

# Capítulo 5 - METODOLOGIA E PROGRAMA DE ENSAIOS

## 5.1. Introdução

Com o objetivo de avaliar o comportamento geomecânico dos enrocamentos das barragens de Marimbondo e de Serra da Mesa, foi estabelecido um programa experimental de ensaios no laboratório, dividido em três fases:

- primeira fase: caracterização petrográfica dos materiais e coleta das amostras de enrocamento;
- segunda fase: produção de amostras de enrocamento de basalto com alteração induzida no laboratório. O material escolhido corresponde ao basalto denso da Pedreira Rio Grande;
- terceira fase: execução dos ensaios de caracterização geomecânica das rochas, das partículas e dos enrocamentos como meio granular.

O programa de ensaios enfatiza os ensaios de avaliação da alterabilidade do enrocamento de basalto. A metodologia utilizada para tal está apresentada na Figura 3.7.

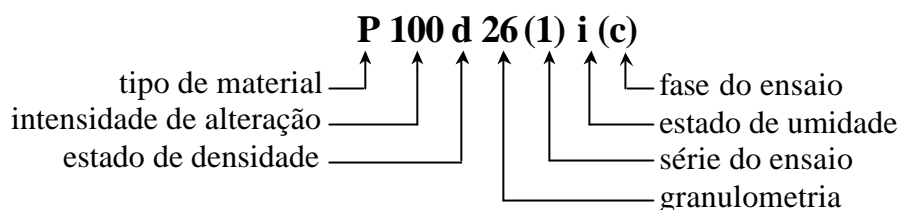
Os ensaios utilizados na caracterização do comportamento geomecânico dos materiais foram:

- ensaios de caracterização das partículas e da rocha de enrocamento: índices físicos (pesos específicos e absorção), carregamento pontual (*point load test*), fraturamento de partículas, desgaste, compressão uniaxial e compressão diametral;
- ensaios de caracterização do maciço de enrocamento: ângulo de talude natural, compressão unidimensional, adensamento isotrópico e compressão triaxial e cisalhamento direto.

Todos os ensaios executados no programa experimental seguiram as recomendações das normas ou referências mencionadas na Tabela 2.5.

## 5.2. Denominação dos ensaios

O programa experimental do presente trabalho utilizou a seguinte convenção de nomenclatura das amostras ensaiadas:



onde:

**tipo de material:** P ... basalto da Pedreira Rio Grande;  
M ... basalto da Barragem de Marimbondo;  
L ... basalto da Pedreira alterado por lixiviação contínua;  
U ... basalto da Pedreira alterado por ciclos de umidade;  
G ... granito da Barragem de Serra da Mesa

**intensidade de alteração:** o valor indicado corresponde ao número de horas de lixiviação contínua ou o número de ciclos de umidade. Só é indicado para os materiais L e U.

**estado de densidade:** d ... corpo de prova densificado (denso);  
f ... corpo de prova vertido (fofo).

**granulometria:** o valor indicado representa o diâmetro médio ( $d_{50}$ ) das partículas.

**série do ensaio:** (1) ... primeira série de ensaios;  
(2) ... segunda série de ensaios;  
(3) ... terceira série de ensaios;  
sem indicação ... só foi executada uma série de ensaios;  
Cada série corresponde ao conjunto de ensaios executados em uma mesma amostra, cada ensaio com nível diferente de tensão vertical.

**estado de umidade:** i ... amostra inundada durante o ensaio;  
u ... amostra saturada por submersão desde o início do ensaio.  
sem indicação ... amostra seca.

**fase do ensaio:** (c) ... carregamento;  
(r) ... recarregamento;  
(i) ... inundação do corpo de prova.

### 5.3. Amostragem

#### 5.3.1. Amostras de enrocamento

As amostras de enrocamento de basalto foram preparadas segundo curvas granulométricas paralelas a do enrocamento no campo (Figura 4.17). Para o enrocamento de granito foi utilizada a curva granulométrica sugerida por Caproni Jr. *et al.* (1999). Esta curva foi obtida através de truncamento, substituindo toda a fração granulométrica com diâmetro superior à peneira de abertura 20,3cm pelo material retido na peneira de abertura 15,5cm.

