

**AVALIAÇÃO DO COLAPSO DE ENROCAMENTOS DEVIDO À
ALTERAÇÃO DA ROCHA CONSTITUINTE**

RAYSSA LOPES MENDONÇA

Laboratório de Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

Campos dos Goytacazes, 25 de Setembro 2014.

AVALIAÇÃO DO COLAPSO DE ENROCAMENTOS DEVIDO À ALTERAÇÃO DA ROCHA CONSTITUINTE

RAYSSA LOPES MENDONÇA

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

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

Laboratório de Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

Campos dos Goytacazes, 25 de Setembro 2014.

AVALIAÇÃO DO COLAPSO DE ENROCAMENTOS DEVIDO À ALTERAÇÃO DA ROCHA CONSTITUINTE

RAYSSA LOPES MENDONÇA

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

Aprovado em 25 de Setembro de 2013.

Comissão Examinadora:

Prof. André Pacheco de Assis (Ph.D., Geotecnia) – UNB

Prof. Rodrigo Martins Reis (DSc, Geotecnia) – UENF

Prof. Gustavo de Castro Xavier (DSc, Geotecnia) – UENF (Orientador)

Prof. Paulo Cesar de Almeida Maia (DSc, Geotecnia)– UENF (Coorientador)

DEDICATÓRIA

À minha família;

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo incentivo e amor dedicado a mim.

Aos professores Gustavo de Castro Xavier e Paulo César de Almeida Maia pelo constante incentivo, paciência e dedicação como orientadores e amigos.

Aos amigos da UENF, em especial ao amigo José Luiz E. Dias Filho pela amizade e toda a valiosa e indispensável ajuda.

Aos alunos de iniciação científica do laboratório Juliana Pessin e Brunner Rabelo pelo auxílio durante o período de realização do trabalho.

Aos professores da comissão examinadora, pelas importantes sugestões.

A CAPES pelo auxílio financeiro.

A Paulo Pandino que sempre esteve ao meu lado nos momentos difíceis da dissertação com muita compreensão e paciência.

A Deus por ter me dado força para concluir mais essa etapa em minha vida.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

Nas últimas décadas, o desenvolvimento do país associado à necessidade de implantação de novos empreendimentos, levou a engenharia civil a estudar o emprego de diferentes materiais de construção nas obras de grande porte. Especialmente os enrocamentos em particular merecem destaque, tanto pelo amplo campo de aplicação quanto pelas suas características de comportamento. Nas barragens, particularmente, vem se observando o uso cada vez mais frequente de materiais rochosos menos competentes, como consequência da necessidade de evitar bota-foras. Conseqüentemente, às deformações geradas pela oscilação do nível do reservatório ou variações de umidade que geram o colapso de enrocamentos, merece atenção. De fato no primeiro enchimento do reservatório ou em chuvas intensas durante a construção, pode-se notar grandes deformações por colapso do maciço de enrocamento. Variações do nível do reservatório associados a processos de alteração da rocha constituinte geram, também, processos de colapso, inferiores em magnitude ao colapso inicial, mais igualmente importantes. Neste sentido a presente pesquisa visa a avaliação dos efeitos do colapso no comportamento tensão vs. deformação de enrocamentos utilizado na construção da Barragem de Manso. Para isso foram realizados ensaios de compressão oedométrica, em corpos de prova de grandes dimensões, associados a ensaios de saturação e secagem, simulando os processos de variação de temperatura e umidade. São apresentados e discutidos os resultados dos ensaios na condição seca, saturada, inicialmente seca com inundação intermediária e inicialmente seca e com ciclos de saturação e secagem intermediários. Como principal observação da pesquisa notou-se que o colapso primário, gerado na primeira inundação é da ordem de 30%. O colapso secundário, gerado por ciclo de saturação e secagem é da ordem de 50%. Conclui-se que o colapso secundário é significativo e deve ser alvo de atenção em projetos de barragens de enrocamento.

Palavras-Chave: Enrocamento, Colapso, Ensaio de Carregamento Oedométrico e deformabilidade.

ABSTRACT

In the last decades, the country's development associated with a need for creation of new business has led civil engineering to study the utilization of different building materials in great works. The rockfills, particularly, must be put in evidence, because of their large field of application and also because of the characteristics of their behavior. In dams, particularly, it has been seen a continuous growth in the use of few competent rocky materials as a consequence of the need to avoid sends-off. Therefore, it is necessary to pay attention on the strain caused by the oscillation on the reservoir's level or variations in humidity, that cause the rockfill's collapse. Actually, when a reservoir is filled with water for the first time or when there are pouring rains while building, it is possible to see some great deformations due to the collapse of the rockfill. Variations on the reservoir's level associated with some alteration processes on the base rock also cause collapse processes, that are not so stronger in magnitude, than the first ones, but equally important. In this way, the present research aims to evaluate the effects of collapse on the stress-strain behavior of some rockfills used in the building of Manso Dam. For this purpose, some oedometric compression tests were done in great dimensions samples, associated with some wet and dry tests, simulating the variations in temperature and humidity. Results of the tests in dry, saturated, firstly dry with intermediate flooding and firstly dry with intermediate wet and dry cycles conditions are presented and discussed. The research has realized, as a main result, that the primary collapse caused during the first flooding is about 30%. The secondary collapse, caused by a wet and dry cycle is about 50%. Therefore, it can be concluded that the secondary collapse is significative, and it deserves attention in projects of rockfill dams.

Key words: rockfill, collapse, oedometric compression test and deformability

SUMÁRIO

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Símbolos.....	xvii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Histórico.....	3
1.3. Objetivos e justificativas do trabalho.....	5
1.4. Organização do trabalho.....	6
Capítulo 2 - Enrocamento, Barragem de Enrocamento, Fatores que Influenciam no Comportamento Geomecânico do Material.....	7
2.1. Definição de enrocamentos	7
2.2. Barragem de enrocamento	8
2.3. Comportamento geomecânico de enrocamentos	10
2.4. Estado de alteração da rocha	13
2.5. Colapso.....	13
2.5.1. Tipos de colapso definidos por zonas nos aterros de enrocamento.....	17
2.5.2. Adição de água durante a compactação	20
2.6. Resistência a quebra das partículas.....	20
2.7. Considerações finais.....	23
Capítulo 3 - Oedômetro de Grandes Dimensões e Degradação de Enrocamentos	24
3.1. Ensaio mecânicos em enrocamentos	24
3.1.1. Cisalhamento direto.....	24
3.1.2. Triaxial.....	25
3.1.3. Deformação plana	25
3.1.4 Compressão unidimensional (oedômetro).....	25
3.2. Equipamento de compressão unidimensional de grandes dimensões	26

3.3. Câmara de compressão unidimensional.....	29
3.4. Alterabilidade de rochas	33
3.4.1. Mecanismos de degradação	34
3.4.2. Efeitos da degradação.....	35
3.4.3. Metodologia de avaliação da alterabilidade de enrocamentos	37
3.4.4. Ensaio de degradação acelerada no laboratório	40
3.4.5. Ensaio de ciclo de umidade (ciclagem)	40
3.5 Considerações finais	42
Capítulo 4 - Apresentação do Equipamento, Material de Estudo e Modelo Constitutivo	43
4.1 Equipamento de compressão confinada de grandes dimensões.....	43
4.2. Equipamento de saturação e secagem.....	47
4.3. Câmara de compressão unidimensional utilizada.....	52
4.4. Material de estudo	54
4.5. Leis constitutivas e parâmetros de análises	58
4.6 Considerações finais	60
Capítulo 5 - Programa Experimental e Metodologia.....	62
5.1. Programa experimental.....	62
5.2. Metodologia dos ensaios	64
5.2.1. Calibração	64
5.2.2. Preparação da amostra	65
5.2.3. Moldagem do corpo de prova.....	67
5.2.4. Aplicação de carregamento.....	68
5.2.5. Avaliação do colapso devido à inundação.....	69
5.2.6. Avaliação do colapso devido à degradação	71
5.2.7 Calibração da câmara de degradação	73
5.2.8 Cálculo de grau de quebra (Bg).....	74
5.3 Considerações finais	74
Capítulo 6 - Apresentação e Análise dos Resultados	75
6.1. Condição seca e inundada	75
6.2. Efeito da saturação	81
6.3. Deformação primária por inundação intermediária	82

6.4. Deformação secundária por ciclos de umidade	85
6.5 Câmara de compressão unidimensional.....	92
6.6. Tempo.....	95
6.7. Grau de quebra (B_g).....	99
6.8 Considerações finais	101
Capítulo 7 - Conclusões	102
Recomendações.....	104
Referência bibliográfica	106
Anexo I – Resultados dos ensaios de compressão confinada	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Enrocamento com face de concreto - Barragem de Campos Novos.....	1
Figura 2.1: Barragem de Enrocamento com Vedação Montante (BEVM)	9
Figura 2.2: Barragem de Enrocamento com Vedação Central (BEVC).....	10
Figura 2.3: Curvas de deformação uniaxial vs. tensão axial em compressão unidimensional em enrocamentos de granulometria uniforme (Nobari e Duncan, 1972).	14
Figura 2.5: Barragem de enrocamento com vedação a montante.....	19
Figura 3.1: Classificação dos ensaios para avaliação da degradação (Salles 2006).	38
Figura 3.2: Metodologia para avaliação da alterabilidade do material geotécnico (Maia <i>et al.</i> , 2003)	38
Figura 4.1: Vista em perspectiva do equipamento	43
Figura 4.2: Corte longitudinal do equipamento.....	44
Figura 4.3: Extensômetros analógicos	45
Figura 4.4: Pesos utilizados nos ensaios	45
Figura 4.5: Corte transversal do equipamento de compressão confinada	45
Figura 4.6: Mesa de transmissão de carga	46
Figura 4.7: Macaco hidráulico e parafusos rosqueados	46
Figura 4.8: Configuração para o ensaio na condição do material seca (a), saturada (b) e para o ensaio de saturação e secagem.	47
Figura 4.9: Equipamento de saturação e secagem automático acoplado ao equipamento de compressão confinada de grandes dimensões.	48
Figura 4.10: Corte longitudinal do equipamento acoplado	48
Figura 4.11: Câmara de compressão dentro da câmara de degradação com corpo de prova já moldado.....	49
Figura 4.12: Câmara de compressão inserida no interior da câmara de degradação inundada.....	49
Figura 4.13: Corte transversal do equipamento de compressão confinada com a câmara de degradação.	50
Figura 4.14: Painel de Controle da Câmara de Degradação.....	51
Figura 4.15: Bombas d`água do sistema de enchimento e esvaziamento.	51

Figura 4.16: Reservatório inferior do sistema de esvaziamento.....	52
Figura 4.17: Ventilador centrífugo utilizado para resfriamento da câmara por ventilação forçada	52
Figura 4.18: Visão geral da base inferior, base superior, anéis de aço inoxidável e anéis de silicone (a) e detalhe para melhor visualização dos anéis (b).	53
Figura 4.19: Câmara de compressão montada composta de anéis de aço inoxidável justapostos e intercalados a anéis de silicone.....	53
Figura 4.20: Corte esquemático da câmara de compressão proposta por Veiga Pinto (1982), (Veiga Pinto, 1982 apud Maia <i>et al.</i> , 2001).....	54
Figura 4.21: Barragem de Manso – Cuiabá/MT	55
Figura 4.22: Enrocamento da Barragem de Manso.....	56
Figura 4.23: Material granular do enrocamento de arenito da Barragem de Manso, utilizado nos corpos de prova do programa experimental.	57
Figura 4.24: Granulometria do arenito utilizado nos ensaios e a utilizada no campo.....	57
Figura 4.25: Determinação gráfica dos parâmetros do módulo edométrico do modelo EC-K ₀	59
Figura 5.1: Curva granulométrica empregada nos ensaios.....	66
Figura 5.2: Amostra do material de enrocamento. Homogeneização da amostra antes do ensaio (a) Amostra homogeneizada (b)	66
Figura 5.3: Procedimento de moldagem do corpo de prova.....	68
Figura 5.4: Detalhe do apoio do braço alavanca durante a aplicação de um incremento de carga.	69
Figura 5.5: Momento em que ocorre a inundação intermediária do corpo de prova.	70
Figura 5.6: Curvas de saturação e secagem obtidas em ensaios de absorção e secagem para enrocamento arenítico (Carvalho, 2009).	72
Figura 5.7: Variação da temperatura vs. Tempo no ciclo de saturação.	73
Figura 5.8: Variação da temperatura vs. Tempo no ciclo de secagem.....	73
Figura 5.9: Variação da temperatura vs. Tempo no ciclo de ventilação.	73
Figura 6.1: Variação da tensão axial vs. deformação axial no ensaio de compressão confinada executado em corpo de prova seco.	76
Figura 6.2: Variação da tensão axial vs. deformação axial no ensaio de compressão confinada executado em corpo de prova inundado.....	76

Figura 6.3: Comparação da variação tensão axial vs. deformação axial experimentais e teóricas do modelo EC- K_0	78
Figura 6.4: Variação do módulo M com a tensão axial no ensaio de compressão confinada executado em corpo de prova seco.	80
Figura 6.5: Variação do módulo M com a tensão axial no ensaio de compressão confinada executado em corpo de prova inundado.	80
Figura 6.6: Variação da tensão axial vs. deformação axial do corpo de prova do arenito de Manso, em ensaio seco e inundado.	81
Figura 6.7: Variação do módulo M com a tensão axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpos de prova seco e inundado.	82
Figura 6.8: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento do arenito de Manso condição seca, inundada e com inundação intermediária em 107,37 kPa.	83
Figura 6.9: Variação do módulo M com a tensão axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpos de prova seco, inundado e com inundação intermediária em 107,37 kPa.	83
Figura 6.10: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento do arenito de Manso na condição seca, inundada e com inundação intermediária em 299,55 kPa	83
Figura 6.11: Variação do módulo M com a tensão axial no enrocamento de arenito seco, saturado e com inundação em 299,55 kPa.	84
Figura 6.12: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento de arenito seco, inundado e com inundação intermediária em 454,4 kPa.	84
Figura 6.13: Variação do módulo M com a tensão axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpos de prova seco, inundado e com inundação intermediária em 454,4 kPa.	84
Figura 6.14: Número de ciclos de saturação e secagem vs. deformação axial para ensaio de ciclagem nas tensões iguais a 113, 300 e 599 kPa.	86
Figura 6.15: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento do arenito de Manso na condição seca, inundada e com ciclos de saturação e secagem na tensão de 113,22 kPa.	87
Figura 6.16: Variação do módulo M com a tensão axial no enrocamento de arenito seco, inundado e com ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 113,22 kPa. ...	87

Figura 6.17: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento do arenito de Manso na condição seca, inundada e com ciclos de saturação e secagem na tensão de 300 kPa.	88
Figura 6.18: Variação do módulo M com a tensão axial no enrocamento de arenito seco, inundado e com ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 300 kPa.	88
Figura 6.19: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento de arenito de Manso na condição seca, inundada e com ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 599 kPa.	88
Figura 6.20: Variação do módulo M com a tensão axial no enrocamento de arenito seco, inundado e com ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 599 kPa.	89
Figura 6.21: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento de Manso na condição seca, inundada e com ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 113, 300 e 599 kPa.	89
Figura 6.22: Comparativo da tensão axial vs. Variação da deformação axial no momento do colapso do corpo de prova, no enrocamento do arenito de Manso para os ensaios de inundação intermediária e ciclos de saturação e secagem.	90
Figura 6.23: Comparativo da tensão axial vs. colapso no enrocamento do arenito de Manso para os ensaios de inundação intermediária e degradação por ciclos de saturação e secagem para diferentes níveis de tensão.	91
Figura 6.24: Ensaios de compressão unidimensional. Relação tensão-deformação, avaliado nas diferentes configurações de câmaras de compressão e diferentes estados de compacidade.	93
Figura 6.25: Variação tensão axial vs. deformação axial do corpo de prova de arenito, comparação de ensaios na condição seca adotando-se critérios de estabilização distintos.	96
Figura 6.26: Variação da deformação axial com o tempo do corpo de prova do arenito de Manso, comportamento esperado do material de enrocamento.	97
Figura 6.27: Variação da deformação axial com o tempo do corpo de prova do arenito de Manso, comportamento desenvolvido em alguns estágios de carregamento.	97
Figura 6.28: Variação deformação axial com o tempo do corpo de prova do arenito de Manso, comportamento desenvolvido durante o estágio de colapso por inundação do material	98

Figura 6.29: Curvas granulométricas inicial e final do enrocamento, referente ao ensaio de compressão confinada seco e inundado.	100
Figura A.1: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K ₀	117
Figura A.2: Comparação da variação tensão axial vs. deformação axial experimental e teórica do modelo EC-K ₀	117
Figura A.3: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K ₀ associado ao ensaio de inundação em 107,37 kPa.	117
Figura A.4: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K ₀ associado ao ensaio de inundação em 299,55 kPa.	118
Figura A.5: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K ₀ associado ao ensaio de inundação em 454,5 kPa.	118
Figura A.6: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K ₀ associado ao ensaio de degradação em 113,22 kPa.....	118
Figura A.7: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K ₀ associado ao ensaio de degradação em 300 kPa.....	119
Figura A.8: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K ₀ associado ao ensaio de degradação em 599 kPa.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Fatores que interferem no comportamento mecânico dos enrocamentos (Carvalho, 2009).....	11
Tabela 2.2 - Mecanismos de degradação	19
Tabela 3.1: Ensaio de compressão unidimensional de grandes dimensões (adaptada Pacheco, 2005)	27
Tabela 3.2: Modelos de câmara de compressão unidimensional (adaptado Carvalho 2009)	30
Tabela 3.3: Resultados de alguns ensaios de compressão unidimensional realizados na literatura.	31
Tabela 3.4: Mecanismos de degradação de natureza física e química em rochas.	34
Tabela 3.5: Estudos de alteração rochas através de ensaio de umedecimento e secagem (Salles 2013).....	41
Tabela 5.1: Tensões de confinamento	63
Tabela 6.1: Valores dos parâmetros AE e BE para diferentes materiais.....	77
Tabela 6.2: Variação do módulo M do material na fase inicial e linear quando avaliado nas diferentes configurações de câmaras de compressão e diferentes estados de compacidade.....	93
Tabela 6.3: Tempo de duração dos ensaios seco e inundado.	98
Tabela 6.4: Tempo de duração dos ensaios de inundação intermediária.	99
Tabela 6.5: Tempo de duração dos ensaios de saturação e secagem.	99
Tabela 6.6: Valores correspondentes ao grau de quebra (B_g) para o processo de colapso.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE	Parâmetro relacionado ao comportamento tensão-deformação do material
ASTM	American Society for Testing Materials
BE	Parâmetro relacionado ao comportamento tensão-deformação do material
BEVC	Barragem de Enrocamento com Vedação Central
BEVM	Barragem de Enrocamento com Vedação a Montante
B_g	Grau de Quebra
C_c	Coeficiente de curvatura
Cm/S	Centímetro por segundo
C_{nu}	Coeficiente uniformidade
$d_{máx.}$	Diâmetro máximo
D_r	Densidade relativa
E	Índice de vazios
EC	Módulo edométrico tangente
EC- K_0	Modelo constitutivo
H	Hora
K	Coeficiente de permeabilidade
kN	Kilonewton
K_0	Coeficiente de empuxo no repouso
kPa	Quilo-Pascal
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
M	Módulo de compressibilidade (Constrained Modulus)
mm	Milímetro
MPa	Mega-Pascal
P_a	Pressão Atmosférica
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
W_k	Peso do material de fração K da curva granulométrica
σ'_v	Tensão axial
ε_v	Deformação Vertical
$\Phi_{máx}$	Diâmetro Máximo

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Nas últimas décadas, o desenvolvimento do país associado à necessidade de implantação de novos empreendimentos, levou a engenharia civil a estudar o emprego de diferentes materiais de construção nas obras de grande porte. Tais materiais, em alguns casos, podem estar submetidos a condições de degradação pela exposição ao ambiente exógeno.

Pode-se observar que, nas grandes obras brasileiras, um tipo material que vem sendo usado com grande frequência são os enrocamentos. Os enrocamentos possuem um amplo campo de aplicação nas obras de engenharia, dos quais se podem citar as barragens, obras portuárias, vias de transporte e aeroportos. Dentre estes, destaca-se o uso do enrocamento nas obras de grandes barragens, constituindo o maciço de aterro do corpo estrutural da barragem garantindo assim a estabilidade dos taludes, especialmente na região de variação do nível d'água do reservatório da barragem. Os tipos de barragens mais comuns que utilizam enrocamento como elemento estrutural são: barragem de terra e enrocamento, de enrocamento com face de concreto, enrocamento com face de geomembrana e enrocamento com núcleo em concreto asfáltico. Na Figura 1.1, pode-se observar uma barragem de enrocamento com face de concreto.



Figura 1.1: Enrocamento com face de concreto - Barragem de Campos Novos

É importante mencionar que das obras de grande porte, as barragens merecem destaque especial, sobretudo pela grande demanda gerada pela matriz energética brasileira que se encontra em constante expansão. Tendo em vista que os enrocamentos, que são normalmente constituídos por materiais rochosos, quando expostos aos agentes do ambiente exógeno, estão sujeitos a severas condições de degradação. A degradação do material de enrocamento se constitui com as modificações nas características das rochas e dos minerais constituintes.

Apesar de o uso de enrocamentos existir há longa data, foi somente com o crescente uso de enrocamentos nas últimas décadas que se observou laboratórios com equipamentos de grande porte e o aperfeiçoamento de profissionais para o estudo do comportamento geomecânico desses materiais. Atualmente, vários equipamentos de grande porte já são comercializados para esse fim.

Nos últimos anos, a bibliografia técnica tem desenvolvido inúmeras pesquisas para avaliar o comportamento geomecânico no material de enrocamento. Muitas dessas pesquisas envolvem a simulação do comportamento por modelos numéricos. A simulação do comportamento em laboratório é realizada, frequentemente, por meio de ensaios triaxiais de grandes dimensões. E, considerando que os triaxiais possuem maior aplicabilidade, esses equipamentos são usados frequentemente em ensaios mecânicos de enrocamento.

Particularmente abordando o comportamento de durabilidade dos enrocamentos, poucos estudos conclusivos são encontrados na literatura. No entanto, tais estudos são hoje de grande relevância, tendo em vista fatores como os elevados níveis de tensão a que os enrocamentos são submetidos devido à construção de barragens cada vez mais altas e à susceptibilidade à degradação e ao colapso apresentada pelo frequente emprego de materiais de baixa qualidade.

A avaliação do comportamento tensão-deformação dos materiais de enrocamento é de grande importância. Tal afirmação pode ser constatada ao avaliar maciços de enrocamento sujeitos à variação de água, quando estes chegam a sofrer consideráveis deformações.

Neste sentido, considerando a evolução das técnicas de ensaio, o uso frequente de enrocamentos em grandes obras e a necessidade da avaliação de sua durabilidade,

faz-se necessário a implementação de pesquisas para o estudo do comportamento geomecânico associado à durabilidade desses materiais.

1.2. Histórico

Barragens de enrocamento são construções de longa data e têm mostrado um desenvolvimento crescente. Isto se pode justificar, em parte, em razão da escassez de solos de fração fina para a construção de barragens de terra em determinados locais e pela disponibilidade de material rochoso.

As primeiras barragens de enrocamento foram construídas nas zonas mineiras da Califórnia, em Serra Nevada, no início do século XIX. A construção de uma barragem de enrocamento, naquele momento, foi motivada pela abundância de rocha nas minas. A partir de então, as obras com material de enrocamento foram cada vez mais empregadas. Entretanto, os blocos de rocha eram simplesmente empilhados, sem nenhuma compactação ou controle tecnológico. Em função disto, muitas barragens sofreram deformações significativas durante o período de construção e enchimento.

Pode-se considerar que, na história da construção de barragens de enrocamento, há três períodos importantes. Na primeira época, desde meados do século passado até cerca de 1942, o enrocamento era colocado com lançamento de blocos e a estanqueidade era garantida, muitas vezes, pela ação de um núcleo argiloso. Havia, no entanto, a possibilidade de migração dos solos finos para os vazios do enrocamento. No período de 1942 a 1960, começou-se a utilizar os filtros e zonas de transição entre o núcleo argiloso e os maciços de enrocamento. No terceiro período, posterior a 1960, os materiais de enrocamento são compactados por camadas, recorrendo-se a cilindros vibradores (Veiga Pinto; 1983).

A execução das barragens de enrocamento teve grande impulso na década de 50, momento em que os enrocamentos mostraram o seu grande potencial de utilização em função tanto no que se refere aos custos, quanto às características mecânicas que os tornam adequados para a construção de barragens de grande altura.

Na década de 60, surgiram pesquisas empregando equipamentos de grandes dimensões o que tornou possível estudar mais detalhadamente o comportamento mecânico dos enrocamentos.

As décadas seguintes foram marcadas pelas construções das grandes barragens utilizando controle tecnológico, introduzindo a técnica da compactação em camadas e molhagem no período construtivo. Dentre as primeiras barragens construídas com enrocamento compactado pode-se citar a barragem de El Infiernillo, no México, e a barragem de Quoich, na Escócia, cujas obras foram terminadas em 1963 e 1969, respectivamente (Saboya, 1993). Estas barragens apresentaram comportamento bastante satisfatório com relação a deformações.

No mesmo período ocorreu, no Brasil, o desenvolvimento das técnicas de projeto e construção de barragens de enrocamento. Na década anterior, alguns projetos de barragens já haviam sido realizados no país por firmas internacionais. No entanto, devido ao crescimento da matriz energética no país, a engenharia brasileira viu a necessidade de se capacitar e deu início a obras de grandes barragens.

Dentre as maiores barragens brasileiras (em relação à altura) estão as barragens de Irapé (MG), Itaipu (PR), Campos Novos (SC), Foz do Areia (PR), Emborcação (MG e GO), Serra da Mesa (GO), Xingó (AL e SE). O material de enrocamento tem sido empregado com sucesso em barragens de grande altura, utilizando seções do tipo enrocamento com núcleo de argila ou enrocamento com face de concreto.

Nos últimos anos, projetos hidrelétricos encontram-se entre as principais áreas a desfrutar de desenvolvimento contínuo na China. Devido ao desenvolvimento de grandes projetos e construções, o país tem acumulado experiência na área. Entre todos os projetos hidrelétricos, as barragens de enrocamento possuem, de modo geral, maior prioridade devido à utilização de matéria prima local de baixo custo de acordo com Wang e Zeng *et. al* (2011). Este fator tem alavancado as pesquisas na busca de um maior conhecimento do comportamento mecânico do material de enrocamento no país, que frequentemente utiliza equipamentos triaxiais de grande porte para simular o comportamento do enrocamento em laboratório.

Existe ainda, contudo, carência de estudos mais aprofundados a respeito do comportamento mecânico dos enrocamentos. Para um melhor desempenho de tais barragens, é aconselhável pesquisas relacionadas à compressibilidade da rocha empregada.

1.3. Objetivos e justificativas do trabalho

O presente trabalho segue a linha de pesquisa de durabilidade de materiais geotécnicos, empregados na construção de obras de grande porte. Visa, portanto, determinar as características de longo prazo destes materiais buscando uma estimativa da vida útil das obras.

Nesta pesquisa, procura-se avaliar os efeitos das alterações da rocha constituinte no comportamento de enrocamentos. Particularmente, pretende-se compreender o comportamento mecânico do enrocamento devido ao colapso gerado por variações de umidade e temperatura da rocha, causados especialmente pela oscilações do nível d'água do reservatório da barragem.

O estudo é aplicado ao enrocamento de arenito da Barragem de Manso que apresenta sinais de degradação acelerada no campo.

Neste trabalho dá-se ênfase à avaliação do comportamento do material de enrocamento sob condição tensão-deformação oedométrica. Dessa forma, estabeleceu-se um programa experimental de ensaios laboratoriais utilizando equipamento de grandes dimensões de compressão confinada e saturação e secagem da UENF. Para a execução destes ensaios foram realizadas adaptações em equipamentos existentes no laboratório de engenharia civil da UENF-LECIV para suportar maiores níveis de tensões e deformações.

Em face da carência de literatura técnica que apresente estudos conclusivos sobre a durabilidade, comportamento geomecânico e procedimentos de ensaios, torna-se necessária a pesquisa de metodologias apropriadas para a avaliação da interferência da degradação no comportamento mecânico destes materiais empregados em barragens.

Deste modo, o desenvolvimento da pesquisa contribui para o aprimoramento das técnicas de determinação das características mecânicas e de durabilidade dos materiais de enrocamento.

1.4. Organização do trabalho

O Capítulo 1 faz considerações iniciais sobre os materiais de enrocamento a fim de contextualizar o tema, além de apresentar um breve histórico sobre o emprego desses materiais ao longo dos anos. Sintetiza, ainda, as principais justificativas e o objetivo do trabalho.

O Capítulo 2 expõe o início da revisão bibliográfica onde são abordados temas relevantes para pesquisa como: definição de enrocamento e barragem de enrocamento e elenco de fatores que influenciam no seu comportamento geomecânico.

O Capítulo 3 se dedica aos ensaios de compressão unidimensional (grandes dimensões), descrevendo algumas pesquisas realizadas anteriormente onde foram utilizados estes ensaios. Aborda também a alterabilidade de maciços rochosos apresentando o ensaio utilizado.

O Capítulo 4 descreve com detalhes o equipamento de compressão confinada (grandes dimensões), de degradação e a câmara de compressão utilizada na pesquisa de mestrado e apresenta o material de estudo.

O Capítulo 5 propõe programa experimental e metodologia para avaliar o colapso em materiais de enrocamento.

O Capítulo 6 apresenta e analisa os resultados dos ensaios em laboratório, isto é, mostra os resultados dos ensaios de compressão unidimensional e degradação do material.

O Capítulo 7 contém as conclusões, bem como algumas sugestões para pesquisas futuras sobre o comportamento do material de enrocamento.

CAPÍTULO 2 - ENROCAMENTO, BARRAGEM DE ENROCAMENTO, FATORES QUE INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DO MATERIAL

Este capítulo apresenta uma definição de enrocamento e classifica as barragens de enrocamento quanto ao elemento de vedação. Enfoca também os fatores que influenciam no comportamento geomecânico dos materiais de enrocamentos a fim de permitir a análise dos resultados experimentais obtidos na pesquisa. Neste momento o termo colapso de enrocamentos é abordado de forma detalhada, considerando que é este um dos aspectos da pesquisa.

2.1. Definição de enrocamentos

Em virtude de uma maior compreensão do comportamento do material e de novas tecnologias aplicadas aos processos construtivos (equipamentos, transporte, processos de desmonte e densificação de materiais rochosos), foram criadas, ao longo do tempo, definições e classificações do termo enrocamento.

Enrocamentos, como materiais de construção, são comumente definidos como um conjunto de fragmentos rochosos cuja granulometria é basicamente composta por partículas com diâmetros variáveis entre 2 a 200 cm, podendo apresentar pequena porcentagem de finos material que passa na peneira com abertura de 4,76 mm (Maia 2001).

A escolha e a dimensão do tipo de partícula usado no enrocamento são influenciadas diretamente pela disponibilidade do material na região da obra, pelos tipo de obra e processo construtivo. Não existe limitação do diâmetro mínimo, contudo, deve-se ter atenção ao percentual de finos uma vez que o material fino em elevada porcentagem pode gerar o desenvolvimento de pressão nos poros do enrocamento. Penman e Charles (1971) enfatizam que o coeficiente de permeabilidade da camada de enrocamento deve ser superior a 10^{-3} cm/s. De acordo com Maranhã das Neves (2002), a porcentagem de fragmentos com dimensão inferior a 0,074 mm (peneira 200, ASTM) não deve exceder 10%.

