

Uso do Ensaios de Desgaste para o Estudo da Perda de Massa da Rocha Basáltica do Enrocamento da Usina Hidrelétrica de Marimbondo

Costa, Kelly de Oliveira Borges da, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil, kelly@uenf.br

Maia, Paulo César de Almeida; Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil, maia@uenf.br

Xavier, Gustavo de Castro; Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil, gxavier@uenf.br

RESUMO: Os principais campos de aplicação dos enrocamentos são as barragens, as obras portuárias, as vias de comunicação e os aeroportos. Dentre estes, destaca-se a construção das grandes barragens, com o emprego cada vez maior de rochas alteradas e fissuradas, susceptíveis às variações de resistência e deformabilidade. A grande quantidade de material aplicado na barragem, associado ao volume de escavações previsto em projeto, obriga o emprego de rochas menos resistentes e susceptíveis a alteração, disponíveis na região de implantação das barragens. Neste sentido, este trabalho apresenta um estudo sobre a degradação da rocha basáltica utilizada como enrocamento de proteção da Barragem de Marimbondo, Brasil, com 40 anos de exposição a agentes intempéricos, através dos resultados dos ensaios Micro-Deval (MD) e *slake durability* (SD). Os resultados indicam a variação de massa e a perda de resistência do material devido a degradação no campo.

PALAVRAS-CHAVE: Enrocamento de basalto, Barragem de Marimbondo, Ensaio micro-Deval, Slake durability test, Degradação de rocha.

1 INTRODUÇÃO

As rochas são materiais de construção cujo uso é primordial na engenharia desde os tempos remotos, sendo aplicadas em alvenarias, revestimentos, obras portuárias, pavimentos, aeroportos, entre outros.

Os enrocamentos destacaram-se na construção de grandes barragens, nos últimos anos, devido ao seu potencial de utilização e ao desenvolvimento de técnicas de extração, transporte, beneficiamento, densificação e ensaios, garantindo a qualidade dos materiais e o conhecimento sobre a durabilidade e a aplicabilidade nas obras de engenharia.

As características físicas e químicas dos enrocamentos possuem estreita relação com a

origem geológica e mineralógica da rocha que os originou e deve ser observada para complementar a avaliação do uso adequado dos materiais rochosos.

A escolha de um material para uma aplicação particular, não deve ser definida sem o conhecimento dos seus parâmetros geotécnicos e das condições às quais o material estará submetido. Para tal, as propriedades são conhecidas por meio de análise, ensaios e estudos. Uma limitação presente no estudo dos enrocamentos é a dificuldade e restrição prática de representar o maciço rochoso em escala real.

A maior ou menor susceptibilidade da rocha à alteração é definida pela alterabilidade do material. A alterabilidade depende,

principalmente, da estabilidade química dos minerais constituintes da rocha. Os primeiros minerais a se formarem no magma são os menos estáveis nas condições de alteração da superfície terrestre, os últimos minerais a se formarem no magma são os mais estáveis nas condições vigentes da superfície do globo terrestre.

Segundo Maia (2001) a análise da alteração e da alterabilidade das rochas e seus efeitos nas propriedades geotécnicas são de extrema relevância na possível previsão do comportamento de materiais rochosos, seja na forma de maciço, seja na forma granular.

O tempo de exposição ao meio exógeno, a litologia da rocha, a presença de fissuras e o clima são fatores que influenciam a susceptibilidade e taxa do intemperismo físico e químico em rochas, que ocorre de modo gradativo.

Neste sentido, a caracterização da degradação do enrocamento torna-se adequada para definir o seu comportamento ao longo da vida útil das obras aos quais são aplicados, conhecendo as características de alteração e alterabilidade.

Considerando a aplicação do enrocamento em grandes obras, e em especial, o envelhecimento da Barragem de Marimbondo, que completa 40 anos de utilização, este trabalho objetiva apresentar os resultados dos ensaio de degradação Micro-Deval e *slake durability test*, também conhecido como ensaio de durabilidade.

2 ÁREA E MATERIAL DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica de Marimbondo, construída por Furnas Centrais Elétricas S.A. na década de 70, opera com uma potência instalada de 1.440.000kW e está localizada no Rio Grande na divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, Brasil (Figura1), numa região de clima tropical, com períodos de chuvas entre os meses de outubro a março, e seca entre os meses de abril a setembro, com temperatura média nos meses quentes variando de 28°C a 30°C.

