

**Avaliação do Colapso por Degradação em Enrocamentos Arenítico
e Basáltico através de Procedimentos de Laboratório**

Marconi Neves Sampaio

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Campos dos Goytacazes – RJ

Setembro, 2010

Avaliação do Colapso por Degradação em Enrocamentos Arenítico e Basáltico através de Procedimentos de Laboratório

Marconi Neves Sampaio

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

Orientador: Prof. Gustavo de Castro Xavier
Co-orientador: Prof. Paulo César de Almeida Maia
Campos dos Goytacazes – RJ

Setembro, 2010

Avaliação do Colapso por Degradação em Enrocamentos Arenítico e Basáltico através de Procedimentos de Laboratório

Marconi Neves Sampaio

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

Aprovada em 21 de setembro de 2010

Comissão Examinadora:

Prof. Roberto Francisco de Azevedo, UFV

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Jr., UENF

Prof. Paulo César de Almeida Maia, UENF

Co-Orientador

Prof. Gustavo de Castro Xavier, UENF

Orientador

Agradecimentos

Primeiramente, à Deus, por ter me dado vida e a oportunidade de concluir este curso e a Jesus, por ser o meu melhor amigo em todos os momentos.

À minha mãe Maria Lucia Neves Sampaio e às minhas irmãs Natália e Bethânia. Tudo o que sou eu devo a vocês.

Aos meus cunhados André Sarlo e André Coelho pelo companheirismo e parceria.

Aos meus amigos Jair, Davi, Gabriel, Cássia, Priscilla, Isabel, Daniele, Maria Fernanda, Flávia, Rodolfo, Aliny e Viviane. Vocês fazem os meus dias mais felizes e a caminhada mais prazerosa.

Aos meus orientadores Gustavo Xavier e Paulo Maia pelo apoio, incentivo, transmissão de conhecimento e paciência.

Por fim, a todos que me ajudaram de alguma forma no decorrer do curso até sua conclusão.

Sumário

1.	Capítulo 1 - Introdução	15
1.1.	Considerações iniciais	15
1.2.	Objetivos	16
1.3.	Organização do trabalho	17
2.	Capítulo 2 – Comportamento geomecânico de enrocamentos	19
2.1.	Características que determinam o comportamento dos enrocamentos	19
2.1.1.	Estado de tensão	19
2.1.2.	Partículas Constituintes do Enrocamento	21
2.1.3.	Enrocamento como meio granular	25
2.1.4.	Procedimentos de ensaio	29
2.2.	Alteração de enrocamentos	30
2.2.1.	Mecanismos de degradação	31
2.2.2.	Efeitos da degradação	32
2.2.3.	Metodologia para avaliação da alteração de enrocamentos	33
2.3.	Considerações finais	35
3.	Capítulo 3 – Programa experimental	36
3.1.	Compressão confinada	36
3.2.	Equipamento de saturação e secagem	41
3.3.	Acoplagem dos equipamentos	43
4.	Capítulo 4 – Materiais de estudo e programa experimental	47
4.1.	Enrocamento arenítico	47
4.2.	Enrocamento basáltico	52
4.3.	Programa experimental	54
4.3.1.	Colapso por inundação	55
4.3.2.	Colapso por degradação	55
5.	Capítulo 5 – Apresentação e análise de resultados	59
5.1.	Efeito da granulometria e tipo de colapso	59
5.2.	Efeito da tensão confinante e tipo de rocha	63
5.3.	Efeito da granulometria na compressibilidade	68
5.4.	Efeito do tipo de material na compressibilidade	71
5.5.	Efeito da tensão axial na compressibilidade	73

6. Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões	75
6.1. Conclusões	75
6.2. Sugestões	77
Referências Bibliográficas	78

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Valores recomendados para a relação D/d_{max}	29
Tabela 2.2: Mecanismos de degradação de natureza física e química em materiais geotécnicos (Carvalho, 2009).....	31
Tabela 5.1: Efeitos analisados no programa experimental.....	59
Tabela 5.2: Níveis de deformação provocados pelo procedimentos de colapso na tensão de confinamento igual a 30,7kPa para os enrocamentos de arenito	62

Lista de Figuras

Figura 2.1: Variação do ângulo de resistência ao cisalhamento interno com o nível de tensão dos materiais de enrocamento (Maia, 2001)	21
Figura 2.2: Curvas de deformação uniaxial vs. tensão axial em compressão unidimensional em enrocamentos de granulometria uniforme (Nobari e Duncan, 1972).	27
Figura 2.3: Metodologia para avaliação da alterabilidade de enrocamentos. (Maia, 2001).	34
Figura 3.1: Vista lateral do equipamento.	38
Figura 3.2: Vista lateral da câmara de compressão.	39
Figura 3.3: Anel utilizado na câmara de compressão unidimensional.	40
Figura 3.4: Equipamento de degradação por saturação e secagem da UENF	41
Figura 3.5: Esquema de funcionamento do equipamento de saturação e secagem.	42
Figura 3.6: Equipamento de degradação acoplado ao equipamento de compressão confinada.	44
Figura 3.7: Diferentes montagens do equipamento de compressão.	45
Figura 3.8: Topo da câmara de degradação e sistema de medida de deslocamento vertical.	45
Figura 3.9: Esquema do Equipamento.	46
Figura 4.1: Barragem de Manso, Cuiabá – MT.	47
Figura 4.2: Enrocamento da Barragem de Manso.	48
Figura 4.3: Vista aérea da Barragem de Manso (GOOGLE, 2010).	48
Figura 4.4: Seção transversal da margem direita da Barragem de Manso. (FURNAS, 1997)	49
Figura 4.5: Faixa granulométrica do enrocamento E1 da Barragem de Manso.	50
Figura 4.6: Processo de degradação acelerado do enrocamento da Barragem de Manso.	51
Figura 4.7: Enrocamento abaixo do nível mínimo do reservatório da Barragem de Manso.	51
Figura 4.8: Local de instalação do eixo da UHE Foz do Chapecó (Ramos, 2009).	52
Figura 4.9: Arranjo geral da UHE Foz do Chapecó (Ramos, 2009)	53
Figura 4.10: Faixa granulométrica do enrocamento da Barragem de Chapecó.	53

Figura 4.11: Curvas de saturação e secagem obtidas em ensaios de absorção e secagem para o enrocamento arenítico (Carvalho,2009).	56
Figura 4.12: Curvas de saturação e secagem obtidas em ensaios de absorção e secagem para o enrocamento basáltico.....	56
Figura 4.13: Ensaio de calibração do equipamento.	57
Figura 4.14: Variação das deformações axiais com o número de ciclos no ensaio de ciclagem em enrocamento arenítico (adaptado de Carvalho, 2009).	58
Figura 5.1: Variação da deformação axial com a tensão vertical no enrocamento bem graduado seco, saturado e com inundação.....	60
Figura 5.2: Variação da deformação axial com a tensão vertical no enrocamento uniforme seco, saturado e com inundação (Carvalho, 2009).	60
Figura 5.3: Variação da tensão com a deformação vertical.	61
Figura 5.4: Variação da tensão com a deformação vertical (Carvalho, 2009).	62
Figura 5.5: Variação da tensão com a deformação vertical.	63
Figura 5.6: Variação da tensão com a deformação vertical.	64
Figura 5.7: Variação da deformação axial com a tensão vertical no enrocamento bem graduado seco, saturado e com inundação.....	65
Figura 5.8: Variação da tensão com a deformação vertical.	65
Figura 5.9: Variação da tensão com a deformação vertical.	66
Figura 5.10: Variação da tensão com a deformação vertical.	67
Figura 5.11: Variações das deformações por colapso por inundação e ciclagem no arenito e basalto bem graduados.	67
Figura 5.12: Variação da deformabilidade para o arenito bem graduado e uniforme nos estados seco e saturado.....	69
Figura 5.13: Variação da porcentagem de aumento da deformabilidade com a tensão axial gerado pela saturação no enrocamento de arenito.....	71
Figura 5.14: Variação do Módulo M com a tensão vertical no enrocamento arenítico bem graduado e uniforme e basáltico.	72
Figura 5.15: Variações da compressibilidade por colapso e ciclagem no arenito e basalto bem graduados nas diferentes tensões axiais.	73
Figura 5.16: Variações da compressibilidade por inundação no arenito e basalto bem graduados.	74