A Tabela 5.1 e a Figura 5.1 apresentam, respectivamente, as características e as curvas granulométricas consideradas no programa experimental do trabalho. A figura mostra, também, as curvas granulométricas médias dos enrocamentos das barragens de Marimbondo e de Serra da Mesa, obtidas no campo, na fase de construção. Ressalta-se que a curva granulométrica de diâmetro  $d_{50}$  igual a 32mm foi utilizada somente em ensaios de alteração no laboratório.

Tabela 5.1 - Características granulométricas dos enrocamentos modelados no laboratório.

| Identificação da granulometria ( $d_{50}$ em mm) | Diâmetros característicos (mm) |          |          |          |          |          |           | $C_u$ | $C_c$ |
|--|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-------|-------|
|  | $d_{10}$                       | $d_{15}$ | $d_{30}$ | $d_{50}$ | $d_{60}$ | $d_{85}$ | $d_{100}$ |       |       |
| <i>Marimbondo</i>                                | 300,0                          | 346,2    | 477,0    | 652,3    | 714,1    | 797,1    | 821,6     | 1,06  | 2,38  |
| <i>Serra da Mesa</i>                             | 12,6                           | 32,6     | 97,5     | 222,3    | 298,0    | 680,6    | 914,4     | 2,52  | 23,60 |
| 136  | 1,9                            | 10,6     | 60,3     | 136,1    | 157,3    | 186,0    | 203,2     | 11,99 | 81,97 |
| 103  | 42,8                           | 50,6     | 74,0     | 102,8    | 113,8    | 138,8    | 152,4     | 1,12  | 2,66  |
| 32   | 13,5                           | 15,8     | 24,0     | 31,7     | 35,2     | 50,2     | 63,5      | 1,22  | 2,61  |
| 26   | 11,8                           | 13,6     | 18,8     | 25,9     | 28,3     | 34,4     | 38,1      | 1,05  | 2,40  |
| 22   | 0,7                            | 1,6      | 9,5      | 21,7     | 26,1     | 33,6     | 38,1      | 4,81  | 36,01 |
| 16   | 7,7                            | 8,9      | 12,3     | 16,3     | 18,3     | 22,8     | 25,4      | 1,07  | 2,38  |
| 12   | 5,7                            | 6,6      | 9,0      | 12,3     | 13,7     | 17,1     | 19,1      | 1,03  | 2,41  |
| 8  | 3,1                            | 3,8      | 5,8      | 8,1      | 9,1      | 11,4     | 12,7      | 1,21  | 2,98  |

$$C_u: \text{coeficiente de uniformidade}; C_c: \text{coeficiente de curvatura}; C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}}; C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Da Figura 5.1, além do paralelismo das granulometrias adotadas, destaca a presença de finos (partículas com diâmetros menor que 4,76mm) nas granulometrias com diâmetro  $d_{50}$  iguais a 136 e 22 milímetros.

