

4. MATERIAIS E MÉTODOS – ROCHAS

4.1. MATERIAIS

As amostras de filito sericítico e rocha básica intrusiva para caracterização geotécnica e realização do presente estudo, foram coletadas nas minas do Pico do Itabirito e do Tamanduá. A amostragem realizada baseou-se no histórico de problemas de instabilização de taludes operacionais e definitivos das cavas, tanto por conta de sua baixa resistência ao intemperismo quanto pela sua presença, comum, nos taludes destas minas.

Foram extraídos materiais tanto de taludes quanto em furos de sondagem rotativa.

As ilustrações dos locais em que foram coletadas as amostras de taludes estão apresentadas a seguir, juntamente com figuras ilustrando as amostras obtidas a partir da sondagem rotativa.

Figura 4.1 – Talude da Mina do Pico onde foram coletadas amostras de filito sericítico.



Figura 4.2 – Amostras ilustrando o filito sericítico, obtido a partir de furos de sondagem rotativa, na mina do Tamanduá.



Figura 4.3 – Talude da Mina do Pico onde foram coletadas amostras de rocha básica intrusiva.



Figura 4.4 – Amostras ilustrando a rocha básica intrusiva, obtidas a partir de furos de sondagem rotativa, na mina do Tamanduá.



4.2. METODOLOGIA DE CAMPO

O trabalho de campo constituiu-se na coleta de amostras de rocha em taludes expostos superficialmente, na tentativa de avaliar o grau de alteração destes materiais no campo, e em furos de sondagem rotativa buscando-se amostras com o maior grau de sanidade possível. As amostras foram convenientemente acondicionadas de maneira a garantir suas características originais e posteriormente levadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos do DEC/UFV, onde foram armazenadas de modo a preservar sua integridade até o início dos ensaios.

4.3. METODOLOGIA DE LABORATÓRIO

4.3.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

O ensaio de caracterização física foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil - UFV, seguindo as recomendações da norma NBR 12766: “Rochas para revestimento – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d’água aparente”. Estes ensaios foram utilizados para caracterizar o estado inicial das rochas bem como acompanhar as modificações sofridas pelos litotipos ao longo do ensaio de ciclagem água-estufa. A Figura 4.5 apresenta, a título de exemplo, as amostras de rocha básica intrusiva obtida na face do talude e utilizada neste ensaio.



Figura 4.5 – Amostras de Rocha básica intrusiva.

O ensaio consiste em secar os corpos-de-prova em estufa, a uma temperatura de $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 24 horas, e ao retirá-los, deixá-los esfriar à temperatura ambiente. Após isso, pesa-se e anota-se a massa de cada corpo de prova (massa A). Colocam-se os corpos-de-prova numa bandeja e adiciona-se água até 1/3 de suas alturas, após 4 horas adiciona-se água até 2/3 e depois de mais 4 horas completa-se a submersão dos corpos-de-prova e deixa-se completar o tempo total de 24 horas.

Transcorridas 24 horas de submersão, enxuga-se a superfície dos corpos-de-prova e pesa-se ao ar (massa B). Finalmente, pesam-se os corpos-de-prova na condição submersa (massa C), utilizando-se uma balança de pesagem hidrostática, Figura 4.6.



Figura 4.6 – Ilustração da Balança Hidrostática

Para a determinação dos parâmetros físicos, a saber, massa específica aparente seca ($\rho_{a_{sec}}$), massa específica aparente saturada ($\rho_{a_{sat}}$), porosidade aparente (η_a) e absorção d'água aparente (α_a) foram utilizadas as expressões apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Formulações utilizadas na determinação dos parâmetros físicos.

$\rho_{a_{sec}} \text{ (ML}^{-3}\text{)}$	$\rho_{a_{sat}} \text{ (ML}^{-3}\text{)}$	$\eta_a \text{ (\%)}$	$\alpha_a \text{ (\%)}$
$\rho_{a_{sec}} = A/(B-C)$	$\rho_{a_{sat}} = B/(B-C)$	$\eta_a = ((B - A)/(B - C)) \cdot 100$	$\alpha_a = ((B - A) / A) \cdot 100$

Sendo:

A → Massa seca; B → Massa saturada superfície seca; C → Massa submersa para amostra saturada.

