

**CARACTERIZAÇÃO DA DEGRADAÇÃO NATURAL DOS ENROCAMENTOS DE
PROTEÇÃO DE BARRAGENS**

KELLY DE OLIVEIRA BORGES DA COSTA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
SETEMBRO – 2016

**CARACTERIZAÇÃO DA DEGRADAÇÃO NATURAL DOS ENROCAMENTOS DE
PROTEÇÃO DE BARRAGENS**

KELLY DE OLIVEIRA BORGES DA COSTA

Dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Gustavo de Castro Xavier
Coorientador: Prof. Paulo César de Almeida Maia

Laboratório de Engenharia Civil
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO – 2016

**CARACTERIZAÇÃO DA DEGRADAÇÃO NATURAL DOS ENROCAMENTOS DE
PROTEÇÃO DE BARRAGENS**

KELLY DE OLIVEIRA BORGES DA COSTA

Dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 27 de Setembro de 2016

Comissão examinadora:

Prof. Milton Assis Kanji (D.Sc., Geociências) - USP

Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira (D.Sc., Ciências dos Materiais) - UENF

Prof. Aldo Durand Farfán (D.Sc., Geotecnia) - UENF

Prof. Gustavo de Castro Xavier (Orientador, D.Sc., Geotecnia) - UENF

Prof. Paulo César de Almeida Maia (Coorientador, D.Sc., Geotecnia) - UENF

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
SETEMBRO - 2016

DEDICATÓRIA

Aos meus pais:
Elzy de Oliveira e Janildo Borges

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas graças e oportunidades alcançadas, por me conceder a fé e a perseverança para concretizar mais esta etapa de minha qualificação profissional.

Aos meus pais, meus irmãos, sobrinhos e familiares que sempre estiveram na torcida pelo meu êxito.

Aos amigos de trabalho, aos amigos incentivadores: Camila Louvaim, Fábio Cândido, Jader Zacharias, Carla Teixeira, Roosevelt Batista, Bia Gomes, Ângela Gomes, Valéria Pereira, aos bolsistas que me auxiliaram, em especial ao Brunner Rabelo e Lorena Leite, aos servidores da UENF: Neiva, Vanusa, Milton, Silvio Caires, Ivissom, José Renato, aos motoristas Rodrigo (charopinho) e Luiz (Sará), à equipe de servidores da biblioteca, às secretárias do curso, ao Prof. Aldo Durand coordenador da Pós-Graduação, aos professores e aos colegas de turma que desbravaram a geotecnia juntos comigo.

Aos orientadores Gustavo de Castro Xavier e Paulo César de Almeida Maia, pelos desafios lançados, incentivos, orientações, recomendações, atenção e os conhecimentos adquiridos.

À banca examinadora, pela disponibilidade e observações que somam e aprimoram o trabalho.

A todos que me auxiliaram a elaborar este trabalho, fornecendo dados, orientando e compartilhando um pouco do seu saber, destacando-se os professores Rogério e Paraguassu da USP e o Geólogo Marcio Remédio do CPRM.

A UENF, pelo apoio financeiro e logístico; à empresa Furnas, pelo material cedido à pesquisa, pelo suporte de toda equipe que nos recebeu e auxiliou na coleta dos materiais nas barragens.

Ao meu esposo Marcelo, meus filhos Letícia e Lucas, pelo apoio, trabalho e companheirismo nos finais de semana no laboratório, pelo estímulo, por acreditar e dividir comigo todas as dificuldades, por compreenderem a minha ausência e sempre estarem me apoiando.

Aos que rezaram por mim para que este momento se efetivasse, meus sinceros agradecimentos!

... Estou percorrendo apenas um trecho da estrada... Ainda resta muito a seguir!

Kelly Borges

SUMÁRIO

RESUMO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS, SINAIS E UNIDADES	xviii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - INTRODUÇÃO	1
1.2- JUSTIFICATIVA	2
1.3- OBJETIVO DO TRABALHO	3
1.4- METODOLOGIA	4
1.5- ESCOPO DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1- ENROCAMENTO	6
2.2- BARRAGENS.....	11
2.3- ROCHAS APLICADAS EM ENROCAMENTO	13
2.4- ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DE ENROCAMENTOS.....	17
2.5- CRITÉRIOS DE PROJETO E RETROANÁLISE DE BARRAGENS.....	20
2.6- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO	27
3.1- APRESENTAÇÃO	27
3.1.1- Usina Hidrelétrica de Furnas	28
3.1.2 - Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia	33
3.1.3- Usina Hidrelétrica de Marimbondo	37
3.1.4 - Usina Hidrelétrica de Manso	41
3.1.5 - Usina Hidrelétrica de Foz do Chapecó	45
3.2- CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
CAPÍTULO 4 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO E PROCEDIMENTO	49

4.1- ANÁLISE QUÍMICA	51
4.2- PETROGRAFIA	51
4.3- ABRASÃO DE LOS ANGELES.....	51
4.4- ENSAIO DE DURABILIDADE (Slake Durability Test)	58
4.5- ENSAIO MICRO DEVAL	62
4.6- ENSAIO DE RESIST. Á COMPRESSÃO PONTUAL(Point load test)	65
4.7- ÍNDICE DE ALTERAÇÃO.....	69
4.8- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E ANÁLISES	71
5.1 - UHE FURNAS	71
5.1.2- Correlação entre os ensaios de compressão pontual e abrasão los angeles – Furnas	82
5.2- UHE PORTO COLÔMBIA	84
5.2.2- Ensaios de compressão pontual e abrasão los angeles – Porto Colômbia	94
5.3- UHE MANSO	95
5.4 - UHE FOZ DO CHAPECÓ	100
5.5- UHE MARIMBONDO	106
5.5.1- Ensaios compressão pontual e abrasão los angeles.....	116
5.5.2- Caracterização da durabilidade – Marimbondo	117
5.6- PERDA DE MASSA - BASALTO E DIABÁSIO.....	119
5.7- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	119
6- CONCLUSÃO.....	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

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 onde os enrocamentos mostraram o seu potencial de utilização, tanto no que se refere aos custos, quanto às características geomecânicas. A construção civil busca, cada vez mais, o aproveitamento máximo dos materiais disponíveis. Assim, observa-se uma tendência de emprego de rochas de menor qualidade, susceptíveis às variações de resistência e de deformabilidade, provocadas por diversos fatores inerentes aos materiais e ao meio ambiente. Dentre estes fatores, destacam-se as características de alteração da rocha. Neste sentido, este trabalho apresenta um estudo sobre a variação das propriedades mecânicas de rochas expostas ao intemperismo, e utilizadas como enrocamento de proteção dos taludes de montante das barragens das seguintes Usinas Hidrelétricas: Furnas, Porto Colômbia, Marimondo, Manso e Foz do Chapecó, com as respectivas rochas (quartzito, diabásio, basalto, arenito e basalto). O período de degradação natural é compreendido entre 6 e 53 anos. São descritos a metodologia e o ensaio, é realizada a análise química e petrografia das partículas de enrocamento, e apresentados os resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles, Micro Deval, *Slake Durability* e compressão pontual. Os resultados obtidos são associados aos dados da literatura para a avaliação de parâmetros de degradação e durabilidade característicos desse material. Para complementar o entendimento deste trabalho, são apresentadas: a revisão bibliográfica sobre o assunto, as áreas de estudo, os materiais e métodos de ensaio, as análises, discussões dos resultados e conclusão.

PALAVRAS-CHAVE: Enrocamento, Degradação natural, Barragens, Alterabilidade, Ensaio de laboratório.

ABSTRACT

Airports, traffic ways, port developments and dams constitute the main riprap application fields. Among them, construction of major dams stands out to highlight riprap potential in cost terms as much as for its geomechanical characteristics. Construction projects increasingly aim the maximum use of available materials. Thus, a trend in use of lower quality rocks has been observed despite them being susceptible to resistance variation and deformability due to several inherent material factors or environmental aspects. Rock alteration characteristics are noticeable among such factors. This paper presents a study on mechanical properties variation in rocks exposed to weathering, and used as upstream slope riprap protection in the following hydropower plants dams: Furnas, Porto Colômbia, Marimbondo, Manso and Foz do Chapecó. The rocks used were, respectively: quartzite, diabase, basalt, arenite and basalt. Natural degrading period spans from 6 to 53 years. Methodology and essays are described; chemical analysis and riprap particles petrography are performed; and results from Los Angeles, Micro Deval and Slake Durability abrasion tests, and from punctual compression test are shown. Study results were compared to literature data for assessment of degradation and durability parameters of such materials. For a more comprehensive understanding of this paper, a literature review on the subject; its study fields; materials and essay methods; analyses; result discussions; and a conclusion are presented.

KEY WORDS: Riprap, Natural degradation, Dams, Alterability, Laboratory test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Barragem de Enrocamento- (a) BENC, (b) BEFC	pág 13
Figura 2.2 – Alterabilidade dos minerais e rochas	pág 18
Figura 2.3 – Tipos de alteração em função da temperatura e da precipitação (Peltier, 1950), extraído de Maia, (2001)	pág 19
Figura 2.4 - Barragem de enrocamento com vedação central. (a) Barragem de enrocamento com nucleo impermeável; (b) Barragem de terra com rip-rap e dreno de pé	pág 20
Figura 2.5 - Ruptura característica de um <i>rip-rap</i> . (ICOLD, 1993, <i>apud</i> ANA 2015)	pág 23
Figura 3.1 – Localização das UHE (Adaptado Anuário estatístico do Brasil, 2003)	pág 27
Figura 3.2 – UHE de Furnas	pág 28
Figura 3.3 – Vista Superior da UHE de Furnas	pág 30
Figura 3.4 – (a) Talude de montante. (b) Enrocamento em quartzito	pág 30
Figura 3.5 – (a) Enrocamento com intervenção em basalto. (b) Muro em gabião	pág 31
Figura 3.6 – Seção Típica da UHE de Furnas.....	pág 32
Figura 3.7 – UHE Porto Colômbia.....	pág 33
Figura 3.8 – (a),(b)- Enrocamento de Porto Colômbia composto por diabásio e seixo	pág 35
Figura 3.9 – Vista Superior da UHE de Porto Colômbia	pág 35
Figura 3.10 – Seção Típica da Barragem de Terra da Margem esquerda, da UHE de Porto Colômbia	pág 36
Figura 3.11 – Usina Hidrelétrica de Marimbondo	pág 37
Figura 3.12 – Vista Superior da UHE de Marimbondo	pág 38
Figura 3.13 – Enrocamento de proteção, UHE de Marimbondo.....	pág 39
Figura 3.14 – Seção Típica da UHE de Marimbondo.....	pág 40
Figura 3.15 – (a) Vista frontal à jusante; (b) vista superior, UHE de Manso. (fonte:www.camarachapadadosguimaraes.mt.gov.br, acesso em 01/07/2016).....	pág 41

Figura 3.16 – (a) Enrocamento de proteção; (b) arenito – APM- Manso. (Fonte: Carvalho 2009)	pág 43
Figura 3.17 – Seção Típica do APM-Manso.....	pág 44
Figura 3.18 – Vista superior da UHE Foz do Chapecó. (Fonte:www.fozdochapeco.com.br/banco de imagens, acesso em 14/05/2016)	pág 45
Figura 3.19 – (a) execução de núcleo asfáltico e transição (b) Estrutura de fechamento da calha do Rio Uruguai. (Fonte:www.fozdochapeco.com.br/banco de imagens, acesso em 14/05/2016)	pág 46
Figura 3.20 – Seção Típica da Barragem Principal -UHE Foz do Chapecó.....	pág 47
Figura 4.1 – (a) Equipamento da UENF para ensaio de Abrasão Los Angeles (b) Carga abrasiva	pág 52
Figura 4.2 – Quartzito da UHE Furnas - (a) Amostra antes do ensaio; (b) Amostra após o ensaio de abrasão Los Angeles	pág 55
Figura 4.3 – UHE Porto Colômbia, amostra antes e após o ensaio de abrasão Los Angeles (a) Seixo; (b) Diabásio.....	pág 56
Figura 4.4 – Basalto da UHE Marimbondo, (a) amostra antes do ensaio (b) após o ensaio de abrasão Los Angeles.....	pág 57
Figura 4.5 – Metarenito da UHE APM-Manso após o ensaio de abrasão Los Angeles.....	pág 57
Figura 4.6 – Basalto da UHE Foz do Chapecó, (a) amostra antes do ensaio (b) após o ensaio de abrasão Los Angeles	pág 58
Figura 4.7 – Desenho esquemático do equipamento para ensaio de durabilidade.....	pág 59
Figura 4.8 - Equipamento para ensaio de durabilidade e Micro-Deval.....	pág 59
Figura 4.9 – Amostras de Enrocamento antes do ensaio SD - (a) Quartzito de Furnas, (b) Basalto de Marimbondo , (c) Basalto de Foz do Chapecó, (d) Diabásio de Porto Colômbia, (e) Seixo de Porto Colômbia	pág 62
Figura 4.10 – Amostras de Enrocamento após o ensaio SD - (a) Quartzito de Furnas, (b) Basalto de Marimbondo , (c) Basalto de Foz do Chapecó, (d) Diabásio de Porto Colômbia, (e) Seixo de Porto Colômbia	pág 62
Figura 4.11 – Amostras de Enrocamento antes e após o ensaio MD - (a) Quartzito de Furnas degradado, (b) Quartzito de Furnas britado, (c) Diabásio de Porto	

Colômbia, (d)Basalto de Marimbondo , (e) Basalto de Foz do Chapecó, (f) arenito de Manso.....	pág 65
Figura 4.12 – Equipamento para os ensaios de carregamento pontual.....	pág 66
Figura 4.13 – Rochas ensaiadas a compressão puntiforme. (a) Quartzito de Furnas, (b) Basalto de Marimbondo , (c) Diabásio de Porto Colômbia, (d) Basalto de Foz do Chapecó.....	pág 67
Figura 4.14 – Basalto vesicular.....	pág 67
Figura 5.1 - (a) (b) e (c)- Fotomicrografia do quartzito de Furnas.....	pág 72
Figura 5.2 – Comparação entre os resultados obtidos no quartzito.....	pág 75
Figura 5.3 – Perda A_L do quartzito ao longo do tempo.....	pág 76
Figura 5.4– Resultados MD de Furnas.....	pág 78
Figura 5.5 – compressão pontual do enrocamento de Furnas	pág 79
Figura 5.6 – Comparação entre os valores de q_u para o quartzito de Furnas, obtido segundo equação proposta por diversos autores	pág 81
Figura 5.7 – Quartzito de Furnas- Correlação entre I_s50 e AL	pág 83
Figura 5.8 – (a) Correlação entre e I_s e q_u (b) Correlação entre I_s e AL	pág 84
Figura 5.9 – Fotomicrografia – (a) diabásio, (b) quartzito micáceo	pág 85
Figura 5.10– Diabásio com capa de alteração.....	pág 86
Figura 5.11 – Índices de alteração química do diabásio	pág 87
Figura 5.12 – Abrasão Los Angeles- diabásio.....	pág 89
Figura 5.13 – Porto Colômbia- índices SD	pág 90
Figura 5.14 – Porto Colômbia - índices MD do diabásio	pág 91
Figura 5.15 – Correlação entre o ensaio MD e ataque químico a sulfato de magnésio, Senior e Rogers (1991)	pág 92
Figura 5.16 – Compressão Pontual do diabásio.....	pág 93
Figura 5.17 – Diabásio - (a) Correlação entre e I_s e q_u (b) Correlação entre I_s e AL	pág 94
Figura 5.18 – Índices químicos – arenito	pág 97
Figura 5.19 –metarenito – Abrasão Los Angeles	pág 98

Figura 5.20 – metarenito – M_{DE}	pág 99
Figura 5.21 – Correlação entre o ensaio MD e ataque químico a sulfato de magnésio,Senior e Rogers (1991)	pág 99
Figura 5.22 – Fotomicrografia do basalto de Foz do Chapecó	pág 100
Figura 5.23 – Basalto de Foz do Chapecó- Índices Geoquímicos	pág 102
Figura 5.24 – Foz do Chapecó - Abrasão Los Angeles	pág 103
Figura 5.25 – Compressão pontual- basalto de Foz do Chapecó.....	pág 105
Figura 5.26 - Capa de alteração- basalto de Marimbondo, Maia(2001)	pág 108
Figura 5.27 – Fotomicrografia do basalto de Marimbondo.....	pág 108
Figura 5.28 – Resultado do ensaio LA - basalto de Marimbondo.....	pág 109
Figura 5.29 - Perda de massa durante 40 anos no segundo e quinto ciclo de ensaio SD – basalto de Marimbondo.....	pág 111
Figura 5.30 – Resultados MD de Marimbondo.....	pág 112
Figura 5.31 –MD de Marimbondo ao longo do período de exposição no campo.....	pág 113
Figura 5.32 – PL basalto de marimbondo.....	pág 114
Figura 5.33 – Variação do PL com o tempo.....	pág 115
Figura 5.34 – Basalto - (a) Correlação entre I_s e q_u (b) Correlação entre I_s e AL	pág 117
Figura 5.35 – Previsão da durabilidade (a) Slake Durability (b) Compressão pontual.....	pág 118
Figura 5.36 – Perda de massa dos basaltos e diabásio no ensaio SD	pág 119
Figura 5.37 – Perda AL no enrocamento.....	pág 120
Figura 5.38 – Ensaio de durabilidade.....	pág 121
Figura 5.39 – Perda de massa do enrocamento no ensaio MD.....	pág 121
Figura 5.40 – Compressão pontual nos enrocamentos.....	pág 122

LISTA DE TABELA

Tabela 2.1 – Rochas usadas em enrocamentos de Barragens no Brasil.....	pág 16
Tabela 2.2 - Tabela 2.2 - Mecanismos de degradação de enrocamento (Mendonça,2014).....	pág 20
Tabela 2.3 - Frequência de monitoramento das barragens de terra, enrocamento e concreto após o primeiro ano de operação.....	pág 22
Tabela 2.4 - Critério de projeto de enrocamento e qualidade das rochas	pág 24
Tabela 3.1- Resumo das UHE estudadas.....	pág 48
Tabela 4.1 - Ensaio de Degradação de Materiais – Adaptado Salles (2006) ...	pág 49
Tabela 4.2- Graduações A a D, massa e número de esferas para o ensaio de Abrasão Los Angeles – Adaptado NM 51 (ABNT,2001).....	pág 53
Tabela 4.3- Valores típicos da resistência a abrasão para diferentes rochas (Adaptado: Bull. Materials Science, Vol. 31, No. 2)	pág 54
Tabela 4.4- Amostras de quartzito para Ensaio Los Angeles	pág 54
Tabela 4.5 - Classificação da durabilidade (Maia 2001)	pág 60
Tabela 4.6 – Trabalhos encontrados na literatura usando o SD	pág 61
Tabela 4.7- Correlações entre $I_{s(50)}$ e q_u	pág 68
Tabela 4.8 - Ensaio realizado para cada enrocamento	pág 70
Tabela 5.1 – Análise química	pág 73
Tabela 5.2 – Alteração dos enrocamentos devido ao intemperismo.....	pág 74
Tabela 5.3 – SD enrocamento de Furnas	pág 77
Tabela 5.4 – Estimativa do valor de q_u para o quartzito de Furnas.....	pág 80
Tabela 5.5 – Índice de alteração do quartzito de Furnas	pág 82
Tabela 5.6 – Análise Química do Enrocamento da UHE Porto Colômbia	pág 85
Tabela 5.7 – Alteração das rochas devido ao intemperismo.....	pág 88
Tabela 5.8 - Índice de Durabilidade- enrocamento de Porto Colômbia.....	pág 90
Tabela 5.9 – Estimativa do valor de q_u para o quartzito de Furnas.....	pág 93

Tabela 5.10 – Análise Química do Enrocamento do APM-Manso	pág 95
Tabela 5.11 – Alteração dos enrocamentos devido ao intemperismo.....	pág 97
Tabela 5.12 – Foz do Chapecó - Análise Química	pág 101
Tabela 5.13 – Alteração dos enrocamentos devido ao intemperismo.....	pág 102
Tabela 5.14 – SD enrocamento de Furnas	pág 104
Tabela 5.15- Correlações usadas para obter q_u	pág 105
Tabela 5.16 – Análise Química do Enrocamento da UHE Marimbondo.....	pág 106
Tabela 5.17 – Alteração dos enrocamentos devido ao intemperismo.....	pág 109
Tabela 5.18 – SD enrocamento de Furnas	pág 110
Tabela 5.19 – SD segundo Maia (2001)	pág 111
Tabela 5.20- Índices de resistência à carga pontual e compressão uniaxial...	pág 115
Tabela 5.21-Índices de resistência à carga pontual e compressão uniaxial Marimbondo	pág 116
Tabela 5.22-Índices de degradação dos ensaios SD e resistência à compressão pontual	pág 117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHE	Aproveitamento Hidrelétrico
AL	Perda de massa do ensaio de abrasão Los Angeles
ANA	Agência Nacional das Águas
APM	Aproveitamento Múltiplo
BEFC	Barragens de Enrocamento com Face de Concreto
BENC	Barragens de Enrocamento com Núcleo Central
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CIA	Índice químico de alteração
CIGB /ICOLD	Comissão Internacional de Grandes Barragens
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
De	Diâmetro equivalente
FC	Fator de correção
I	Índice de degradação
Idx	Índice de durabilidade
IS	Índice de resistência a carga pontual
K	Fator de conversão para obter qu
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
m	massa da amostra
MD	Ensaio Micro Deval
mf	Massa final da amostra lavada e seca
mi	mi massa total da amostra seca
P	carga de ruptura
P _{alt}	valores de ensaio do material alterado
P _{int}	valores de ensaio do material intacto
PL	Ensaio de compressão pontual
q _u	Resistência à compressão uniaxial da rocha
SD	Ensaio de durabilidade
U.S.	Corps of Engineer
UENF	Univeridade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro
UHE	Usinas Hidrelétricas
USBR	The United States Bureau of Reclamation
USP	Universidade de São Paulo
y	variável

LISTA DE SÍMBOLOS, SINAIS E UNIDADES

=	Igual
≥	Maior ou igual
≤	Menor ou igual
>	Maior
<	Menor
%	Percentual
A	Área
MPa	Megapascal
Cm	centímetro
De	Diâmetro equivalente
s	segundo
Kg	quilograma
Cm	centímetro
m	metro
m ³	metro cúbico
m ²	metro quadrado
mm	milímetro
°C	graus Celsius
MW	Megawatt
Km	quilômetro
Km ²	quilômetro quadrado
H	altura

“Aonde a informação não chega, a transformação não ocorre.”

Jader Zacharias

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a construção de barragens está relacionada à necessidade do confinamento de água devido a grandes períodos de estiagem, às evoluções tecnológicas e ao crescimento da população.

As barragens podem ser executadas para diversas finalidades, entre elas: armazenamento de água para consumo, mitigação de enchentes, contenção de rejeitos industriais. Pode, ainda, ser construída para possibilitar que o rio se torne navegável aumentando a profundidade do reservatório; para aquicultura, lazer e geração de energia.

O Registro Mundial de Barragens, da Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB/ICOLD), considera uma grande barragem aquela que possua altura de 15 metros (independentemente do volume de água armazenável em seu reservatório) ou também a que possua altura entre 10 e 15 metros desde que tenha capacidade de armazenar mais de três milhões de metros cúbicos de água em seu reservatório. De acordo com esse critério, a altura de uma barragem é determinada pela diferença da elevação de sua crista até o ponto mais baixo da sua fundação.

Entre as décadas de 60 a 80, a crescente industrialização e urbanização no Brasil fez surgir a necessidade da ampliação da oferta de energia elétrica. Com a hidrografia marcada pela existência de um grande número de rios aproveitáveis para a geração de energia elétrica renovável, iniciou-se a exploração deste recurso com a construção de grandes barragens e instalação de Usinas Hidrelétricas (UHE).

Uma usina hidrelétrica pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração elétrica, através de aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio (FURNAS, 2014). As barragens constituem obras complexas e de grande porte, possuindo altos custos de implantação. Dessa

forma, é importante o estudo de alternativas que reduzam os custos e melhorem suas características técnicas.

A grande quantidade de material aplicado na barragem, associada ao volume de escavações previsto em projeto, e a preocupação em minimizar os danos ambientais obriga o emprego de solos compressíveis e enrocamentos rochosos menos resistentes, disponíveis na região de implantação das UHE. Aliado a estes fatores, o desenvolvimento de novos equipamentos, as inovações tecnológicas nos processos de desmonte, escavação, transporte, densificação de maciços, e ainda, os custos favoráveis e as características geomecânicas, fizeram com que essas rochas antes descartadas em *bota-fora*, se destacassem no uso em enrocamentos nas construções de grandes obras como barragens, portos, aeroportos e vias.

Os enrocamentos de proteção de talude possuem altos valores de resistência ao cisalhamento, que influenciam na estabilidade do talude, no entanto, a exposição a agentes intempéricos acarreta alteração do material, por desagregação ou decomposição da rocha. O processo de alteração provoca a diminuição da resistência superficial do agregado e afeta diretamente a deformabilidade e a resistência dos enrocamentos como meio granular, principalmente pela modificação de características como pontos de contato entre os blocos de rocha, Maia *et al.*,(2002).

1.2 JUSTIFICATIVA

A matriz energética do Brasil é predominantemente hidrelétrica e o país tem grande parcela dessa matriz a ser explorada. O potencial hidrelétrico brasileiro está estimado em 248,9 GW, sendo que somente 34,8% está em operação. (ELETROBRAS, 2011).

O setor energético é considerado um dos pilares da sociedade moderna (COPEL, 2009). A matriz energética brasileira se destaca em relação a de outros países por deter sua geração de eletricidade baseada fundamentalmente em obras hidráulicas. Parte das Usinas em funcionamento no país foi construída entre as décadas de 60 e 80 – Furnas, por exemplo, entrou em operação em 1963, totalizando, no momento, 53 anos de operação. Nesta Usina, o material vem sendo exposto aos agentes de

intemperismo químico, ou seja, os minerais são alterados ou dissolvidos por reações químicas; biológico, que implica na transformação das rochas a partir da ação de seres vivos; e físico, significando que rocha se fragmenta por meio de processos físicos, sem modificação em sua composição química.

Os enrocamentos expostos ao meio exógeno sofrem alterações, principalmente os nos taludes de montante que, devido à oscilação do nível da água, são submetidos à lixiviação e à ciclagem constante, onde a presença de argilominerais expansivos pode levar a uma rápida alteração das partículas do enrocamento.

Recentemente, nota-se um aumento na quantidade de falhas e danos em barragens como consequência de seu envelhecimento e de mudanças atípicas no clima, entre outros fatores, fazendo com que a segurança dessas estruturas seja um fator de grande importância na atualidade. (Jeon *et al*, 2009). A garantia das condições de segurança de uma barragem é resultante de uma série de fatores, entre os quais podem ser citados: aspectos estruturais, geotécnicos, hidráulicos, operacionais e ambientais, visando estabelecer um conhecimento contínuo e adequado do comportamento da mesma (CBDB, 2001).

Como consequência do exposto, novas normas, critérios de projeto e construção, observação, inspeção e acompanhamento da operação de barragens tem sido elaborados. Exemplo disso é a criação da Lei 12.334/10 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Os critérios de projeto são descritos no item 2.5. Essas medidas demonstram a crescente preocupação com a segurança dessas obras. Neste sentido, esse trabalho vem complementar o estudo das estruturas envolvidas em face da caracterização da degradação natural dos enrocamentos.

1.3. OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho objetiva o estudo da degradação natural de enrocamento de proteção a montante de barragens das seguintes Usinas: Foz do Chapecó, Furnas, Manso, Marimondo e Porto Colômbia, para caracterização em laboratório da sua

degradação, priorizando as rochas localizadas na faixa de flutuação do nível d'água de cada reservatório.

A avaliação da alteração das rochas é feita com ensaios em amostra alterada naturalmente no campo e comparações com estudos e resultados de ensaios destes enrocamentos, encontrados na literatura.

Face à análise dos resultados e comparações com a bibliografia, é possível avaliar as variações das propriedades físicas, químicas e mecânicas do material de estudo alterado naturalmente no campo, e estabelecer a tendência de comportamento em longo prazo da degradação do material.

1.4 METODOLOGIA

A caracterização da degradação será estabelecida mediante a realização de ensaios diretos de carregamento pontual, abrasão Los Angeles, Slake Durability, Análise Química, Petrografia e desgaste Micro Deval, avaliando a rocha constituinte de cada enrocamento, pela perda de massa e/ou de resistência.

A metodologia estabelecida neste trabalho divide-se em 3 etapas:

- Obtenção da amostra no campo, escolhida visualmente com melhor representatividade do maciço, nos taludes de montante dos reservatórios, na faixa de flutuação do nível da água, das Usinas Hidrelétricas de Furnas, de Porto Colômbia e Marimbondo, totalizando uma massa de 70 kg nas seguintes faixas granulométricas:
 - graduação entre 0,5 e 10 cm.
 - graduação entre 20 e 35 cm.

Nas demais hidrelétricas, o material foi coletado pela Concessionária gestora das Usinas e encaminhado ao Laboratório de Ensaio de Degradação (LED) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

- Realização de ensaios nos Laboratórios da UENF:
 - Ensaio de Durabilidade (*Slake Durability Test*);
 - Abrasão Los Angeles;
 - Desgaste Micro Deval;
 - Ensaio de resistência à compressão pontual (*Point Load*) ;
 - Análise Química.

e ainda, petrografia das rochas realizada em parceria científica com os laboratórios da Universidade de São Paulo (USP), em São Carlos e a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

- Análise dos resultados.

Os resultados obtidos foram comparados com os dados da Literatura e Normas Técnicas vigentes, e interpretados para a avaliação da durabilidade dos enrocamentos.

1.5. ESCOPO DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em 6 capítulos. O Capítulo 1 traz as considerações iniciais, a justificativa, o objetivo e a metodologia adotada para a pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde são abordadas as definições sobre barragens e enrocamentos; os fatores que influenciam no comportamento geomecânico; durabilidade, alteração e alterabilidade de rochas, e os critérios de projeto de enrocamento.

O Capítulo 3 descreve os locais de estudo, apresenta as UHE e as seções transversais típicas de cada empreendimento.

O Capítulo 4 expõe o programa de ensaio realizado, os procedimentos adotados e os equipamentos empregados.

O Capítulo 5 mostra os resultados provenientes desta pesquisa, obtidos nos ensaios em Laboratório e apresenta as discussões.

O Capítulo 6 exhibe as conclusões do trabalho, as propostas e sugestões para pesquisas futuras. Ao final, estão elencadas as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica, abordando os aspectos gerais com as definições de enrocamento, barragens, os tipos de rochas, os conceitos de alteração e alterabilidade de materiais rochosos e os ensaios usados em rochas de proteção de taludes.

2.1 ENROCAMENTO

Encontra-se, na literatura, um grande número de trabalhos abordando o uso de enrocamento e uma série de definições que o caracterizam por sua composição litológica, granulométrica e permeabilidade.

Os enrocamentos destacaram-se na construção de pavimentos, aeroportos, obras portuárias, grandes barragens e ensecadeiras. Com o surgimento de novas tecnologias e o aprimoramento de equipamentos nos processos de desmonte da rocha, transporte, beneficiamento, densificação e ensaios de laboratório, garantindo um melhor conhecimento sobre comportamento do material, a qualidade, a durabilidade e a aplicabilidade nas obras de engenharia, foram criadas definições atuais para o termo enrocamento.

Para Agrar (2000), a obra de enrocamento é constituída de material granular, muito grosseiro, com granulometria bem distribuída, composta por não menos de 95% em peso de blocos de rocha sã ou pouco alterada, desde que suficientemente densos, sólidos e resistentes à abrasão, com dimensão média por volta da peneira com malha de $\frac{1}{2}$ ", desde que não exceda a 10% em peso.

Segundo Pacheco (2005), os enrocamentos podem ser definidos como um conjunto não coerente de fragmentos de rocha, com o coeficiente de permeabilidade superior a 10^{-3} cm/s, cuja granulometria é constituída em 70% por partículas maiores que $\frac{1}{2}$ " com uma fração de no máximo 30% de partículas que passam na peneira 4,8 mm. O limite de percentual de finos é importante para manter a adequada permeabilidade do enrocamento, evitando o surgimento de pressões neutras nas estruturas.

O termo enrocamento pode ser definido por uma aglomeração de partículas de rocha cujas dimensões obedecem a limites compreendidos entre 2 cm a 200 cm. A dimensão e o tipo das partículas usadas no enrocamento estão diretamente relacionados à disponibilidade do material e à finalidade da obra. Atualmente, não existem limitações na definição do diâmetro mínimo das partículas de enrocamentos. Normalmente, especifica-se o limite da porcentagem de material fino, Maia (2001) e Matherson (1986) considera-se que o diâmetro máximo não deve ser superior $\frac{3}{4}$ da espessura da camada compactada.

Diante das definições apresentadas, conclui-se que o termo enrocamento tem um conceito relativamente amplo, que a permeabilidade do material usado deve ser superior a 10^{-3} cm/s, para evitar o surgimento da pressão neutra no maciço, e que a espessura da camada e a granulometria dependem do tipo de obra que será executada.

As primeiras aplicações do enrocamento como material de construção de barragens ocorreram durante a segunda metade do século XIX. A princípio, os aterros de enrocamento não eram compactados e sua granulometria se caracterizava por um baixo coeficiente de uniformidade e pela utilização de blocos de grandes dimensões de rocha sã, Watzko (2007).

Em geral, os enrocamentos empregados em barragens, objeto deste estudo, provém de desmontes obrigatórios de rocha, tal como a construção de túneis de desvios e adução, de vertedouros, de acessos e jazidas próximas.

Os enrocamentos lançados tipo “rip-rap” possuem elevada permeabilidade e são utilizados para proteger taludes de barragens do efeito das ondas provocadas pelos ventos e ainda promover a estabilização de taludes e contenção de encostas.

2.1.1 Comportamento mecânico dos enrocamentos

O comportamento mecânico dos enrocamentos no campo é influenciado pelo estado de tensão, pelas partículas de rochas, consideradas individualmente e pelo conjunto do enrocamento, analisando como meio granular Veiga Pinto (1983). Tais comportamentos, quando pesquisados em laboratório, sofrem ainda a influência dos procedimentos de ensaio, como descritos a seguir:

a) *Estado de tensão*

A modificação do estado de tensão nos enrocamentos ocasiona a deformação do material, originando dois efeitos distintos nas partículas de rocha:

- Quando o enrocamento é submetido a um carregamento inicial, ocorre a compressão elástica das partículas, ocasionando a quebra entre os contatos, e ainda a ruptura ou o fraturamento da rocha.
- O rearranjo das partículas é o segundo efeito. Ocorrida a quebra dos grãos, há o rolamento e deslizamento da rocha para atingir um novo estado de equilíbrio do maciço.

Estes efeitos dependem, especialmente, do grau de interferência entre as partículas, ou seja, o imbricamento, definido pela disposição e a capacidade de movimentação que as partículas têm entre si.

Deve-se destacar que o tipo e a velocidade do carregamento também influenciam no estado de tensão, pois a aplicação de grandes carregamentos de forma rápida geram deformações mais acentuadas, evidenciando ainda mais os efeitos citados acima.

b) *Rocha granular constituinte do enrocamento*

As características das rochas do enrocamento que interferem no imbricamento e no comportamento destes materiais são:

- A resistência ao fraturamento das partículas varia com o tipo de rocha, a heterogeneidade do material rochoso, o grau de fissuração e as dimensões das partículas;
- Forma: a forma da rocha influencia o imbricamento entre partículas. A angulosidade dos grãos reduz a mobilidade das partículas. Para níveis de tensões mais elevados podem originar um acréscimo do fraturamento e conseqüentemente, uma maior deformabilidade e menor resistência ao cisalhamento do meio granular. Segundo Penman (1969) *apud* Saboya Jr. (1993), quando a forma da partícula apresenta cantos arredondados, a compressibilidade do enrocamento é significativamente menor;
- Atrito entre as partículas: considerando um meio granular, o aumento das forças de atrito entre as partículas conduz a um maior imbricamento. Deste

modo, quanto à resistência ao cisalhamento, o efeito é vantajoso em baixas pressões, pois diminui o deslizamento, mas é desvantajoso para altas pressões, pois aumenta a concentração de tensões e acarreta maior grau de faturamento, Maia (2001);

- Mineralogia e tipo de rocha: ensaios de atrito superficial, realizados por Horn & Deere (1962) em diferentes minerais, mostram que, sob as mesmas condições de ensaio, diferentes minerais apresentam diferentes coeficientes de atrito e, minerais do mesmo tipo, embora de diferentes origens, têm a mesma característica de atrito.

Leslie (1969) e Becker *et al.* (1972) apresentam resultados nos quais se verifica influência pequena da mineralogia no ângulo de resistência ao cisalhamento, em baixos níveis de tensão σ'_3 . No entanto, Sowers (*et al.* 1965) notam não haver relação entre o tipo de material e o assentamento (recalque) a longo prazo de barragens de enrocamento;

- Estado de alteração da rocha: para uma interpretação dos efeitos da alteração de enrocamentos, faz-se necessária a avaliação da alteração que o material sofre no campo, ao longo de sua utilização geotécnica. Dias Filho (2012) estabelece que é possível correlacionar a degradação sofrida no campo com a degradação no laboratório através da perda de massa entre as diferentes degradações.

As modificações que a rocha sofre durante os processos de alteração são observadas em praticamente todas as características das partículas do enrocamento. A presença de argilominerais expansivos, formados pela decomposição do feldspato, olivina, piroxênio e anfibólios constituintes das rochas, causa o faturamento da partícula.

c) *Enrocamento como meio granular*

Os fatores mais expressivos que influenciam o comportamento do enrocamento como meio granular são:

- Estado de compacidade: a compacidade e a resistência do material são influenciadas pelo índice de vazios.

A resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da massa específica aparente dos enrocamentos, Marsal (1965).

A compressibilidade, por sua vez, diminui com aumento da massa específica aparente destes materiais (Fumagalli, 1970; Kjaernsli e Sande, 1963; Marsal 1972, Marsal, 1973a; Maia (2001);

- Distribuição granulométrica e porcentagem de finos: enrocamentos bem graduados permitem, para a mesma energia de compactação, produzir maciços mais densos e menos deformáveis. A porcentagem de finos interfere na permeabilidade do maciço.
- Adição de água: a magnitude das deformações provocada pela adição de água aumenta com o nível de tensão. Este comportamento, designado colapso, já tem sido observado em diversos maciços de enrocamento (Baumann, 1960; Sowers *et al.*, 1965; Kjaernsli e Tornblaa, 1966; Marsal e Ramírez, 1967; Marsal, 1972).

