento de fragmentos desagregados, trincados, fragmentados; modificações na cor dos fragmentos, - acompanhamento fotográfico e exame petrográfico antes do ensaio e após cada determinado nº de ciclos, caso se mostrem afetados. Somente frag

mentos maiores que 3/8" (9,51 mm), são adequados para esta análise.

7. - RELATÓRIO

O relatório deve incluir os seguintes dados:

- 7.1 - Peso de cada fração de cada amostra antes do ensaio.
- 7.2 - Porcentagem de perda para cada peneiramento efetuado. A peneira usada na determinação da perda deverá ser a própria peneira da granulação do ensaio de alteração.
- 7.3 - Resistência mecânica do material retido após cada determinado nº de ciclos.
- 7.4 - Resistência mecânica final após cada determinado nº de ciclos.
- 7.5 - A queda percentual de resistência e o coeficiente de alterabilidade específica.
- 7.6 - Fotografias de acompanhamento e análise petrográfica com fotomicrografias.
- 7.7 - Observações macroscópicas sobre o estado de alteração após ensaio.
- 7.8 - Se possível, execução da difratometria de raios X antes do ensaio e após, no pó formado pela alteração, para determinação da natureza do produto, e principalmente das proporções dos argilominerais presentes.
- 7.9 - Considerações a respeito da durabilidade da rocha.

8. - OBSERVAÇÕES

Utiliza-se diferentes tipos de ensaios mecânicos neste método, para verificar se:

A. Tanto a tenacidade como a resistência à abrasão, podem constituir-se em parâmetros mecânicos do estado de alteração.

B. Como o cálculo dos valores nos ensaios mecânicos citados segue a mesma diretriz, os índices de alterabilidade deverão ser

aplicáveis para todos.

C. Conforme a quantidade de material disponível, pode-se em pregar qualquer um dos parâmetros citados.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ALTERAÇÃO EM SOLUÇÃO DE ETILENO GLICOL E
MEDIDA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ROCHA

1. - OBJETIVO

Este método tem por finalidade determinar a resistência à alteração de rochas, submetidas a ciclos sucessivos de imersão em etileno glicol, e secagem em estufa a 100-110°C. A solução de etileno glicol deverá permitir a identificação de rochas portadoras de argilominerais expansivos, pois estas são particularmente suscetíveis à sua atuação. Este método permite também uma previsão da queda de resistência mecânica de agregados contendo proporções variadas destes argilo minerais.

2. - APARELHAGEM

A aparelhagem necessária constitui basicamente no seguinte:

2.1 - Uma estufa ventilada capaz de manter uma temperatura de 105 a 110°C (ou 60-70°C), com uma variação definida para um período de pelo menos 10 horas.

2.2 - Para pesar o agregado miúdo ou pequenas quantidades de agregado graúdo, uma balança com capacidade de no mínimo 500 g e sensibilidade de 0,1 g, e para o graúdo uma balança com capacidade de no mínimo 5000 g e sensibilidade de 1 g.

2.3 - Bandejas metálicas de folhas de dimensões adequadas, secagem dos materiais na estufa.

2.4 - Solução de etilenoglicol incolor (límpida), que deverá ser sempre mantida coberta para evitar sua hidratação pela umidade do ar.

2.5 - Recipientes fechados para imersão das amostras em solução de etilenoglicol. As amostras deverão estar completamente submersas.

2.6 - Peneiras de malhas quadradas com caixilho metálico de 203,2 mm de diâmetro, 50 mm de altura, de acordo com a espe-

cificação ASTM: E11-39, de aberturas nominais respectivamente de 19,1 mm a 15,9 mm e 1,68 mm para o ensaio de impacto Treton, de 19,1 mm a 9,46 mm e 1,68 mm para o ensaio de abrasão Los Angeles, de 38,1 mm a 25,4 mm para o ensaio de desgaste a úmido.

2.7 - Aparelho Treton, do padrão DER: P81-52T.

2.8 - Máquina de abrasão Los Angeles, conforme MB-170 do DER.

2.9 - Aparelho de desgaste a úmido, conforme descrito na pesquisa EPC-7 e ilustrado no anexo I.

3. - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a britagem, peneirar o material a ser ensaiado em frações individuais conforme a série de peneiras mencionada.

Toma-se tantas amostras de cada fração quantos forem os ensaios mecânicos intermediários de controle a serem executados, para um determinado nº de ciclos. Desta maneira, o peso de cada fração deve concordar com o indicado a seguir, para um único ensaio mecânico a ser executado após um determinado nº de ciclos. Os pesos de cada fração a ser ensaiada, deverão ser multiplicados por 2, 3,, n, se o nº de ensaios mecânicos intermediários de controle for respectivamente 1, 2,, n-1.

Granulação (mm)	Peso da amostra para ensaio (kg)
19,1 a 25,4	1,2
19,1 a 15,9	1,5
19,1 a 12,7	5,0
12,7 a 9,5	5,0

Observa-se que as amostras obtidas devem ser bem lavadas e secas até um peso constante.

4. - PROCEDIMENTO

Após lavagem e secagem em estufa a 100-110°C, até atingir -

peso constante, separa-se a amostra em diferentes frações conforme o item 2.6., por peneiramento. Pesam-se as quantidades nas diferentes frações que são colocadas separadamente em imersão na solução de etilenoglicol, em recipientes fechados, por aproximadamente 6 horas.

Após o período de imersão, removem-se as amostras de agregado e levam-se à estufa a 100-110°C até que seja atingido um peso constante. Durante o período de secagem, retiram-se as amostras da estufa, esfriam-se à temperatura ambiente e pesam-se a intervalos de 3 horas após pelo menos 8 horas na estufa. Após ter sido atingido o peso constante, esfriam-se as amostras (por aproximadamente 3 horas), à temperatura ambiente, quando estarão preparadas para nova imersão em etilenoglicol.

Repete-se este processo de saturação e secagem alternada - até que o nº requerido de ciclos seja atingido.

5. - ANÁLISE QUANTITATIVA

A análise quantitativa é efetuada da seguinte forma:

Após cada 10 ciclos, retiram-se amostras para a medida de sua resistência mecânica. Para isto, ao ser atingido o nº de ciclos requerido e após resfriamento, retira-se uma das amostras de cada fração. As demais amostras deverão continuar até o próximo nº de ciclos requerido. A amostra retirada deve ser lavada e seca a 100-110°C e peneirada durante 5 minutos com a mesma peneira na qual tinham sido retidas antes do ensaio. A seguir, pesa-se o material retido de cada fração com a precisão de 0,1 g.