Lista de Símbolos

ASTM	.....American Society for Testing and Materials
B_g	.....índice de fraturamento
C_c	.....coeficiente de curvatura
C_u	.....coeficiente de uniformidade da curva granulométrica
D	.....dimensão mínima do corpo de prova
d_{max}	.....dimensão máxima das partículas
D_r	.....<i>densidade relativa</i>
EDX	.....ensaio de dispersão de Raios-X
kPa	.....kilopascal
MW	.....megawatt
N.A.	.....nível da água
UHE	.....Unidade Hidrelétrica
σ'_r	.....tensão normal
φ'	.....ângulo de resistência ao cisalhamento

RESUMO

Este trabalho visa o estudo experimental do efeito da alteração no comportamento mecânico de materiais de enrocamento, considerando as variações de deformabilidade e resistência provocadas pela alteração da rocha e pelas variações das características intrínsecas do enrocamento, tais como, litologia, granulometria, efeito de escala, umidade e as características das partículas. É considerado um programa experimental envolvendo dois tipos de litologia de rochas constituintes dos enrocamentos: das barragens de Manso, constituída de arenito e a barragem de Chapecó, constituída de basalto.

Para avaliar a alterabilidade do material foi elaborada uma metodologia comparando-se os parâmetros dos enrocamentos intactos, ou seja, não alterados e degradados no laboratório. Os materiais foram ensaiados no equipamento de grandes dimensões desenvolvido no Laboratório de Engenharia Civil da UENF, que possibilita a realização de ensaios de compressão unidimensional nas amostras simultaneamente ao processo de degradação.

Os resultados indicam que a granulometria, o teor de umidade, o tipo de rocha e a tensão axial influenciam significativamente na variação das deformações e da compressibilidade dos enrocamentos estudados.

O programa experimental desenvolvido mostrou-se satisfatório para a avaliação da compressibilidade do enrocamento da Barragem de Manso e de Chapecó devido a processos de degradação por ciclos de saturação e secagem.

ABSTRACT

This work aims the experimental study concerning the alteration effect on the mechanical behavior of the rockfill materials considering the variations of deformability and strength caused by the rock alteration and by the variations of the intrinsic properties of the rockfill, such as lithology, particle size distribution, scale effect, humidity and the properties of the particles. It is regarded as an experimental program involving two sorts of lithology of rock constituent of rockfills: from Manso dams, Chapecó dam – constituted of sandstone and basalt, respectively.

The alterability of the material is evaluated by comparing the intact rockfill parameters, that is, the ones with no alteration and natural degradation as well as in the laboratory. The materials were tested on large equipment developed at the Laboratory of Civil Engineering UENF, which allows the realization of one-dimensional compression tests on the samples while the process of degradation.

The results indicate that the particle size, the content humidity, type of rock and axial stress have significantly influence in the variation of deformation and compressibility of the rockfill studied.

The experimental program was satisfactory for assessing the compressibility of rockfill dam of Manso and Chapecó due to degradation processes through cycles of saturation and drying.

"Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu trabalho pertencer."

A. Einstein

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Considerações iniciais

O enrocamento, utilizado como material de construção é tradicionalmente definido como um conjunto de partículas rochosas com diâmetro variável entre 2 a 200 cm, podendo apresentar pequena porcentagem de finos, material que passa na peneira com abertura de 4,76 mm. O limite da porcentagem de material fino é especificado normalmente de modo a garantir que não ocorra desenvolvimento de pressão nos poros do enrocamento. Para isso, o coeficiente de permeabilidade deve ser superior a 10^{-3} cm/s (Penman e Charles, 1971). A dimensão máxima depende, principalmente, do tipo de equipamento de compactação e da espessura das camadas do material densificado. Segundo Matherson (1986), o diâmetro máximo deve ser da ordem de $\frac{3}{4}$ da espessura da camada compactada. O conceito de enrocamento é relativamente amplo do ponto de vista granulométrico, mas é dependente da estrutura em que se pretende utilizá-lo.

Os principais campos de aplicação dos enrocamentos são as barragens, as obras portuárias, as vias de comunicação e os aeroportos.

O estudo do comportamento mecânico de enrocamentos vem observado grandes avanços na última década devido à quantidade significativa de obras instrumentadas e à disponibilidade de equipamentos especiais de grandes dimensões nos laboratórios de pesquisas. Contudo, ainda há limitações ou impedimentos de ordem prática para a execução de ensaios no laboratório em amostras de enrocamento em escala real. Ressalta-se que a determinação dos parâmetros geotécnicos destes materiais a partir de ensaios no laboratório em corpos de prova em escala reduzida pode gerar erros consideráveis entre os valores calculados e os observados no campo, mesmo considerando os avanços experimentais que a prática laboratorial geotécnica observa nos dias de hoje.

Em algumas barragens cujos materiais de enrocamento são mais susceptíveis à degradação provocada pelo meio ambiente as deformações dos maciços vêm se mostrando uma preocupação constante. Essa degradação constitui-se nas modificações das características das rochas e seus minerais constituintes, em virtude de sua exposição aos agentes do meio ambiente. Tais modificações ocorrem de modo gradativo e originam produtos de alteração que buscam a estabilidade nas novas condições de temperatura e pressão do meio. Nos enrocamentos, os principais agentes de alteração são de ordem climática, envolvendo processos físicos e/ou processos químicos. As variações de umidade da rocha são um importante processo de degradação dos enrocamentos. Isso é provocado especialmente pelas variações de umidade que ocorrem devido à flutuação do nível do reservatório da barragem, da umidade relativa do ar, além do umedecimento provocado pelas precipitações e secagem pela insolação.

Destaca-se que a complexidade da interação dos agentes de degradação do meio ambiente e a grande diversidade de tipos litológicos de rochas usadas como enrocamento, dificultam a previsão do comportamento destes materiais.

Neste sentido, é de grande importância o desenvolvimento de estudos voltados para a caracterização das propriedades de durabilidade dos materiais de enrocamento. Alternativamente, e seguindo a tendência moderna no estudo da durabilidade de materiais geotécnicos, estes estudos podem ser aplicados no desenvolvimento ou aprimoramento de metodologias que permitam modelar o comportamento de durabilidade dos enrocamentos aceleradamente em laboratório, possibilitando, deste modo, a previsão da vida útil destes materiais.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo maior avaliar o comportamento de enrocamentos utilizados como proteção de talude (Rip Rap), especialmente o material localizados na faixa de variação do nível de água de reservatórios de barragens.

A pesquisa pretende, sobretudo, entender o comportamento geomecânico do enrocamento que se desenvolve durante o processo de variação do nível d'água do reservatório. Relaciona-se esse comportamento às características de degradação do enrocamento observadas durante o desenvolvimento dos mecanismos de alteração por variações de umidade e temperatura do material. Este comportamento é tradicionalmente conhecido como colapso. No caso em particular este colapso é provocado pela degradação do material de enrocamento.

Os materiais de estudo selecionados para essa pesquisa são provenientes da Barragem de Manso, constituída de arenito, situada à cerca de 88 km de Cuiabá – MT e a Barragem de Chapecó, constituída de basalto, Santa Catarina – RS. Os enrocamentos da Barragem de Manso vêm apresentando processos de degradação consideravelmente acelerada com o tempo, especialmente o material localizado na faixa variável do N.A. do reservatório. Nesta faixa observam-se deformações significativas devido à degradação do enrocamento.

Para se atingir os objetivos deste trabalho, foi estabelecido um programa experimental de ensaios de laboratório onde se utilizou equipamentos de grandes dimensões desenvolvidos no Laboratório de Engenharia Civil da UENF.