Watzko (2007) sugere uma classificação dos enrocamentos, ainda com extensa faixa granulométrica, como enrocamento fino, médio, graúdo duro e graúdo brando, com a finalidade de facilitar o entendimento do uso do mesmo de acordo com o zoneamento (utilização), e as características relacionadas com a sua litologia, granulometria e grau de alteração dos grãos. Aponta ainda que, atualmente, há granulometrias onde o diâmetro máximo atinge até 1,5 m e o percentual de material fino chega a 35 % ou 40 % passante na peneira n°4 (4,8 mm), ou até mesmo um percentual da ordem de 10 % passante na peneira n° 200 (0,074 mm).

As definições acima levam a concluir, do ponto de vista granulométrico, que o conceito de enrocamento é relativamente amplo e dependente do tipo de obra em que se pretende empregar.

2.2. Barragem de enrocamento

Uma barragem de enrocamento é constituída fundamentalmente por um aterro rochoso compactado em camadas, onde o peso dos grãos e o imbricamento dos blocos rochosos tornam a estrutura estável.

O emprego de enrocamentos em barragens geralmente ocorre em situações onde há escassez de solos de fração fina, com características adequadas para compactação, ou onde é abundante o volume de rocha derivada de escavações obrigatórias. Desta-se que, de acordo com Veiga Pinto (1983), os materiais de enrocamento são os mais adequados para a construção de barragens de grande altura.

Os enrocamentos são materiais com elevada permeabilidade, o que obriga a utilização de elementos de vedação no corpo dos aterros de barragens. A impermeabilização pode ser feita de duas maneiras: pelo núcleo central de material impermeável ou pela face impermeável construída sobre o talude de montante.

Classificação do tipo de barragem de enrocamento quanto ao elemento de vedação

Tendo em vista que o coeficiente de permeabilidade de um aterro de enrocamento é alto, as barragens de enrocamento necessitam de um elemento de

vedação. Desse modo, a classificação de uma barragem de enrocamento depende do tipo de vedação adotada. Esse elemento pode ser basicamente de dois tipos: interno ou externo. O elemento de vedação define o tipo de barragem de enrocamento:

Barragem de enrocamento com vedação a montante

A Barragem de enrocamento com vedação a montante (BEVM) possui o elemento impermeável na face de montante. E todo o corpo do aterro é constituído de material de enrocamento. O elemento vedante pode ser constituído de concreto, aço, material sintético, madeira, solo-cimento ou concreto betuminoso (Figura 2.1).

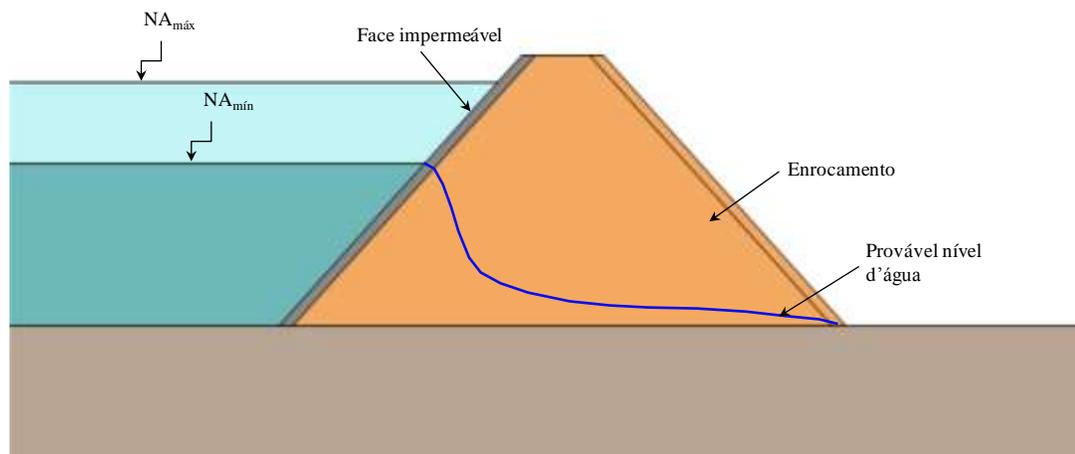


Figura 2.1: Barragem de Enrocamento com Vedação Montante (BEVM)

Barragem de enrocamento com vedação central

A Barragem de enrocamento com vedação central (BEVC) possui o elemento de vedação interno e o aterro de enrocamento é composto por zona montante e jusante. O elemento vedante que compõe o núcleo central pode ser de solo argiloso compactado, geomembrana, aço, concreto compactado ou concreto betuminoso (Figura 2.2).

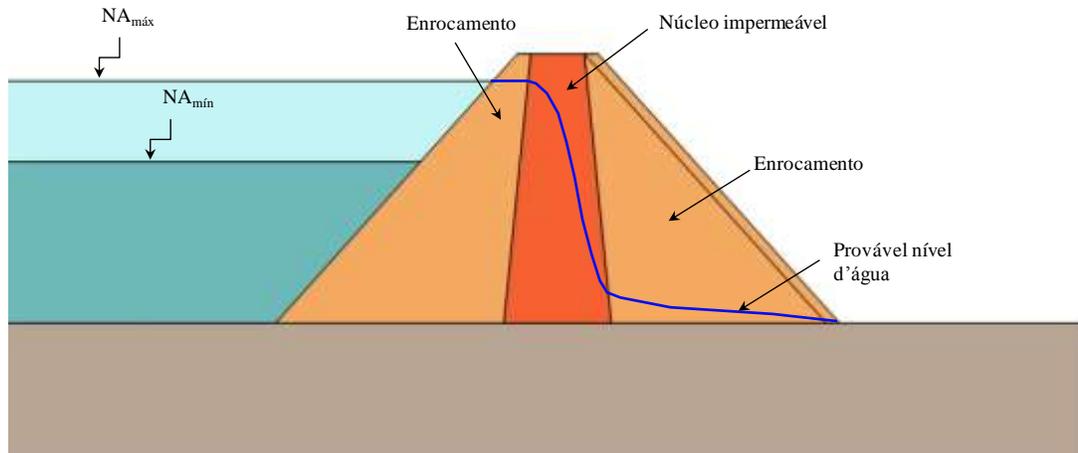


Figura 2.2: Barragem de Enrocamento com Vedação Central (BEVC)

2.3. Comportamento geomecânico de enrocamentos

O comportamento geomecânico do material de enrocamento foi e permanece sendo foco principal de muitas pesquisas nas últimas décadas. Os trabalhos de Marsal (1973 e 1975), Veiga Pinto (1983), Silva (1996), Caproni Jr. (1998), Oldecop e Alonso (2001, 2003 e 2007), Maia (2001), Maia *et al.* (2003), Dias (2001), Cuberos (2003), Santos *et al.* (2005), Pacheco (2005), Basso (2007), Kohgo *et al.* (2007), Meirelles (2008), Carvalho (2009), Sampaio (2010), Dias (2010), Almeida (2010), Roosta e Alizadeh (2012), Sakai e Nakano (2013), Salles (2013), Pessin (2013) consolidam importantes informações com foco nos fatores que influenciam no comportamento mecânico dos materiais de enrocamento. Tais autores realizaram investigações geotécnicas dos enrocamentos baseados em resultados de ensaios de grandes dimensões.

A Tabela 2.1 apresenta resumidamente as principais conclusões obtidas a partir destes trabalhos, bem como as referências utilizadas, para uma melhor compreensão dos fatores que condicionam o comportamento mecânico dos enrocamentos.

Tabela 2.1 - Fatores que interferem no comportamento mecânico dos enrocamentos (Carvalho, 2009)

Fator		Principais Referências	Principais Conclusões
Tensões atuantes		Marsal (1975) Maia (2001)	Deformação de enrocamentos depende das tensões atuantes na estrutura granular, nas partículas ou em ambas.
Partículas constituintes do enrocamento	Forma das partículas	Fraia Neto (1996) Marsal (1973) Hom e Deere (1962) Maia (2001)	Materiais constituídos por partículas angulosas são mais deformáveis do que os compostos de elementos arredondados.
	Dimensão das partículas		Para um enrocamento submetido ao mesmo estado de tensão, arranjo estrutural (forma da distribuição granulométrica) e densidade relativa, a compressibilidade do material aumenta com o aumento das dimensões das partículas.
	Atrito entre as partículas		O efeito do atrito entre partículas, importante nos materiais dilatantes, anula-se praticamente nos materiais de enrocamentos constituídos de partículas de baixa resistência.
	Mineralogia		Mineralogia afeta as propriedades mecânicas dos materiais granulares pela influência no coeficiente de atrito e na resistência à quebra das partículas.
	Estado de degradação das rochas		Degradação da rocha interfere na resistência ao fraturamento e nas dimensões das partículas do enrocamento.
Enrocamento como meio granular	Estado de compacidade	Veiga Pinto(1979) Fraia Neto (1996) Saboya Jr. (1993) Lopes (2000) Fumagalli (1969) Becker et al. (1972) Baumann (1960) Sowers et al. (1965) Kjaernsli e Tornblaa (1966) Marsal e Ramírez (1967) Marsal (1972) Lowe (1964) Leslie (1969) Marachi et al. (1972)	Depende da granulometria, tanto em termos de tamanho e forma dos grãos quanto da distribuição granulométrica.
	Distribuição granulométrica		Característica granulométrica mais utilizada no estudo de enrocamentos é a dimensão máxima das partículas $d_{100} = d_{max}$. Afeta o comportamento mecânico dos materiais granulares devido à influência no fraturamento das partículas. Materiais bem graduados possuem menor nível de fraturamento das partículas do que para os de graduação uniforme.
	Adição de água		Com a adição de água em enrocamentos, ocorre o aumento das deformações com o aumento do nível de tensão. O colapso em enrocamentos é gerado pela ruptura das partículas constituintes, diferente dos solos que é gerado pela ruptura da estrutura das partículas (desestruturação).
	Inclusão de finos		Inclusão de finos nos vazios existentes nos compostos de enrocamento reduz a quebra das partículas, assim como os valores do ângulo de atrito.

Tabela 2.1 - Fatores que interferem no comportamento mecânico dos enrocamentos (Carvalho, 2009)

Enrocamento como meio granular	Dimensão da Amostra(efeito escala)	Cea e Ollala(1993) Zeller e Wullimann (1957) Veiga Pinto (1982) Caproni Jr. et al. (1998) Vallerga et al. (1957) Tombs (1969) Thiers e Donovan (1981) Marsal (1973 a) Penman (1971)	Utilização de curva granulométrica paralela à do material no campo ou curva granulométrica truncada, para melhor representatividade do material em campo. A densidade dos corpos de prova modelados no laboratório é melhor representada pela reprodução da densidade relativa do material no campo. Avaliação do efeito de escala pode ser dificultada pela interferência de fatores como: maior ou menor uniformidade da granulometria, as porcentagens das diferentes frações granulométricas, a forma e a resistência das partículas. Relações de D/dmax de 4 a 6 são as mais utilizadas na prática.
Procedimentos de ensaio	Trajetória de tensões	Sayão e Castro (1998) Holtz e Gibbs (1956)	Em enrocamentos, 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.Descontinuidade do meio interfere na distribuição de tensões do aterro de enrocamento e, conseqüentemente, na trajetória de tensões.
	Tipo de ensaio		Dentre os ensaios realizados para determinação das características dos enrocamentos, somente o ensaio de compressão unidimensional, não utiliza equipamentos com controle da deformação, pois os equipamentos de tensão controlada não permitem a observação de comportamento pós-ruptura.
	Velocidade de cisalhamento		Velocidade de cisalhamento usual de laboratório não afeta significativamente as características mecânicas dos enrocamentos

A Tabela 2.1 baseia-se na divisão feita por Maia (2001), que apresenta como os principais fatores que afetam, de maneira direta ou indireta, o comportamento mecânico do enrocamento: *o estado de tensões, as partículas constituintes do enrocamento, enrocamento como meio granular e procedimentos de ensaio.*

O comportamento mecânico do material de enrocamento influencia nas características de compressibilidade dos aterros.

Quanto aos fatores apresentados na Tabela 2.1, a maioria é passível de simulação em escala reduzida. No estudo da durabilidade de materiais de enrocamento no laboratório, os seguintes fatores merecem destaque especial: o estado de alteração do maciço, adição de água e quebra das partículas.

2.4. Estado de alteração da rocha

O enrocamento, quando exposto aos agentes do ambiente exógeno, encontram-se sujeitos a processos de degradação, que afetam seu desempenho e durabilidade. Destacam-se como principais agentes de degradação de enrocamentos utilizados em barragens os químicos e os físicos.

Embora estudos sobre alteração de enrocamentos sejam minoria na literatura, eles são de grande importância para a compreensão do comportamento mecânico a longo prazo. O fato se justifica sobretudo pelo emprego de materiais rochosos menos competentes cada vez mais frequente nas construções, como as rochas fraturadas ou alteradas provenientes de escavações obrigatórias da obra. Nesses casos os materiais são mais susceptíveis à degradação e reduzem a durabilidade da obra.

O processo de alteração das rochas é um problema complexo e de difícil simulação em laboratório. A escolha do tipo de ensaio de alteração deve considerar a solicitação que o material sofrerá ao longo de todo o tempo de exposição. Apesar disto, Maia (2001) e Salles (2006) sugerem que a degradação acelerada através da lixiviação contínua ou por ciclos de umidade podem simular a degradação do enrocamento no campo.

Outros aspectos e estudos a respeito da degradação em material de enrocamento serão abordados no Capítulo 3.

2.5. Colapso

O colapso dos enrocamentos é caracterizado por deformações que ocorrem durante a fase de saturação do material sob um estado de tensão total constante. O colapso é um fenômeno que consiste na deformação volumétrica rápida do material devido à saturação.

Terzaghi (1960) afirma que o colapso dos materiais de enrocamento em barragens de aterro se dá devido à perda da resistência dos elementos rochosos quando saturados. Essa perda de resistência pode ser explicada pela penetração da água nas microfraturas, no entorno dos contatos entre partículas, o que provoca alteração no estado de tensões efetivas dentro das microfissuras. Tal fato ocorre pela

geração de pressões neutras nas microfaturas durante a absorção rápida da água. Caso ocorra a propagação das microfaturas, serão observadas grandes mudanças na estrutura granular, provocadas pelo rearranjo entre partículas. A esse processo denomina-se colapso.

A Figura 2.3 mostra a influência da adição de água no comportamento de materiais enrocamentos, através das curvas tensão vs. deformação em compressão unidimensional nos estados seco e saturado. Observa-se uma deformação significativa do material inicialmente seco e quando se procede a adição de água. Nobari e Duncan (1972) sugerem que o processo de inundação do enrocamento provoca o deslocamento da curva tensão vs. deformação do enrocamento seco para a curva do mesmo enrocamento ensaiado sob condição saturada.

Carvalho (2009) realizou ensaios de compressão unidimensional em que avaliou o colapso gerado por inundação em amostras de arenito, calcário e granito. Os resultados indicaram um comportamento similar aos apresentados por Nobari e Duncan (1972).

Maia (2001), ao realizar ensaio de compressão unidimensional em amostras de basalto e granito densos, verificou que o processo de inundação não provocou o deslocamento da curva σ_v vs. ϵ_v do enrocamento seco para a curva do mesmo enrocamento ensaiado sob condição saturada por submersão, como sugerido por Nobari e Duncan (1972). Este resultado evidencia a influência das características intrínsecas dos materiais no processo de colapso.

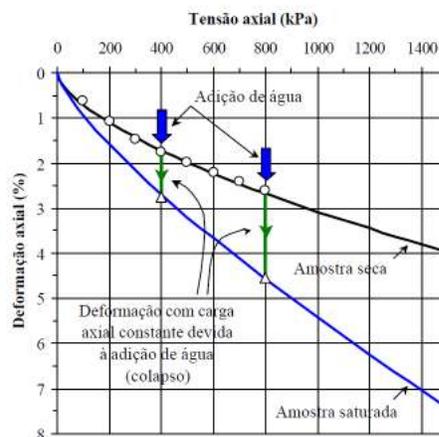


Figura 2.3: Curvas de deformação uniaxial vs. tensão axial em compressão unidimensional em enrocamentos de granulometria uniforme (Nobari e Duncan, 1972).

A ordem de grandeza do colapso é função da litologia, da granulometria e da densidade do enrocamento. O colapso se reduz com o aumento da densidade relativa e com o aumento de finos na granulometria (Maia, 2001).

Torna-se importante destacar, nesse momento, que o mecanismo de colapso nos enrocamentos é diferente do mecanismo de colapso de solos: nos enrocamentos, ocorre a ruptura dos grãos e blocos constituintes, enquanto que nos solos, o colapso é gerado pela ruptura da estrutura granular.

Em seu trabalho, Maia (2001) se fundamenta em estudos de alguns autores e assim relaciona as causas do colapso de enrocamentos a aspectos relevantes, tais como:

- i) redução da carga de ruptura no carregamento pontual devido à saturação das partículas (Marsal, 1967; Veiga Pinto, 1983);
- ii) redução da resistência à compressão uniaxial da rocha pela saturação da rocha (Kjaernsli E Sande, 1963; Penman, 1971; Good, 1976; Lama & Vutukuri, 1978);
- iii) fragmentação das partículas causada pela expansão de argilominerais em razão da adição de água (Frazão & Caruso, 1983).

Para permitir uma abordagem sistemática, pode-se fazer uma diferenciação entre as deformações rápidas e lentas associadas aos mecanismos de alteração. Neste sentido, podem-se identificar três mecanismos distintos relacionados às deformações sob tensão constante em enrocamento: colapso primário, colapso secundário e deformação lenta (creep).

Colapso primário:

O colapso primário está associado a deformações rápidas que ocorrem na primeira inundação, durante a fase de saturação gerada no primeiro enchimento da barragem ou por eventuais chuvas fortes durante a fase de construção. As deformações provocadas nestas condições são significativas, uma vez que a primeira saturação do enrocamento aumenta consideravelmente a sua deformabilidade.

Nessa fase a degradação ocorre fundamentalmente por mecanismos físicos, por meio da ruptura dos contatos pela penetração da água nas microfaturas.

Alguns autores como Marsal (1965), Fumagalli (1969a), Nobari e Duncan (1972), Donaghe Cohen (1978), Veiga Pinto (1983), Silva (1996), Oldcop e Alonso (2001/03), Maia (2001), Pacheco (2005), Carvalho (2009), Sampaio (2010), Almeida (2010) entre outros analisam, em seus trabalhos, o colapso dos enrocamentos por inundação. A ênfase das pesquisas se dá na avaliação das deformações geradas pelo colapso primário. Isso se justifica, principalmente, pelas maiores deformações geradas nesse tipo colapso em relação às deformações geradas por eventos de outra natureza.

Como exemplo do processo de colapso pode-se citar a Barragem de El Infiernillo, com 148 m de altura, localizada no México, cujo enrocamento de diorito apresentou deformações rápidas expressivas devido ao processo de saturação. Marsal (1965) conduziu ensaios de compressão unidimensional com o enrocamento utilizado na Barragem com o objetivo de avaliar as deformações por colapso observadas. Foi observado que para tensão axial igual a 1,6Mpa ocorre acréscimo da deformação axial igual a 1,1 % devido a inundação do corpo de provas. Esse comportamento foi considerado próximo do apresentado na Barragem segundo Veiga Pinto (1983).

Colapso secundário:

Este tipo de deformação rápida é decorrente de episódios de saturação do enrocamento devido a variações súbitas de umidade e temperatura após o primeiro colapso. Nas barragens, o colapso secundário está associado à oscilação periódica do nível d'água do reservatório ou às chuvas intensas ocasionais.

A primeira inundação do material, que corresponde ao colapso primário, provoca deformações significativas no maciço. Uma inundação posterior, que corresponde ao colapso secundário, provoca deformação menos significativa que a primeira inundação. A repetição sistemática de inundações gera o acúmulo de deformações que na sua totalidade pode ser significativa.

Nessa fase, espera-se que ocorram mecanismos químicos e físicos simultaneamente. Fisicamente, a mudança do estado de tensão nas microfaturas

inicialmente secas pela absorção da água gera ruptura que se propaga para o restante da estrutura granular. Como a ruptura no colapso primário por esse mecanismo gera uma significativa mudança da estrutura granular, é de se esperar que este mecanismo não se pronuncie expressivamente no colapso secundário.

Quimicamente, as alterações da rocha, especificamente na porção mais próxima dos contatos entre partículas, após o colapso primário e antes do colapso secundário, pode provocar a redução da resistência do contato até mesmo sem gerar deformações por creep. Nessas condições, o colapso gerado por inundação vai facilitar a ruptura dos contatos entre partículas.

Deformação lenta (Creep):

O material de enrocamento sofre modificações devido à ação dos agentes de degradação exógenos, especialmente pela variação de umidade e temperatura sazonais. A alteração dos materiais de enrocamento ocorre normalmente de forma lenta, gerando deformações a longo prazo.

Nessa fase, predominam os mecanismos químicos, que geram alterações especificamente nos contatos, gerando redução de resistência e, automaticamente, deformação. Não se consideram as deformações rápidas características no processo de creep. Deste modo, o creep ocorre continuamente, devendo estabilizar somente depois da alteração completa da rocha.

2.5.1. Tipos de colapso definidos por zonas nos aterros de enrocamento

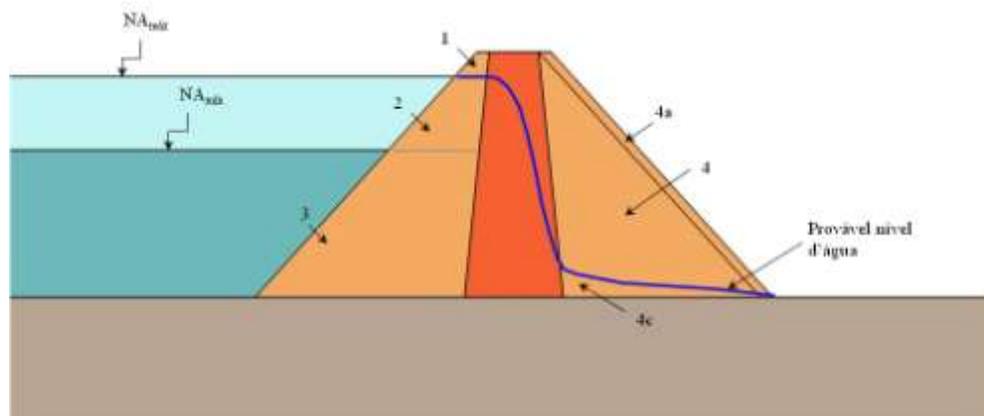
Com auxílio das Figuras 2.4a, 2.4b e 2.5, pretende-se mostrar os tipos de colapso existentes nos enrocamentos.

Observa-se, nas Figuras 2.4a e 2.4b, que a face de montante do maciço de enrocamento - a faixa 3 - sofre colapso primário, saturado por inundação durante o primeiro enchimento do reservatório. Enquanto que a faixa 2 sofre o processo de colapso secundário, associado à oscilação periódica do nível d'água do reservatório.

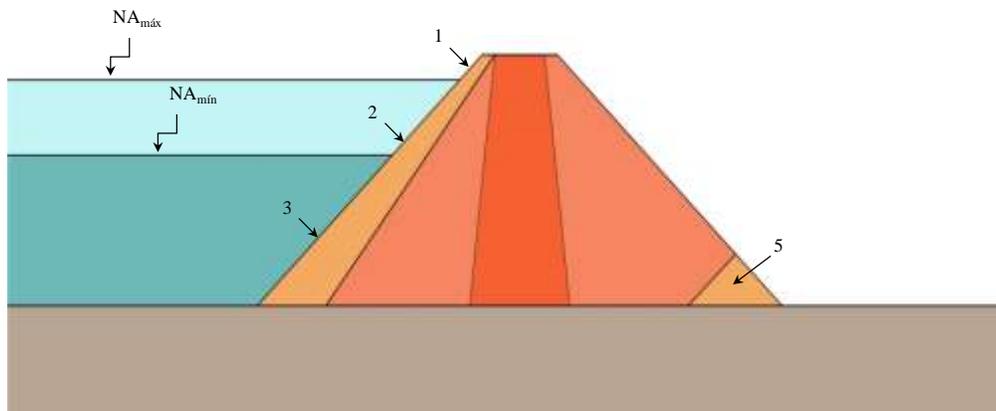
Existe ainda outra faixa do maciço de enrocamento que sofre deformações por colapso, mas que são pouco significativas. Está representada pela faixa 1 (Figura 2.4a

e Figura 2.4b). Este tipo de deformação ocorre por ciclos de chuva ou ainda, de forma lenta (creep), ocasionada por variações de umidade e temperatura sazonais. Na face de jusante da barragem, o maciço de enrocamento sofre deformação lenta (creep) somente na camada de alteração, devido também a variações de umidade e temperatura sazonais. Este processo ocorre nos dois tipos de barragens BEVC e BEVM (Figuras 2.4a.b e 2.5).

Observa-se que o colapso secundário não ocorre na faixa 3, sempre submersa, uma vez que nesta faixa não há variação da umidade. Na faixa 4c, ocasionalmente, pode ocorrer colapso primário, dependendo da integridade da laje ou do núcleo impermeável. Ressalta-se 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.



(a)



(b)

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

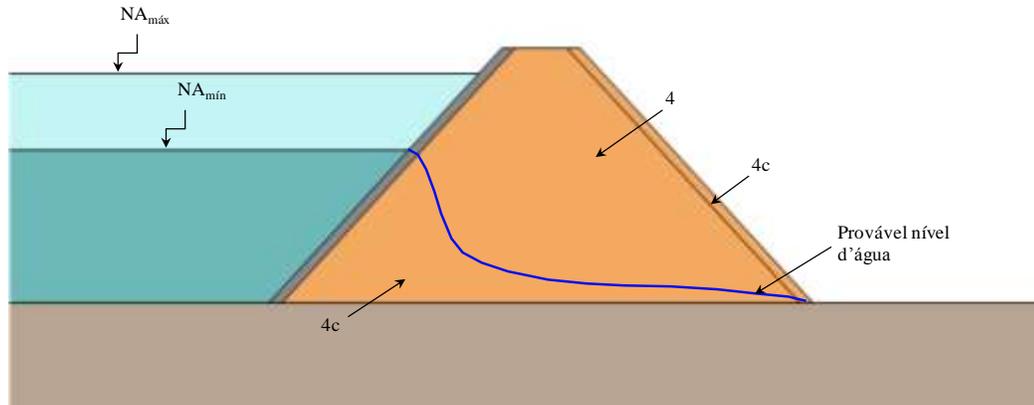


Figura 2.5: Barragem de enrocamento com vedação a montante

Tabela 2.2 - Mecanismos de degradação

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

Neste sentido, o emprego de enrocamentos em obras de barragens pode gerar acentuadas deformações verticais devido ao processo de colapso. Barragens de enrocamento do tipo BEVM podem ser afetadas por deformações diferenciais do maciço de enrocamento, o que pode provocar trincas ou aberturas da face de montante. Já em barragens do tipo BEVC, deformações do maciço podem resultar em sobrecarga e trincas no núcleo na direção do fluxo de água. Nos dois casos podem ocorrer infiltrações indesejadas nas barragens, comprometendo a eficiência da obra pelo significativo abatimento do maciço de enrocamento.

2.5.2. Adição de água durante a compactação

A fim de reduzir as deformações em aterros de enrocamento os autores em sua maioria recomendam a construção dos aterros em camadas, com molhagem e compactação. A adição de água durante a compactação, denominada molhagem, tem a finalidade principal de minimizar recalques pós-constitutivos, principalmente em aterros compostos por rochas que apresentam redução da resistência quando saturadas.

Ao realizar ensaios com amostras secas e molhadas, de material de enrocamento em câmara unidimensional, Veiga Pinto (1983) constatou que o colapso é nulo se as amostras tiverem sido montadas com molhagem do material. Ainda de acordo com o autor, a quantidade de água aplicada deve ser de aproximadamente 300 l/m³.

Oldcop e Alonso (2001) analisam o efeito da água na compressibilidade de enrocamento e observam que a quebra das partículas e a propagação de fraturas são mecanismos básicos do comportamento do material e que são controlados pela umidade relativa do ar que preenche os vazios de enrocamento. Para isso realizaram ensaios unidimensionais em que a umidade relativa do ar foi controlada. A partir dos resultados, foi possível concluir que o aumento da umidade nos vazios da rocha para o valor máximo, igual a 100 %, resulta em um colapso da mesma dimensão ao observado em amostras saturadas. Qualquer situação que conduz a uma mudança no conteúdo de água das partículas de rocha é suficiente para promover deformação. Esta conclusão é consistente com as deformações ocasionadas pela chuva, observadas em barragens de enrocamento e aterros.

No presente trabalho, optou-se por realizar os ensaios sem molhagem durante o processo de compactação do corpo de prova, visto que se pretendeu obter maiores níveis de colapso.

2.6. Resistência a quebra das partículas

Dentre as características das partículas que influenciam nas propriedades mecânicas dos materiais de enrocamento, a resistência à quebra exerce grande

influência. A intensidade das tensões de contato entre as partículas ocasiona a quebra dos contatos e/ou o fraturamento da partícula. Tal comportamento juntamente com o rearranjo das partículas caracteriza o processo de deformação em materiais de enrocamento.

A fragmentação dos grãos constituintes é um dos fenômenos mais importantes observados em decorrência de solicitações de esforços em um aterro de enrocamento. A quebra de partículas interfere na distribuição granulométrica e altera significativamente as características de deformação do material, podendo influenciar também sua resistência ao cisalhamento (Fraiha Neto, 1995).

De acordo com Maia (2001), a resistência à quebra das partículas varia com o tipo de rocha, a heterogeneidade do material rochoso, o grau de fissuração e as dimensões das partículas.

Marsal (1973) definiu o grau de quebra (B_g) que se refere ao parâmetro de quebra das partículas de enrocamento durante a realização dos procedimentos de ensaio (compactação, triaxial e/ou compressão unidimensional). O grau de quebra das partículas é influenciado por fatores como a granulometria, a resistência do material, a perda de resistência da partícula quando saturada e o nível de tensão. E pode ser definido pela porcentagem do material em peso, que sofreu quebra.

O valor de B_g pode ser obtido através da soma das diferenças positivas entre as frações granulométricas iniciais e finais do material de enrocamento, com auxílio da curva granulométrica adotada no início do ensaio e a obtida no fim do ensaio após novo peneiramento do material. Este grau é dado por:

$$B_g = \sum_{k=1}^n (\Delta W_k) \text{ positivos} \quad (2.1)$$

onde:

$$\Delta W_k = W_{ki} - W_{kf} \quad (2.2)$$

sendo, W_{ki} é o peso em Kg do material de fração K da curva granulométrica inicial; e W_{kf} é o peso em Kg do material de fração K da curva granulométrica final.

Veiga Pinto (1983), realizando ensaios de compressão unidimensional em enrocamento alterado, verificou aumento no grau de quebra do ensaio submerso quando comparado ao ensaio seco. Obteve grau de quebra de 19 % no ensaio seco e 48 % no ensaio submerso. Tal fato se justifica devido à presença de água, que resulta em um maior esmagamento dos grãos.

Os valores do grau de quebra das partículas determinado por Maia (2001), após a realização de ensaios de compressão unidimensional em basalto, sugerem que enrocamentos densos sofrem maior faturamento que os fofos. Contudo, o autor observa que o valor de Bg em enrocamento denso está sujeito à quebra que ocorre durante o processo de moldagem (densificação), o que pode não indicar, apropriadamente, o efeito da alteração na quebra das partículas do enrocamento de basalto denso.

Dias (2001) notou quebra do material nas maiores frações granulométricas ao realizar ensaios de compressão unidimensional, observando que quanto maior o diâmetro dos grãos, mais susceptível à quebra. E também observou que existe um maior grau de faturamento com o aumento da densidade.