Mendonça (2016), avaliando o colapso de enrocamentos em arenito, observou que a inundação provoca a ruptura dos contatos entre as partículas, e as deformações ocorrem pela interação entre a matriz sólida e a distribuição de vazios.

Uma maneira de reduzir a magnitude do colapso é através da adição de água ao material durante o processo de densificação das camadas de enrocamento. Segundo Veiga Pinto (1983), o volume ótimo de água para o umedecimento do enrocamento depende da capacidade de absorção de água da rocha. Na prática, tem-se utilizado um valor da ordem de 300 litros de água por m³ de enrocamento.

c) *Procedimentos de Ensaios*

Veiga Pinto (1982) cita que, para uma amostra de enrocamento apresentar boa reprodutibilidade das condições de campo, tem que possuir semelhança na granulometria, no estado de compactação e na forma das partículas.

- Efeito escala: as dimensões máximas das partículas têm influência direta na distribuição granulométrica dos enrocamentos. O efeito escala afeta o estado de compactação das rochas, as condições de imbricamento e fraturamento. O tamanho dos blocos de rocha normalmente impede a obtenção direta de seus parâmetros, ou seja, a realização de ensaios de laboratório ou campo. Justifica-se deste modo, a dificuldade ou até mesmo a impossibilidade de

definir os parâmetros dos enrocamentos em termos de ensaios tensão-deformação, sendo necessário recorrer a um elevado número de parâmetros, modelos de simulação e teorias probabilísticas. Torna-se então adequada uma explanação de cada um dos fatores que condicionam as características mecânicas desses materiais, Saboya Júnior (1993).

- Trajetória de tensões: a trajetória de tensões usada nos ensaios é determinada por métodos numéricos, onde se estabelece uma constante que relaciona a tensão horizontal e vertical no aterro. Em enrocamentos, a trajetória de tensões depende não somente da geometria do aterro, mas também do comportamento tensão vs. deformação do material, o qual é relacionado com o fraturamento das partículas. Além disso, descontinuidades no maciço interferem na distribuição de tensões do aterro de enrocamento e, como consequência, interferem na trajetória de tensões.
- Tipo de ensaio: os principais ensaios utilizados para determinação das características mecânicas do enrocamento são: cisalhamento direto, compressão unidimensional, triaxial e deformação plana. Normalmente utiliza-se ensaio com deformação controlada. Vale destacar que, exceto no ensaio de compressão unidimensional, são utilizados equipamentos com controle da deformação, pois os equipamentos de tensão controlada não permitem a observação de comportamento pós-ruptura, Maia (2001).

A caracterização das rochas e a realização dos ensaios de laboratório permitem uma melhor compreensão e representatividade do comportamento do material no campo.

2.2. BARRAGENS

Os projetos de barragens são, em geral, condicionados a fatores hidrológicos, geográficos, geotécnicos, geológicos e ambientais. Kanji (1990) sugere que o empreendimento de uma barragem não tem regra fixa, uma vez que cada construção tem características próprias, não apresentando as mesmas propriedades geológicas.

A necessidade do conhecimento da geologia e da geotecnia do sítio de um barramento de um grande curso d'água vem ao encontro de critérios de segurança

de um empreendimento hidrelétrico. Risco existe em qualquer obra de engenharia mas, em barragens, as consequências são geralmente mais sérias, principalmente quando situadas próximas a áreas intensamente edificadas e populosas. Segundo Marques Mesquita (*et al.* 2014), de 30 % a 40 % dos acidentes em barragens são causados por fatores geológico-geotécnicos.

As barragens podem ser classificadas em diferentes tipos, de acordo com o seu objetivo, seu projeto hidráulico e os tipos de materiais empregados na sua construção. Com relação a estes materiais, as barragens podem ser classificadas em: concreto, terra e enrocamento.

Barragens de concreto

A utilização do concreto como material de construção de barragens de aproveitamentos hidráulicos ocorre há mais de 100 anos, permitindo a obtenção de um banco de dados confiável sobre o comportamento deste tipo de obra Marques Filho (2005).

As barragens de concreto adotam cinco tipos de soluções básicas: barragens de concreto à gravidade, à gravidade aliviada, arco-gravidade, em arco e em contrafortes. Em todas estas soluções estão associados volumes expressivos de concreto, gerando preocupações quanto à fissuração gerada pelos fenômenos termogênicos da hidratação do cimento, cujos malefícios são potencializados com a presença da água do reservatório.

Segundo Kochen (2009), as rupturas de barragens de concreto quase sempre estão relacionadas com problemas na fundação. Um exemplo de gestão inadequada de riscos geológicos/geotécnicos é o rompimento da barragem de Camará, que vitimou cinco pessoas. Segundo Kanji (2004), no rompimento da citada barragem houve uma falha na ombreira esquerda, devido à elevada subpressão e ao baixo ângulo de atrito disponível, evidenciando ainda a ruptura pela fundação.

Barragem de Terra

As barragens de terra são as mais elementares obras de barragens e normalmente são aplicadas para qualquer tipo de fundação, desde a rocha

compacta, até terrenos construídos de materiais inconsolidados, podendo ser do tipo homogênea ou zoneada.

a) *Homogênea* - é aquela composta de uma única espécie de material, suficientemente impermeável, excluindo-se a proteção dos taludes, que precisa ser relativamente suave, para uma estabilidade adequada.

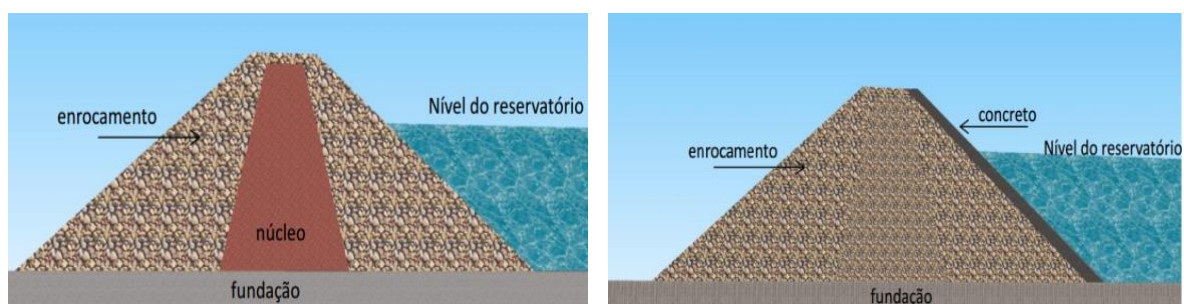
b) *Zoneada* - esse tipo é representado por um núcleo central impermeável, envolvido por zonas de materiais consideravelmente mais permeáveis. As zonas permeáveis consistem de areia, cascalho, enrocamentos, ou uma mistura desses materiais.

Barragem de Enrocamento

Pode-se definir uma barragem de enrocamento como um maciço construído por um conjunto permeável de fragmentos rochosos compactados, sem coesão, cujo peso próprio e o imbricamento entre os blocos fornecem a estabilidade do maciço e a vedação é garantida por um núcleo central, inclinado ou vertical, ou um paramento constituído de um material impermeável, Melo (2012).

A classificação de uma barragem de enrocamento depende do tipo de vedação que pode ser inserido no exterior ou no interior da barragem, podendo ser:

- Barragens de Enrocamento com Núcleo Central (BENC);
- Barragens de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC) .



(a)

(b)

Figura 2.1 – Barragem de Enrocamento- (a) BENC, (b) BEFC

2.3 ROCHAS APLICADAS EM ENROCAMENTO

Adiante são apresentados os tipos de rochas usados nos enrocamentos e suas características:

Granitos e Gnaisses

São denominadas rochas cristalinas, em decorrência de seu aspecto granular brilhante e também pela elevada resistência mecânica. Apresentam grande variação mineralógica e grau metamórfico.

Os granitos são rochas plutônicas, ácidas, granulares, essencialmente constituídas por quartzo e feldspatos alcalinos e, acessoriamente por biotita, muscovita, piroxênios e anfibólios. Apresentam elevada resistência à abrasão por seu elevado teor de quartzo. A coloração é determinada pela cor do feldspato: branca, acinzentada, rosada, avermelhada, esverdeada, amarelada, acastanhada.

Ocorrem num contexto geológico muito variado. A sua maior concentração dá-se nos arcos magmáticos das cadeias de montanhas. Os granitos encontram-se expostos na superfície pela erosão das cadeias de montanhas.

Os gnaisses são um grupo de rochas metamórficas originadas por metamorfismo regional, especialmente de alto grau, de textura orientada, granular, caracterizada pela presença de feldspato, além de outros minerais como quartzo, mica, anfibólio. Ocorrem associados com migmatitos e granitos, nas regiões centrais dos cinturões metamórficos. São rocha muito comum no embasamento cristalino brasileiro.

Os fatores que podem colocar em risco o uso dos granitos e gnaisses em obras são o grau de sanidade, o grau de coesão, o grau de fraturamento e a condutividade hidráulica.

Basaltos

Os basaltos são rochas ígneas muito duras. Em função de seu rápido resfriamento, quando se consolidam, cristalizam-se rapidamente, gerando assim intensas tensões internas em sua matéria sólida. Apresentam elevada resistência mecânica quando inalterados.

Estas tensões de resfriamento são tão intensas, que o sólido se contrai e gera intensos planos de fraturas, tanto verticais quanto horizontais, assim como fraturas

irregulares. Isto faz com que o maciço constituído por basaltos se revele sempre muito fraturado, com intensos desprendimentos de blocos de diversos tamanhos.

O grau de alteração em maciços de basaltos é mais comum do que em rochas ígneas claras, como os granitos. Isto porque os basaltos são rochas ferromagnesianas e assim mais susceptíveis à ação do intemperismo químico. Quando alterados, são rochas de baixa resistência mecânica, e há aumento concomitante da porosidade e também da condutividade hidráulica.

Arenitos e Quartzitos

Os arenitos são rochas sedimentares clásticas formadas pelo acúmulo e posterior diagênese de grãos minerais ou partículas de rochas, os grãos variam de finos a grossos, e as estratificações também são variadas. Em geral são denominadas de rochas brandas, apresentam elevada porosidade e elevada condutividade hidráulica.

O arenito é composto normalmente por quartzo, mas pode ter quantidades apreciáveis de feldspatos, micas e/ou impurezas. São a presença e o tipo de impurezas que determinam a coloração dos arenitos... Grandes quantidades de óxidos de ferro, fazem com que a rocha tenha coloração vermelha.

Quartzitos podem ser definidos como rochas metamórficas com textura sacaróide, derivadas de sedimentos arenosos, formadas por grãos de quartzo recristalizados e envolvidos ou não por cimento silicoso. Apresenta uma tendência a ser coesa, com estrutura cristalina densa e organizada, de modo que a força do cimento entre as partículas propicia uma resistência interna bastante alta. São rochas muito resistentes ao intemperismo químico e físico e tendem a se destacar no relevo, dando origem a serras e morros.

Nos Quartzitos, as condições geomecânicas são melhores em geral, pois estas rochas tornam mais coesivas e duras com o metamorfismo. O maciço comporta-se como se fosse uma rocha cristalina (granito), com baixíssima permeabilidade e elevada resistência mecânica.

Calcários e Mármore

Os mármore são rochas metamórficas. Encontram-se associados a quartzitos, filitos e diferentes tipos de xistos em seqüências metamórficas geradas a partir de sedimentos. São compostos essencialmente por calcita (mármore calcítico) e/ou dolomita (mármore dolomítico).

O calcário é uma Rocha sedimentar de origem química, orgânica ou clástica, constituído predominantemente de carbonato de cálcio (mais de 50%), principalmente calcita.

Os calcários e os mármore se classificam na engenharia dentro do grupo de rochas carbonáticas. Estes maciços são permeáveis, apresentam cavidades devido às reações de dissolução do carbonato pela infiltração e percolação de águas ácidas, no entanto, há registros de construção de barragens com rochas calcárias, como o caso de Fukuzato, em Miyakojima no Japão e a barragem de Shuibuya no Rio Qingjian, na China.

A Tabela 2.1 exhibe as rochas usadas em diversas obras de UHE e Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) no Brasil.

Tabela 2.1 – Rochas de enrocamentos de Barragens no Brasil

Barragem	Rocha	Local
UHE Itaipu; UHE Itá;	Basalto	Rio Paraná, Foz do Iguçu/PR; Rio Uruguai, Itá/SC ;
UHE Marimondo; UHE Machadinho	Basalto	Rio Grande,Fronteira/MG; Rio Pelotas, Piratuba/SC
UHE Emborcação	Gnaisse	Rio Paranaíba, Araguari/MG
UHE Chavantes	Arenito Brando	Rio Paranapanema, divisa de SP/PR
UHE Serra da Mesa; UHE Xingó	Granito	Rio Tocantins, Minaçu/ GO; Rio São Francisco, divisa de SE/AL
UHE Irapé	Quartzo-micaxisto	Rio Jequitinhonha, Grão Mogol/MG
UHE Corumbá	Quartzito- clorita xisto	Rio Corumbá, Caldas Novas/GO
UHE Itauba; UHE Foz do Areia	Basalto	Rio Jacuí, Estrela Velha/RS ; Rio Areia, Pinhão/PR
APM Manso; UHE Tucuruí	Arenito, Metarritmito	Rio Manso, Chapada dos Guimarães/GO; Rio Tocantins, Tucuruí/PA

UHE Boa Esperança	Diabásio	Rio Parnaíba, Guadalupe divisa MA/PI;
UHE Itapebi	Granito-gnaissé	Rio Jequitinhonha, divisa da BA/MG
UHE São Simão	Basalto vesicular	Rio Paranaíba, São Simão/GO
UHE Jaguará	Quartzito	Rio Grande, Rifânia /MG
AHE Jirau	Granito e Riólito	Rio Madeira, Ilha do Padre/RO
UHE Quebra Queixo; UHE Salto Segredo	Basalto	Rio Chapecó, Ipuáçu/SC; Rio Iguáçu, Mangueirinha/PR
UHE Serra do Facão	Micaxisto felsdpático, Quartzo-micaxisto felsdpático	Rio São Marcos, divisa de Divinópolis e Catalão/GO
UHE Campos Novos	Brecha basáltica	Rio Canoas, Campos Novos/ SC
UHE Sobradinho	Anfibólito, quartzo-felsdpático	Rio São Francisco; Sobradinho/BA

2.4 ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DE ENROCAMENTOS

A alteração é definida como sendo o conjunto das transformações pelas quais passam as rochas, motivadas por fatores intrínsecos e extrínsecos, Frazão & Caruzo (1983) *apud* Retore (2005).

Os fatores intrínsecos são pertinentes à composição mineralógica da rocha e ao estado microfissural. Os fatores extrínsecos são relacionados ao meio exógeno, e incluem fatores como temperatura, umidade, agentes biológicos, entre outros. Esse conjunto de processos que acarreta a desintegração e a decomposição dos minerais e das rochas, denomina-se intemperismo.

A desintegração, causada pelo intemperismo físico, consiste na perda de coesão da rocha e na constante individualização dos minerais, sem que ocorra, necessariamente, a modificação da natureza dos minerais. Por vez, a decomposição, causada pelo intemperismo químico, provoca a modificação dos minerais que constituem a rocha.

O processo de alteração leva à degradação da rocha e os seus efeitos são observados diretamente no aumento da absorção e perda de massa.

A alterabilidade pode ser definida como a maior ou menor susceptibilidade do material à alteração.

É possível realizar a avaliação da alterabilidade de uma rocha através da sua composição mineralógica. Isso porque os primeiros minerais a se formarem no esfriamento do magma são os menos estáveis na condição de intemperismo da superfície. Tem-se como exemplo a olivina e o plagioclásio cálcico. Por sua vez, minerais como a hematita e o quartzo, últimos a se formarem no magma, são mais estáveis face ao intemperismo.

Considerando a alterabilidade, Bowen (1956) apresenta séries de reações que sugerem uma sequência de formação de minerais no líquido magmático. Minette (1982) *apud* Maia (2001) expõe uma sequência de rochas, em função da susceptibilidade à alteração dos minerais constituintes. A Figura 2.2 exhibe essas séries de minerais e sequências rochosas.

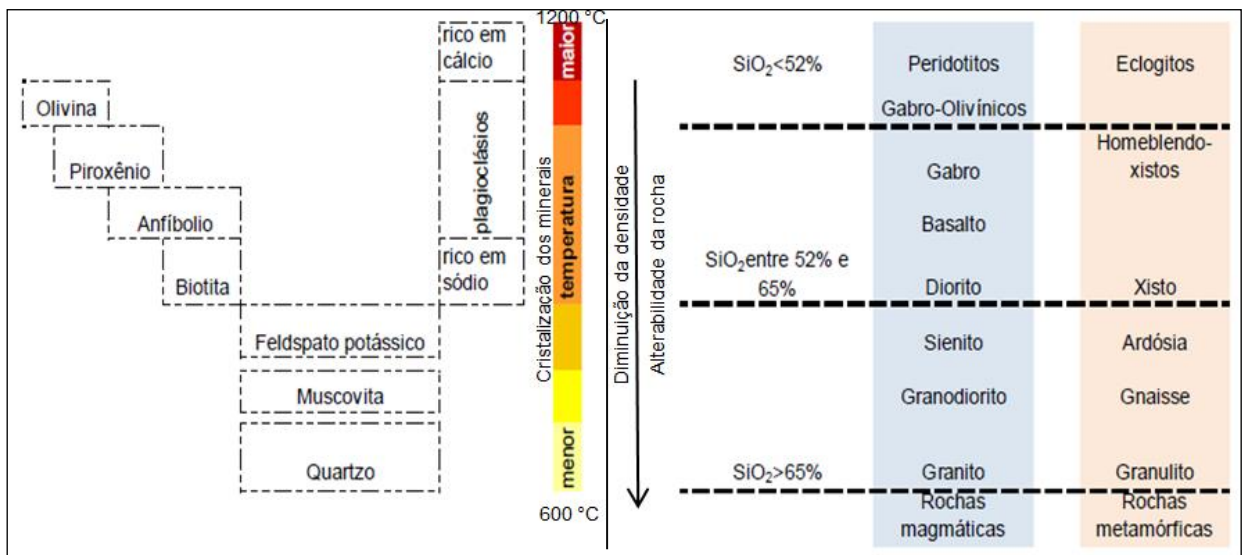


Figura 2.2 – Alterabilidade dos minerais e rochas

Moniz *et al.* (1973), propõe a avaliação do grau de alterabilidade de basaltos através da relação entre as quantidades de sílica/alumínio, denominado (K_i), e conclui que quanto maior o valor de K_i , menor a alteração do basalto.

Na tentativa de estabelecer a avaliação do grau de alterabilidade, observam-se na literatura trabalhos como: Weinert (1984) *apud* Oliveira (2012), que quantifica a influência dos fatores climáticos por um Índice Climático N, definido em função da taxa de evaporação do mês mais quente do ano e da precipitação média anual; Frascá (1998), que propõe um índice petrográfico para avaliação da alterabilidade

de rochas basálticas da formação Serra Geral; Maia (2001), que avalia a alterabilidade de basaltos da UHE de Marimbondo, da Pedreira Rio Grande e do granito da UHE Serra da Mesa através de um ensaios de laboratório em equipamentos de grandes dimensões, permitindo a previsão da resistência e deformabilidade dos enrocamentos a longo prazo; Peltier (1950) *apud* Maia (2001), que estabelece uma correlação gráfica entre a temperatura média anual, a precipitação média anual e os prováveis tipos e intensidade de alteração, apresentados na Figura 2.3.

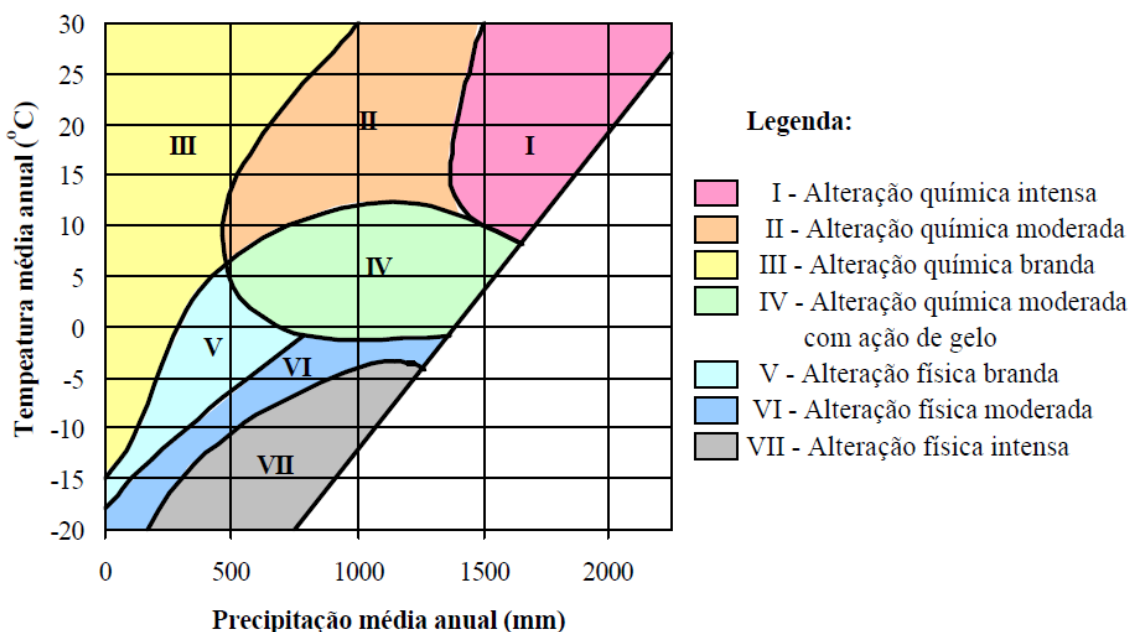


Figura 2.3 – Tipos de alteração em função da temperatura e da precipitação (Peltier, 1950), extraído de Maia (2001).

Pesquisadores como Irfan & Dearman (1978), Cole & Sandy (1980) propõem a utilização de índices petrográficos baseados na proporção de minerais são e alterados e aspectos texturais para quantificação de rochas.

Mendonça (2014) ressalta que todo o maciço de enrocamento, a montante e a jusante, encontra-se exposto à possibilidade da ocorrência de colapso primário provocado por forte chuva durante a fase de construção e ao efeito da degradação (Figura 2.4), na Tabela 2.2 são apresentados os mecanismos de degradação das barragens para cada zona de localização do enrocamento.

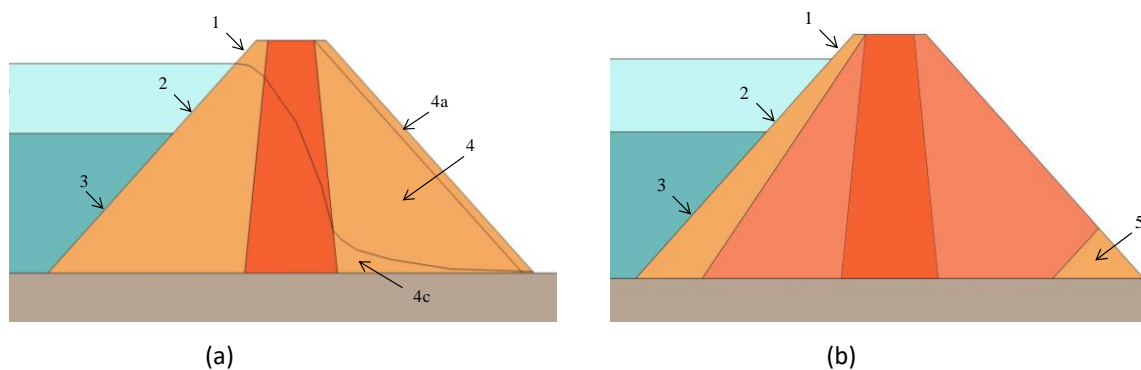


Figura 2.4 - Barragem de enrocamento com vedação central. (a) Barragem de enrocamento com núcleo impermeável; (b) Barragem de terra com rip-rap e dreno de pé

Tabela 2.2 - Mecanismos de degradação de enrocamento (Mendonça,2014)

Zonas	Saturação e Secagem	Variação de Temperatura	Variação da umidade	Lixiviação Contínua	Inundação	Radiação Ultravioleta	Nevoa Salina
1	x	x	x	x	-	x ^(**)	x
2	x	x	x	x	x ^(*)	x ^(**)	x
3	-	-	-	-	x	-	-
4a	x	x	x	x	-	x	x
4b	-	-	x	x	-	-	-
4c	-	-	x	x	x	-	-
5	x	x	x	x	-	x ^(**)	x

(*) Ocasional

(**) Só na parte exposta

2.5 CRITÉRIOS DE PROJETO E RETROANÁLISE DE BARRAGENS

A escolha do tipo de barragem depende, principalmente, da existência de material qualificado para sua construção, dos aspectos geológicos e geotécnicos e da conformação topográfica do local da obra. Além desses fatores, o Comitê Brasileiro de Barragens - CBB (2003) enfatiza a importância da disponibilidade de solo ou rocha com qualidade e quantidades adequadas; a natureza das fundações; as

condições climáticas que podem dificultar a construção de determinados tipos de barragens.

No cálculo de barragens, a caracterização dos materiais é um dos grandes problemas, pois o solo ou o enrocamento são heterogêneos e têm comportamento reológico, surgindo assim à dificuldade de aproximar o seu comportamento por uma lei constitutiva adequada.

Baseados em análises teóricas e experimentais, no ano de 2003, a ELETROBRÁS e o CBB publicaram uma edição com o “Critério de projeto civil de Usinas Hidrelétricas”, elaborado nos moldes do *Bureau of Reclamation-USBR*, que “tem por finalidade orientar as condições exigíveis na verificação da segurança das estruturas principais das UHEs e estabelecer as definições, normas, diretrizes e critérios de quantificação das ações e das resistências a considerar no projeto das estruturas, que permitam a máxima eficiência, durabilidade e confiabilidade”. Nos casos não orientados na publicação, é sugerida a utilização de normas e diretrizes internacionais, e especificamente para enrocamentos, recomenda a utilização das orientações do *U.S. Corps of Engineer - Design Manual EM - 1110-1-1902 - Stability of Earth and Rockfill Dams*.

Não há regulamentações quanto à reabilitação de barragens existentes.). O Comitê Brasileiro de Barragens e a Agência Nacional das Águas (ANA), estabelecem diretrizes quanto a inspeções periódicas e de instrumentação das estruturas, cabendo aos gestores, através de monitoramento, decidir sobre as intervenções nas estruturas.

As grandezas, cuja medição é recomendada para qualquer tipo de barragem, são:

- Os níveis da água no reservatório, a montante e a jusante;
- As temperaturas do ar e da água do reservatório;
- As precipitações
- A sismicidade, em regiões com históricos desses acontecimentos.

Nas barragens de aterro recomendam-se as seguintes medições:

- Deslocamentos superficiais, por métodos geodésicos;
- Recalques, na barragem e na fundação, por intermédio de medidores e placas;
- Deslocamentos da barragem e na fundação, por intermédio de inclinômetros;
- Pressões da água, na barragem e fundação, por intermédio de piezômetros;

- Tensões totais, na barragem, por intermédio de células de pressão total;
- Medidores de vazão na fundação.

Nas barragens de concreto são recomendados a auscultação e o monitoramento das seguintes grandezas:

- Deslocamentos do paramento de jusante e em galerias, por métodos geodésicos;
- Deslocamentos da barragem e fundação por pêndulos, diretos e invertidos, no caso de existirem poços de prospecção / drenagem na fundação; ou deslocamentos na fundação por roseta de extensômetros de hastes a 30°, um vertical e outros dois inclinados de 30°, (com profundidade mínima de 20 m ou metade da altura (H) de barragens com $H > 40m$);
- Movimentos diferenciais de juntas, por meio de medidores de junta;
- Tensões e deformações no concreto, por meio de deformímetros e tensômetros;
- Temperaturas no corpo da barragem, por meio de termômetros;
- Pressões da água na fundação, por meio de piezômetros;
- Vazões na barragem e fundação, por meio de medidores de vazão.

A Tabela 2.3 expõe a frequência mínima das leituras e medições citadas acima para o período de operação das barragens de terra/ enrocamento e concreto.

Tabela 2.3 - Frequência de monitoramento das barragens de terra, enrocamento e concreto após o primeiro ano de operação

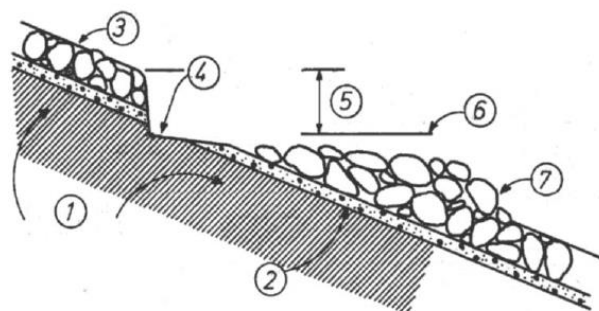
Barragens de Terra/Enrocamento		Barragens de concreto	
Tipo de Observação	Período de Leitura (dias)	Tipo de Observação	Período de Leitura (dias)
Deslocamentos superficiais (topografia)	180	Deslocamentos (geodesia)	180
Deslocamentos internos	30	Deslocamentos relativos	15
Deformação	30	Deslocamentos entre blocos/ monolitos	30
Pressão total e efetiva	30	Deformação interna	30
Poropressão	15	Tensão	30
Subpressão	15	Pressão intersticial	30

Nível d'água	15	Sub-pressão	7 a 15
Vazão de infiltração	7	Vazão de infiltração	7
		Temperatura do concreto	30

No que diz respeito a enrocamentos, as rochas devem ser caracterizadas compreendendo a descrição dos diversos estágios de decomposição do maciço, os graus de resistência ou dureza e de fraturamento; quando não for possível a realização de ensaios, serão utilizados valores obtidos em outros locais, com materiais semelhantes devidamente adaptados às condições vigentes no caso em análise. Os critérios de projeto adotados para o dimensionamento do enrocamento de proteção de talude é o de Taylor, que estabelece a massa dos blocos de rocha em função da altura da onda prevista no reservatório, ELETROBRÁS (2003). As orientações do *U.S. Corps of Engineer, EM - 1110-1-1902* preveem enrocamento com as características mínimas aplicadas aos agregados na construção civil.

Os problemas mais frequentes nos taludes de montante com proteção em enrocamento são a erosão ou deslocamento de blocos pela ação de ondas, e a desagregação de blocos de rocha.

Segundo a versão preliminar do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens da ANA (2015), quando uma onda atinge o talude, a água sobe no interior do *rip-rap* e da camada de filtro (que deverá existir). Esta ação pode causar danos: se os materiais da camada de filtro forem demasiado finos, podem ser arrastados, até provocar o deslocamento dos blocos e deixar o aterro exposto à erosão; por outro lado, se o peso médio dos blocos de enrocamento não for suficiente para resistir às forças hidrodinâmicas das ondas, os blocos podem ser deslocados ou arrastados sobre a camada de filtro. A Figura 2.5 apresenta uma ruptura típica de enrocamento.



- (1) Aterro compactado;
- (2) Camada filtrante;
- (3) Talude de montante da barragem;
- (4) Área erodida do talude;
- (5) Amplitude das alturas das ondas durante a tempestade;
- (6) Nível de retenção do reservatório no momento da tempestade;
- (7) Blocos de rocha deslocados são depositados abaixo do nível de retenção do reservatório.

Figura 2.5. Ruptura característica de um *rip-rap*. (ICOLD, 1993, *apud* ANA 2015)

A Tabela 2.4 apresenta de forma sintética, os critérios para escolha das rochas do enrocamento e de projetos encontrados na literatura.

Tabela 2.4 Critério de projeto de enrocamento e qualidade das rochas

Referência	Critério para o dimensionamento do enrocamento	Especificação das rochas
Critério de projeto civil de Usinas Hidrelétricas, ELETROBRÁS (2003)	A massa das partículas de enrocamento; Altura da onda prevista no reservatório.	Descrição dos estágios de decomposição do maciço, os graus de resistência ou dureza e de fraturamento; Estudo e observação de obras anteriores
<i>Materials for Embankment Dams, United States Society on Dams (2011)</i>	Graduação; Compactação; Permeabilidade; Compressibilidade; Resistência e deformação do maciço.	Resistência à compressão: 70 a 200 MPa alta; 17,0-70 MPa média; baixa de 3,5-17,0 Mpa. Absorção de água 1%.
NCHRP REPORT 568 <i>Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality Control, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD EXECUTIVE COMMITTEE (2006)</i>	Tamanho da partícula; Graduação; Espessura do enrocamento.	Ensaio para análise da qualidade do material. Absorção inferior a 2 % Perda por ataque a sulfato de sódio inferior a 10%
(ASTM C131, ASTM C535, USBR 4131):		Perda de massa no ensaio Los Angeles de 10% para 100 rotações; Perda de 40% para 500 revoluções.
<i>Bureau of Reclamation. 2012. Design Standard No. 13, Embankment Dams. Chapter 7.</i>	Estabilidade do talude Altura da onda sobre o talude Peso e espessura do enrocamento Graduação	Peso específico 2,6 g/cm ² ; Absorção máx 2%; Perda por ataque a sulfato de sódio inferior a 10%.
<i>Range of 50 States Dept. of Transportation</i>		Perda por sulfato de magnésio máximo entre 10-20%; Desgaste por abrasão Los Angeles 40-60%; Absorção 2-6%.
<i>U.S. Corps of Engineers</i>	Estabilidade Fator de segurança	Perda por sulfato de magnésio máximo 5 %; Desgaste por abrasão Los Angeles 20%; Absorção 1%.

Apesar da aparente evolução, os projetos atuais de barragens de enrocamento ainda são desenvolvidos com critérios fundamentalmente empíricos, Cooke (1999). Atualmente, tem-se certo domínio no controle executivo da obra e um desenvolvimento tecnológico dos equipamentos de transporte e compactação. Contudo, há dificuldade para entender o comportamento mecânico dos enrocamentos que constituem o corpo da barragem.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As rochas são materiais de construção cujo uso é primordial na engenharia desde os tempos remotos, sendo aplicados em 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 adequação de um material para uma aplicação particular não deve ser definida sem o conhecimento dos seus parâmetros geomecânicos 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.

No sentido de estabelecer critérios de segurança em obras hidráulicas e projetos de barragens, o CBB lançou uma publicação que orienta os profissionais e gestores quanto ao critério de projeto de barragens no Brasil e auscultação geotécnica. No entanto, quando comparado com a literatura, nota-se a deficiência de uma série de informações relativas aos projetos e à análise de desempenho da rocha.

A obtenção dos parâmetros geotécnicos dos enrocamentos sofre limitações devido à dificuldade de realização dos ensaios em escala real, que necessitam de equipamentos de grandes dimensões e um considerável volume de amostras.

Os resultados de instrumentação de campo e retroanálise não podem ser aplicados indiscriminadamente, sendo necessário que haja similaridade dos materiais de enrocamentos e dos procedimentos construtivos.

CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO

3.1- APRESENTAÇÃO

Os enrocamentos estudados são provenientes de cinco distintas Usinas em funcionamento: UHE Furnas com enrocamento em quartzito, UHE Marimbondo com enrocamento de basalto e UHE Porto Colômbia com enrocamento em diabásio e seixo rolado, ambas localizadas na região Sudeste do Brasil, na Bacia do Rio Grande; APM Manso na Bacia do rio Manso, com enrocamento em arenito, localizada no Centro-Oeste do País, e UHE Foz do Chapecó, com enrocamento construído em basalto, situada na Bacia do Rio Uruguai, região Sul do País. A Figura 3.1 exibe a localização dessas Hidrelétricas.

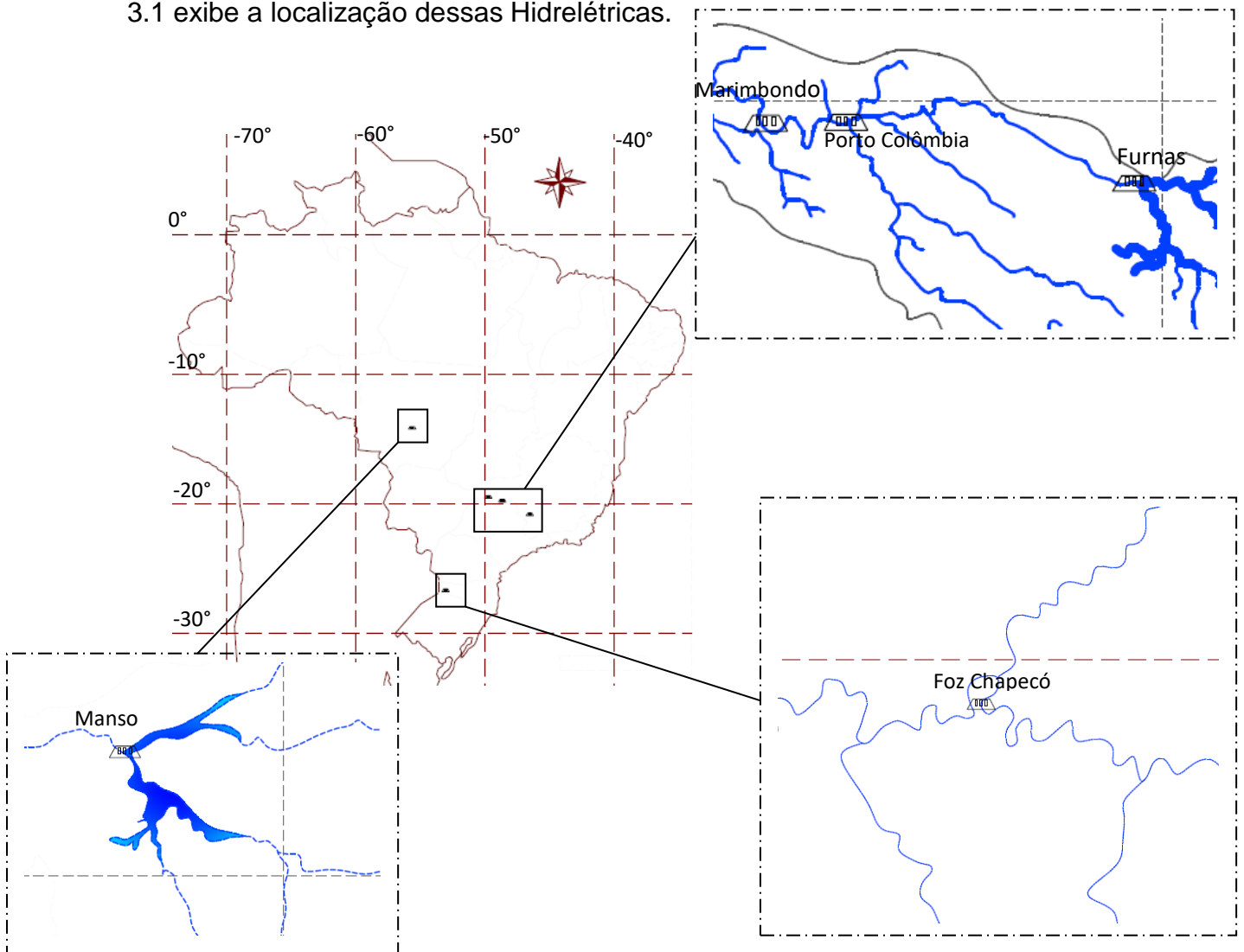


Figura 3.1 – Localização das UHE (Adaptado Anuário Estatístico do Brasil, 2003)

A seguir são detalhadas as respectivas áreas de estudo, o clima predominante de cada região, as barragens e os enrocamentos.