1.3. Organização do trabalho

Este trabalho apresenta os resultados dos ensaios realizados no equipamento de grandes dimensões, analisando o comportamento desses materiais submetidos a processos de degradação enquanto são submetidos à compressão unidimensional. O trabalho é dividido em sete capítulos cujo conteúdo é resumido a seguir:

O Capítulo 1 faz a introdução do trabalho levantando informações importantes e apresentando a justificativa e o objetivo do estudo.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica onde são feitas importantes definições sobre o tema como: definição de enrocamento e fatores

que influenciam no seu comportamento geomecânico. Trata também da alterabilidade de maciços rochosos e ensaios de compressão unidimensional de grandes dimensões e de alteração.

O Capítulo 3 é dedicado à apresentação do programa experimental, expondo uma descrição detalhada do equipamento de grandes dimensões da UENF utilizado no estudo e os ensaios realizados.

O Capítulo 4 apresenta os materiais usados na pesquisa e as obras envolvidas no estudo, caracteriza os materiais rochosos e a granulometria destes nas barragens relacionadas.

No Capítulo 5 são tratados os resultados provenientes dos ensaios de laboratório de compressão unidimensional e degradação do material e realizada as análises destes ensaios.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e algumas sugestões para a continuidade de pesquisas sobre o assunto.

Ao final apresenta-se a lista das referências bibliográficas.

Capítulo 2 – Comportamento geomecânico de enrocamentos

Considerando que esta pesquisa de mestrado faz a avaliação do comportamento geomecânico de enrocamento, aborda-se inicialmente neste capítulo os principais aspectos ou características que influenciam neste comportamento. Considerando ainda que no programa experimental desta pesquisa de mestrado são desenvolvidos ensaios de degradação para avaliação das características de durabilidade de enrocamentos, este capítulo apresenta também as principais considerações sobre o assunto.

2.1. Características que determinam o comportamento dos enrocamentos

Para entender melhor o comportamento dos enrocamentos é preciso compreender os fatores que influenciam o seu comportamento. Veiga Pinto (1979) apresentou os principais fatores que condicionam as características mecânicas desses materiais e Maia (2001) propôs uma divisão destes em quatro diferentes aspectos:

- estado de tensão;
- partículas constituintes do enrocamento consideradas individualmente;
- enrocamento como meio granular considerado como um conjunto de partículas;
- procedimentos de ensaio.

2.1.1. Estado de tensão

Segundo Maia (2001), o estado de tensão é de grande importância para a avaliação do comportamento dos enrocamentos. A deformação do material

origina dois efeitos diferentes nas partículas e na estrutura granular durante o processo de modificação do estado de tensão dos enrocamentos. O primeiro, na fase inicial do carregamento, é a compressão da partícula de rocha. Quando a tensão num ponto de contato iguala-se à tensão resistente, pode ocorrer a ruptura ou quebra da partícula e, eventualmente, o fraturamento. Isto caracteriza o segundo efeito, que é o rearranjo das partículas através do deslizamento e do rolamento entre si, de forma a atingir um novo estado de equilíbrio. O rearranjo das partículas, por sua vez, depende deste fraturamento. Ambos os efeitos, o fraturamento e o rearranjo de partículas ocorrem simultaneamente.

Estes efeitos dependem em grande parte do imbricamento, que é o grau de interferência entre as partículas, definido pela disposição e a capacidade de movimentação entre as partículas.

Na fase inicial de carregamento, observações experimentais indicam que as propriedades do enrocamento dependem, sobretudo, da mobilidade relativa entre as partículas. Já na fase final, as propriedades são condicionadas, principalmente, pelo fraturamento das partículas. Associado a esta observação, destaca-se o efeito que melhor ilustra a influência do estado de tensão no comportamento de enrocamentos, correspondente à não-linearidade da envoltória de resistência.

A Figura 2.1, que consolida resultados de ensaios realizados por Leps (1970) e Indraratna *et al.* (1993), apresenta a variação da tensão normal à superfície de ruptura σ'_r com o ângulo de resistência ao cisalhamento φ' obtida por Leps (1970), que realizou uma análise detalhada da influência do nível de tensões na resistência ao cisalhamento utilizando resultados de 100 ensaios triaxiais em materiais diferentes correspondentes a 15 variedades de rocha. Verifica-se destes resultados a redução do ângulo de resistência ao cisalhamento φ' com o nível de tensão normal σ'_r .

imbricamento, portanto propriedades de resistência e deformabilidade mais favoráveis. No entanto, dependendo do índice de quebra dos blocos, o maciço de enrocamento pode sofrer grandes deformações durante o rearranjo destes blocos.

Vários minerais podem constituir os blocos de enrocamento, os quais apresentam propriedades mecânicas diferentes, podem também apresentar fissuras e vazios e serem afetados por intemperismo. Essas considerações reforçam o grau de complexidade que envolve um processo de fraturamento de blocos, considerando a natureza dos materiais. As tensões em uma massa composta de blocos são transmitidas através de forças que atuam em áreas de contato limitadas de superfície dos blocos, o que normalmente são bastante superiores às tensões médias.

Marsal (1973) definiu um índice de fraturamento com o objetivo de obter uma noção do grau de fraturamento de uma amostra, representado por Bg , que é obtido pela soma das diferenças positivas das frações da rocha, que corresponde a um determinado diâmetro nominal das curvas granulométricas, obtidas antes e depois do ensaio executado (compactação, triaxial e/ou compressão unidimensional). Este índice é dado por:

$$Bg = \sum_{K=1}^n (\Delta W_K) \text{positivos} \quad (2.1)$$

onde:

$$\Delta W_K = W_{K_i} - W_{K_f} \quad (2.2)$$

onde, W_{K_i} o peso do material de fração K da curva granulométrica inicial e W_{K_f} o da curva granulométrica final.

Forma das Partículas

O fato de que, a um dado índice de vazios, principalmente a baixas tensões confinantes, o ângulo de resistência ao cisalhamento de uma amostra constituída de partículas angulares é maior que se esta fosse composta de grãos arredondados foi apresentado por diversos pesquisadores. Explica-se tal

fato pelo ângulo de dilatância do material que, para partículas angulares que apresentam formas mais alongadas, é maior do que para partículas arredondadas. Estes pesquisadores demonstraram ainda que, os materiais constituídos por partículas angulosas são mais deformáveis do que os compostos de elementos arredondados. Tal fato pode ser explicado pela menor área de contato entre as partículas angulares e conseqüente aumento das forças de contato para o mesmo nível de tensões médias, o que favorece a quebra e esmagamento dos contatos.

Segundo Veiga Pinto (1983), em baixos níveis de tensão ocorre um decréscimo da deformabilidade do meio granular em enrocamentos com partículas angulosas. Todavia, em níveis de tensão mais elevados, a angulosidade pode provocar um acréscimo do fraturamento das partículas e, conseqüentemente, um acréscimo da deformabilidade do meio granular. Sob estas condições, a angulosidade das partículas tem menor influência no comportamento destes materiais quando comparadas à dureza das mesmas.

Dimensão das Partículas

A compressibilidade do material aumenta com o aumento das dimensões das partículas para um dado enrocamento submetido ao mesmo estado de tensão e arranjo estrutural, que depende da distribuição granulométrica e da densidade relativa. Tal fato deve-se ao aumento das forças de contato entre as partículas, o que proporciona a maior quebra de contatos, rearranjo estrutural e conseqüente deformação.

O aumento das dimensões das partículas pode significar aumento do ângulo de atrito para baixas tensões de confinamento e diminuição para elevadas tensões de confinamento, quanto à resistência ao cisalhamento. Isso ocorre devido ao fenômeno da dilatância no cisalhamento, a baixas tensões de confinamento, de materiais granulares. Para elevadas tensões de confinamento, o aumento das dimensões das partículas pode causar o aumento das forças de contato e, conseqüentemente, a quebra das partículas, mudando assim as características quanto à resistência mecânica dos enrocamentos.

Atrito entre Partículas

Como meio granular, o aumento das forças de atrito entre as partículas conduz a um maior imbricamento. Assim, o efeito é vantajoso quanto à resistência ao cisalhamento, em baixas pressões, pois diminui o deslizamento entre partículas. No entanto, é desvantajoso para altas pressões, pois aumenta a concentração de tensões e acarreta maior grau de fraturamento.