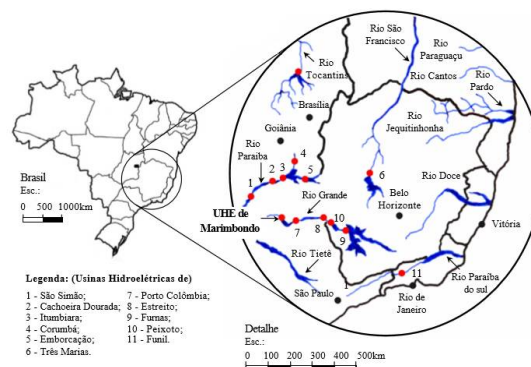


Figura 1. Localização da UHE de Marimbondo

A Barragem de Marimbondo, tem uma seção homogênea em argila e enrocamento em basalto, com altura máxima de 94,00m, uma largura de 10,00m no coroamento e um comprimento aproximado de 3.100,00m, que se compõe de duas barragens de terra localizadas nas ombreiras e uma estrutura de concreto na parte central (Figura 2).



Figura 2 . Barragem de Marimbondo

A crista da barragem da ombreira direita possui cerca de 800m de comprimento, e da esquerda aproximadamente 2300m de comprimento. A estrutura de concreto se constitui de um muro de peso fazendo a transição com a barragem direita, uma tomada d'água, um vertedouro e outro muro de peso, fazendo a transição com a barragem esquerda. Em períodos de cheia pode atingir um volume total de 14.400.000m³ de água.

O basalto denso e um basalto vesicular foram usados no enrocamento de proteção,

lançado sobre os taludes juntamente com a construção do corpo do aterro. Esse material corresponde a rocha escavada das fundações das estruturas principais de concreto.

Para o presente estudo foram retiradas amostras de basalto denso dos taludes de montante da barragem, evitando-se material com trincas e fissuras, mostrado na Figura 3.



Figura 3 – Enrocamento em basalto com fissuras

São usados ainda resultados da pesquisa de Maia (2001), que estudou a alterabilidade do enrocamento com 25 anos de exposição no campo e o basalto intacto da Pedreira Rio Grande, similar ao usado no enrocamento. Maia (2001) observou que os blocos apresentavam desintegração, devido a alteração do material de preenchimento das fissuras das rochas escavadas, e às variações térmicas diárias, que geram concentrações de tensões nas fissuras e provocam a separação dos blocos.

2.1 Programa Experimental

Para o presente estudo foram retiradas amostras dos taludes de montante da barragem, na faixa de oscilação do nível da água do reservatório (Figura 4), com escolha visual das partículas.

As partículas coletadas foram submetidas à análise petrográfica, executada segundo as diretrizes da NBR 15845-1 (ABNT, 2015).



Figura 4 – Local da coleta das amostras de basalto

Através do exame macroscópico da amostra *in natura*, e do exame microscópico das lâminas delgadas, que consiste na descrição dos minerais e suas inter-relações (ou arranjo textural), com a observação do estado microfissural e grau de alteração das rochas e de seus constituintes minerais, além da classificação formal da rocha.

O basalto é proveniente de derrame de lava do mesozóico médio ou superior, apresenta massa cristalina, granulação muito fina, textura holocristalina capa de alteração proveniente da decomposição dos minerais do basalto denso. A maioria dos minerais de plagioclásio encontram-se limpos com pouca sericitização e ou saussuritização, no entanto um material amorfo de cor ocre é bastante presente e deve ser produto da alteração dos clinopiroxênios e também dos minerais opacos como a magnetita.

A caracterização mineralógica é um importante aliado na identificação de argilo-minerais ou quaisquer outras substâncias que venham a causar expansão ou retração da rocha.

Na Tabela 1, é apresentada a composição do basalto usado no talude de proteção da barragem.

Tabela 1- Composição do basalto da Barragem

Composição Mineralógica	Cor da Rocha
Plagioclásio: 40-50%	Sã: cinza escuro
Clinopiroxênio: 25-30%	Alterada: bege
Opacos: 25-30%	

Na Figura 5 é mostrada a fotomicrografia do basalto.