Pacheco (2005) também observou quebra do material nas maiores frações granulométricas, ao notar diferenças significativas entre os diâmetros nominais de 10 e 30 mm. Concluindo que o aumento da quantidade de partículas com estes diâmetros ocorreu devido à quebra de partículas maiores, durante o processo de montagem e carregamento.

O grau de quebra das partículas está associado ao esmagamento dos grãos e à tensão atuante. Uma vez que a compressibilidade da rocha está associada à quebra dos contatos ou da partícula, as considerações sobre Bg tendem a auxiliar na previsão do comportamento do material de enrocamento, tornando-se possível correlacionar o grau de quebra com fatores do comportamento geomecânico do material que possam afetar o seu valor.

É relevante comentar que o grau de quebra (Bg) pode sofrer influências da quebra de partículas durante o processo de compactação e moldagem do corpo de prova. Espera-se, contudo, que ensaios em corpos de prova com mesma densidade, compactado com mesmo método de compactação e rocha com o mesmo estado de alteração, é possível que a comparação entre o grau de quebra possa ser representativa.

2.7. Considerações finais

A definição de enrocamento mostrou que este termo vem sofrendo constantes modificações nas últimas décadas. Isto ocorre devido ao desenvolvimento de pesquisas e novas técnicas construtivas.

Destaca-se que o maciço de enrocamento no campo está exposto à ação dos agentes do ambiente exógeno que alteram o material de formas diferentes em determinadas zonas da barragem ocasionando deformações. O colapso pode ocorrer devido a mecanismos de deformação primária, associado à primeira inundação do material e deformação secundária em razão de variações periódicas de umidade.

Sabe-se que a compressibilidade dos materiais de enrocamento está relacionada a uma série de fatores que interagem. Observa-se que é complexa a avaliação da interferência das características do enrocamento na determinação do comportamento tensão vs. deformação. Pelo exposto, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas a respeito do colapso e da durabilidade destes materiais.

A quebra associada ao rearranjo das partículas caracteriza o processo de deformação em materiais de enrocamento e pode ser quantificada a partir da comparação da curva granulométrica antes e depois do ensaio.

CAPÍTULO 3 - OEDÔMETRO DE GRANDES DIMENSÕES E DEGRADAÇÃO DE ENROCAMENTOS

O presente capítulo aborda o programa experimental utilizado para avaliar o comportamento dos materiais de enrocamento em laboratório. Em face da dimensão das partículas do material, é necessário o emprego de equipamentos de grandes dimensões no programa experimental. Apresenta, ainda, uma breve referência aos equipamentos de compressão unidimensional de grandes dimensões desenvolvidos ao longo dos anos que permearam o desenvolvimento de novas pesquisas.

O tema alterabilidade de enrocamentos é discutido em detalhes, visto que é um problema presente no enrocamento empregado em obras de barragens prejudicando a eficiência das obras.

3.1. Ensaio mecânicos em enrocamentos

Os ensaios mecânicos normalmente úteis para avaliar o comportamento dos materiais de enrocamento em laboratório são: Cisalhamento direto, Triaxiais, Deformação plana e Compressão unidimensional (edômetro). A escolha do ensaio mecânico que melhor representa o comportamento do enrocamento é bastante complexa, pois cada tipo de ensaio mecânico de laboratório simula uma trajetória de tensões específica, normalmente diferente das trajetórias de tensão no campo.

A execução do ensaio mecânico permite a determinação de parâmetros que podem ser utilizados em modelos para a previsão do comportamento mecânico de barragens de enrocamento.

3.1.1. Cisalhamento direto

Os equipamentos de cisalhamento direto, utilizados para os ensaios em enrocamentos, possuem o mesmo princípio de funcionamento dos equipamentos convencionais para ensaios em solos. São equipamentos de fácil execução. No entanto, estes equipamentos possuem limitações. Entre elas estão as deformações e

as tensões ao longo da superfície de cisalhamento que não são uniformemente distribuídas devido à rigidez das partes superior e inferior da caixa de cisalhamento. Dependendo da mobilidade pode ocorrer o deslocamento vertical diferenciado entre as partículas e ocasionar rotação do plano de ruptura e a abertura entre a caixa superior e inferior, podem interferir nos resultados.

3.1.2. Triaxial

Os ensaios triaxiais são os mais utilizados na avaliação da deformabilidade de materiais de enrocamento. Uma das maiores dificuldades enfrentadas ao realizar ensaios triaxiais é a determinação do revestimento empregado para isolamento do corpo de prova do fluido utilizado para o confinamento. O revestimento deve ser flexível, de modo a não interferir na tensão de confinamento e suficientemente resistente, a fim de não ser perfurado por possíveis extremidades pontiagudas das partículas de rocha. Outro aspecto experimental relevante é a possível expansão lateral da amostra de enrocamento conduzida em ensaios triaxiais.

3.1.3. Deformação plana

O ensaio de deformação plana reproduz de forma mais aproximada o estado de tensão e deformação dos aterros de enrocamento. É, contudo, um ensaio pouco empregado nas pesquisas em face da complexidade de uso.

3.1.4 Compressão unidimensional (oedômetro)

Este tipo de ensaio tem como finalidade determinar as características de deformabilidade de amostras com confinamento lateral. O ensaio de compressão unidimensional simula a trajetória de tensões, seguida pelo enrocamento no eixo principal da barragem, onde um elemento de material encontra-se solicitado simetricamente, seguindo a trajetória K_0 . Esta hipótese é mais correta quando a barragem é construída de forma a manter a simetria de carregamento, em relação ao eixo vertical da seção. O estado de carregamento durante o enchimento do reservatório não deve ser simulado como unidimensional.

Porém, os resultados destes ensaios podem apresentar interferência pelo tipo de câmara de compressão unidimensional, que pode gerar atrito entre as partículas e a parede interna da câmara. Neste sentido, pesquisas a fim de minimizar e/ou quantificar essa interferência são realizadas, como se pode constatar nos trabalhos realizados por Fumagalli (1969), Veiga Pinto (1983), Pacheco (2005) entre outros.

O ensaio de compressão unidimensional permite determinar o módulo de compressibilidade M (*Constrained Modulus*). A determinação do Módulo M , nos ensaios de compressão unidimensional é feita diretamente dos resultados dos ensaios. O módulo M é definido como:

$$M = \frac{d\sigma_v'}{d\varepsilon_v} \quad (3.1)$$

ou seja, a tangente à curva σ'_v vs. ε_v .

3.2. Equipamento de compressão unidimensional de grandes dimensões

A construção de um equipamento de grandes dimensões, além de ser de alto custo, apresenta dificuldades, o que pode justificar a escassez de estudos na área. Muitos são os questionamentos a respeito da reprodução do comportamento de enrocamentos em laboratório, tais como o diâmetro mínimo das amostras a serem ensaiadas, efeito escala nos resultados, atrito das partículas com as paredes da câmara de compressão, procedimento de moldagem das amostras (com ou sem molhagem), grau de alteração dos fragmentos rochosos, relevância de deformações por fluência. Contudo, as significativas deformações apresentadas por barragens em que se empregam enrocamentos justificam o aprofundamento de pesquisas no estudo do comportamento desses materiais.

A Tabela 3.1 apresenta resumo com as principais características dos equipamentos de compressão unidimensional de grandes dimensões e que colaboram para o estudo do comportamento geomecânico de enrocamentos.

Tabela 3.1: Ensaios de compressão unidimensional de grandes dimensões (adaptada Pacheco, 2005)

Autor	Laboratório	Aplicação/material	Equipamento edométrico			Observações
			Diâmetro (m)	Altura (m)	Tensão axial máxima (KN/m ²)	
Marsal (1975)	Universidade Nacional do México	Barragem de El Infiernillo/ conglomerados e cascalho	0,50	0,50	3200	A parede interior foi revestida com três placas de polietileno lubrificadas para se tentar reduzir o atrito.
Marsal (1967-1973)	Universidade Nacional do México	Análise das características de compressibilidade de diversos materiais de enrocamento	1,13	0,68	5600	-
Fumagalli (1969)	ISMES - Itália	Atrito lateral; construção de Câmaras constituídas por anéis alternados de material rígido e de material deformável	0,10	0,20	Redução em 40% da carga	Atrito lateral medido na metade da câmara.
			0,50	1,00		
			1,30	2,00	-	
Pinto (1982 e 1983)	LNEC - Portugal	Barragem de Beliche e El Piedras / mistura de grauvaca e xisto	0,50	0,50	2000	-
			0,23	0,46	-	Estudou o colapso
Neves (1982)	LNEC - Portugal	Colapso	0,20	0,17	-	Estudou o colapso
Pennan et al. (1976)	Imperial College Grã-Bretanha	Parâmetros elásticos para barragens da Grã-Bretanha	1,00	0,50	-	-
(1984-1985)	ELETROSUL - Brasil	Barragem de Ita / Enrocamento de Basalto	1,00	0,50	1701	-
Caproni Jr. et al. (1998 e 1999). Maia (2001)	Furnas - Brasil	Barragem de Serra da Mesa / granito britado. Barragem de Marimbondo / basalto. Alterabilidade de enrocamentos	1,05	1,00	2000	Aborda sobre deformação lateral dos anéis de borracha e de alumínio.
Anthiniac (1999)	Cemagref d'Aix-en-Provence – França	Verificação do colapso / Calcário e Diorito.	0,30 x 0,30*	0,35	±1000	*Seção prismática com paredes laterais transparentes. Foi comentado sobre a existência do atrito lateral.
Maia (2001)	Furnas-Goiânia/ CEDEX - Espanha	Alterabilidade de enrocamentos. Barragem de Serra da Mesa/granito britado. Barragem de Marimbondo/basalto.	1,00	1,00	±2000	Seção da câmara de anéis justapostos de alumínio e borracha *Seção quadrada
			0,30*	0,18		

Tabela 3.1: Ensaios de compressão unidimensional de grandes dimensões (adaptada Pacheco, 2005)

Autor	Laboratório	Aplicação/material	Equipamento edométrico			Observações
			Diâmetro (m)	Altura (m)	Tensão axial máxima (KN/m ²)	
Dias (2001)	Furnas-Goiânia	Caracterização mecânica de enrocamentos. Barragem de Itapebi (granito). Barragem de Manso (random)	1,00	1,00	±2000	Seção da câmara de anéis justapostos de alumínio e borracha
Oldecop e Alonso (2001 e 2003)	UPC/ Barcelona-Espanha	Modelo constitutivo (elastoplástico) para análise do efeito d`agua na compressibilidade e fenomeno de colapso em enrocamentos/Ardozia	0,30	0,20	1000	Circulação de vapor de água por circuito fechado de circulação de ar, utilizando solução salina para impor a umidade relativa do ar. Estudou o colapso.
Hueso cuberos (2003)		Projecto Regulação rio Dam Jiloca localizado no rio Pancrudo . Quartzito ardósia	0,30	0,20	2800	Controle das condições de umidade relativa, utilizando solução salina. Estudou o colapso.
			0,15	0,50	2800	
Pacheco (2005)	UFSC - Brasil	Atrito lateral, avaliação do colapso, influência da molhagem da amostra na compactação. Barragem de Machadinho/Basalto – Ácido Riodacito	1,00	0,50	2200	Força de atrito medida através de três células de cargas dispostas ao longo da célula de compressão. Estudou colapso.
Santos, Fleury e Assis (2005)	Furnas-Goiânia	Deformabilidade de enrocamentos considerando o efeito escala.Barragem de Serra da Mesa/granito	1,00	1,00	-	Ensaios de laboratório, com a mesma mineralogia e densidade relativa de campo, podem representar o comportamento do enrocamento numa escala real de obra.
Carvalho (2009)	UENF-Brasil	Avaliação do colapso devido à inundação e degradação. Areia quartzosa lavada-Barragem de Manso/Rocha Arenítica. Rocha Calcária-Rocha Granítica	0,30	0,10	246	Equipamento de compressão de grandes dimensões acoplado a um sistema de degradação por saturação e secagem. Estudou colapso.
Sampaio (2010)	UENF-Brasil	Avaliação do colapso devido à inundação e degradação. Barragem de Manso/Rocha Arenítica. Barragem de Chapecó/Basalto	0,30	0,10	250	Equipamento de compressão de grandes dimensões acoplado a um sistema de degradação por saturação e secagem. Medição de deslocamentos por LVDTs. Estudou o colapso.

3.3. Câmara de compressão unidimensional

Ensaio em materiais de enrocamento são realizados em escala reduzida devido às limitações experimentais de realizar um ensaio em escala real. Para determinação das características de compressibilidade, o ensaio de compressão unidimensional é um dos mais utilizados. Isso se justifica, sobretudo, pelas dificuldades experimentais na execução de ensaios como os ensaios triaxiais, cisalhamento direto e de deformação plana.

Os resultados do ensaio de compressão unidimensional podem sofrer interferência do desenvolvimento de atrito lateral entre as partículas de rocha e a parede interna da câmara de compressão. Fumagalli (1969) realizou estudos sobre o distúrbio causado pelo atrito entre a superfície lateral da amostra e a parede da câmara com altura de duas vezes o diâmetro. Foi possível notar-se que o atrito na superfície lateral reduz a pressão vertical, medida na metade da seção da câmara, para 60 % da pressão dos extremos.

Sendo assim, observa-se que parte da resistência vertical medida durante um ensaio de compressão no material granular é gerada pelo atrito entre o corpo de prova e a parede da câmara utilizada, o que pode mascarar a deformação real apresentada por aquele material.

Torna-se importante, neste sentido, a realização da avaliação do efeito do tipo de câmara de compressão no estudo da deformabilidade de materiais. Além da escolha do tipo de câmara adequada a fim de diminuir a interferência do atrito na realização do ensaio, torna-se necessário quantificá-lo para que a tensão aplicada na amostra seja corrigida, de modo que a curva tensão deformação obtida represente a real deformação apresentada pela amostra devido à tensão atuante.

A Tabela 3.2 apresenta diferentes configurações de câmaras de compressão que podem ser empregadas em ensaios de compressão unidimensional. Apresenta também as principais características de cada tipo de câmara, no sentido de mostrar possíveis interferências relacionadas ao atrito lateral.

Tabela 3.3 reúne resultados de ensaios de compressão unidimensional realizados por outros autores e pela presente pesquisa.

Tabela 3.2: Modelos de câmara de compressão unidimensional (adaptado Carvalho 2009)

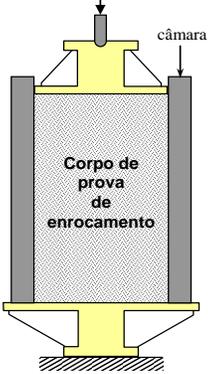
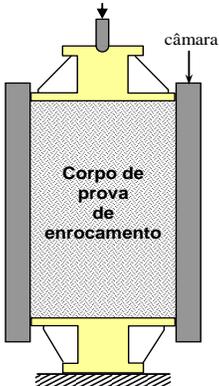
Tipos de Câmaras Compressão	Esquema	Características
<p>Câmara de fundo fixo (base apoiada)</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Maior geração de atrito entre as partículas do corpo de prova e as paredes internas da câmara. -O deslocamento relativo entre as partículas e a câmara ocorre de forma não uniforme ao longo do corpo de prova, gerando desenvolvimento de tensões de atrito também não uniforme. - A tensão de atrito deve ser máxima no topo e próxima de zero na base dos corpos de provas.
<p>Câmara de fundo móvel (base suspensa)</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Geração de atrito entre as paredes da câmara e o corpo de prova menor do que a câmara de fundo fixo. - Para baixos níveis de tensões axiais, a câmara pode deslizar. - Distribuição de tensões de atrito deve reduzir do topo e da base para o centro do corpo de provas.
<p>Câmara Flexível</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Constituída por anéis justapostos e intercalados. - Geração de atrito entre as paredes da câmara e o corpo de prova desenvolvido de forma linear. - Ocorrem pequenas deformações radiais dos anéis (da ordem de 10^{-6}) que podem ser desprezadas.

Tabela 3.3: Resultados de alguns ensaios de compressão unidimensional realizados na literatura.

Autor	Material/Aplicação		Tipo de Câmara ^(I)	Condição Inicial da Amostra	Colapso	Colapso ^(II) (%)	Tensão axial de Inundação (kPa)
Veiga Pinto (1983)	Grauvaque (Barragem de Beliche)	Material São	Flexível	Seco	-	-	-
				Submerso	-	-	-
	Material Alterado	Submerso		-	-	-	
		Seco		-	-	-	
Maia (2001)	Basalto (Barragem Marimbondo)		Flexível	Seco	-	-	-
			Rígida	Seco	Inundação	43	2000
	Basalto (Pedreira Rio Grande)		Flexível	Seco	-	-	-
			Flexível	Submerso	-	-	-
			Rígida	Seco	Inundação	28	2000
	Granito (Barragem Serra da Mesa)		Rígida	Seco	Inundação	22	2000
			Flexível	Submerso	-	-	-
Rígida			Seco	Inundação	13	2000	
Dias (2001)	Granito (Barragem Itapebi)	Flexível	Rígida	Seco	Inundação	13	2000
			Seco	-	-	-	
			Seco	-	-	-	
	Randon (Barragem de Manso)		Seco	-	-	-	
			Seco	-	-	-	
			Seco	-	-	-	
			Seco	-	-	-	
Pacheco (2005)	70% Riadocito e 30% Brecha (Barragem Machadinho)	Rígida	Seco	-	-	-	
			Seco	-	-	-	
Carvalho (2009)	Arenito (Barragem de Manso)	Rígida ^(IV)	Seco	-	-	-	
			Submerso	-	-	-	
			Seco	Inundação	53	30,7	
			Seco	Inundação	49	122,8	
			Seco	Degradação	57	30,7	
Pessin (2013)	Basalto (Barragem Chapecó)	Flexível ^(IV)	Seco	Degradação	55	122,8	
			Seco	-	-	-	
			Submerso	-	-	-	
			Seco	Inundação	20	200	
Presente Pesquisa	Arenito (Barragem de Manso)	Flexível	Seco	Inundação	39	350	
			Seco	-	-	-	
			Submerso	-	-	-	
			Seco	Inundação	37,7	107,37	
			Seco	Inundação	37,6	299,55	
			Seco	Inundação	34,0	454,50	
			Seco	Degradação	55,7	113,22	
Seco	Degradação	52,2	300,00				
Seco	Degradação	43,6	599,00				

(I) As dimensões das respectivas câmaras encontram-se descritas na Tabela 3.1 do Capítulo 3.

(II) Corresponde ao incremento porcentual em relação à deformação axial na inundação do CP.

(III) Adotou-se a h do corpo de prova 10 cm.

(IV) Ensaios realizados na mesma câmara utilizada na presente pesquisa.

Tabela 3.3: Resultados de alguns ensaios de compressão unidimensional realizados na literatura.

Autor	Material/Aplicação		Tensão axial Máxima (kPa)	Deformação axial máxima (%)	D_{máx.} (mm)	B_g (%)	Peso específico (kN/m³)	DR_{inicial} (%)
Veiga Pinto (1983)	Grauvaque (Barragem de Beliche)	Material São	2000	1,8	-	12	-	100
			2000	9,7	-	9	-	60
			2000	5,5	-	10	-	80
	Material Alterado	2000	3,5	-	19	-	-	
		2000	5,7	-	48	-	-	
Maia (2001)	Basalto (Barragem Marimbondo)		1900	3,6	152,4	37,31	-	denso
			5250	7	38,1 ^(V)	-	-	denso
	Basalto (Pedreira Rio Grande)		1900	3,1	152,4	38,86	-	denso
			5250	3,5	38,1 ^(VI)	-	-	denso
			5250	4,5	38,1 ^(V)	-	-	denso
	Granito (Barragem Serra da Mesa)	5250	3	38,1 ^(VI)	-	-	denso	
		3900	1,9	38,1 ^(VI)	-	-	denso	
		5250	10,5	38,1 ^(V)	-	-	denso	
	Dias (2001)	Granito (Barragem Itapebi)		780	2	76	7	18
900				2,3	76	6	19	-
100				1,9	76	6,5	20	-
1600				1,6	76	10	21	-
Randon (Barragem de Manso)		780	3,2	152,4	2	19,5	-	
		1500	3,5	152,4	4,5	20	-	
		1800	3,1	152,4	6	21	-	
		1700	3	152,4	-	21,5	-	
Pacheco (2005)	70% Riadocito e 30% Brecha (B.Machadinho)		2305	2,9	100	5,6	18,9	-
			2326	2	100	4,9	18,7	campo
Carvalho (2009)	Arenito (Barragem de Manso)		250	5	7,96	-	-	campo
			250	9	7,96	-	-	95
			250	6,2	7,96	-	-	95
			250	7	7,96	-	-	95
			250	5,7	7,96	-	-	95
			250	6,5	7,96	-	-	95
Pessin (2013)	Basalto (Barragem Chapecó)		602,5	3,22	7,96	-	-	95
			605,22	2,94	7,96	-	-	95
			602,5	3	7,96	-	-	95
			525	7	7,96	-	-	95
Presente Pesquisa	Arenito (Barragem de Manso)		650	9,09	7,96	5,3	16,3	95
			602	12,3	7,96	7,9	16,3	95
			143	2,74	7,96	3,1	16,3	95
			372	7,85	7,96	2,7	16,3	95
			520	11,25	7,96	2,5	16,3	95
			137	2,57	7,96	5,8	16,3	95
			313	5,83	7,96	7,1	16,3	95
			585	11,73	7,96	13,3	16,3	95

(I) As dimensões das respectivas câmaras encontram-se descritas na Tabela 3.3 do capítulo 3.

(II) Corresponde ao incremento porcentual em relação à deformação axial na inundação do CP.

(III) Adotou-se a h do corpo de prova 10 cm.

(IV) Ensaios realizados na mesma câmara utilizada na presente pesquisa.

(V) d50=26 mm (VI) d50=22 mm

3.4. Alterabilidade de rochas

A construção civil emprega diferentes materiais de construção, alguns desses materiais ficam expostos ao meio, e assim, sujeitos à alteração de suas características pela exposição aos agentes exógenos, comprometendo a eficiência da obra. Neste sentido, o conhecimento das propriedades dos materiais e do comportamento destes quando sofrem alteração são de grande importância para o acompanhamento adequado de uma obra.

As rochas são materiais geotécnicos comumente utilizados nas obras na construção civil, desde a fundação até no acabamento. Como qualquer outro material geotécnico as rochas apresentam modificações de suas características iniciais devido a processos de alteração no decorrer do tempo.

O material rochoso pode sofrer degradação provocada por agentes físicos, químicos e biológicos que causam a desintegração, a desagregação, a decomposição e a oxidação das rochas e dos minerais, provocando mudanças, principalmente do ponto de vista geomecânico (Maia *et al.*, 2003).

Na literatura técnica existem vários termos que designam as modificações sofridas pelas rochas devido a ação dos agentes do ambiente exógeno. O termo mais difundido é o intemperismo, que representa o conjunto de processos que originam a desintegração e a decomposição das rochas e minerais. Neste sentido, desintegração consiste na perda de coesão da rocha e na progressiva individualização dos minerais constituintes, sem que ocorra, necessariamente, a modificação da natureza dos minerais. A decomposição corresponde à modificação progressiva da natureza dos minerais, sem, necessariamente, ocorrer desintegração. Além do intemperismo, a desagregação é, também, importante fator quanto às modificações das rochas. Entende-se por desagregação, o mecanismo pelo qual ocorre a redução da resistência mecânica e o aumento da produção de finos. Este mecanismo envolve processos físicos e/ou químicos Maia (2001).

Degradação é um termo utilizado para definir modificações específicas das rochas devido aos agentes do ambiente exógeno. O termo alteração é igualmente usado para designar as modificações físicas e químicas das rochas.

A alterabilidade de uma rocha depende principalmente da estabilidade química de seus minerais constituintes. E, a alterabilidade do material define o grau de susceptibilidade de uma rocha à alteração; ou seja; a vulnerabilidade da rocha em apresentar modificações em suas características intrínsecas afetando assim sua durabilidade. Diante disso, observa-se que a avaliação da susceptibilidade da rocha à alteração é de suma importância para compreender o comportamento mecânico do enrocamento.

3.4.1. Mecanismos de degradação

Os mecanismos de degradação ou alteração de rochas mais significantes estão associados à ação do intemperismo físico e químico.

Salles (2013) resumiu os mecanismos de degradação de natureza física e química em rochas. A Tabela 3.4 sintetiza os mecanismos.

Tabela 3.4: Mecanismos de degradação de natureza física e química em rochas.

Intemperismo Físico	
Abrasão	É um mecanismo de natureza física que pode ser definido como o desgaste por atrito ou impacto entre partículas, ou, ainda, o desgaste decorrente da movimentação do solo ou da rocha;
Desagregação por Crescimento de Cristais:	Este processo ocorre principalmente por dois fatores: o congelamento da água e a cristalização de sais com alterações químicas com expansão. O congelamento da água é típico de regiões glaciais onde a água, ao penetrar por uma determinada fratura, congelará provocando um aumento de volume e de abertura da fratura. A cristalização de sais é típica de regiões áridas onde os sais não são removidos pela água da chuva, sendo então transportados para a superfície, concentrando-se nas fendas das rochas. Ao cristalizarem, ocorre um aumento de volume, que resulta em forças expansivas, as quais acarretam a desagregação das rochas;
Diaclasamento	Este processo pode ser devido ao alívio de tensão ou a variação de temperatura. O primeiro ocorre quando há a descompressão do maciço rochoso devido a escavações subterrâneas, cortes de grandes taludes, erosão de extratos superficiais, etc., provocando o fraturamento do material. O segundo processo é atribuído a variações diárias ou sazonais de temperatura. Quando o material rochoso é submetido a variações de temperatura, apresentam diferentes coeficientes de dilatação, causando a expansão e a contração dos materiais através da concentração de tensões, que podem gerar e propagar microfissuras e desagregar o material;

Tabela 3.4: Mecanismos de degradação de natureza física e química em rochas.

Intemperismo Físico	
Secagem e Umedecimento	Característico de regiões de clima tropical úmido, onde a elevada umidade associada a altas temperaturas e insolação direta, acelera a alteração das rochas, influenciando no enfraquecimento do material e reduzindo sua resistência. Neste processo, ocorre a expansão e a desagregação da rocha que se inicia através de microfaturas, levando à redução do material em fragmentos. A velocidade de propagação das microfissuras aumenta, acelerando o processo de desagregação quando o maciço rochoso sofre ciclos intensos de secagem e umedecimento. Isto ocorre devido à umidade maior penetrar gradativamente na rocha;
Ação antrópica	O homem é um grande agente de alteração, devido principalmente à evolução das técnicas de corte e desmonte de maciços rochosos para obras de engenharia civil. As novas fraturas decorrentes do desmonte favorecem a ação do intemperismo.
Intemperismo Químico	
Hidrólise	Consiste na ruptura das cadeias moleculares pela ação das moléculas de água, causando a expansão nos materiais e, conseqüentemente, a lixiviação dos elementos constituintes e formação de novos minerais. Um exemplo de produto da hidrólise dos aluminossilicatos são os argilominerais;
Hidratação	Representa a adição de água à composição de determinados minerais. Por exemplo, a hidratação da anidrita (CaSO_4) forma gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$);
Dissolução	Este fenômeno ocorre em diferentes intensidades, a depender do conteúdo de gás carbônico, acidez das soluções e da natureza dos minerais submetidos à alteração (Frasca & Sartori, 1998). Dentre aqueles minerais com maior facilidade de sofrerem dissolução estão os cloretos, sulfatos e carbonatos. Rochas ricas em calcita possuem alta solubilidade, a qual pode resultar em problemas de engenharia, tais como, subsidência de terreno, colapso de estruturas e comprometimento de aberturas subterrâneas. O carbonato de cálcio oriundo dos calcários é lentamente dissolvido pela água da chuva contendo dióxido de carbono, formando bicarbonato de cálcio;
Oxidação	É causada pela formação de óxidos e hidróxidos devido à presença de oxigênio no ambiente. Em geral estes minerais são de fácil lixiviação.

3.4.2. Efeitos da degradação

Existem vários aspectos relacionados aos efeitos da alteração nos materiais rochosos empregados na construção civil. Destaca-se que os principais efeitos são: a redução da resistência mecânica, modificação dos parâmetros de deformabilidade, variação na permeabilidade e redução da aderência.

Redução da resistência mecânica

A perda de resistência mecânica de materiais rochosos, na maioria dos casos, provoca a redução do fator de segurança da obra, pois, em geral, a resistência mecânica de rochas mais alteradas é menor que a de rochas menos alteradas. Além dos casos clássicos, em que a rocha perde resistência à compressão ou à tração, pode ocorrer a desagregação da rocha, provocada pela degradação das fissuras.

Modificação dos parâmetros de deformabilidade

Segundo Shoa e Mase (1966), a deformabilidade de uma rocha se dá, de um lado, pela deformabilidade dos grãos cristalinos da estrutura da rocha e, de outro, pela deformabilidade do sistema constituído pelas ligações entre os grãos. A natureza dos grãos minerais e as ligações entre eles são modificadas com a alteração da rocha. A deformabilidade da rocha pode, portanto, ser significativamente afetada pela alteração.

Variação na permeabilidade

Em razão das variações na permeabilidade, ocorrem modificações no regime de fluxo e nos níveis de pressões nas descontinuidades do material rochoso. A alteração pode causar tanto o aumento, quanto a redução da permeabilidade do material rochoso. Podem citar-se, como exemplo, as fundações de uma barragem, onde a alteração da rocha pode provocar o aumento da permeabilidade do maciço rochoso e a consequente perda de água pelas fundações. Em taludes, a produção de finos, provocada pela alteração da rocha, pode reduzir a permeabilidade do maciço rochoso e causar, eventualmente, uma sobrecarga pelo acúmulo de água.

Redução da aderência

A degradação pode provocar a redução da capacidade de aderência das partículas (adesividade) tanto a ligantes hidráulicos, quanto a betuminosos. Durante o processo de britagem, na superfície de fratura dos fragmentos, ocorre a quebra de

algumas das ligações interatômicas dos elementos constituintes da rocha, reduzindo, assim, sua aderência.

Os enrocamentos, como são constituídos por materiais rochosos, estão sujeitos a severas condições de degradação, especialmente quando aplicados em grandes barragens. Nesse caso, o enrocamento encontra-se exposto ao meio e sofre alteração devido a variações de umidade, temperatura e precipitação.

Segundo Maia (2003 *et al.*), as transformações sofridas pela rocha constituinte durante os processos de alteração interferem nas características das partículas do material de enrocamento e, deste modo, modificam o comportamento mecânico do enrocamento. O processo de alteração baseado na desagregação e decomposição provoca a redução da resistência mecânica da rocha constituinte. Destaca-se que essa redução da resistência acontece proporcionalmente ao estado de alteração da rocha. A redução da resistência mecânica da rocha e da aderência torna a partícula do enrocamento mais susceptível à quebra. A maior quebra das partículas, que por sua vez aumenta o índice de quebra, ocasiona redução das dimensões das partículas. Estes fatores ocasionam o colapso do enrocamento; gerando deformações significativas no material.

Nota-se com isso que, as modificações nas características das partículas, decorrentes da degradação sofrida nos materiais de enrocamento, ocasionam processos inter-relacionados que por fim modificam o comportamento mecânico do enrocamento.

3.4.3. Metodologia de avaliação da alterabilidade de enrocamentos

A característica dos materiais que influencia a degradação é de grande importância quando se realiza a avaliação da alterabilidade do material. A realização dessa avaliação permite identificar os processos de degradação da rocha constituinte que interferem no comportamento de enrocamento.

Para a decisão da metodologia adequada de avaliação da alterabilidade de enrocamentos torna-se necessário o conhecimento dos principais procedimentos de ensaio para avaliação da degradação destes materiais. Salles (2006) apresenta um

resumo esquemático dos principais ensaios para avaliação da degradação. A Figura 3.1 ilustra este resumo:



Figura 3.1: Classificação dos ensaios para avaliação da degradação (Salles 2006).