O aumento do coeficiente de atrito conduz a uma maior interferência entre partículas em um meio granular o que é vantajoso para baixas tensões, quando à resistência ao cisalhamento. Para altas tensões esse efeito é negativo, pois aumenta a concentração das tensões nos contatos, provocando maior quebra. Pelo estudo da deformação de uma massa granular sujeita ao cisalhamento conclui-se que o efeito do coeficiente de atrito é máximo quando a amostra é dilatante (Fraiha Neto, 1995). Finalmente deve-se realçar que o efeito do atrito entre partículas, importante nos materiais dilatantes, anula-se praticamente nos materiais de enrocamentos constituídos de partículas de baixa resistência, dado que o efeito da quebra se sobrepõe largamente ao da dilatação.

Mineralogia

A mineralogia controla as propriedades físicas de cada uma das partículas de rocha e de materiais granulares pela influência no coeficiente de atrito e na resistência à quebra das partículas.

Ensaio de cisalhamento realizados por Horn e Deere (1962) com amostras constituídas por diferentes minerais revelaram que, sob condições similares, rochas diferentes têm ângulos de atrito diferentes, mas rochas do mesmo tipo, embora de origens diferentes, têm as mesmas características de atrito (Fraiha Neto, 1995).

Estado de Alteração da Rocha

O estado de alteração da rocha se constitui um importante fator que influencia no comportamento geomecânico dos enrocamentos. No entanto este assunto será tratado detalhadamente no item 2.2 deste trabalho.

2.1.3. Enrocamento como meio granular

São vários os fatores inerentes ao meio granular dos enrocamentos que influenciam o comportamento destes materiais. Dentre estes, pode-se citar o estado de compactação, a distribuição granulométrica (porcentagem de finos) e a adição de água. O parâmetro mais utilizado para representar a grau de compactação de enrocamentos é a densidade relativa D_r . A adição de água pode causar um aumento significativo na magnitude das deformações devido ao aumento da deformação volumétrica do enrocamento, fenômeno conhecido por colapso por inundação.

Estado de Compactação

O índice de vazios é provavelmente o fator mais influente nas características de resistência e compressibilidade de materiais granulares. Casagrande em 1936, citado por Fraina Neto (1995), mostrou que a influência do índice de vazios não se limita apenas ao valor do diâmetro do enrocamento, mas também ao modo no qual a deformação cisalhante se desenvolve. Em amostras densas com partículas de material resistente, a deformação cisalhante é acompanhada por um aumento de volume na ruptura, enquanto que para outra inicialmente fofa, o volume diminui. A partir desta observação, definiu-se o conceito de índice de vazios crítico. Saboya Júnior (1993), no entanto, ressalta que devido ao fato de que o tamanho e a forma dos grãos constituírem problemas de macro-escala, o índice de vazios pode não ser um bom parâmetro de comparação, recomendando, nesses casos, o uso da densidade relativa D_r .

Para uma mesma resistência de blocos, os enrocamentos bem graduados facilitam o preenchimento de um maior volume de vazios, o que diminui as forças de contato, gerando, ao final, menores índices de quebra dos

grãos. A granulometria do enrocamento está intrinsecamente ligada ao índice de vazios, ou seja, para um material com a mesma granulometria, quanto menor o índice de vazios, maior a resistência e menor a deformabilidade.

Distribuição Granulométrica

O comportamento mecânico dos materiais granulares é afetado pela distribuição granulométrica, principalmente devido à influência no fraturamento das partículas, e está relacionada diretamente ao índice de vazios ou à densidade relativa e, por conseqüência, à densidade dos enrocamentos. A característica granulométrica mais utilizada no estudo de enrocamentos é a dimensão máxima das partículas $d_{100} = d_{max}$. Se a amostra é bem graduada, as partículas estão encaixadas e as tensões de contato devem ser relativamente baixas. Se a granulometria é uniforme, as forças de contato devem transmitir-se sob menor número de contatos e, conseqüentemente, com magnitudes mais elevadas. Isto dá origem a um maior grau de fraturamento das partículas segundo Maia (2001).

Através de ensaios de compressão triaxial Leslie (1969) e Donaghe e Cohen (1978) verificaram que a resistência ao cisalhamento de enrocamentos é mais influenciada pelo coeficiente de uniformidade do que pela dimensão das partículas. Considerando enrocamentos com mesma densidade relativa inicial e mesmo diâmetro d_{100} , a resistência ao cisalhamento dos materiais bem graduados é maior do que a dos enrocamentos de graduação uniforme (Becker *et al.*, 1972). Além disso, observa-se um menor nível de fraturamento das partículas para enrocamentos bem graduados do que para os de graduação uniforme (Fumagalli, 1969).

Adição de Água

As curvas tensão vs. deformação em compressão unidimensional, nos estados seco e saturado mostrados na Figura 2.2 ilustram a influência da presença de água no comportamento de enrocamentos. Observa-se uma deformação significativa do material nesta figura, inicialmente seco, quando se

procede a adição de água. A magnitude das deformações provocada pela adição de água aumenta com o nível de tensão.

Destaca-se que o mecanismo de colapso dos enrocamentos é diferente do mecanismo nos solos, principalmente por não existir tensão limite a partir da qual não se verifica o colapso nos enrocamentos. Além disto, o colapso nos solos é gerado pela ruptura da estrutura das partículas (desestruturação) enquanto que nos enrocamentos ocorre a ruptura das partículas constituintes.

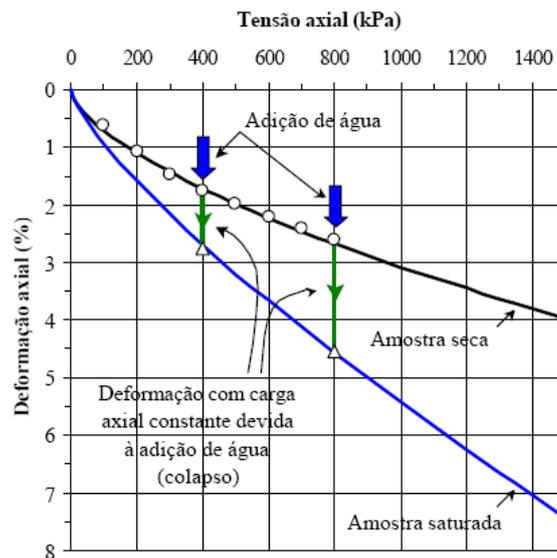


Figura 2.2: Curvas de deformação uniaxial vs. tensão axial em compressão unidimensional em enrocamentos de granulometria uniforme (Nobari e Duncan, 1972).

O efeito da adição da água depende do tipo dos minerais constituintes da rocha. Por exemplo, em minerais com rede cristalina tridimensional (quartzo, feldspato), a adição de água é antilubrificante. Já nos de rede cristalina bidimensional (mica, serpentina, talco, clorita), o efeito é lubrificante (Horn e Deere, 1962; Mitchell, 1976).

Carvalho (2009) relata resultados de ensaios de compressão confinada em corpos de prova de enrocamento submetidos a processos de degradação por saturação e secagem. Estes ensaios se constituem em um programa experimental preliminar destinados a verificação da funcionalidade do equipamento utilizado. Como era de se esperar, os resultados sugerem que o

colapso por degradação da rocha pode ser superior ao colapso por inundação. O nível de colapso relatado pela autora é dependente do nível de tensão de confinamento.

Efeito de Escala

Os materiais de enrocamento não podem ser ensaiados no laboratório utilizando corpos de prova em escala real devido às dimensões das partículas. Assim, faz-se necessária a adoção de corpos de prova com dimensões reduzidas. Para tal, os materiais são modelados através da redução das dimensões das partículas. A questão básica é a representatividade das características tensão vs. deformação do modelo reduzido no laboratório.