3.1.1- Usina Hidrelétrica de Furnas

Localizada entre os Municípios de São João Batista do Glória e São José da Barra, no Estado de Minas Gerais, a UHE de Furnas (Figura 3.2) foi a primeira a ser construída pela empresa da qual herdou o nome. Sua construção começou em julho de 1958, tendo a primeira unidade entrado em operação em setembro de 1963, totalizando 1216 MW de potência instalada.



Figura 3.2 – UHE de Furnas

O clima predominante região é o tropical de altitude, que se caracteriza por ser mesotérmico, úmido, com chuvas torrenciais e orográficas. A precipitação média anual varia entre 1300 mm e 1600 mm. O trimestre mais seco ocorre nos meses de junho, julho e agosto com valores médios da ordem de 60 mm. O trimestre mais úmido ocorre nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, com valores médios de 750 mm. A temperatura média anual da região mineira oscila entre 21°C e 23°C. O verão e a primavera são os períodos mais quentes, quando as máximas diárias

variam em torno de 28 °C e 30 °C. No inverno, a temperatura é inferior a 18 °C. (PHD Furnas, 2013).

Tratando do aspecto estratigráfico geral, as rochas que afloram na região são da unidade do Complexo Basal de Campos Gerais, e do Grupo Araxá. Na área de implantação da barragem, dentro da Nappe de Passos, há o predomínio do Quartzito neoproterozóicos aflorado, que corresponde a um pacote de quartzitos com espessuras variando de 30 a 100 metros com intercalações centimétricas a métricas de muscovita-xisto e muscovita-quartzo xisto. O quartzo perfaz uma massa finamente recristalizada, com contatos intergrãos suturados, contendo filmes ou cristais dispersos de mica branca e de clorita. Forte foliação planar é definida por estes dois minerais, além de uma foliação oblíqua definida por muscovita e/ou bandas de extinção ondulante no quartzo, (UERJ/CPRM, 2007).

O embasamento litológico da bacia do Rio Grande compreende uma complexa associação de rochas cristalinas com idades de formação distintas e intensamente deformadas por eventos tectônicos, com aquíferos representados pelas fissuras e diáclases interconectadas, sendo sobrepostas por coberturas detríticas e depósitos colúvio-aluvionares.

A barragem de enrocamento situa-se no trecho médio do Rio Grande, possui núcleo de argila, largura no coroamento de 15 m, comprimento no coroamento de 554 m, podendo atingir o volume total de 9.450.000 m³. A Figura 3.3 mostra a vista superior da UHE.



Figura 3.3 – Vista Superior da UHE de Furnas

O enrocamento é composto por quartzitos (Figura 3.4), com laminações plano paralelas e estratificações, revelando sinais de alteração.



(a)



(b)

Figura 3.4 – (a) Talude de montante. (b) Enrocamento em quartzito.

Em trechos do talude de montante foi necessária a intervenção de reforço, com lançamento de basalto e construção de muro em gabião, para a estabilização, como mostrado na Figura 3.5.



(a)

(b)

Figura 3.5 – (a) Enrocamento com intervenção em basalto. (b) Muro em gabião.

No instante de coleta das amostras, a UHE operava com o reservatório em 28% de sua capacidade hídrica. A Figura 3.6 apresenta a seção típica da barragem.

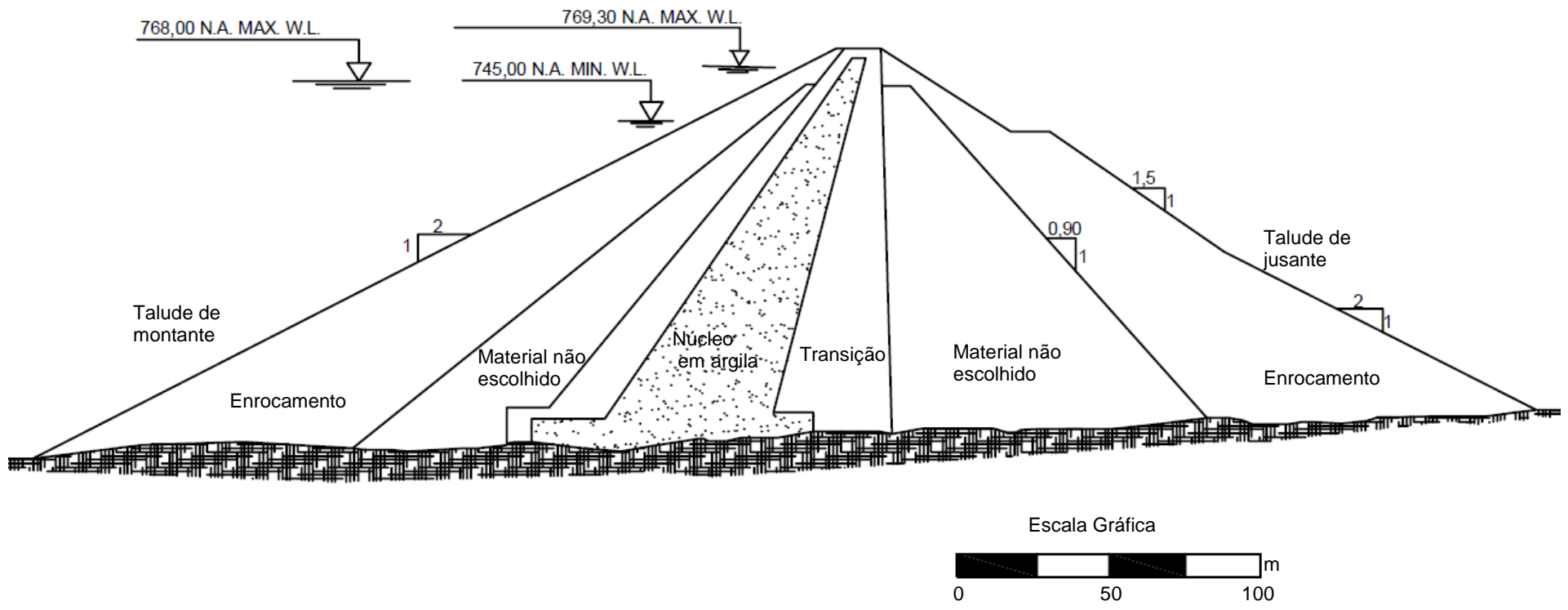


Figura 3.6 – Seção Típica da UHE de Furnas

3.1.2 - Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia

Usinas hidrelétricas de baixa queda são raras no Brasil. A UHE de Porto Colômbia, com uma potência instalada de 320 MW, é a única instalação desse tipo no Sistema FURNAS. Os trabalhos de construção foram iniciados em março de 1970, e a usina foi colocada em operação em junho de 1973. Em janeiro do ano subsequente, já atingia sua capacidade total instalada, que é de 320 MW.

Localizada no rio Grande, entre os municípios de Planura (MG) e Guaíra (SP), foi construída para aproveitar as descargas, promovida pelo reservatório da UHE de Furnas.

A barragem de Porto Colômbia, mostrada na Figura 3.7, forma um lago com aproximadamente 143 km², constituindo-se em outro ponto importante de regularização do rio.



Figura 3.7 – UHE Porto Colômbia

O clima predominante região é o tropical de altitude, as chuvas concentram-se entre os meses de dezembro a fevereiro, as temperaturas mais quentes são registradas nestes mesmos períodos, ficando em média de 28° a 30° C.

Segundo informa o relatório do Programa de Monitoramento da Qualidade da Água do Reservatório da UHE Porto Colômbia (1996-2000), o clima na região do reservatório da UHE pode ser dividido em quatro estações com diferentes períodos:

Uma estação quente e úmida: de novembro a março; um período de transição da estação chuvosa para a seca, com redução drástica de temperatura: de abril a maio; uma estação fria e seca: de junho a agosto; um período de transição da estação seca para a chuvosa, com rápido aumento de temperatura: de setembro a outubro. Em toda bacia, as temperaturas médias anuais são de cerca de 22° C e o total de chuva no período de seca não ultrapassa 30 mm. O regime pluviométrico apresenta valores médios anuais entre 1.600 mm e 1.800 mm, com um período de estiagem distribuído entre junho e agosto.

Nesta região, são encontradas rochas magmáticas da formação Serra Geral, que ocorrem nas regiões Sudeste e Sul do País; o afloramento de basaltos ocorre em faixas estreitas associadas a vales profundos.

A barragem possui seção homogênea em argila, com altura máxima de 40m, com a largura de 10 m no coroamento e 2.150 metros de comprimento de crista, proteção do talude de montante com enrocamento, devido às oscilações e às correntes da água.

O enrocamento lançado (do tipo *rip-rap*) é composto por materiais distintos: seixo rolado e diabásio (visualmente similar ao basalto), mostrado na Figura 3.8.

Foram observadas a presença de fissuras e a desintegração dos blocos de diabásio durante a coleta das amostras.

As estruturas de concreto são do tipo gravidade, com um volume total de 88.011 m³ e comprimento de crista de 184 metros, que dividem a barragem em dois maciços desiguais, ficando o maior junto à margem esquerda (987 metros).

A UHE Porto Colômbia pode atingir um volume total de 2.736.497 m³ de água. Tem o nível de água máximo na cota de 467,2 metros e o mínimo operacional em 465,5 metros, no entanto, a flutuação do nível da água ocorre em torno de 50 cm entre o período de máxima e mínima vazão.



(a)

(b)

Figura 3.8 – (a),(b)- Enrocamento de Porto Colômbia composto por diabásio e seixo.

A área de implantação da barragem (Figura 3.9) corresponde a sucessões supracrustais arqueanas, que incluem rochas metavulcânicas ultrabásicas (komatiitos) e máficas magnesianas (basaltos), rochas subvulcânicas máficas a félsicas (diabásios, riodacitos), (CPRM, 2010).



Figura 3.9 – Vista Superior da UHE de Porto Colômbia

A Figura 3.10 ilustra a seção transversal típica da barragem da margem esquerda da UHE.

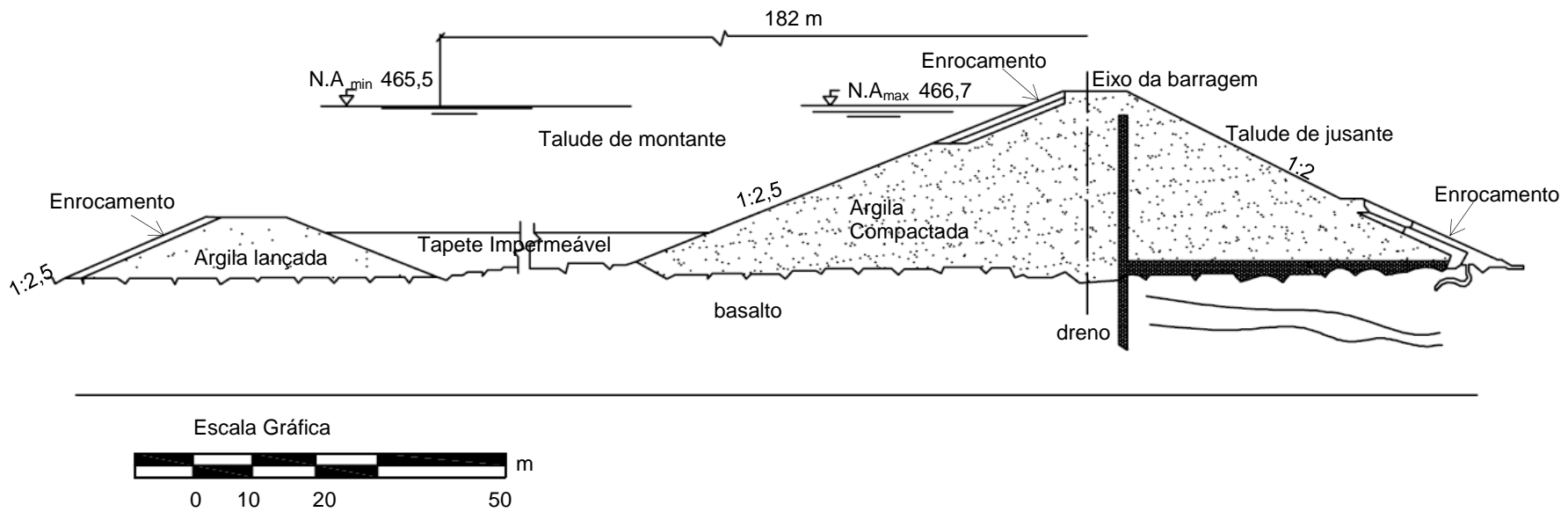


Figura 3.10 – Seção Típica da Barragem de Terra da Margem esquerda, da UHE de Porto Colômbia.

3.1.3- Usina Hidrelétrica de Marimbondo

Localizada no rio Grande, entre as cidades de Icém (SP) e Fronteira (MG), a UHE de Marimbondo (Figura 3.11) foi construída sobre uma cachoeira de mesmo nome, que apresentava aproximadamente 30 metros de altura. É a segunda maior potência instalada dentre as usinas de FURNAS, 1.440 MW. As obras foram iniciadas em 1971. A primeira unidade entrou em operação comercial em outubro de 1975.



Figura 3.11 – Usina Hidrelétrica de Marimbondo.

A UHE de Marimbondo se situa em uma 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. O perfil geológico do local indica a presença de rochas basálticas da formação Serra Geral da era Mesozóica Superior.

Construída com uma seção homogênea em argila e enrocamento em basalto, a barragem tem altura máxima de 94 m, com uma largura de 10 m no coroamento e

um comprimento aproximado de 3.100 m, podendo atingir um volume total de 14.400.000m³ de água. A Figura 3.12 exibe a vista superior da Usina.



Figura 3.12 – Vista Superior da UHE de Marimbondo.

Segundo Maia (2001) o material utilizado no corpo do aterro da barragem foi um solo argiloso muito arenoso, retirado de áreas de empréstimo situadas junto às ombreiras. Para os filtros, utilizaram-se depósitos de areia ao longo do rio. O enrocamento de proteção do talude de montante e do enrocamento para drenagem de pé do talude de jusante corresponde à rochas escavadas das fundações das estruturas principais de concreto, o enrocamento de proteção foi executado por lançamento dos blocos de rocha tipo *rip-rap*, juntamente com a construção do corpo do aterro.

O basalto denso e um basalto vesicular foram usados no enrocamento de proteção, que vem apresentando sinais de alteração por desintegração.

Ao estudar o enrocamento com 25 anos de exposição no campo, Maia (2001) enfatiza que as possíveis causas deste tipo de alteração estão relacionadas à presença de fissuras no material. Esta desintegração ocorre devido às variações térmicas diárias nos blocos, gerando concentrações de tensões nas fissuras e provocando a separação dos blocos. Além disso, as fissuras do basalto intacto se encontram preenchidas. A alteração do material de preenchimento destas fissuras é também condicionante para a desintegração dos blocos.

A Figura 3.13 mostra enrocamento de proteção do talude.



(a)

(b)

Figura 3.13 – Enrocamento de proteção, UHE de Marimbondo.

A Figura 3.14 exibe a seção típica da barragem.

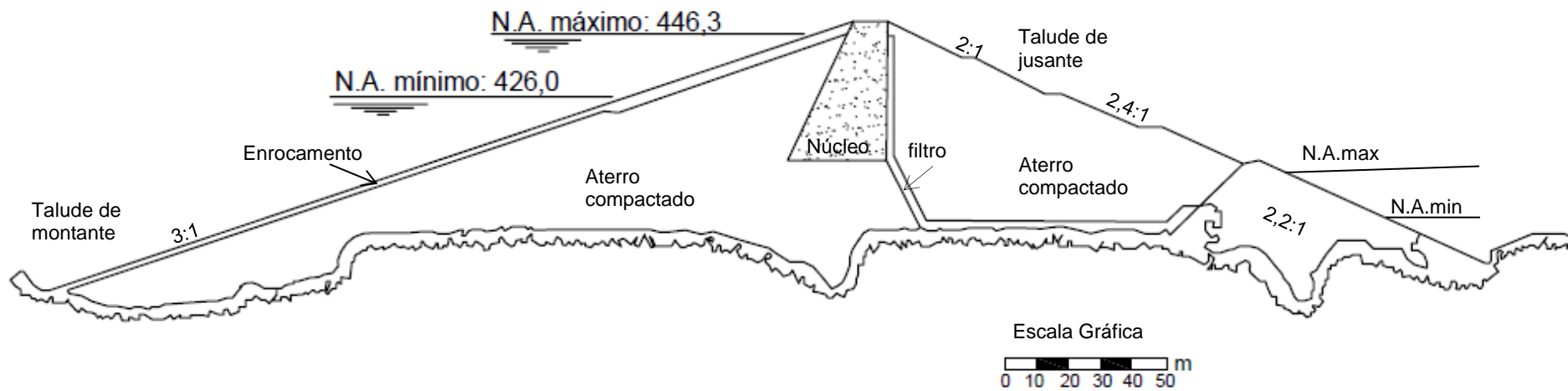


Figura 3.14 – Seção Típica da UHE de Marimbondo

3.1.4 Usina Hidrelétrica de Manso

O reservatório da UHE de Manso está localizado entre os municípios de Chapada dos Guimarães e Brasilândia, na bacia do rio Manso, tendo como principais afluentes e contribuintes para formação do Reservatório de Manso os rios Casca-Roncador, Quilombo e Palmeiras. Segundo Lima (2001), a implantação da UHE de Manso no centro-sul do Estado de Mato Grosso/Brasil foi planejada no final da década de 70, tendo como preocupação a mitigação das cheias ocorridas na região e que afetavam periodicamente as cidades de Nobres, Rosário Oeste, Acorizal e Cuiabá.

A Usina (Figura 3.15) iniciou suas obras em 1988, tendo a primeira unidade geradora entrado em operação em novembro de 2000 e a última em maio de 2001, com os seguintes objetivos: gerar eletricidade, controlar enchente, melhorar as condições de irrigação, facilitar a navegação, além de melhorar o turismo e as atividades de lazer, recebendo o nome de APM – Manso (Aproveitamento Múltiplo de Manso).



Figura 3.15 – (a) Vista frontal à jusante; (b) vista superior, UHE de Manso.
(fonte: www.camarachapadadosguimaraes.mt.gov.br, acesso em 01/07/2016)

O clima da região onde está localizado o reservatório da hidrelétrica de Manso pode ser caracterizado como do tipo Tropical, com duas estações bem definidas, com temperaturas altas durante todo o ano, com uma média anual de 26°C e total anual de chuvas em torno de 1300 mm, com seus regimes controlados, sobretudo por massas de ar equatoriais e tropicais (Stralher, 1996).

Com relação à caracterização geomorfológica e geológica, a área da bacia do rio Manso abrange três unidades, a saber:

- 1) no extremo norte/nordeste da bacia, têm-se a ocorrência da unidade geomorfológica Província Serrana que, segundo Ross (1991), se caracteriza por um relevo muito acidentado decorrente de dobramentos e falhamentos das camadas das rochas calcárias, arenitos, siltitos e argilitos pertencentes ao Grupo Alto Paraguai;
- 2) no sentido norte/sul, verifica-se a ocorrência de terrenos baixos, que se caracterizam por rochas do pré-cambriano superior, representadas por filitos, xistos, quartzitos, mármore, calcários, dolomitos etc, do Grupo Cuiabá;
- 3) ocupando praticamente toda a porção sul/sudeste da área da bacia, tem-se a unidade geomorfológica "Planalto dos Guimarães", onde predominam rochas mesozoicas dos Grupos Parecis e Bauru, representadas localmente principalmente pelos arenitos das formações Botucatu e Marília, Almeida (1948).

Com potência instalada de 212 MW, a Usina APM-Manso possui a barragem com altura máxima de 72 m, comprimento total de 3,6 quilômetros, composta de uma estrutura mista com extensão de 140,00 m de concreto e 3.120,00m de solo compactado e 420,00m de enrocamento em arenito, área de inundação de 387 km² na cota máxima normal, PROMANMT(2016).

Como enrocamento de proteção do talude de montante (rip-rap) da Usina APM-Manso (Figura 3.16), foram usados blocos de rocha obtidos das escavações obrigatórias e de pedreiras abertas com a finalidade de obtenção do material pétreo necessário à obra, constituído de metassedimentos, tais como: meta-arenitos, metaconglomerados e metasiltitos, Cavalcanti *et. al.* (2007).

O enrocamento da barragem está revelando processos de degradação acelerada com o tempo, o que se apresenta evidenciado no talude de montante, na faixa de variação do nível d'água do reservatório. As deformações nos taludes têm obrigado à execução de intervenções recorrentes para recuperação do enrocamento.



(a)



(b)

Figura 3.16 – (a) Enrocamento de proteção; (b) arenito – APM- Manso. (Fonte: Carvalho 2009)

A degradação que o material sofre no campo sugere que o mecanismo preferencial é a desagregação, induzida por fraturas e pela xistosidade da rocha, e a desintegração, com a geração de finos. Neste caso, espera-se que tais mecanismos ocorram devido às variações de umidade e temperatura sazonais e à variação do nível d'água do reservatório da Barragem, Carvalho (2009).

A Figura 3.17 exibe a seção transversal da barragem da Usina APM-Manso.

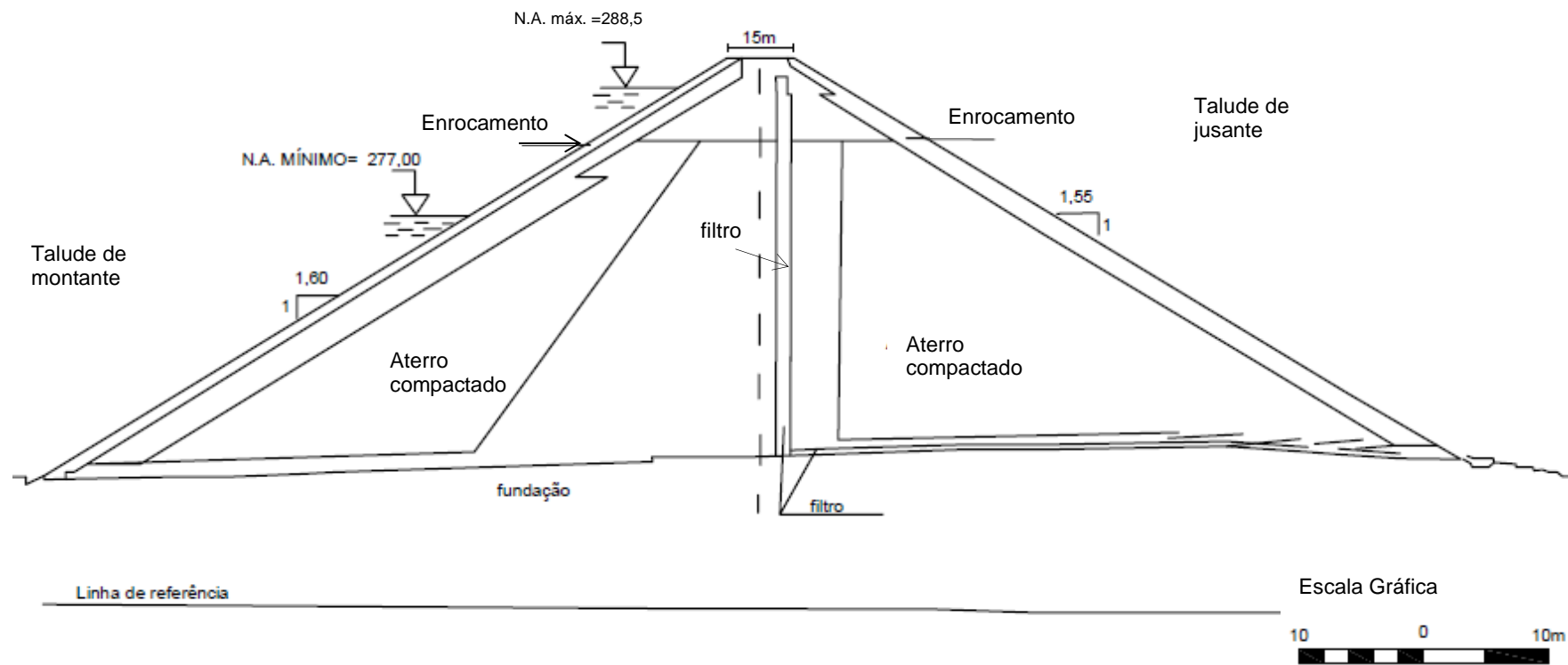


Figura 3.17 – Seção da Barragem de Terra da Margem Direita, APM-Manso

3.1.5 - Usina Hidrelétrica de Foz do Chapecó.

A UHE de Foz do Chapecó está localizada no Rio Uruguai, na divisa dos estados de Santa Catarina (entre as cidades de São Carlos e Águas de Chapecó) e Rio grande do Sul, no município de Alpestre. No local, o Rio apresenta uma grande alça em forma de U (Figura 3.18), com um desnível natural de 12 m ao longo de 19,5 km de comprimento, viabilizando a implantação do empreendimento.



Figura 3.18 – Vista superior da UHE Foz do Chapecó. (Fonte: [www.fozdochapeco.com.br/banco de imagens](http://www.fozdochapeco.com.br/banco_de_imagens), acesso em 14/05/2016)

A construção da Usina iniciou-se em março de 2007, sendo inaugurada em dezembro de 2010, com uma potência instalada de 855 MW, um reservatório com área de 79,2 Km², dos quais 40,0 Km² correspondem à própria calha do rio Uruguai. É composta por uma barragem principal de enrocamento com núcleo asfáltico com 48 m de altura, 598 m de extensão, vertedouro em concreto armado e uma barragem em enrocamento e argila na margem direita, com altura média de 8 m e comprimento de 150 m, como mostra a Figura 3.19.



(a) (b)
 Figura 3.19 – (a) execução de núcleo asfáltico e transição (b) Estrutura de fechamento da calha do Rio Uruguai. (Fonte:www.fozdochapeco.com.br/banco de imagens, acesso em 14/05/2016).

A obra se destaca no cenário nacional por ser a primeira a adotar, em sua barragem, um sistema de núcleo asfáltico (com espessura de 55 cm), técnica comum nos Estados Unidos e em países europeus. A escolha do núcleo asfáltico ocorreu em razão das dificuldades em explorações de jazidas de argila e períodos chuvosos, o que ocasionaria atraso do cronograma da obra.

O clima da região é temperado, registrando as maiores temperaturas no mês de janeiro, em média 24°C, e menores temperaturas no mês de junho, com média em torno de 13°C. A área apresenta baixa sazonalidade, com chuva média anual de 160 mm/mês, (CENEC/2006), *apud* Guimarães (2012).

No aspecto Geológico, a região da UHE de Foz do Chapecó é constituída por rochas sedimentares da Formação Botucatu, coberta por sequência de derrames vulcânicos de natureza basáltica.

As rochas basálticas originárias das escavações obrigatórias e pedreiras da região foram usadas nos taludes e nas estruturas de concreto. Na face externa dos taludes foi lançado enrocamento do tipo *rip-rap*, com espessura de 1 metro. A Figura 3.20 mostra a seção transversal da barragem principal, com núcleo em CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente).

A Figura 3.20 apresenta a seção típica da barragem.

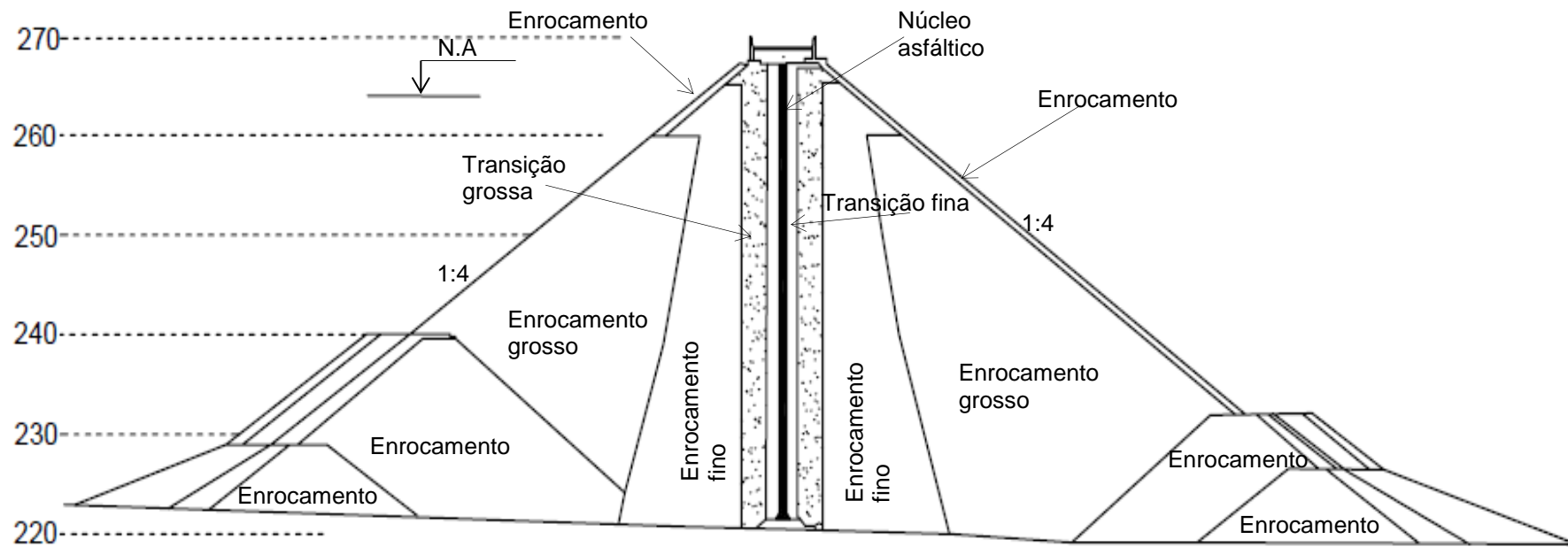


Figura 3.20 – Seção Típica da Barragem Principal -UHE Foz do Chapecó

3.2- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentadas as barragens de enrocamento, os materiais que as constituem, a região de implantação das Usinas Hidrelétricas, e os aspectos concernentes a estes locais, tais como geologia, clima e pluviosidade. A tabela 3.1 expõe de forma resumida os dados referentes às UHE estudadas.

Tabela 3.1- Resumo das UHE estudadas

UHE	Localização	Potência Instalada (MW)	Duração das obras (anos)	Tempo de operação (anos)	Material do enrocamento
Furnas	Bacia do Rio Grande, no estado de MG	1216	5	53	Quartzito
Porto Colômbia	Bacia do Rio Grande, entre os estados de MG e SP	320	3	43	diabásio e seixo
Marimbondo	Bacia do Rio Grande, entre os estados de MG e SP	1440	4	40	Basalto denso e basalto vesicular
APM-Manso	Rio Manso, no estado de Matogrosso do Sul	212	12	16	Meta-arenito E arenito
Foz do Chapecó	Rio Uruguai, no estado de Santa Catarina	855	3	6	Basalto denso

A UHE de Furnas e Manso sofreram reparos em seus taludes devido a degradação do quartzito e arenito, motivando o estudo e caracterização desses materiais.

Dentre as Usinas Hidrelétricas mencionadas destacam-se, por suas peculiaridades, a UH de Porto Colômbia, que é uma usina de baixa queda, projetada para aproveitar as descargas da UHE de Furnas; APM-Manso, que foi projetada para, além de gerar energia elétrica, melhorar a navegabilidade do rio, mitigar os problemas referentes às cheias nas cidades próximas a sua região de implantação; e a UHE de Foz do Chapecó, pelo uso de novas técnicas construtivas no país, com a execução do núcleo da barragem principal em CBUQ.

CAPÍTULO 4 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO E PROCEDIMENTOS

Devido à existência de grande variedade de composições rochosas, ao processo de intemperismo e ao o tempo de uso das barragens em questão, o estudo da degradação dos enrocamento torna-se relevante não apenas para segurança das obras de enrocamento, mas também para constante evolução do conhecimento científico.

Foram pesquisados na literatura valores referentes a ensaios de caracterização do material de enrocamento das UHE estudadas. Para a UHE de Marimbondo, foram obtidos os dados da pesquisa de Maia (2001); para a UHE Furnas, foram obtidos dados Francklin Júnior (2009). Não foram encontrados, na literatura, dados referentes à caracterização dos enrocamentos da UHE de Porto Colômbia, Manso e Foz do Chapecó. Ressalta-se que, a UHE de Foz do Chapecó que está em operação há 6 anos e Manso, em operação há 16 anos, são consideradas relativamente obras novas em relação ao período de projeto.

Para a realização de uma metodologia adequada para avaliar a degradação em materiais geotécnicos, Salles (2006) propõe um resumo esquemático dos principais ensaios nos materiais geotécnicos, mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Ensaio de Degradação de Materiais – Adaptado Salles (2006)

Descrição	Ensaio
Ensaio Indiretos:	Análise Petrográfica Avaliação Visual: microscopia ótica e eletrônica de varredura Ataque químico Índices Físicos Sanidade a Sulfatos Ensaio Acústicos Análise Química Difração de raio-X e espectrometria de raio-X Análise Granulométrica

Ensaio em Campo:			
	Propagação de ondas ultrassônicas		
Ensaio Diretos:	Degradação no Laboratório:	Lixiviação Contínua Ciclagem por Umedecimento e Secagem Degradação Washington Condensação e Radiação Ultravioleta Exposição em estufa Exposição a Névoa salina	
	Degradação no Campo:	Degradação Natural Degradação Acelerada	
	Ensaio de Desgaste:	Slake Durability Test Abrasão Los Angeles Desgaste Micro Deval Desgaste AMSLER Abrasividade CERCHAR	
		Ensaio de Impacto:	Ensaio de Impacto Treton Resistência ao Impacto do Corpo Duro

Neste estudo, foi realizada a análise química, a análise petrográfica, o ensaio de abrasão Los Angeles, desgaste Micro Deval, o ensaio de durabilidade e compressão pontual.

O quartzito de Furnas, por se tratar de uma rocha de origem metamórfica, capaz de ser britada em pequenos equipamentos, foi fragmentado no Laboratório de Degradação da UENF para a retirada da capa de alteração das amostras coletadas nos enrocamentos. Os resultados do material sem a capa de alteração foi comparado com os dados da literatura.

As partículas coletadas foram divididas em dois tipos distintos: as amostras do tipo 1 foram submetidas diretamente aos ensaios no equipamento Los Angeles; as amostras do tipo 2 foram britadas mecanicamente para a remoção da capa de alteração. A mesma granulometria foi mantida para evitar que o efeito escala, devido a dimensões distintas das partículas, interferisse nos resultados obtidos.

A seguir, são descritos os ensaios executados neste trabalho para a caracterização da degradação natural dos enrocamentos.

4.1 Análise Química

A análise química no estudo das rochas e argilas é de grande utilidade na identificação mineralógica.

A composição química das rochas foi determinada no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV), na UENF, utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X, de energia dispersiva (EDX), ou espectrometria de absorção atômica, ambos atuando acoplados a um computador para o processamento de dados.

Os ensaios não fornecem diretamente uma avaliação completa das propriedades físico-químicas da amostra, entretanto estabelecem dados importantes que auxiliam a identificação posterior dos minerais presentes na amostra.

4.2 Petrografia

A análise petrográfica é executada segundo as diretrizes da NBR 15845 - Anexo A (ABNT,2010 a), 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 do grau de alteração das rochas e de seus constituintes minerais, além da classificação formal da rocha.

A análise macroscópica não deve ser considerada como indicador quantitativo da alteração da rocha, por ser baseada em informações visuais. Outra limitação da aplicação dos índices petrográficos é a dificuldade de representatividade das lâminas.

4.3 Abrasão de Los Angeles

A amostra de agregado é colocada juntamente com esferas de aço dentro de um tambor, que gira numa frequência específica, promovendo uma interação das partículas de agregados e entre os agregados e as esferas. Esse movimento submete o material a diferentes processos: abrasão, impacto e trituração. Como o ensaio é bastante severo, acaba sendo mais um teste para avaliação da resistência

ao impacto ao invés da resistência à abrasão, por isso o ensaio atualmente vem sendo chamado de ensaio Los Angeles de Abrasão e Impacto (Rogers, 1998).

Rogers (1998) ressalta que a avaliação realizada através da utilização do ensaio de abrasão Los Angeles quantifica, na realidade, a resistência dos agregados em relação à quebra e não à abrasão. Isso se deve ao fato de que o ensaio resulta em um valor de porcentagem de massa perdida da amostra de agregado, desconsiderando a forma dos mesmos após as rotações do tambor e o contato com as esferas de aço. Sendo assim, um baixo valor do parâmetro Los Angeles, ou seja, pouca perda de massa no ensaio, não necessariamente indica agregados resistentes à abrasão. A resistência à abrasão depende da textura e varia com a granulação, o índice de forma, e está relacionada com a dureza da rocha.

O equipamento para execução do procedimento está destacado na Figura 4.1.

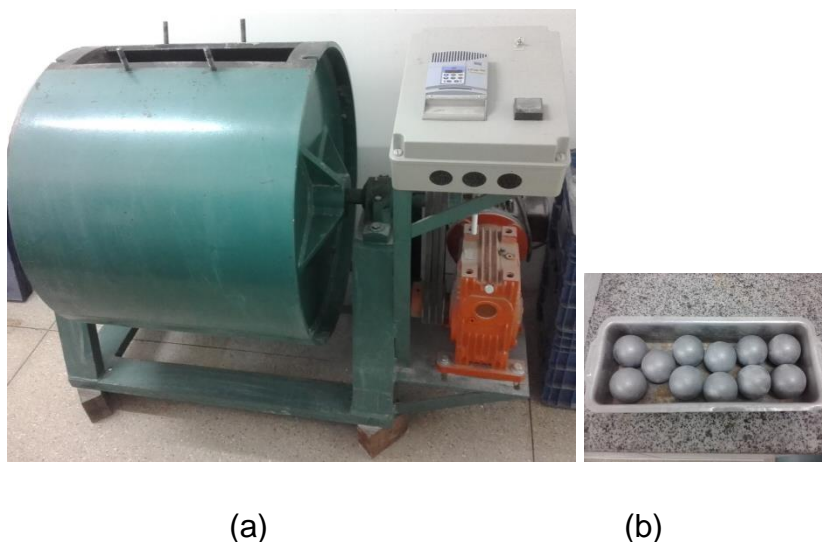


Figura 4.1 – (a) Equipamento da UENF para ensaio de Abrasão Los Angeles (b) Carga abrasiva

As faixas granulométricas, as massas e o número de esferas foram estabelecidos pela norma NM 51 (ABNT, 2001). No ensaio, o material foi submetido ao giro a 30 rpm até completar 500 rotações para as graduações usadas, nas faixas A, B, C e D. O material desgastado é aquele que passa pela peneira 1,7mm.