O material passante nas peneiras, constitui a perda em peso devido à ciclagem, correspondente à parte mais desagregável, de resistência mecânica nula. O material retido, pesado, das frações consideradas, é ensaiado da seguinte forma:

Granulação (mm)	Ensaio	Método
19,1 a 15,9	Impacto Treton	IPTM-52
19,1 a 12,7 12,7 a 9,5	abrasão Los Angeles	MB-170
38,1 a 25,4	desgaste a úmido	Descrito na pesquisa EPC-7

O cálculo da resistência mecânica final do material, para um determinado nº de ciclos, é efetuado ponderando-se as resistências mecânicas dos materiais passante e retido após a ciclagem, através da fórmula:

$$R_f = \frac{X \cdot R_p + (100-X) R_r}{100}$$

onde:

X = % de perda na ciclagem

100-X = % de material que resistiu à ciclagem

R_p = Resistência mecânica do material passante

R_r = Resistência mecânica do material retido

R_f = Resistência mecânica final para um determinado nº de ciclos

Como R_p = 0, a fórmula acima fica reduzida a:

$$R_f = \frac{(100-X) R_r}{100}$$

A queda percentual da resistência mecânica inicial, válida para o intervalo de ciclos considerado, pode ser expressa como:

$$\Delta R = \frac{R_i - R_f}{R_i} \cdot 100$$

onde:

ΔR = queda percentual da resistência mecânica inicial

R_i = Resistência mecânica inicial

R_f = Resistência mecânica final para um determinado nº de ciclos

A relação entre a queda percentual de resistência mecânica e a resistência mecânica inicial fornece um índice que exprime a suscetibilidade de uma determinada rocha em sofrer uma queda na sua resistência mecânica quando submetida a ciclos alternados de saturação em etilenoglicol e secagem em estufa. Este índice é designado coeficiente de alterabilidade específica K, obtido pela fórmula:

$$K = \frac{\Delta R}{R_i}$$

6. - ANÁLISE QUALITATIVA

A análise qualitativa deverá constar de observações periódicas sobre o aparecimento de fragmentos desagregados, trincados, fragmentados; modificações na cor dos fragmentos; acompanhamento fotográfico e exame petrográfico antes do ensaio e após cada de terminado nº de ciclos, caso se mostrem afetados. Somente fragmentos maiores que 3/8" (9,51 mm), são adequados para esta análise.

7. - RELATÓRIO

O relatório deve incluir os seguintes dados:

- 7.1 - Peso de cada fração de cada amostra antes do ensaio.
- 7.2 - Porcentagem de perda para cada peneiramento efetuado. A peneira usada na determinação da perda deverá ser a própria peneira da granulação do ensaio de alteração.
- 7.3 - Resistência mecânica do material retido após cada determinado nº de ciclos.
- 7.4 - Resistência mecânica final após cada determinado nº de ciclos.
- 7.5 - A queda percentual de resistência mecânica e o coeficiente de alterabilidade específica.
- 7.6 - Fotografias de acompanhamento e análise petrográfica com fotomicrografias.
- 7.7 - Observações macroscópicas sobre o estado de alteração após ensaio.
- 7.8 - Se possível, execução da difratometria de raios-X antes do ensaio e após, no pó formado pela alteração, para determinação da natureza do produto e, principalmente das proporções dos argilominerais presentes.
- 7.9 - Considerações a respeito da durabilidade da rocha.

8. - OBSERVAÇÕES

Utiliza-se diferentes tipos de ensaios mecânicos neste mêtodo, para verificar se:

A. Tanto a tenacidade como a resistência à abrasão, podem constituir-se em parâmetros mecânicos do estado de alteração.

B. Como o cálculo dos valores nos ensaios mecânicos citados segue a mesma diretriz, os índices de alterabilidade deverão ser aplicáveis para todos.

C. Conforme a quantidade de material disponível, pode-se empregar qualquer um dos parâmetros citados.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA A ALTERAÇÃO EM SOLUÇÃO SATURADA DE SULFATO
DE SÓDIO E MEDIDA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ROCHA

1. - OBJETIVO

Este método tem por finalidade determinar a resistência à alteração de rochas, submetidas a ciclos sucessivos de saturação em solução saturada de sulfato de sódio e secagem em estufa a 100-110°C. Este método permite também uma previsão da queda de resistência mecânica principalmente de agregados microfraturados, quando submetidos a mudanças de condições físicas, durante emprego.

2. - APARELHAGEM

A aparelhagem necessária constitui basicamente no seguinte:

2.1 - Uma estufa ventilada capaz de manter uma temperatura de 105 a 110°C (ou 60-70°C), com uma variação definida para um período de pelo menos 10 horas.

2.2 - Para pesar o agregado miúdo ou pequenas quantidades - de agregado graúdo, uma balança com capacidade de no mínimo 500 g e sensibilidade de 0,1 g, e para o graúdo uma balança com capacidade de no mínimo 5000 g e sensibilidade de 1 g.

2.3 - Bandejas metálicas de folhas de dimensões adequadas, para secagem dos materiais na estufa.

2.4 - Prepara-se uma solução saturada de Na_2SO_4 dissolvendo-se este sal em água à temperatura de 20-30°C. Adiciona-se sal suficiente, seja anidro ou hidratado, para assegurar não somente saturação mas também a presença de cristais em excesso, quando a solução estiver pronta para uso nos ensaios (350 g de sal anidro ou 750 g de sal decahidratado - por litro de água). Agita-se cuidadosamente a mistura durante a adição de sal e também a solução (pronta) em intervalos frequentes, até ser usada. Para reduzir a evaporação e prevenir contaminação, a solução deve ser mantida sempre

coberta, mantendo-a pelo menos durante 48 horas, antes do uso, deve-se dispersar o sal no recipiente, agitando-se cuidadosamente a solução e determina-se a sua densidade. A solução ao ser usada deverá ter uma densidade de 1.151 a 1.174.

2.5 - Envólucros para imersão das amostras de agregados na solução, de acordo com o procedimento deste ensaio, que devem ser perfurados para permitir livre acesso da solução à amostra e drenagem da solução sem perda de agregado.

2.6 - Estes envólucros mais amostras e a solução, devem ser colocados em recipientes fechados. O volume da solução deve ser no mínimo 5 vezes maior que o volume da amostra a ser imersa.