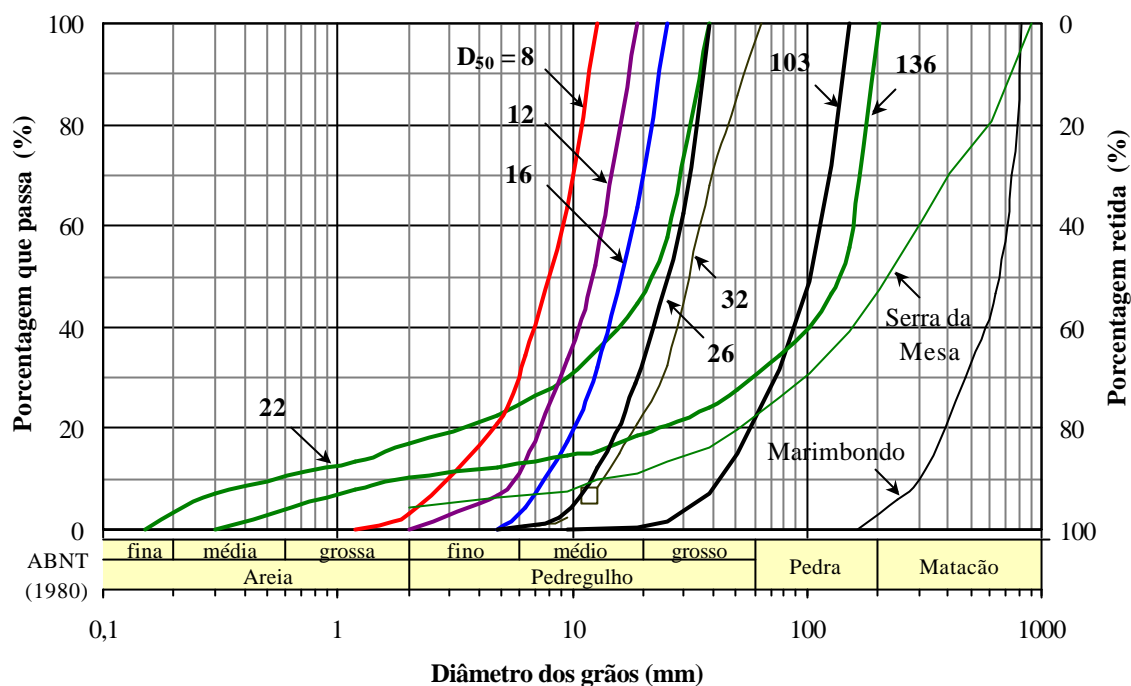


Figura 5.1 - Curvas granulométricas das amostras de enrocamento modeladas no laboratório e dos enrocamentos das barragens.

Assim, através dos resultados dos ensaios nos enrocamentos com as granulometrias consideradas, é possível avaliar os efeitos tanto da dimensão das partículas quanto da presença de finos no enrocamento.

### 5.3.2. Densidade dos corpos de prova de enrocamentos

Considerou-se dois estados de densidade para os enrocamentos estudados. Um, muito denso, com densidade relativa  $D_r > 85\%$ , simulando uma condição de enrocamento densificado, típica de aterros de barragens e estradas. Outro, muito fofo, com  $D_r < 15\%$ , simulando uma condição de enrocamento lançado, típico de ensecadeiras e quebra-mares.

O cálculo da densidade relativa dos enrocamentos foi elaborado através da seguinte expressão (extraído de Lambe e Wittman, 1968):

$$D_r = \frac{g_d \max}{g_d} \times \frac{g_d - g_d \min}{g_d \max - g_d \min} \times 100 \% \quad (5.1)$$

onde  $g_{max}$  e  $g_{min}$  são os pesos específicos secos máximo e mínimo do enrocamento e  $g_i$  é o peso específico do corpo de provas de enrocamento.

Na determinação de  $g_{max}$  e  $g_{min}$  dos enrocamentos com granulometrias correspondentes aos diâmetros  $d_{50}$  de 26, 22, 16, 12 e 8mm, utilizou-se uma câmara cilíndrica com 30cm de diâmetro interno e 20cm de altura. Uma outra câmara, também cilíndrica, com 101,5cm de diâmetro e 100 cm de altura, foi utilizada para os enrocamentos basálticos com granulometria de  $d_{50}$  igual a 103mm. Para o enrocamento granítico, com esta mesma granulometria, usou-se uma caixa quadrada com 1m de lado e 1,2m de altura. A Tabela 5.2 apresenta os pesos específicos secos máximos  $g_{max}$  e mínimos  $g_{min}$  na determinação das densidades relativas dos enrocamentos ensaiados.