4.3.2. ANÁLISE PETROGRÁFICA

A análise petrográfica é realizada através de exames macroscópico e microscópico, que permitem identificar a natureza ou tipo de rocha, os minerais presentes e suas inter-relações, o grau de alteração, o estado microfissural dos cristais, sua granulação e textura, além de outras características que possam influenciar na durabilidade da rocha. Através desse ensaio é possível se fazer uma reconstituição histórica da rocha, onde se incluem informações que vão desde as condições físico-químicas atuantes na época de sua formação até a identificação de eventos geológicos (tectônicos, hidrotermais, metassomáticos, intempéricos) a que foi submetida ao longo de sua existência (VIDAL, BESSA & LIMA, 1999). Certas estruturas, como, por exemplo, a microfissuração, podem exercer papel relevante no comportamento mecânico dos materiais rochosos, com influência significativa em suas propriedades.

As análises petrográficas foram realizadas no Departamento de Geologia da UFRJ, sob a supervisão do Professor Emílio Velloso Barroso e contemplaram os litotipos utilizados na pesquisa em questão que são as rochas básicas intrusivas e os filitos sericíticos.

4.3.3. DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

Os raios-X são ondas eletromagnéticas utilizadas no modo de difração por raios-X para determinar a estrutura dos cristais ou moléculas (CULLITY, B. D., 1978).

Nesta técnica faz-se incidir um feixe de raio-X difratados numa placa fotográfica. Os padrões de difração são constituídos por padrões de pontos na placa e pode-se extrair conclusões sobre a estrutura do cristal através das posições e intensidades destes pontos.

Segundo RESENDE et al. (2005), a difratometria de raios-X é a mais poderosa ferramenta para estudo de minerais do solo, particularmente aqueles presentes na fração argila.

Segundo HERMANN (1979) *apud* PASSOS (2005), os raios-X são difratados pelos elétrons nas moléculas usando cristais moleculares. A difração é, pois, uma propriedade das ondas e, é óbvio, das ondas eletromagnéticas, que causa a radiação, se “inclinarem” à medida que ela passa por uma aresta ou por uma abertura. O efeito da difração aumenta à medida que a dimensão física da abertura se aproxima do comprimento de onda da radiação empregada. O resultado da difração é uma coleção de figuras de interferência, que podem ser pontos escuros, anéis claros e escuros, ou mesmo linhas, dependendo da geometria do objeto que está causando a difração.

A técnica analítica da Difração de Raio-X fornece informações precisas e detalhadas quanto à qualificação, caracterização e quantificação dos compostos presentes nas amostras, além de ser rápida, versátil e não destrutiva (CULLITY, B. D., 1978).

Esta técnica é utilizada para a identificação e determinação quantitativa de vários compostos cristalinos, conhecidos como “fases” presentes em pó ou materiais sólidos.

Toda informação explícita das fases é perdida, o que impossibilita a determinação direta da estrutura a partir das intensidades medidas (GIACOVAZZO, 2002).

Neste ensaio, realizado no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, as amostras foram preparadas de forma a representar as rochas em estudo no decorrer do ensaio de ciclagem, ou seja, em diferentes graus de alteração. Estas foram pipetadas (montagem orientada), sendo acondicionadas em lâminas de vidro para análise, conforme apresentado na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Lâminas para o ensaio de Difractometria de Raio X

Desta forma realizou-se a preparação das lâminas através dos materiais de raspagem das rochas cicladas em água-estufa a cada 25 ciclos, tendo início em zero e final no centésimo ciclo.

O ensaio foi executado com as seguintes características: um ângulo 2θ variando de 4° a 50° ; a velocidade utilizada foi de 0,50 grau por segundo; o metal alvo utilizado foi o tubo de cobalto.

O conhecimento da mineralogia pode ser de grande valor para entendimento de algumas propriedades de engenharia, principalmente para avaliar a alterabilidade de alguns litotipos em função da presença de argilominerais expansivos.