2.7 - Peneiras de malhas quadradas com caixilho metálico de 203,2 mm de diâmetro, 50 mm de altura, de acordo com a especificação ASTM: E11-39, de aberturas nominais respectivamente de 19,1 mm a 15,9 mm e 1,68 mm para o ensaio de impacto Treton, de 19,1 mm a 9,46 mm e 1,68 mm para o ensaio de abrasão Los Angeles, de 38,1 mm a 25,4 mm para o ensaio de desgaste a úmido.

2.8 - Aparelho Treton, do padrão DER: P81-52T

2.9 - Máquina de abrasão Los Angeles, conforme MB-170 do DER.

2.10 - Aparelho de desgaste a úmido, conforme descrito na pesquisa EPC-7 e ilustrado no anexo I.

3. - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a britagem, peneirar o material a ser ensaiado em frações individuais conforme a série de peneiras mencionada.

Toma-se tantas amostras de cada fração quantos forem os ensaios mecânicos intermediários de controle a serem executados, para um determinado nº de ciclos. Desta maneira, o peso de cada fração deve concordar com o indicado a seguir, para um único ensaio mecânico a ser executado após um determinado nº de ciclos.

Os pesos de cada fração a ser ensaiada, deverão ser multiplicadas por 2, 3, ..., n, se o nº de ensaios mecânicos intermediários de controle fôr respectivamente 1, 2, ..., n-1.

Granulação (mm)	Peso da amostra para ensaio (kg)
38,1 a 25,4	1,2
19,1 a 15,9	1,5
19,1 a 12,7	5,0
12,7 a 9,5	5,0

Observa-se que as amostras obtidas devem ser bem lavadas e secas até um peso constante.

4. - PROCEDIMENTO

Após lavagem e secagem em estufa a 100-110°C, até atingir peso constante, separa-se a amostra em diferentes frações conforme o item 2.7., por peneiramento. Pesam-se as quantidades nas diferentes frações, que são colocadas separadamente em envólucros perfurados. Em seguida, são colocados em imersão na solução preparada de Na₂SO₄, dentro de um recipiente fechado, por não menos do que 16 horas e nem mais do que 18 horas, de tal forma que a solução cubra totalmente as amostras.

Após o período de imersão, removem-se as amostras de agregado da solução, permitindo sua drenagem por aproximadamente 15 minutos e colocam-se na estufa a 100-110°C até que seja atingido um peso constante. Durante o período de secagem, retiram-se as amostras da estufa, esfriam-se à temperatura ambiente e pesam-se a intervalos de 3 horas após pelo menos 8 horas na estufa. Após ter sido atingido o peso constante, esfriam-se as amostras (por aproximadamente 3 horas), à temperatura ambiente, quando estarão preparadas para nova imersão na solução.

Repete-se o processo de imersão e secagem alternada até que o nº requerido de ciclos seja atingido.

5. - ANÁLISE QUANTITATIVA

A análise quantitativa é efetuada da seguinte forma:

Após cada 5 ou 10 ciclos, retiram-se amostras para a medida de sua resistência mecânica. Para isto, após atingido o nº de ciclos requerido e após resfriamento, retira-se uma das amostras - de cada fração que é lavada, extraindo-se o resíduo de Na_2SO_4 com uma solução 5% de BaCl_2 . As demais amostras deverão continuar até o próximo nº de ciclos requerido. Na amostra retirada, após a remoção de Na_2SO_4 , cada fração deve ser secada a $100-110^\circ\text{C}$ até peso constante e peneirada durante 5 minutos com a mesma peneira na qual as amostras tinham sido retidas antes do ensaio. A seguir, pesa-se o material retido de cada fração com a precisão de 0,1 g.

O material passante nas peneiras, constitui a perda em peso devido à ciclagem, correspondente à parte mais desagregável, de resistência mecânica nula. O material retido, pesado, das frações consideradas, é ensaiado da seguinte forma:

Granulação (mm)	Ensaio	Método
19,1 a 15,9	impacto Treton	IPT M-52
19,1 a 12,7 12,7 a 9,5	abrasão Los Angeles	MB-170
38,1 a 25,4	desgaste a úmido	Descrito na pesquisa FPC-7

O cálculo da resistência mecânica final do material, para um determinado nº de ciclos, é efetuado ponderando-se as resistências mecânicas dos materiais passante e retido após a ciclagem, através da fórmula:

$$R_f = \frac{X \cdot R_p + (100-X) R_r}{100}$$

onde: X = % de perda na ciclagem

100-X = % de material que resistiu à ciclagem

R_p = Resistência mecânica do material passante

R_r = Resistência mecânica do material retido

R_f = Resistência mecânica final para um determinado nº de ciclos.

Como $R_p = 0$, a fórmula acima fica reduzida a:

$$R_f = \frac{(100-X) R_i}{100}$$

A queda percentual da resistência mecânica inicial, válida para o intervalo de ciclos considerado, pode ser expressa como:

$$\Delta R = \frac{R_i - R_f}{R_i} 100$$

onde:

ΔR = queda percentual da resistência mecânica inicial

R_i = Resistência mecânica inicial

R_f = Resistência mecânica final para um determinado n° de ciclos.

A relação entre a queda percentual de resistência mecânica e a resistência mecânica inicial fornece um índice que exprime a suscetibilidade de uma determinada rocha em sofrer uma queda na sua resistência mecânica quando submetida a ciclos de saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa. Este índice é designado coeficiente de alterabilidade específica K , obtido pela fórmula:

$$K = \frac{\Delta R}{R_i}$$

6. - ANÁLISE QUALITATIVA

A análise qualitativa deverá constar de observações periódicas sobre o aparecimento de fragmentos desagregados, trincados, fragmentados; modificações na cor dos fragmentos; acompanhamento fotográfico e exame petrográfico antes do ensaio e após cada determinado n° de ciclos, caso se mostrem afetados. Somente fragmentos maiores que $3/8"$ (9,51 mm), são adequados para esta análise.

7. - RELATÓRIO

O relatório deve incluir os seguintes dados:

7.1 - Peso de cada fração de cada amostra antes do ensaio.

7.2 - Porcentagem de perda para cada peneiramento efetuado. A peneira usada na determinação da perda deverá ser a própria peneira da granulação do ensaio de alteração.

7.3 - Resistência mecânica do material retido após cada determinado nº de ciclos.

7.4 - Resistência mecânica final após cada determinado nº de ciclos.

7.5 - A queda percentual de resistência mecânica e o coeficiente de alterabilidade específica.