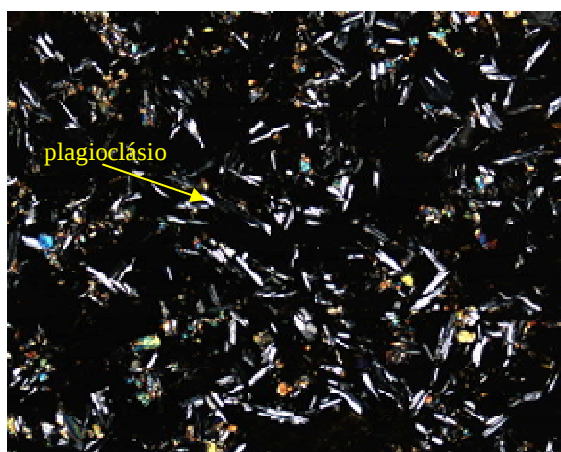


Figura 5 – Fotomicrografia do basalto

Foram realizados dois ensaios distintos, o SD e o MD, freqüentemente utilizado na determinação da durabilidade de rochas brandas, normatizado pela ASMT D4644-08. O ensaio SD, consiste em submeter dez fragmentos de rocha, cada um pesando entre 40 e 60g, a ciclos normalizados de secagem e umidificação, de dez minutos cada um. Os fragmentos são colocados dentro de redes metálicas cilíndricas com 2 mm de abertura, parcialmente imersos na água (Figura 6), girando a uma velocidade de 20 rpm, em torno de um eixo horizontal. O choque dos fragmentos de rocha entre si e o contato com a água favorecem a sua desagregação e alteração. A secagem dos fragmentos é realizada em estufas. Após esse processo, pode-se seguir outra umidificação e ação mecânica.

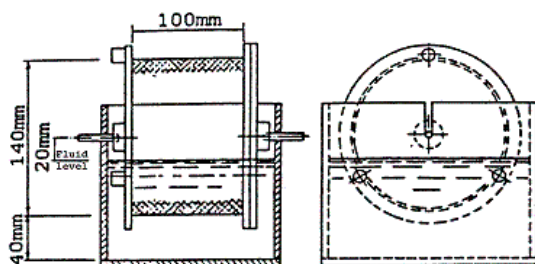


Figura 6 – Desenho esquemático do equipamento para ensaio de durabilidade

No SD a avaliação do desgaste é feita através da perda de massa observada em cada

ciclo do ensaio. Considera-se material perdido aquele que passa pela malha do cilindro metálico. Nesta pesquisa foram considerados cinco ciclos de ensaios.

O índice de durabilidade (Id_x) corresponde à percentagem de massa perdida entre cada ciclo, sendo determinado através da relação entre a massa inicial e final do ensaio até o quinto ciclo, obtido pela Equação 01.

$$Id_x = \frac{m_{inic} - m_{fciclo}}{m_{fciclo}} \times 100 \quad (1)$$

Onde, m_{inic} é massa em gramas, da amostra seca antes do ciclo; m_{fciclo} é massa em gramas, da amostra seca ao final do ciclo.

A durabilidade do material é classificada de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2- Classificação da durabilidade (Maia 2001)

Classificação da durabilidade	Perda de massa (%)		
	Rochas brandas		Rochas duras
	1º ciclo	2ciclo	5ºciclo
Muito Alta	<1	<2	<5
Alta	1-2	2-5	5-15
Medianamente Alta	2-5	5-15	15-40
Média	5-15	15-40	40-70
Baixa	15-40	40-70	70-80
Muito Baixa	>40	>70	>80

Foi realizado o ensaio MD, que avalia a durabilidade e a resistência à abrasão dos materiais através do contato entre as amostras e pequenas esferas de aço, na presença de água. O ensaio seguiu as prescrições da Norma UNE – EN 1097-1, com um total de quatro amostras, nas granulometias entre 4 mm e 8 mm.

Neste ensaio, 500 g de material saturado é submetido a fricção com 5000 g de carga abrasiva, constituída por esferas de aço com diâmetro cerca de 10 mm, e 2,5 litros de água, no interior de um cilindro com tampo estanque.

Os cilindros são colocados sobre dois suportes que os fazem rodar a cerca de 100 rotações por minuto, num total de 120

minutos.

Também aqui se considera desgastado o material que no fim passa na peneira 1,6 mm. Sendo o coeficiente Micro-Deval (M_{DE}) correspondente à percentagem da amostra inicial reduzida a uma dimensão inferior a 1,6 mm depois da conclusão do ensaio, obtido pela Equação 2.

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5} \quad (2)$$

Onde, m é a massa da amostra retida na peneira 1,6mm, em gramas.

Finalmente, os resultados destes ensaios serão somados aos estudos de Maia (2001), que avalia o basalto de Marimbondo na condição itacta e com 25 anos de degradação no campo, permitindo acrescentar mais um ponto na curva de degradação natural do material, para uso em estudos futuros.

2.2 Equipamento

O equipamento utilizado neste trabalho apresentado na Figura 7, foi desenvolvido e na UENF, e permite a elaboração do ensaio SD e o MD, com a modificação dos respectivos cilindros, rotações e carga abrasiva.