Tabela 5.2 - Pesos específicos secos e índices de vazios máximos e mínimos dos enrocamentos.

| Material |                  |                     | Granulometria<br>( $d_{50}$ em mm) | $g_{max}$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | $g_{min}$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | $e_{min}$ | $e_{max}$ |
|----------|------------------|---------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|
| Tipo     | Origem           | Alteração           |                                    |                                  |                                  |           |           |
| Basalto  | Marimbondo       | Campo<br>(25 anos)  | 103                                | 18,32                            | 15,21                            | 0,53      | 0,84      |
|          |                  |                     | 26                                 | 18,12                            | 14,53                            | 0,52      | 0,90      |
|          |                  |                     | 12                                 | 17,32                            | 13,62                            | 0,58      | 1,01      |
|          | Pedreira         | Intacto<br>(0 anos) | 103                                | 18,54                            | 15,16                            | 0,54      | 0,89      |
|          |                  |                     | 26                                 | 18,71                            | 14,83                            | 0,25      | 0,51      |
|          |                  |                     | 22                                 | 22,30                            | 18,50                            | 0,50      | 0,90      |
|          |                  |                     | 16                                 | 18,13                            | 14,94                            | 0,55      | 0,88      |
|          |                  |                     | 12                                 | 17,83                            | 14,05                            | 0,57      | 0,99      |
|          |                  |                     | 8                                  | 18,01                            | 13,90                            | 0,55      | 1,00      |
|          |                  |                     | 136                                | 20,75 (*)                        | -                                | 0,24 (*)  |           |
| Granito  | Serra da<br>Mesa | São                 | 103                                | 16,44                            | 14,69                            | 0,60      | 0,79      |
|          |                  |                     | 26                                 | 17,25                            | 13,98                            | 0,50      | 0,85      |
|          |                  |                     | 22                                 | 20,73                            | 17,48                            | 0,23      | 0,47      |

(\*) valor médio obtido durante a construção do aterro (Caproni Jr. e Armelin,1998), considerado como valor máximo no presente trabalho.

Na determinação do  $g_{min}$ , o material foi depositado dentro da câmara com altura de queda máxima de 10cm, para a granulometria de  $d_{50} = 103\text{mm}$ . Nas outras granulometrias, a altura de queda foi de 2cm.

Na determinação do  $g_{max}$ , o procedimento adotado foi o seguinte:

- na câmara cilíndrica com 30cm de diâmetro, o material foi densificado em três camadas. Para a densificação de cada camada fez-se, inicialmente, o ajuste manual das partículas,

em busca do arranjo mais denso. Posteriormente, adicionou-se um peso cilíndrico (490,0N) sobre a amostra. Por meio de uma mesa vibratória, a amostra foi densificada por um período de 10 minutos. O estado de densidade máxima foi considerado satisfatório quando, após dois estágios de vibração consecutivos, a altura da amostra se manteve constante.

- na câmara cilíndrica com 101,5cm de diâmetro, o material foi densificado em cinco camadas. Para a densificação de cada camada procedeu-se, também, ao ajuste manual das partículas. A densificação se deu através de um compactador especialmente projetado para esta câmara (Figura 5.2). Cada camada foi compactada em períodos de 10 minutos, até ocorrer constância de altura da amostra.
- na câmara prismática de 100cm de aresta, o procedimento adotado foi o mesmo para a câmara cilíndrica com 101,5cm de diâmetro. A densificação foi realizada através de um compactador manual elétrico, do tipo martetele. Na extremidade deste compactador adaptou-se uma placa circular de 15cm de diâmetro, a fim de minimizar a quebra das partículas. Após a densificação de cada camada, aplicou-se uma tensão vertical de  $980\text{kN/m}^2$ , o que foi mantido até estabilização das deformações da amostra.