4.3.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) permite a visualização da superfície de amostras volumosas, com um mínimo de preparação destas amostras e por isso conquistou rapidamente grande aceitação. O MEV tem maior aplicação no exame de superfícies rugosas (contraste topográfico). Este proporciona a obtenção de imagens com grande profundidade de campo e alta resolução, fácil interpretação das imagens com aparência tridimensional, aquisição de sinal digital, possibilitando processamento dos sinais, e manipulação e processamento das imagens, com o auxílio de acessórios, além da possibilidade de microanálise de elementos, (MANNHEIMER 2002).

Para realização dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura seguiu-se a metodologia usada pelo Núcleo de Microscopia e Microanálise do CCB/UFV para materiais não biológicos e não condutivos. Nestes, as amostras foram reduzidas a pedaços de rocha em formato laminar, com a maior dimensão medindo aproximadamente 5 milímetros. Posteriormente procedeu-se a montagem em *stub's* com fita adesiva dupla face para o recebimento do material.

Amostras não condutoras devem ser recobertas com uma fina camada de material condutor, utilizando-se comumente o ouro, platina ou carbono. O procedimento pode ser feito com um evaporador de vácuo, ou mais eficientemente, pelo processo de *sputtering*, (MANNHEIMER 2002).

Para evitar os efeitos de carga dentro da câmara do microscópio, todas as amostras foram submetidas ao processo de metalização por *sputtering*, com deposição de um filme de ouro sobre a superfície do porta amostra (*stub's*), conforme apresentado na Figura 4.8.

Para realização desta deposição utilizou-se um metalizador, marca Balgers modelo SCD 010 Sputter Coater, sendo os parâmetros de deposição iônica estabelecidos a uma temperatura na câmara de metalização de 33°C , corrente de 30mA e tempo de deposição

de aproximadamente 120 segundos, fornecendo um filme de ouro na superfície das partículas da ordem de 20nm, deposição necessária para evitar os efeitos de carga durante as observações e que não mascara a visualização das partículas, apesar da espessura ser maior que o diâmetro de algumas, já que uma camada de ouro de até 100nm é transparente a luz visível (TOMA, 2005; TOMA, 2005; STOGNIJI, 2003 *apud* SILVA, 2007) e também ao feixe eletrônico. A Figura 4.9 mostra o equipamento utilizado para a deposição do ouro sobre a amostra.



Figura 4.8: Detalhe de uma lâmina após a metalização.



Figura 4.9: Metalizador utilizado - marca Balzers modelo SCD 010
Sputter Coater

Em seguida as laminas foram levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura, da marca LEO modelo ZP 1430, onde foram registradas as imagens dos principais minerais de sua composição. A Figura 4.10 ilustra o equipamento de microscopia eletrônica utilizado nesses estudos.

Utilizou-se aceleração de alta voltagem, EHT 15,00 KV, e foram analisados os elétrons secundários de baixa voltagem.

Para este ensaio, foram preparadas dez lâminas, sendo cinco para a Rocha básica intrusiva e cinco para o filito sericítico, representando os ciclos 0, 25, 50, 75 e 100. A Figura 4.11 ilustra uma lâmina de rocha visualizada no microscópio.

Este ensaio foi realizado para qualificar os tipos de minerais encontrados no decorrer da ciclagem em água-estufa, comprovando os resultados encontrados na difratometria de Raios-X.



Figura 4.10: Imagem do microscópio eletrônico de varredura utilizado - marca LEO modelo ZP 1430.

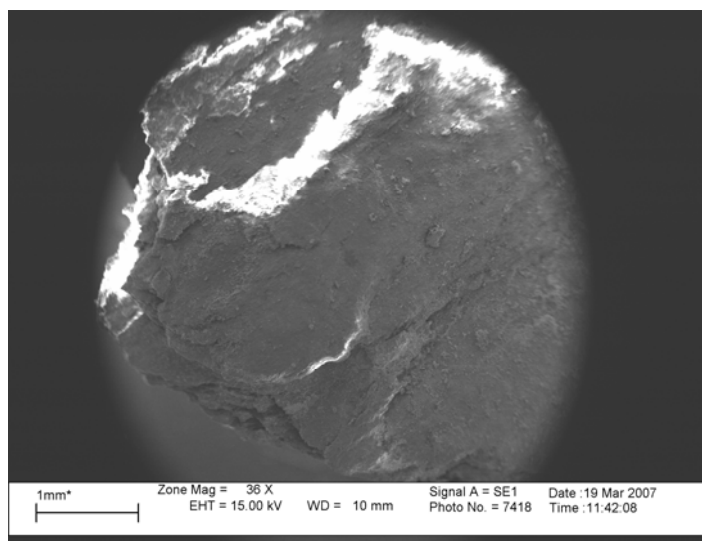


Figura 4.11: Imagem Microscópica da amostra de filito sericítico.