A preparação de um corpo de prova em escala reduzida (modelagem) requer a busca de semelhanças entre o modelo reduzido e o enrocamento em escala real. Estas semelhanças estão relacionadas à granulometria, à compactidade e à forma das partículas. Em laboratório, duas metodologias alternativas têm sido utilizadas para modelagem de corpos de prova em escala reduzida: uma com curva granulométrica paralela à do material no campo (Lowe, 1964; Leslie, 1969; Marachi *et. al.*, 1972; Cea, 1998) e outra com curva granulométrica truncada, ou seja, com substituição da fração mais grossa, de dimensão superior à que se pode utilizar no laboratório, por material da fração menos grossa, com menor dimensão (Zeller e Wullimann, 1957; Leslie, 1969; Veiga Pinto, 1982; Caproni Jr. *et. al.*, 1998). A metodologia mais usada é a da curva paralela. A curva truncada só é utilizada quando a curva paralela mostra presença significativa de finos, o que pode interferir no comportamento do material.

Foi mostrado através de resultados de ensaios de compressão triaxial que em enrocamentos com a mesma densidade relativa, a granulometria mostra grande influência na resistência destes materiais. No entanto, para o mesmo índice de vazios inicial, a influência da granulometria pode ser desprezível (Becker *et. al.*, 1972). Além disso, enrocamentos modelados com a mesma densidade relativa inicial, a dimensão máxima das partículas não influencia a resistência significativamente. Por outro lado, em amostras com

mesmo índice de vazios inicial, esta influência é representativa. Assim, a densidade dos corpos de prova modelados no laboratório deve ser igual a densidade relativa do material no campo (Becker *et. al.*, 1972).

Em laboratório, é normal a utilização da máxima dimensão de partícula, possível de ser ensaiada nos equipamentos disponíveis. Para tanto, utilizam-se relações entre a dimensão mínima do corpo de prova D e a dimensão máxima das partículas d_{max} . As relações sugeridas por Penman (1971) são as mais utilizadas na prática. Existe grande variação dos valores sugeridos para a relação D/d_{max} . O limite superior da relação é aplicado para enrocamentos com granulometrias uniformes e o limite inferior para enrocamentos bem graduados. A Tabela 2.1 apresenta alguns valores recomendados para a relação D/d_{max} .

Tabela 2.1: Valores recomendados para a relação D/d_{max} .

Autor	Amostras Uniformes	Amostras graduadas
Holtz e Gibbs (1956)	20	6
Marshall (1965)	11	4
Fumagalli (1969)	20	5
Marachi et al. (1969)	-	6
Penman et al. (1971)	6	4
Veiga Pinto (1988)	10	5

2.1.4. Procedimentos de ensaio

Segundo Maia (2001), a determinação das características de enrocamentos é influenciada, especialmente, pela trajetória de tensões, pelo tipo de ensaio e pela velocidade de aplicação do carregamento.

Os ensaios mecânicos realizados na rocha do enrocamento são os mais utilizados na avaliação do comportamento de enrocamentos. São ensaios de fácil execução e atualmente bastante utilizados em obras de engenharia civil.

No enrocamento, para a execução de ensaios mecânicos, faz-se necessária à utilização de equipamentos de grandes dimensões, os quais não são de uso corriqueiro.

Existem vários ensaios no laboratório indicados na literatura utilizados com o objetivo de determinar as características dos materiais de enrocamento, como cisalhamento direto, compressão unidimensional, triaxial e deformação plana. Nesta pesquisa foram realizados ensaios de compressão unidimensional em corpos de prova de 30 cm de diâmetro.

2.2. Alteração de enrocamentos

A alteração de rochas ocorre, naturalmente, num intervalo geológico de tempo, ou seja, de centenas a milhares de anos. Todavia, alterações significativas também podem, em alguns casos, ocorrer num intervalo muito menor, isto é, de alguns anos ou mesmo meses.

Os termos mais difundidos para designar as modificações sofridas pelas rochas são intemperismo ou degradação, que representa o conjunto de processos que ocasionam a desintegração e a decomposição das rochas e dos minerais, provocados pelos agentes atmosféricos (físicos e químicos) e biológicos.

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).

A maior ou menor susceptibilidade da rocha à degradação é definida pela alterabilidade do material. É da estabilidade química dos minerais constituintes da rocha que depende a alterabilidade. Como exemplo, destaca-se a maior alterabilidade de rochas basálticas em relação às graníticas. Este fato se deve à menor estabilidade química dos minerais essenciais do basalto (plagioclásio e piroxênios) em relação aos do granito (quartzo, ortoclásio e biotita), nas mesmas condições físico-químicas do ambiente de degradação (Maia, 2001).

Segundo Maia (2001), os efeitos das modificações que a rocha sofre durante os processos de alteração são observados em praticamente todas as características das partículas e do próprio enrocamento. Carvalho (2009) indica também que a degradação da rocha pode influenciar a compressibilidade do

enrocamento. Destaca-se que, a alteração da rocha interfere, principalmente, na resistência ao fraturamento e nas dimensões das partículas do enrocamento. Quanto à alteração da rocha, existe perda de resistência devido às modificações mineralógicas e estruturais, provocadas pelos processos de alteração. Assim, espera-se um aumento do índice de quebra das partículas, tornando o enrocamento mais deformável e menos resistente. Quanto às dimensões das partículas do enrocamento, a alteração provoca a redução nas dimensões das partículas devido à alteração superficial dos minerais da rocha e à fragmentação dos blocos de enrocamento. Neste caso, ocorrem rearranjos entre as partículas, o que pode provocar grandes deformações no enrocamento.

Diante disso, a avaliação da susceptibilidade da rocha à degradação é de grande importância para compreensão do comportamento mecânico do enrocamento durante sua vida útil. No entanto, a literatura técnica apresenta pouco conteúdo a respeito dos efeitos da degradação da rocha no comportamento de enrocamentos.

2.2.1. Mecanismos de degradação

Os principais mecanismos de degradação de natureza física e química em materiais geotécnicos foram definidos por Carvalho (2009). A Tabela 2.2 apresenta um resumo destes mecanismos.

Tabela 2.2: Mecanismos de degradação de natureza física e química em materiais geotécnicos (Carvalho, 2009).

<i>Mecanismos de Degradação</i>	<i>Natureza da Degradação</i>	<i>Conseqüências</i>
Abrasão	Física	Desgaste por atrito ou impacto de partículas ou desgaste decorrente da movimentação do solo ou da rocha (Maia, 2001)
Desagregação por crescimento de cristais	Física	Em materiais rochosos, a variação de volume, ocasionada pelo crescimento de cristais, gera tensões que podem causar fraturamento (Maia, 2001).
Expansão devido a efeitos térmicos	Física	Variação da amplitude térmica diurna e noturna (variação sazonal) gera a expansão e a contração dos materiais.

Fraturamentos por alívio de tensões	Física	Podem ser causados pela descompressão de maciços rochosos devido a escavações subterrâneas, cortes de grandes taludes, erosão de extratos superficiais, e outros processos, provocando microfissuração e fraturas no material (Goodman, 1989).
Hidrólise	Química	Consiste na ruptura das cadeias moleculares pela ação das moléculas de água, causando a expansão nos materiais e, conseqüentemente, a lixiviação dos elementos constituintes.
Oxidação	Química	Em materiais rochosos e cerâmicos, observa-se a reação entre os elementos constituintes destes materiais com o oxigênio, formando óxidos e hidróxidos, que constituem elementos de fácil lixiviação (Maia, 2001).

2.2.2. Efeitos da degradação

Existem vários aspectos relacionados aos efeitos da alteração nos materiais rochosos utilizados na construção civil, destacando-se:

Perda 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, por um lado, pela deformabilidade dos grãos cristalinos da estrutura da rocha e, por 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. Assim, a deformabilidade da rocha pode ser significativamente afetada pela alteração.

Variação na permeabilidade

Devido às 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. Pode 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 conseqüente 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 devido ao 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.