Os cálculos da porcentagem de perda por abrasão são feitos utilizando a seguinte equação:

$$A_L = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad \text{Equação 01}$$

Onde:

A_L é a perda de massa resultando do ensaio de abrasão Los Angeles; m_i corresponde a massa total da amostra seca colocada na máquina; m_f é a massa da amostra lavada e seca, retida na peneira 1,7mm.

A Tabela 4.2 destaca a granulometria, a massa de rocha e número de esfera usadas nos ensaios.

Tabela 4.2 Graduações A a D, massa e número de esferas para o ensaio de Abrasão Los Angeles – Adaptado NM 51 (ABNT,2001)

Peneira (mm)		Massa da Amostra (g)			
Passa	Retida	Graduação A	Graduação B	Graduação C	Graduação D
38,1	25,4	1250 ±25			
25,4	19,1	1250 ±25			
19,1	12,7	1250 ±25	2500± 50		
12,7	9,52	1250 ±25	2500± 50		
9,52	6,35			2500± 50	
6,35	4,76			2500± 50	
4,76	2,38				5000±100
Massa Total		5000±100	5000±100	5000±100	5000±100
Número de esferas		12	11	8	6
Massa total das esferas (g)		5000±25	4584±25	3330±25	2500±25

Na Literatura, são encontrados valores de referência típicos da resistência à abrasão para diversos tipos de rochas, o que se mostra na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Valores típicos da resistência a abrasão para diferentes rochas (Adaptado: Bull. Materials Science, Vol. 31, No. 2)

Tipo da rocha	Perda por abrasão (%)
Basalto	10-17
Dolomita	18-30
Gnaisse	33-57
Granito	27-49
Calcáreo	19-30
Quartzito	20-35

As partículas coletadas na UHE de Furnas foram divididas em dois tipos distintos. As amostras do tipo 1 foram submetidas diretamente aos ensaios no equipamento Los Angeles; as amostras do tipo 2 foram britadas mecanicamente para a remoção da capa de alteração. A mesma granulometria foi mantida para evitar que o efeito escala, devido a dimensões distintas das partículas, interferisse nos resultados obtidos.

Foram realizados quatro ensaios, usando amostras com graduação B, compreendendo 2500 g de rochas com graduação entre 19 e 12,5mm, 2500 g de amostras com graduação entre 12,5 e 9,5mm e onze esferas de aço submetidas a 500 giros no tambor. A tabela 4.4 apresenta as massas das amostras usadas no procedimento.

Tabela 4.4. Amostras de quartzito para Ensaio Los Angeles

Tipo da amostra	Massa total (g)
1A	5001,0
1B	5003,5
2C*	5004,3
2D*	5003,3

*Amostras britadas em laboratório.

O material submetido à abrasão desgasta-se e fragmenta-se durante o ensaio; o desgaste é avaliado pela quantidade de material passado na peneira 1,7 mm.

A Figura 4.2 exibe a rocha do enrocamento de Furnas antes e após a realização dos ensaios.

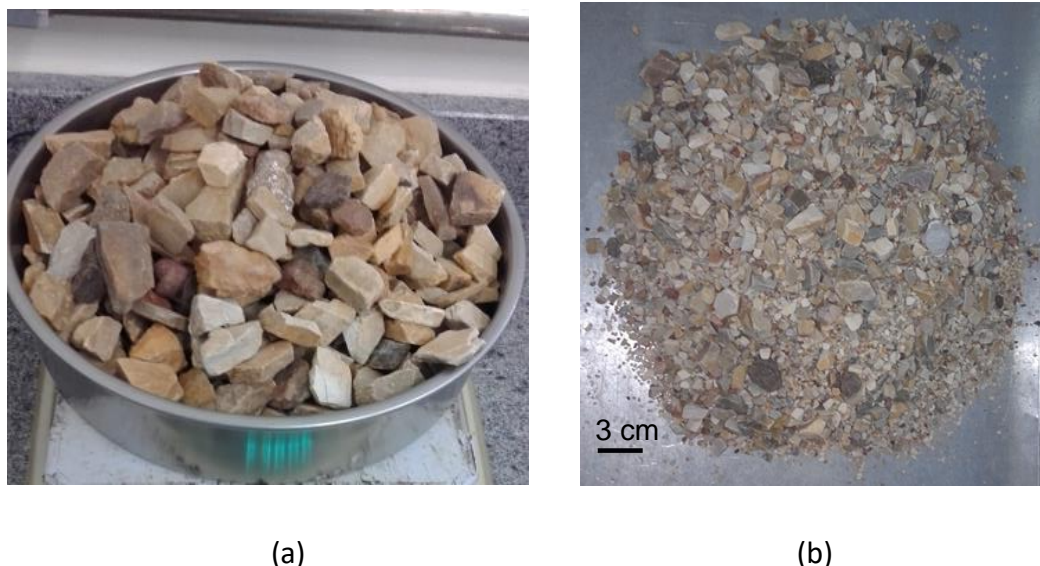


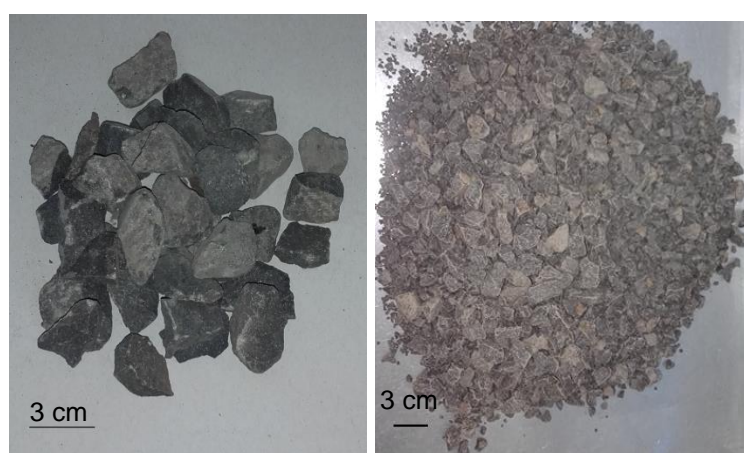
Figura 4.2 – Quartzito da UHE Furnas - (a) Amostra antes do ensaio; (b) Amostra após o ensaio de abrasão Los Angeles.

No material de enrocamento da UHE Porto Colômbia, foram realizados dois ensaios com o diabásio e um com seixo rolado, ambos usando amostras com graduação A, compreendendo cerca de 1250 g de rochas com as seguintes granulometrias: de 38,1 a 25,4 mm; entre 25,4 e 19,1mm; entre 19,1 e 12,7mm e entre 12,5mm e 9,52 mm, totalizando a massa de 5000g, submetidas a 500 giros no tambor com a carga abrasiva de doze esferas de aço.



(a) Antes

(a) Depois



(b) Antes

(b) Depois

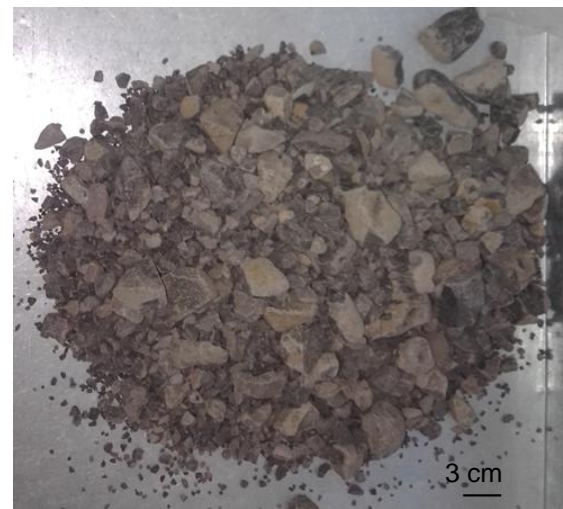
Figura 4.3 – UHE Porto Colômbia, amostra antes e após o ensaio de abrasão Los Angeles

(a) Seixo; (b) Diabásio.

No basalto da UHE Marimbondo, foram realizados dois ensaios com amostras na graduação A, compreendendo cerca de 1250 g de rochas com as seguintes granulometrias: de 38,1 a 25,4 mm; entre 25,4 e 19,1mm; entre 19,1 e 12,7mm e entre 12,5mm e 9,52 mm, totalizando a massa de 5000g, submetidas a 500 giros no tambor com a carga abrasiva de doze esferas de aço. A Figura 4.3 apresenta o material antes e após o ensaio.



(a)



(b)

Figura 4.4 – Basalto da UHE Marimbondo, (a) amostra antes do ensaio (b) após o ensaio de abrasão Los Angeles

O material de enrocamento da UHE Manso foi ensaiado nas graduações C e D, nas massas e carga abrasiva descrita na Tabela 4.1. A Figura 4.5 exibe o material antes e após a realização do ensaio de abrasão.

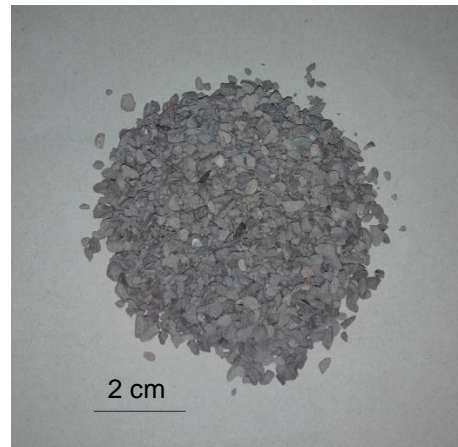
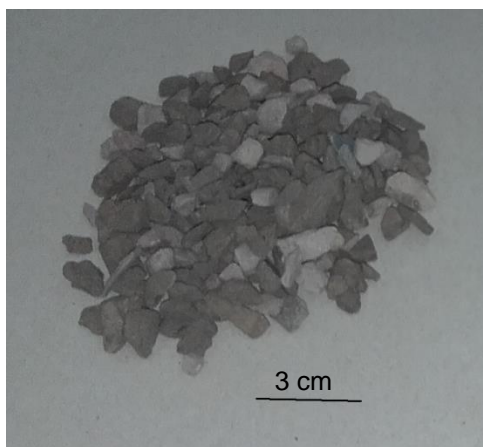


Figura 4.5 – Metarenito da UHE APM-Manso após o ensaio de abrasão Los Angeles

No basalto da UHE Foz do Chapecó (Figura 4.6), foram realizados dois ensaios usando amostras com graduação C, compreendendo as massas, a granulometria e a carga abrasiva indicada na Tabela 4.1

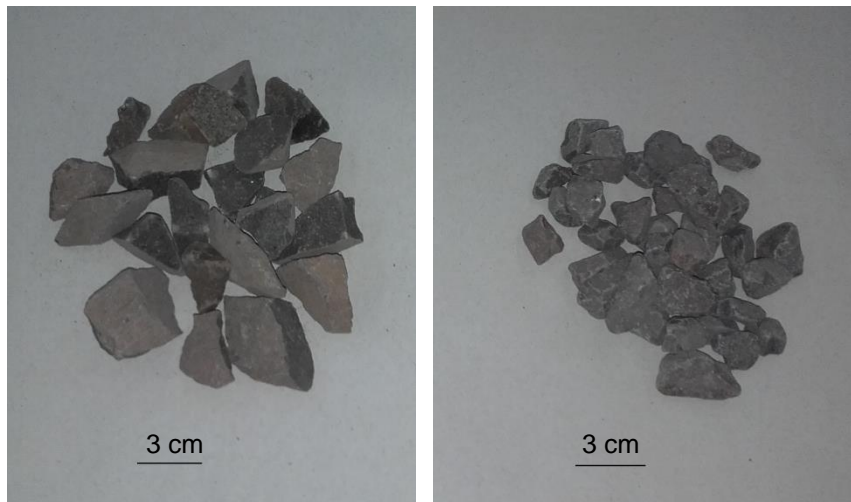


Figura 4.6 – Basalto da UHE Foz do Chapecó, (a) amostra antes do ensaio (b) após o ensaio de abrasão Los Angeles

4.4 Ensaio de Durabilidade (*Slake Durability Test*)

A durabilidade é entendida como uma característica do material e pretende medir a maior ou menor susceptibilidade à erosão em meio úmido de um dado maciço rochoso.

O ensaio de durabilidade (SD) consistiu em submeter dez fragmentos de rocha, cada um pesando entre 40 e 60g, a dois ciclos normalizados de secagem e umidificação, de dez minutos cada um, com secagem em estufa no intervalo entre os ciclos, conforme ASMT D4644-08.

Os fragmentos são colocados dentro de redes metálicas cilíndricas com 2 mm de abertura, parcialmente imersos na água (Figura 4.7), 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.

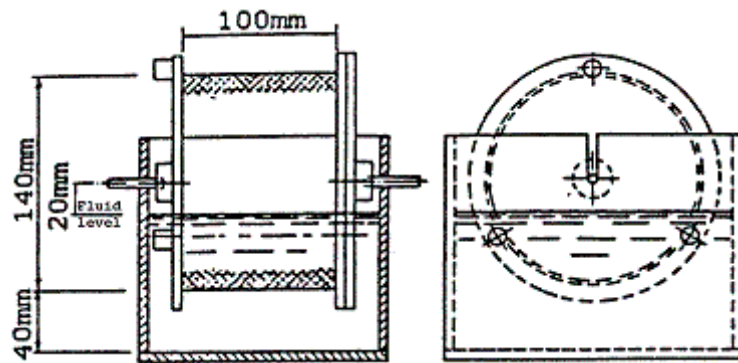


Figura 4.7 – Desenho esquemático do equipamento para ensaio de durabilidade

O equipamento utilizado neste ensaio, descrito na Figura 4.8, foi desenvolvido na UENF, e permite a elaboração do ensaio SD e o Micro Deval, com a modificação dos respectivos cilindros, rotações e carga abrasiva.

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).



Figura 4.8 - Equipamento para ensaio de durabilidade e Micro-Deval

O índice de durabilidade (Id_2) corresponde à percentagem de rocha seca que fica retida nos tambores de rede metálica (abertura de 2 mm), em dois ciclos completos de umidificação e secagem, sendo determinado através da relação entre as massas final e inicial do ensaio no primeiro e segundo ciclo, obtidos pelas Equações 02 e 03.

A durabilidade do material é classificada de acordo com a Tabela 4.5.

$$Id_1 = \frac{B-D}{A-D} \times 100\% \quad \text{Equação 02}$$

$$Id_2 = \frac{C-D}{A-D} \times 100\% \quad \text{Equação 03}$$

Onde,

A é a massa do tambor em gramas, com a amostra seca antes do primeiro ciclo; B corresponde a massa do tambor em gramas, com a amostra seca antes do segundo ciclo; C, a massa do tambor em gramas, com a amostra seca depois do segundo ciclo e D a massa do tambor, em gramas.

O ensaio de durabilidade, embora recomendado para rochas brandas, pode ser usado em rochas duras ou degradadas. Maia (2001) propõe a utilização do SD para avaliar a perda de massa superficial devido ao desgaste, para um índice de durabilidade (Id_5), equivalente a cinco ciclos no equipamento SD.

Tabela 4.5- Classificação da durabilidade (Maia 2001)

Classificação da durabilidade	Perda de massa (%)		
	Rochas brandas		Rochas duras
	1º ciclo	2º ciclo	
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

A literatura menciona o uso do SD para vários tipos rochosos e, ainda, para o estudo da degradação de materiais cerâmicos. A Tabela 4.6 destaca tais trabalhos.

Tabela 4.6 – Trabalhos encontrados na literatura usando o SD

Material utilizado	Análise realizada	Referência
Granito	Caracterização da alteração de granitos	Ferreira & Antão (2006)
Rochas sedimentares	Durabilidade dos materiais de acordo com o teor de carbono	Keaton <i>et al.</i> (2010)
Basalto e granito	Alterabilidade de enrocamentos	Maia (2001)
Gnaisse ornamental	Estudo do efeito da energia de desgaste na previsão da durabilidade	Dias Filho (2012)
Materiais cerâmicos	Degradação em materiais cerâmicos	Fraga (2011)
Filito	Influência da Durabilidade no comportamento geotécnico de filitos	Silva (2012)

Foram usados 20 fragmentos de rochas dos enrocamentos das Barragens de Furnas, Porto Colômbia, Marimbondo e Foz do Chapecó, cada enrocamento, compreendendo dois ensaios de cinco ciclos cada. Não foi possível a realização do ensaio com o quartzito de Manso, por não apresentar partículas com a massa estabelecida na Norma ASMT D4644-08. As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam as amostras antes e após os ensaios.

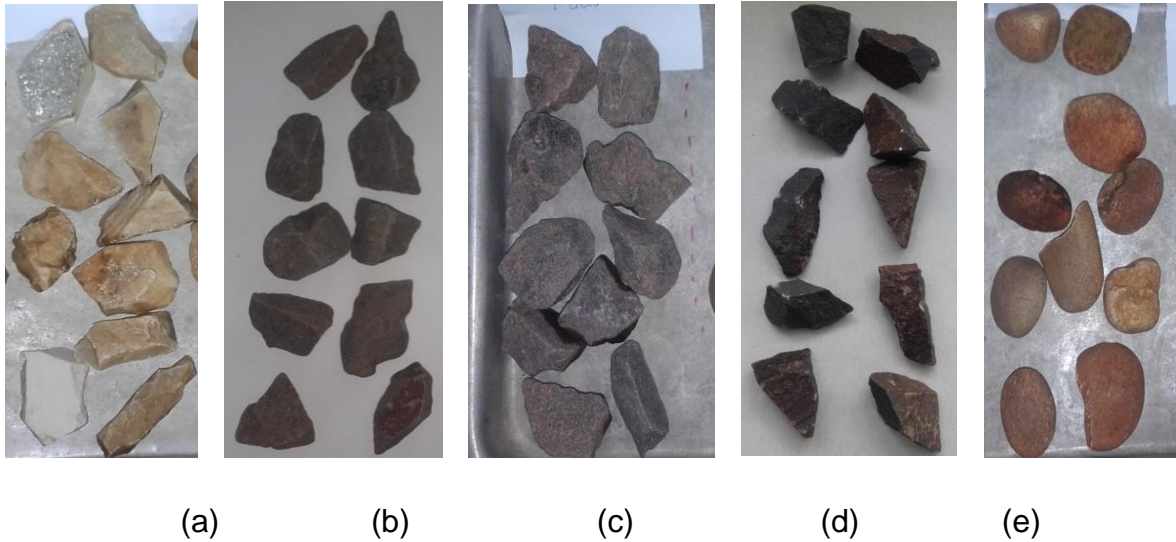


Figura 4.9 – Amostras de Enrocamento antes do ensaio SD - (a) Quartzito de Furnas, (b) Basalto de Marimbondo , (c) Basalto de Foz do Chapecó, (d) Diabásio de Porto Colômbia, (e) Seixo de Porto Colômbia.

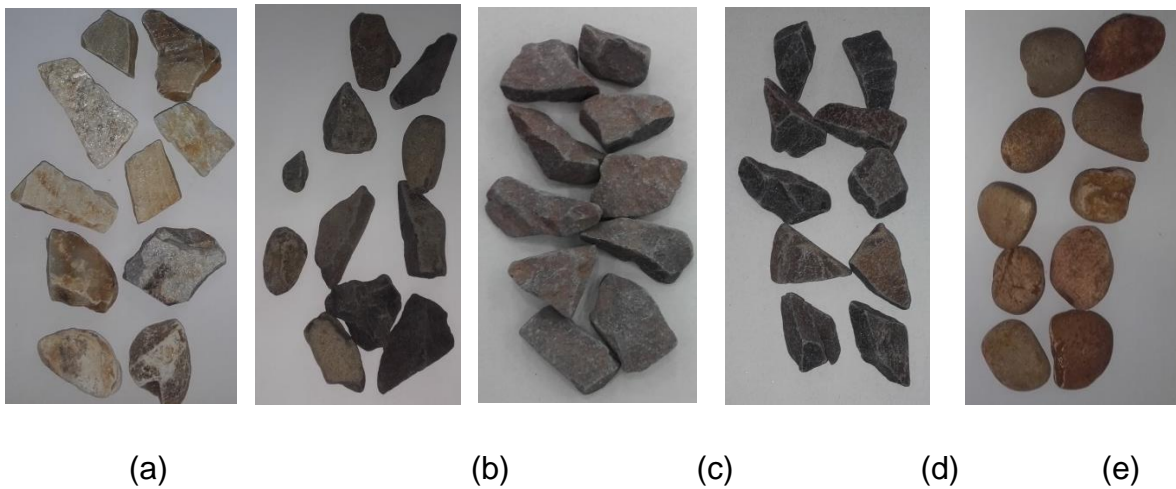


Figura 4.10 – Amostras de Enrocamento após o ensaio SD - (a) Quartzito de Furnas, (b) Basalto de Marimbondo , (c) Basalto de Foz do Chapecó, (d) Diabásio de Porto Colômbia, (e) Seixo de Porto Colômbia.

Observa-se que, após os cinco ciclos de ensaio, as partículas não exibem as arestas pontiagudas, e a parte superficial da capa de material alterado é perdida.

4.5 Ensaio Micro Deval

Comumente utilizado para a medição da resistência à abrasão dos agregados e realizado no equipamento desenvolvido originalmente nos anos 60, na França, o ensaio Micro Deval (MD) avalia a durabilidade e a resistência à abrasão dos

agregados, através do contato entre partículas de agregados e pequenas esferas de aço, na presença de água (Lane C. e James, 2003).

Diversos autores têm feito comparações entre os ensaios no equipamento de abrasão Los Angeles e no MD. De acordo com Lane *et al.* (2000), o ensaio de abrasão Los Angeles avalia a resistência dos agregados ao impacto, ao invés de medir a resistência à abrasão. Rogers (1998) afirma que o contato com a água no ensaio MD simula melhor as condições em campo se comparado à condição seca do ensaio no Los Angeles.

O procedimento gera quebra das partículas e perda de massa superficial. Sua aplicação é adequada a agregados naturais ou artificiais para propósitos de engenharia civil.

O ensaio seguiu todas as prescrições da Norma UNE – EN 1097-1, quanto à massa, à granulometria, ao número de rotações e à carga abrasiva. O equipamento usado foi o destacado anteriormente na Figura 4.8, desenvolvido na UENF.

Neste ensaio, 500 g de material saturado é submetido à 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. O cilindro é colocado sobre dois suportes que os fazem rodar a cerca de 100 rotações por minuto, num total de 120 minutos.

Considera-se 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 4.

$$M_{DE} = \frac{500-m}{5} \quad \text{Equação 04}$$

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

Foram realizados dois ensaios MD para cada enrocamento. As partículas de Manso foram usadas na granulometria entre 6 mm e 10 mm; para as demais amostras foi usada a granulometria entre 4 mm e 8mm. A Figura 4.11 exhibe as partículas antes e

após os ensaios MD.



(a) antes MD



(a) após MD



(b) antes MD



(b) após MD



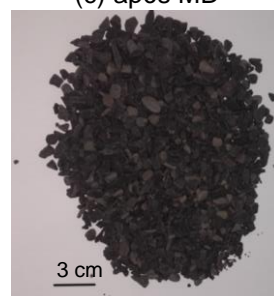
(c) antes MD



(c) após MD



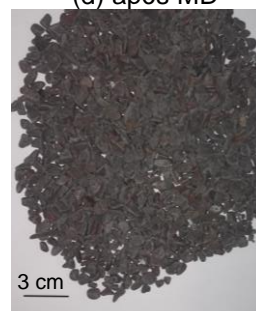
(d) antes MD



(d) após MD



(e) antes MD



(e) após MD

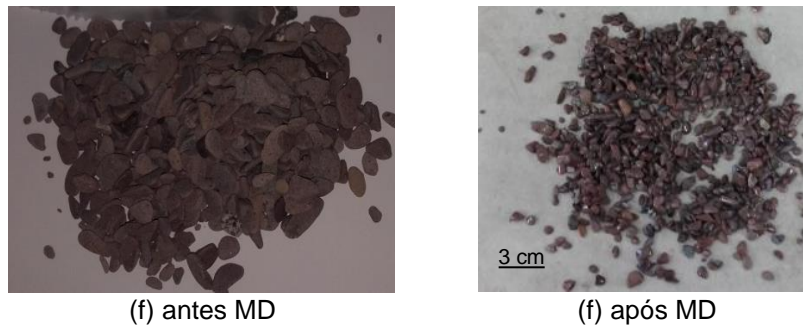


Figura 4.11 – Amostras de Enrocamento antes e após o ensaio MD - (a) Quartzito de Furnas degradado, (b) Quartzito de Furnas britado, (c) Diabásio de Porto Colômbia, (d) Basalto de Marimbondo, (e) Basalto de Foz do Chapecó, (f) Arenito de manso.

4.6 Ensaio de resistência à compressão pontual (*Point load test*)

O ensaio de resistência à compressão pontual (PL) tem como finalidade obter, de maneira simplificada e rápida, uma estimativa do valor de ruptura das rochas (índice de resistência à carga pontual), que pode ser relacionado com a resistência à compressão uniaxial. O ensaio envolve a compressão de uma amostra de rocha entre placas de aço cônicas, até que ocorra a ruptura provocada pelo desenvolvimento de fraturas de tração paralela ao eixo de carregamento.

O uso do ensaio PL é considerado pouco adequado para rochas de baixa resistência. Hawkins & Pinches (1992) não o recomendam para rochas silto-argilosa, argilitos e siltitos; por sua vez Dobereiner e Oliveira (1986) não o recomendam para arenitos brandos. Em rochas com resistência à compressão inferior a 25 MPa, nesse caso, o valor dos ensaios pode estar relacionado à penetração da ponteira cônica na amostra. Bieniawski (1975) *apud* Pinho (2003), afirma que o uso do ensaio PL é limitado a materiais rochosos com índice de carga pontual de inferior a 1 MPa, que corresponde a rochas com resistência a compressão de 25 MPa.

O aparelho para este teste, mostrado na Figura 4.12, consiste de uma armação rígida, duas placas de carga com ponteira cônica, um atuador hidráulico e um medidor de pressão. O medidor de pressão deve ser do tipo em que a pressão de ruptura pode ser gravada.



Figura 4.12 – Equipamento para os ensaios de carregamento pontual

Foram seguidas as recomendações estabelecidas na ASTM D5731(2008) e utilizadas partículas de forma aproximadamente prismática. O carregamento pontual foi aplicado na metade do comprimento e na metade da largura da partícula, garantindo-se que a direção do carregamento durante o ensaio permanecesse perpendicular ao comprimento do bloco.

Ainda seguindo a Norma, foram desconsiderados os ensaios com ruptura fora da seção transversal da partícula. O valor para o índice de resistência à carga pontual padronizado para um diâmetro de 50 mm (I_{s50}) é determinado segundo as Equações:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \quad \text{Equação 05}$$

$$De^2 = \frac{4A}{\pi} \quad \text{Equação 06}$$

$$FC = \left(\frac{De}{50}\right)^{0,45} \quad \text{Equação 07}$$

$$I_{s50} = FC \cdot I_s \quad \text{Equação 08}$$

Nas equações acima, I_s representa o índice de resistência a carga pontual, P a carga de ruptura, De o diâmetro equivalente, FC o fator de correção, A a área da menor seção transversal que passa pelos contatos da ponteira.

Este ensaio é um ensaio rápido, prático e de fácil manuseio. Através dele, é possível obter-se uma correlação entre a resistência à compressão puntiforme e à compressão uniaxial das rochas estudadas.

A Figura 4.13 apresenta algumas rochas ensaiadas à compressão puntiforme.

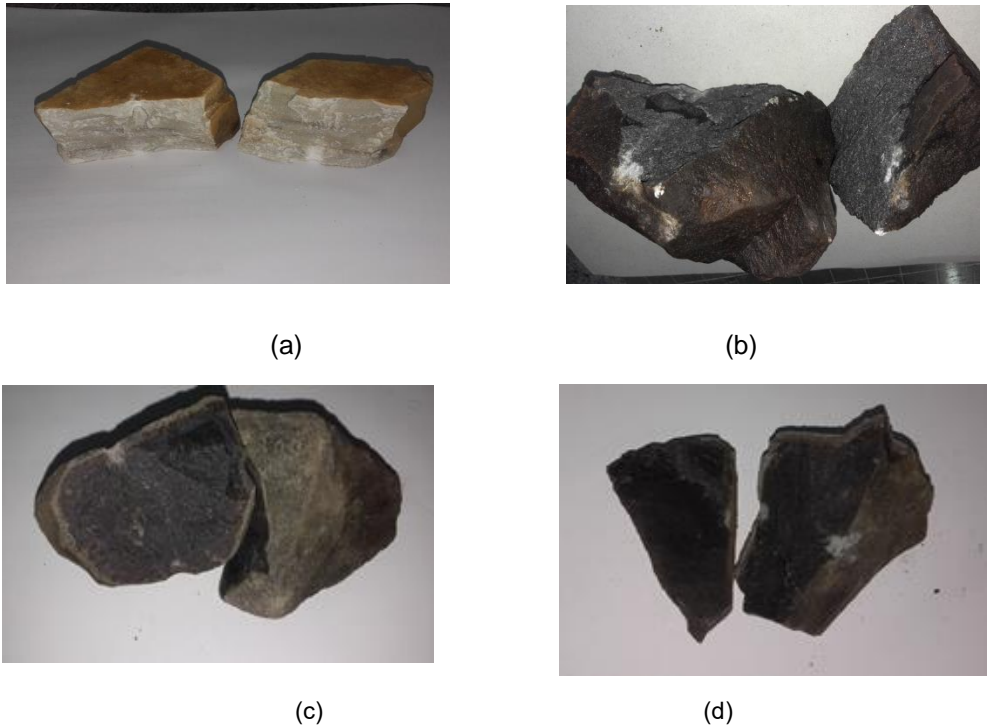


Figura 4.13 – Rochas ensaiadas a compressão puntiforme. (a) Quartzito de Furnas, (b) Basalto de Marimbondo, (c) Diabásio de Porto Colômbia, (d) Basalto de Foz do Chapecó.

A Figura 4.14 mostra o basalto vesicular encontrado em porções menos representativas no enrocamento e desconsiderado neste estudo, por se tratar de quantidade pouco expressiva no talude.

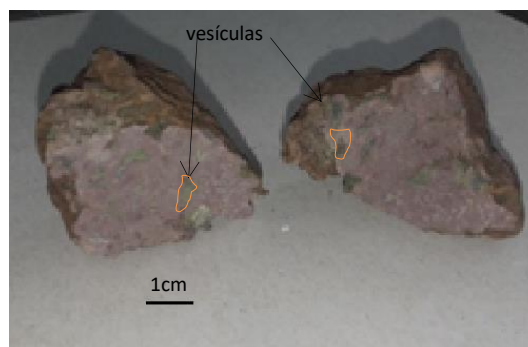


Figura 4.14 – Basalto vesicular

Segundo a Norma ASTM D5731 (2008), o valor da resistência à compressão uniaxial da rocha (q_u) pode ser obtido através da Equação 09:

$$q_u = K \cdot I_{s50}$$

Onde, K é um fator de conversão sugerido na literatura.

A literatura apresenta valores da constante K em função do diâmetro do corpo de prova, sendo tipicamente adotado o diâmetro de 50mm.

Na Tabela 4.7 são apresentados valores para k e as correlações para cálculo do valor de q_u .

Tabela 4.7- Correlações entre $I_{s(50)}$ e q_u

Tipo de rocha	Correlação	Referência
Todos os tipos de rocha	$q_u = 23 I_{s50}$	ASTM D5731 (2008)
Todos os tipos de rocha	$q_u = 24 I_{s50}$	(Goodman, 1989; Hudson e Harrison, 1995)
Basalto de Marimbondo	$q_u = 18 \dots 26 I_{s50}$	Maia (2001)
Todos os tipos de rocha	$q_u = 25 I_{s50}$	Egyptian Code for Soil Mechanics, Design and Construction of Foundations (2001)
Gnaisse	$q_{qu} = 16,656 I_{s50} + 21,7$	Cha <i>et al.</i> (2007)
Todos os tipos de rocha	$q_u = 18,7 I_{s50}$	Read <i>et al.</i> (1980)
Basalto	$q_u = 11,8 \text{ a } 17,6 I_{s50}$	Forster (1983)
Basalto	$q_u = 18,7 I_{s50} - 13,2$	Singh (1981)
Basalto	$q_u = 20 I_{s50}$	Read <i>et al.</i> (1980)
Turfas	$q_u = 22 I_{s50} + 49$ para $80,4 \leq q_u \leq 208 \text{MPa}$	Kim <i>et al.</i> (2004)
Rochas sedimentares	$q_u = I_{s50}^{1,71}$ para $I_{s50} \geq 3,5 \text{MPa}$	Min and Moon (2006)
Quartzito	$q_u = 22,8 I_{s50}$ para $32,5 \leq q_u \leq 98,8 \text{MPa}$	Singh <i>et al.</i> (2012)

Arenito	$q_u = 6,2 I_{s50}$	Elkateb (2009)
Siltito	$q_u = 8,6 I_{s50}$	Elkateb (2009)
Xisto	$q_u = 14,4 I_{s50}$ para $9,9 \leq q_u \leq 18,8 \text{MPa}$	Singh <i>et al.</i> (2012)
Meta-siltito e meta-arenito	$q_u = 20 \text{ a } 21 I_{s50}$	Li and Wong (2013)

O ensaio de carregamento pontual pode ser correlacionado com outros ensaios, sendo possível, através do conhecimento do valor do índice I_{s50} , estimar o valor para os ensaios de abrasão Los Angeles, resistência ao esmagamento e resistência ao choque, Al-Harhi (2001), Geroto & Assis (2006);

4.7 Índice de Alteração

Os resultados do estudo da degradação de materiais geotécnicos permitem calcular o índice de alteração do material, 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. Este índice pode ainda, ser aplicado entre dois períodos de utilização do material, desde que conhecidas as suas características entre os dois intervalos de tempo.

Desta forma, define-se o índice de alteração (I), pela Equação 10:

$$I = \frac{P_{\text{int}} - P_{\text{alt}}}{y} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

onde, p_{int} corresponde aos valores de ensaio do material intacto (ou em um primeiro estágio de monitoramento), e p_{alt} , corresponde aos valores de ensaio do material alterado. A variável y assume o valor p_{int} ou p_{alt} quando as características físicas analisadas diminuem ou aumentam, respectivamente, devido à alteração da rocha.

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.

4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os ensaios realizados e as Normas Técnicas seguidas para cada procedimento. A Tabela 4.8 apresenta os ensaios realizados para cada enrocamento.

Tabela 4.8- Ensaios realizados para cada enrocamento

Ensaio	Enrocamento					
	Furnas (quartzito)	Porto Colômbia (diabásio)	Porto Colômbia (seixo)	Marimbondo (basalto)	Manso (arenito)	F. Chapecó (basalto)
Abrasão Los Angeles	x	x		x	x	x
Micro Deval	x	x		x	x	x
Slake Durability	x	x	x	x		x
Compressão Pontual	x	x		x		x
Petrografia	x	x	x	x		

São citados trabalhos encontrados na literatura usando os ensaios descritos e as litologias estudadas.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E ANÁLISES

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados nos enrocamentos de montante das UHE, onde se mostram, inicialmente, os dados da análise química e petrografia, seguidos pelos valores obtidos nos ensaios de desgaste: abrasão Los Angeles, *Slake durability*, Micro Deval; e o ensaio de compressão pontual.

Os resultados referentes a cada UHE são exibidos separadamente. Para as UHE Furnas e Marimbondo são comparados e discutidos os resultados da rocha intacta com a rocha alterada, e ainda os dados de estudos anteriores da literatura.

As UHE Porto Colômbia, Manso e Foz do Chapecó apresentam resultados e análises da alteração da rocha.

Em todas as UHE são discutidas as correlações entre os ensaios realizados.

5.1 UHE Furnas

A UHE Furnas está em operação há 53 anos. O enrocamento desta Usina é composto por quartzito.

Com o intuito de se estabelecerem previsões sobre a degradação, o material de enrocamento foi britado para a retirada da capa de alteração e efetuada a análise química do material com e sem alteração.

A petrografia foi realizada com amostras *in natura* do enrocamento.

a) *Petrografia e Análise química*

O material do enrocamento, mostrado na Figura 5.1, é composto por quartzitos micáceos, com textura granular, estrutura laminada, de granulação fina devido à intensa recristalização dinâmica; são formados por quartzo 94%, muscovita 5% e minerais acessórios 1%, como turmalina, ilmenita, zircão, rutilo e monazita detrítica, com laminações plano paralelas e estratificações. Apresenta, ainda, fissuras e capa de alteração visíveis a olho nu.

No interior da rocha a coloração é branca, a camada externa submetida à

alteração possui coloração amarelo variegado, como resultado do metamorfismo apresenta um xisto verde.

Segundo Valeriano *et al.*(2000), a muscovita presente nesta região tem idade por determinação radiométrica K-Ar de 595 ± 7 Ma.