4.3.5. ENSAIOS DE CICLAGEM NATURAL

Este ensaio foi realizado conforme a Norma da CESP: MCA – 14 – Sanidade do Agregado Através da Ciclagem Natural. Para este, a amostra deve constar de aproximadamente 50 fragmentos passando na peneira de 1" e retidos na de ¾".

Este ensaio deve ser realizado em um ambiente aberto, seguro e de acesso restrito, uma vez que é exposto ao ambiente natural e a alteração das amostras está condicionada à variação das características climáticas (agentes intempéricos).

As amostras foram acondicionadas em vasilhas de plástico, furadas na sua parte inferior e estas foram apoiadas em material drenante (brita e areia) de forma a evitar o acúmulo de água pluvial. Estas foram expostas sobre uma laje de concreto sem acesso ao público, garantindo a veracidade dos resultados. A Figura 4.12 apresenta os cuidados adotados para exposição das amostras aos agentes intempéricos.



Figura 4.12: Forma de exposição das amostras na ciclagem natural.

Este ensaio foi realizado apenas com a rocha básica intrusiva, devido à falta de amostra para o filito sercítico e seus procedimentos estão abaixo descritos de forma sucinta.

1. Lavar completamente os fragmentos, secar até constância de peso na temperatura de (100 a 110)°C e anotar este peso como inicial;
2. Expor a amostra às intempéries e mensalmente fazer exames qualitativo e quantitativo, do estado de desagregação da rocha de acordo com o seguinte:

- O exame qualitativo consta de uma verificação visual do estado de desagregação da amostra, anotando o número de partículas afetadas por cada tipo de ataque.
- O exame quantitativo consta de lavagem do material na peneira ¾” e após, pesar conforme item 1, determinar a perda de massa em relação à massa inicial da amostra.

4.3.6. ENSAIOS DE CICLAGEM ARTIFICIAL ÁGUA E ESTUFA

Para realização deste ensaio seguiu-se criteriosamente as prescrições da Norma NBR12696: “Agregados – Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa”.

Inicialmente foram preparadas amostras de ambas as rochas através da quebra manual, conforme apresentado na Figura 4.13 e posteriormente foram selecionados 50 fragmentos de cada amostra passantes na peneira de 76 mm e retidos na peneira de 19 mm. Estas amostras foram armazenadas em uma bandeja de alumínio e submetidas a ciclos alternados de imersão em água (14 ± 1) horas, em temperatura controlada (23 ± 2) °C e secagem em estufa (8 ± 1) horas a (100 ± 5) °C. Posteriormente estas eram resfriadas naturalmente por (60 ± 5) minutos antes do próximo ciclo.

Os exames qualitativos foram realizados a cada 5 ciclos até os primeiros 24 ciclos. A partir de então estes exames foram realizados a cada 12 ciclos.

O exame qualitativo consistiu em examinar visualmente as partículas verificando-se o número de amostras afetadas por lasqueamento, rachadura, fissuração e/ou desintegração.

No exame quantitativo determinou a perda de massa em relação à massa inicial da amostra ensaiada.

Este ensaio foi realizado com amostras de rocha básica intrusiva e filito sericítico, Figura 4.13, com a finalidade de verificar a velocidade dos efeitos da alteração intempérica sobre as amostras de rochas, função de sua mineralogia. As variações de temperatura aceleram as reações químicas e físicas responsáveis pelo intemperismo da rocha e sua conseqüente desagregação.



Figura 4.13: Preparação das amostras para ensaio de ciclagem.