2.2.3. Metodologia para avaliação da alteração de enrocamentos

A Figura 2.3 apresenta uma metodologia simplificada para a avaliação da alterabilidade de materiais de enrocamento (Maia, 2001). Metodologias similares também foram usadas por Salles (2006), Pinto (2006), Xavier (2006), Pessanha et. al. (2010) para estudo de outros materiais geotécnicos (geossintéticos, cerâmicos, rochas ornamentais e outros).

Na metodologia proposta por Maia (2001) destacam-se quatro fases, que devem ser executadas na seguinte ordem:

- obtenção do material de estudo (amostragem);
- produção de amostras de enrocamento com alteração induzida de forma acelerada, no laboratório;

- obtenção dos parâmetros que caracterizam o comportamento destes materiais;
- análise dos resultados para previsão do comportamento do material a longo prazo.

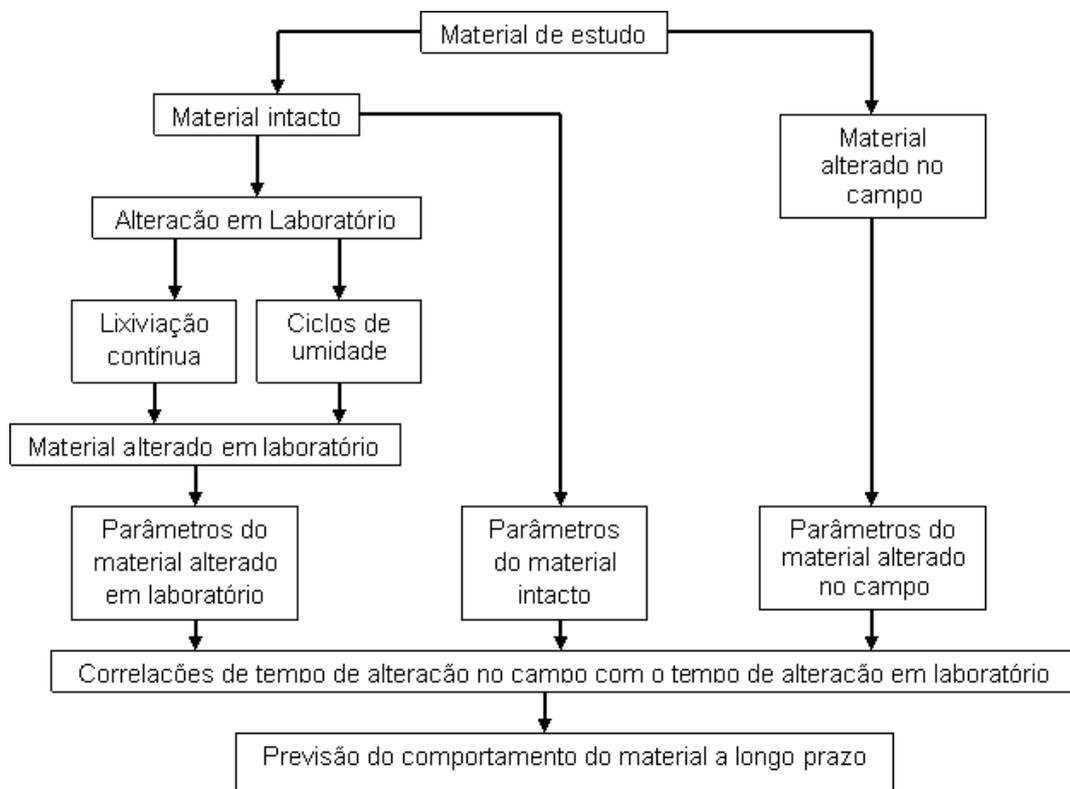


Figura 2.3: Metodologia para avaliação da alterabilidade de enrocamentos.
(Maia, 2001).

A alterabilidade de enrocamentos é mais bem quantificada pela comparação dos resultados de ensaios de amostras intactas com as amostras alteradas. Os ensaios mais representativos para a quantificação da alterabilidade são os ensaios mecânicos, tais como, compressão unidimensional, compressão triaxial e cisalhamento direto.

Maia (2001) indica que a alteração no laboratório possibilita a simulação do comportamento do material alterado no campo. Em consequência da diferença de sensibilidade, as relações entre o tempo de alteração no laboratório e o tempo de alteração natural são diferentes para cada parâmetro considerado.

Apesar das limitações dos equipamentos de grandes dimensões, as aplicações destes resultados podem representar uma importante ferramenta na avaliação do comportamento dos enrocamentos.

Segundo Maia *et al.*, (2002) a alteração por lixiviação contínua de amostras é mais eficiente do que por ciclagem de umidade e também se mostra adequada para a previsão a longo prazo do comportamento dos enrocamentos de basalto.

No laboratório, a alteração do basalto envolveu processos predominantemente físicos, causando micro fissuração da camada mais externa das partículas. No entanto, devido ao crescente nível de fissuração da rocha, pode-se concluir que processos químicos de alteração no laboratório tornam-se gradativamente mais significativos, de acordo com Maia *et al.*, (2003).

2.3. Considerações finais

Diante do exposto nesse capítulo, conclui-se que é difícil a avaliação da interferência das características do enrocamento na determinação do comportamento tensão vs. deformação.

Ressalta-se que o fraturamento das partículas, apesar de ser determinante no comportamento do enrocamento, é de difícil determinação, visto que a comparação das granulometrias antes e depois do ensaio pode estar sujeita a erros.

O tipo de ensaio exerce grande influência na caracterização mecânica dos enrocamentos.

Concluindo, a realização de ensaios em enrocamentos encontra grandes dificuldades, como a dimensão dos equipamentos e seus custos e a mudança de comportamento provocada pela redução da escala nas amostras.

Capítulo 3 – Equipamentos Utilizados

Neste capítulo faz-se inicialmente a descrição dos equipamentos utilizados no programa experimental desenvolvido nesta pesquisa de mestrado. Apresenta-se o equipamento de compressão confinada e a câmara de degradação por saturação e secagem, ambos de grandes dimensões. Estes equipamentos foram desenvolvidos no Laboratório de Engenharia Civil da UENF para permitir a aceleração da degradação de materiais de enrocamento em corpos de prova sob um estado de compressão confinada. Para efeito de melhor entendimento do mecanismo de funcionamento dos equipamentos faz-se inicialmente a apresentação dos equipamentos de compressão confinada e de degradação separadamente. Posteriormente, ilustra-se a montagem associadas destes equipamentos

3.1. Compressão confinada

O equipamento responsável pelos ensaios de compressão confinada foi desenvolvido por Carvalho (2009). Este equipamento foi utilizado para avaliação da deformabilidade de materiais granulares, especialmente areias e enrocamentos. O equipamento é capaz de realizar ensaios de compressão confinada sob estado de tensão controlada em corpos de prova de grandes dimensões, com diâmetro igual a 30 cm e altura máxima igual a 30 cm. Neste trabalho apresenta-se uma descrição resumida do equipamento, ressaltando os principais componentes e princípio de funcionamento. Informações mais detalhadas são reportadas por Carvalho (2009)

A Figura 3.1 mostra uma em perspectiva do equipamento e da câmara de compressão. A Figura 3.2 apresenta um corte longitudinal do equipamento de compressão onde estão indicadas duas principais dimensões. A Figura 3.3 apresenta os principais componentes do equipamento.

O equipamento é constituído basicamente por um sistema de aplicação de carga, um sistema de transferência de carga, uma mesa de reação e uma

câmara de compressão. A adoção deste tipo de equipamento para realização dos ensaios de compressão nos enrocamentos estudados nesta pesquisa se justifica, sobretudo, pela necessidade de se manter a carga axial constante por longo período de tempo.

O sistema de aplicação de carga é similar ao de um equipamento de adensamento tradicional com a carga aplicada utilizando um pendural e contra pesos. Devido às dimensões do equipamento, foi necessária a instalação de um guia para garantir a estabilidade do pendural. O guia permite o deslocamento vertical do pendural sem geração de atrito. Para a câmara de compressão com diâmetro igual a 30cm, a tensão máxima possível de ser aplicada pelo equipamento é da ordem de 500kPa.