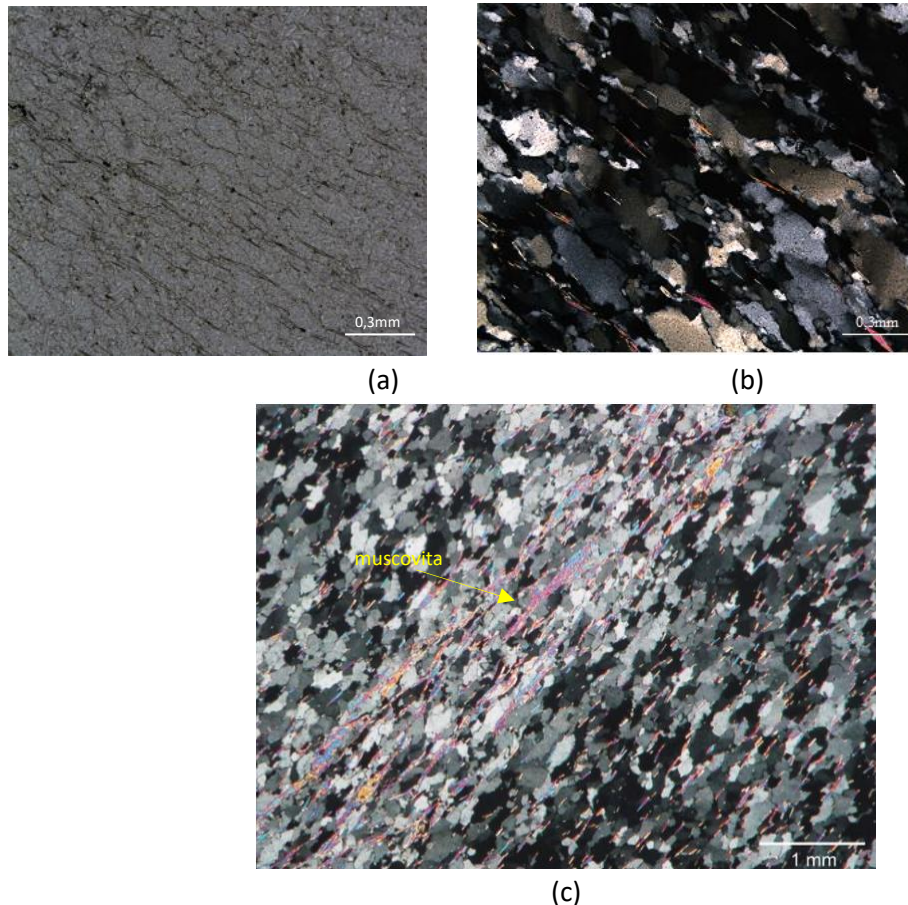


Figura 5.1 - (a) (b) e (c)- Fotomicrografia do quartzito de Furnas

O quartzo perfaz uma massa finamente recristalizada, com contatos intergrãos suturados, contendo filmes ou cristais dispersos de mica branca e de clorita. Forte foliação planar é definida por estes dois minerais, além de uma foliação oblíqua definida por muscovita e/ou bandas de extinção ondulante no quartzo, (UERJ/CPRM, 2007).

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados da análise química dos minerais e óxidos presentes nas amostras estudadas, degradadas e britadas .

Tabela 5.1 - Análise Química

	Quartzito Britado	Quartzito Degradado
Minerais		
Valores percentuais obtidos nas amostras (%)		
Si	80,7	77,1
k	6,2	5,7
Fe	3,2	6,1
S	2,8	3,2
Al	2,5	2,8
Cs	1,4	1,6
Sm	0,9	1,1
W	0,7	0,0
Ti	0,7	0,6
Ca	0,6	1,6
Mn	0,0	0,0
Óxidos		
SiO ₂	82,2	89,3
Al ₂ O ₃	10,0	5,4
SO ₃	2,9	1,9
k ₂ O	2,3	1,2
Fe ₂ O ₃	1,1	1,1
CaO	0,0	0,0
TiO ₂	0,0	0,0

Quanto aos óxidos presentes nas rochas, há predominância do quartzo (SiO₂) e do óxido de alumínio (Al₂O₃). O resultado da análise química das amostras permite a aplicação de índices geoquímicos para a avaliação da alterabilidade das rochas.

Para os valores apresentados, o índice que considera a quantidade de sílica total para a avaliação de alteração (I_R), proposto por Ruxton (1968), não teve uma aplicação adequada; o índice analisa a perda de sílica e de cátions solúveis na adição de H₂O com o peso constante da alumina.

Era esperada a diminuição do percentual de quartzo no material degradado, devido ao intemperismo e à lixiviação da rocha. No entanto, com a evolução do intemperismo, a sílica se concentra na forma de quartzo, ocasionando um acréscimo no valor do quartzo presente na rocha, fazendo com que o resultado não fosse representativo do caso estudado - os valores do quartzo para o material britado corresponderam a 82,2% e do material degradado, aumentaram, obtendo o valor de 89,3%.

Caracterização quanto ao Intemperismo

A caracterização da alteração devido ao intemperismo foi realizada segundo o diagrama de Peltier, (1950), mostrado na Figura 2.3, onde se estabelece a correlação entre a temperatura média anual e a precipitação média anual para obter tipos de alteração devido ao intemperismo. A Tabela 5.2 apresenta os valores registrados na região e a classificação da alteração.

Tabela 5.2 – Alteração dos enrocamentos devido ao intemperismo

Enrocamento	Tipo de Rocha	Precipitação média anual (mm)	Temperatura média anual (°C)	Alteração
UHE Furnas	Quartzito	1600	23	Alteração química intensa

b) Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão foi realizado com o material de enrocamento britado, sem a capa de alteração, e o material nas condições de campo, com a capa de alteração. A faixa granulométrica B, estabelecida pela NM 51 (ABNT, 2001), foi mantida para as duas amostras para descartar diferenças no resultado devido ao tamanho do grão ensaiado.

Francklin Júnior (2009) realizou estudos em rejeitos de quartzitos do Sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado graúdo. Entre os materiais estudados, encontra-se o quartzito de uma pedreira de São João Batista do Glória/MG, cidade onde está localizada a UHE Furnas, com jazida similar à das rochas usadas no enrocamento de Furnas. Os resultados obtidos pelo autor são comparados com as porcentagens de perdas por abrasão Los Angeles (A_L) do material britado e estudado nesta pesquisa.

O resultado do ensaio Los Angeles do material do enrocamento, com a capa de degradação e britado sem a capa de alteração, foi comparado a fim de observar a influência da capa de alteração nos valores obtidos. O valor encontrado na literatura, mostrado na Tabela 4.2 para A_L entre 20% e 35%, corresponde ao quartzito sem a capa de alteração.

Os resultados das perdas obtidas no ensaio de abrasão Los Angeles para os quartzitos com diferentes tempo de exposição são mostrados na Figura 5.2. O material denominado Furnas 1 equivale à rocha de enrocamento alterada; Furnas 2 corresponde ao material britado; e os valores da Pedreira correspondem ao resultado para A_L da pedreira de São João Batista do Glória/MG, estudada por Francklin Júnior (2009).

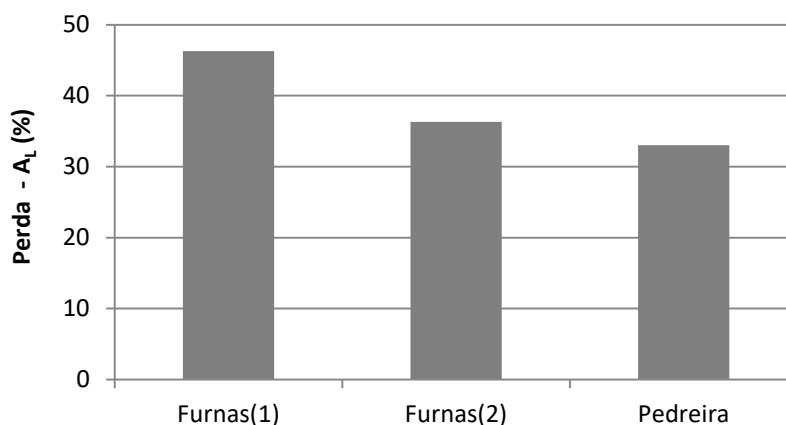


Figura 5.2 – Comparação entre os resultados obtidos no quartzito.

Os resultados da porcentagem de perda no LA obtidos com o material de enrocamento britado (Furnas 2), $A_L = 36\%$ se assemelha ao resultado obtido do material na Pedreira $A_L = 33\%$.

Comparando os valores dos percentuais de perdas do material degradado (Furnas 1) e o material britado (Furnas 2) observa-se que a presença da capa de alteração preservada na rocha provoca maiores perdas.

Os valores encontrados na literatura, exibidos na Tabela 4.2 para a perda por abrasão típica nos quartzitos, correspondem a uma faixa entre 20 e 35%. Comparado o resultado esperado com os valores obtidos no ensaio Los Angeles, pode-se afirmar que a alteração sofrida pela rocha vem provocando a perda de resistência do material - que atualmente encontra-se com perda de 46%, valor superior ao esperado em relação à literatura e em relação ao material do enrocamento britado e ao da pedreira de São João Batista do Glória.

Observando os valores previstos para o ensaio Los Angeles nos critérios de projeto de UHE e enrocamentos apresentados na Tabela 2.3 têm-se os valores mais conservadores do *U.S. Corps of Engineers*, que limita o resultado das perdas A_L a

no máximo 20%; os valores usados pelas demais entidades internacionais tais como: Transportation Research Board Executive Committee (2006) Bureau of Reclamation. 2012 e as Normas ASTM C131, ASTM C535, USBR 4131, admitem um valor máximo para as perdas A_L de 40%.

Considerando o critério do *U.S. Corps of Engineers*, onde o percentual máximo $P_{AL} = 20\%$, nota-se que o material correspondente ao início da construção não se enquadra ao critério adotado, tendo perdas de 36%, sendo considerado inadequado para o uso.

Considerando os demais critérios de projeto, pode-se afirmar que o enrocamento de Furnas não atende à recomendação quanto à qualidade do material em uso, devendo ser observadas as deformações devido à desagregação da partícula para o planejamento de intervenções visando a substituição pontual e/ou o reforço do maciço com outro tipo de rocha.

Conhecido o valor correspondente A_L do material intacto e com 53 anos de exposição no campo, é possível calcular a curva ajustada aos resultados, e consequentemente, a equação que melhor representa a perda do quartzito ao longo do tempo. O coeficiente de correlação R^2 foi encontrado por meio de regressão estatística. A Figura 5.2 ilustra a curva obtida.

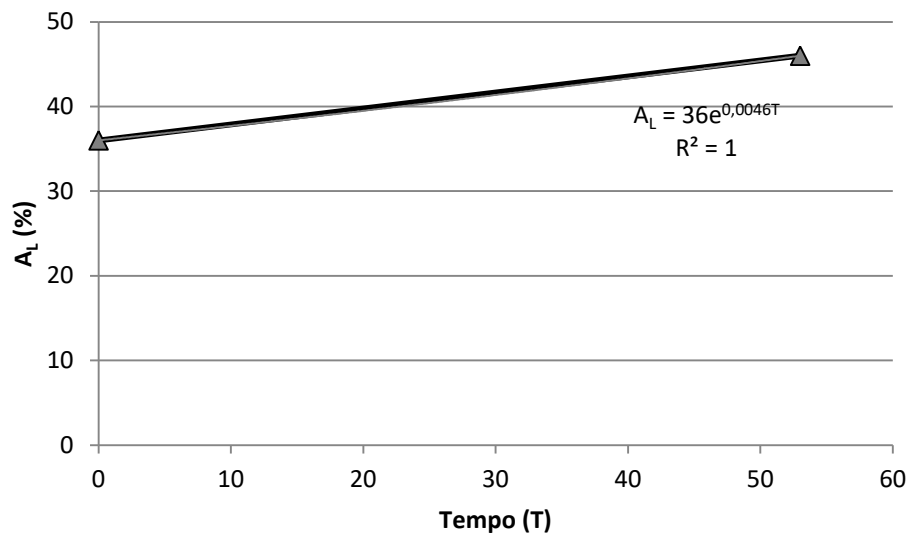


Figura 5.3 – Perda A_L do quartzito ao longo do tempo.

c) Ensaio de Durabilidade (SD)

O ensaio foi realizado com o material de enrocamento apresentando a capa de degradação.

A baixa rotação do equipamento e o tempo de ensaio reduzido não provocam desgaste profundo nas partículas, permitindo avaliar o desgaste superficial da capa alterada das partículas durante o procedimento. O ensaio foi realizado conforme descrito no item 4.4, do Capítulo 4, e o índice de durabilidade (Id_5), calculado segundo a Equação 03. A Tabela 5.3 mostra os valores do índice de durabilidade para os cinco ciclos de ensaios realizados.

Tabela 5.3 – SD enrocamento de Furnas

Índice de durabilidade (%)				
Id1	Id2	Id3	Id4	Id5
0,6	1,2	1,5	1,9	2,2

O SD foi usado para caracterizar a durabilidade da rocha em função da perda de massa ocorrida no quinto ciclo de ensaio. Observando os valores apresentados no Capítulo 4, Tabela 4.3, para o quinto ciclo, a perda de massa menor que 5% caracteriza que as amostras ensaiadas possuem durabilidade muito alta.

d) Ensaio Micro Deval

O MD é um ensaio rápido, confiável e preciso, que requer o uso de equipamentos simples. A interação entre os agregados, entre esferas e agregado, e adição de água produzem a abrasão e o polimento das amostras ensaiadas, Wang *et al.* (2015).

Usando o equipamento montado na UENF, e efetuando o procedimento de ensaio descrito no item 4.5, foram realizados dois ensaios com as rochas degradadas, cujo resultado foi calculado pela Equação 04 e está apresentado na Figura 5.4.

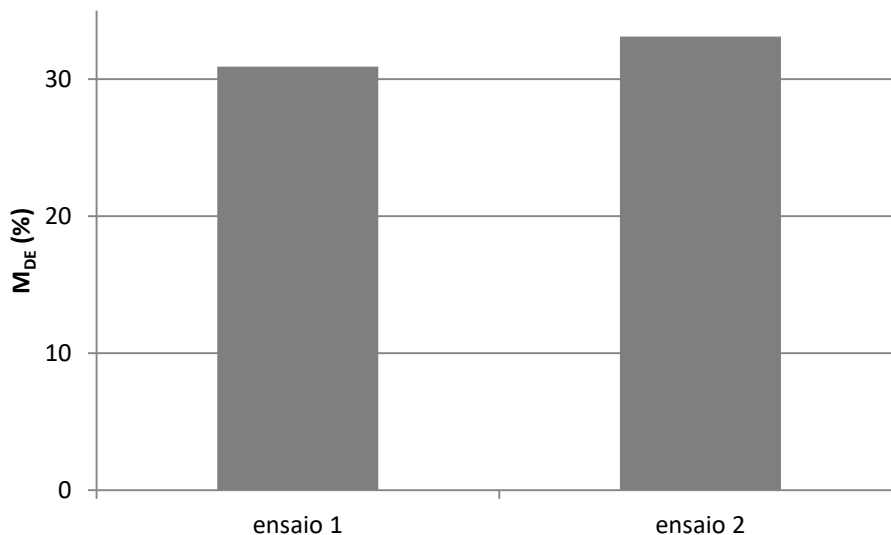


Figura 5.4 – Resultados MD de Furnas

Nos critérios de ensaio para projeto de enrocamentos, citados no item 2.5, não são estabelecidos valores de referência para o ensaio MD. O valor médio obtido para o coeficiente Micro Deval foi de 32 %. No item 5.1.2 serão fornecidas correlações entre o ensaio Los Angeles e o MD.

e) Carregamento Pontual (*Point Load*)

Foi seguido o procedimento de ensaio descrito no item 4.6, onde são consideradas válidas apenas as partículas que tiveram plano de ruptura coincidente com a seção transversal do bloco.

O valor para o índice de resistência à carga pontual (I_{S50}) foi determinado segundo as Equações 05 a 08.

Para Costa (2016), os resultados obtidos no carregamento pontual permitem respostas em curto prazo e com técnicas de baixo custo para a compreensão dos efeitos da alteração no comportamento mecânico do enrocamento. O ensaio possibilita a análise em amostras de geometria irregular, o que o torna rápido e prático na obtenção dos resultados, sem a preocupação da análise dos mecanismos condicionantes ao surgimento das alterações. A Figura 5.5 apresenta os valores dos ensaios realizados.

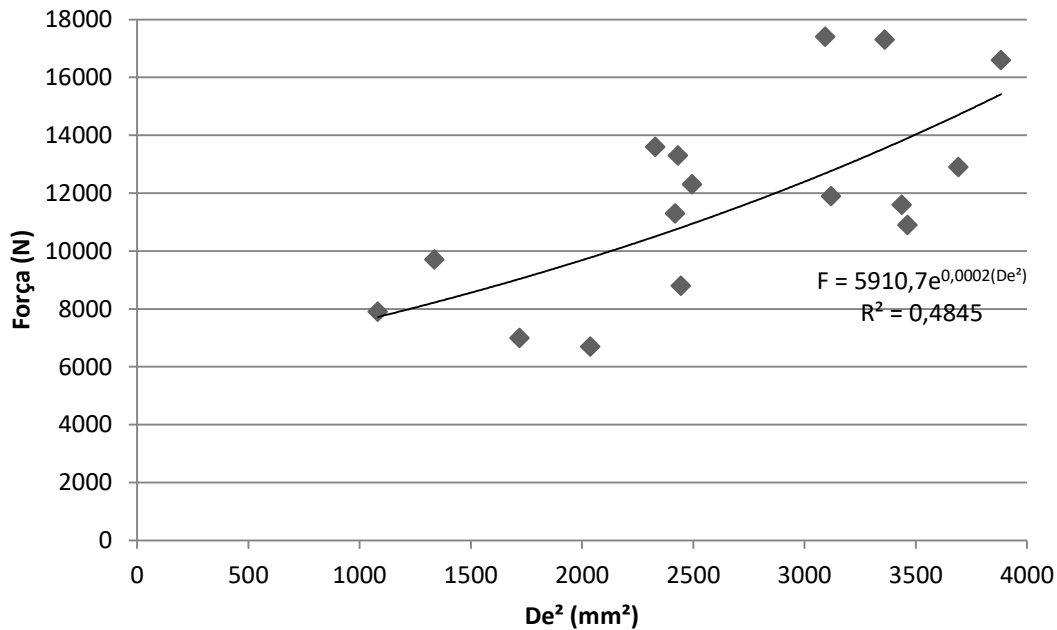


Figura 5.5 – compressão pontual do enrocamento de Furnas

Para o diâmetro equivalente de 50 mm, o índice (I_{S50}) obtido foi de **4,74 MPa**.

As foliações presentes em algumas partículas provocaram a quebra da rocha no sentido horizontal, ocasionando uma elevada perda de amostras durante a realização dos ensaios.

A presença de amostras heterogêneas de quartzito, com partículas acinzentadas e outras amarelo variegado, contribuíram para a dispersão dos resultados apresentados.

O valor da resistência à compressão uniaxial da rocha (q_u) pode ser obtido por meio do ensaio de compressão pontual usando a Equação 09, onde admite-se um fator de conversão k sugerido na literatura, exibido na Tabela 4.5, variando conforme o material.

Para estimar o valor de q_u , foi usado o fator k extraído da Tabela 4.5, sugerido para quartzitos por: Hudson e Harrison (1995), *Egyptian Code for Soil Mechanics, Design and Construction of Foundations* (2001), ASTM D5731 (2008), Singh *et al.* (2012); empregados para todos os tipos de rochas, com os respectivos valores de $k= 24$; $k= 25$; $k= 23$ e $k= 22,8$. Os resultados são apresentados na Tabela 5.4

Tabela 5.4 – Estimativa do valor de q_u para o quartzito de Furnas

Referência	Correlação	q_u (MPa)
Singh <i>et al.</i> (2012)	$q_u = 22,8 I_{s50}$	108
ASTM D5731(2008)	$q_u = 23 I_{s50}$	109
(Goodman, 1989; Hudson e Harrison, 1995)	$q_u = 24 I_{s50}$	113
Egyptian Code for Soil Mechanics, Design and Construction of Foundations (2001)	$q_u = 25 I_{s50}$	118

O uso de mais de um método de correlação entre o ensaio de compressão pontual e o valor da compressão axial encontrado na literatura permitem avaliar a faixa de variação dos valores esperados para q_u , o que torna a avaliação razoável por se tratar de uma estimativa de resultados.

Francklin Júnior (2009) realizou ensaio de compressão axial em quartzitos de quatro pedreiras do sudoeste de Minas Gerais, obtendo os valores de q_u compreendidos entre 93 MPa a 142 MPa. Para a pedreira de São João Batista do Glória, o valor médio encontrado para q_u foi de 142 MPa.

Os resultados obtidos pela correlação entre a compressão pontual e a compressão axial estão compreendidos dentro da faixa de valores esperados para o quartzito da região da UHE Furnas.

Comparados os valores obtidos pela correlações apresentada na Tabela 5.5 com o da Pedreira de São João Batista do Glória, que se assemelha ao material de construção do enrocamento de Furnas, nota-se que ocorreu a perda de resistência do material de enrocamento estudado, considerando 53 anos de degradação. A Figura 5.6 mostra a comparação entre os resultados.

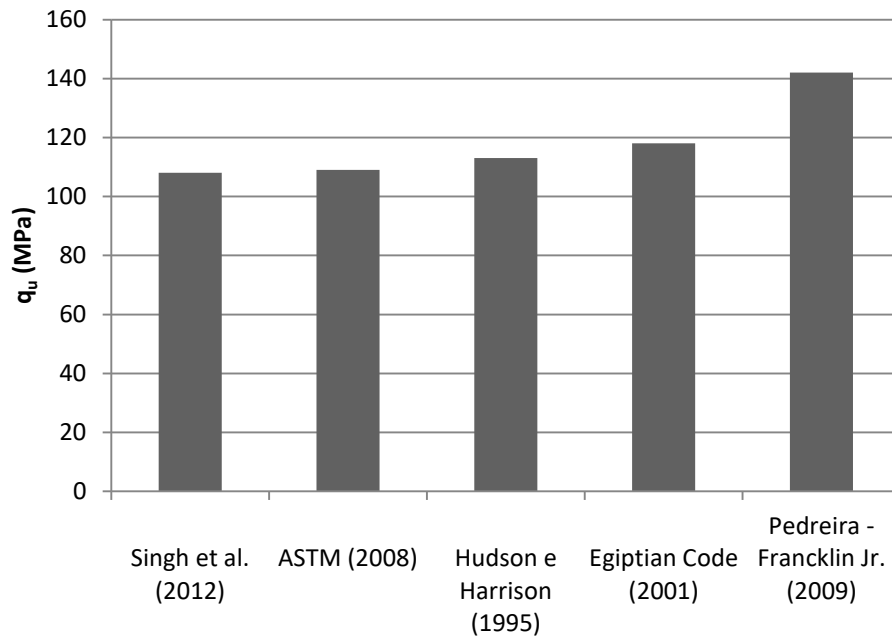


Figura 5.6 – Comparação entre os valores de q_u para o quartzito de Furnas, obtido segundo equação proposta por diversos autores

Usando as equações da Tabela 5.4 foi possível determinar o valor médio da resistência à compressão uniaxial da rocha degradada equivalente a 112 MPa, a resistência a compressão uniaxial correspondente ao material intacto tem valor de 142 MPa.

f) Índice de alteração (I)

Conhecendo as características do material geotécnico intacto e alterado, é possível calcular o índice de alteração I , através da Equação 10.

Para o quartzito de Furnas, esse índice foi calculado usando os resultados obtidos nos ensaios de abrasão Los Angeles e carregamento pontual e, ainda, para os valores estimados da compressão axial apresentados na Figura 5.6 . A Tabela 5.5 expõe esses resultados.

Tabela 5.5 – Índice de alteração do quartzito de Furnas

Ensaio	Unidade	Valores do ensaio		Índice de alteração
		Rocha intacta	Rocha alterada	
Los Angeles	(%)	36	46	27%
Carregamento pontual	MPa	5,9	4,7	20%
Compressão Axial	MPa	142*	112	21%

*Valor obtido por Francklin Júnior (2009)

Os dados do carregamento pontual para a rocha intacta foram retirados dos ensaios de Francklin Júnior (2009), onde se considerou o valor médio entre os dois tipos de quartzitos ensaiados. O índice que apresentou maiores mudanças entre o estado intacto e o estado alterado foi para o ensaio de abrasão Los Angeles com valor de 27%.

5.1.2 CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS COMPRESSÃO PONTUAL E ABRASÃO LOS ANGELES - FURNAS

Os resultados das perdas A_L foram correlacionados com o índice de resistência à compressão pontual I_{s50} . Consideraram-se os resultados dos ensaios para o material intacto e degradado em campo por 53 anos. Determinou-se a curva que melhor se ajustava aos resultados, obtendo um coeficiente de correlação igual a 1.

Através da curva, puderam-se associar quaisquer resultados obtidos no ensaio de abrasão aos obtidos na compressão pontual, ou vice-versa, para o material estudo. A Figura 5.7 apresenta a curva que correlaciona esses resultados.

O uso de correlações entre ensaios tem a vantagem de realizar previsões do comportamento do material de forma rápida e com boa representatividade dos resultados.

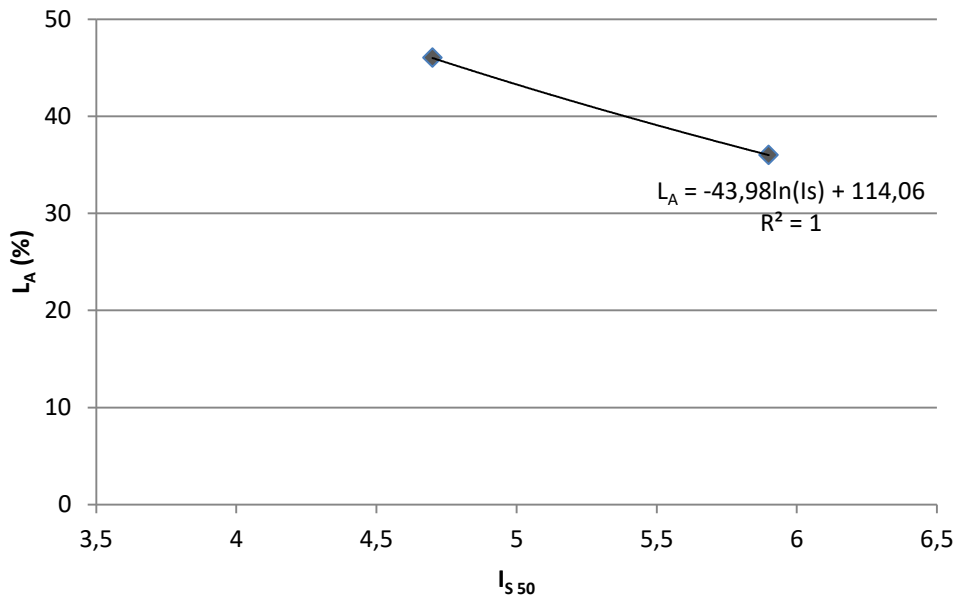


Figura 5.7 – Quartzito de Furnas- Correlação entre I_{s50} e A_L

Através da equação da Figura 5.7, pôde-se realizar o ensaio mais conveniente no enrocamento para estimar os parâmetros de perda por abrasão ou compressão pontual, seja pela realização do Los Angeles podendo-se estimar a compressão pontual ou vice-versa.

Al-Harathi (2001) estudou um total de 110 litotipos compreendendo rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, com grau de intemperismo distinto e a correlação nessas rochas, entre o ensaio de compressão pontual e abrasão Los Angeles, e compressão axial. A Figura 5.8 fornece os valores obtidos pelo autor e neste trabalho.

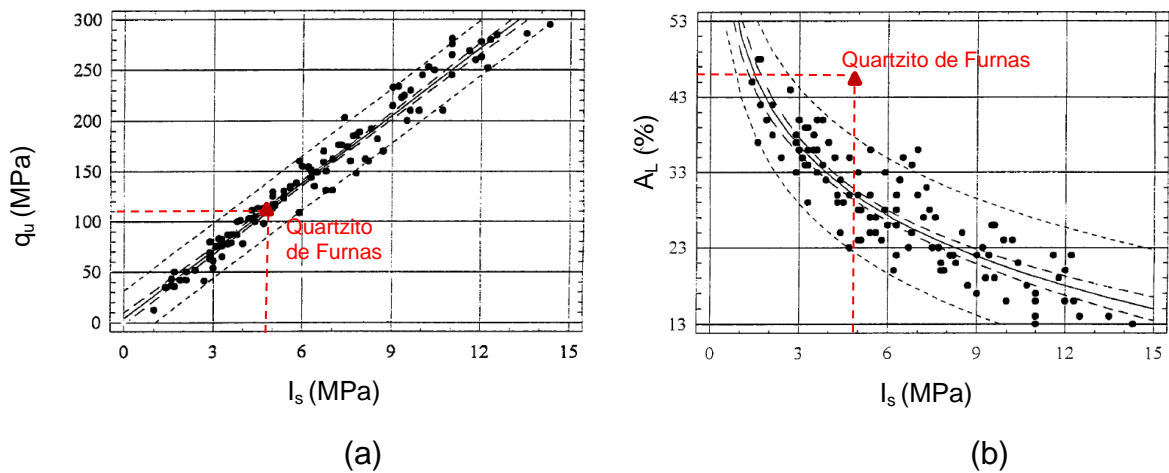


Figura 5.8 – (a) Correlação entre I_s e q_u (b) Correlação entre I_s e A_L

Comparando o resultado obtido neste estudo com os encontrados por Al-Harthy (2001), observa-se que o valor encontrado para a compressão axial está dentro da faixa esperada. No entanto, a degradação sofrida pela rocha do enrocamento da UHE Furnas ocasionou valores para o índice A_L superiores ao esperado, fazendo com que a correlação entre os valores I_s e A_L ficassem fora da faixa considerada pelo autor.

Observa-se, na Figura 5.8 (a), que os valores da compressão pontual e carregamento uniaxial (I_s) e (q_u) estiveram dentro da faixa esperada, pois o valor de q_u não foi estabelecido por ensaios, e sim, por equações que correlacionam esses dois valores.

5.2 UHE Porto Colômbia

O enrocamento da Usina de Porto Colômbia é composto por diabásios e seixo rolado. O material estudado está exposto ao meio exógeno por 43 anos.

Na Literatura, encontra-se o diabásio da UHE Porto Colômbia referenciado como basalto. Tal fato se deve às semelhanças física, química e geotécnica entre esses dois tipos rochosos.

a) Petrografia e Análise Química

Na petrografia, o material estudado foi identificado como: diabásio e pequenos seixos denominados quartzitos micáceos. O diabásio apresenta a composição mineralógica entre 40 a 50% de plagioclásio, entre 40-50% de clinopiroxênio e de 7 a 10 % de minerais opacos.

A granulação é fina, a textura da rocha é fanerítica fina, de cor cinza na parte sã e cor bege na face externa, onde a rocha se apresenta alterada. A presença de fissuras na rocha é um facilitador da desintegração dos blocos.

O seixo, formado por quartzito micáceo, revela em sua composição, 95% de quartzo e 5% de muscovita. Rocha com foliações, de estrutura laminada, textura granular, exibindo a coloração cinza na rocha sã e bege na rocha alterada, tendo a capa de alteração marcada por laminações de micas. Apresenta o xisto verde, em decorrência do metamorfismo.

A Figura 5.9 exibe a fotomicrografia das rochas da UHE de Porto Colômbia.

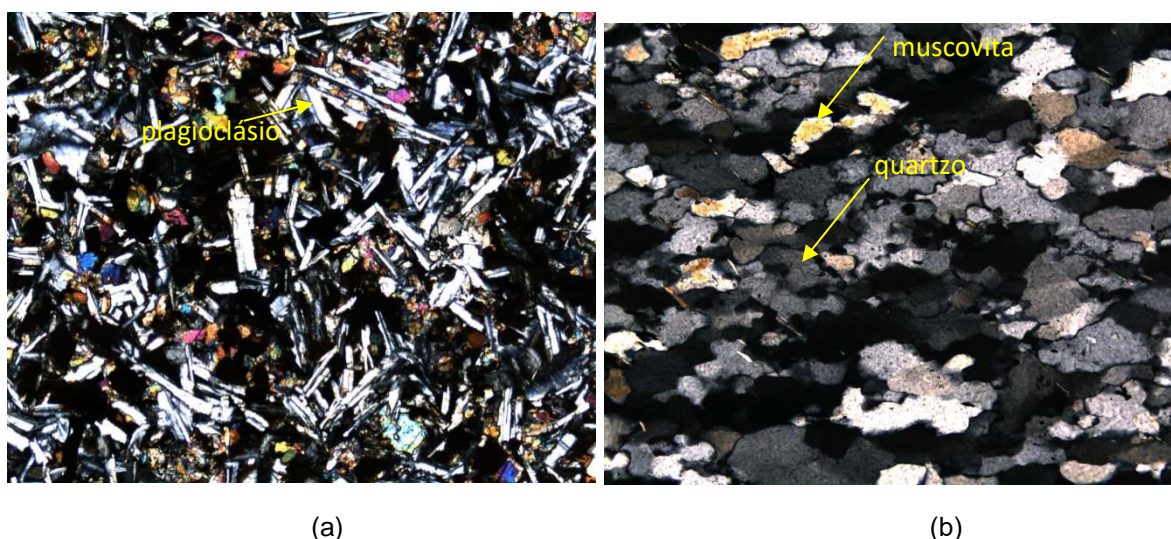


Figura 5.9 – Fotomicrografia – (a) diabásio, (b) quartzito micáceo.

A análise química visa à determinação dos minerais e óxidos presentes nas partículas estudadas. O resultado da análise química encontra-se na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Análise Química do Enrocamento da UHE Porto Colômbia

	Porto Colômbia	
	Seixo	Diabásio
Minerais		
Si	69,9	22,1

K	2,6	3,4
Fe	12,4	37,1
S	2,6	0,7
Al	2,9	6,5
Cs	0,0	0,0
Sm	0,0	0,0
W	0,6	0,0
Ti	1,8	5,0
Ca	6,6	24,1
Mn	0,0	0,7
Óxidos		
SiO ₂	86,5	47,0
Al ₂ O ₃	5,5	17,4
SO ₃	1,9	1,4
K ₂ O	0,7	2,0
Fe ₂ O ₃	2,5	17,1
CaO	1,9	12,9
TiO ₂	0,5	2,3

Quanto à composição, no seixo rolado da UHE Porto Colômbia, há predominância de mais de 85% de quartzo (SiO₂) e cerca de 5,5% de óxido de alumínio (Al₂O₃), seguido de outros óxidos. O diabásio apresenta composições típicas desses materiais, com mais de 47% de quartzo, cerca de 17% de óxido de alumínio, hematita (Fe₂O₃) em torno de 17% (correspondendo a rochas ferro-magnesianas) e cerca de 12% de óxido de cálcio.

Nos diabásios e basaltos, a oxidação dos minerais férricos provoca o aumento de Fe₂O₃, que se concentra na capa de alteração das rochas, devido à baixa mobilidade do ferro durante o processo de lixiviação, ocasionando a coloração avermelhada na capa de alteração (Figura 5.10).



Figura 5.10 – Diabásio com capa de alteração.

Diante dos resultados obtidos na análise química das amostras, foram aplicados índices geoquímicos para a avaliação da alterabilidade do diabásio.

Ruxton (1968) propõe o índice (I_R), que considera a quantidade de sílica total em relação à alumina para a avaliação de alteração, considerando que os valores da alumina permanecem constante. Barros (1979) estabelece a relação entre a quantidade de diferentes óxidos. O Índice químico de alteração (C/A) considera as proporções moleculares dos óxidos. Os basaltos apresentam índices entre 30 e 45 e as rochas graníticas, entre 45 e 55 (Nesbitt and Young 1982). A Figura 5.11 expõe esses índices obtidos para o diabásio.

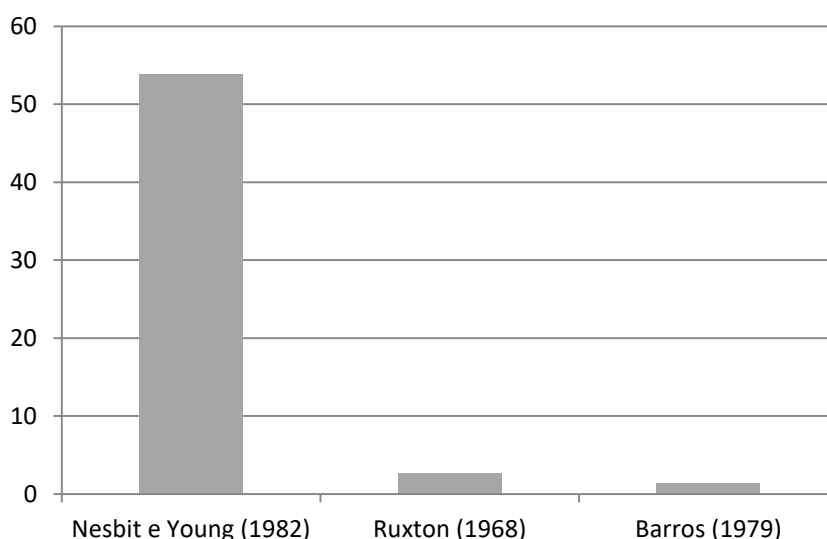


Figura 5.11 – Índices de alteração química do diabásio

A partir da Figura 5.11, verifica-se que o valor esperado para basaltos e, conseqüentemente, para o diabásio - dada a já mencionada semelhança - para o índice químico proposto por Nesbitt and Young (1982) deveria alcançar o valor máximo de 45 %, sendo registrado um valor aproximado de 54%. Essa diferença deve-se à alteração sofrida pela rocha.

Os índices de Ruxton (1968) e Barros (1979) apresentaram respectivamente valores de 2,7 e 1,4 para o diabásio. Ressalta-se que não foi avaliada a evolução do intemperismo para esses índices, pois dependem dos valores obtidos para a rocha

intacta, ou para a rocha entre dois intervalos de tempo distinto. Foi realizada a quantificação para o estado atual de degradação.

Caracterização quanto ao Intemperismo

A alteração devido ao intemperismo foi caracterizada segundo o diagrama de Peltier, (1950), mostrado na Figura 2.3, que estabelece a correlação entre a temperatura média anual e a precipitação média anual para obter tipos de alteração devido ao meio exógeno. A Tabela 5.7 fornece os valores registrados na região e a classificação da alteração.

Tabela 5.7 – Alteração das rochas devido ao intemperismo

Enrocamento		Tipo de Rocha	Precipitação média anual (mm)	Temperatura média anual (°C)	Alteração
UHE Colômbia	Porto	Diabásio e seixo	1800	22	Alteração química intensa

b) Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão foi realizado apenas com o diabásio, devido ao fato do material ser o componente predominante em grande parte do enrocamento, e apresentar sinais visíveis de intemperismo. A metodologia usada seguiu as prescrições estabelecidas pela NM 51 (ABNT, 2001). A Figura 5.12 exibe os resultados obtidos nos dois ensaios realizados no diabásio.