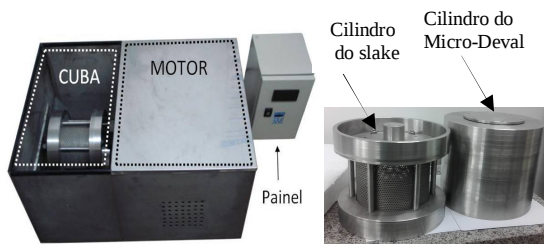


Figura 7 - Equipamento para ensaio de durabilidade e Micro-Deval

O equipamento possui uma cuba que contém um suporte para o cilindro de ensaio, com eixo horizontal que permite uma livre rotação, sendo capaz de ser preenchido com um fluido, no caso do ensaio SD. Uma unidade motriz é acoplada a cuba, sendo capaz de rotacionar o cilindro a uma velocidade constante controlada por um painel, Fraga (2011).

3 RESULTADOS E ANÁLISES

A diferença fundamental entre o ensaio SD e o MD está na energia de desgaste e o tempo de rotação. A quantificação dessa energia não é tão simples, pois envolve a velocidade da rotação, a presença da carga abrasiva e o tempo. Tais diferenças serão observadas a seguir na comparação entre a perda de massa gerada pelos dois ensaios.

O ensaio de durabilidade embora recomendado para rochas brandas, pode ser usado em rochas duras ou degradadas, possibilitando avaliar a perda de massa superficial devido ao desgaste.

3.1 Slake Durability test

Os resultados obtidos geram informações sobre o efeito da degradação do material em longo prazo. Foram realizados dois ensaios com o material exposto no campo durante 40 anos, cujos resultados são apresentados na Figura 8.

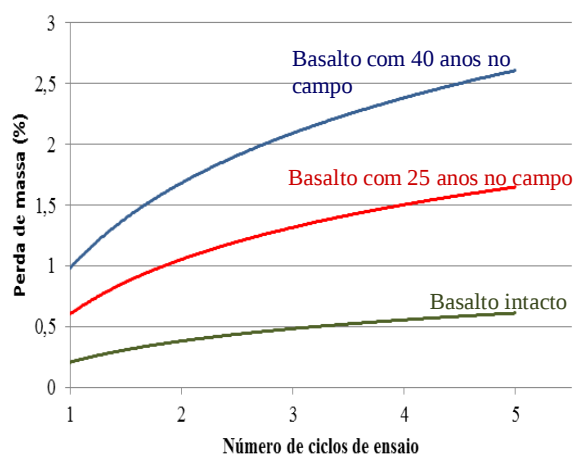


Figura 8 – Perda de massa do basalto em 5 ciclos de ensaio SD.

Os resultados permitem calcular o índice de alteração da rocha, citado por Farjallat, (1972), Maia, (2001), Salles (2006). O índice de alteração faz uma comparação entre a característica do material no estado inicial de utilização, intacto, e a mesma característica no estado alterado.

Desta forma, define-se o índice de alteração (I), pela Equação 3.

$$I = \frac{P_{alt} - P_{int}}{P_{alt}} \times 100 \quad (3)$$

Onde, p_{int} corresponde à perda de massa do material intacto, e p_{alt} , corresponde à perda de massa do material alterado, com 57 anos de exposição no campo.

O valor do índice I varia de zero, para o material intacto, até um valor máximo, sempre menor que 100%, para o material mais alterado.

Aplicando a Equação 3 para os valores do material intacto e com 40 anos de degradação, no quinto ciclo de ensaio, é determinado o Índice de alteração de 7%.

Observa-se nas curvas obtidas por Maia (2001) e nesse trabalho, o aumento da perda de massa da rocha com o período de exposição da amostra em campo, e com o número de ciclos realizados no ensaio.

A perda de massa observada é função da capa de alteração presente nos blocos de rocha que sofre quebra durante o ensaio.

Seguindo a classificação de durabilidade apresentada na Tabela 2, pode-se classificar a durabilidade do basalto de proteção da barragem de Marimondo como muito alta.

3.2 Micro-Deval

Entre os ensaios de desgaste, o MD é o mais agressivo, gerando uma perda de massa maior e desgaste mais profundo, além da quebra da partícula.

Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 3, o coeficiente médio M_{DE} obtido foi de 19,6%.

Tabela 3- Resultado do ensaio MD para o basalto com 40 anos de degradação.

Amostra	m (g)	M_{DE} (%)
1	407,6	18,5
2	399,2	20,2
3	399,6	20,1
4	401,3	19,7
valor médio		19,6

Observa-se na Figura 9, onde são

apresentados os resultados obtidos por Maia (2001), que o material alterado sofreu uma perda de massa considerável nos primeiros 25 anos de degradação no campo, e apresenta uma tendência a estabilizar a perda entre os quinze anos seguintes.