Figura 5.2 - Compactador para a câmara com 101,5cm de diâmetro.

Os valores de  $g_{max}$  ou  $g_{min}$  não mostram variações significativas nos enrocamentos com granulometrias com  $d_{50}$  iguais a 103 e 26mm.

Foram feitas, também, determinações de  $g_{max}$  e  $g_{min}$  utilizando uma câmara cilíndrica com 22cm de diâmetro e 50cm de altura (Tabela 5.3). Tal câmara, que é apresentada no item 5.6.3.2, é utilizada na moldagem de corpos de prova para ensaios de compressão triaxial nos enrocamentos. O procedimento utilizado para determinação de  $g_{min}$  é o mesmo que o anteriormente descrito. Na terminação de  $g_{max}$ , o corpo de prova foi moldado em 5 camadas. Cada camada foi densificada através de 60 golpes de um soquete, cuja energia de compactação é de  $245\text{Ncm/cm}^3$ , que corresponde a mesma energia de compactação no ensaio de Proctor Normal. Observa-se dos valores de  $g_{max}$  e  $g_{min}$ , determinados nesta câmara, uma significativa diferença dos valores apresentados na Tabela 5.2. Deste modo, na determinação das densidades relativas dos corpos de prova dos ensaios triaxiais, serão utilizados os valores de  $g_{max}$  e  $g_{min}$  apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 -  $g_{max}$ ,  $g_{min}$ ,  $e_{min}$  e  $e_{max}$  para as granulometrias com  $d_{50}$  igual a 26mm, determinados em câmara de 22cm de diâmetro e 50cm de altura.

| Material |                  |                     | $g_{max}$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | $g_{min}$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | $e_{min}$ | $e_{max}$ |
|----------|------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|
| Tipo     | Origem           | Alteração           |                                  |                                  |           |           |
| Basalto  | Marimbondo       | Campo<br>(25 anos)  | 20,6                             | 16,5                             | 0,37      | 0,66      |
|          | Pedreira         | Intacto<br>(0 anos) | 20,8                             | 16,5                             | 0,35      | 0,70      |
| Granito  | Serra da<br>Mesa | São                 | 20,5                             | 15,5                             | 0,24      | 0,64      |

### 5.3.3. Extração de testemunhos das rochas basálticas

Visando a caracterização mecânica da rocha intacta e alterada no campo, foram extraídos testemunhos do basalto da Pedreira Rio Grande e do basalto de Marimbondo, respectivamente. Outro objetivo da extração testemunhos foi a produção de corpos de prova para os ensaios de alteração no laboratório.

Os testemunhos foram extraídos através da perfuração de blocos da rocha, provenientes da Pedreira e de Marimbondo (Figura 5.3). Ressalta-se que tais blocos foram selecionados no campo segundo características que facilitassem o processo de extração, como por exemplo, forma prismática, dimensão mínima de 40cm e ausência de fissuras visíveis. Os blocos foram concretados em moldes cúbicos para evitar sua movimentação durante a perfuração mecânica do processo de extração. Mesmo assim, grande quantidade de testemunhos do basalto de Marimbondo foi danificada durante o processo, principalmente

devido à presença de fissuras que não são detectadas a olho nu. Verificou-se posteriormente que os testemunhos do basalto da Pedreira também apresentavam fissuras, no entanto, não ocorreu a abertura devido ao processo de extração ou de moldagem dos corpos de prova.



(a) bloco da Pedreira (b) bloco da Barragem

Figura 5.3 - Extração de testemunhos dos blocos de basalto.

## 5.4. Alteração de amostras de basalto no laboratório

A produção de amostras de basalto, com alteração induzida no laboratório, foi feita através de dois métodos: por ciclos de umidade e por lixiviação contínua. Foram alterados testemunhos da rocha e amostras do enrocamento.