O sistema de transferência de carga é responsável pela transferência da carga aplicada nos extremos do pendural para o centro do corpo de provas. É constituído por uma viga inferior rotulada no pendural, uma viga superior, dois tirantes rosqueados laterais e um parafuso guia. A centralização do sistema de transferência de carga é feito através de um prumo de centro posicionado no teto da sala onde foi instalado o equipamento. Os tirantes rosqueados permitem o ajuste da distância entre as vigas de superior e inferior e o nivelamento da viga superior.

A mesa de reação é composta por uma base rígida e fixa ao piso e por uma base circular com nível regulável. A Base circular é apoiada sobre três parafusos que permitem o ajuste de nível antes e durante a realização do ensaio (Figura 3.3). Para controle do nível da base circular são utilizados três extensômetros posicionados de forma equidistante em relação ao perímetro da base circular (Figura 3.3).

A câmara de compressão é constituída por um anel vazado de aço inoxidável com diâmetro interno igual a 30 cm, espessura 5 mm e altura 40 cm (Figura 3.3). A câmara é apoiada sobre a base circular e centralizada com a ajuda do prumo de centro. Com essa câmara é possível executar ensaios com o fundo fixo ou suspenso (Carvalho, 2008). No presente trabalho utilizam-se somente ensaios com fundo suspenso, tendo em vista o menor desenvolvimento de atrito entre as partículas de enrocamento e as paredes internas da câmara. Para os ensaios com anel suspenso foi necessária a

utilização de uma placa de base rígida com altura igual a 10 cm e diâmetro igual a 29,8 cm (Figura 3.3).



Figura 3.1: Vista geral do equipamento.

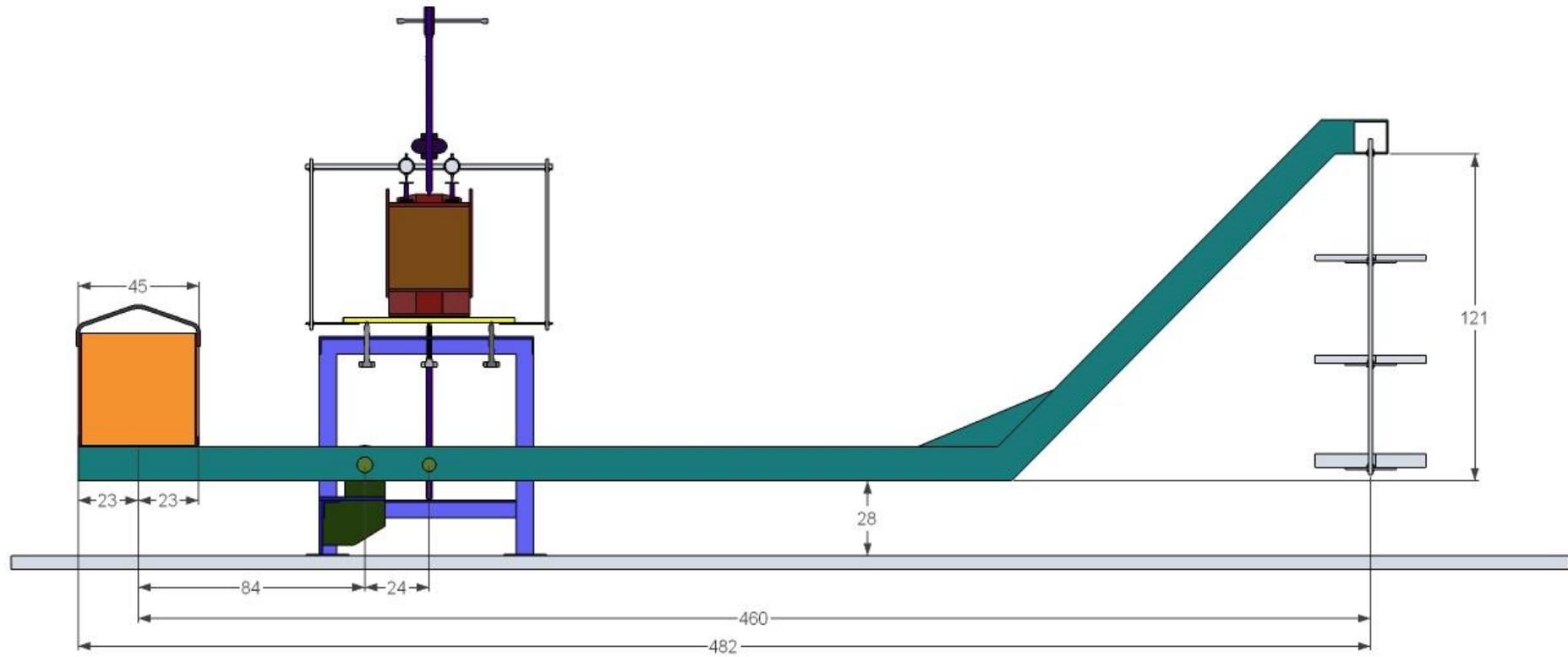


Figura 3.2: Vista geral do equipamento de compressão.



Vista lateral da Câmara



Placa de base



Base circular



Placa de topo



Contrapeso



Mesa de reação



Guia e pendural



Suporte da placa circular

Figura 3.3: Vista Lateral do equipamento.

Ressalta-se que na presente pesquisa fez-se a instalação de um sistema de aquisição de dados automático para realização dos ensaios de compressão. O sistema de medição dos deslocamentos verticais do corpo de prova é feito através LVDTs posicionados simetricamente em relação ao centro da placa de base (Figura 3.8).

3.2. Equipamento de saturação e secagem

A construção do equipamento de degradação por saturação e secagem foi iniciada na pesquisa de mestrado de Carvalho (2009) e concluída na presente pesquisa. O equipamento é constituído por uma câmara de degradação com isolamento térmico, dois reservatórios de água, um sistema de ventilação, um sistema de esvaziamento e um sistema automático que controla os ciclos de saturação e secagem (Figura 3.4).



Figura 3.4: Vista do Equipamento de degradação por saturação e secagem da UENF

A Figura 3.5 ilustra os componentes do equipamento de degradação por saturação e secagem e o princípio de funcionamento do equipamento.