A literatura apresenta diversas metodologias para avaliação da durabilidade (Minette, 1982; Frazão, 1993; Maia, 2001; Pinheiro & Maia, 2004; Salles & Maia, 2004; Cunha Pinto, 2006). Contudo, uma metodologia generalizada foi apresentada por Maia et al. (2003). A Figura 3.2 sugere uma metodologia simplificada para a avaliação da alterabilidade de materiais de enrocamento (Maia et al., 2003).

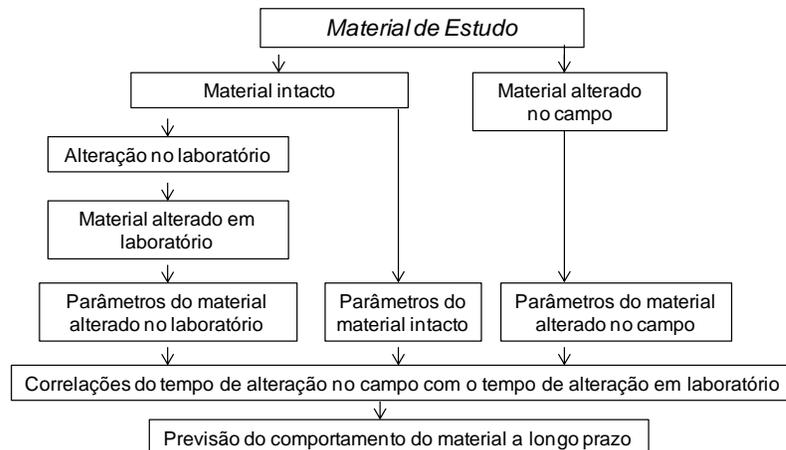


Figura 3.2: Metodologia para avaliação da alterabilidade do material geotécnico (Maia et al., 2003)

Para a realização de uma metodologia objetivando a avaliação dos processos de degradação, é necessária a realização de quatro fases segundo Maia (*et al.*, 2003):

- i) obtenção do material de estudo (amostragem);
- ii) produção de amostras com degradação induzida de forma acelerada no laboratório;
- iii) obtenção dos parâmetros que caracterizam o comportamento destes materiais;
- iv) análise dos resultados para previsão do comportamento do material a longo prazo.

A metodologia apresentada por Maia (*et al.*, 2003) sugere análise da alterabilidade do material de enrocamento pela comparação dos resultados de ensaios de amostras intactas, com amostras submetidas à degradação acelerada em laboratório paralelamente com as amostras degradadas no campo e posterior obtenção dos parâmetros.

A avaliação da durabilidade de enrocamentos envolve amostras do material intacto, usado na fase de construção, e deste mesmo material, alterado naturalmente no campo. Portanto, consideram-se duas classes de estudos da durabilidade de enrocamentos: uma relativa a obras recentes ou em andamento e outra relativa a obras antigas. No primeiro caso, existe a disponibilidade do material intacto, mas não do material alterado naturalmente.

Nesta condição, pode-se produzir amostras com alteração natural, através da exposição do material aos agentes atmosféricos. Todavia, o tempo necessário para produção de amostras representativas pode inviabilizar a análise. No segundo caso, existe a disponibilidade do material alterado naturalmente. Entretanto, não se dispõe do material intacto usado na fase de construção. Assim, deve-se procurar um material intacto semelhante ao utilizado na fase de construção da obra.

3.4.4. Ensaio de degradação acelerada no laboratório

Os ensaios de degradação de um material simulam a degradação natural que ocorre com o material e são comumente utilizados para análise do comportamento do material a longo prazo.

Os principais ensaios de degradação acelerada em laboratório são a exposição à condensação e radiação ultravioleta, a exposição à névoa salina, a exposição à estufa, a exposição à lixiviação contínua e a ciclagem por umedecimento e secagem.

Em enrocamentos, os ensaios mais representativos das condições de alteração natural são os ensaios de ciclos de umidade e de lixiviação contínua, segundo Maia (2001).

3.4.5. Ensaio de ciclo de umidade (ciclagem)

Ensaio de ciclos de umidade representam a condição de alteração do material provocada pelas variações sazonais de umidade e temperatura da rocha no campo. Estes ensaios tentam reproduzir no laboratório as alterações que ocorrem no campo.

Os ensaios de ciclagem por umedecimento e secagem são função da solução utilizada para imersão dos materiais, abaixo os ensaios de ciclagem mais utilizados:

- i) Umedecimento em água e secagem em estufa;
- ii) Umedecimento em etilenoglicol e secagem em estufa;
- iii) Umedecimento em sulfato de sódio ou magnésio e secagem em estufa.

O ensaio de degradação através de ciclos de umidade mais comum é o de umedecimento da amostra em água natural ou destilada seguido de secagem ao ar ou em estufa. No ensaio de ciclos de umidade, o tempo necessário para o umedecimento e para a secagem do material depende do tipo de rocha e pode ser definido através das curvas de variação de umidade com o tempo, obtidas a partir de ensaios de absorção e de secagem (Frazão, 1993). As curvas possibilitam a definição dos tempos mínimos de

umedecimento e de secagem que melhor representem os estados saturado e seco do material.

Salles (2013) apresentou alguns autores que realizaram estudos de degradação de rochas através da ciclagem por umedecimento e secagem. Estes estudos encontram-se resumidos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Estudos de alteração rochas através de ensaio de umedecimento e secagem (Salles 2013).

Referência	Material	Tipo de ensaio	Observação
Farjallat <i>et al.</i> (1972)	Basaltos	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	Procedimento razoável para prever a durabilidade de rochas.
Frazão & Caruso (1983)	Basaltos	Umedecimento em Água Destilada, em Etilenoglicol e em Sulfato de Sódio e Secagem	A imersão em sulfato de sódio representa o ensaio mais severo.
Lopes (2000)	Xistos	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	A avaliação qualitativa mostrou o surgimento e a propagação de fraturas.
Maia (2001)	Basalto	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	Os materiais foram influenciados pelo procedimento de ensaio.
Santiago <i>et al.</i> (2004)	Filito	Umedecimento em Água Destilada e em Etilenoglicol e Secagem	Grande perda de massa ao final dos ensaios e redução da resistência.
Koppe <i>et al.</i> (2005)	Granitos	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	Oxidação dos materiais e aumento de fissuras.
Matos e Rocha (2005)	Mármore	Umedecimento em Sulfato de Sódio e Secagem	O material apresentou baixos índices de degradação.
Lopes <i>et al.</i> (2007)	Filito	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	Aumento da porosidade, redução do peso específico e da resistência.

Quando submetidas a ciclos de umedecimento e secagem, as amostras apresentam deformações, denominadas colapso, a cada novo ciclo. O umedecimento e secagem geram a contração e expansão do material respectivamente, o mesmo ocorre com material no campo quando submetido à ação dos agentes do meio exógeno.

3.5. Considerações finais

Conforme o exposto, a realização de ensaios laboratoriais em enrocamentos apresenta um grande empecilho, que é a dimensão das partículas mesmo em escala reduzida. Isto justifica a necessidade da utilização de equipamento de grandes dimensões que apresentam, por sua vez, limitações laboratoriais como custo elevado.

O tipo de ensaio exerce grande influência na caracterização mecânica dos enrocamentos, sendo o de compressão confinada muito empregado. Este ensaio apresenta dificuldades laboratoriais quanto ao tipo de câmara utilizada em razão da interferência do atrito no desenvolvimento da curva tensão vs. deformação.

E ainda, se discutiu a respeito da alterabilidade de enrocamentos. Foi elucidado que as modificações sofridas pelas rochas devido aos agentes de alteração são comumente denominadas pelos termos intemperismo ou degradação.

O ensaio de ciclos de umidade representa a condição de alteração no campo.

CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO, MATERIAL DE ESTUDO E MODELO CONSTITUTIVO

Este capítulo descreve o equipamento laboratorial utilizado na pesquisa para avaliação do colapso em materiais de enrocamento. Para isto, são fornecidos detalhes do equipamento de compressão confinada de grandes dimensões, do equipamento automatizado de saturação e secagem e da câmara de compressão unidimensional flexível utilizada. Por fim, é feita a apresentação do material de estudo utilizado.

4.1 Equipamento de compressão confinada de grandes dimensões

O equipamento utilizado para realização dos ensaios de compressão confinada nesta pesquisa foi um edômetro de grandes dimensões, o que possibilita o estudo das deformações dos materiais que compõem os maciços de enrocamento. A Figura 4.1 ilustra, em perspectiva, o equipamento.

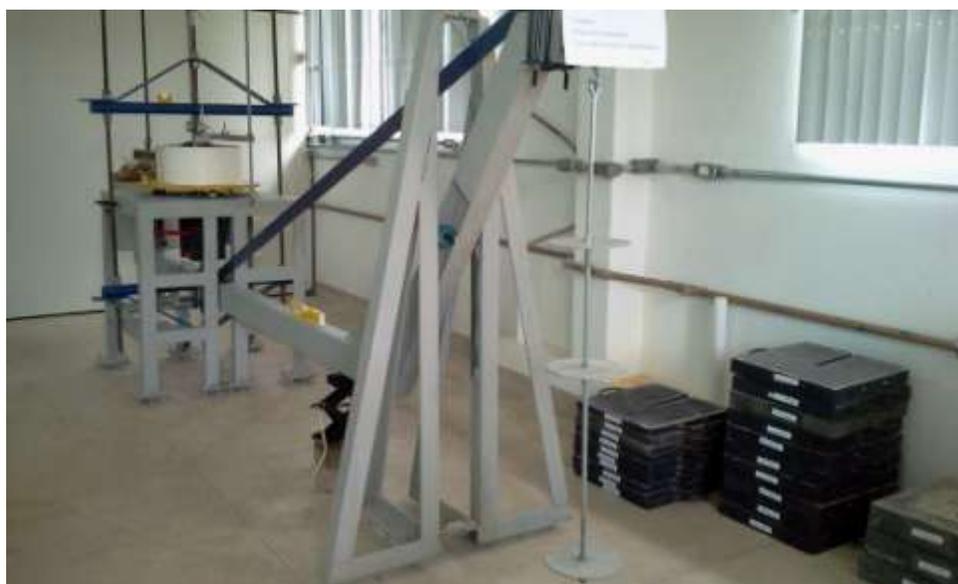


Figura 4.1: Vista em perspectiva do equipamento

O equipamento é capaz de realizar ensaios de compressão confinada, sob estado de tensão controlada em corpos de prova de grandes dimensões e permite

ensaiar amostra de até 30 cm de diâmetro. O equipamento é constituído basicamente por um sistema de aplicação de carga, um sistema de transferência de carga, uma mesa de transmissão de carga e uma câmara de compressão unidimensional. A Figura 4.2 apresenta um corte longitudinal do equipamento indicando suas principais dimensões.

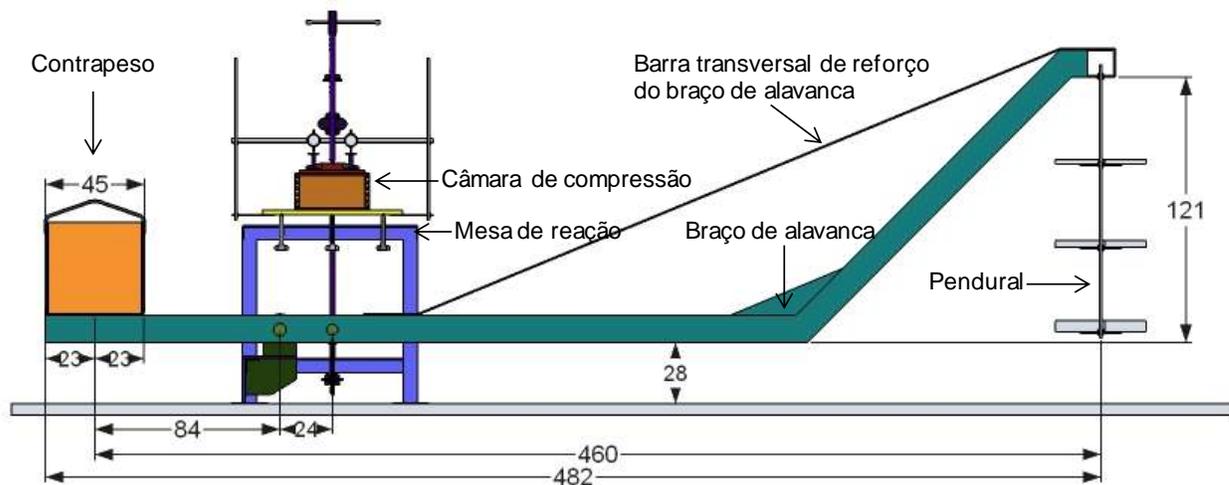


Figura 4.2: Corte longitudinal do equipamento

Este sistema de aplicação de carga é similar ao de um equipamento de adensamento tradicional em que a carga de confinamento é aplicada utilizando um pendural e um contrapeso. No ensaio as amostras são submetidas à carga axial constante por longo período de tempo. O sistema de medição dos deslocamentos verticais do corpo de prova é realizado através de dois extensômetros analógicos, dispostos simetricamente no topo do corpo de prova (Figura 4.3). O sistema de aplicação de carga é constituído de um braço de alavanca com aproximadamente 3 m de comprimento, um pendural, uma mesa de transmissão de carga e um contrapeso de aproximadamente 240 kg. Os pesos utilizados nos ensaios e que foram colocados no pendural se dividem em escalões de carga de aproximadamente 10, 20 e 35 kg (Figura 4.4).

Este equipamento foi desenvolvido por Carvalho (2009) e adaptado nesta pesquisa para suportar maiores níveis de tensão, de forma que durante a realização dos ensaios seja possível aplicar maiores tensões axiais ao corpo de prova sem o risco

de ocorrer danos no equipamento. Para isso foram inseridos uma barra transversal ao braço de alavanca e reforços nas vigas superior e inferior.



Figura 4.3: Extensômetros analógicos

Figura 4.4: Pesos utilizados nos ensaios

A Figura 4.5 apresenta um corte transversal do equipamento de compressão confinada.

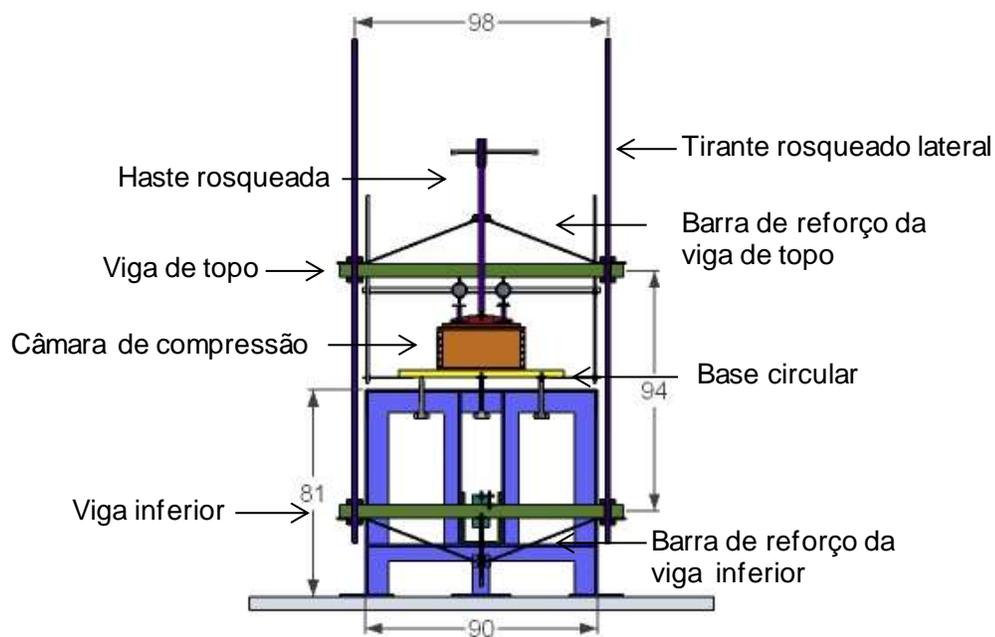


Figura 4.5: Corte transversal do equipamento de compressão confinada

O sistema de transferência de carga é responsável pela transferência da carga aplicada no pendural para o centro do corpo de prova. Esse sistema é constituído por um eixo ou ponto de apoio que gira livre no braço de alavanca, dois tirantes rosqueados laterais, uma haste rosqueada e vigas de topo e inferior que são rotuladas no pendural.

As vigas foram reforçadas com barras que possibilitam maior rigidez ao sistema, reduzindo as deformações do equipamento para maiores níveis de carregamento.

Na viga de topo do sistema de transmissão de carga é colocado haste rosqueada em aço inoxidável, com nível regulável, que aplica carga diretamente no centro do topo do corpo de prova. A distribuição da carga axial no centro da câmara de compressão é realizada por uma placa de topo. A câmara de compressão é colocada sobre uma base circular com nível regulável sob uma mesa de transmissão de carga composta por uma base rígida e fixa ao piso.

Para o ajuste do nível da base circular utilizam-se três parafusos rosqueados servindo de apoio. A fim de auxiliar no processo de nivelamento adaptou-se um macaco hidráulico de 65,8 kN (20 t) à parte inferior da mesa de transmissão de carga (Figura 4.6 e 4.7).



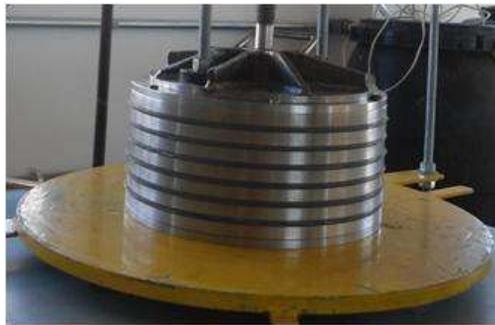
Figura 4.6: Mesa de transmissão de carga



Figura 4.7: Macaco hidráulico e parafusos rosqueados

A realização de ensaios do material na condição seca, saturada e com saturação e secagem necessitou de diferentes configurações do equipamento. Para o ensaio do material na condição seca sobre a base circular, foi colocada apenas a câmara de compressão unidimensional (Figura 4.8a). Para o ensaio na condição saturada, a fim de garantir a saturação por inundação da amostra, utilizou-se uma parede cilíndrica de PVC, ao redor da câmara de compressão, anexada à base circular com silicone

(Figura 4.8b). Já para a realização dos ensaios de saturação e secagem foi necessário utilizar a câmara de degradação, que foi colocada sobre a base circular (Figura 4.8c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8: Configuração para o ensaio na condição do material seca (a), saturada (b) e para o ensaio de saturação e secagem.

4.2. Equipamento de saturação e secagem

O equipamento de saturação e secagem da UENF consiste em um sistema automatizado de degradação acelerada em laboratório, por meio de ciclos de saturação e secagem em corpos de prova. O projeto permite o acoplamento ao equipamento de compressão para que os ensaios de alteração e compressão possam ser realizados simultaneamente (Figura 4.9).

A realização dos ensaios de compressão confinada e saturação e secagem simultaneamente permite avaliar as deformações das amostras de enrocamento confinado, quando submetidas à tensão axial durante a ação dos agentes de degradação mobilizados pela variação da umidade e temperatura do material.



Figura 4.9: Equipamento de saturação e secagem automático acoplado ao equipamento de compressão confinada de grandes dimensões.

A Figura 4.10 apresenta um corte longitudinal do equipamento onde estão indicadas suas principais dimensões.

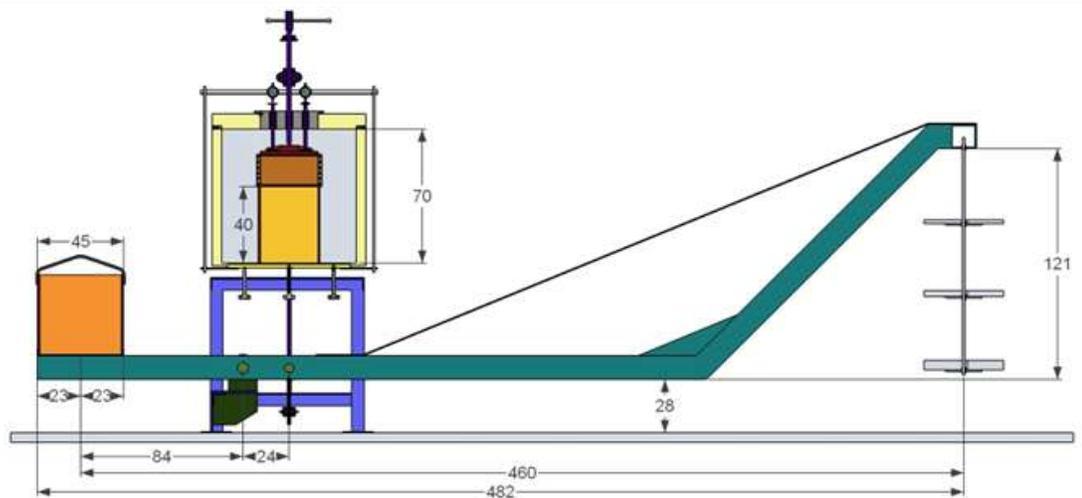


Figura 4.10: Corte longitudinal do equipamento acoplado

Para que os dois tirantes laterais rosqueados fossem capazes de suportar a carga máxima quando o equipamento de compressão confinada estivesse acoplado ao de saturação e secagem, foi necessário realizar-se o reforço destes tirantes. Tendo em vista as características do equipamento, especialmente no que se refere às dimensões e níveis de carga, em ensaio piloto foi observado que o pórtico sofre desaprumos acentuados, comprometendo os resultados e pondo em risco o equipamento. Foi introduzido, assim, um sistema guia que permite a recentralização das cargas e evita acidentes durante o ensaio. O sistema é composto por correntes que são tracionadas ou aliviadas sem gerar acréscimos de carregamento no corpo de prova.

A câmara de degradação é constituída por um recipiente com isolamento térmico e possui diâmetro interno igual a 70 cm, espessura igual a 4 cm e altura igual a 70 cm. Essa câmara é colocada sobre a mesa de reação do equipamento de compressão unidimensional, e dentro dela é inserida a câmara de compressão que deve ser centralizada para assim iniciar a moldagem do corpo de prova (Figura 4.11 e 4.12).



Figura 4.11: Câmara de compressão dentro da câmara de degradação com corpo de prova já moldado.



Figura 4.12: Câmara de compressão inserida no interior da câmara de degradação inundada.

O equipamento de saturação e secagem é constituído por uma câmara de degradação com isolamento térmico, uma caixa d'água própria, um sistema de ventilação, um sistema de esvaziamento e um sistema automático que controla os ciclos de saturação e secagem.

A Figura 4.13 apresenta um corte transversal do equipamento de compressão confinada.

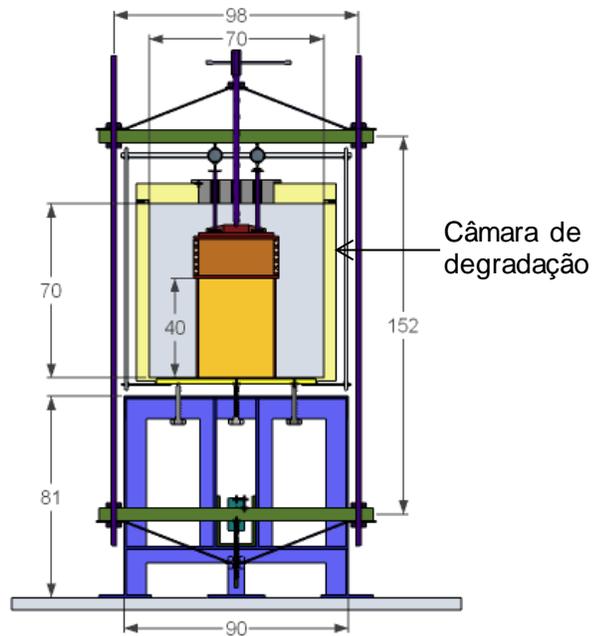


Figura 4.13: Corte transversal do equipamento de compressão confinada com a câmara de degradação.

Os processos de saturação, secagem e resfriamento da câmara de degradação são controlados por sistema digital programável. O sistema é automatizado e executa sequencialmente o enchimento da câmara de degradação com água, o esvaziamento completo, o aquecimento e a ventilação. Permite, ainda, estabelecer os tempos de cada processo e a temperatura de aquecimento. A Figura 4.14 mostra o painel de controle do equipamento de saturação e secagem.

Durante o procedimento de saturação, a câmara de degradação é totalmente preenchida com água para garantir total saturação por submersão do corpo de prova. Os processos de enchimento para saturação e esvaziamento da câmara de degradação para iniciar a secagem são realizados através de um sistema composto de duas bombas d'água (Figura 4.15).



Legenda

- 1 - Controlador de Tempo Geral
- 2 - Controlador Geral
- 3 - Acionamentos do Equipamento (ON/OFF)
- 4 - Controlador de Tempo para Saturação
- 5 - Controlador de Tempo para Secagem
- 6 - Controlador de Tempo para Ventilação
- 7 - Acionamento da Programação do Equipamento
- 8 - Termopar para Controle da Temp. de Secagem
- 9 - Termopar para Controle da Temp. de Resfriamento
- 10 - Chave-Teste para Saturação da Câmara
- 11 - Chave-Teste para Esvaziamento da Câmara
- 12 - Chave-Teste para Secagem da Câmara
- 13 - Chave-Teste para Ventilação da Câmara

Figura 4.14: Painel de Controle da Câmara de Degradação

A fim de garantir volume de água em quantidade suficiente para o enchimento da câmara de degradação, foi necessário instalar uma caixa d'água de polietileno. O reservatório é preenchido com água a 21°C e serve de alimentação para os ensaios de saturação e secagem, exclusivamente.



Figura 4.15: Bombas d'água do sistema de enchimento e esvaziamento.

O esvaziamento da câmara de degradação é realizado através de um sistema de esvaziamento composto por um reservatório inferior cujo topo é posicionado abaixo do fundo da câmara de degradação (Figura 4.16). Para que o aquecimento da câmara durante o processo de secagem seja mais rápido e com menos geração de vapor d'água, o sistema de esvaziamento evita que ocorra acúmulo de água no fundo da

câmara, permitindo que este volume de água escoe livremente para dentro do reservatório inferior, mesmo após o processo de bombeamento de água.

O processo de aquecimento da câmara de degradação é realizado por resistências, instaladas nas paredes internas da câmara de degradação, que permitem atingir temperaturas da ordem de 110°C. Após a etapa de aquecimento e antes de reiniciar uma nova etapa de saturação, a câmara é resfriada por ventilação forçada com auxílio de um ventilador centrífugo (Figura 4.17). A ventilação ocorre até se atingir a temperatura preestabelecidos no painel de controle. A exaustão do ar quente na câmara é realizada através de uma abertura próxima a haste rosqueada.



Figura 4.16: Reservatório inferior do sistema de esvaziamento



Figura 4.17: Ventilador centrífugo utilizado para resfriamento da câmara por ventilação forçada

4.3. Câmara de compressão unidimensional utilizada

Os ensaios foram executados em equipamento de compressão confinada de grandes dimensões. Foi utilizada câmara de compressão, constituída de corpo de prova cilíndrico com 30 cm de diâmetro e 14 cm de altura. Esta composta por duas bases e anéis de aço inoxidável que permitem pouca deformabilidade radial, justapostos e intercalados a anéis de silicone que possibilitam alta deformabilidade axial da câmara (Figura 4.18 e 4.19).



(a) disposição geral

(b) detalhes dos anéis

Figura 4.18: Visão geral da base inferior, base superior, anéis de aço inoxidável e anéis de silicone (a) e detalhe para melhor visualização dos anéis (b).



Figura 4.19: Câmara de compressão montada composta de anéis de aço inoxidável justapostos e intercalados a anéis de silicone.

Sabe-se que neste tipo de câmara podem ocorrer deformações circunferenciais, apesar disso vamos nomear de câmara de compressão unidimensional.

Este tipo de câmara de compressão é similar à apresentada por Veiga Pinto (1982), no entanto, a câmara permitia a realização de ensaios com amostras contendo 50 cm de diâmetro e era constituída por anéis borracha no lugar de silicone (Figura 4.20).

A câmara escolhida visa reduzir o efeito do atrito lateral entre as partículas de enrocamento e a parede da câmara. Isso ocorre porque as paredes da câmara são comprimidas junto com o corpo de prova.

Nos maiores estágios de carga, observam-se deformações não uniformes dos anéis rígidos, geradas pela mobilização não uniforme dos contatos entre as partículas e os anéis.

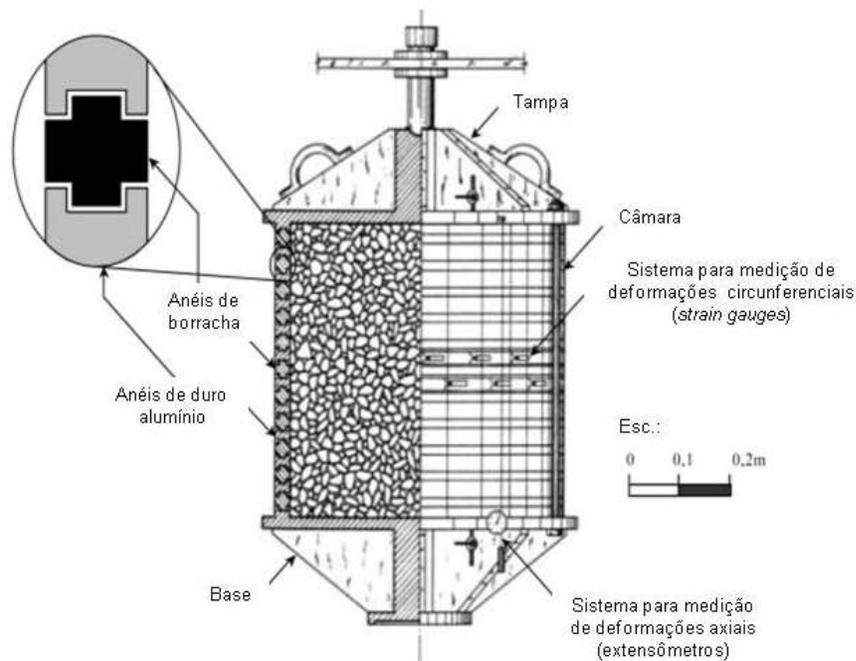


Figura 4.20: Corte esquemático da câmara de compressão proposta por Veiga Pinto (1982), (Veiga Pinto, 1982 apud Maia *et al.*, 2001).

4.4. Material de estudo

O material de estudo selecionado para pesquisa foi uma rocha arenítica. Este arenito é proveniente dos maciços de enrocamento da Barragem de Manso (Figura 4.21), localizado no Rio Manso em Cuiabá no Estado do Mato Grosso, sendo a barragem propriedade de Furnas. A Barragem de Manso é constituída por barragens e diques com amplo emprego de solos e rochas das escavações obrigatórias e de pedreiras abertas com a finalidade de obtenção do material pétreo necessário à obra.

A barragem teve sua construção iniciada em setembro de 1988, com paralisação em novembro de 1989 e retomada no primeiro trimestre de 1998, entrando em operação em novembro de 2000.

A Barragem de Manso possui crista com comprimento igual a 3.680 m, sendo 140 m de concreto, 3120 m de enrocamento e 420 m de solo compactado. Esta barragem gera 210 MW de energia e representa uma importante unidade de aproveitamento múltiplo de energia do circuito elétrico brasileiro, fornecendo energia para o Sudeste/Centro-Oeste e proteção contra cheias do vale do Rio Cuiabá, especialmente na cidade de Cuiabá e Várzea Grande.



Figura 4.21: Barragem de Manso – Cuiabá/MT

A escolha deste arenito se deu em razão do material apresentar sinais de degradação acelerada no campo com o tempo.