7.6 - Fotografias de acompanhamento e análise petrográfica com fotomicrografias.

7.7 - Observações macroscópicas sobre o estado de alteração após ensaio.

7.8 - Se possível, execução da difratometria de raios X antes do ensaio e após, no pó formado pela alteração, para determinação da natureza do produto e, principalmente das proporções dos argilominerais presentes.

7.9 - Considerações a respeito da durabilidade da rocha.

8. - OBSERVAÇÕES

Utiliza-se diferentes tipos de ensaios mecânicos neste método, para verificar se:

A. Tanto a tenacidade como a resistência à abrasão, podem constituir-se em parâmetros mecânicos do estado de alteração.

B. Como o cálculo dos valores nos ensaios mecânicos citados segue a mesma diretriz, os índices de alterabilidade deverão ser aplicáveis para todos.

C. Conforme a quantidade de material disponível, pode-se empregar qualquer um dos parâmetros citados.

D. A alteração com solução de sulfato de sódio segue aproximadamente o método ASTM-C 88:69, modificado.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA A ALTERAÇÃO EM EXPOSIÇÃO NATURAL E MEDIDA
DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ROCHA

1. - OBJETIVO

Este método tem por finalidade verificar a resistência a alteração de rochas, submetidas às condições intempéricas, visando o possível aproveitamento das mesmas como material de construção. A análise quantitativa do método, permite avaliar a influência das condições climáticas sobre as características mecânicas da rocha.

2. - APARELHAGEM

A aparelhagem necessária constitui basicamente no seguinte:

2.1 - Uma estufa ventilada capaz de manter uma temperatura de 105 a 110°C (ou 60-70°C), com uma variação definida para um período de pelo menos 10 horas.

2.2 - Para pesar o agregado miúdo ou pequenas quantidades - de agregado graúdo, uma balança com capacidade de no mínimo 500 g e sensibilidade de 0,1 g, e para o graúdo uma balança com capacidade de no mínimo 5000 g e sensibilidade de 1 g.

2.3 - As amostras poderão ser colocadas dentro de caixas de madeira providas de tela, devidamente numeradas, e levadas à exposição natural.

2.4 - Bandejas metálicas de folhas de dimensões adequadas - para secagem dos materiais na estufa.

2.5 - Peneiras de malhas quadradas com caixilho metálico de 203,2 mm de diâmetro, 50 mm de altura, de acordo com a especificação ASTM: E11-39, de aberturas nominais respectivamente de 19,1 mm a 15,9 mm e 1,68 mm para o ensaio de impacto Tretón, de 19,1 mm a 9,46 mm e 1,68 mm para o ensaio de abrasão Los Angeles, de 38,1 mm a 25,4 mm para o ensaio de desgaste a úmido.

2.6 - Aparelho Treton, do padrão DER: P81-52T.

2.7 - Máquina de abrasão Los Angeles, conforme MB-170 da ABNT.

2.8 - Aparelho de desgaste a úmido, conforme descrito na pesquisa EPC-7 e ilustrado no anexo I.

3. - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após a britagem, peneirar o material a ser ensaiado em frações individuais conforme a série de peneiras mencionada.

Toma-se tantas amostras de cada fração quantos forem os ensaios mecânicos intermediários de controle a serem executados, para um determinado tempo de exposição. Desta maneira, o peso de cada fração deve concordar com o indicado a seguir, para um único ensaio mecânico a ser executado após um determinado tempo.

Os pesos de cada fração a ser ensaiada, deverão ser multiplicados por 2, 3,n, se o nº de ensaios mecânicos intermediários de controle for respectivamente 1, 2,n-1.

Granulação (mm)	Peso da amostra para ensaio (kg)
38,1 a 25,4	1,2
19,1 a 15,9	1,5
19,1 a 12,7	5,0
12,7 a 9,5	5,0

Observa-se que as amostras obtidas devem ser bem lavadas e secas até um peso constante.

4. - PROCEDIMENTO

Após lavagem e secagem em estufa à 100-110°C, até atingir peso constante, separa-se a amostra em diferentes frações conforme o ítem 2.5., por peneiramento. Pesam-se as quantidades nas diferentes frações, que são colocadas separadamente em caixas de madeira providas de tela, devidamente identificadas, e levadas à exposição natural.

Após 1 mês de exposição, retira-se uma das amostras de cada fração para medida de sua resistência mecânica. As demais amostras deverão continuar até os próximos meses requeridos.

5. - ANÁLISE QUANTITATIVA

A análise quantitativa é efetuada da seguinte forma:

A amostra retirada deve ser lavada e seca na estufa a 100-110°C. Durante o período de secagem, retiram-se as amostras da estufa, esfriam-se à temperatura ambiente e pesam-se a intervalos de 3 horas após pelo menos 8 horas na estufa. Após ter sido atingido o peso constante, esfriam-se as amostras (por aproximadamente 3 horas), que são peneiradas durante 5 minutos com a mesma peneira na qual tinham sido retidas antes do ensaio. A seguir, pesa-se o material retido de cada fração com a precisão de 0,1 g.

O material passante nas peneiras, constitui a perda em peso devido à alteração, correspondente à parte mais desagregável, de resistência mecânica nula. O material retido, pesado, das frações consideradas, é ensaiado da seguinte forma:

Granulação (mm)	Ensaio	Método
19,1 a 15,9	impacto Treton	IPT M-52
19,1 a 12,7 12,7 a 9,5	abrasão Los Angeles	MB-170
38,1 a 25,4	desgaste a úmido	Descrito na pesquisa EPC-7

O cálculo da resistência mecânica final do material, para um determinado tempo de exposição é efetuado ponderando-se as resistências mecânicas dos materiais passante e retido após a exposição, através da formula:

$$R_f = \frac{X R_p + (100-X) R_r}{100}$$

onde:

X = % de perda na exposição

100 - X = % de material que resistiu à exposição

Rp = Resistência mecânica do material passante

Rr = Resistência mecânica do material retido

Rf = Resistência mecânica final para um tempo determinado de exposição

Como Rp = 0, a fórmula acima fica reduzida a:

$$R_f = \frac{(100-X) R_r}{100}$$

A queda percentual da resistência mecânica inicial, válida para o intervalo de tempo de exposição considerado, pode ser expressa como:

$$\Delta R = \frac{R_i - R_f}{R_i} \cdot 100$$

onde:

ΔR = queda percentual da resistência mecânica inicial

R_i = Resistência mecânica inicial

R_f = Resistência mecânica final para um determinado tempo de exposição.