4.3.7. ENSAIOS DE CICLAGEM ACELERADA EM ETILENO-GLICOL

A realização deste ensaio seguiu rigorosamente as prescrições da Norma NBR 12697: “Agregados: Avaliação do Comportamento Mediante Ciclagem Acelerada com Etilenoglicol”.

Nesta a amostra para ensaio deve ser constituída de fragmentos passantes na peneira de 76 mm e retidos na peneira de 19 mm, com massa de (5 ± 2) kg. Na presente pesquisa, entretanto, foram usadas apenas fragmentos entre as peneiras de 25mm e 19mm. Colocou-se o conjunto de amostras em recipientes de vidro. As amostras foram submetidas a ciclos alternados de imersão em Etileno-glicol (48 ± 1) horas, em temperatura controlada (23 ± 2) °C e secagem em estufa até constância de massa, submetendo-as a um resfriamento natural de (60 ± 5) minutos antes do próximo ciclo. Na Figura 4.14, estão apresentadas as amostras utilizadas no respectivo ensaio.

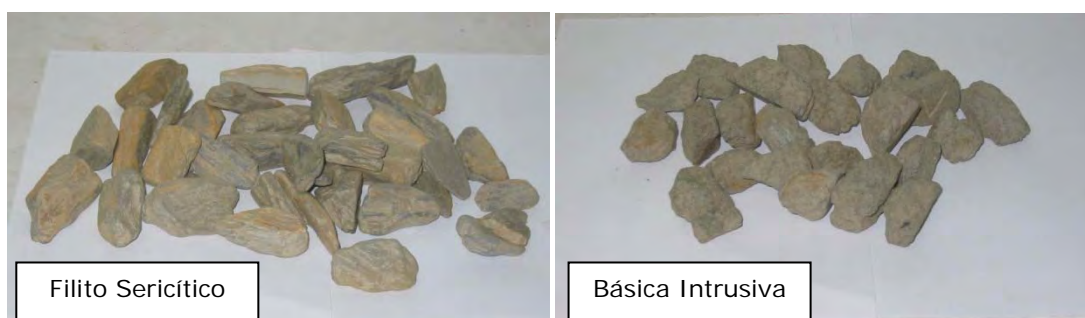


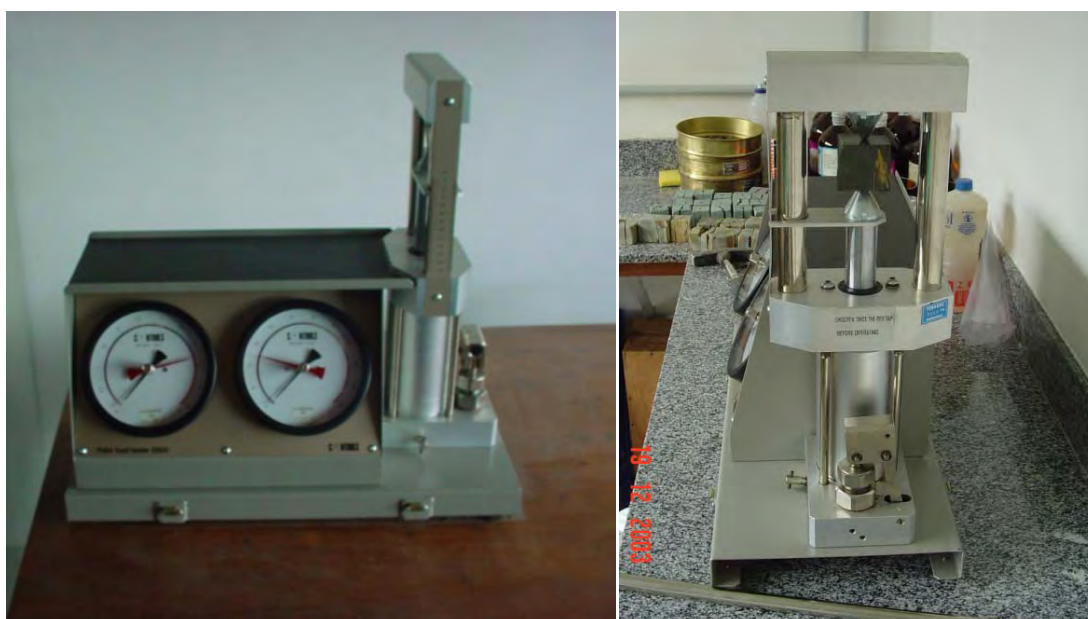
Figura 4.14: Amostras utilizadas no ensaio de ciclagem.