As amostras de enrocamento, destinadas aos ensaios de alteração, foram modeladas segundo a curva granulométrica de  $d_{50} = 32\text{mm}$ , com peso total de 590N ( $\cong 60\text{kg}$ ). De cada amostra, uma parte foi destinada aos ensaios de caracterização geomecânica do enrocamento ( $\cong 390\text{N}$ ), cuja granulometria adotada nos ensaios foi a correspondente à curva de  $d_{50} = 26\text{mm}$  (Figura 5.1). O restante foi empregado nos ensaios de caracterização da rocha, tais como desgaste, fraturamento de partícula e carregamento pontual.

### 5.4.1. Ciclos de umidade

Os ciclos de umidade foram executados através da submersão das amostras em água destilada, à temperatura ambiente ( $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), com posterior secagem em estufa com temperatura de  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A definição da temperatura de secagem foi baseada na temperatura máxima que a rocha pode atingir durante a exposição diária ao sol no campo. Os tempos de submersão e de



secagem foram determinados experimentalmente através das curvas de variação do peso da rocha (Figura 5.4). Constata-se que períodos de 10 horas de submersão ou de secagem garantem, respectivamente, o umedecimento ou secagem satisfatórios do basalto.

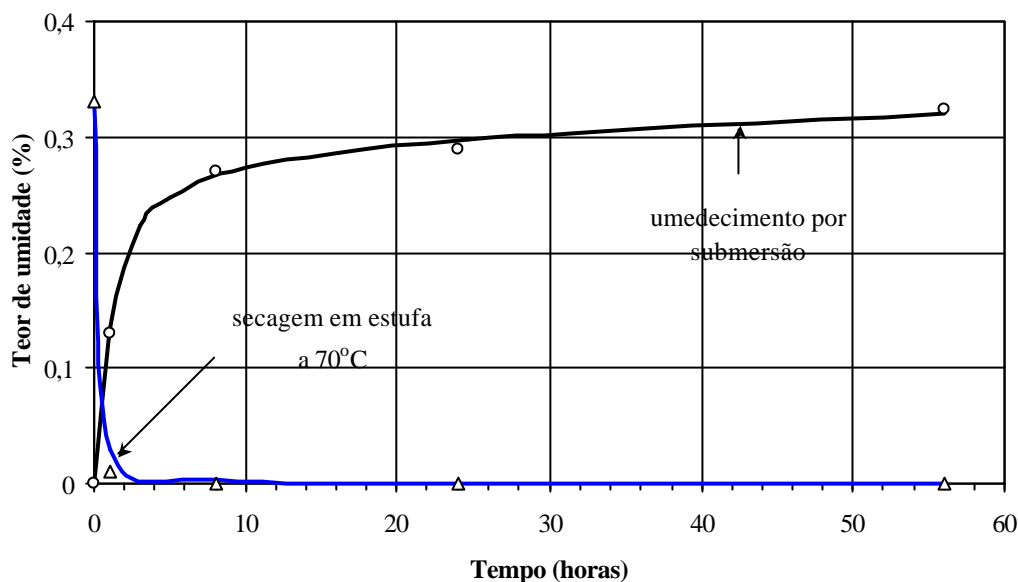


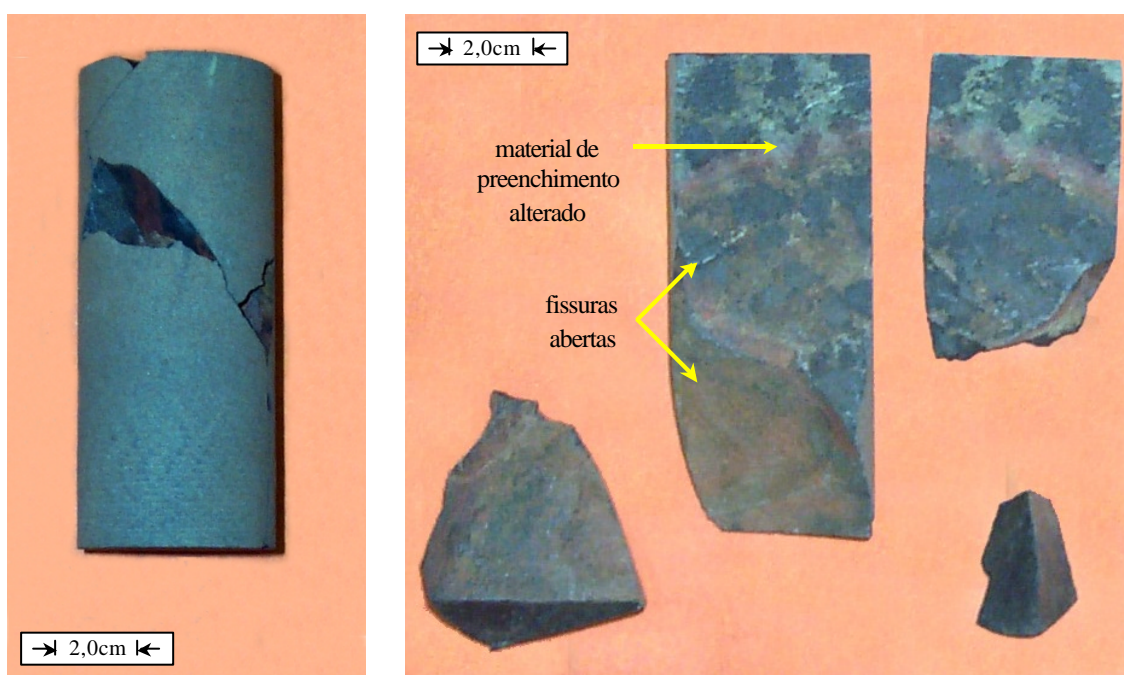
Figura 5.4 - Variação do teor de umidade com o tempo nos ensaios de umedecimento e de secagem.