A relação entre a queda percentual de resistência mecânica e a resistência mecânica inicial fornece um índice que exprime a suscetibilidade de uma determinada rocha em sofrer uma queda na sua resistência mecânica quando submetida às condições naturais. Este índice é designado coeficiente de alterabilidade específica K, obtido pela fórmula:

$$K = \frac{\Delta R}{R_i}$$

6. - ANÁLISE QUALITATIVA

A análise qualitativa deverá constar de observações mensais sobre o aparecimento de fragmentos desagregados, trincados, fragmentados; modificações na cor dos fragmentos; acompanhamento fotográfico e exame petrográfico antes do ensaio e após cada tempo de exposição, caso se mostrem afetados. Somente fragmentos maiores que 3/8" (9,51 mm) são adequados para esta análise.

7. - RELATÓRIO

O relatório deve incluir os seguintes dados:

- 7.1 - Peso de cada fração de cada amostra antes do ensaio.
- 7.2 - Porcentagem de perda para cada peneiramento efetuado. A peneira usada na determinação da perda deverá ser a própria peneira da granulação do ensaio de alteração.
- 7.3 - Resistência mecânica do material retido após cada determinado tempo de exposição.
- 7.4 - Resistência mecânica final após cada determinado tempo de exposição.
- 7.5 - A queda percentual de resistência mecânica e o coeficiente de alterabilidade específica.
- 7.6 - Fotografias de acompanhamento e análise petrográfica com fotomicrografias.
- 7.7 - Observações macroscópicas sobre o estado de alteração após ensaios.
- 7.8 - Resumo das condições climáticas durante o mes, incluindo precipitação, variações termométricas, dias de sol, geadas, umidade relativa do ar, etc.
- 7.9 - Se possível, execução da difratometria de raios X antes do ensaio e após, no pó formado pela alteração, para determinação da natureza do produto e, principalmente das proporções dos argilominerais presentes.
- 7.10 - Considerações a respeito da durabilidade da rocha.

8. - OBSERVAÇÕES

Utiliza-se diferentes tipos de ensaios mecânicos neste método, para verificar se:

A. Tanto a tenacidade como a resistência à abrasão, podem constituir-se em parâmetros mecânicos do estado de alteração.

B. Como o cálculo dos valores nos ensaios mecânicos citados segue a mesma diretriz, os índices de alterabilidade deverão ser

aplicáveis para todos.

C. Conforme a quantidade de material disponível, pode-se em pregar qualquer um dos parâmetros citados.

ESQUEMA DO APARELHO DE DESGASTE A UMIDO

1. Parafuso de fixação da tampa
2. Eixo do tambor
3. Tambor crivado
4. Recipiente de acrílico
5. Nível do líquido
6. Líquido de imersão

CORTE LONGITUDINAL

CORTE TRANSVERSAL

ANEXO II

EXTRATOR SOXHLET - SIFÃO NORMAL

APÊNDICE C

PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO ADOTADO PARA ANÁLISE DE RESULTADOS

PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO PARA DIMENSIONAMENTO DE AMOSTRAS, APLICABILIDADE DO MÉTODO DE ENSAIO E CORRELAÇÕES

GENERALIDADES

Em ensaios físicos sobre rochas, a média de um conjunto de leituras é considerado como sendo representativa do todo. As diferenças de resultados que se obtém ao efetuarmos tais ensaios, são devidas a diversos fatores:

1. Heterogeneidade dos materiais rochosos, ocasionando variações nas amostras ensaiadas e variações entre uma amostra e as demais, procedentes de uma mesma jazida.
2. Falta de uniformidade na preparação dos corpos de prova.
3. Erros instrumentais com o emprego de aparelhos não aferidos periodicamente.
4. Erros do operador nos ensaios e nas leituras.

Ao considerarmos e avaliarmos erros de medida, é de grande valia ter em mente o esquema de medida empregado. A determinação de índices físicos mecânicos em rochas, constitui um caso de atuação direta de um sistema físico. Entretanto, qualquer que seja o esquema de medida empregado, o valor do número atribuído como resultado das medidas para descrever a magnitude da propriedade medida, deverá ter um maior ou menor erro, i.é., deverá afastar-se um certo tanto do valor real da quantidade. Nenhuma medida seja elaborada ou precisa ou repetida muitas vezes, poderá já mais eliminar completamente esta incerteza (10). Então, o valor real de uma quantidade física medida nunca poderá ser obtida com exatidão absoluta. Uma das fases mais importantes na arte de medida, consiste na padronização de procedimentos, de maneira a reduzir os erros de medida a limites toleráveis para os objetivos em vista.

Assim, se uma amostra é representativa de uma população, conclusões importantes podem frequentemente serem inferidas a partir da análise da amostra. A parte da estatística tratando com

condições sob os quais tal inferência é válida é chamada inferência estatística. Como esta inferência não pode ser absolutamente certa, aplica-se a teoria das probabilidades ao extrairmos as condições. O emprego de métodos estatísticos na análise dos resultados obtidos proporciona então o conhecimento do padrão característico de variação para cada rocha e equipamento de ensaio.

De acordo com Considine e Ross (10), ao estimar a magnitude da incerteza ou erro no valor atribuído a uma quantidade medida, devemos fazer uma distinção entre 2 classes gerais de erros: erros sistemáticos e erros randômicos. Erros sistemáticos são aqueles que são consistentemente repetidos com a repetição do ensaio e, erros randômicos são acidentais, cuja magnitude e sinal, flutuam de forma que não pode ser prevista a partir do conhecimento do sistema de medida e das condições de medida.

Deste modo, ao efetuarmos medidas de propriedades físicas de rochas através de ensaios tecnológicos, os resultados obtidos podem estar afetados por estas classes de erros. Neste caso, a dispersão nos resultados é devida a todos os fatores atuantes, mencionados anteriormente. A esta dispersão, podemos chamar de dispersão total. Conforme Himsworth (in 19), a dispersão total é a soma das dispersões causadas por fontes de variação atuando independentemente. Se as medidas forem executadas sob as mesmas condições, em corpos de prova teoricamente isotrópicos, a dispersão obtida deverá corresponder à dispersão devida unicamente ao instrumento. Este fato será de grande valia no dimensionamento da amostra, como se verá a seguir.