Foram realizados exames qualitativos após a imersão e quantitativos depois de anotada a constância de massa. O exame qualitativo consiste em examinar visualmente as partículas para verificar o número de amostras afetadas por lasqueamento, rachadura, fissuração e/ou desintegração. O exame quantitativo consiste em determinar a perda de massa em relação à massa inicial da amostra de ensaio. Este ensaio apresentou duração de seis ciclos, conforme prescrito pela Norma, sendo que os três primeiros ciclos de imersão têm duração de (48 ± 1) h e os ciclos seguintes têm duração de (72 ± 1) h. Segundo a Norma o ensaio deve ser encerrado quando a intensidade do ataque for tal que, ao final do ciclo, nenhuma partícula fique retida na peneira de 19mm.

Este ensaio foi realizado com a finalidade de identificar amostras com argilominerais em sua composição mineralógica, visto que o etileno glicol é um dos materiais que formam complexos organo-argilosos.

4.3.8. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PUNTIFORME – POINT LOAD TEST

O ensaio de Resistência à Compressão Puntiforme foi realizado de acordo com método proposto pela ISRM - “International Society of Rock Mechanics” (1981) e desenvolvido por Broch e Franklin (1972). Neste ensaio a rocha é carregada pontualmente através de dois cones metálicos. A ruptura é provocada pelo desenvolvimento de fraturas de tração paralelas ao eixo de carregamento. O equipamento é mostrado na Figura 4.15.



a) Vista frontal

b) Vista lateral

Figura 4.15 – Equipamento de compressão puntiforme.

O índice de resistência à carga pontual é padronizado para um diâmetro de 50 mm (IS50). Para a obtenção deste valor é necessário calcular o valor do índice de resistência à carga pontual (IS) e multiplicar por um fator de correção, que é função da relação entre o diâmetro da amostra e o diâmetro padronizado (50 mm).

$$IS_{50} = FC \times IS \quad \text{Equação 3}$$

$$IS = \left(\frac{P}{De^2} \right) \times 10^3 \quad \text{Equação 4}$$

$$FC = \left(\frac{De}{50} \right)^{0,45} \quad \text{Equação 5}$$

$$De^2 = D \times D' \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

FC – Fator de correção;

De – Diâmetro equivalente;

D' – Dimensão medida no instante da ruptura;

P – Carga de Ruptura;

IS, IS50 – Índices de Resistência.

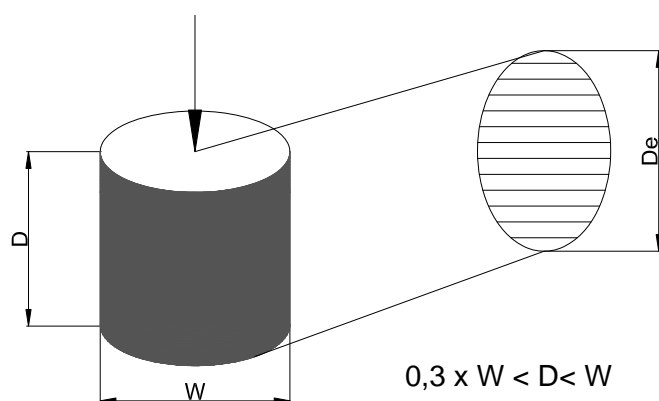


Figura 4.16 – Ilustração das dimensões de um corpo de prova.

Este ensaio foi realizado por se tratar de um ensaio rápido, prático e de fácil manuseio, na tentativa de se obter uma correlação entre a resistência à compressão puntiforme e os índices físicos das rochas estudadas. Para isto as amostras do ensaio de compressão puntiforme eram submetidas ao ensaio de ciclagem água-estufa registrando sua perda de resistência com o avanço da alteração.