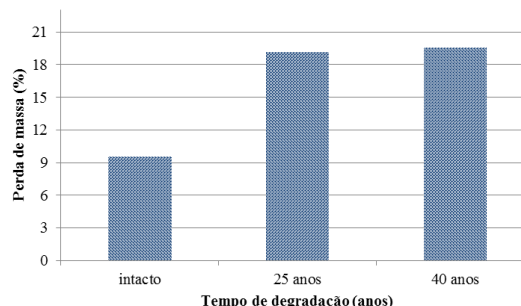


Figura 9 – Perda de massa do basalto com o ensaio MD ao longo do período de exposição no campo.

Para o ensaio MD, o índice de alteração entre o material intacto e com 40 anos de exposição corresponde a 53%.

Comparando o índice de alteração obtido no ensaio SD de 77% e o índice obtido no ensaio MD de 53%, observa-se que a perda de massa foi mais evidente no SD, isto porque o efeito do intemperismo é sentido na rocha da face externa para o interior da amostra, e a velocidade das rotações e o tempo é menor no SD quando comparado ao MD, ocasionando um desgaste na superfície da amostra. O ensaio MD é realizado com maiores rotações e tempo, e com a presença de carga abrasiva no cilindro, ocasionando a quebra das partículas e um desgaste intenso da rocha.

Na Figura 10 apresenta-se uma amostra de basalto partida, sendo possível a identificação visual da capa de material alterado e o interior da rocha sem alteração na coloração cinza escuro.



Figura 10- Basalto com capa de alteração

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho vem contrubuir na geração de dados e resultados a respeito da caracterização da durabilidade e degradação do enrocamento de proteção da barragem de Marimbondo.

As amostras estudadas foram retiradas da face de montante dos taludes, onde há maior exposição a oscilação no nível do reservatório, possibilitando a ciclagem contínua da rocha, variação da umidade e carreamento pelas ondas dos finos gerados por desagregação das partículas.

A metodologia dos ensaios seguiu as normas citadas anteriormente, sendo aplicável genericamente as rochas alteradas.

A perda de massa no ensaio de durabilidade é um indicador do processo de alteração do basalto.

O aumento do desgaste em relação ao tempo, indica a diminuição da resistência superficial das partículas e afeta diretamente o imbricamento das rochas, gerando deformações e afetando a resistência do enrocamento. A alteração superficial dos minerais do enrocamento provoca a desagregação, diminuindo a dimensão dos blocos e provocando um rearranjo na estrutura.

De modo geral, os resultados obtidos nos ensaios de desgaste são bons indicadores da alteração da rocha constituinte do enrocamento, que apresentam contínua perda de massa com o tempo. Os resultados deste trabalho associados a Maia (2001) permitem a plotagem de curvas de degradação em relação ao período de exposição do material no campo e dispõem de dados para a previsão do comportamento do enrocamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Furnas Centrais Elétricas S.A., pelo fornecimento das amostras, ao Bolsista Brunner Rabello Frazão Corrêa pelo trabalho durante a coleta, ao Geólogo Márcio José Remédio (CPRM), pela análise petrográfica e o apoio financeiro e logístico proporcionado pela UENF.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnica (2015). *Rochas para revestimento Parte 1: Análise petrográfica*. ABNT - NBR 15845 -1.
- ASTM – American Society for Testing Materials(2008) . Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks. Test Designation D 4644/08.
- EN- Europäische Norm (2011). Ensayos para determinar las propiedades macánicas y físicas de los áridos. Parte1- Determinacion de la resistencia al desgaste (Micro-Deval), Test designation: EN 1097-1
- Farjallat, J. E. S. (1972). *Relato sobre o Tema: Desagregabilidade de Rochas e Problemas Relativos à sua Aplicabilidade*. 4ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, São Paulo, vol. II A, pp. 19-53.
- Fraga F. A. Et all (2011) *Avaliações dos Procedimentos Não-Convencionais, Micro Deval e Slake-Durability, de Degradação em Materiais Cerâmicos*. 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica.
- Maia P. C. A (2001) - *Avaliação Do Comportamento Geomecânico e De Alterabilidade De Enrocamentos*. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica.
- Salles, R. O. Maia, P. C. A.(2006); *Estudo Experimental da Durabilidade de Rochas Ornamentais Através de Procedimentos Especiais de Laboratório*. In: Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica, 13, Curitiba/PR.