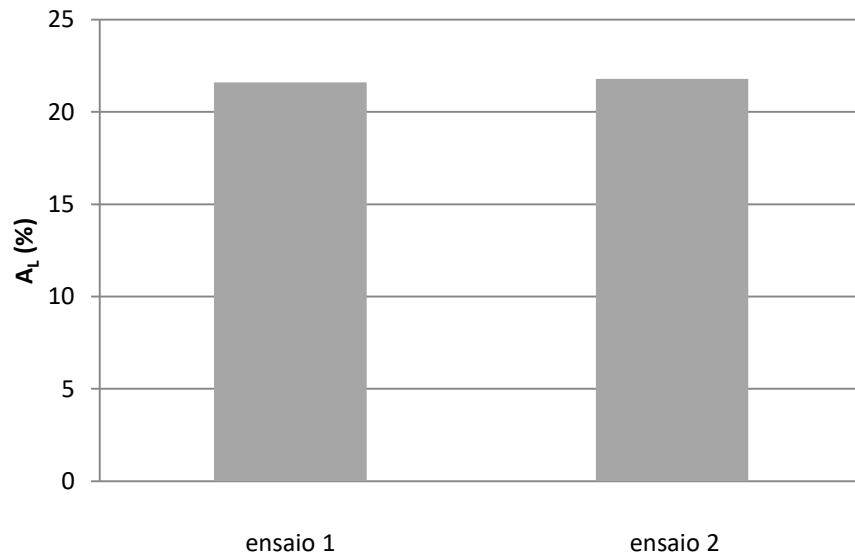


Figura 5.12 – Abrasão Los Angeles- diabásio

Os valores encontrados na literatura, apresentados na Tabela 4.2 para a perda por abrasão esperada para os diabásios sem alteração, assemelham-se aos do basalto, ficando na faixa de 10 % a 17 %. O valor médio obtido nesse ensaio foi de 20,6%, superior, portanto, ao indicado na literatura por apresentar degradação.

Observando os valores previstos para o ensaio Los Angeles nos critérios de projeto de UHE e enrocamentos expostos na Tabela 2.3, os valores mais conservadores do *U.S. Corps of Engineers* limitam o resultado das perdas A_L a, no máximo, 20%; e os valores usados pelas demais entidades internacionais, tais como Transportation Research Board, Executive Committee (2006), Bureau of Reclamation (2012) e as Normas ASTM C131, ASTM C535, USBR 4131 admitem um valor máximo para as perdas A_L de 40%.

Os resultados indicam a perda de resistência do material devido aos 43 anos de exposição a agentes intempéricos e ao processo contínuo de lixiviação, sofrido na faixa de oscilação do nível d'água.

Admitindo como critério de utilização, um percentual de perdas A_L até 40%, conforme citado anteriormente, pode-se classificar o material como alterado, quando comparado aos percentuais de perdas para o material intacto; com vida útil, entretanto, para o fim ao qual se aplica.

c) *Ensaio de Durabilidade (Slake Durability)*

A avaliação da capa de alteração no material rochoso foi efetuada com o SD. Foram realizados cinco ciclos de ensaios com as partículas de diabásio e seixo, constituintes do enrocamento. Foi seguida a metodologia prescrita no item 4.4. A Tabela 5.8 apresenta o resultado dos índices de durabilidade (Id_x) para o segundo e o quinto ciclo.

Tabela 5.8 - Índice de Durabilidade- enrocamento de Porto Colômbia

Enrocamento	Rocha	Id_2 (%)	Id_5 (%)
UHE Porto Colômbia	Diabásio	0,9	1,2
UHE Porto Colômbia	Seixo	0,4	0,9

A Figura 5.13 mostra a evolução do desgaste da capa de alteração no decorrer dos cinco ciclos de ensaios realizados.

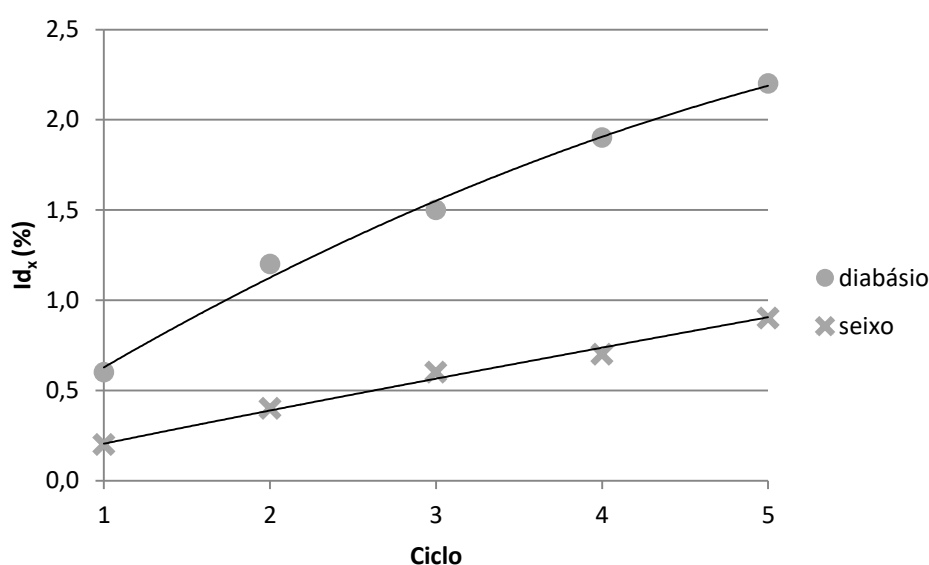


Figura 5.13 – Porto Colômbia- índices SD

A perda da capa de alteração é mais acentuada na partícula de diabásio do que no seixo rolado. Isso se deve, por exemplo, às características geológicas e mineralógicas e à angulosidade das partículas das rochas em questão.

d) *Ensaio Micro Deval*

O ensaio foi realizado seguindo a metodologia apresentada no item 4.5, com as partículas saturadas e a presença de carga abrasiva. O MD avalia o desgaste por abrasão e choque. A Figura 5.14 mostra a perda de massa do enrocamento de diabásio estudado.

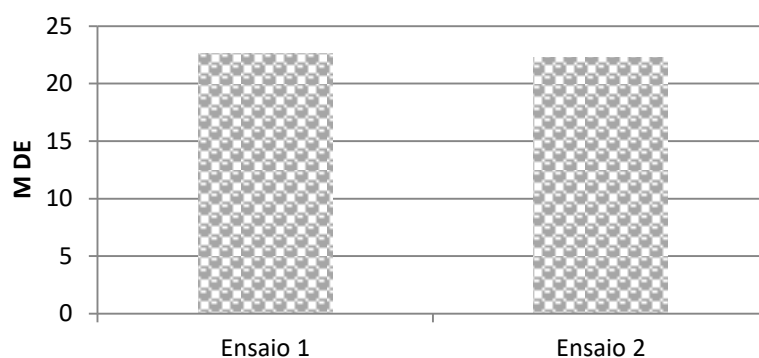


Figura 5.14– Porto Colômbia - índices MD do diabásio

Os valores obtidos no ensaio MD aproximaram-se dos obtidos no Los Angeles. A perda média de massa no MD foi de 22,5.

São encontradas, na literatura, várias tentativas de correlação do ensaio MD com outros ensaios em rocha. Resultado significativo tem sido obtido quando correlacionado o MD ao ataque químico com sulfato de magnésio, que degrada o material de modo acelerado em laboratório. Senior e Rogers (1991) estudaram 106 amostras de agregado, e obtiveram um coeficiente de correlação de 0,85. Richard e Scarlett (1997) confirmam, com seu trabalho, essa boa correlação.

A Figura 5.15 confirma o resultado apresentado por Senior e Rogers (1991), o qual foi usado para a estimativa gráfica do resultado de ensaio de ataque químico, com sulfato de magnésio para o diabásio de Porto Colômbia.

O uso do ensaio de ataque químico com sulfato de magnésio e o conhecimento da correlação entre esse ensaio e o micro Deval tornam-se relevantes quando não há a possibilidade de execução do ensaio MD, seja pela disponibilidade de equipamentos ou recursos financeiros. É possível, portanto, realizar-se o ataque químico e estimarem-se os valores percentuais de perdas do MD e vice-versa.

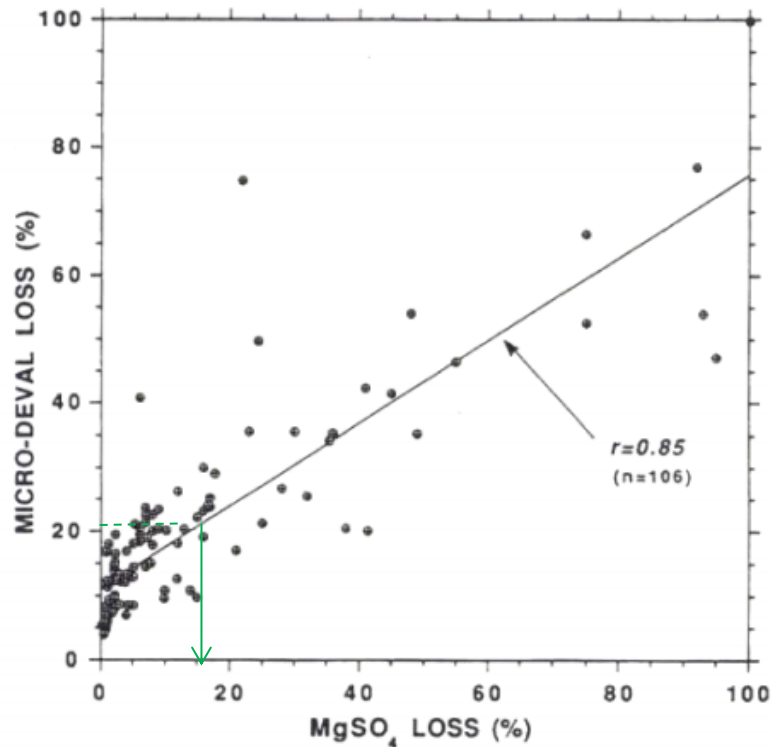


Figura 5.15 – Correlação entre o ensaio MD e ataque químico a sulfato de magnésio, Senior e Rogers (1991)

Usando o gráfico da Figura 5.15, para o valor do Micro Deval de 22,5, pode-se obter por meio de correlação, uma perda estimada por ataque químico de 17% para o diabásio. Encontram-se, na literatura, algumas tentativas de correlacionar, de modo generalizado, o MD ao ensaio de abrasão Los Angeles. No entanto, alguns autores como Cooley e James (2003), Kandhal e Parker (1998), Latham et al. (1998) relatam, em seus estudos, que o MD não tem boas correlações com quaisquer testes de abrasão para uma aplicação genérica e que a correlação entre o MD realizado seco e molhado apresenta significativas diferenças.

e) *Compressão Pontual*

O ensaio de resistência à compressão pontual foi executado segundo a ASTM D5731 (2008), seguindo a metodologia prescrita anteriormente no item 3.7. Destacam-se a agilidade e a simplicidade de execução do ensaio, que fornece bons resultados quanto à compressão pontual e possibilita a obtenção do valor da resistência à compressão uniaxial por meio de correlações .

A Figura 5.16 ilustra os valores dos ensaios de carregamento pontual realizado com o diabásio de Porto Colômbia.

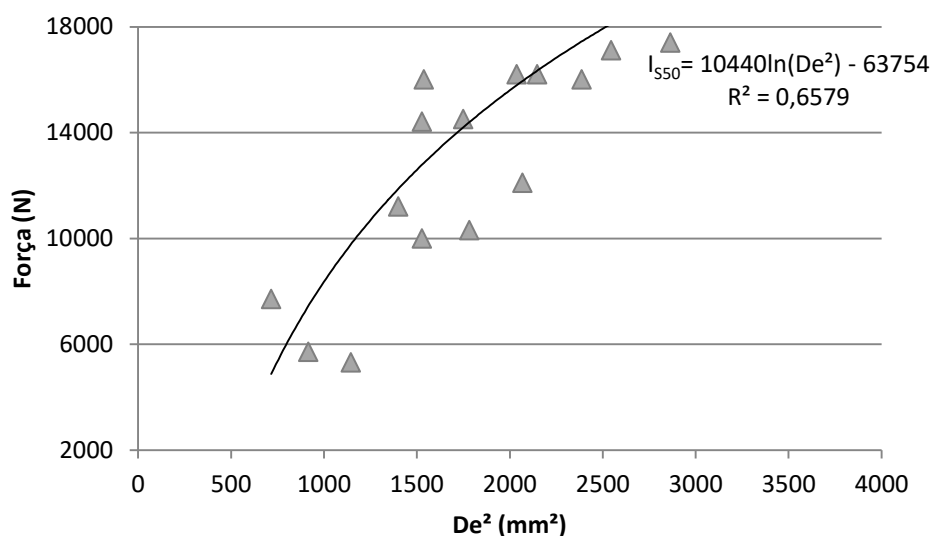


Figura 5.16– Compressão Pontual do diabásio

O valor da resistência à compressão uniaxial da rocha (q_u) foi obtido através do ensaio de compressão pontual usando a Equação 09, onde admite-se um fator de conversão k sugerido na literatura. O valor correspondente ao índice I_{S50} obtido foi de **6,70** MPa.

Para estimar o valor de q_u , foi usado o fator k extraído da Tabela 4.5, sugerido por ASTM D5731 (2008), Hudson e Harrison (1995), Maia (2001) e *Egyptian Code for Soil Mechanics, Design and Construction of Foundations* (2001), empregado para todos os tipos de rochas, com os respectivos valores de $k= 23$; $k= 24$; $k= 26$ e $k= 25$. Os resultados são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Estimativa do valor de q_u para o quartzito de Furnas

Referência	Correlação	q_u (MPa)
ASTM D5731 (2008)	$q_u = 23 I_{S50}$	154,1

(Goodman, 1989; Hudson e Harrison, 1995)	$q_u = 24 I_{s50}$	160,8
Egipcion Code for Soil Mechanics, Design and Construction of Foundations (2001)	$q_u = 25 I_{s50}$	167,8
Maia (2001)	$q_u = 26 I_{s50}$	174,2

Por se tratar de um valor estimado, o uso de mais de um método de correlação entre o ensaio de compressão pontual e o valor da compressão axial, permite avaliar uma faixa de valores previstos para q_u . Considerando a média dos resultados da Tabela 5.9, adotou-se a resistência à compressão uniaxial média $q_u = 164$ MPa.

5.2.2 ENSAIOS COMPRESSÃO PONTUAL E ABRASÃO LOS ANGELES – PORTO COLÔMBIA

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão pontual e abrasão Los Angeles foram comparados aos valores apresentados por Al-Harhi (2001).

A Figura 5.17 mostra os valores obtidos pelo autor e neste trabalho.

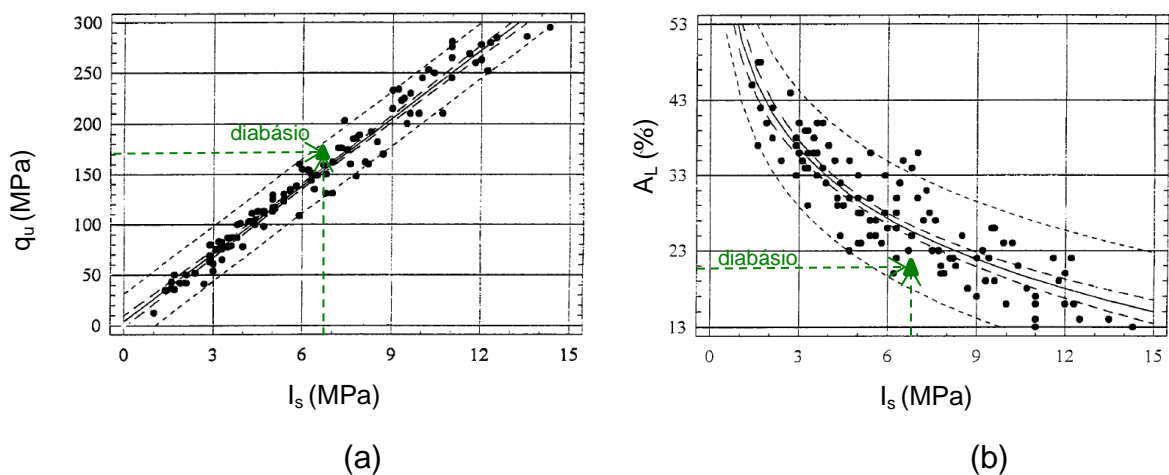


Figura 5.17 – Diabásio - (a) Correlação entre I_s e q_u (b) Correlação entre I_s e A_L

Comparando o resultado obtido neste estudo com os encontrados por Al-Harhi (2001), conclui-se que o valor encontrado para a compressão axial está dentro da faixa esperada.

Os resultados do carregamento pontual e abrasão Los Angeles correspondem-se dentro da faixa de valores encontrado na literatura.

5.3 UHE Manso

O enrocamento do APM-Manso está exposto ao meio exógeno por 16 anos. O material rochoso em questão são o arenito e o metarenito, ambos de composição similar.

Não serão exibidos os ensaios de durabilidade e carregamento pontual devido à limitação da granulometria das partículas.

Litologicamente, as partículas são compostas por metarenitos finos a médios, vermelhos, com grãos de quartzo bem arredondados, de boa esfericidade, superfície fosca e recobertos por uma película ferruginosa, sendo comum cimento silicoso ou ferruginoso. As características das estruturas sedimentares presentes, tais como estratificação cruzada de grande porte, arredondamento e esfericidade dos grãos, opacidade, entre outros, caracterizam um ambiente com depósitos de dunas e interdunas. (CPRM, 2006).

a) *Análise Química*

A análise química do metarenito com a determinação dos minerais e óxidos presentes nas partículas está exposto na Tabela 5.10 .

Tabela 5.10 – Análise Química do Enrocamento do APM-Manso

Manso - Metarenito	
Minerais	Percentuais
Si	69,9
K	2,6
Fe	12,4
S	2,6

Al	2,9
Cs	0,0
Sm	0,0
W	0,6
Ti	1,8
Ca	6,6
Mn	0,0
Óxidos	
SiO ₂	86,5
Al ₂ O ₃	5,5
SO ₃	1,9
K ₂ O	0,7
Fe ₂ O ₃	2,5
CaO	1,9
TiO ₂	0,5

O metarenito que compõe o enrocamento é composto por aproximadamente 86 % de sílica, seguido de 5,5% de alumina e 2,5% de hematita, trióxido de enxofre e óxido de cálcio perfazendo 1,9% cada. Os demais óxidos não configuram percentuais expressivos na composição da rocha.

A presença dos minerais férricos é responsável pela coloração avermelhada das partículas. Paraguassu (1972) considera que a cimentação do arenito é efetivada por precipitação da sílica em solução na água subterrânea e que ela ocorre, mais comumente, em camadas de arenitos com pouca espessura.

Os índices geoquímicos propostos Ruxton (1968), Barros (1979) e o Índice químico de alteração (CIA) foram aplicados aos resultados obtidos na análise química. A Figura 5.18 apresenta esses índices.

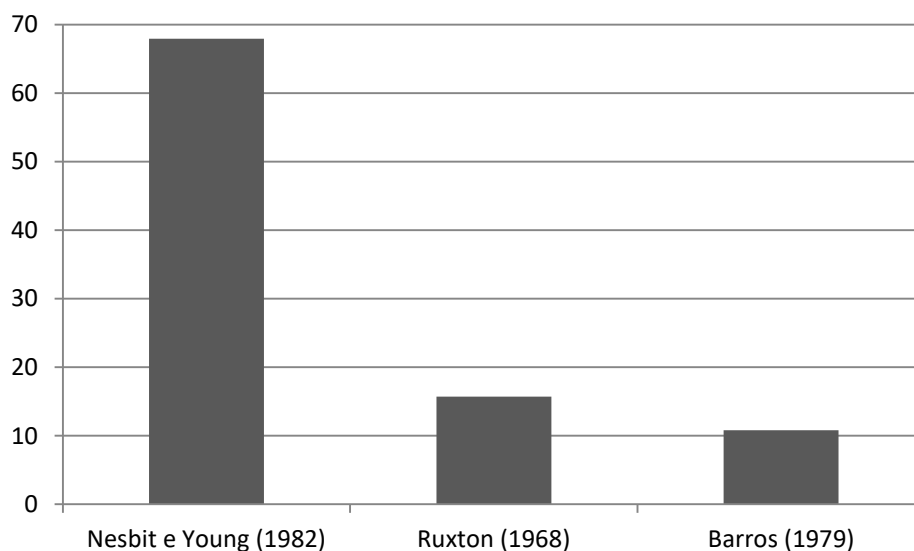


Figura 5.18 – Índices químicos . arenito

O valor do *CIA* proposto por Nesbit e Young (1982), calculados para os arenitos da área de estudo é em torno de 68, o que indica um nível moderado a intenso de intemperismo da rocha.

b) Caracterização da alteração

Usando o diagrama de Peltier (1950), mostrado na Figura 2.3, foi estabelecida a correlação entre a temperatura média anual e a precipitação média anual, o que se verifica na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Alteração dos enrocamentos devido ao intemperismo

Enrocamento	Tipo de Rocha	Precipitação média anual (mm)	Temperatura média anual (°C)	Alteração
UHE Manso	Arenito e meta-arenito	1300	26	Alteração química intensa

c) Abrasão Los Angeles

A metodologia usada para a execução dos ensaios foi descrita no item 4.3. Foram usadas as faixas granulométricas C e D, com as massas e número de esferas e giros estabelecidos pela norma NM 51 (ABNT, 2001). Os cálculos da percentagem de perda por abrasão foram efetuados utilizando a Equação 01.

Os resultados das perdas obtidas no ensaio de abrasão Los Angeles (A_L) para o enrocamento encontram-se na Figura 5.18.

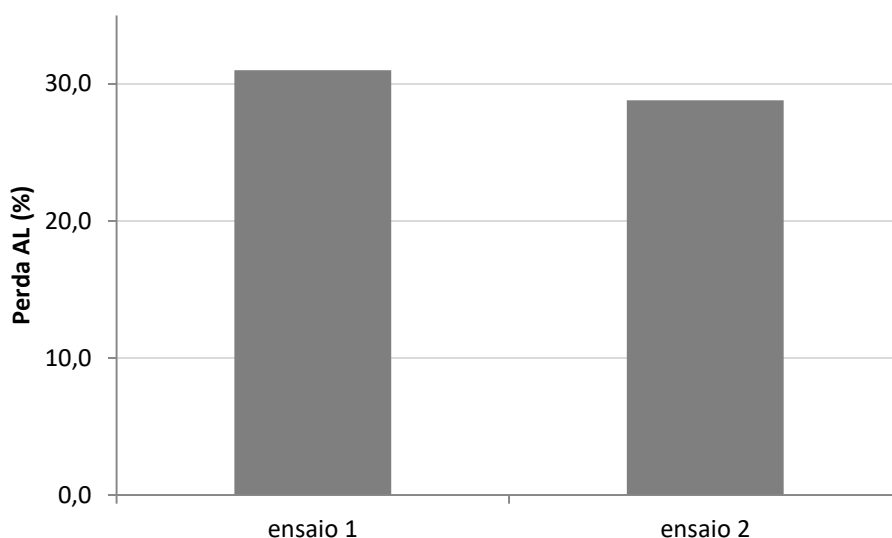


Figura 5.19 –metarenito – Abrasão Los Angeles

O ensaio Los Angeles mostra valores de perda por abrasão de aproximadamente 30%, compatíveis com a gênese do metarenito, cuja faixa de valores A_L encontra-se de 15 % a 30 %.

Como citado anteriormente, para o ensaio de abrasão em rochas de enrocamento segundo: Transportation Research Board Executive Committee (2006) Bureau of Reclamation. 2012 e as Normas ASTM C131, ASTM C535, USBR 4131, o valor máximo da perdas A_L é de 40%, estando o material dentro dos valores estipulados para uso quanto a essas perdas.

d) *Ensaio Micro Deval*

O ensaio foi realizado seguindo a metodologia apresentada no item 4.5. O micro Deval, que avalia o desgaste por abrasão e choque, foi realizado com as partículas úmidas e a presença de carga abrasiva. A Figura 5.20 exhibe a perda de massa dos enrocamentos estudados.

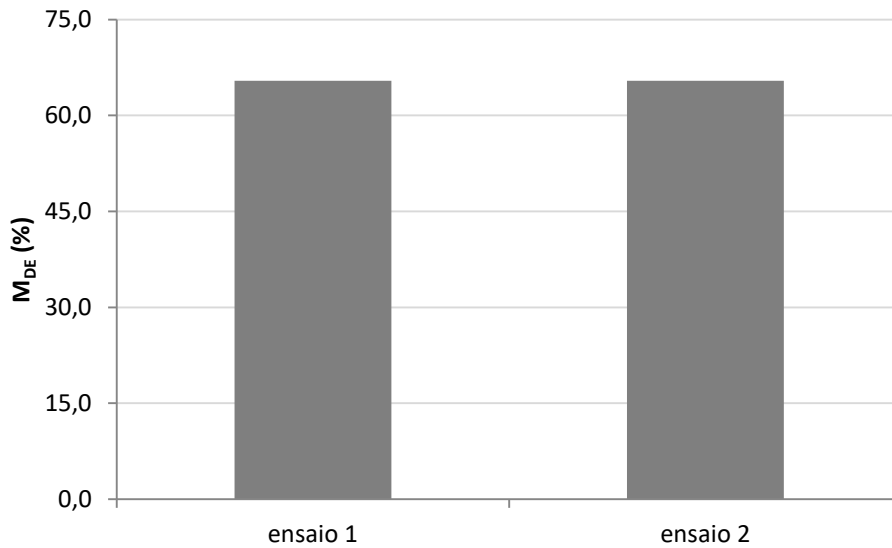


Figura 5.20 – metarenito – M_{DE}

O valor médio obtido para o coeficiente M_{DE} foi de 65,5%. Usando o estudo efetuado por Senior e Rogers (1991), o resultado do ensaio MD foi correlacionado com o ataque químico com sulfato de magnésio. A Figura 5.21 mostra os resultados obtidos pelo autor e o valor encontrado.

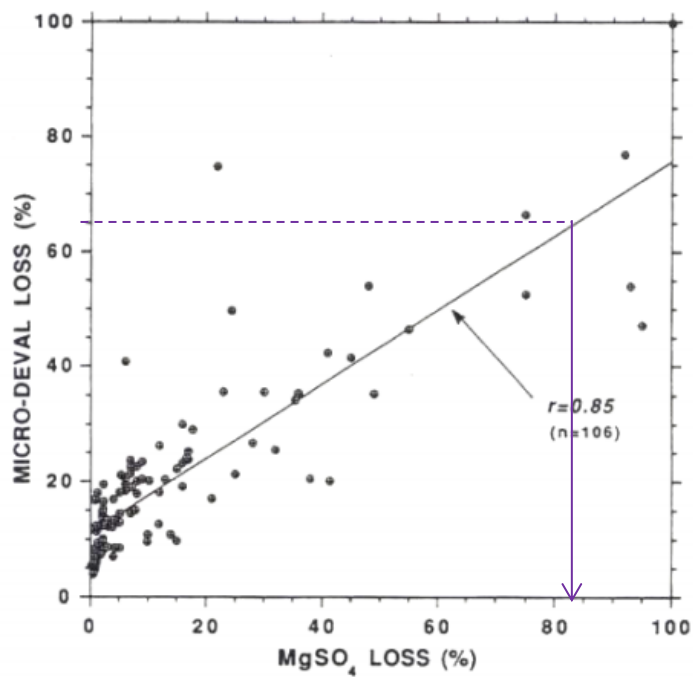


Figura 5.21 – Correlação entre o ensaio MD e ataque químico a sulfato de magnésio, Senior e Rogers (1991)

Para um coeficiente $M_{DE} = 65,5$ se obtém, por meio de correlação gráfica, uma perda estimada por ataque químico de 85%.

5.4 UHE FOZ DO CHAPECÓ

O enrocamento da UHE Foz do Chapecó é composto por basaltos provenientes das escavações obrigatórias na região de implantação da usina. A obra é relativamente nova, a usina encontra-se em operação há 6 anos.

a) Petrografia e Análise química

O basalto da UHE Foz do Chapecó (Figura 5.22) revela composição formada por 50% de plagioclásio, entre 25 % de clinopiroxênio e 25% de minerais opacos.

A granulação é muito fina e a textura afanítica, a rocha sã se apresenta de coloração cinza, e a rocha alterada apresenta coloração marrom avermelhada, as microfraturas mostram vestígios de oxidação.

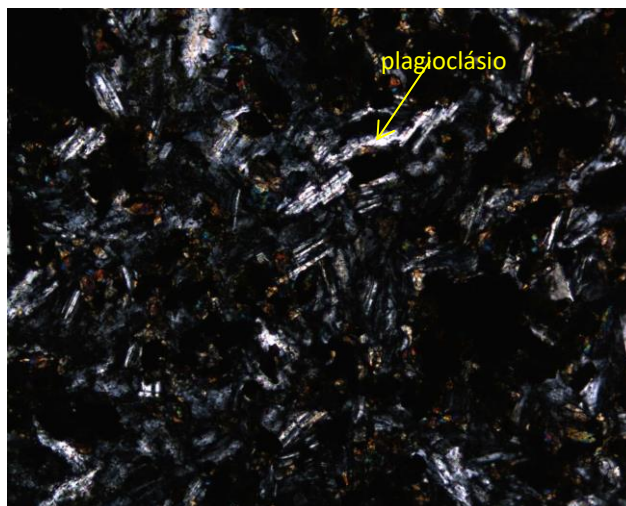


Figura 5.22 – Fotomicrografia do basalto de Foz do Chapecó

A Tabela 5.12 fornece os resultados da análise química dos minerais e óxidos presentes nas amostras estudadas.

Tabela 5.12 – Foz do Chapecó - Análise Química

Rocha: basalto	
Minerais	Percentuais
Si	23,0
K	6,3
Fe	34,8
S	0,8
Al	6,2
Cs	0,0
Sm	0,0
W	0,0
Ti	5,5
Ca	22,2
Mn	0,6
Óxidos	
SiO ₂	49,8
Al ₂ O ₃	17,4
SO ₃	1,2
K ₂ O	3,4
Fe ₂ O ₃	13,0
CaO	11,8
TiO ₂	3,1

O material de Enrocamento das UHE Foz do Chapecó exibe composições semelhantes ao diabásio estudado, típicas desses materiais, com aproximadamente 50% de quartzo, cerca de 17 % de óxido de alumínio, 13 % de hematita (Fe₂O₃) (correspondendo a rochas ferro-magnesianas), e cerca de 12% de óxido de cálcio. A alterabilidade do enrocamento foi avaliada pelos índices geoquímicos de Ruxton (1968), Barros (1979) e o Índice químico de alteração (CIA), já citados anteriormente. Os resultados estão ilustrados na Figura 5.23

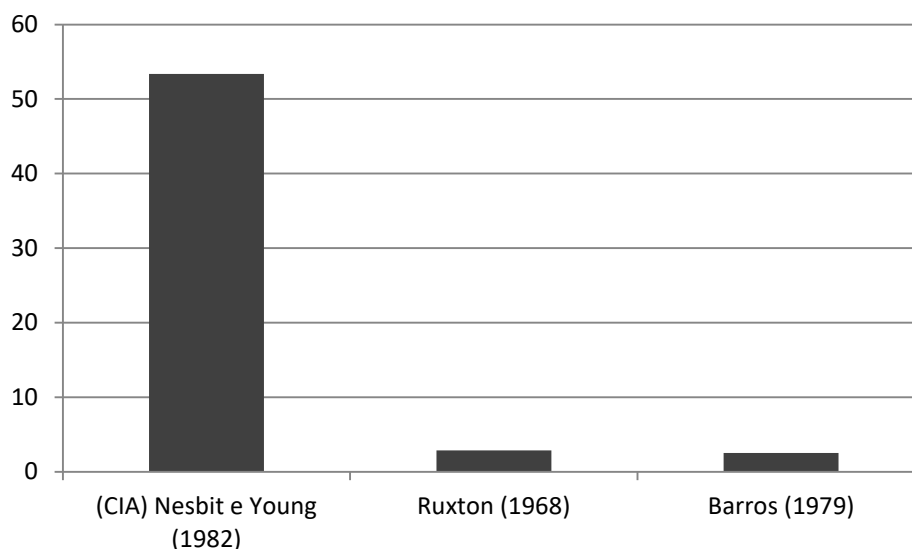


Figura 5.23 – Basalto de Foz do Chapecó- Índices Geoquímicos

Segundo Nesbitt and Young (1982), os basaltos revelam índices entre 30% e 45%. Observa-se que o valor calculado se encontra em 53%, sendo 8% superior ao valor máximo esperado, que é de 45%, evidenciando, portanto, a alteração do material. Ressalta-se que a UHE está em operação há apenas 6 anos e já apresenta traços acentuados de alteração física das partículas, e conseqüentemente, de alteração química.

b) Caracterização da alteração

Com o uso do diagrama de Peltier, (1950), apresentado no Capítulo 2, Figura 2.3, foi estabelecida a correlação entre a temperatura média anual e a precipitação média anual. A conclusão consta na Tabela 5.13

Tabela 5.13 – Alteração dos enrocamentos devido ao intemperismo

Enrocamento	Tipo de Rocha	Precipitação média anual (mm)	Temperatura média anual (°C)	Alteração
UHE Foz do Chapecó	Basalto	1900	18	Alteração química intensa

c) Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão seguiu às prescrições estabelecidas pela NM 51 (ABNT, 2001). A Figura 5.24 exhibe os resultados obtidos no ensaio.

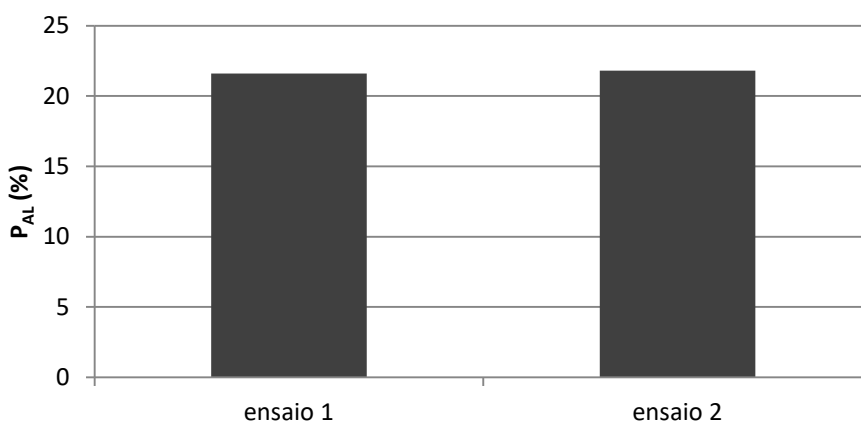


Figura 5.24 – Foz do Chapecó - Abrasão Los Angeles

O valor médio obtido para as perdas por abrasão foi de 21,7%. Os valores encontrados na literatura, expostos na Tabela 4.2 para a perda por abrasão esperada para o basalto, situam-se na faixa de 10 % a 17 %.

Para uma avaliação mais adequada, é necessário comparar os valores do material de enrocamento sem alteração com os resultados obtidos do material no campo. Conjecturando que o material intacto exibia valores de perda A_L na faixa típica, apresentados na Tabela 4.2, com a perda máxima de 17%, pode-se considerar um acréscimo de perdas devido à exposição ao meio exógeno.

Analisando os valores previstos para o ensaio Los Angeles nos critérios de projeto de UHE e enrocamentos apresentado na Tabela 2.3, para o critério mais conservador do *U.S. Corps of Engineers*, que limita o resultado das perdas A_L a no máximo 20%, o material seria considerado inadequado; admitindo os valores usados pelas demais entidades internacionais, citados na Tabela 2.3, que admitem um valor máximo para as perdas A_L de 40%, o enrocamento estaria classificado como adequado.

d) Ensaio de Durabilidade (SD)

O ensaio foi realizado com o material de enrocamento apresentando a capa de degradação, permitindo a avaliação do desgaste da capa de alteração das partículas durante o ensaio.

A Tabela 5.14 apresenta os valores do índice de durabilidade para os cinco ciclos de ensaios realizados.

Tabela 5.14 – SD enrocamento de Furnas

Índice de durabilidade (%)				
Id1	Id2	Id3	Id4	Id5
0,3	0,5	0,8	0,9	1

Nota-se uma pequena perda da capa de alteração. Esse valor é justificado pelo curto intervalo de tempo do material submetido a intempéries (6 anos).

e) *Compressão Pontual*

O ensaio de resistência à compressão pontual foi executado segundo a ASTM D5731 (2008), seguindo a metodologia prescrita no Capítulo 3, no item 3.7. Os resultados da resistência à compressão pontual possibilitaram, por meio de correlações, a obtenção do valor da resistência à compressão uniaxial q_u .

Os valores dos ensaios de carregamento pontual realizado com o basalto de Foz do Chapecó são mostrados na Figura 5.25.

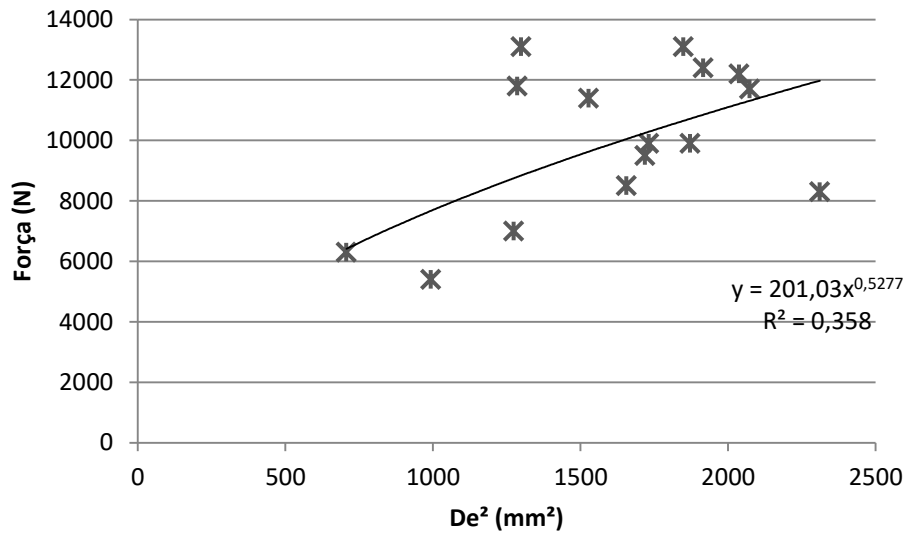


Figura 5.25 – Compressão pontual- basalto de Foz do Chapecó

Aplicando-se as equações 05 a 08, foi obtido o valor correspondente ao índice I_{s50} , de **6,5 MPa**.

Segundo a Norma ASTM D5731 (2008), o valor da resistência à compressão uniaxial da rocha (q_u) pode ser obtida através da Equação 9, admitindo um o fator de conversão k sugerido na literatura. A Tabela 5.15 apresenta os valores para k e as correlações para cálculo do valor de q_u usados.

Tabela 5.15- Correlações usadas para obter q_u

Referência	Tipo de rocha	Correlação	q_u (MPa)
ASTM D5731 (2008)	Todos os tipos de rocha	$q_u = 23 I_{s50}$	149,5
(Goodman, 1989; Hudson e Harrison, 1995)	Todos os tipos de rocha	$q_u = 24 I_{s50}$	156
Egyptian Code for Soil Mechanics, Design and Construction of Foundations (2001)	Todos os tipos de rocha	$q_u = 25 I_{s50}$	162,5
Forster (1983)	Basalto	$q_u = 17,6 I_{s50}$	114,4
Singh (1981)	Basalto	$q_u = 18,7 I_{s50} - 13,2$	108,35
Read <i>et al.</i> (1980)	Basalto	$q_u = 20 I_{s50}$	130

O uso de mais de uma equação para se obter a compressão uniaxial permite avaliar a oscilação dos valores esperados. Para o basalto de Foz do Chapecó, o valor de q_u compreende entre 114 MPa e 162 MPa.