INFERÊNCIA ESTATÍSTICA

Muita confusão tem surgido na aplicação de métodos estatísticos por parte dos pesquisadores devido aos numerosos métodos para registrar dados e estabelecer a confiabilidade de suas análises. A inferência estatística pode constituir-se em valioso instrumento na interpretação de resultados de ensaios, mas devemos ter em mente que suas teorias constituem verdades matemáticas nem sempre aplicáveis aos conceitos geológicos.

Não constitui objetivo deste apêndice, nem certamente nossa

intenção, introduzir uma massa de dados estatísticos e teorias estatísticas complexas relativas à determinação da precisão e confiabilidade de medidas envolvendo flutuações randômicas. O nosso objetivo é apresentar apenas um esquema de procedimento estatístico, que permita visualizar a sequência de operações estatísticas a ser efetuada, ao se testar a aplicabilidade de um determinado ensaio tecnológico.

Para fins práticos de aplicação da análise estatística a agregados rochosos, admite-se que seja do tipo normal (Gauss Laplace), a curva de distribuição de frequências das características físicas (12-30), constituindo um dos exemplos mais importantes de uma distribuição probabilística contínua.

O controle de qualidade dos resultados pode, pois, ser associado à curva normal representativa de cada caso, caracterizada pelos seguintes parâmetros:

1. Média (Média aritmética, $\bar{x}$)

É o valor típico ou representativo de um conjunto de resultados. Uma das médias mais comuns é a média aritmética $\bar{x}$, que constitui a soma de todas as observações em uma amostra dividida pelo nº de observações.

$$\bar{x} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

2. Medidas de dispersão

O grau na qual os valores numéricos tendem a se afastar de um valor médio é chamado variação ou dispersão dos resultados. Uma medida comum da dispersão é a variância.

2.1 - Variância

A variância é a soma dos quadrados dos desvios de observações individuais da média, dividido pelo nº total de observações. A variância da amostra s^2 é calculada pela fórmula:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n}$$

A relação é dividida por n quando $n > 30$ e por $n-1$, quando $n \leq 30$. Para valores grandes de n , não há praticamente diferença entre os valores de S^2 determinados, usando-se (n) ou $(n-1)$. O resultado obtido pelo uso de $(n-1)$ no denominador em lugar de (n) , é considerado como representando uma estimativa melhor e menos afastada da variância da população, da qual a amostra foi extraída.

2.2 - Desvio padrão

A dispersão das observações sobre a média é usualmente medida pelo desvio padrão, que é definido como a raiz quadrada positiva da variância S^2 . É obtida pela equação:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

O desvio padrão pode também ser obtido, sem se calcular inicialmente a média da amostra, usando-se a equação - equivalente simplificada da forma:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n X_i)^2}{n}}{n}}$$

2.3 - Coeficiente de variação

A variação real como é determinada a partir do desvio padrão ou outra medida de dispersão é chamada de dispersão absoluta. Entretanto, para se comparar o grau de variação dentro da amostra ou entre amostras em relação a diferentes propriedades, é mais conveniente expressar o desvio padrão S , como uma porcentagem da média $\bar{x}$. Este valor fornece uma medida da dispersão relativa, chamada coeficiente de variação C_v . Este coeficiente é usualmente expresso como uma porcentagem, e é dado pela fórmula:

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100$$

Como é uma relação de 2 quantidades com a mesma unidade de medida, o coeficiente de variação é independente da unidade empregada.

INTERVALO DE CONFIANÇA

Numa distribuição gaussiana, as observações que diferem pouco da média, ocorrem mais frequentemente do que observações que diferem consideravelmente da média. Relacionando-se a frequência de ocorrência de uma observação com o quanto ela difere da média da população, a curva representativa desta distribuição tem a aparência física de um sino simétrico, extendendo-se infinitamente para ambas as extremidades:

Se a área total entre a curva e o eixo x é de 100%, então, a porção da área sob a curva entre 2 valores quaisquer de x é completamente determinada por μ e σ . Por integração, encontra-se que 68,27% da área total fica no intervalo $\mu \pm 1\sigma$, enquanto que 95,45% das observações estão no intervalo $\mu \pm 2\sigma$. Somente 0,27% da frequência total fica além de $\mu \pm 3\sigma$. O gráfico indica também que 5% da área total fica além de $\mu \pm 1,96\sigma$.

É possível então, pela análise estatística de dados determinar uma flutuação da dispersão do valor médio dentro do qual pode ser esperado que esteja uma certa fração de todos os valores. Esta flutuação é chamada de intervalo de confiança, e a probabilidade que o valor de uma observação escolhida ao acaso esteja dentro deste intervalo é chamada nível de confiança.

Se o nº de observações é grande e suas dispersões são randômicas, diversos intervalos de confiança em volta do valor médio μ podem ser determinados através da expressão geral: $\bar{x} \pm \xi \sigma$ (ξ tabelado e definido para um determinado nível de confiança e nº de observações, na tabela de áreas sob a curva normal).

Se o nº de observações é pequeno e o desvio padrão σ não é conhecido com exatidão, estes intervalos devem ser ampliados. Neste caso, devemos calcular o desvio padrão da amostra S , e multiplicar este valor por um fator apropriado, o coeficiente t de Student, para estabelecer o intervalo de confiança, isto é, o intervalo dentro do qual espera-se encontrar uma observação selecionada ao acaso, com um determinado nível de confiança. Do mesmo modo, podemos achar diversos intervalos de confiança em volta do valor médio μ , que podem ser determinados através da expressão geral $\bar{x} \pm t s$ (t tabelado e definido para um determinado nível de confiança e nº de observações, na tabela de distribuição t de Student).

Para se obter os intervalos de confiança para a média de um grupo de observações, considera-se o desvio padrão das médias, $S_{\bar{x}}$, que é relacionado ao desvio padrão da população σ , da seguinte maneira:

$$S_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Estatisticamente considera-se esta grandeza como erro padrão.

Como a distribuição amostral das médias tem uma média e um desvio padrão $S_{\bar{x}}$ e é normal na forma (29), é possível determinar a probabilidade que a média da amostra $\bar{x}$, possa ser encontrada dentro de uma distância específica da média da população μ , baseada nas características da curva normal.

Considerando que μ e σ sejam conhecidos, as chances são de

68,27 em 100 que a média da amostra $\bar{x}$, seja encontrada dentro do intervalo $\pm 1 \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ de μ . Do mesmo modo, a probabilidade é de 95,45 em 100 que $\bar{x}$ seja encontrado dentro de $\pm 2 \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ de μ . Este intervalo então, pode ser designado como cobrindo qualquer probabilidade considerada como $\pm \xi \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$.