4.3.9. Método RI – Relação de Interdependência

Na tentativa de analisar as rochas de maneira comparativa, foi desenvolvido nesta tese, um método denominado “RI – Relação de Interdependência”, que, relaciona a interdependência entre diferentes amostras de rochas.

O objetivo é expressar de forma numérica o quanto o conjunto de índices físicos e mecânicos de uma determinada amostra alteraram em relação à outra, ou seja, mensurar a correlação existente entre índices físicos e mecânicos de amostras de rochas diferentes, para a criação de uma escala que possibilite uma comparação mais fácil e objetiva.

Para obtenção do índice de interdependência λ_2 , é necessário obter a média aritmética dos valores absolutos obtidos pela variação dos índices finais em relação aos índices iniciais do ensaio. Esta relação é denominada Índice de Alterabilidade, λ_1 , e expressa, em porcentagem, o quanto um índice variou em relação ao seu valor inicial. Para o caso de se comparar rochas com diferentes números de amostra, foi estabelecido um fator de multiplicação com a função de correção, quanto à representatividade dos resultados. Quando as rochas ensaiadas possuem o mesmo número de amostras, este fator se resume a unidade.

Para se obter o Índice de Interdependência, λ_2 , deve-se adotar como $\lambda_{máx}$ o maior dos λ_1 encontrados e posteriormente, realizar a relação existente entre os λ_1 para as diferentes amostras de rochas e o $\lambda_{máx}$. Estes cálculos podem ser realizados utilizando as equações 1 e 2, abaixo apresentadas.

$$\lambda_1 = \text{média} (|\Delta\eta_{a1}| \% + |\Delta\alpha_{a1}| \% + |\Delta\rho_{sat1}| \% + |\Delta\rho_{sec1}| \%) \times \frac{n_1}{\text{Media} (\sum_{i=1}^{i=n} n_i)} \quad \text{Equação 1}$$

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_{máx}} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

λ_1 – Índice de alterabilidade;

λ_2 – Índice de Interdependência;

η_a – Porosidade aparente;

α_a – Absorção d’água aparente;

ρ_{sat} – Massa específica aparente saturada;

ρ_{sec} – Massa específica aparente seca;

n – Número de amostras para cada rocha.

Com a realização de trabalhos futuros envolvendo outros litotipos, poder-se-á correlacioná-los com os litotipos estudados nesta pesquisa, e assim por diante, de forma a ampliar o banco de dados, formando futuramente uma escala “definitiva”, onde rochas de alterabilidade conhecida serão classificadas quanto ao RI e funcionarão como referência para rochas de alterabilidade desconhecida. Com esta escala será possível identificar um litotipo quanto à sua alterabilidade apenas calculando o índice λ_1 .

Um exemplo seria se já tivéssemos um banco representativo com “ n ” amostras, de alterabilidade conhecida depois de comparadas entre si através do Índice de Interdependência λ_2 e que, para simplificar, tiraríamos destas “ n ” amostras, cinco tipos de rocha, sendo uma de baixíssima alterabilidade, uma de baixa alterabilidade, uma de média alterabilidade, uma de alta alterabilidade e uma de altíssima alterabilidade, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Exemplo de aplicação do método RI.

Índice	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
λ_1	2%	60%	100%	140%	200%
λ_2	1	30	50	70	100
Classificação	Baixíssima Alterabilidade	Baixa Alterabilidade	Média Alterabilidade	Alta Alterabilidade	Altíssima Alterabilidade

Desta forma, ter-se-á uma correlação entre estas amostras, onde a amostra 1 possui baixíssima alterabilidade, ou seja $\lambda_2 = 1$, quando comparada à amostra 5, que apresentou altíssima alterabilidade, $\lambda_2 = 100$.

Se tivéssemos agora uma amostra em estudo que apresentasse o índice $\lambda_1 = 70\%$, diríamos se tratar de uma amostra de baixa a média alterabilidade.

Quanto maior for o Índice de Alterabilidade, e conseqüentemente o índice de Interdependência, maior vulnerabilidade relativa à alteração intempérica a rocha possui.

Nesta tese, foram utilizados os índices físicos do ensaio de caracterização física e a resistência à compressão puntiforme como índice mecânico, para obtenção dos Índices de Interdependência dos litotipos pesquisados.