O enrocamento de montante, localizado na faixa de oscilação do nível d'água do reservatório da Barragem, vem mostrando deformações significativas por causa da degradação da rocha constituinte. O arenito utilizado na Barragem aponta uma alteração que, de acordo com monitoramento realizado, se caracteriza pela desagregabilidade dos blocos de rocha.

Carvalho (2009) observa que a degradação que o material sofre no campo sugere que o mecanismo preferencial é a desagregação, induzida por fraturas

existentes 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 variação do nível d água do reservatório da Barragem.



Figura 4.22: Enrocamento da Barragem de Manso

Para a execução dos ensaios nesta pesquisa foram utilizados corpos de prova moldados com material granular (Figura 4.23) do enrocamento de arenito da Barragem de Manso. Utilizou-se o material intacto usado na época da construção proveniente da mesma pedreira de onde foi extraído o material para construção da Barragem. A Figura 4.24 apresenta a granulometria do enrocamento empregado no talude de proteção de montante da barragem e o enrocamento utilizado na pesquisa. Com granulometria uniforme, apresentando C_{nu} igual a 3,2 e C_c igual a 2,0.

Para a amostra moldada em laboratório empregou-se o método das curvas paralelas na moldagem da curva granulométrica. Como o método das curvas paralelas fornece uma quantidade elevada de finos e a presença de finos pode mudar o comportamento do material granular, limitou-se a porcentagem de finos (16,7%).



Figura 4.23: Material granular do enrocamento de arenito da Barragem de Manso, utilizado nos corpos de prova do programa experimental.

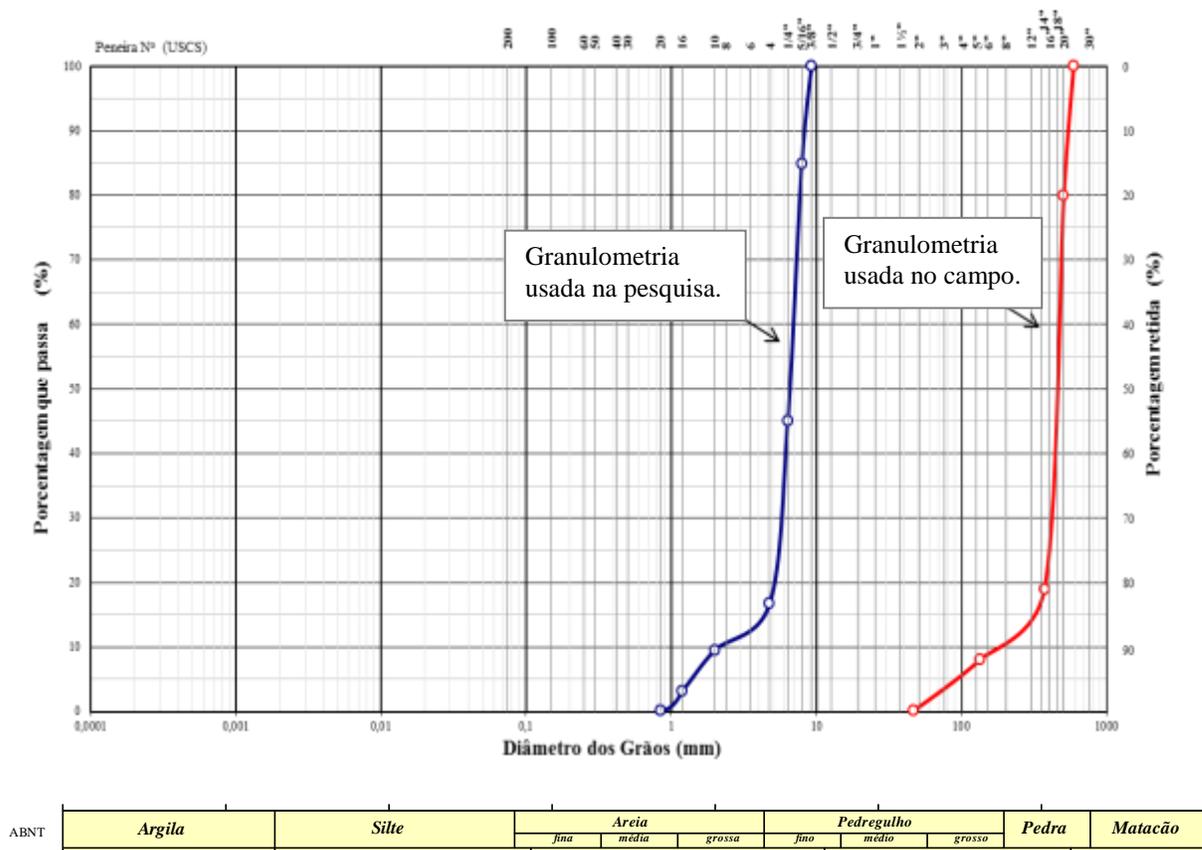


Figura 4.24: Granulometria do arenito utilizado nos ensaios e a utilizada no campo

O Anexo II apresenta as propriedades característica da rocha constituinte da Barragem de Manso.

4.5. Leis constitutivas e parâmetros de análises

A partir da década de 70, o campo dos modelos constitutivos ganhou grande impulso devido ao desenvolvimento da ciência da computação e o surgimento do MEF (Método dos Elementos Finitos).

Em se tratando de barragens, as leis constitutivas são comumente utilizadas na simulação de aterros, no intuito de reproduzir, interpretar e prever o comportamento mecânico do material de enrocamento.

Na interpretação de ensaios laboratoriais analisa-se a variação da geometria do corpo de prova resultante da aplicação de uma determinada sollicitação. Isso demonstra a existência de uma relação única entre deformações e tensões, definidas pelas equações constitutivas. Estas equações são classificadas de acordo com o grau de aproximação do ajustamento teórico ao real, compondo as leis constitutivas.

Em análises numéricas de uma barragem de enrocamento, o modelo constitutivo de enrocamento é o elemento mais importante da análise. Essa afirmação ocorre em função do complexo comportamento tensão-deformação dos materiais de enrocamento, que além de possuírem características complexas, são influenciados por fatores externos. Na prática, o desenvolvimento dos modelos constitutivos limita-se a considerar os principais aspectos da relação tensão deformação do material e determinar o modelo matemático por meio da observação e da análise dos resultados de ensaio de laboratório (Cruz *et al*, 2009).

Os modelos mais comuns utilizados na mecânica dos solos são: elasticidade linear, elasticidade variável e elasto-plásticos.

A aplicação de uma lei constitutiva específica depende da exatidão com que se pretende descrever o comportamento do material. Um modelo pode ser desenvolvido utilizando vários parâmetros. No entanto a busca por um modelo que realize um ajustamento teórico ao comportamento real, com a utilização de um número adequado de parâmetros, é ideal segundo Veiga Pinto (1983).

Modelo EC-K₀

O modelo EC-K₀ descreve a curva tensão vs. deformação obtida no ensaio, através do módulo de Elasticidade Confinado (EC) e o coeficiente de empuxo no repouso (K₀). Esse modelo foi desenvolvido por Veiga Pinto (1983) e é aplicado somente para ensaios de compressão unidimensional.

Veiga Pinto (1983) admite que a relação tensão vs. deformação pode ser expressa como:

$$\sigma_1 = AE p_a \varepsilon_1^{BE} \quad (4.1)$$

ou

$$\log\left(\frac{\sigma_1}{p_a}\right) = \log(AE) + BE \log(\varepsilon_1) \quad (4.2)$$

onde, o termo P_a refere-se à pressão atmosférica, expresso nas mesmas unidades da tensão (102,32 kPa).

Os valores dos parâmetros do material AE e BE, podem ser obtidos por via analítica, como mostra a Figura 4.25.

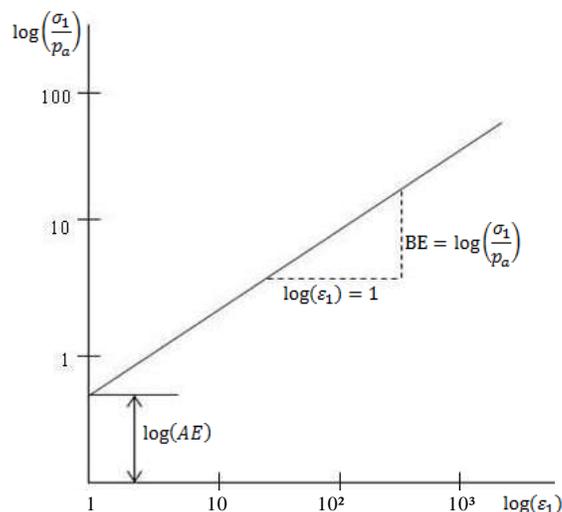


Figura 4.25: Determinação gráfica dos parâmetros do módulo edométrico do modelo EC-K₀.

Ressalta-se que o modelo EC-K₀ não se aplica para o caso de ensaios com saturação intermediária e isso se deve à mudança de características da amostra durante a saturação. Para modelar o efeito do colapso, pode-se dividir o parâmetro AE obtido para o ensaio seco pelo mesmo parâmetro obtido para o ensaio saturado por submersão.

Os parâmetros AE e BE são relacionados ao comportamento tensão-deformação do material, e auxiliam na avaliação do comportamento do enrocamento. O parâmetro AE é referente a inclinação da curva σ_v vs. ϵ_v . Valores elevados referentes a este parâmetro indicam maior rigidez enquanto valores menores indicam menor rigidez.

O parâmetro BE está relacionado à curvatura da curva σ_v vs. ϵ_v . Neste sentido curvas com valores de BE próximos de 1,0 indicam que a grandeza da deformação aumenta linearmente com o nível de tensão. Valores de BE maiores ou menores que 1,0 indicam a existência de um trecho de inflexão na curva σ_v vs. ϵ_v do material, intercalado por dois trechos aproximadamente lineares.

4.6. Considerações Finais

Neste Capítulo foi possível conhecer os detalhes do equipamento utilizado. Descreveu-se o equipamento de compressão confinada de grandes dimensões da UENF e a ciclagem automatizada, bem como, as adaptações realizadas nos equipamentos.

Apresentou-se a câmara de compressão unidimensional do tipo flexível empregada a fim de reduzir o atrito lateral entre as partículas de enrocamento e a interface da câmara.

Conforme já abordado, os materiais rochosos quando expostos aos agentes do ambiente exógeno estão sujeitos a rigorosas condições de degradação. O enrocamento é um material normalmente constituído por materiais rochosos e seu emprego é constante em barragens, como se pode observar no enrocamento da Barragem de Manso, que apresenta sinais de degradação acelerada no campo. A degradação que o

enrocamento de Manso sofre no campo sugere que o mecanismo preferencial é a desagregação, induzida por fraturas e pela xistosidade da rocha, e a desintegração.

A fim de realizar a reprodução, a interpretação e a previsão do comportamento mecânico do material de enrocamento utiliza-se o modelo constitutivo ECK_0 para obtenção das características mecânicas. Com o auxílio dos parâmetros obtidos do modelo ECK_0 pretende-se modelar o colapso do enrocamento.

CAPÍTULO 5 - PROGRAMA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

O capítulo expõe o programa experimental utilizado para a avaliação do comportamento geomecânico de enrocamentos. Especificamente, o programa experimental visa à avaliação do colapso do material de enrocamento devido à inundação intermediária e colapso devido à degradação por saturação e secagem em material confinado. Faz-se a descrição dos instrumentos utilizados, destacando a câmara de compressão do tipo flexível desenvolvida na presente pesquisa.

5.1. Programa experimental

Para uma melhor compreensão é utilizada a seguinte nomenclatura dos tipos de ensaios realizados na pesquisa:

- **Seco**: Ensaio realizado no enrocamento na condição seca;
- **Inundado**: Ensaio realizado no enrocamento na condição saturado por submersão;
- **Inundação intermediária**: Ensaio realizado com o material inicialmente seco e posterior inundação em um determinado estado de tensão;
- **Ciclos de saturação e secagem**: Ensaio realizado inicialmente seco e posterior degradação no equipamento automático de saturação por submersão e secagem por aquecimento.

O programa experimental busca a avaliação dos efeitos do colapso gerado pelo processo de saturação por submersão ou por degradação por ciclos de saturação e secagem. Um programa de piloto de ensaios foi realizado com o objetivo de determinar o efeito do atrito entre o corpo de provas e as paredes internas da câmara e do tempo de estabilização das deformações.

Com a finalidade de detalhar o procedimento adotado na pesquisa, listam-se abaixo os ensaios realizados:

Programa piloto de ensaios:

- i) Ensaios de compressão confinada em três diferentes configurações de câmara de compressão unidimensional em corpos de prova de areia fofa e densa;
- ii) Ensaio de compressão confinada em corpo de prova seco com tempo de aplicação de carregamento de 1 h;

Programa experimental:

- i) Ensaio de compressão confinada em corpo de prova seco;
- ii) Ensaio de compressão confinada em corpo de prova inundado;
- iii) Compressão confinada em corpos de prova inicialmente secos; inundação intermediária, e continuação do ensaio de compressão nos corpos de prova inundados;
- iv) Compressão confinada em corpos de provas inicialmente secos; posterior degradação por ciclos de saturação e secagem em diferentes níveis de tensão e continuação do ensaio de compressão nos corpos de prova inundados.

A tensão axial aplicada na câmara de compressão foi mantida constante durante a realização da inundação intermediária (24 hs) e durante os ciclos de saturação e secagem do corpo de prova de enrocamento. A Tabela 5.1 ilustra as tensões de confinamento adotadas para avaliação do colapso.

Tabela 5.1: Tensões de confinamento

Tipo de ensaio	Tensões de confinamento (kPa)		
Compressão confinada com inundação*	107	299	454
Compressão confinada com saturação e secagem*	113	300	599

*os ensaios foram realizados sem molhagem durante o processo de moldagem do corpo de prova.

5.2. Metodologia dos ensaios

A bibliografia não indica um procedimento de ensaio normalizado para avaliação da deformação de enrocamentos. Veiga Pinto (1983), Pacheco (2005), Carvalho (2009) entre outros autores mostram resultados de ensaios com importantes variações nos procedimentos de ensaios, onde foram usadas diferentes câmaras de compressão unidimensional com diferenças nos diâmetros e alturas da câmara de compressão, várias energias de compactação para preparo da amostra, além de materiais constituintes do enrocamento com propriedades intrínsecas diferentes, dificultando comparação dos resultados obtidos e obtenção de conclusões a respeito do comportamento característico de enrocamentos.

5.2.1. Calibração

Calibração dos Pesos

O equipamento de compressão confinada funciona com um sistema de pendural, em que os pesos colocados no extremo do braço de alavanca geram uma carga aumentada nos corpos de prova. Dessa forma, fez-se necessário a calibração dos pesos.

Inicialmente, realizou-se o nivelamento do pórtico de transmissão de carga. Em seguida, realizou-se a calibração dos pesos, para calcular a carga que chegava no corpo de prova. Para a calibração, utilizou-se uma célula de carga (100 kN) sob a base circular, onde se situaria o corpo de prova e, na sequência, simulou-se a realização de um ensaio aplicando-se carga ao pendural na extremidade da alavanca, tomando-se conhecimento da carga axial confinada aplicada através do pistão ao corpo de prova. Sendo assim, foi possível se obter a constante do braço alavanca igual a 13 kgf.

Calibração da Câmara Oedométrica

A câmara de compressão unidimensional utilizada foi a câmara flexível composta de anéis de aço inoxidável e silicone. Neste tipo de câmara, o corpo de prova e a

câmara de compressão são comprimidos simultaneamente. Desta forma, além da compressão apresentada pelo enrocamento no interior da câmara, ocorre simultaneamente uma parcela de compressão dos anéis de silicone da própria câmara. Sendo assim, foi realizado um ensaio com a câmara de compressão vazia, sem o material de enrocamento, esse ensaio torna possível se obter a parcela da tensão axial absorvida pela parede lateral da câmara.

Os resultados obtidos de resistência à compressão são então corrigidos, descontando-se a resistência introduzida pela compressão da câmara de compressão. Desse modo, a tensão não é constante, há alívio de tensão no corpo de prova em função do aumento da deformação na câmara.

Dependendo das dimensões da câmara utilizada, deformação radial do anel pode ocorrer. Essas deformações podem apresentar, contudo, valores reduzidos da ordem de 10^{-6} de acordo com Maia (2001), que podem ser desprezados nos cálculos desta pesquisa. Importante ressaltar que esta calibração forneceu a resistência da câmara à tensão axial somente.

5.2.2. Preparação da amostra

O material de enrocamento possuía diâmetros muito maiores ao utilizado nos ensaios, sendo assim foi necessária a britagem do material a fim de obter uma curva granulométrica paralela à do material de campo, no entanto reduzindo a porcentagem de finos. Adotou-se a redução dos finos, pois, para o modelo adotado, tais frações de material em quantidade significativa poderiam gerar interferência no comportamento do material granular. A rocha foi processada em britador até obter as frações granulométricas desejadas. As frações utilizadas para montar a granulometria estabelecida na Figura 5.1, foram: 5/16" (7,93 mm), 1/4" (6,35 mm); n° 4 (4,76 mm); n° 10 (2 mm); n° 16 (1,19 mm) e n° 20 (0,84mm). A Figura 5.1 apresenta a curva granulométrica do arenito utilizado em todos os ensaios.

Para a realização de cada ensaio utilizou-se 16,5 kg de material seco. Essa massa foi obtida multiplicando a densidade adotada pelo volume da câmara de compressão.

A homogeneização das amostras foi realizada misturando o material manualmente (Figura 5.2a). Para garantir maior representatividade das amostras a separação destas para moldagem dos corpos de prova foi por quarteamento (Figura 5.2b). Em seguida a massa referente a cada amostra foi separado em sacos plásticos para serem utilizadas posteriormente nos ensaios.

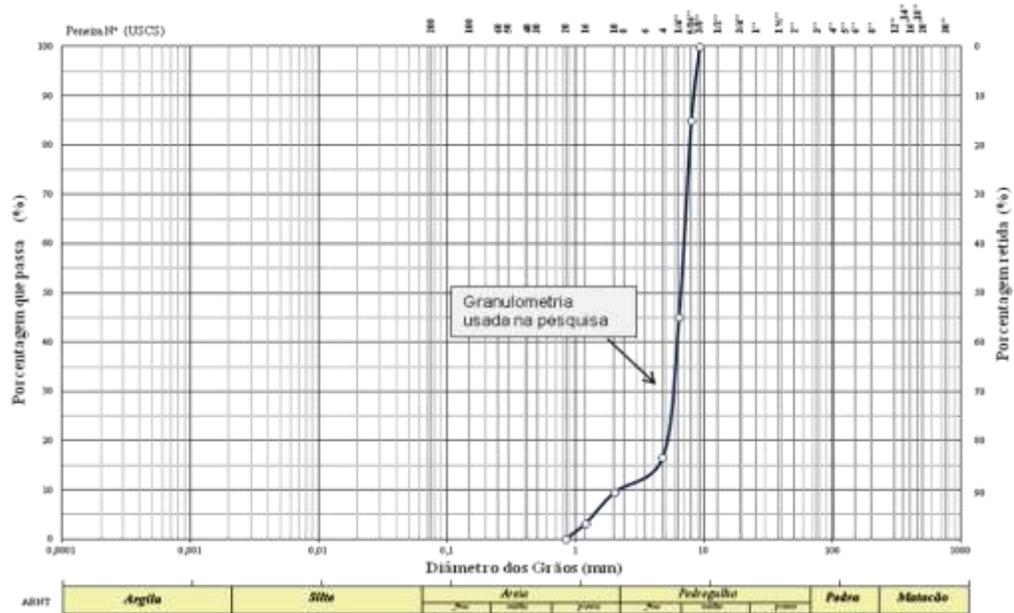


Figura 5.1: Curva granulométrica empregada nos ensaios

O material disponível era limitado, prepararam-se apenas 4 amostras, sendo assim, optou-se por sua reutilização. Após cada ensaio, o corpo de prova era seco em estufa a 100 °C e peneirado. A granulometria era corrigida e o material era utilizado em um novo ensaio. Destaca-se que cada amostra foi reutilizada apenas uma vez.



(a)



(b)

Figura 5.2: Amostra do material de enrocamento. Homogeneização da amostra antes do ensaio (a) Amostra homogeneizada (b)

5.2.3. *Moldagem do corpo de prova*

Foi considerada uma densidade relativa igual a 95%, com peso específico igual a 16,3 kN/m³. Essa densidade representa uma condição típica de enrocamentos compactados, normalmente utilizados em aterros de estradas.

A câmara de compressão utilizada foi do tipo flexível com diâmetro de 30 cm, a altura inicial do corpo de prova foi mantida constante igual a 14,3 cm em todos ensaios.

Para a moldagem do corpo de prova de enrocamento, foi utilizado material seco em estufa a 100°C. Após este procedimento, foi realizada a moldagem na densidade máxima obtida com a amostra seca. Os corpos de prova foram moldados lançando o material com altura máxima de queda de 10 cm (Figura 5.3a) e compactados manualmente com o auxílio de soquetes de madeira para evitar quebras por compactação (Figura 5.3c), garantindo assim a densidade desejada.

O tempo de moldagem de cada corpo de prova foi igual a 2h, em função da demora em compactar as amostras em várias camadas. A compactação em várias camadas tem o objetivo de atingir elevado estado de compacidade, a partir da estabilização da acomodação máxima dos grãos. O corpo de prova foi moldado com o material em dez camadas de aproximadamente 1,4 cm a fim de garantir maior controle da compactação (Figura 5.3b e 5.3d). Este procedimento garante uniformidade do corpo de prova e ajuda na distribuição uniforme das tensões.

A reprodução fiel dos procedimentos de moldagem dos corpos de prova garante a representatividade destes e é de grande importância para se garantir a qualidade dos resultados obtidos. A Figura 5.3 mostra o procedimento de moldagem adotado em todos os corpos de prova.

5.2.4. Aplicação de carregamento

Descreve-se a seguir o procedimento adotado para aplicação do carregamento.

Nivelamento durante troca de carregamento

Cada estágio de carregamento corresponde a um incremento de carga. Antes da aplicação de um incremento de carga, é colocado um apoio no braço de alavanca (Figura 5.4). As cargas são colocadas suavemente no pendural localizado no extremo do braço de alavanca. Posteriormente, retira-se o apoio do braço de alavanca. Após a aplicação de cada carga, faz-se necessário o nivelamento do braço de alavanca.



(a) Lançamento das partículas



(b) Controle de altura da camada



(c) Compactação



(d) Última camada do corpo de prova

Figura 5.3: Procedimento de moldagem do corpo de prova



Figura 5.4: Detalhe do apoio do braço alavanca durante a aplicação de um incremento de carga.

Tempo de aplicação de carregamento em cada estágio

Cada estágio de carregamento foi mantido até que as deformações axiais se estabilizassem. Dessa forma, a estabilização das deformações é determinada através da avaliação da curva tempo x deslocamento axial, sendo admitida, quando a diferença entre as leituras realizadas nos tempos t e $t/2$ corresponder a, no máximo, 5% do deslocamento havido no mesmo estágio. E o tempo mínimo de cada estágio de carregamento foi de 60 minutos. Este é o tempo mínimo necessário para o desenvolvimento das deformações de acordo com ensaio piloto realizado. Destaca-se que o tempo total de cada ensaio variou de acordo com a estabilização das deformações para cada estágio de carga. Alguns estágios de aplicação de carregamento apresentaram deformações por um tempo mínimo de 60 minutos, e o tempo máximo foi de até 720 minutos.

5.2.5. Avaliação do colapso devido à inundação

A avaliação do colapso por inundação intermediária foi realizada com o propósito de estudar o comportamento geomecânico do material de enrocamento.

A fim de avaliar o comportamento geomecânico de enrocamento confinado durante o processo de colapso por inundação intermediária, foi realizado o ensaio de compressão unidimensional em corpo de prova inicialmente seco com posterior saturação por submersão em diferentes níveis de tensão axial. Para isso, foi realizado

inicialmente um ensaio de compressão unidimensional com o corpo de prova seco e um com o corpo de prova inundado, ambos atingindo a capacidade de carga máxima do equipamento.

O processo de ensaio consiste nas seguintes etapas: preparação da amostra, moldagem do corpo de prova, confinamento inicial, inundação, continuação do carregamento e descarregamento. Ressalta-se que as etapas iniciais de preparação da amostra e moldagem do corpo de prova são iguais para todos os ensaios.

Com as etapas iniciais concluídas, foi realizado o carregamento na condição seca, até o nível de tensão axial desejada. Com o mesmo nível de carregamento axial, procedeu-se à inundação intermediária. A inundação intermediária ocorreu com água natural com temperatura de 21°C, após a estabilização do carregamento. O tempo de saturação do corpo de prova foi igual a 24 h. Nesse período, foi realizado o acompanhamento das deformações sob tensão constante. Após esse período, foi dada continuidade do carregamento confinado em estágios. Após o último estágio de carregamento, realizou-se o descarregamento.

A Figura 5.5 mostra o momento de inundação intermediária do corpo de prova. É possível observar que a saturação do corpo de prova ocorre por dois orifícios localizados na tampa superior da câmara de compressão unidimensional (Figura 5.5a) e através dos anéis justapostos (Figura 5.5b).



(a) Água entrando na câmara pelo orifício superior



(b) Água entrando na câmara através dos anéis justapostos

Figura 5.5: Momento em que ocorre a inundação intermediária do corpo de prova.

5.2.6. Avaliação do colapso devido à degradação

A avaliação do colapso por degradação foi realizada com o propósito de estudar o comportamento geomecânico do material de enrocamento.

A fim de avaliar o comportamento geomecânico de enrocamento confinado durante o processo de colapso por degradação, foi realizado o ensaio de compressão unidimensional em corpo de prova inicialmente seco. Em seguida, submeteu-se a amostra a ciclos de saturação e secagem sob tensão constante. O processo de ciclagem consiste nas seguintes etapas: saturação, secagem e ventilação.

Inicialmente acoplou-se o equipamento de saturação e secagem da UENF ao equipamento de compressão confinada. Realizou-se, então, a preparação e moldagem do corpo de prova, repetindo para isso os mesmos procedimentos dos outros ensaios. Com todas as etapas concluídas, foi realizado o carregamento na condição seca, até alcançar o nível de tensão axial desejada. Foi sempre obedecido o critério de estabilização de aplicação de estágios de carregamento estabelecido para a realização dos ensaios.

O tempo de duração de cada ciclo de saturação e secagem foi determinado a partir das curvas de saturação e secagem da rocha do enrocamento (Figura 5.6). O procedimento de ensaio para a determinação de tais tempos foi realizado por Carvalho (2009), de onde foi estabelecido um tempo igual a 360 minutos para cada estágio de saturação ou secagem.

Destaca-se que a curva de saturação é obtida a partir do ensaio de absorção, que consiste em medir a variação de umidade do material inicialmente seco até sua saturação completa. A curva de secagem é obtida em ensaios de secagem, que consiste em medir a variação de umidade do material inicialmente saturado até sua secagem completa.

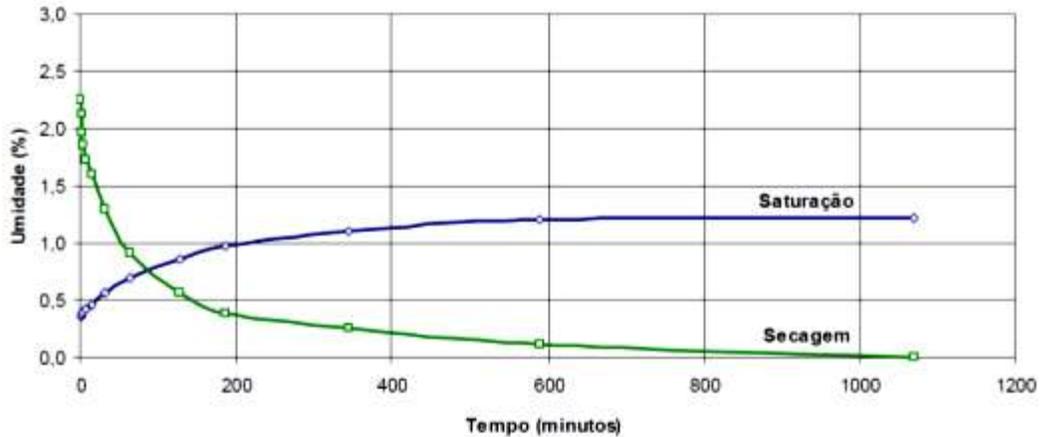


Figura 5.6: Curvas de saturação e secagem obtidas em ensaios de absorção e secagem para enrocamento arenítico (Carvalho, 2009).

A carga aplicada no último estágio de carregamento na condição seca do material permanece constante durante todo o ciclo de degradação.

O ensaio de saturação e secagem inicia-se com a saturação por inundação do corpo de prova, com água natural na temperatura de 21°C. Após a saturação por inundação por 360 min, ocorre o esvaziamento da câmara de degradação e se inicia a secagem do material por 360 min. A secagem ocorre de forma que a temperatura aumenta gradualmente até atingir aproximadamente 100°C.

Durante cada etapa de saturação ou secagem faz-se o acompanhamento dos deslocamentos axiais do topo do corpo de prova com o tempo. O intervalo de tempo entre as leituras foi: 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 15; 30; 60; 90; 120; 180; 360 min. Após a etapa de secagem é feito o resfriamento da câmara de degradação por ventilação para o início de um novo ciclo.

Para os estágios de saturação e secagem o critério de estabilização considerou que a diferença das deformações entre o ciclo atual e anterior é inferior a 1% da deformação total na ciclagem, em pelo menos três ciclos subsequentes. Esse critério se justifica pela necessidade de garantir o máximo de deformações provocadas no procedimento de ciclagem. Após a estabilização das deformações por ciclagem retoma-se ao processo de carregamento e posterior descarregamento também em etapas.

5.2.7. Calibração da câmara de degradação:

Encontram-se, abaixo, as temperaturas correspondentes a um ciclo completo do equipamento de saturação e secagem.

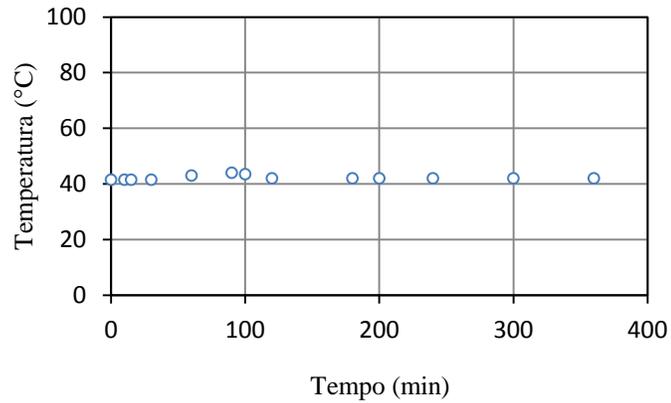


Figura 5.7: Variação da temperatura vs. Tempo no ciclo de saturação.

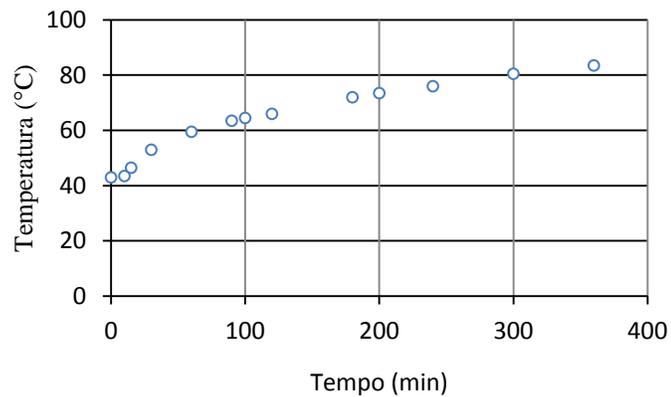


Figura 5.8: Variação da temperatura vs. Tempo no ciclo de secagem.