Desta forma, μ irá cair dentro do intervalo $(\bar{x} - \xi \frac{\sigma}{\sqrt{N}})$ a $(\bar{x} + \xi \frac{\sigma}{\sqrt{N}})$.

Usualmente, ambos os parâmetros da população μ e σ são desconhecidos mas, as características amostrais $\bar{x}$ e s são determinadas. Nestas condições μ irá cair dentro do intervalo $(\bar{x} - \frac{ts}{\sqrt{N}})$ a $(\bar{x} + \frac{ts}{\sqrt{N}})$. Estes valores são referidos estatisticamente como limites de confiança.

DIMENSIONAMENTO DE AMOSTRAS

Sabemos que a determinação das dispersões deve ser efetuada de modo que $\bar{x}$ (média da amostra), seja tão próxima quanto possível de μ (média do universo) e s^2 (variância da amostra), seja representativa de σ^2 (variância do universo). Para tal, N (nº de observações na amostra) deve ser $N \geq 30$ (universo amostral), para grandes amostras.

Quando substituimos quaisquer dos parâmetros por sua estimativa, estaremos cometendo um erro, o erro de amostragem, que tem uma distribuição normal de média 0 e a variância σ^2 .

Por considerações análogas aos efetuados para as distribuições ξ e t , temos com $P\%$ de certeza que o valor absoluto do erro de amostragem apresenta a restrição:

$$| \bar{x} - \mu | < \xi \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Como s é a estimativa de σ baseada em $N \leq 30$ observações, temos:

$$| \bar{x} - \mu | < t \frac{s}{\sqrt{N}} \text{ ou } \mu \text{ compreendido entre } (\bar{x} - t \frac{s}{\sqrt{N}}) \text{ e } (\bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{N}})$$

Dividindo-se a desigualdade $|\bar{x} - \mu| < \xi \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ por μ , temos:

$$\left| \frac{\bar{x} - \mu}{\mu} \right| < \frac{\xi}{\sqrt{N}} \frac{\sigma}{\mu}$$

Chamando-se o 2º membro por erro relativo máximo, na estimação da média (E_r) e substituindo σ/μ por C_v (coeficiente de variação), temos:

$$E_r = \frac{\xi}{\sqrt{N}} C_v \quad \text{ou} \quad N = \left(\frac{\xi C_v}{E_r} \right)^2$$

Analogamente, quando $N \leq 30$, temos:

$$N = \left(\frac{t C_v}{E_r} \right)^2$$

onde:

N = nº mínimo de ensaios

t ou ξ = valores tabelados. Geralmente estes coeficientes são escolhidos para 95% de probabilidade que os resultados não apresentem um erro relativo E_r da média (em nossos estudos admitimos 10%).

C_v = Coeficiente de variação, obtido a partir de rochas mais heterogêneas. Assim, qualquer outra rocha ensaiada deverá cair dentro da dispersão obtida.

Estas expressões permitem determinar o nº de elementos que devem compor uma amostra (nº de ensaios) para que as estimativas obtidas a partir da mesma possuam uma precisão pré-fixada.

Para a determinação do coeficiente de variação, das fórmulas acima é necessário eliminarmos a dispersão devido ao erro sistemático, isto é, a dispersão parcial devido ao equipamento.

O procedimento varia conforme a natureza do ensaio:

I. - ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

1. Executa-se N ensaios em N corpos de prova da rocha. Ob-

tem-se a dispersão total (devido ao equipamento e heterogeneidade dos corpos de prova rochosos).

2. Para discriminar a dispersão parcial devido ao equipamento, observa-se 2 procedimentos diferentes que dependem da possibilidade ou não, de modificar as características superficiais de amostras, quando as solicitações de ensaio são repetidas em um ponto:

2.1 - Executa-se N ensaios em um ponto de um corpo de prova da rocha. Não há modificação das características superficiais. Ex. ensaios para determinação da velocidade de propagação de ondas e do módulo dinâmico em rochas. Obtem-se a dispersão parcial devido ao equipamento, que também pode ser obtida através da execução de N ensaios em um ou mais pontos de modelos isotrópicos. Consideramos materiais teoricamente isotrópicos para efeitos de ensaios: vidro, gesso, cerâmica, calda de cimento, etc.

2.2 - Executa-se ensaios em N pontos do corpo de prova da rocha. Obtem-se a dispersão total.

2.3 - Para ensaios não destrutivos onde ocorre alteração das características superficiais, executa-se primeiramente ensaios em N pontos do corpo de prova da rocha. Obtem-se a dispersão total. Ex: caso de ensaios de dureza dinâmica.

2.4 - Executa-se ensaios em N pontos de modelos isotrópicos. Obtem-se a dispersão parcial devido ao equipamento.

II. - ENSAIOS DESTRUTIVOS

1. Executa-se ensaios em N corpos de prova de modelos isotrópicos. Obtem-se a dispersão parcial devido ao equipamento.

2. Executa-se ensaios em N corpos de prova de rocha. Obtem-se a dispersão total.

De acordo com Himsworth, visto anteriormente, a variância total é a soma das variâncias causadas por fontes de variação -

atuando independentemente. Nestas condições:

$$S^2 = S_0^2 + S'^2 \quad \text{ou} \quad S = \sqrt{S_0^2 + S'^2}$$

onde:

S^2 = variância total

S_0^2 = variância devido ao equipamento

S'^2 = variância devido a amostra (ou amostras) da rocha

Obtido o valor da variância ou desvio padrão da amostra, podemos calcular a dispersão percentual dos resultados dos ensaios através do coeficiente de variação:

$$C_v = \frac{S'}{\bar{x}} \cdot 100$$

Para que o nº mínimo de ensaios especificado pelo método de ensaio seja extensível para todos os materiais rochosos, escolhe-se a maior dispersão obtida nos ensaios preliminares (geralmente em rochas mais anisotrópicas), para o cálculo do coeficiente de variação.

CORRELAÇÃO E REGRESSÃO

O método de correlação estatística entre propriedades físicas de rochas a partir de um conjunto de pontos de um diagrama de dispersão, permite a obtenção de uma reta ou curva de correlação, definida por uma equação de interdependência matemática, que pode ser uma função do tipo linear, exponencial, potencial, etc. Se os dados se aproximarem a uma linha reta, diz-se que existe uma relação linear entre as variáveis. Se a linha curva for a melhor aproximação, diz-se que existe uma relação não linear.