5.5 UHE MARIMBONDO

A UHE Marimbondo está em operação há 40 anos. Possui o talude me montante em rochas basálticas.

a) Petrografia e Análise química

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.

Sua constituição mineralógica é caracterizada pela presença de óxidos em quantidades típicas desses materiais, com mais de 46% de quartzo, cerca de 17% de óxido de alumínio, hematita (Fe_2O_3) cerca de 17% (correspondendo a rochas ferro-magnesianas), e 12% de óxido de cálcio.

A Tabela 5.16 apresenta os resultados da análise química dos minerais e óxidos presentes nas amostras estudadas.

Tabela 5.16 – Análise Química do Enrocamento da UHE Marimbondo

Rocha: basalto	
Minerais	Percentuais
Si	21,3
K	3,6
Fe	41,1
S	0,8

Al	6,1
Cs	0,0
Sm	0,0
W	0,0
Ti	5,5
Ca	20,4
Mn	0,7
Óxidos	
SiO ₂	46,5
Al ₂ O ₃	17,2
SO ₃	1,4
K ₂ O	2,1
Fe ₂ O ₃	16,8
CaO	12,1
TiO ₂	3,2

Os resultados da petrografia do basalto da UHE Marimbondo revelam um material apresentando massa cristalina, granulação muito fina, textura holocristalina capa de alteração proveniente da decomposição dos minerais do basalto denso, com composição em torno de 40 % de plagioclásio, entre 25 a 30% de clinopiroxênio e entre 25 a 30% minerais acessórios.

Há presença de fissuras preenchidas e a capa de alteração está evidenciada. Segundo Maia (2001), na época de seus estudos, a capa de alteração podia alcançar 5mm de espessura (Figura 5.26). Neste caso, o mecanismo de alteração está associado às reações físico-químicas ocorridas na rocha, ou seja, trata-se de um mecanismo de decomposição. Os blocos de rocha perdem a resistência superficial, sofrendo um desgaste sensível e produzindo finos. O interior da rocha é de cor cinza e a camada de alteração apresenta-se bege.



Figura 5.26 - Capa de alteração- basalto de Marimbondo, Maia(2001)

No interior do bloco, a maioria dos minerais de plagioclásio (Figura 5.27) encontra-se limpa 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.

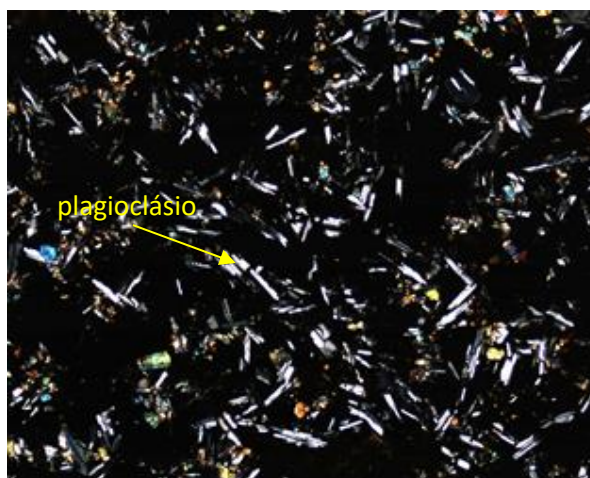


Figura 5.27 – Fotomicrografia do basalto de Marimbondo

b) Caracterização da alteração

Com o uso do o diagrama de Peltier (1950) mencionado no Capítulo 2, Figura 2.3, foi estabelecida a correlação entre a temperatura média anual e a precipitação média anual, nos últimos 10 anos. A conclusão se encontra na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Alteração dos enrocamentos devido ao intemperismo

Enrocamento	Tipo de Rocha	Precipitação média anual (mm)	Temperatura média anual (°C)	Alteração
UHE Marimbondo	Basalto	1380	23	Alteração química moderada

b) Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão seguiu as prescrições estabelecidas pela NM 51 (ABNT, 2001). A Figura 5.28 apresenta os resultados obtidos no ensaio.

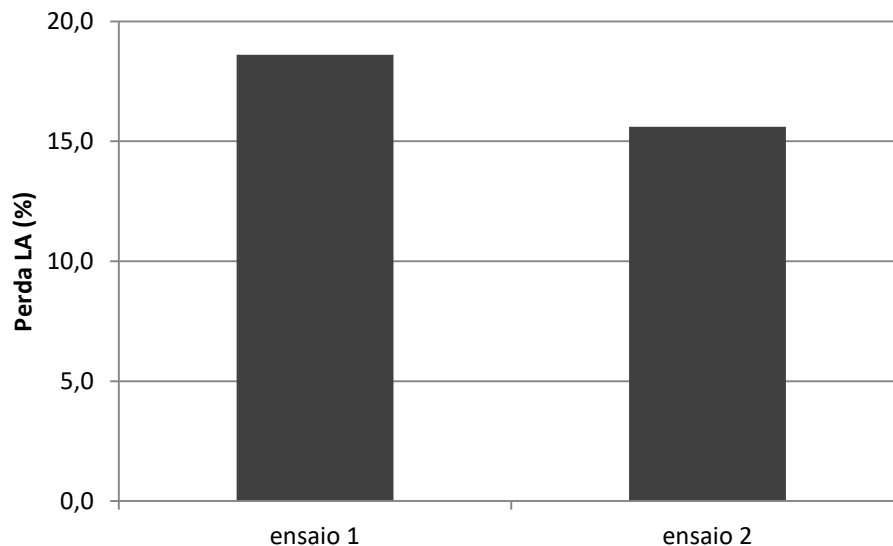


Figura 5.28 – Resultado do ensaio LA - basalto de Marimbondo

A porcentagem média de perda no LA foi de 17%. Os valores exibidos na Tabela 4.2, extraídos do Boletim de Ciências dos Materiais, indicam perdas de 10 % a 17% para basalto intacto. Embora o material esteja submetido a intempéries por 40 anos, o resultado para a perda LA apresenta-se limítrofe na faixa de valores típicos esperados.

Considerando os critérios de projeto de UHE e enrocamentos apresentados na Tabela 2.3 e os valores previstos para o ensaio Los Angeles adotados pelo U.S.

Corps of Engineers, que limita o resultado das perdas A_L a no máximo 20%; e os valores adotados pelo: *Transportation Research Board Executive Committee* (2006) Bureau of Reclamation 2012 e as Normas ASTM C131, ASTM C535, USBR 4131, que admitem um valor máximo para as perdas A_L de 40%, pode-se afirmar que o basalto de marimondo atende ambos os critérios quanto à perda por abrasão Los Angeles, com o valor de perda de 17% , inferior aos critérios mencionados.

c) Ensaio de Durabilidade (SD)

O ensaio foi realizado conforme descrito no Capítulo 4, no item 4.4. O índice de durabilidade (Id_5) foi obtido com o material de enrocamento apresentando a capa de degradação.

Durante o ensaio SD, a baixa rotação do equipamento e o tempo de ensaio reduzido não provocam desgaste profundo nas partículas, permitindo avaliar o desgaste da capa de alteração das partículas. O índice de durabilidade foi calculado segundo a Equação 03.

A Tabela 5.18 exhibe os valores do índice de durabilidade para os cinco ciclos de ensaios realizados.

Tabela 5.18 – SD enrocamento de Furnas

Índice de durabilidade (%)				
Id1	Id2	Id3	Id4	Id5
0,8	2,2	2,6	3,1	3,4

O SD foi usado para caracterizar a durabilidade da rocha em função da perda de massa ocorrida no quinto ciclo de ensaio. Observando os valores apresentados no Capítulo 4, Tabela 4.3, para o quinto ciclo, a perda de massa menor que 5% caracteriza que as amostras ensaiadas possuem durabilidade muito alta.

As pesquisas de Maia (2001) apresentam os valores do índice de durabilidade da rocha intacta e com 25 anos de alteração no campo, expostos na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – SD segundo Maia (2001)

Alteração	Id2	Id5
Intacto	0,38	0,62
25 anos	1,05	1,64

Usando os valores obtidos por Maia (2001) e os valores obtidos nesse estudo é possível gerar a curva que representa a perda de massa da capa de alteração ao longo dos anos para o segundo (I_{d2}) e quinto (I_{d5}) ciclos de ensaio.

A Figura 5.29 apresenta as curvas obtidas para o segundo e quinto ciclos de ensaio.

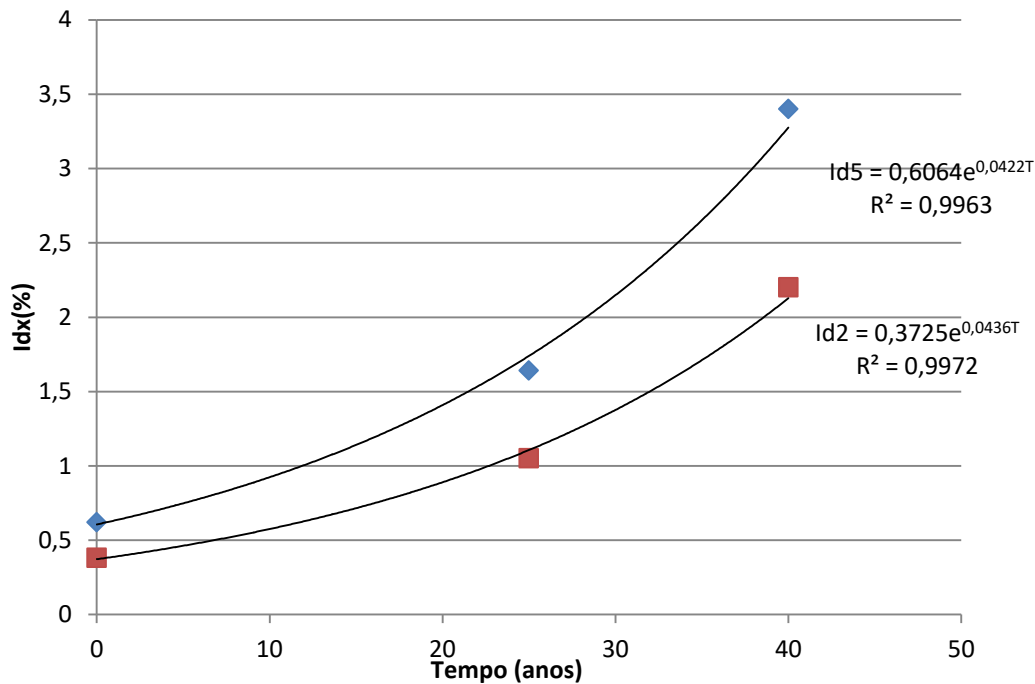


Figura 5.29 - Perda de massa durante 40 anos no segundo e quinto ciclo de ensaio SD – basalto de Marimbondo

d) Ensaio Micro Deval

Usando o equipamento montado na UENF, e efetuando o procedimento de ensaio descrito no item 4.5, foram realizados dois ensaios MD com as rochas degradadas no campo durante 40 anos, cujo resultado, foi calculado pela Equação 04 e está apresentado na Figura 5.30.

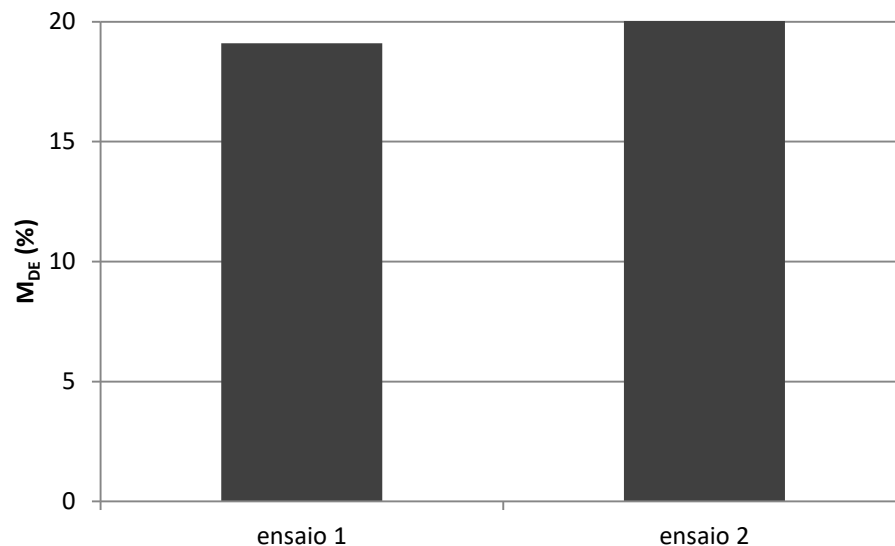


Figura 5.30 – Resultados MD de Marimbondo

A média dos valores obtidos equivale a uma perda percentual de 19,6%. Nos critérios de ensaio para projeto de enrocamentos, citados no item 2.5, não são estabelecidos valores de referência para o ensaio MD.

Na Figura 5.31 são mostrados os valores do ensaio MD para o material intacto, com 25 e 40 anos de degradação natural.

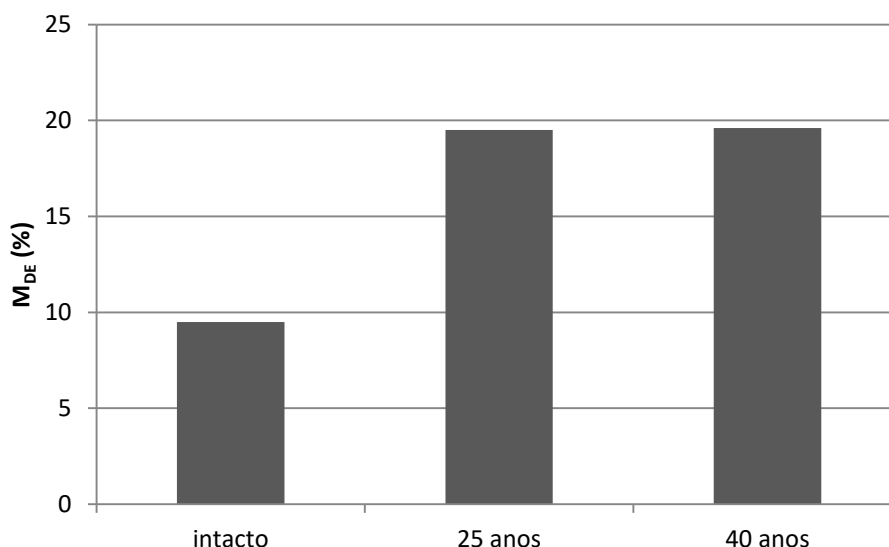


Figura 5.31 –MD de Marimbondo ao longo do período de exposição no campo

Comparando os resultados desse estudo com os resultados obtidos por Maia (2001) para o ensaio micro Deval, observa-se que quanto ao MD, as perdas apresentam-se estáveis, com um aumento de 0,1% nos últimos 15 anos.

O aumento da perda de massa da capa de degradação do SD revelado na Figura 5.29 não influencia nos resultados das perdas no ensaio MD. Isso porque o MD é executado na presença de carga abrasiva, em um intervalo de tempo maior e com mais energia de desgaste, se comparado ao SD, provocando as perdas nas camadas superficiais e internas da rocha. Outro fato que influencia nos resultados, relatado por Maia (2001), é que os blocos de enrocamento vêm sofrendo desagregação, provocada pela alteração das fissuras e, conseqüentemente, redução da granulometria, fazendo com que as partículas de basalto estudadas tenham faces com diferentes períodos de exposição a intempéries.

e) Carregamento Pontual (*Point Load*)

O ensaio foi executado segundo o procedimento descrito no Capítulo 4, item 4.6, seguindo a prescrição da Norma ASTM D5731 (2008).

O valor para o índice de resistência à carga pontual (I_{S50}) foi determinado segundo as Equações 05 a 08.

Realizaram-se 25 ensaios PL, com amostras de rocha basáltica de Marimbondo seca em estufa, exposta ao intemperismo por 40 anos. A Figura 5.32 fornece o gráfico de carga de ruptura no carregamento pontual $P \times De^2$. Mostra a curva ajustada aos resultados e o valor do coeficiente de correlação R^2 , obtido por regressão estatística.

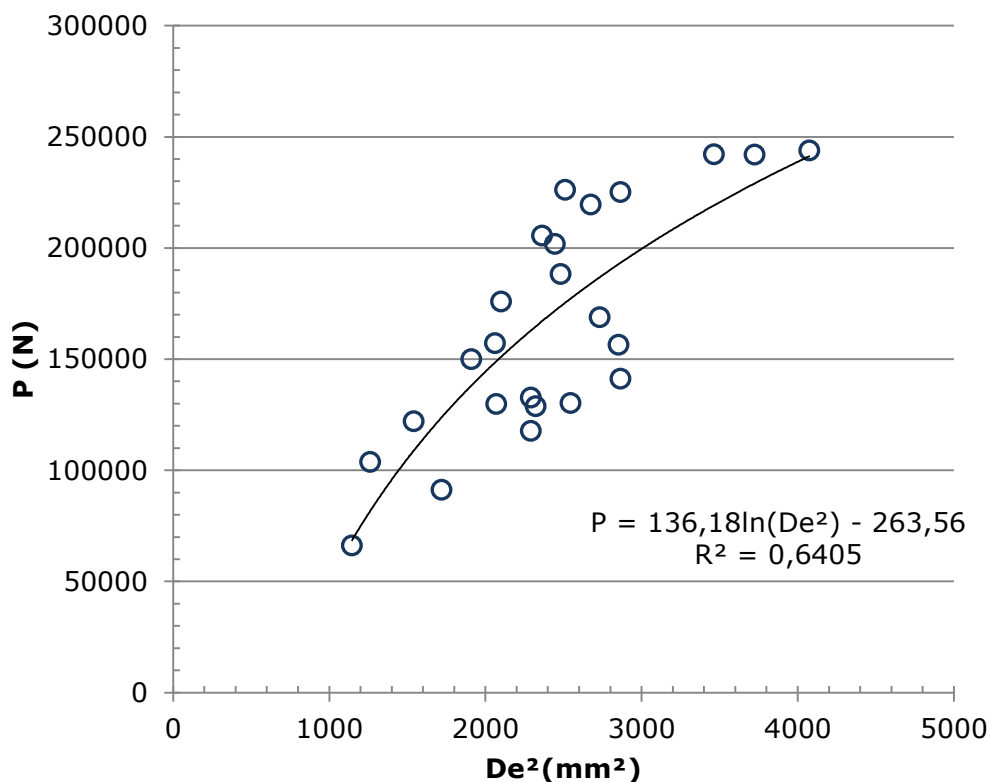


Figura 5.32 – PL basalto de marimbondo

O índice I_{S50} obtido, correspondente ao basalto com 40 anos de exposição no campo, foi de 6,82 MPa.

Os valores do índice de resistência à carga pontual I_{S50} , correspondente ao estudos de Maia (2001) para o basalto intacto e com 25 anos de exposição no campo, foram respectivamente: 9,9 MPa e 8,9 MPa .

Plotando os valores de $I_{S50} \times$ tempo (Figura 5.33), para os distintos períodos de exposição do basalto a intempéries, obtêm-se a curva ajustada aos resultados, que representa o comportamento do material rochoso no decorrer do tempo.

O coeficiente de correlação R^2 encontrado por meio de regressão estatística tem o valor de 0,97, considerado bom para sequência de resultados apresentados.

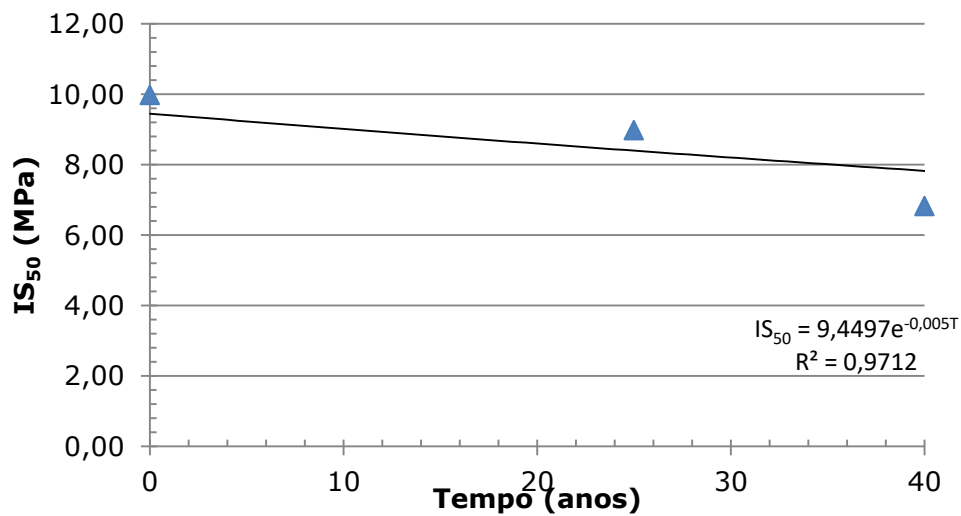


Figura 5.33 – Variação do PL com o tempo

Observa-se a redução gradual de resistência pontual do material de enrocamento ao longo dos anos.

O valor da resistência à compressão uniaxial da rocha q_u pode ser obtido através de um fator de correlação k , sugerido na literatura e já apresentado neste Capítulo.

Segundo a Norma ASTM D5731 (2008), o valor da resistência à compressão uniaxial da rocha (q_u) pode ser obtida através da Equação 9, admitindo um o fator de conversão k sugerido na literatura. A Tabela 5.20 apresenta os valores para k e as correlações para cálculo do valor de q_u usados.

Tabela 5.20 - Correlações usadas para obter q_u

Referência	Tipo de rocha	Correlação	q_u (MPa)
ASTM D5731 (2008)	Todos os tipos de rocha	$q_u = 23 I_{s50}$	156,86
(Goodman, 1989; Hudson e Harrison, 1995)	Todos os tipos de rocha	$q_u = 24 I_{s50}$	163,68
Egyptian Code for Soil Mechanics, Design and Construction of Foundations (2001)	Todos os tipos de rocha	$q_u = 25 I_{s50}$	170,5
Forster (1983)	Basalto	$q_u = 17,6 I_{s50}$	120,03

Singh (1981)	Basalto	$q_u = 18,7 I_{s50} - 13,2$	127,53
Read <i>et al.</i> (1980)	Basalto	$q_u = 20 I_{s50}$	136,40

O uso de mais de uma equação para se obter a compressão uniaxial permite avaliar a oscilação dos valores esperados. Para o basalto de Marimbondo, o valor de q_u compreende entre 120 MPa e 170 MPa.

A Tabela 5.21 apresenta os valores obtidos para a resistência a carga pontual e à compressão axial do basalto denso de Marimbondo, considerando valor de 23 para a constante K , correspondente a ASTM D 5731 (2008) e aos resultados obtidos por Maia (2001) .

Tabela 5.21- Índices de resistência à carga pontual e compressão uniaxial

Tempo (anos)	I_{s50} (MPa)	q_u (MPa)
* intacto	9,98	239,52
*25	8,98	215,52
**40	6,82	156,86

*Resultados obtidos por Maia (2001); **Resultados obtido nessa pesquisa;

Os resultados apresentados mostram um decréscimo no valor da resistência da rocha, de aproximadamente 32% para a resistência a compressão pontual em relação ao basalto intacto.

5.5.1 ENSAIOS COMPRESSÃO PONTUAL E ABRASÃO LOS ANGELES – MARIMBONDO

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão pontual e abrasão Los Angeles foram comparados aos valores apresentados por Al-Harhi (2001). A Figura 5.34 exhibe os valores obtidos pelo autor e neste trabalho.

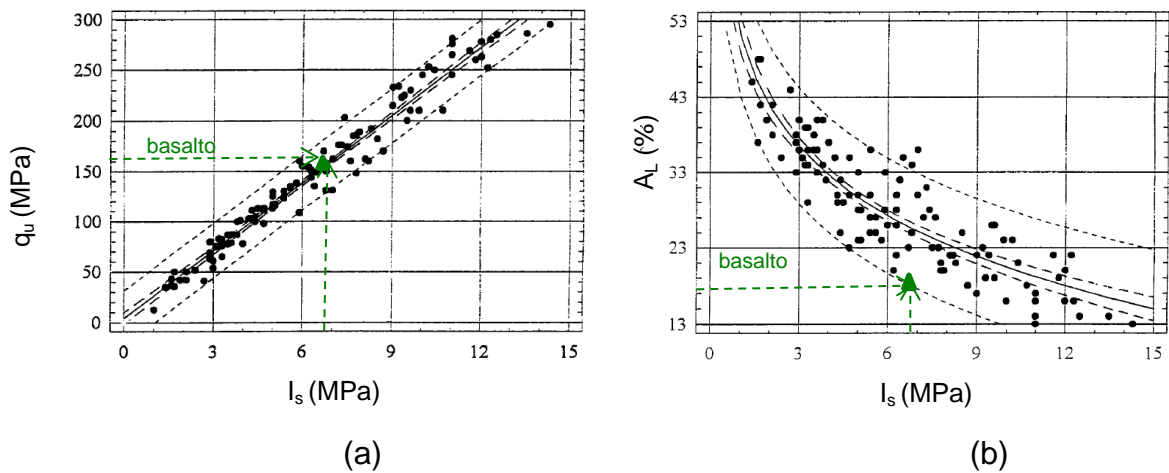


Figura 5.34 – Basalto - (a) Correlação entre I_s e q_u (b) Correlação entre I_s e A_L

Comparando o resultado obtido neste estudo com os encontrados por Al-Harhi (2001), observa-se que o valor encontrado para a compressão axial está dentro da faixa esperada.

Os resultados do carregamento pontual e abrasão Los Angeles correspondem-se no limite da faixa de valores citada na literatura.

5.5.2 CARACTERIZAÇÃO DA DURABILIDADE – MARIMBONDO

Conhecendo os resultados dos ensaios no material intacto e alterado, ou com estágios distintos de alteração, é possível calcular o índice de degradação. Com os resultados do basalto intacto, com 25 anos e 40 anos de exposição a intempéries, se apresenta o índice de degradação ou alteração I , calculado pela Equação 9, para os ensaios de compressão pontual e de durabilidade SD. A Tabela 5.22 mostra o valor do índice para esses ensaios.

Tabela 5.22- Índices de degradação dos ensaios SD e resistência à compressão pontual

SD			Compressão Pontual		
Tempo (anos)	I_{d5} (%)	I (%)	Tempo (anos)	I_{550} (MPa)	I (%)
0	0,62	0	0	8,1	0
25	1,64	62,19512	25	7,1	12,34568
40	3,4	81,76471	40	6,8	16,04938

Dias Filho *et al* (2016) propõe um modelo para estimativa da durabilidade e alterabilidade de materiais geotécnicos, representado pela Equação 11.

$$I = I_{ult} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) \quad \text{Equação 11}$$

onde I_{ult} e T_0 são parâmetros de durabilidade do material, sendo que I_{ult} define o estado último em que o material atinge uma condição de degradação com elevado tempo de exposição, sem a degradação total (desintegração). Desta forma, esse valor está relacionado diretamente à durabilidade do material. T_0 representa a velocidade com que se atinge o estado último e, portanto, está relacionado à alterabilidade do material.

A Figura 5.35 mostra esse modelo aplicado para índice de durabilidade do SD e compressão pontual para o material degradado no campo.

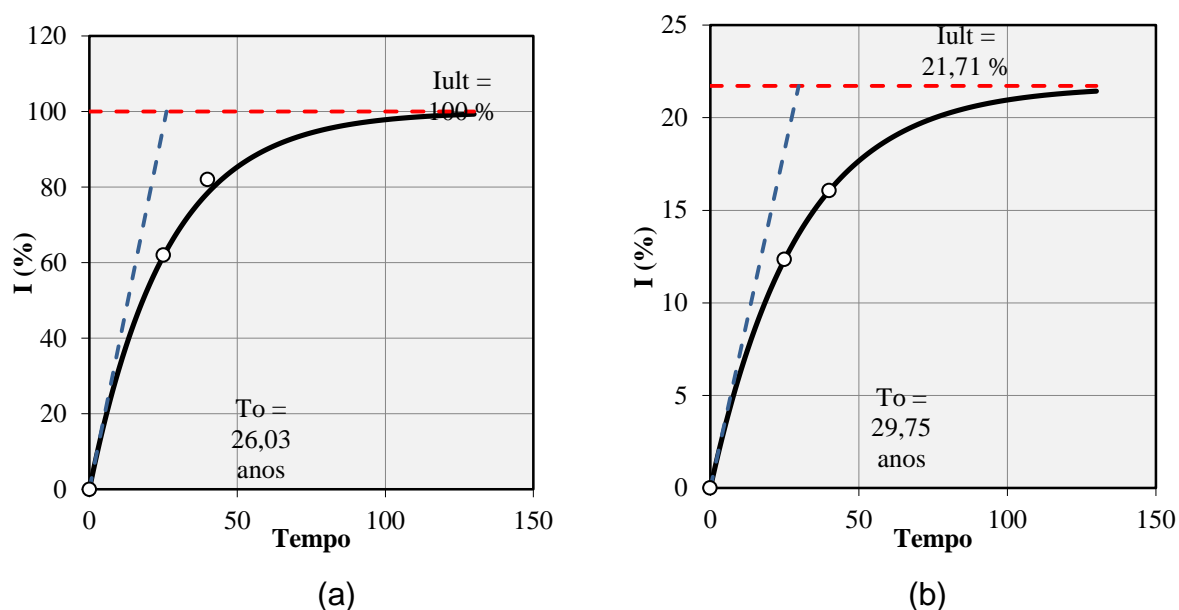


Figura 5.35 – Previsão da durabilidade (a) Slake Durability (b) Compressão pontual

A variação do índice de alteração com o tempo de exposição ao meio exógeno assume uma forma exponencial, indicando que os valores limites correspondem ao estado de maior degradação da rocha. Para o ensaio SD, tem-se onde $I_{ult} = 100\%$, para a compressão pontual $I_{ult} = 21,75\%$. Comparando os valores de T_0 , observa-se que a alterabilidade da rocha é maior para a compressão pontual, sendo condizente com o estado último atingido inferior ao SD.

5.6 PERDA DE MASSA – BASALTO E DIABÁSIO

Analisando os resultados do índice de durabilidade (Id_5) obtidos para as rochas ígneas de litologia e composição semelhante (basalto e diabásio) das UHEs de Marimbondo, Porto Colômbia e Foz do Chapecó foi obtida uma faixa de variação típica para a perda de massa desses materiais ao longo do tempo.

Na Figura 5.36 são apresentados os resultados do (Id_5) ao longo de 43 anos de exposição do material no campo.

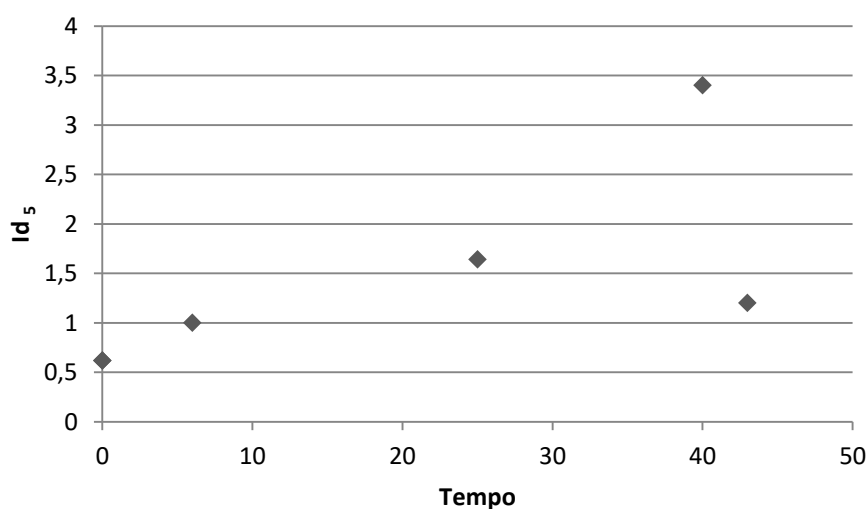


Figura 5.36 – Perda de massa dos basaltos e diabásio no ensaio SD

Observando a Figura 5.36, nota-se que os basaltos de Foz do Chapecó com 8 anos de exposição no campo e o de Marimbondo, com períodos de exposição de 0, 25 e 40 anos apresentam uma tendência exponencial para a perda de massa.

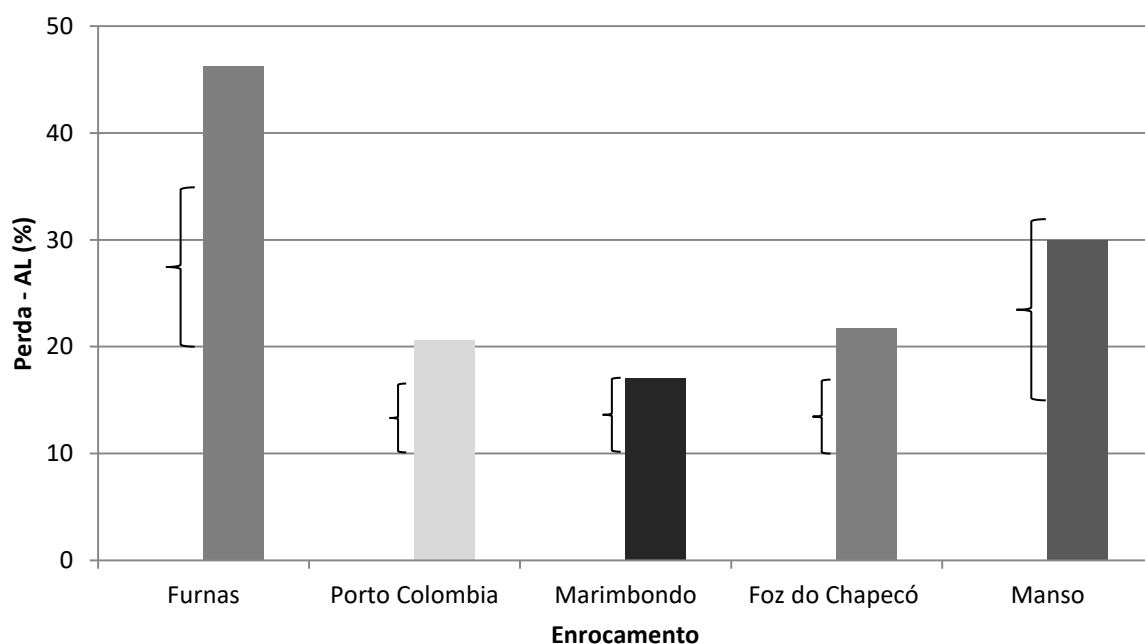
5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir são mostradas as considerações finais por tipos de ensaios.

✓ *Abrasão Los Angeles*

Os resultados das perdas obtidos no ensaio de abrasão Los Angeles (A_L) para os diferentes materiais de enrocamento são apresentados na Figura 5.37. Os valores encontrados na literatura, apresentados na Tabela 4.2 para a perda por abrasão

esperada nos diversos tipos de rocha, são apresentados e comparados com os resultados do ensaio LA.



* { faixa de variação da perda por abrasão Los Angeles encontrada na literatura

Figura 5.37 – Perda A_L no enrocamento.

Considerando o critério de projeto estabelecido pelo *U.S. Corps of Engineers*, que limita o resultado das perdas A_L a no máximo 20%, apenas o basalto do enrocamento da UHE Marimbondo está em condição adequada de uso com perdas A_L de 17%.

Considerando o critério de projeto menos conservador, que admite um valor máximo para as perdas A_L de 40%, pode-se afirmar que apenas o quartzito da UHE Furnas não se enquadra no critério de utilização, com perdas A_L de 46%.

✓ Ensaio de Durabilidade (*Slake Durability*)

Foram realizados cinco ciclos de ensaios com as partículas constituintes do enrocamento das UHE Furnas, UHE Marimbondo, UHE Porto Colômbia e Foz do Chapecó, que permitiu avaliar o desgaste da capa de alteração das partículas durante o ensaio, isso porque a baixa rotação do equipamento e o tempo de ensaio reduzido não provocam desgaste profundo nas partículas das rochas. A Figura 5.38

apresenta o SD em todos os ciclos. Nos enrocamentos de Marimbondo e Furnas esses desgastes são mais expressivos.

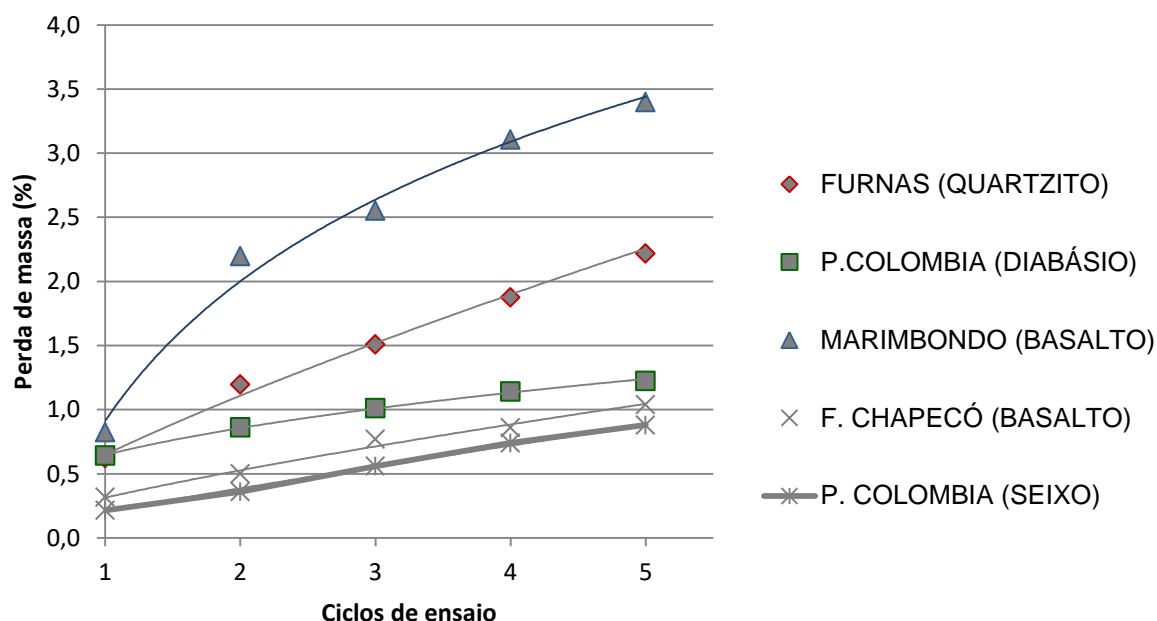


Figura 5.38 – Ensaio de durabilidade.