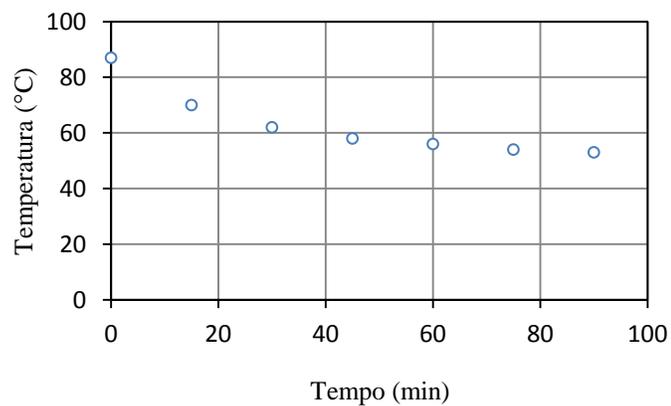


Figura 5.9: Variação da temperatura vs. Tempo no ciclo de ventilação.

5.2.8. Cálculo de grau de quebra (B_g)

Para o cálculo do grau de quebra, realizou-se o peneiramento do enrocamento após cada ensaio. Na presente pesquisa o valor de B_g para o ensaio seco e inundado foi obtido conforme sugerido por Marsal (1973).

Já para os ensaios de inundação intermediária e ciclos de saturação e secagem, pretendeu-se calcular o grau de quebra referente apenas ao processo de colapso do enrocamento. Para isso, após o cálculo do B_g conforme sugerido por Marsal (1973), obteve-se o grau de quebra no colapso com auxílio deste mesmo valor obtido nos ensaios seco e inundado.

Para que os valores do grau de quebra fossem mais representativos do processo de colapso, buscou-se a tendência do material após o colapso com o mínimo de estágios de carga a fim de permitir a determinação do B_g sem influência de carregamentos subsequentes.

5.3. Considerações finais

Neste capítulo foi descrito o programa experimental utilizado para desenvolvimento da pesquisa.

Descreveu-se detalhadamente a metodologia dos ensaios. Foram realizados, inicialmente, processos de calibração dos pesos e calibração da câmara de compressão unidimensional.

Destaca-se que os procedimentos adotados para os ensaios de colapso por inundação intermediária e ciclos de saturação e secagem são os mesmos; o que muda é o processo de geração de colapso. Para avaliar o colapso por inundação intermediária, se realiza a adição de água ao corpo de prova sob tensão axial constante. E, para avaliar o colapso por degradação, o corpo de prova é submetido a ciclos de saturação e secagem sob tensão constante. O procedimento de ciclagem ocorre por saturação e secagem com água. E o tempo adotado para cada ciclo foi igual a 360 min. Este tempo foi obtido das curvas de saturação e secagem da rocha do enrocamento.

CAPÍTULO 6 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo faz-se a apresentação e análise dos resultados dos ensaios laboratoriais realizados nesta pesquisa.

Primeiramente, realiza-se a análise do efeito da adição de água na compressibilidade do enrocamento com auxílio das curvas tensão vs. deformação do material seco e inundado.

Em seguida, realiza-se a análise da inundação intermediária do material sob tensão constante no desenvolvimento das deformações. Faz-se também a análise dos efeitos da degradação por ciclos de saturação e secagem no desenvolvimento das deformações do material.

Nesse momento, a análise da variação do módulo M com o nível de tensão auxilia na compreensão do desenvolvimento de deformações.

Para tais análises, foi aplicado o modelo constitutivo EC- K_0 . A obtenção dos parâmetros do modelo auxiliou a análise do comportamento geomecânico do material de enrocamento.

6.1. Condição seca e inundada

As Figuras 6.1 e 6.2 apresentam a variação da tensão axial com a deformação axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpos de prova na condição seca e inundada, respectivamente.

Destaca-se que, para o ensaio inundado, após a moldagem, a saturação foi realizada através de inundação do corpo de provas por período de tempo igual a 6 h antes do início do ensaio.

A interpretação dos ensaios foi realizada utilizando os parâmetros obtidos com a aplicação do modelo constitutivo EC- K_0 e com o auxílio de conceitos presentes na literatura. A Tabela 6.1 apresenta valores referentes aos parâmetros AE e BE obtidos na presente pesquisa, assim como valores destes parâmetros encontrados na literatura

e são correspondentes a diferentes materiais resultantes de ensaios realizados em câmaras flexíveis similares.

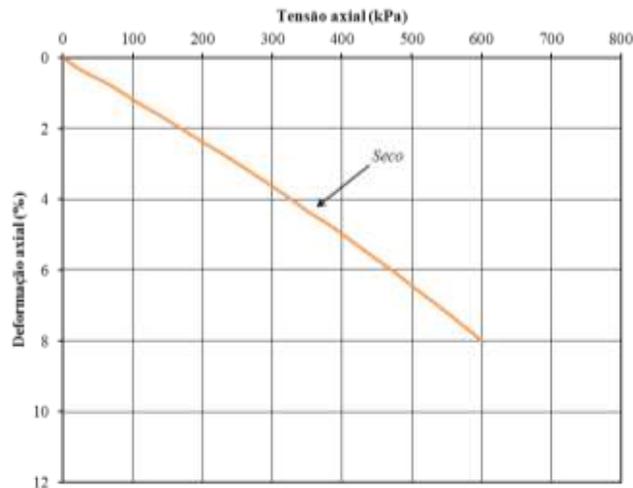


Figura 6.1: Variação da tensão axial vs. deformação axial no ensaio de compressão confinada executado em corpo de prova seco.

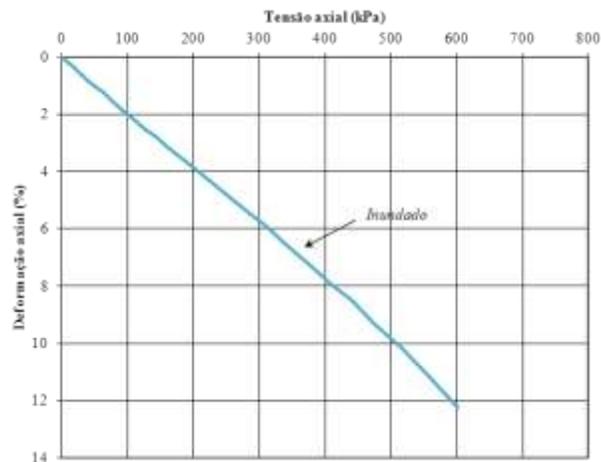


Figura 6.2: Variação da tensão axial vs. deformação axial no ensaio de compressão confinada executado em corpo de prova inundado.

Os parâmetros AE e BE da curva ajustada tensão vs. deformação definida pelo modelo EC- K_0 para o ensaio seco e inundado foram iguais a 73,4 e 0,97 respectivamente. O valor de AE obtido indica que o arenito de Manso ensaiado em câmara do tipo flexível apresenta baixa rigidez quando comparado aos valores de AE presentes na literatura para outros materiais. Nota-se, na condição seca do arenito, que o comportamento tensão vs. deformação do material se aproxima da linearidade com

valor referente ao parâmetro BE igual a 0,97. Conforme discutido, valores referentes ao parâmetro BE iguais a 1,0 representam comportamento tensão vs. deformação linear.

Assim, como observado no ensaio seco, o ensaio inundado também desenvolve comportamento aproximadamente linear, com BE igual a 1,02. O parâmetro AE igual a 56,3 indica baixa rigidez, se comparado a valores presentes na literatura para amostras inundadas.

Tabela 6.1: Valores dos parâmetros AE e BE para diferentes materiais

Material		Parâmetros das curvas σ'_v vs. ϵ_v		Referências
Tipo	Condição do material	AE	BE	
Basalto (Marimbondo)	Campo (25 anos)	895	0,94	Maia (2001)
Basalto (Pedreira Rio Grande)	Intacto	2083	1,01	
	100 h de lixiviação	1929	1,04	
	240 h de lixiviação	1250	0,99	
	600 h de lixiviação	1199	0,99	
	1500 h de lixiviação	1146	0,99	
	3200 h de lixiviação	1035	0,98	
Xisto + Grauvaque (material de transição/Barragem de Beliche)	Alterado seco	1200	1	Veiga Pinto (1983)
	Alterado submerso	146	0,79	
	Alterado submerso e fluência	93	0,68	
Gruvaque (Barragem de Beliche)	São seco	1300	1	
	São submerso	1300	1	
	São submerso $I_D = 80\%$	322	0,88	
Filtro	-	1380	1	
Argila	-	6805	2,17	
Tout-Venant	-	4772	1,92	
Areia	-	470	1	
Basalto (Barragem de Chapecó)	São seco	915	1,33	Pessin (2014)
	São saturado	404	1,19	
Arenito (Barragem de Manso)	São seco	73,4	0,97	Presente pesquisa
	São submerso	53,3	1,02	

A Figura 6.3 apresenta a curva σ_v vs. ϵ_v ajustada aos valores previstos para o enrocamento de Manso e a curva obtida em ensaios laboratoriais. A comparação dos valores experimentais com os valores teóricos previstos do modelo constitutivo EC- K_0 para o enrocamento de arenito evidenciou a adequabilidade da lei constitutiva adotada.

No Anexo I encontram-se as curvas σ_v vs. ϵ_v experimentais dos ensaios realizados associadas à curva teórica do modelo EC- K_0 .

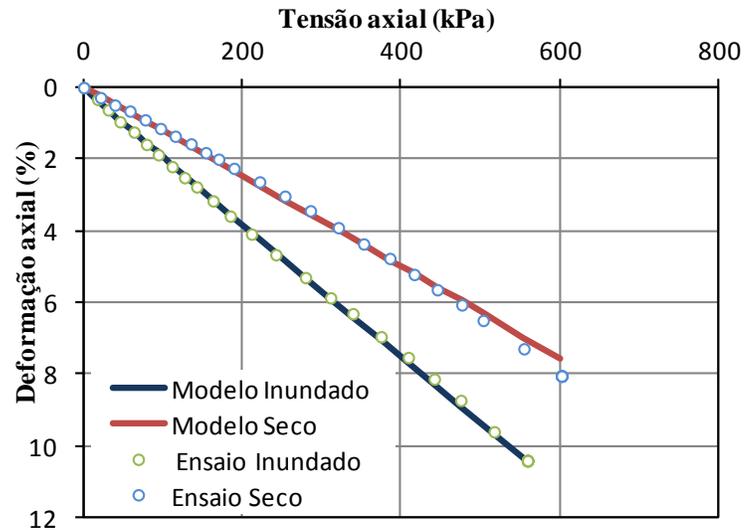


Figura 6.3: Comparação da variação tensão axial vs. deformação axial experimentais e teóricas do modelo EC- K_0

Nota-se que a curva tensão vs. deformação apresentada não possui trecho de inflexão, diferentemente do comportamento esperado para o material de enrocamento. Alguns autores sugerem que tais curvas são compostas normalmente por três regiões distintas sendo: dois trechos aproximadamente lineares (inicial e final) intercalados por um trecho não linear. De acordo com Veiga Pinto (1983), a região não linear representa um ponto de inflexão da curva, que poderia indicar o início do rearranjo das partículas devido à quebra provocada pela elevação da tensão aplicada.

Neste sentido, outra hipótese a ser considerada é que o atrito gerado entre as partículas do material e a parede interna da câmara de compressão influencia no desenvolvimento das deformações e assim na forma da curva σ_v vs. ϵ_v .

A inflexão da curva tensão vs. deformação sugerida por ensaios presentes na literatura pode ser explicada pela mobilização da resistência por atrito interno entre as paredes da câmara de compressão e o corpo de prova. A partir desse momento, ocorrem movimentos relativos mais acentuados entre o corpo de prova e a câmara, sugerindo a redução da rigidez. Espera-se que tal efeito seja mais pronunciado em câmaras de paredes rígidas e em ensaios onde a altura do corpo de provas é

significativamente maior que o diâmetro. Tendo em vista essa mobilização do atrito, se estabelece uma nova relação de atrito interno próximo ao residual, caracterizada pelo trecho linear final.

Isto sugere que o ponto de inflexão apresentado por alguns ensaios não seja um comportamento característico do material, mas do tipo de câmara e equipamento utilizados nos ensaios. Sendo assim, observa-se que a curva tensão vs. deformação do material de enrocamento é diretamente influenciada pelo tipo de câmara de compressão unidimensional.

O resultado de um ensaio de compressão unidimensional sofre interferência do atrito devido ao tipo de câmara de compressão utilizado nos ensaios experimentais, conforme sugerido por Fumagalli (1969) e Pacheco (2005).

Esta hipótese explica o comportamento aproximadamente linear apresentado nos ensaios realizados na presente pesquisa. O tipo de câmara utilizada nesse trabalho possui características que minimizam tal efeito. Destaca-se que existe deslocamento relativo entre as partículas do material e a parede da câmara, mesmo para câmara flexível na pequena interface dos anéis rígidos, entretanto este atrito é menos significativo que o atrito existente em uma câmara de compressão de parede rígida.

A compressibilidade apresentada pelo enrocamento de Manso para a câmara compressível do tipo flexível é relativamente alta, como se pode observar ao se comparar os resultados dos valores dos parâmetros AE da presente pesquisa com os mesmos valores presentes na literatura (Tabela 3.3).

As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam as variações do módulo M com a tensão axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpo de prova seco e inundado, respectivamente.

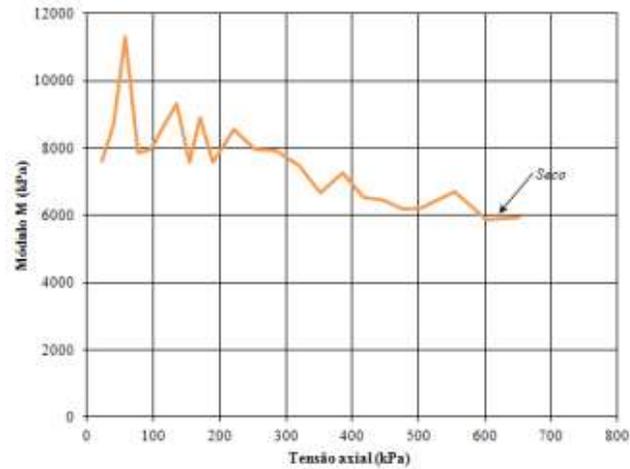


Figura 6.4: Variação do módulo M com a tensão axial no ensaio de compressão confinada executado em corpo de prova seco.

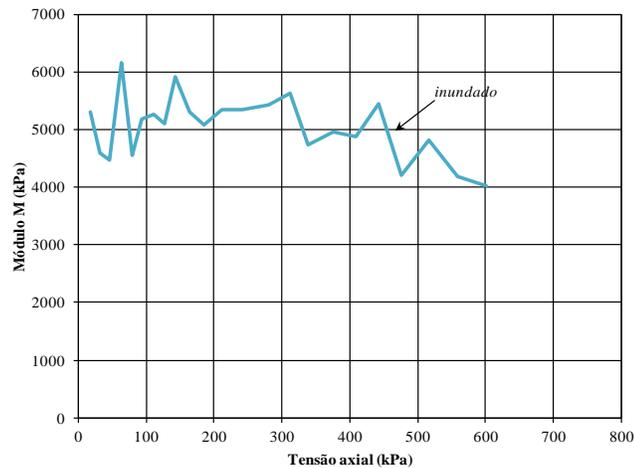


Figura 6.5: Variação do módulo M com a tensão axial no ensaio de compressão confinada executado em corpo de prova inundado.

Nas Figuras 6.4 e 6.5 é possível observar que o material na condição seca e o material na condição inundada apresentam rigidez aproximadamente constante.

Notam-se, nas Figuras 6.4 e 6.5, pontos irregulares na variação do módulo M com a tensão axial. Isto é ocasionado pela sensibilidade do módulo de compressibilidade em enrocamentos. Tal aspecto está relacionado à elevada rigidez dos enrocamentos e ao processo de mobilização das deformações, induzida pelo rearranjo granular abrupto. Espera-se que o rearranjo esteja associado à ruptura dos contatos entre partículas e que isso ocorra em pontos localizados, propagando-se para

o restante da estrutura granular. Isso ocorre de forma irregular durante o ensaio, podendo ser mais acentuado em um estágio de carregamento do que em outro. Assim, rearranjos diferenciados em estágios sucessivos geram importantes diferenças na relação tensão deformação e, conseqüentemente, no módulo M . Para redução desse efeito, foram utilizados 23 estágios de carga e rigoroso critério de estabilização.

6.2. Efeito da saturação

A Figura 6.6 apresenta a variação da tensão axial com a deformação axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpos de prova seco e inundado.

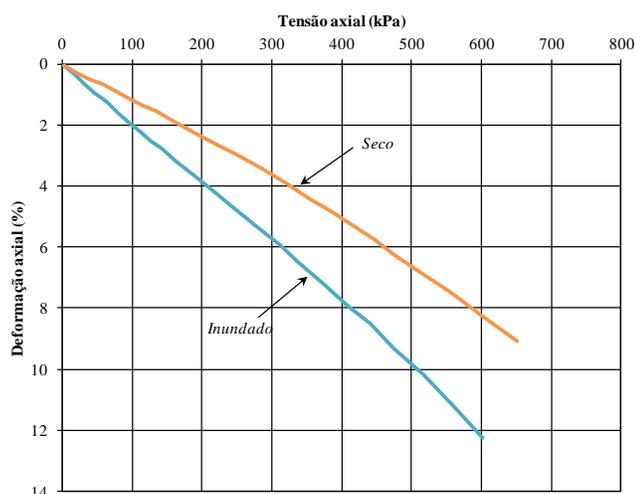


Figura 6.6: Variação da tensão axial vs. deformação axial do corpo de prova do arenito de Manso, em ensaio seco e inundado.

A Figura 6.7 apresenta a variação do módulo M com a tensão axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpos de prova de seco e inundado.

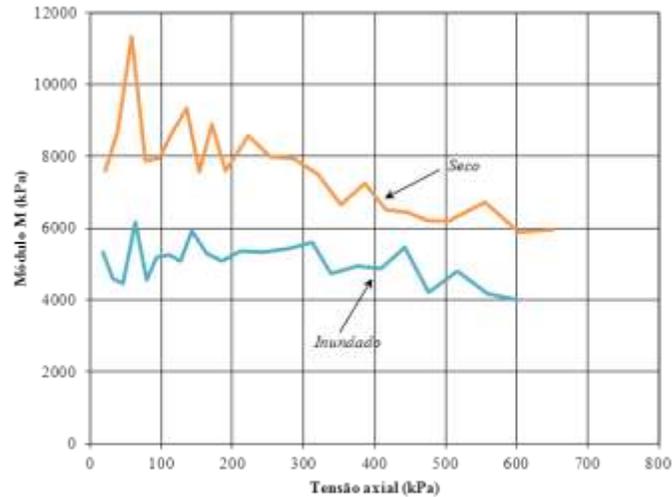


Figura 6.7: Variação do módulo M com a tensão axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpos de prova seco e inundado

Na Figura 6.7 observa-se que, no ensaio inundado, o material apresenta menor rigidez, em razão da significativa redução no módulo M . Neste sentido, verifica-se que a água exerce grande influência nas características tensão vs. deformação do enrocamento de Manso, visto que na condição inundada apresenta compressibilidade 1,3 vezes maior que na condição seca.

6.3. Deformação primária por inundação intermediária

As Figuras 6.8, 6.10 e 6.12 apresentam as variações da tensão axial com a deformação axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpos de prova de rocha arenítica para ensaios seco, inundado e com inundação intermediária na tensão igual a 107; 300 e 454 kPa. As Figuras 6.9, 6.11 e 6.13 apresentam as variações do módulo M com a deformação axial nesses ensaios.

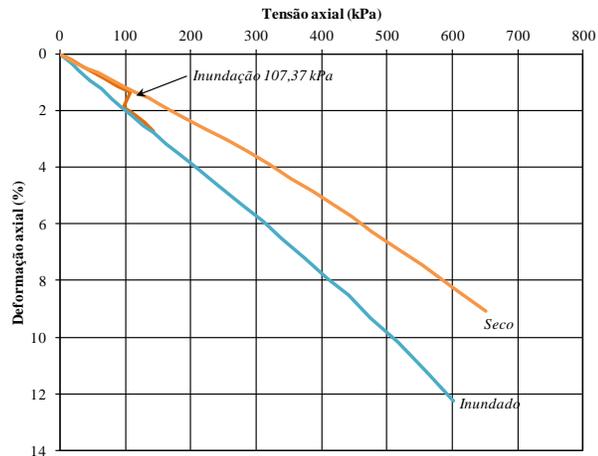


Figura 6.8: Varia o da tens o axial vs. deform o axial no enrocamento do arenito de Manso condi o seca, inundada e com inunda o intermedi ria em 107,37 kPa.

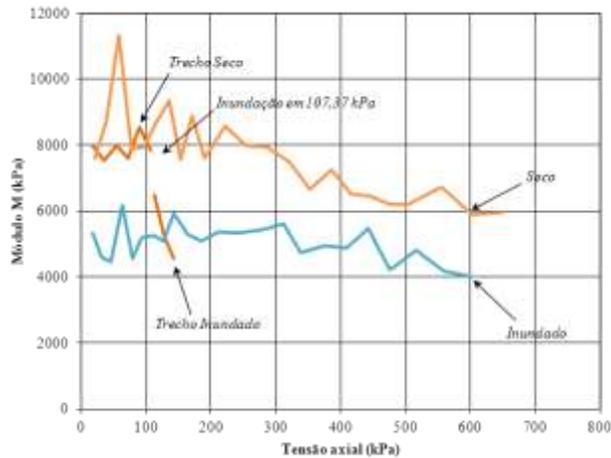


Figura 6.9: Varia o do m dulo M com a tens o axial nos ensaios de compress o confinada executados em corpos de prova seco, inundado e com inunda o intermedi ria em 107,37 kPa.

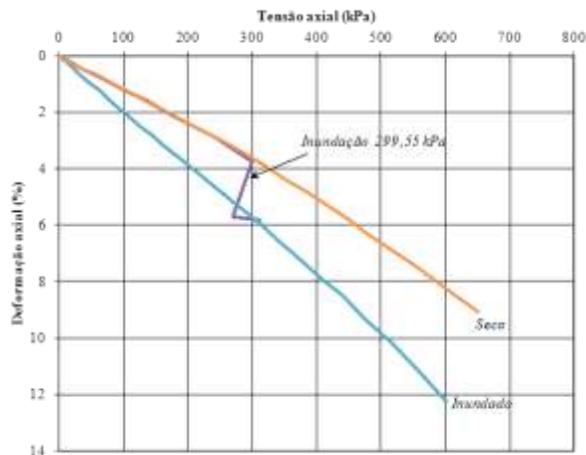


Figura 6.10: Varia o da tens o axial vs. deform o axial no enrocamento do arenito de Manso na condi o seca, inundada e com inunda o intermedi ria em 299,55 kPa

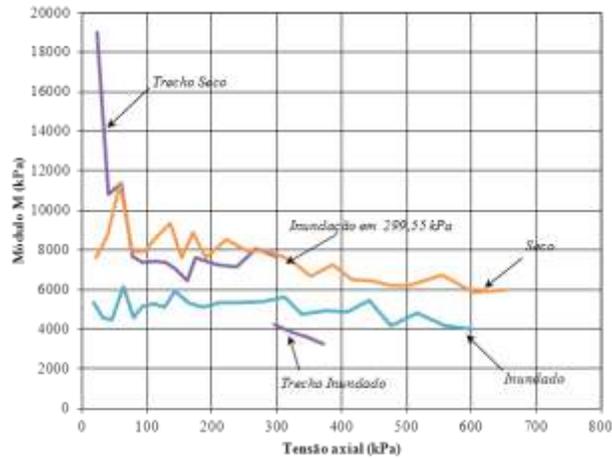


Figura 6.11: Variação do módulo M com a tensão axial no enrocamento de areito seco, saturado e com inundação em 299,55 kPa.

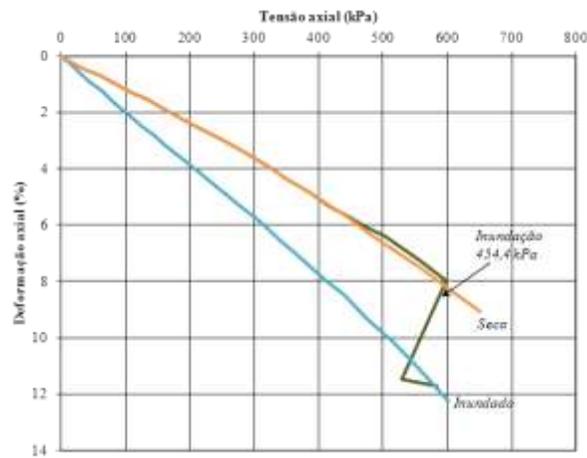


Figura 6.12: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento de areito seco, inundado e com inundação intermediária em 454,4 kPa.

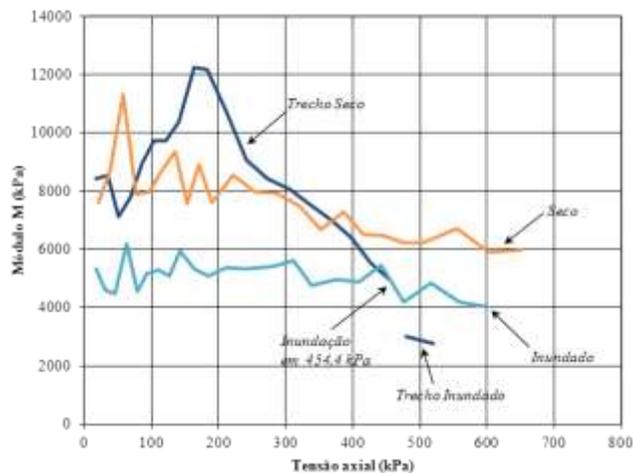


Figura 6.13: Variação do módulo M com a tensão axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpos de prova seco, inundado e com inundação intermediária em 454,4 kPa.

A análise dos resultados evidencia um colapso significativo do material devido à adição de água durante o processo de inundação intermediária. Verificou-se que o processo de inundação do corpo de prova sob tensão constante provocou o deslocamento da curva σ_v vs. ϵ_v do enrocamento de arenito seco para a mesma curva do material ensaiado sob condição inundada. Comportamento semelhante foi sugerido por Nobari e Duncan (1972). Vale lembrar que os resultados de ensaios de compressão unidimensional conduzidos por estes autores foram apresentados na Figura 2.3.

Este comportamento é associado a alguns aspectos como: redução da carga de ruptura no carregamento pontual pela saturação das partículas, redução da resistência à compressão uniaxial da rocha devido à saturação da rocha.

O processo de inundação resultou em uma deformação por colapso, correspondente ao incremento porcentual em relação à deformação axial no estágio da inundação do corpo de prova igual a 37,8; 37,6; e 34% correspondente às tensões de confinamento de 107; 300 e 454 kPa respectivamente. A redução do módulo M no trecho inundado evidencia o aumento da compressibilidade do enrocamento.

Fatores como a compactação a seco, granulometria uniforme, pouca adição de finos, fraturas ou microfaturas nas partículas e a absorção das partículas, possivelmente, influenciaram na grandeza do colapso primário apresentado pelo enrocamento de Manso.

Ressalta-se que Carvalho (2009), ao comparar resultados de ensaios de compressão confinada com inundação intermediária conduzidos em sua pesquisa em materiais de arenito, calcário e granito observou maiores deformações para o material de arenito em torno de 8 % (material também proveniente da Barragem de Manso).

6.4. Deformação secundária por ciclos de umidade

A Figura 6.14 apresenta as variações das deformações com o número de ciclos realizados nos ensaios de ciclos de saturação e secagem, executados em corpos de prova de enrocamento, para o corpo de prova sob tensão constante igual a 113; 300 e 599 kPa, respectivamente.

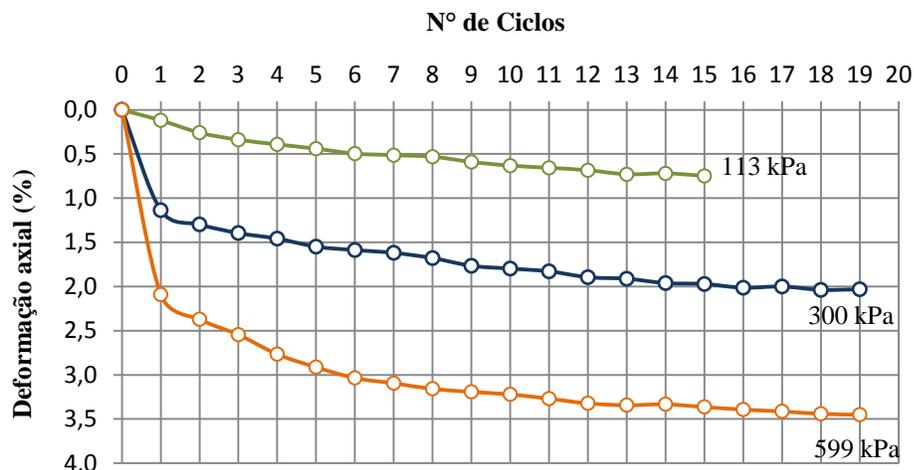


Figura 6.14: Número de ciclos de saturação e secagem vs. deformação axial para ensaio de ciclagem nas tensões iguais a 113, 300 e 599 kPa.

A Figura 6.14 indica que, para o enrocamento de Manso, o número mínimo de ciclos para a estabilização das deformações ocasionadas pelo colapso por degradação da rocha por meio de ciclos de saturação e secagem em câmara de compressão do tipo flexível, é igual a 15 para a tensão igual a 100 kPa e igual a 19 para as tensões iguais a 300 e 599 kPa. Carvalho (2009) observou que o número mínimo de ciclos para estabilização das deformações em câmara rígida de fundo móvel é igual a 2 para a tensão de 30,7 kPa e igual a 7 para a tensão de 122,8 kPa.

Vale mencionar que houve a necessidade de refazer o ensaio de ciclo de saturação e secagem na tensão igual a 300 kPa, devido ao desaprumo acentuado apresentado pelo pórtico de transmissão de carga. Neste momento ocorreu a introdução de um sistema de guias, a fim de permitir a recentralização das cargas.

A partir da variação da deformação axial com o número de ciclos, nota-se que, para o ensaio de ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 113 kPa, ocorre uma significativa deformação da amostra nos primeiros ciclos, seguido do desenvolvimento aproximadamente constante de deformações, até a estabilização com o aumento do número de ciclos. Para as tensões de 300 e 599 kPa observa-se comportamento distinto, as deformações significativas apresentadas pelo material são resultantes do colapso primário do material logo no primeiro ciclo, assim como observado nos ensaios de inundação intermediária, e tendem a estabilizar em seguida.

As Figuras 6.15, 6.17 e 6.19 apresentam as variações da tensão axial com a deformação axial nos ensaios de compressão confinada executados em corpos de prova seco, inundado e com ciclos de saturação e secagem nas tensões iguais a 113, 300 e 599 kPa, respectivamente. As Figuras 6.16, 6.18 e 6.20 ilustram as variações do módulo M com a deformação axial nesses ensaios.

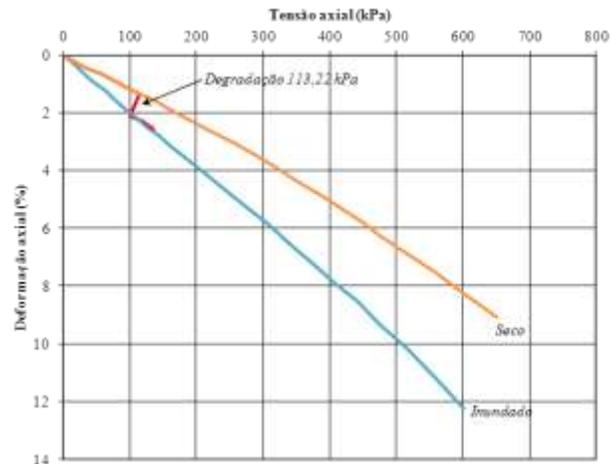


Figura 6.15: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento do arenito de Manso na condição seca, inundada e com ciclos de saturação e secagem na tensão de 113,22 kPa.