Para evitar a subjetividade na construção de linhas, parábolas ou outras curvas aproximadas ajustadas a um conjunto de dados, aplica-se a análise de regressão pelos mínimos quadrados. Neste método, a reta ou curva melhor ajustada é aquela que se ajusta à nuvem de pontos do diagrama de dispersão, quando a soma

dos quadrados dos desvios dos pontos em relação a esta linha é mínima. Quando estes desvios são determinados ao longo do eixo y, dizemos que x é a variável independente e y a variável dependente. Se x é dependente, a situação é modificada considerando-se os desvios horizontais no lugar dos desvios verticais, o que leva a um intercâmbio dos eixos x e y.

Estas 2 situações, em geral, levam a diferentes linhas de mínimos quadrados. Então, quando estas 2 linhas se aproximarem até coincidirem, constitui uma indicação que os resultados são muito bem descritos por uma relação linear.

O grau de relação entre variáveis, ou correlação, procura determinar o quanto uma equação linear ou outra descreve a relação. Se todos os valores das variáveis satisfazem uma equação exatamente, diz-se que as variáveis estão perfeitamente correlacionadas, ou que existe uma correlação perfeita entre elas.

Assim, com base nos resultados da amostra, podemos estimar o valor de uma variável y, correspondendo a um dado valor da variável x, a partir de uma linha (ou curva) de mínimos quadrados, que se ajusta aos resultados da amostra. A linha resultante é chamada de linha de regressão de y em x, pois y é estimado a partir de x. Inversamente, o valor de x pode ser estimado a partir da linha de regressão de x e y, no caso em que x é a variável dependente e y a variável independente. Em geral, a linha de regressão ou curva de y em x não é a mesma da linha ou curva de regressão de x em y.

A linha de regressão dos mínimos quadrados de y em x tem a equação:

$$Y = a X + b \text{ (para uma relação linear)}$$

onde:

X = variável independente

Y = variável dependente

a = inclinação da linha de regressão

b = intersecção de Y na linha de regressão.

A intensidade da associação ou relação entre variáveis é definida pelo coeficiente de correlação r, que é dado pela ex-

pressão geral:

$$r = \pm \sqrt{\frac{\sum (Y_{est} - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

onde: Y_{est} = valor de Y para dados valores de X estimados a partir de uma relação linear ou não linear.

Esta expressão geral pode ser empregada tanto para as relações lineares como para as não lineares, com uma única diferença do Y_{est} ser calculado por meio de uma equação não linear e dos sinais $\pm$ serem omitidos. Assim, o valor de r calculado em qualquer caso, fornece o grau de relação correspondente ao tipo de equação que é realmente admitido, isto é, o coeficiente de correlação mede a existência do ajustamento aos dados da equação realmente considerada.

Para o caso da correlação linear, r conserva-se o mesmo, quer se considere X ou Y como a variável independente. Por isso, o coeficiente de correlação constitui uma boa medida da correlação linear entre 2 variáveis. A expressão geral ficaria então:

$$r = \frac{\sum x y}{\sqrt{\sum (x)^2 \sum (y)^2}}$$

(proporciona automaticamente o sinal adequado de r).

onde:

$$x = x - \bar{x}$$

$$y = y - \bar{y}$$

A quantidade r varia entre + 1 e - 1, que são os valores para uma correlação perfeita. Os sinais + 1 e - 1, representam respectivamente uma correlação linear positiva e negativa, isto é, quando $r = + 1$, as variáveis aumentam ou diminuem concomitantemente e $r = - 1$, os grandes valores de uma variável se associam a pequenos valores da outra. Quando $r = 0$, as variáveis não são

correlacionáveis linearmente (pode haver uma forte correlação não linear).

Entretanto, na prática, nenhuma correlação é perfeita. Ao calcularmos o valor de uma variável, conhecido o valor de outra variável, através da equação de regressão, haverá uma certa variação em torno do resultado previsto, ou seja, os valores reais não irão coincidir com os valores teóricos estimados a partir da linha de regressão.

A dispersão ao redor da linha de regressão de Y em X é definida pelo erro padrão da estimativa S_{yx} , que é dada pela equação geral:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{est})^2}{N - 2}} \quad (29)$$

Esta dispersão estabelece uma faixa dentro da qual uma determinada porcentagem de valores irá cair. Do mesmo modo, o erro padrão da estimativa de X em Y é obtido trocando-se Y com X nesta equação.

O erro padrão da estimativa tem propriedades análogas aos do desvio padrão. Se as linhas são construídas paralelamente à linha de regressão de Y em X para as distâncias verticais respectivas de $\pm S_{yx}$, $\pm 2 S_{yx}$ e $\pm 3 S_{yx}$ a partir dela, aproximadamente 68%, 95% e 99,7% dos pontos de amostras deverão ser incluídas entre estas linhas.

Analogamente, as considerações estatísticas descritas no item sobre intervalo de confiança são válidas para se estabelecer a faixa de confiança ao se estimar uma variável conhecendo-se a outra. Neste caso, o desvio padrão é substituído pelo S_{yx} e como o nº de pontos de correlação é geralmente $N < 30$, utilizamos o coeficiente t de Student para 95% de confiança, em função do nº de graus de liberdade de S_{yx} , que no caso da regressão linear é igual a $N - 2$ (interdependência entre 2 variáveis). O intervalo de confiança (IC) permite então, calcular entre que limites estará $\bar{y}$ para um dado x_i . A expressão deste intervalo será:

$$I C (Y) = Y_i \text{ calc.} \pm S_{yx} \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{S_{xx}}}$$

onde:

$$S_{xx} = \sum_1 (x_i - \bar{x})^2$$

$Y_i \text{ calc.}$ = obtido da equação para um dado x

A análise da expressão dos limites de intervalo de confiança, permite estabelecer diversas conclusões de interesse prático (29). Assim, a precisão da estimativa de $\bar{y}$ em relação a x_i , será tanto maior quanto:

1. Menor for S_{yx} , isto é, quanto mais reduzida for a dispersão dos valores observados na amostra sobre a regressão.
2. Maior for N
3. Maior for S_{xx} , isto é, a dispersão dos valores observados de x sobre sua média $\bar{x}$.
4. Como a variação de x_i conduz a um alargamento do intervalo de confiança, para aumentarmos a precisão da estimativa, devemos observar valores de x afastados da média $\bar{x}$.
5. As estimativas de $\bar{y}$ para valores de x_i muito afastados de x apresentam baixa precisão, pois o erro na estimação será muito grande.