✓ *Ensaio Micro Deval*

O ensaio foi realizado seguindo a metodologia apresentada no ítem 4.5. O micro Deval avalia o desgaste por abrasão e choque, foi realizado com as partículas úmidas e a presença de carga abrasiva. A Figura 5.39 apresenta a perda de massa dos enrocamentos estudados.

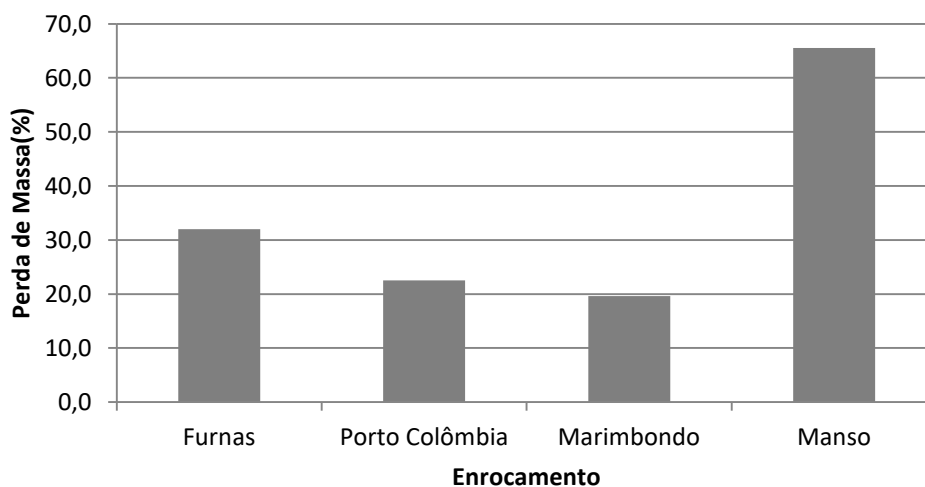


Figura 5.39 – Perda de massa do enrocamento no ensaio MD

As perdas de massa foram mais acentuadas nos enrocamento de arenito do APM – Manso.

✓ *Carregamento Pontual (Point Load)*

Para este ensaio foram consideradas válidas apenas as partículas que tiveram plano de ruptura coincidente com a seção transversal do bloco.

Não foram realizados ensaios de carregamento pontual nos seixos do enrocamento de Porto Colômbia e no arenito da UHE Manso, por não possuir amostras com granulometrias adequadas para o procedimento. A Figura 5.40 apresenta o resultado do ensaio de compressão pontual nos enrocamentos estudados.

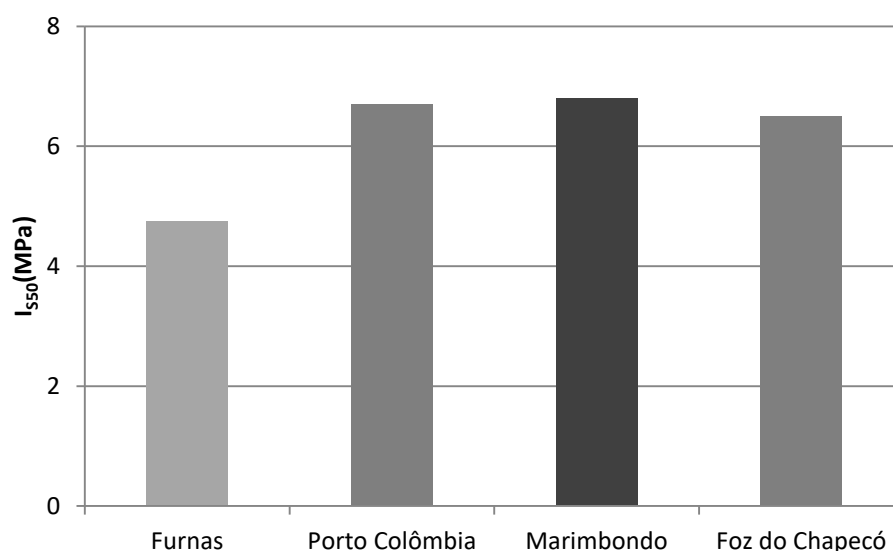


Figura 5.40 – Compressão pontual nos enrocamentos

Apesar de cada enrocamento possuir um período distinto de exposição à intempérie, os valores obtidos no ensaio de compressão pontual para os basaltos e diabásio são próximos, apresentando para o basalto de Marimbondo (6,8 MPa), para o diabásio de Porto Colômbia (6,7 MPa) e o basalto de Foz do Chapecó (6,5 MPa), evidenciando a influência da litologia nos resultados.

CAPÍTULO 6- CONCLUSÃO

O presente trabalho foi desenvolvido visando à caracterização da degradação natural dos enrocamentos de proteção das barragens das UHE de Furnas, Porto Colômbia, Marimbondo, Manso e Foz do Chapecó através dos ensaios de abrasão Los Angeles, Micro Deval, *Slake Durability*, Compressão Pontual, Análise Química e Petrografia.

As áreas de estudo apresentam distintos tipos de rocha e períodos de exposição no campo. As UHEs de Furnas e Manso sofreram reparos em seus taludes devido a degradação do quartzito e arenito, motivando o estudo e caracterização desses materiais. O estudo das Usinas de Marimbondo, Porto Colômbia e Foz do Chapecó vêm a contribuir com dados e conhecimento da degradação de litologias semelhantes no campo.

Os objetivos foram alcançados, o programa experimental se mostrou eficaz para a caracterização da degradação das rochas. Buscou-se na literatura dados dos materiais pesquisados sem alteração para a quantificação da degradação através da comparação de resultados entre as amostras intactas e degradadas.

Quanto aos projetos desenvolvidos, nota-se a carência de dados e Normas estabelecidas para novas construções e projetos e reabilitação, ocasionando a adoção de critérios empíricos e observação de obras similares. Foi observado que a escolha do tipo de barragem depende dos aspectos geológicos, da disponibilidade de materiais e a natureza das fundações, entre outros.

De acordo com os resultados obtidos em ensaios distintos, são apresentadas as conclusões a seguir:

✓ *Abrasão Los Angeles*

O basalto da UHE de Marimbondo apresenta-se uma perda de massa de 17%, dentro da faixa limite esperada para esta litologia. Nos demais enrocamentos o valor obtido no percentual de perda A_L foi superior ao previsto na literatura, indicando que as rochas não apresentam adequada resistência a abrasão, evidenciando ainda uma significativa capa de material alterado, que leva a perda da resistência entre os

contatos das partículas. Cabe observar ainda que as partículas do quartzito de Furnas tem formato retangular alongado, com arestas vivas, que se desintegram durante a realização do ensaio de abrasão influenciando no resultado do ensaio.

Devido a dificuldade de obtenção de dados da rocha intacta da UHE Furnas, parte do material de enrocamento foi britado para a retirada da capa de alteração, recebendo o nome de Furnas (2). Quando realizadas às comparações entre os resultados do percentual de perda no ensaio AL para as amostras degradadas (1) correspondendo a 46 % e britadas (2) correspondendo a 33 %, ficou evidente a influência da capa alterada no resultado do ensaio, mostrando um valor de 10% menos perdas no material britado.

O resultado do ensaio das partículas britadas foi comparado aos resultados de Francklin Júnior (2009), que realizou estudos com o quartzito de uma pedreira de São João Batista do Glória/MG, cidade onde está localizada a UHE Furnas, com jazida similar às rochas usadas no enrocamento da UHE Furnas. Os resultados entre o material britado (36%) e o material da pedreira (33 %) se assemelharam, mostrando que a presença da capa de alteração preservada na rocha provoca maiores perdas.

Considerando o critério de projeto estabelecido pelo *U.S. Corps of Engineers*, que limita o resultado das perdas A_L a no máximo 20%, apenas o basalto do enrocamento da UHE Marimbondo está em condição adequada de uso com perdas A_L de 17%.

Considerando o critério de projeto menos conservador, que admite um valor máximo para as perdas A_L de 40% usado pelo Transportation Research Board Executive Committee (2006), Bureau of Reclamation. 2012 e as Normas ASTM C131, ASTM C535, USBR 4131, pode-se afirmar que o apenas o quartzito da UHE Furnas não se enquadra no critério de utilização, com perdas AL de 46%.

✓ Ensaio de Durabilidade (*Slake Durability*)

O ensaio de durabilidade foi usado para determinar a perda de massa das partículas na capa de material alterado. Nota-se que os basaltos com período de exposição no campo distintos apresentam a mesma característica de perda de massa, sendo representada por um modelo exponencial.

✓ *Ensaio Micro Deval*

O ensaio foi realizado seguindo a metodologia apresentada no ítem 4.5. O micro Deval avalia o desgaste por abrasão e choque, foi realizado com as partículas úmidas e a presença de carga abrasiva. A Figura 6.4 apresenta a perda de massa dos enrocamentos estudados.

O enrocamento do APM-Manso apresentou maior perda de massa no ensaio, evidenciando a dissolução do material cimentício do arenito face a abrasão e choque no meio úmido.

Os resultados obtidos por Maia (2001) para o basalto de Marimbondo com 25 anos de alteração no campo corresponde 19,5 % e nesse estudo 19,6 %. Não houve perda significativa de massa para o basalto do enrocamento de Marimbondo nos últimos 15 anos, esse fato pode ser explicado, pois a alteração maior sofrida pela partícula está na superfície do bloco, e a exposição a intempéries provoca a desagregação dos blocos, surgindo faces com períodos distintos de exposição.

✓ *Carregamento Pontual (Point Load)*

Apesar de cada enrocamento de basalto e diabásio possuir um período distinto de exposição à intempérie, os valores obtidos no ensaio de compressão pontual são próximos, apresentando para o basalto de Marimbondo (6,8 MPa), para o diabásio de Porto Colômbia (6,7 MPa) e o basalto de Foz do Chapecó (6,5 MPa) , evidenciando a influência da litologia nos resultados.

Foi observado que o tamanho das partículas influencia na dispersão dos resultados. As partículas com tamanhos aproximados, obtidas no enrocamento Marimbondo (basalto) e no enrocamento de Porto Colômbia (diabásio) reproduziram uma menor dispersão dos valores dos ensaios, obtendo os respectivos coeficientes de regressão de 0,64 e 0,66.

O ensaio de carregamento pontual permitiu estimar o valor da compressão axial dos enrocamentos estudados.

✓ *Efeitos da degradação nos enrocamentos*

A degradação influencia no enrocamento quanto a partícula e os efeitos da alteração da partícula afeta o meio granular.

A desagregação da partícula causa alteração no diâmetro dos grãos e conseqüentemente na granulometria do talude, ocasionando a produção de finos. A mudança da granulometria e a quebra dos contatos entre os grãos acarretam no surgimento de deformações devido ao rearranjo das partículas. A permeabilidade do maciço pode ser afetada devido a essas alterações, assim como a segurança e a estabilidade do talude .

✓ *Sugestões para trabalhos futuros*

Para o prosseguimento e aprofundamento do tema tratado na presente dissertação de mestrado, são apresentadas algumas sugestões e recomendações que podem ser promissoras para eventuais estudos :

- ✓ Realizar um programa de estudos e ensaios nas barragens de Manso e Foz do Chapecó, que são obras recentes, estando em operação a 16 e 6 anos respectivamente e já sofreram intervenções devido a degradação do material;
- ✓ Estudo dos mecanismos de alteração (físicos e químicos), das mudanças nas características mecânicas e da deformabilidade dos enrocamentos devido à degradação das partículas;
- ✓ Criação de banco de dados com resultados avaliando a degradação natural dos enrocamentos.;
- ✓ Correlacionar os resultados dos ensaios realizados em rochas similares, para elaboração de uma metodologia de manutenção e reforço de taludes degradados.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Norma Técnica (2015). Rochas para revestimento Parte 1: Análise petrográfica. ABNT -NBR 15845 -1.
- ABNT- Associação Brasileira De Normas Técnicas . (2001). NBR NM 51: *Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"*. Rio de Janeiro, 6 p.
- AGRAR – Consultoria e Estudos Técnicos Ltda. (2000) Projeto executivo de contenção da erosão das margens do Baixo São Francisco a jusante da tomada da água da EB-1204 do Perímetro de Irrigação de Cotinguiba/Pindoba. Apêndice E – Especificações Técnicas. Brasília, DF: CODEVASF.
- Aires-Barros, L. (1991). Alteração e alterabilidade de rochas. Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa:Universidade Técnica de Lisboa. 384p.
- Akram M. and Bakar M. Z. A. (2007). Correlation Between Uniaxial Compressive Strength And Point Load Index For Salt-Range Rocks. Pak. J. Engg. & Appl. Sci. Vol. 1. pp.1-8.
- Al-Harathi AA (2001). A field index to determine the strength characteristics of crushed aggregate. Bull. Eng. Geol. Env., 60: 193-200.
- Almeida, F. F. M. de. (1948) . Contribuição à Geologia dos Estados de Goiás e Mato Grosso. Notas Preliminares e Estudos da Divisão de Geologia e Mineralogia, (46): 1 – 15,Rio de Janeiro.
- Almeida, F. F. M. de. (1968) . Evolução Tectônica do Centro-Oeste Brasileiro, Rio de Janeiro, 40: 255 – 293, Suplemento.
- ANA - Agência Nacional de Águas (2013) - *Relatório de segurança de barragens 2011*. Brasília: ANA, 92 p.
- ANA_ Agência Nacional de Águas (2015) Guia para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens - Manual do Empreendedor Volume VII -Versão Preliminar – fevereiro de 2015.
- ASTM – American Society for Testing Materials (2008) . Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks. Test Designation D 4644/08.

- ASTM - American Society for Testing Materials (2006). Resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine.
- ASTM- American Society for Testing Materials C131 - 14 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
- ASTM- American Society for Testing Materials C535 - 16 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine
- ASTM- American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications. ASTM Test Designation: D 5731-08.
- ASTM - American Society for Testing Materials Designation C-131-01. Philadelphia: American Society for Testing Materials.
- Baptista, M. B.; Coelho, M. M. L. P.; Cirilo, J. A.; Mascarenhas, F. C. B.; Canali, G. V.; Cabral, J. J. S. P.; A, J. R. G.; Montenegro, S. M. G. L – (2001) Hidráulica Aplicada. Porto Alegre, 621p;
- Baumann, P. 1960. Rockfill dams: Cogswell and San Gabriel Dam. Transactions, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 125, Part 2, Proc. Paper 3064, pp. 29-57.
- Becker, E.; CHAN, C.; SEED, B. (1972) Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials in Plane Strain and Triaxial Compression Tests. Department of Civil
- Bieniawski ZT. (1975) The Point Load Test in Geotechnical Practice. Eng. Geol., Sept., pp. 1-11.
- Bowen, N. L. (1956). The Evolution of the Igneous Rocks. New York, Dover Publications, pp.1-334.

- Bulletin of the National Institute of Road Research, Pretoria, 5 (citado em Fookes *et al.* Bulletin Materials Science (2008), *Indian Academy of Sciences* – abril/08, Vol. 31, No. 2, pp. 185–187.
- Bureau of Reclamation. 2012. Design Standard No. 13, Embankment Dams. Chapter 7.
- Bureau Reclamation - USBR 4131- Resistance to Degradation of Small Size, Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in Los Angeles. Machine*
- Carvalho, N. O. V. (2009) - Desenvolvimento de equipamento para estudo da Compressibilidade de enrocamentos durante processos de degradação – Dissertação de mestrado do programa de Engenharia Civil UENF.
- Casarotto P. O., Zuquette L. V. (2014) *Avaliação Da Alteração De Litotipos Basálticos Com Base Em Ensaios de Ph, de Condutividade Elétrica e de Carga Pontual*. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 67(1), pp.13-19.
- Cavalcanti, A. V.; Pires C. J. F; Martins G.; Sant’ana A. P. (2007) -APM Manso - Proteção De Taludes Da Barragem De Enrocamento (Rip-Rap) Com Emprego De Rosário De Blocos Rochosos - Comitê Brasileiro De Barragens, Xxvii Seminário Nacional De Grandes Barragens Belém/ Pa.
- CBDB, Comitê Brasileiro de Barragens (2001)- Guia básico de segurança de barragens, Núcleo Regional de São Paulo, Comissão de segurança de barragens, São Paulo, 2001.
- Cha AR, Song JH, Choi HS, Chun BS. (2007) The study on the correlation between unconfined compressive strength and point load strength within the geniss complex in Gyunggi Province. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* ;8(1):21e6 (in Korean).
- CNEC Engenharia S.A. (2006). Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó - Projeto Básico Consolidado. Relatório final - volume 1 – texto. 130 P.
- Cole, W. F.; SANDY, C. J. 1980. A Proposed Secondary Mineral Rating for Basalt Road Aggregate Durability. *Australian Road Research*, vol. 10, no. 3, pp.27-37 (citado em Fookes *et al.*, 1988).
- CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens (1999). “Simpósio de Barragens de Enrocamento com face de concreto”, CBDB, Florianópolis.

- Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1.2, Moscow,
- Cooke, J. B. The Development of Today's CFRD Dam. In: II Simpósio Sobre Barragens De Enrocamento Com Face De Concreto, 1999, Florianópolis. Anais. 1999. p. 14-15.
- COPEL – Companhia Paranaense de Energia. Balanço Energético do Paraná: 2010. Ano base 2009.
- COPPETEC - PGRH-RE-010-R0 (2002) Projeto de Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, Volumes 1 a 4, Rio de Janeiro,
- Costa, K. O. B. , Maia, P. C. A., Xavier, G. C., (2016) - Estudo Da Perda De Resistência a Ruptura Em Ensaios Point Load Devido A Degradação Natural De Rocha Basáltica Do Enrocamento Da Usina Hidrelétrica De Marimbondo - 15 CNG-Portugal
- CPRM/UERJ (2007) - PROGRAMA GEOLOGIA DO BRASIL levantamentos geológicos básicos- Geologia da Folha Alpinópolis, Brasília.
- Design Guide MD#6 (2004) Riprap Design Methods NRCS Engineering, Maryland January.
- Dias Filho, J. L. E., Maia, P. C. A., Xavier, G. C., Santos, V.G.P.,(2016) Durability of Ornamental Gneisses from Pádua-RJ as Covering Stone, *EJGE (The Electronic Journal of Geotechnical Engineering)*, Vol.21,pp.1957-1976.
- Dias Filho, J. L. E., Xavier G. C., and Maia, P.C. A. (2013). Durability analysis of gneiss using wear resistance. *Vertices*, 15, 7-16.
- Dias Filho, José Luiz Ernandes (2012) – Estudo Do Efeito Da Energia De Desgaste Na Previsão Da Durabilidade De Gnaisses Ornamentais De Pádua, Dissertação de mestrado em engenharia civil- UENF.
- Dobereiner, L. ; Oliveira R. (1986) – Site investigations on weak sandstone. Proc 5th Int. Congress Int Assoc. Engineering Geology, Buenos Aires, vol 1, p. 411-421

- Donadon, J.M.-Evolução Das Barragens de Enrocamento No Brasil – Linha Do Tempo -Comitê Brasileiro De Grandes Barragens -XXX Seminário Nacional De Grandes Barragens Foz Do Iguaçu – PR .
- Eigenheer, L.P. de Queiroz T.; Souza. R. J. B. de. (1999). Barragem de enrocamento com face de concreto da UHE Xingó.- II Simpósio sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, CBDB, Florianópolis, SC, 1: 271-282
- ELETROBRAS (2011), Sistema de Informações do Potencial Hidráulico (SIPOT), Departamento de Planejamento de Geração, Diretoria de Planejamento e Engenharia, Rio de Janeiro, Fevereiro de2011.
- ELETROBRÁS/CBDB (2003)- Critério de projeto civil de Usinas Hidrelétricas – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. –p.278
- Elhakim A. F. (2015) The use of point load test for Dubai weak calcareous sandstones Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 7 (2015) 452-457
- Elkateb T. (2009) The point load test in the Persian Gulf carbonate rocks. In: Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1; p. 372e5.
- EN- Europäische Norm (2011). Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 1 – Determinacion de la resistencia al desgaste (Micro-Deval), Test designation: EN 1097-1
- Engineering, Report TE-72-3, University of California, Berkeley, pp. 1-121.
- 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,
- Ferreira, M. Q; Antão, A. (2006) Utilização do “Slake Durability Test” na caracterização da alteração de granitos – VII Congresso Nacional de Geologia - Universidade de Evora- Portugal
- Florentini, J. A. (2002). Avaliação Da Durabilidade, Abrasividade, E Dureza Das Rochas Vulcânicas Da Formação Serra Geral. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Fookes, P. G.; Gourley, C.S.; Ohikere,C. (1988) Rock Weathering in Engineering Time. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, London, vol. 21, p. 33-57
- Foster I.R. (1983). The influence of core sample geometry pm the axial point load test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abst.*, 20:289-295
- Foz do Chapecó (2016) – disponível em www.fozdochapeco.com.br/banco de imagens, acesso em 14/05/2016
- Fraga F. A., Maia P. C. C; Xavier, G. C. (2011) *Avaliações dos Procedimentos Não-Convencionais, Micro Deval e Slake-Durability, de Degradação em Materiais Cerâmicos*. 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica
- Francklin Júnior I., (2009) – Estudo Tecnológico em rejeito de Quatzito do Sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado graúdo no concreto – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia
- Frasca M.H.B.O. (2003). Estudos Experimentais De Alteração Acelerada Em Rochas Graníticas Para Revestimento. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 281p.
- Frasca, M. H. B. O.: (2005) “Durabilidade e alterabilidade de rochas ornamentais e para revestimento”, *Revista Rocha de Qualidade*, nº 180 pp. 178-188
- Frazão E.B.; Caruso, L. G. (1983) Síntese do Conhecimento sobre Alterabilidade de rochas como material de construção em algumas barragens da bacia do alto Paraná. In: *Simpósio sobre geotecnia da Bacia do Alto Paraná*. São Paulo. Anais....São Paulo:ABMS/ABGE,1983,v.2ª, p21-33
- Frazão, E.B.; Paraguassu, A. B. (1998)*Materiais Rochosos para Construção*. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Eds.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998. P. 331-342.
- Fumagalli, E. (1970). Laboratory Tests on Materials and Static Model for Rockfill Dams. 10th International Conference on Large Dams , Montreal, vol. 1, pp. 531.
- Fumagalli, E. (1969) Test on cohesionless materials for rockfill dams. ASCE, *Journal of the soil mechanics and foundation division*, SM1, January. p. 313-330.

FURNAS (2015), Disponível em:
http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemaufurnas/usina_hidr_funciona.asp
Acessado em: 16/12/2016

Furnas (2013) - Relatório de Sustentabilidade, Brasil

Colombo G. (1971) - Manuale dell'ingegnere, 80ª Edizione, Hoepli, Geology, vol. 2, no. 6, pp. 363-95.

Geroto, R.E; Assis C.D (2006) Análise das Correlações para Estimativa das Propriedades Mecânicas de Agregados Através de Ensaios em Granito., II GeoJovem, Friburgo.

Goatley, J.M.; Malldox, V.L.; Watkins, R.M - Bahiagrass Response to a Plant Growth Regulator as Effected by Mowing Interval, Crop Science, 1998, p.196-200;

Goodman R.E. 1989. Introduction to rock mechanics. 2nd Edition. John Wiley & Sons, New York, 562p.

Goodman, R. (1993). *Engineering Geology: Rock In Engineering Construction*. John Wiley & Sons, New York, 412 pp.

Guimarães, R. C. (2012) Barragens com núcleo de concreto asfáltico : análise do comportamento mecânico e hidráulico do núcleo- Tese (doutorado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Hawkins, A. B.; Pinches G. M. (1992) – The engineering description of mudrocks. Quarterly Journal Engineering Geology. London, Vol 25, nº1, p. 17-30.

Horn, H.M.& Deere, D.U. (1962)- Frictional Characteristics of Minerals – Geotechnique 12, pp. 319-335

ICOLD -INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Concrete face rockfill dams: concepts for design and construction. Bulletin 141. Paris: ICOLD, 2010a, 401 p.

IGAM, 2012. *Resumo Executivo do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno do Lago de Furnas / Instituto Mineiro de Gestão das Águas; Alago - Fupai. Belo Horizonte:75 p.*

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE - (2003) - Anuário Estatístico do Brasil

IRFAN, T. Y.; DEARMAM, W. R. (1978). The Engineering Petrography of a Weathered Granite in Cornwall. London, Quarterly Journal of Engineering Geology, vol. 11, pp. 233-244.

Jeon, J.; Lee, J.; Shin, D.; Park, H. (2009) *Development of dam safety management system*. Advances in Engineering Software, n. 40, p. 554-563.

Kahraman S, Toraman OY (2008). Predicting Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from crushability index. Bull. Mater. Sci., 31: 173-177.

Kanji, M. A. (1990) "Algumas reflexões sobre a instrumentação de barragens", Rio de Janeiro, Simpósio sobre Instrumentação Geotécnica de Campo – SINGEO "90", ABMS, Rio de Janeiro.

Kanji, M. A.; Figueira, P. C. da S. (1990). Quantificação tentativa do uso de instrumentação em barragens", Rio de Janeiro, Simpósio sobre Instrumentação Geotécnica de Campo – SINGEO'90", ABMS, Rio de Janeiro, pp. 119-128.

Kanji, M. A. (2004) Parecer Técnico Sobre Ruptura Barragem Camará – Min. Público Paraíba. São Paulo.

Kazi A, Al-Mansour ZR (1980). Influence of geological factors on abrasion and soundness characteristics of aggregates. Eng. Geol.,15: 195-203.

Keaton, J; Mishra, S. 2010 Modified *Slake Durability* Test for Erodible Rock Material. Scour and Erosion: pp. 743-748.

Kim HG, Koh YK, Oh KH. (2004) A study on the mechanical properties of the cretaceous tuffs in Goheung area. The Journal of Engineering Geology;14(3):273e85

Kjaernsli, B.; Tornblaa, I. (1966). The Venemo Asphalt Faced Rockfill Dam. Norwegian Geotechnical Institute Publication, no. 69 (citado em Narvaez, 1980).

Kjaernsli, B; Sande, A. (1963). Compressibility of some Coarse Grained Material.

- Kochen, R. (2009) Segurança no projeto, construção e operação de barragens. São Paulo, jun. 2009. Palestra proferida para o IBC Brasil.
- Lane C., James R., (2003) Micro-Deval testing of aggregates in the Southeast, Trans..Res. Rec. 1837 (1) 73–79.
- Lane, B.; Rogers, C. e Senior, S. (2000) The Micro-Deval Test for Aggregates in Asphalt Pavement. Apresentado no 8th Annual Symposium of International Center for Aggregate Research, Denver, CO
- Laouafa, S.D.F., Franck, C., Guedon, S., Martineauc F., Bostc M., and D'Amatoc J. (2013). Influence of Water on Rock Discontinuities and Stability of Rock Mass.Procedia Earth and Planetary Science,7, 219-222
- Leslie, D. (1969). Relationships Between Shear Strength, Gradation and Index operties of Rockfill Materials. Specialty session no. 13, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, pp. 201-210.
- Li D, Wong LNY. (2013) Point load test on meta-sedimentary rocks and correlation to UCS and BTS. Rock Mechanics and Rock Engineering ;46(4):889e96
- Lima E. B. N. R. 2001, *Modelagem Integrada para estação da. Qualidade da Água na Bacia do Rio Cuiabá*. Tese de Doutorado do Programa de Engenharia Civil .COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro
- Lúcio F. S. Matos ; Janaíde C. Rocha (2006) Metodologia Experimental Para Previsão Da Durabilidade De Pedras De Revestimento. Encontro Nacional de Tecnologia no ambiente Construído. pp. 2999-3009
- Luza Huilca , C. A. (2014). Estudo experimental do comportamento geomecânico do travertino . Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Maia P. C. A (2001) - *Avaliação Do Comportamento Geomecânico e De Alterabilidade De Enrocamentos*. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica
- Maia, P. C. A.; Salles, R. O. *Estudo Experimental da Durabilidade de Rochas Ornamentais Através de Procedimentos Especiais de Laboratório*. In:

Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica, 13.,
2006, Curitiba/PR

Maia, P. C. A.; Sayão, A. S. F. J.; Nunes, A. L. L. S.; Antunes, F. S. (2002).
Alterabilidade de Rochas Basálticas - Caracterização Petrográfica. Solos e
Rochas, Revista Latino-americana de Geotecnia, ABMS/ABGE, v.25, n. 3, p.
207-220.

Maia, P.C.A., Sayão, A.S.F.J., Nunes, A.L.L.S., and Antunes, F.S. (2003). *Alterability
of Basalt Rocks - Mechanical characterization*. Soils and Rocks, 26 (3), pp.
205-215.

Maia, P.C.A; Sayão A.S.F.J; Nunes A.L.L.S. - *Considerações Sobre A Alteração De
Enrocamentos-* Comitê Brasileiro De Barragens - XXV Seminário Nacional
De Grandes Barragens Salvador.

Manual report, (2010) Processed Data of Batu dam from 1989 up to 2010. Dam
measurement office.

Marques Filho, P. L. et al. (1985). "Deformation characteristics of Foz do Areia
Concrete Face Rockfill Dam, as revealed by a simple instrumentation
system", Comissin Internationale des Grands Barrages, Quinzième
Congrès des Grands Barrages, Lausanne, 1985, Q.56 R.21, pp. 417-450.

Marques Filho, P.L.; Geraldo, A. (1998). *Barragens e Reservatórios*. Geologia de
Engenharia,

Marsal, R. J. (1965). Research on Behavior of Granular Materials and Rockfill
Samples. Comisión Federal de Electricidad, México (citado em Cea, 1998).

Marsal, R. J. (1967). Large Scale Testing of Rockfill Materials. Journal of the Soil
Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 93, no. SM2, Proc. Paper
5128, march, pp. 27-53.

Marsal, R. J. (1972). Resistencia y Compresibilidad de Enrocamientos y Gravas.
Universidad Nacional Autónoma de México, Publicação 306.

Marsal, R. J. (1973^a). Mechanical Properties of Rockfill. Embankment-Dam
Engineering, Casagrande Volume, John Wiley & Sons Pub., pp. 109-200.

- Marsal, R. J. (1973b). A True Triaxial Apparatus to Test Rockfill. 8th International Materials for Embankment Dams, United States Society on Dams (2011)
- Matheson, G. M.; (1986) Relationship between compacted rockfill density and gradation, J. Geotechnical Engineering ASCE, vol 112, n. 12. pp. 1119-1124.
- Melo, R. (2012) comportamento de percolação em barragens de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico, Dissertação de Mestrado UFMG
- Mesquita, J. B. (2008). *Maçios Rochosos Em Projetos Hidrelétricos: Proposta De Classificação Geomecânica*. Tese de doutorado – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
- Min TK, Moon JK. (2006) A review of strength estimation method on Ulsan sedimentar rocks. Journal of the Korean Geotechnical Society;22(8):63e75 (in Korean).
- Minette, E. (1982). Quantificação Geomecânica e de Alterabilidade de um Diorito. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1-262.
- Moniz, A. C.; Nascimento, A.C; Paiva neto J.E (1973) – Mobilidade dos constituintes de rochas básicas de São Paulo durante o intemperismo. Ver. Bras. Geoc,3. p.201-213
- Navarrete M., Martínez W. , Alonso E. , Lara C., Bedolla A. , Chávez H. , Delgado D. , Arteaga J. C. (2013). Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura. Revista ALCONPAT, Volumen 3, Número 2, pp. 132 – 142.
- Oliveira, A. M. dos Santos e Brito, (1998) S.N.A. de Geologia de Engenharia, ABGE – Associação Brasileira de Geologia da Engenharia, São Paulo;
- Ozcelik Y. (2011) Full Length Research Paper Predicting Los Angeles abrasion of rocks from some physical and mechanical properties - Scientific Research and Essays Vol. 6(7), pp. 1612-1619
- P. Vázquez, B. Menéndez, M.F.C. Denecker, C. Thomachot-Schneider, (2015) Comparison between petrophysical properties, durability and use of two limestones of the Paris region, Geol. Soc. Lond., Spec. Publ. 416.

- Pacheco, D.; (2005) Compressão Unidimensional em enrocamento de basalto: Desenvolvimento do equipamento e realização de ensaios. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 14 p.
- Peltier, L. 1950. The Geographic Cycle in Periglacial Regions as it is Related to Climate Geomorphology. *Ann. Assoc. Amer. Geol.*, vol. 40, pp. 214-236.
- Penman, A. D. M. Instrumentation for earth and rockfill dams. *BNCOLD News and Views. Relatório técnico*, pp.7-10. 1969
- Pinho, A. B. 2003 – Geotechnical Characterization of weak rock masses – the baixo Alentejo Flysch Group. Tese de Doutorado. Universidade de Evora p.272
- Promant, disponível em <http://www.promanmt.com.br/>, acesso em 12 de maio de 2016
- Read J.R.L., Thornton P.N., Regan W.M. 1980. A rational approach to the point load test. In: *Proc. 3rd Australian–New Zealand Geomechanics Conf.*, Wellington, New Zealand, 12–16 May 1980. 2:35–39.
- Retore, T.S, (2005) - Comportamento Mecânico de agregado de basalto alterados para pavimentação, rejeitos de garimpo de ametista. Dissertação de Mestrado –UFRGS
- Rettemeier, K.; Falkenhagen, B.; Köngeter, J. Risk assessment: new trends in Germany. In: *INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 20.*, (2000), Beijing. Twentieth International Congress On Large Dams – Proceedings. Paris: ICOLD, 2000. v. 01. pp. 625-641.
- Rogers, C. (1998) Canadian Experience with the Micro-Deval Test for Aggregates. *Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation* 13, 139-147
- Ross J.L.S., “O contexto Geotectônico e a Morfogênese da Província Serrana de Mato Grosso”, *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, v. 12, n.1-2, p. 21-37, 1991.
- Rusnak, John A.; Mark, Christopher. 19th CONFERENCE ON GROUND CONTROL IN MINING. In: *Proceedings of... International Conference on Ground Control*

- in Mining. Department of Mining Engineering, College of Mineral and Energy Resources, West Virginia University. p. 362.
- Ruxton, B. P. (1968). Measures of the Degree of Chemical of Rocks. *Journal of Geology*, vol. 76, no. 5, pp. 518-527
- Saboya Jr., F. (1999). Considerações sobre compressibilidade de enrocamentos e determinação de parâmetros para análise numérica de barragens de enrocamento com face de concreto. *Anais do II Simpósio sobre barragens de enrocamento com face de concreto, Florianópolis*, pp. 99-110.
- Saboya Jr, F. A. (1993). “Análise de barragens de enrocamento com face de concreto durante o período de construção e enchimento”. Tese de doutorado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil. 261p.
- Salles, R. O.; Maia, P. C. A. (2004). Avaliação Experimental Da Alterabilidade De Rochas Ornamentais Do Norte Do Estado Do Rio De Janeiro. I Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, São Carlos-SP, ABMS, 6p.
- Salles, R. O.; Maia, P. C. A. (2006) - *Estudo Experimental da Durabilidade de Rochas Ornamentais Através de Procedimentos Especiais de Laboratório*. 13º Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos E Engenharia Geotécnica, Curitiba/PR, Brasil.
- Sampaio, M. N. (2010). Avaliação Do Colapso Por Degradação Em Enrocamento Enrocamentos Areníticos E Basálticos Através De Procedimentos De Laboratório –. Dissertação de mestrado em engenharia civil.
- SEMAD/CPRM, (2005) - *Projeto APA Sul RMBH: - Belo Horizonte*. v.16 , 64p.
- Silva, C. H. C; Lana M. S. (2012), Influência da durabilidade no comportamento geotécnico dos filitos da Mina Pau Branco. *Revista. Esc. Minas, Ouro Preto*, 65(3), 413-418, jul. set.
- Singh TN, Kainthola A, Venkatesh A (2012) .Correlation between point load index and uniaxial compressive strength for different rock types. *Rock Mech Rock Eng* 45(2). pp. 259–264.

Sowers, G.; Williams R.; Wallace, T. (1965). Compressibility of Broken Rock and the Settlement of Rockfill. 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 2, Montreal, pp. 561-565.

Strahler A. N. (1996) Classificação dos Climas e Regimes Climáticos. Trad. SENA, J. de A. e LIMA, R. C. de - Série B: Textos Didáticos, nº14 - Depto de Ciências Geográficas, Recife, Universidade Federal de Pernambuco.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD EXECUTIVE COMMITTEE (2006)
NCHRP REPORT 568 Riprap Design Criteria, Recommended Specifications, and Quality Control,

U.S. Corps of Engineer - Design Manual EM - 1110-1-1902 - Stability of Earth and Rockfill Dams.

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Embankment Dams Reclamation managing Water in the West (2001) Design Standards No. 13

UERJ/CPRM, 2007. Guapé- Série Programa de Geologia do Brasil- SF.23-V-B-IV, - Minas Gerais: 116p.

UNE- EN 1097-1:2011 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro deval)

United States Department of Transportation- *Range of 50 States*

United States Society on Dams- Materials for Embankment Dams -Prepared by the USSD Committee on Materials for Embankment Dams ,January 2011

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams. Department of the Army, Washington – DC, 2004.

Usace – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Gravity Dam Design. 1995.

Valeriano, C.M.; Simões, L.S.A.; Teixeira, W.; Heilbron, M. (2000). Tectonic discontinuities in the southern Brasília belt (SE Brazil): implications to fold-thrust evolution during the Neoproterozoic Brasiliano orogeny. *Revista Brasileira de Geociências*, 30:(1):195-199.

- Veiga Pinto, A. (1983). "Previsão do Comportamento Estrutural de Barragens de Enrocamento", Tese de Especialização, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 157 p.
- Veiga Pinto, A. A. (1979). Características de Resistência e Deformabilidade de Enrocamentos. *Geotecnia*, no. 27, Lisboa, pp. 3-41.
- Watzko, Aires - (2007) Barragens de Enrocamento com Face de Concreto no Brasil –. Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 106 p.
- Weinert, H. H. (1964). Basic Igneous Rocks in Road Foundations. CSIR Research Report 218.
- Weinert, H. H. (1968). Engineering Petrology for Roads in South Africa. *Engineering*
- Xavier G. C., F. Saboya, Maia P. C., Alexandre J. (2012). Durabilidad de ladrillos cerámicos reforzados con polvo de granite. *Materiales de Construcción* Vol. 62, 306, pp. 213-229.
- Zacoeb A., Ishibashi K. (2009) Point Load Test Application For Estimating Compressive Strength Of Concrete Structures From Small Core. -*ARN Journal of Engineering and Applied Sciences* VOL. 4, NO. 7, pp46-57.