#### 5.4.2. Lixiviação contínua dos testemunhos da rocha

Testemunhos de basalto foram alterados no laboratório com diferentes intensidades de lixiviação contínua, correspondentes a 300, 750, 1500 e 3200 horas de funcionamento do equipamento soxhlet convencional (Figura 3.8). Cada série de lixiviação contínua foi composta por nove testemunhos, sendo 3 destinados a ensaios de compressão uniaxial, e seis a ensaios de compressão diametral.

Verifica-se que a alteração provocada pela lixiviação gera a abertura de fissuras preexistentes da rocha. Tal abertura é ilustrada pelo corpo de prova com 3200 horas de lixiviação na Figura 5.5. A Figura 5.5a mostra o corpo de prova na forma em que se encontra quando retirado do equipamento soxhlet após a lixiviação. A Figura 5.5b apresenta a fragmentação do corpo de prova após a secagem. Observa-se que, neste corpo de prova, as fissuras existentes foram totalmente abertas, provocando sua fragmentação. Nota-se que ocorreu a alteração do material de preenchimento da fissura. Vale destacar que este

comportamento também foi observado nos corpos de prova com ciclos de umidade, no entanto, neste caso não se observa a alteração do material de preenchimento das fissuras.



(a) quando sai do equipamento

(b) após secagem na estufa (fragmentado)

Figura 5.5 - Testemunho fragmentado durante o processo de lixiviação contínua.

### 5.4.3. Lixiviação contínua de amostras de enrocamento

A fim de permitir a lixiviação contínua de amostras de enrocamento, foi desenvolvido no presente trabalho no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, um equipamento soxhlet de grandes dimensões (Figuras 5.6. e 5.7). Foram alteradas cinco amostras de enrocamento de basalto da Pedreira, com diferentes intensidades de lixiviação, correspondente às séries de 100, 240, 600, 1500 e 3200 horas de funcionamento contínuo do equipamento.