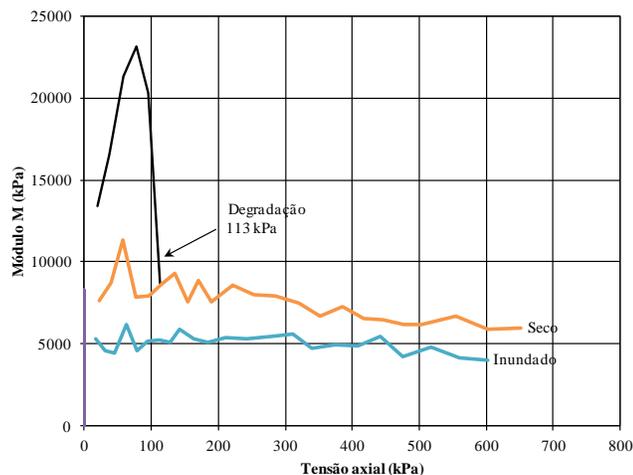


Figura 6.16: Variação do módulo M com a tensão axial no enrocamento de arenito seco, inundado e com ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 113,22 kPa.

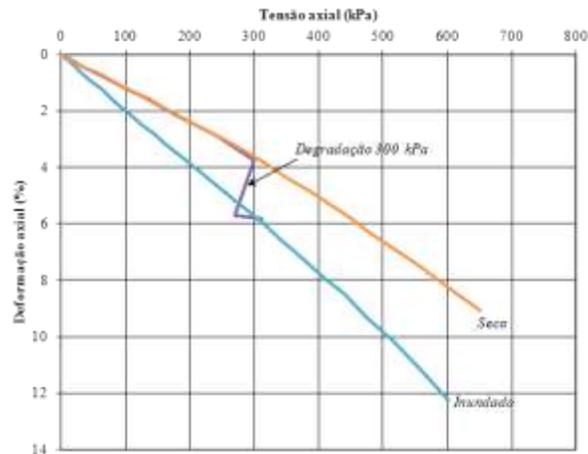


Figura 6.17: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento do arenito de Manso na condição seca, inundada e com ciclos de saturação e secagem na tensão de 300 kPa.

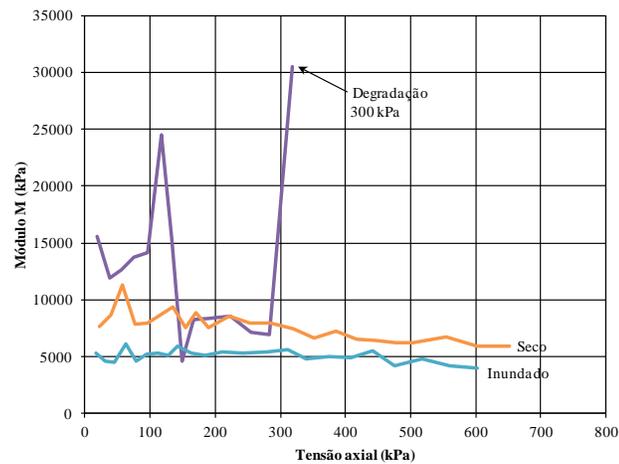


Figura 6.18: Variação do módulo M com a tensão axial no enrocamento de arenito seco, inundado e com ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 300 kPa.

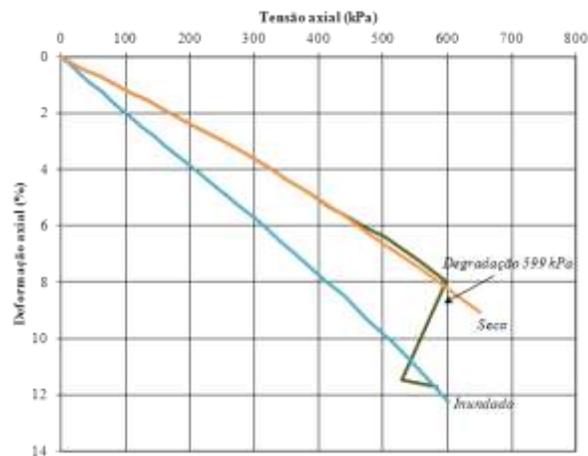


Figura 6.19: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento de arenito de Manso na condição seca, inundada e com ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 599 kPa.

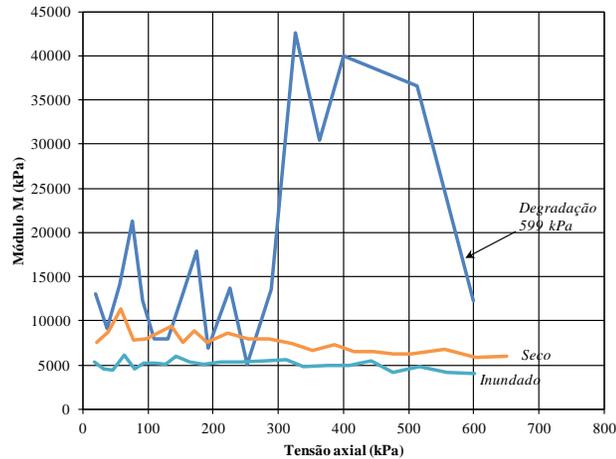


Figura 6.20: Variação do módulo M com a tensão axial no enrocamento de arenito seco, inundado e com ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 599 kPa.

Na Figura 6.21, verifica-se que o processo de degradação do corpo de prova resulta no desenvolvimento de significativas deformações que se estabilizam abaixo da curva σ_v vs. ϵ_v do enrocamento inundado. A nova envoltória obtida, a partir dos ensaios de ciclos de saturação e secagem, corresponde ao comportamento do material degradado por ciclos de umidade, que conforme discutido, mostra elevada compressibilidade.

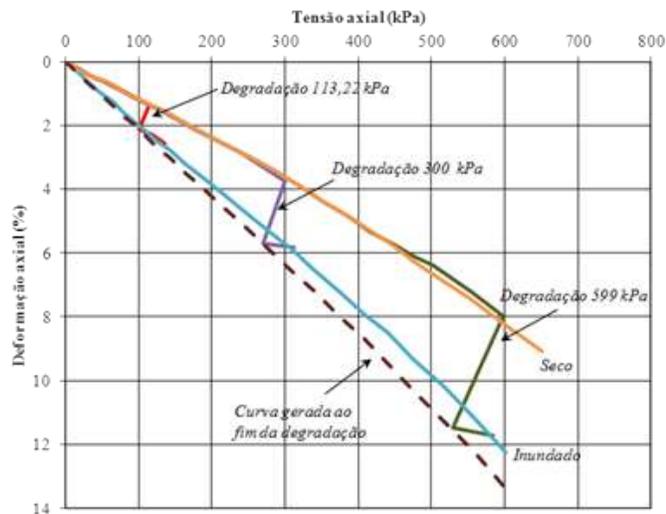


Figura 6.21: Variação da tensão axial vs. deformação axial no enrocamento de Manso na condição seca, inundada e com ciclos de saturação e secagem na tensão igual a 113, 300 e 599 kPa.

O parâmetro AE obtido da curva de comportamento do material degradado por ciclos de saturação e secagem é igual a 43,4, o que indica que a rigidez do material degradado é 1,3 vezes menor que a rigidez apresentada pelo material inundado. Quando comparado ao material seco, observa-se que a rigidez do material degradado é 1,7 vezes menor que o material na condição seca.

O colapso gerado por ciclos de saturação e secagem, correspondente ao incremento porcentual em relação à deformação axial no estágio da ciclagem no corpo de prova, apresentado pelo enrocamento de Manso, foi igual a 55,7; 52; 43,6 % nas tensões de 113, 300 e 599 kPa, respectivamente.

Outro aspecto relevante é que, no final dos ciclos de saturação e secagem, o comportamento do material retorna à curva σ_v vs. ϵ_v do enrocamento de arenito inundado, apresentando maior rigidez.

A Figura 6.22 apresenta gráfico comparativo da tensão axial vs. variação da deformação axial no momento do colapso do corpo de prova, para os ensaios de inundação intermediária e ciclos de saturação e secagem.

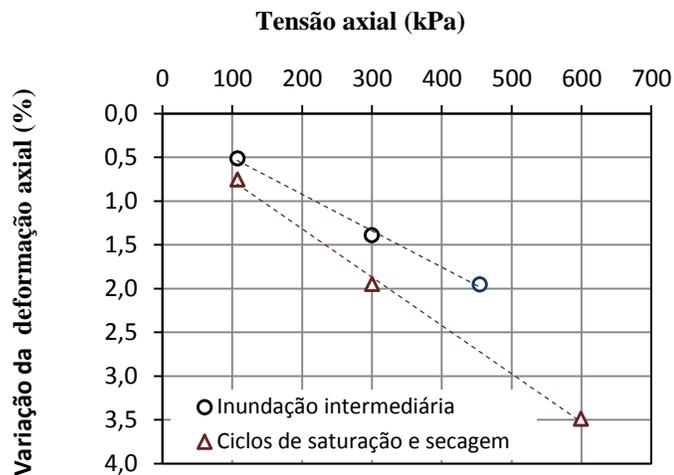


Figura 6.22: Comparativo da tensão axial vs. Variação da deformação axial no momento do colapso do corpo de prova, no enrocamento do arenito de Manso para os ensaios de inundação intermediária e ciclos de saturação e secagem.

A diferença observada no comportamento nos ensaios de compressão confinada com inundação intermediária ou degradação por ciclagem da amostra ocorre no desenvolvimento de deformações mais expressivas do enrocamento arenítico de Manso

durante a realização dos ciclos de saturação e secagem para os níveis de tensão analisados.

A Figura 6.23 apresenta gráfico comparativo da tensão axial vs. colapso no enrocamento de Manso para os ensaios de inundação intermediária e degradação por ciclos de saturação e secagem.

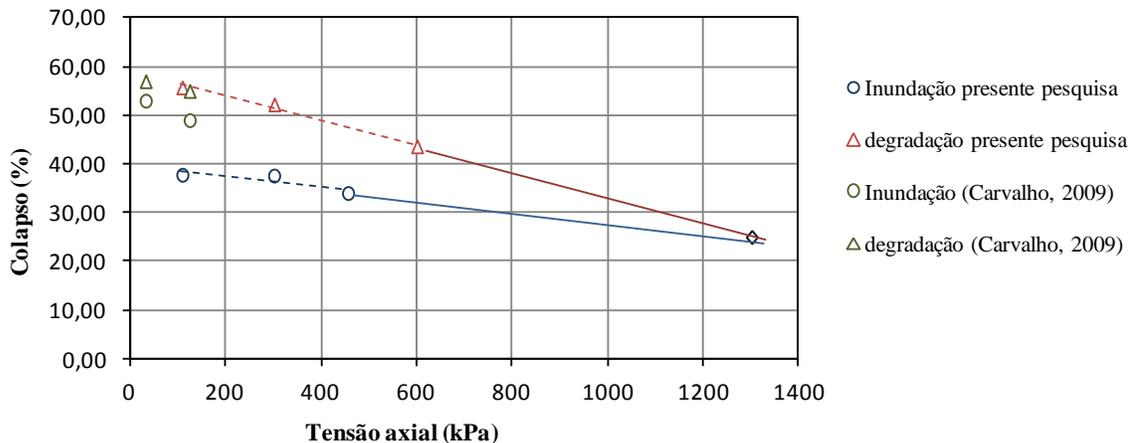


Figura 6.23: Comparativo da tensão axial vs. colapso no enrocamento do arenito de Manso para os ensaios de inundação intermediária e degradação por ciclos de saturação e secagem para diferentes níveis de tensão.

Observa-se que o colapso gerado por degradação foi maior que o colapso gerado por inundação primária, sendo 18% maior para a tensão igual a 100 kPa, 15% maior para a tensão igual a 300 kPa e 10 % para os maiores níveis de tensão ensaiados.

Nota-se que, para maiores tensões, o colapso gerado pela inundação e pela ciclagem apresenta redução. Observa-se que, para o ensaio de degradação por ciclos de saturação e secagem, essa redução é mais significativa.

Admitindo uma variação linear, observa-se que as taxas de colapso tendem para um ponto em comum, correspondente à tensão axial aproximadamente igual a 1300 kPa. Essa tensão equivale a aproximadamente 60 metros de enrocamento.

Carvalho (2009) observou que o efeito do colapso gerado por degradação no enrocamento de Manso revelou deformações mais significativas quando comparado ao processo de inundação. Conforme mostra a Tabela 3.3, para realização dos ensaios, utilizou-se câmara de compressão do tipo rígida suspensa na tensão de 30,7 e

122,8 kPa. O processo de colapso por ciclos de saturação e secagem apresentou deformações na mesma ordem de grandeza da dos ensaios realizados nesta pesquisa. Entretanto, para o processo de inundação intermediária, observa-se que a câmara de fundo móvel apresentou influência no desenvolvimento das deformações.

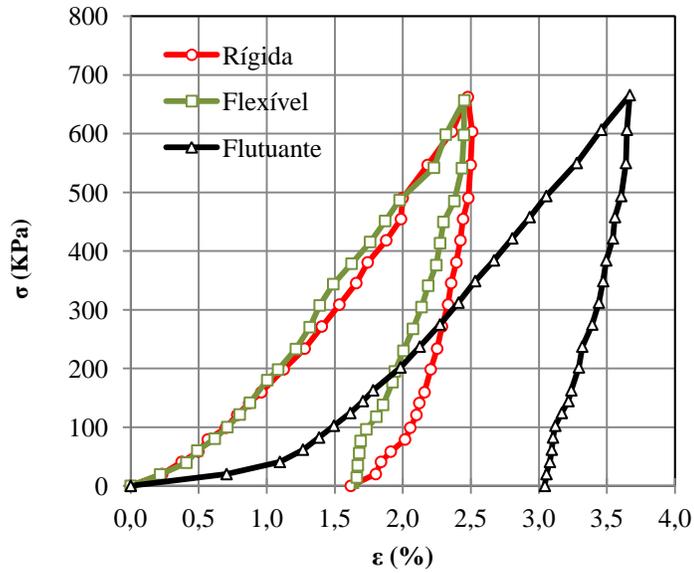
Outro fator relevante a ser discutido é a forma apresentada pela partícula do enrocamento estudado. Na presente pesquisa, realizaram-se ensaios de compressão unidimensional no enrocamento de Manso em partículas com características angulosas. Destaca-se que a superfície específica da partícula é a relação da área superficial por volume da partícula. A superfície específica de uma massa de material granular é o somatório das superfícies das partículas dividido pelo volume de massa. Nota-se que a superfície específica do enrocamento depende da densidade e da forma das partículas do material. Neste sentido, o aumento da densidade e a mudança da forma das partículas vão influenciar o mecanismo de degradação.

6.5 Câmara de compressão unidimensional

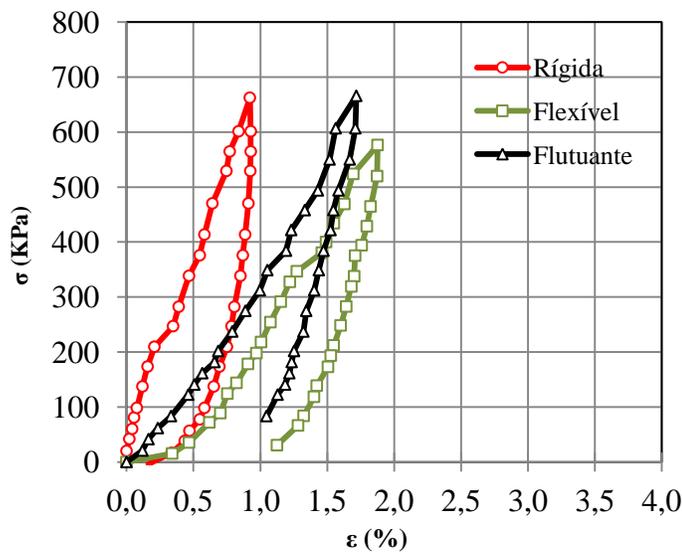
Análise do efeito do tipo de câmara de compressão

A análise quanto ao tipo câmara de compressão unidimensional utilizada auxilia em uma melhor compreensão dos mecanismos de interação entre as partículas constituintes do enrocamento e a câmara de compressão. Para análise do efeito do tipo de câmara de compressão no estudo do comportamento geomecânico de enrocamentos avaliaram-se três diferentes configurações de câmaras (Figura 6.24): câmara rígida, câmara flutuante e câmara flexível.

Para a avaliação do efeito do tipo de câmara em material granular, foram utilizados corpos de prova de areia com densidades relativas iguais a 15% e 95%, representando as condições fofa e densa do material, respectivamente. Nos ensaios foi utilizada areia quartzosa, com granulometria uniforme e grãos arredondados. Foram moldados corpos de prova com diâmetro igual a 30 cm e altura igual a 14,3 cm.



(a) fofo



(b) denso

Figura 6.24: Ensaios de compressão unidimensional. Relação tensão-deformação, avaliada nas diferentes configurações de câmaras de compressão e diferentes estados de compactidade.

Tabela 6.2: Variação do módulo M do material na fase inicial e linear quando avaliada nas diferentes configurações de câmaras de compressão e diferentes estados de compactidade.

(a) fofo

Câmara	M_{linear}	M_{inicial}
Flexível	31,5	9,0
Flutuante	28,5	2,9
Rígida	30,2	8,7

(b) denso

Câmara	M_{linear}	M_{inicial}
Flexível	41,6	4,5
Flutuante	40,8	17,6
Rígida	79,9	103,9

Para o caso de materiais densos, a câmara flexível se mostrou mais adequada, permitindo o desenvolvimento das menores tensões de atrito interno desenvolvido entre o material e a câmara. Para o material fofo, as câmaras flexível e rígida mostram resultados similares, sugerindo que o tipo de câmara não influencia o comportamento da amostra. Maiores investigações são necessárias para verificação do comportamento observado na câmara flutuante.

Avaliação da Câmara de Compressão Flexível e do Equipamento de Compressão Confinada de Grandes Dimensões

Nota-se que o enrocamento ensaiado nesta pesquisa revelou desenvolvimento das deformações superior às obtidas em resultados presentes na literatura, mesmo para pesquisas utilizando câmara de compressão do tipo flexível (Tab. 3.3). Essa diferença no comportamento pode resultar de possível influência quanto ao tipo de material empregado na câmara de compressão nesta pesquisa, com relação ao material que constitui os anéis rígidos e flexíveis. Na câmara utilizada nesta pesquisa o tipo de borracha empregada no anel flexível foi de silicone, que manifesta boa trabalhabilidade, resistência, e suporta temperaturas elevadas. Desse modo, a magnitude das deformações ocorridas sugere que o anel flexível permitiu maior deformação axial do material quando se elevou o nível de tensão.

Além destes fatores, existem outros inerentes ao equipamento utilizado que influenciaram na redução do atrito entre as partículas de enrocamento e as paredes internas da câmara; fatores como o tempo de aplicação de carga no pendural e o sistema de aplicação de carregamento controlado, já que o pendural torna a carga estável.

Outra hipótese a ser considerada são as dimensões do corpo de prova, no que se refere à relação adotada entre o diâmetro da câmara de compressão e a altura. Comumente, a relação adotada é de 1:1, ou seja, altura da amostra igual ao diâmetro. Nesta pesquisa, entretanto, essa relação foi de aproximadamente 2:1. A relação de 1:1 poderia levar a um maior desenvolvimento de atrito, visto que a altura da câmara influencia diretamente na mobilização do atrito interno, pois quanto mais alta a câmara

de compressão, maior a dificuldade de mobilizar o atrito desenvolvido na interface entre o material e a câmara.

Do exposto, observa-se que a câmara de compressão flexível empregada nos ensaios reduziu de forma significativa o possível desenvolvimento de atrito, interferência frequente em ensaios de compressão unidimensional como foi discutido.

Destaca-se que, durante a execução dos ensaios, foi possível ouvir ruídos provenientes da câmara de compressão, devido à quebra das partículas. No mesmo sentido destaca Veiga Pinto (1983) durante seus ensaios: “para estados de tensão mais elevados eram facilmente audíveis estalidos”. Estes estalidos ocorreram sempre nas fases de ensaio na condição seca.

6.6. Tempo

A Figura 6.25 apresenta a variação da tensão axial vs. deformação axial de um ensaio realizado com o critério de estabilização de apenas 1 h. E, outro adotando o critério de estabilização mínimo de 1 h juntamente com a análise do desenvolvimento de deformações, conforme explicado no item 5.2.4.

A comparação entre os ensaios permite observar que o critério de estabilização baseado na aplicação de carregamento confinado durante apenas 1 h não é suficiente para que ocorra o desenvolvimento das deformações durante um estágio de carregamento para o equipamento utilizado.

Uma vez que o ensaio em que se adotaram dois critérios de parada distintos, apresentou mais deformações significativas. Isto sugere que o mecanismo de deformação também é dependente do fator tempo, para o ensaio de compressão unidimensional no equipamento utilizado.

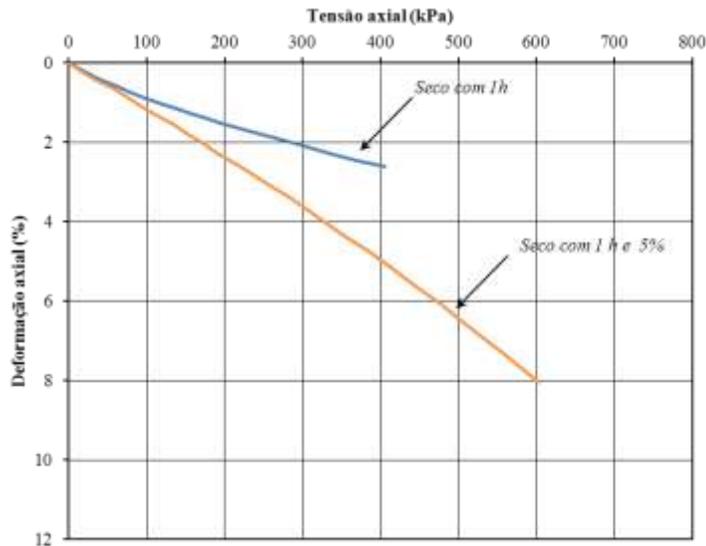


Figura 6.25: Variação tensão axial vs. deformação axial do corpo de prova de arenito, comparação de ensaios na condição seca adotando-se critérios de estabilização distintos.

Para melhor compreensão do comportamento mecânico dos enrocamentos em cada estágio de pressão aplicada, observou-se a relação existente entre a deformação vertical com o tempo para cada estágio de carregamento.

As Figuras 6.26 e 6.27, típicas dos estágios de carregamento, e a Figura 6.28, típica do processo de colapso por inundação intermediária ou por saturação e secagem, apresentam a forma de variação da deformação vertical com a raiz do tempo mais frequentemente observadas durante a realização dos ensaios.

Destaca-se que foram selecionadas as curvas mais representativas do comportamento do material e que o importante para esta análise é o desenvolvimento das deformações, não a grandeza destas.

A Figura 6.26 mostra o comportamento característico do material de enrocamento. Nota-se que, no momento em que há elevação da solicitação axial, desenvolvem-se deformações significativas iniciais, nos primeiros 30 min, seguidas pela estabilização das deformações. Observa-se evolução das deformações de forma monotônica.

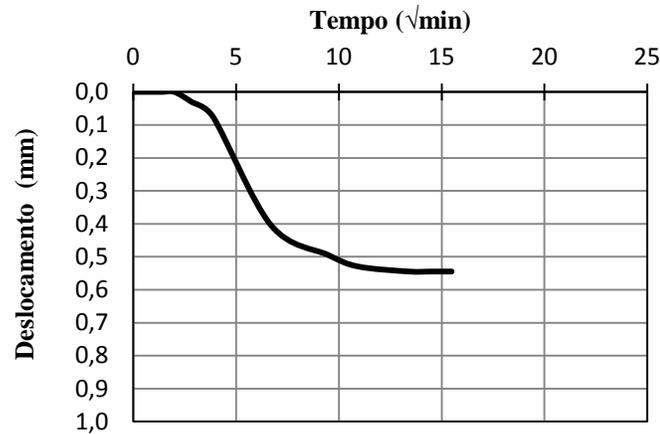


Figura 6.26: Variação da deformação axial com o tempo do corpo de prova do arenito de Manso, comportamento esperado do material de enrocamento.

Na Figura 6.27, verifica-se um comportamento distinto do comportamento característico do enrocamento apresentado anteriormente. Após o aumento de tensão, observa-se, nos primeiros 60 min, o desenvolvimento de deformações do material seguido pela aparente estabilização. No entanto, a amostra desenvolve em seguida um acréscimo de deformação significativo. Isto se explica devido a micro rearranjos entre as partículas que buscam uma nova condição de estabilidade na estrutura granular. Esta movimentação vem da transferência de tensões entres os contatos mais carregados para os menos carregados, buscando uma distribuição de tensões mais uniformes. Assim, há a possibilidade de um contanto entre particulas, que não estava em condição crítica de tensões, entre em processo de ruptura, rearranjando a estrutura granular mesmo sob estado de tensão axial constante.

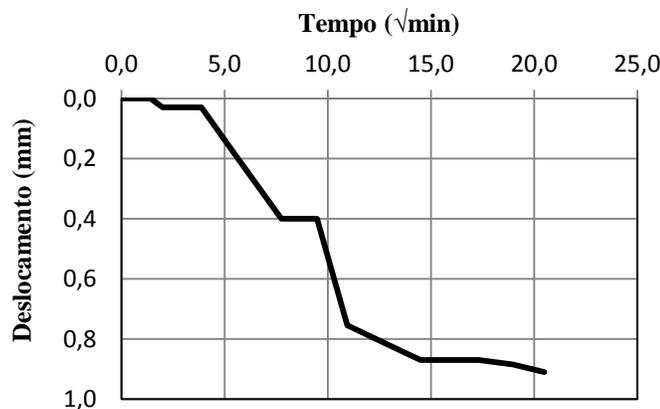


Figura 6.27: Variação da deformação axial com o tempo do corpo de prova do arenito de Manso, comportamento desenvolvido em alguns estágios de carregamento.

A Figura 6.28 mostra que o desenvolvimento de deformações do material durante o processo de colapso no estágio de inundação intermediária e por ciclos de saturação e secagem da amostra apresentou comportamento característico do material de enrocamento. Nota-se que o colapso do material devido à inundação apresenta deformações rápidas devido à queda da resistência da rocha com a presença de água, provocando a quebra dos contatos entre as partículas, ou até mesmo, a quebra da própria partícula seguida de estabilização das deformações.

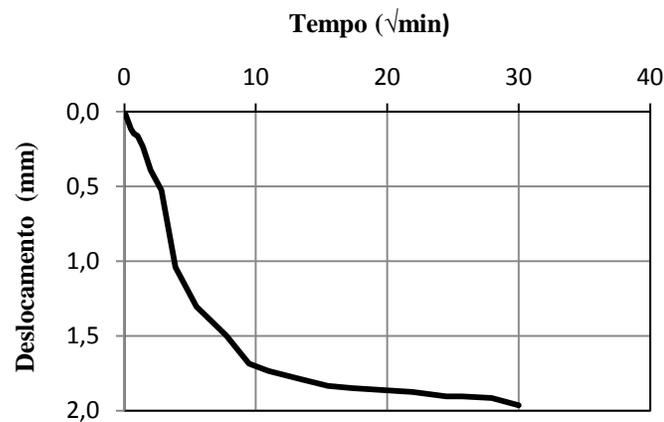


Figura 6.28: Variação deformação axial com o tempo do corpo de prova do arenito de Manso, comportamento desenvolvido durante o estágio de colapso por inundação do material

Conforme mencionado anteriormente, o tempo mínimo de aplicação de carregamento foi de 60 min e o máximo foi de 720 min. Observa-se que a continuação do carregamento, a longo prazo, gera Creep.

As Tabelas 6.3, 6.4 e 6.5 mostram o tempo de duração dos ensaios detalhadamente:

Tabela 6.3: Tempo de duração dos ensaios seco e inundado.

Ensaio	$\sigma_{\text{máx.}}$ (kPa)	Carregamento (h)	Tempo total de ensaio (h)
Seco	652	101	113
Inundado	602	215	227

Tabela 6.4: Tempo de duração dos ensaios de inundação intermediária.

Ensaio	σ (kPa)	Carregamento seco (h)	Inundação intermediária (h)	Carregamento saturado (h)	Tempo total de ensaio (h)
Inundação intermediária	107	38	24	36	98
	299	71	24	8	103
	454	118	24	8	150

Tabela 6.5: Tempo de duração dos ensaios de saturação e secagem.

Ensaio	σ (kPa)	Carregamento seco (h)	Ciclos (h)	Carregamento saturado (h)	Tempo total de ensaio (h)
Saturação e secagem	113	54	180	21	255
	300	90	228	4	322
	599	114	228	12	354

A avaliação do desenvolvimento das deformações axiais com o tempo para o ensaio de degradação por saturação e secagem já foi discutida, uma vez que são dependentes do estado de tensão e não reproduzem o mesmo comportamento em diferentes tensões.

6.7. Grau de quebra (B_g)

Para o ensaio seco e o ensaio inundado foi calculado o grau de quebra (B_g). Os valores de B_g obtidos para o ensaio seco e inundado foram iguais a 5,3 e 7,9 % respectivamente (Figura 6.29). Visto que a deformabilidade do enrocamento inundado foi consideravelmente maior se comparada ao material seco, os valores de B_g são coerentes, uma vez que a compressibilidade do material está inter-relacionada a quebra das partículas, conforme discutido no item 2.6.

Os valores de B_g apresentados para os processos de colapso encontram-se na Tabela 6.6. Observa-se que os valores do grau de quebra obtida para os ensaios de ciclos de saturação e secagem são maiores que os obtidos para os ensaios de inundação intermediária. Isto se deve à maior compressibilidade apresentada pelo enrocamento degradado.

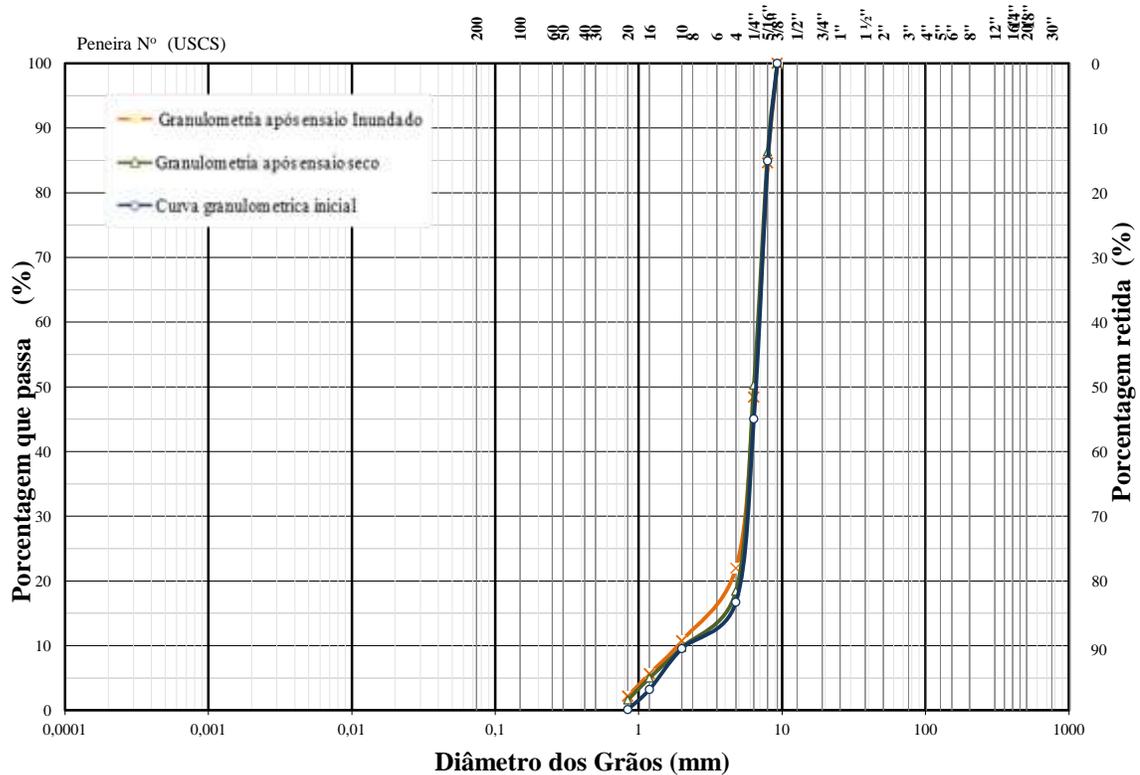


Figura 6.29: Curvas granulométricas inicial e final do enrocamento, referente ao ensaio de compressão confinada seco e inundado.

Tabela 6.6: Valores correspondentes ao grau de quebra (B_g) para o processo de colapso.

Tipo de Ensaio	σ (kPa)	B_g (%) colapso
Seco	-	5,3
Inundado	-	7,9
Inundação intermediária	107	3,1
Inundação intermediária	299	2,7
Inundação intermediária	454	2,5
Ciclos de saturação e secagem	113	5,8
Ciclos de saturação e secagem	300	7,1
Ciclos de saturação e secagem	599	13,3

É importante mencionar que o grau de quebra (B_g) pode sofrer influência relacionada à tensão máxima atingida no ensaio, tipo de câmara, dimensões da câmara de compressão, granulometria do material e tipo de rocha ensaiada.

Após comparação entre as granulometrias antes e depois dos ensaios, foi possível observar o aumento de partículas intermediárias com diâmetros nominais iguais a 4,76 e 2,0 mm, o que sugere a quebra de partículas com maiores diâmetros nominais durante a realização dos ensaios.

6.8. Considerações Finais

A análise dos resultados obtidos nos ensaios de compressão unidimensional permite observar que, na fase inicial do ensaio, não há ruptura de contatos, comportamento definido pela rigidez da matriz sólida. A partir do momento que ocorre a ruptura dos contatos, o comportamento será definido pela interação entre a matriz sólida e a distribuição de vazios de modo que a maior capacidade de maleabilidade das partículas pode reduzir a rigidez do conjunto.

A mudança do comportamento, que é determinada pela matriz sólida individualmente e pela interação entre a matriz sólida e os vazios, é definida pela resistência da rocha e dos contatos. Espera-se que, no caso particular de estudo em que a rocha é de “baixa” resistência, a interação entre a matriz sólida e os vazios defina o comportamento desde a fase inicial de carregamento.

A avaliação do colapso do material permitiu observar desenvolvimento de deformações mais expressivas do enrocamento durante os ensaios de saturação e secagem. Nota-se que, para maiores níveis de tensão, tanto o colapso gerado por inundação quanto por saturação e secagem, apresentam redução. Observa-se que essa redução é mais significativa para o ensaio de saturação e secagem.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi desenvolvida a fim de realizar a avaliação do colapso no material de enrocamento devido à inundação intermediária e a ciclos de saturação e secagem reproduzidos em ensaios, utilizando um equipamento de compressão confinada de grandes dimensões, uma câmara de compressão unidimensional do tipo flexível e um equipamento de ciclagem automático. E, por fim aplicou-se o modelo constitutivo EC- K_0 para reproduzir teoricamente o comportamento do material.

De acordo com os resultados obtidos, são apresentadas a seguir as principais conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Revisão bibliográfica

A partir da revisão bibliográfica realizada para este trabalho, observou-se que ainda há poucas publicações atuais disponíveis sobre enrocamentos. Vale mencionar a relevância das recentes publicações desenvolvidas pelos chineses, das quais se destacam as publicações sobre estudos do comportamento geomecânico do material utilizando equipamentos triaxiais e modelos constitutivos.

Equipamento de compressão confinada e ciclagem automatizado

As adaptações realizadas nos equipamentos de compressão confinada de grandes dimensões e ciclagem automatizada se mostraram satisfatórias, fator que permitiu que o programa experimental fosse executado com sucesso.

Câmara de compressão unidimensional

A câmara de compressão confinada do tipo flexível utilizada nos ensaios apresentou significativa redução do atrito lateral. A trabalhabilidade gerada pelos anéis de silicone, juntamente com a relação entre o diâmetro e a altura, permitiram adequada deformabilidade das paredes da câmara junto com o material quando solicitado. Dessa forma, notou-se redução da influência do atrito entre as partículas e a parede da câmara, reduzindo pois, a tendência de comportamento diferenciado na curva tensão-deformação, o que é comum em programas experimentais em outros tipos de câmara.

Metodologia adotada

A metodologia aplicada mostrou-se eficiente para a avaliação das características de compressibilidade do enrocamento da Barragem de Manso, associadas ao processo de colapso gerado através da inundação intermediária e degradação por saturação e secagem. Ressalta-se que a padronização dos procedimentos de ensaios é fundamental para evitar variações pouco conclusivas nos resultados e, assim, garantir a obtenção de dados de qualidade.

Colapso secundário por degradação por ciclos de saturação e secagem

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que a degradação do enrocamento provoca modificações significativas no seu comportamento. Verifica-se, dessa forma, que a degradação é um fator relevante no estudo de enrocamentos. Além disso, observou-se que a ciclagem por saturação e secagem permite a obtenção de parâmetros importantes do material.

Quanto às curvas tensão vs. deformação obtidas nos ensaios de ciclagem, observa-se que, para o material de enrocamento arenítico, as deformações geradas pela degradação natural da rocha são maiores que as deformações geradas na fase de

enchimento do reservatório. Contudo, para maiores níveis de tensão, essa deformação tende a se aproximar das deformações geradas no primeiro enchimento.

Colapso primário por inundação

A degradação por inundação gera significativas deformações devido ao colapso primário no material de enrocamento. Verificou-se, nesta pesquisa, uma elevada compressibilidade do enrocamento quando submetido à inundação.

Modelo constitutivo

Os resultados teóricos das equações constitutivas permitiram um bom ajuste com as curvas obtidas nos ensaios laboratoriais. Sendo assim, a comparação dos valores experimentais com os valores teóricos previstos pelo do modelo constitutivo EC-K₀ para o enrocamento de arenito evidenciou a adequabilidade da lei constitutiva para este tipo de ensaio.

Índice de Quebra (B_g)

Quanto ao índice de quebra (B_g), observa-se a expressiva influência de vários fatores como tensão máxima de ensaio, granulometria, tipo de câmara de compressão, litologia do material e procedimento de compactação

Recomendações

No intuito de contribuir para o desenvolvimento de novas pesquisas sobre o comportamento mecânico e de durabilidade dos enrocamentos, sugerem-se para trabalhos futuros:

- Com relação ao equipamento, recomenda-se, para pesquisas futuras, ajustar o sistema de nivelamento para maiores níveis de tensões;

- Recomenda-se, ainda, realizar ensaios com diferentes densidades, a fim de avaliar a influência do estado de compactação no desenvolvimento de deformações na câmara flexível;

- É importante executar ensaio de compressão unidimensional simultaneamente à ciclagem em amostras compactadas com molhagem, para avaliar a influência da degradação por ciclos de umidade em amostras compactadas com molhagem;

- Indica-se realizar ensaios de compressão unidimensional no enrocamento arenítico da Barragem de Manso com o material na condição alterada;

- Aconselha-se executar ensaios em tensões mais elevadas, uma vez que as Barragens construídas tem sido cada vez maiores;

- Recomenda-se, finalmente, comparar parâmetros de ensaios experimentais com parâmetros obtidos de retroanálises baseados em barragens instrumentadas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1979. *Determinação da Resistência ao Choque*. Rio de Janeiro, Designação da norma: ABNT - MB 964/79.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. *Agregados: Determinação da Abrasão Los Angeles*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Designação da norma: ABNT -NBR 6465/84.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1992a. *Rocha para revestimento - Análise Petrográfica*. Rio de Janeiro, Designação da norma: ABNT - NBR 12768/92.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1992b. *Apreciação Petrográfica de Materiais Naturais para Utilização como Agregado em Concreto*. Rio de Janeiro, Designação da norma: ABNT - NBR 7389/92.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2006. *Estacas - Prova de carga estática*. Rio de Janeiro, Designação da norma: ABNT -NBR 12131.
- ALMEIDA, M. M. (2010). *Estudo Tensão Deformação de Barragem de Terra e Enrocamento*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, NUGEO, da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto-MG, pp.1-139.
- ANTHINIAC, P. (1999). *Modélisation hydroplastique des enrochements de barrage en elements finis*. Tese de Doutorado. Universidade de Aix- Marseille II, França,198p.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. 1963. *Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulphate or Magnesium Sulphate*. ASTM Test Designation: C 88-63.

- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. 1987. *Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks*. Reproved 1992. ASTM Test Designation: D 4644-87.
- BASSO, V. R. (2007). *Estudo tensão-deformação de um enrocamento visando barragens de enrocamento com face de concreto*. Dissertação de Mestrado. USP - Universidade de São Paulo-SP, pp. 1-112
- 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.; CHEN, C.; SEED, B. (1972). *Strength and deformation characteristics of rockfill Materials in Plane Strain and Triaxial Compression Tests*. Department of Civil Engineering, Report TE-72-3, University of California, Berkeley, pp. 1-121.
- CAPRONI JR., N., ARMELIN, J. L., CASTRO, C. H. (1999). *Deformabilidad de un Material Granular Obtenida en Ensayos de Compresión Unidimensional*. XI Congreso Pan-Americano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Foz do Iguazu, vol.1, pp.187-192.
- CAPRONI JR., N; ARMELIN, J. L. (1998). *Deformabilidade de um Enrocamento obtida em ensaios de compressão unidimensional*. Xi Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, pp. 705-712.
- CARVALHO, N. de O. V. (2009). *Desenvolvimento de equipamento para estudo da compressibilidade de enrocamentos durante processos de degradação*. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Geotecnia, Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, pp. 1-128
- CEA, J. C.; OLALLA, C. (1993). *Estudio de la Resistencia al Corte de la Escollera Empleada en los Espaldones de la Presa de Canales (Granada)*. Simposio sobre Geotecnia de Presas de Materiales Suelos. Comunicación no. 1.01, pp. 61-67.

- CRUZ, P.T.; Materón, Bayardo; Freitas, Manoel. (2009). *Barragens de Enrocamento com Face de Concreto. Oficina de Textos, São Paulo-SP, 448p.*
- CUBEROS, O. H. (2003). *Compresibilidad de escoleras. Influencia de la humedad relativa*. Diss. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, (Enginyeria Geològica).
- CUNHA PINTO, V. (2006). *Estudo da Degradação de Geotêxteis Tecidos*. Dissertação de Mestrado. Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, RJ, 133p.
- DIAS, A. C. (2001). *Caracterização mecânica de enrocamentos através de ensaios de grande escala visando barragens com face de concreto*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 114 p.
- DIAS, J.O.M.P. (2010). *Efeitos do Clima no Comportamento de Barragens de Terra-Enrocamento*. Dissertação de Mestrado, IST da Universidade Técnica de Lisboa, pp. 1-94.
- DONAGHE, R. e COHEN, M. (1978). *Strength and deformation properties of rockfill, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Report S-78-1, Vicksburg, pp.1-24*
- ELETROSUL (1986). Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A. *Interpretação de ensaios de adensamento unidimensional sobre amostras de enrocamento*. Relatório interno. Florianópolis (citado em Pacheco 2005).
- EN - EUROPÄISCHE NORM. (1996). *Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates*. Part 1: Determination of the Resistance to Wear (Micro-Deval). Bruxelles, Test Designation: EN 1097-1.

- FARJALLAT, J. E. S. (1972). Relato sobre o Tema: *Desagregabilidade de Rochas e Problemas Relativos à sua Aplicabilidade*. 4ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, São Paulo, vol. II A, pp. 19-53.
- FRAHIA NETO, S. H. (1996). *Estudo do Comportamento da Barragem de Xingó Objetivando uma Contribuição à Validação Experimental de Modelos Teóricos de Análise*. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro - RJ, julho, pp. 1-283.
- FRAZÃO, E. B. (1993). *Metodologia para avaliação da alterabilidade de rochas a partir de estudo experimental em amostras de basalto da Uhe de Três Irmãos - Estado de São Paulo*. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, pp. 1-175.
- FRAZÃO, E. B.; CARUSO, L. G. (1983). *Síntese do Conhecimento sobre Alterabilidade de Rochas Basálticas como Material de Construção em Algumas Barragens da Bacia do Alto Paraná*. Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná vol. II A, São Paulo - SP, pp. 21-33.
- FUMAGALLI, E. (1969). *Tests on Cohesionless Materials for Rockfill Dams*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, SM 1, January, pp. 313-330.
- GOOD, R.J. (1976). Kangaroo Creek dam. *Use of a Weak Schist as Rockfill for a Concrete Faced Rockfill Dam*. 12th International conference on Large Dams. México, Q.44, R.33 (citado em Cea 1998)
- HOLTZ, W.; GIBBS (1956). *Triaxial Shear Tests on previous gravelly soils*. Proc. A.S.C.E., *Journal of the soil mechanic a foundation division*, sm 1, January. p. 313-330.
- HORN, H. M.; DEERE, D. U. (1962). *Frictional Characteristics of Minerals*. *Geotechnique*, vol. 12, no. 4, pp. 319-335.

- ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods*, Ed. E.T. Brow, Pergamon Press, Oxford, pp.1-212.
- 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. Norwegian Geotechnical Institute*, Publication no. 66 (citado em Cea 1998)
- KOHGO, Y.; ASANO, I.; HAYASHIDA, Y. (2007). *An Elastoplastic Model for Unsaturated Rockfills and its Simulations of Laboratory Tests*. Soils and Foundations. Vol.47. No.5, pp.919-929.
- KOPPE, J. C.; ZINGANO, A. C.; COSTA, J. F. C. L. (2005). *Alterabilidade de Rochas Ornamentais, a Importância das Propriedades Tecnológicas na Seleção de Revestimentos Externos*. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 5 p.
- LAMA, R.D.; VUTUKURI, X.S. (1978). *Handbook of Mechanical Properties of Rock*. Vol. IV, Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- LESLIE, D. (1969). *Relationships Between Shear Strength, Gradation and Index Properties of Rockfill Materials*. Specialty session no. 13, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, pp. 201-210.
- LOPES, M. C., LANA, M. S., RIBEIRO, L. F. M., SILVA, C. H. C., (2007). *Comportamento geotécnico de rochas brandas na mina Córrego do Sítio, Santa Bárbara (MG)*. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 60, n.3, pp. 471-476.
- LOPES, M.C.O. (2000). *Disposição Hidráulica de Rejeitos Arenosos e Influência nos Parâmetros de Resistência*. Dissertação de Mestrado, Publicação GDM-068A/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília DF, 157 p.

- LOWE, J. (1964). *Shear Strength of Coarse Embankment Dam Materials*. 8th International Conference on Large Dams, Edimburgo, pp.745-761.
- MAIA, P. C. A. (2001). *Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos*. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, PUC. Rio de Janeiro – RJ.
- MAIA, P. C. A. ; SAYÃO, A. S. F. J. ; NUNES, A. L. L. S. (2003). *Alterabilidade de Rocha Basáltica - Caracterização Mecânica*. Solos e Rochas, v. 26, n. 3, p. 205-215.
- MARACHI, D.; CHAN, C.; SEED, B. (1972). *Evaluation of Properties of Rockfill Materials*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 98, no. SM1, Proc. Paper 8672, January, pp. 95-114.
- MARANHA DAS NEVES, E. (2002). *Algumas considerações sobre a mecânica dos enrocamentos*. Solos e Rochas, v. 25, n. 3, p. 161-203.
- MARSAL, R. J. (1973a). *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 Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1.2, Moscow, pp. 259-264.
- MARSAL, R. J.; RESENDIZ, D. (1975). *Presas de Tierra y Enrocamiento*, Pub. Editorial Limusa, México, D. F., pp.1-546 (citado em Veiga Pinto 1983).
- MARSAL, R.J (1965). *Research on Behavior of Granular Materials and Rockfill Samples*. Comisión Federal de Eletricidad, 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 Compressibilidad de Enrocamientos y Gravas*. Universidad Nacional Autónoma do México, Publicação 306.
- MARSAL, R.J.; RAMIREZ, L. (1967). *Performance of el infiernillo dam, 1963-66*, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, no. SM4, pp. 265-298.
- MATOS, L. F. S.; ROCHA, J. C. (2005). *Caracterização da Alterabilidade do Mármore CAMBORIÚ-SC*. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 5 p.
- MEIRELLES, M. C. (2008). *Determinação da Resistência ao Cisalhamento de Enrocamento da UHE Machadinho Através de Ensaios de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina– UFSC, pp.1-123.
- MINETTE, E. (1982). *Quantificação Geomecânica e de Alterabilidade de um Diorito*. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1-262.
- NOBARI, e. E DUNCAN, J. (1972). *Effect on reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams*, Department of Civil Engineering, Report N.º TE-72-1, University of California, pp. 1-186.
- OLDECOP, L. A.; ALONSO E. E. (2003). *Suction effects on rockfill compressibility*. *Geotechnique*. v.53, No. 2, pp.289-292.
- OLDECOP, L. A.; ALONSO, E. E. (2001). *A model for rockfill compressibility*. *Géotechnique*. v.51, No. 2, pp. 127-139.
- OLDECOP, L. A.; ALONSO, E. E. (2007). *Theoretical investigation of the time-dependent behaviour of rockfill* *Geotechnique*. V. 57, No. 3, pp. 289-301.
- PACHECO, D. (2005). *Compressão unidimensional em enrocamento de basalto: desenvolvimento do equipamento e realização de ensaios*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, SC, novembro, pp. 1-206.

- PENMAN, A. D. M.; BURLAND, J. B.; CHARLES, J. A. (1971). *Observed and predicted deformations in a large embankment dam during construction*. Proc. of the ICE, v. 49.
- PENMAN, A. D.; (1971). *Rockfill*. Building Research Station, Department of the Environment, Current paper 15/71, pp. 1-10 (citado em Cea 1998).
- PENMAN, A. D.; CHARLES, J. A. (1976). *The quality and suitability of rockfill used in dam construction*. Douzieme Congrees on Large Dams, pp- 533-556.
- PESSIN, J. (2014). *Aplicação do Modelo Ec-K0 a Ensaios de Compressão Unidimensional em Enrocamentos*. VI COFICT - VI Congresso Fluminense de Iniciação Científica e Tecnológica, UENF-Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Pinheiro, A. D.; Maia, P.C.A. (2004). *Avaliação da Durabilidade de Materiais Cerâmicos Vermelhos*. I Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, São Carlos-SP, ABMS, 6p.
- ROOSTA, R. M.; Alizadeh, A. (2012). *Simulation of collapse settlement in rockfill material due to saturation*. International Journal of Civil Engineering - Vol. 10, No. 2, pp.93-99.
- SABOYA, JR. F. (1993). *Análise de Barragens de Enrocamento com Face de Concreto Durante o Período de Construção e enchimento*. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, junho, pp. 1-283
- SAKAI T.; NAKANO M. (2013). *Interpretation of the Effect of Compaction on the Mechanical Behavior of Embankment Materials Based on the Soil Skeleton Structure Concept*. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris – pp.1179-1182.
- SALLES, R. O. (2013). *Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade da Rocha Gnáissica da Obra do AHE Simplício*. Tese de Doutorado – Programa de Pós-

graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – RJ, pp. 1-177.

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. (2006). *Durabilidade de geossintéticos em equipamentos de degradação em laboratório*. Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, pp. 1-106.

SAMPAIO, M. N. (2010). *Avaliação do colapso por degradação em enrocamentos arenítico e basáltico através de procedimentos de laboratório*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 83 p.

SANTIAGO, L. O. R.; MARQUES, E. A. G.; BOTELHO, B. S.; RODRIGUES, W.; COSTA, T. A. V. (2004). *Correlações Entre o Grau de Alteração, a Alterabilidade e a Resistência à Compressão, para um Filito Sericítico*. I Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, São Carlos-SP, ABMS, 6p.

SANTOS, A.C.C.; FLEURY, S.V.; ASSIS, A.P. *Estudo de laboratório da deformabilidade de enrocamentos considerando o efeito de escala*. In: XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Goiânia, 2005, Goiânia.

SAYÃO, S. F. J. A.; CASTRO, C. H. (1998). *Previsão do Comportamento da Barragem de Serra da Mesa Durante a Construção*. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, vol. 1, pp. 423-430 .

SHOA, E. D.; MASE, G. E. (1966). *Effects of Confining Pressure on Polycrystalline Rock Behavior Analyzed by Rheological Theory*. 1st International Congress of the ISRM, Lisboa, ISRM, vol.1, pp. 733-747. SHORT, N. W. 1961. Geochemical Variations.

SILVA, J.M.M. (1996). *Modelação do colapso e da fluência em aterros*. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- 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.
- TERZAGHI, K., (1960). *Discussion on settlement of Salt Springs and Lower Bear River concrete face dams*. Trans. Amer. Soc. of civil engineers, vol. 125, part II, p.139-48
- THIERS, G. R.; DONOVAN, T. D. (1981). *Field Density, Gradation, and Triaxial Testing of Large-size Rockfill for LITTLE Blue Run Dam*. Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP 740, pp. 315-328.
- TOMBS, S. G. (1969). *Strength and Deformations Characteristics of Rockfill*. Ph.D. Thesis, University of London.
- VALLERGA, B.; SEED, B.; MONISMITH, C.; COOPER, R. (1957). *Effect of Shape Size and Surface Roughness of Aggregate Particles on the Strength of Granular Materials*. Special Technical Publication no. 212, ASTM.
- VEIGA PINTO, A. A. (1979). *Características de resistência e deformabilidade de enrocamentos*. Geotecnia, no. 27, Lisboa, pp. 3-41.
- VEIGA PINTO, A. A. (1982). *Modelação de Enrocamentos*. Dissertação de Mestrado da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, pp. 1-76.
- VEIGA PINTO, A. A. (1983). *Previsão do comportamento estrutural de barragens de enrocamento*. Tese apresentada para obtenção do grau de especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal - LNEC, Lisboa, pp. 1-157.
- WANG, L.; ZENG J. et. al (2011). *A decision support system for substage-zoning filling design of rock-fill dams based on particle swarm optimization*. Published online: 26 March 2011-Springer Science+Business Media, pp. 111-119.
- WATZKO, A. (2007). *Barragens de enrocamento com face de concreto no Brasil*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,

Laboratório de Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC,
pp.1-106.

ZELLER, J.; WULLIMANN, R. (1957). *The Shear Strength of the Shell Materials for the Göschenentalp Dam* - Switzerland. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.2, pp.399-415.

ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO CONFINADA

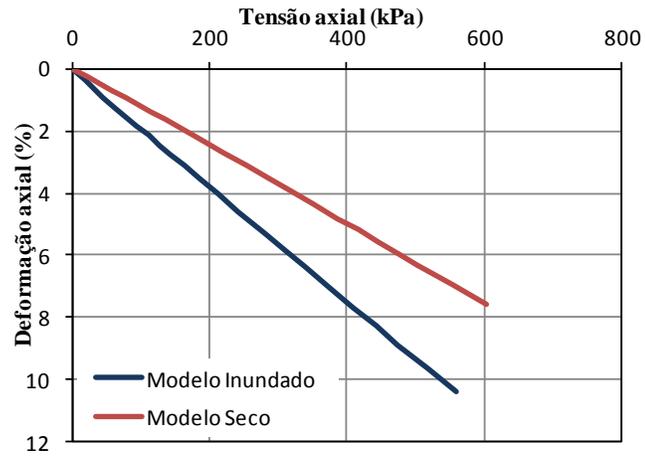


Figura A.1: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K₀

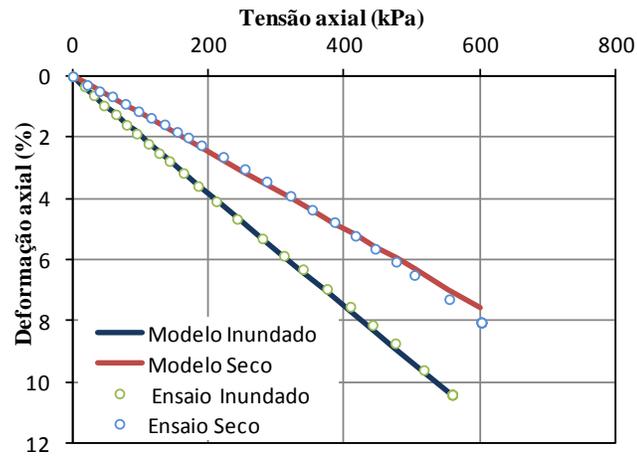


Figura A.2: Comparação da variação tensão axial vs. deformação axial experimental e teórica do modelo EC-K₀

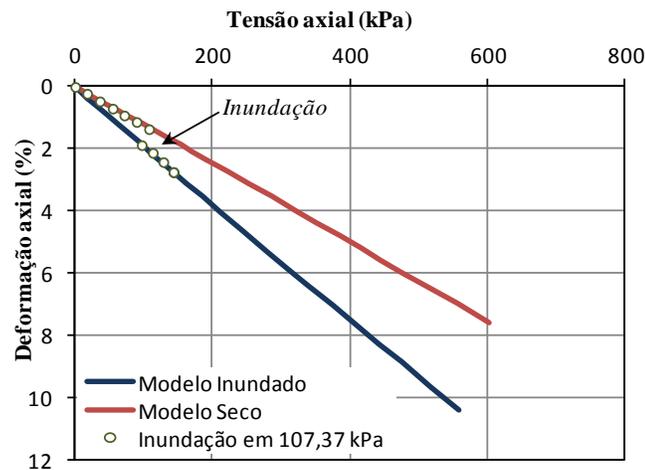


Figura A.3: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K₀ associado ao ensaio de inundação em 107,37 kPa.

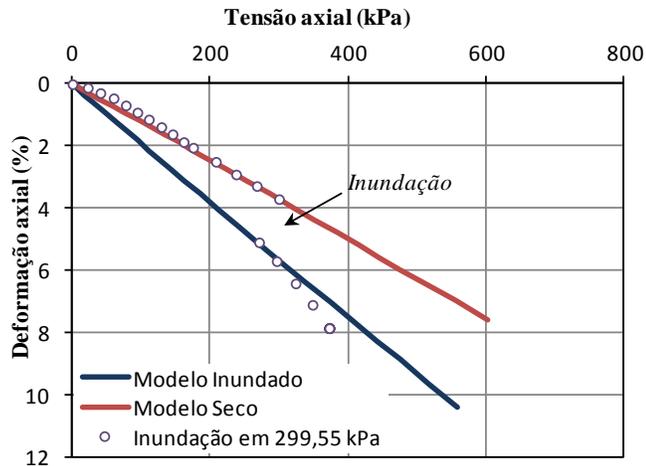


Figura A.4: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K₀ associado ao ensaio de inundação em 299,55 kPa.

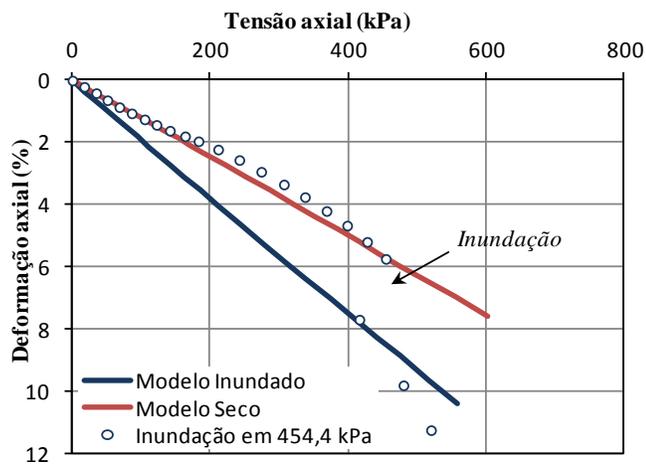


Figura A.5: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K₀ associado ao ensaio de inundação em 454,5 kPa.

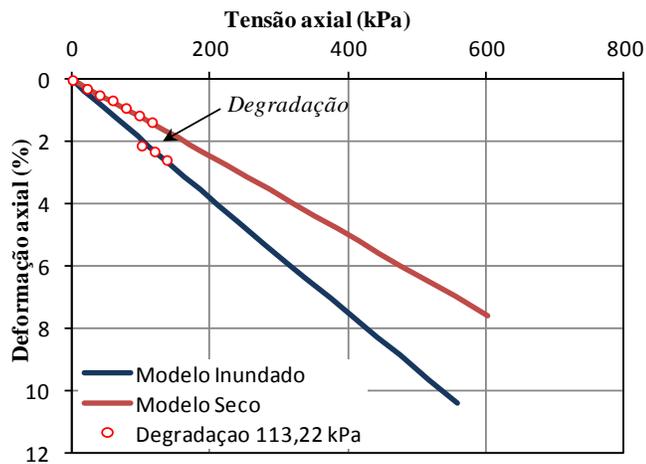


Figura A.6: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K₀ associado ao ensaio de degradação em 113,22 kPa.

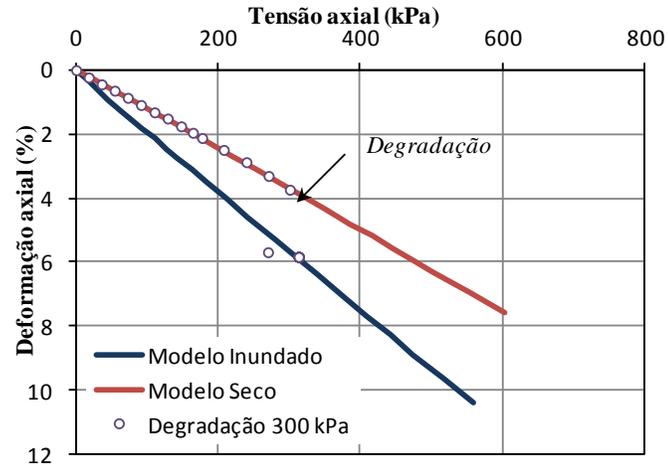


Figura A.7: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K₀ associado ao ensaio de degradação em 300 kPa.

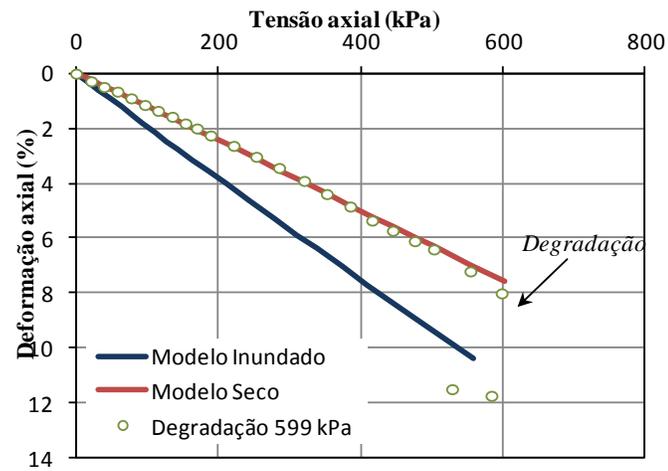


Figura A.8: Variação da tensão axial vs. deformação axial teóricas do modelo EC-K₀ associado ao ensaio de degradação em 599 kPa.