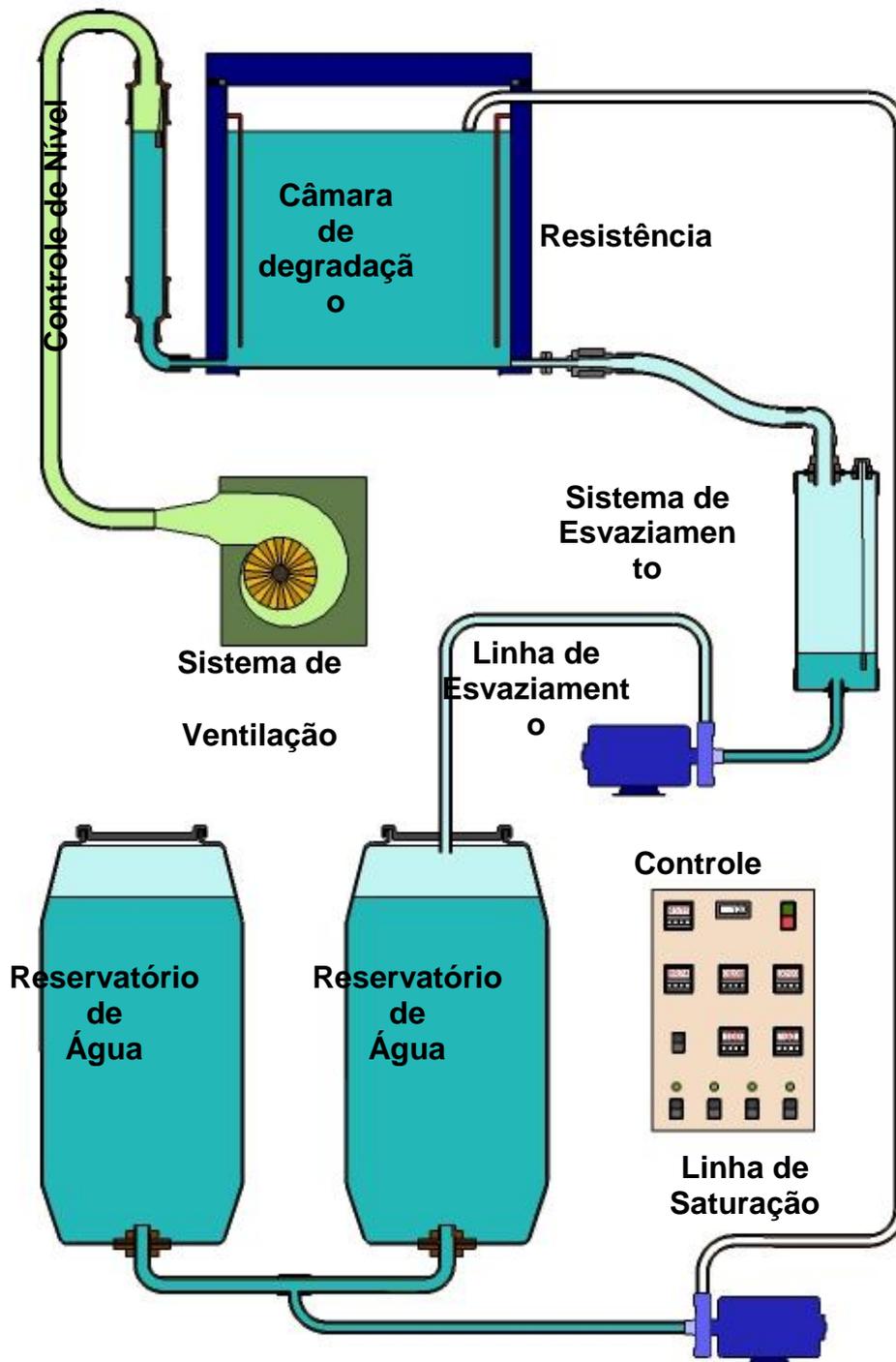


Figura 3.5: Esquema de funcionamento do equipamento de saturação e secagem

Este equipamento de degradação permite submeter amostras com grande volume a ciclos de saturação e secagem, de forma automática. O sistema é automatizado e executa seqüencialmente o enchimento da câmara de degradação com água até um nível pré-determinado, o esvaziamento completo, o aquecimento e

a ventilação. Todos os processos são controlados por sistema digital programável. Esse sistema permite estabelecer os tempos de cada processo e a temperatura de aquecimento da câmara.

A câmara de degradação possui diâmetro interno igual a 70 cm e altura igual a 70 cm, com volume útil igual a 200 litros.

A etapa de saturação é feita por inundação do corpo de provas. Os processos de enchimento e esvaziamento da câmara nesta etapa são realizados por um sistema composto de duas bombas d'água com selo de alta temperatura. O nível de enchimento da câmara é determinado por sensores de nível d'água posicionados dentro do sistema de controle de nível. Para garantir volume de água em quantidade suficiente para o enchimento da câmara de degradação, foram adaptados dois reservatórios interligados com água na temperatura ambiente (21°C) e capacidade igual a 200 litros cada.

O total esvaziamento da câmara de degradação é feito através de um sistema de esvaziamento composto por um reservatório inferior cujo topo é posicionado abaixo do fundo da câmara de degradação. Este sistema permite que, após o processo de bombeamento de água para esvaziamento da câmara, o volume de água retido nos vazios da amostra se escoie livremente para dentro do reservatório inferior. Deste modo, o aquecimento da câmara durante o processo de secagem é mais rápido com menos geração de vapor d'água.

O aquecimento da câmara é feito através de resistências que permitem atingir temperaturas da ordem de 110°C. Após a etapa de aquecimento e antes de se reiniciar uma nova etapa de saturação, a câmara é resfriada por ventilação por um período de tempo ou até atingir uma determinada temperatura ambos preestabelecidos no painel de controle. A ventilação é forçada e a exaustão do ar quente dentro da câmara é feito através de uma válvula posicionada na tampa da câmara.

3.3. Acoplagem dos equipamentos

O equipamento de degradação por saturação e secagem foi projetado para ser acoplado no equipamento de compressão confinada de grandes dimensões. Deste modo é possível a aceleração da degradação do corpo de provas submetido a

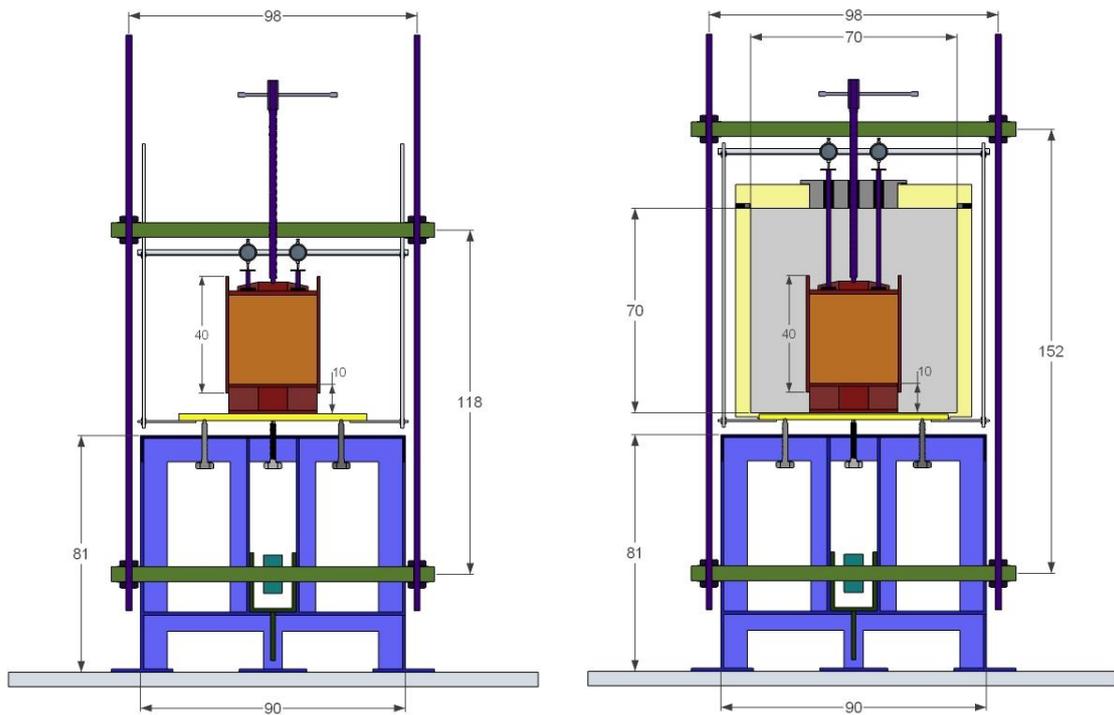
um estado de tensão axial e deformação lateral nula. A Figura 3.6 mostra os dois equipamentos durante um ensaio.

A Figura 3.7 ilustra a diferença de montagem do equipamento de compressão para realização dos ensaios de compressão e dos ensaios de compressão associado aos ensaios de saturação e secagem. Nesta figura nota-se que para a medida das deformações axiais no ensaio associado, faz-se necessário a instalação de pistões para posicionamento dos medidores de deslocamento fora da câmara de degradação. A Figura 3.8 mostra um detalhe do topo dos pistões e dos medidores de deslocamento. Os pistões são constituídos por eixos retificados em metal inoxidável que se deslocam por gravidade livremente em buchas de latão fixas na tampa da câmara. Ensaios de calibração indicaram que durante os ensaios não é gerada nenhuma resistência ao deslocamento do pistão devido à variação de temperatura da câmara.

Cuidado especial é necessário na vedação da tampa câmara no entorno do parafuso guia (Figura 3.8). Para isto foi utilizado material sintético resistente à temperatura enrolado no parafuso guia. Esta vedação não impede o deslocamento vertical do parafuso em relação à tampa da câmara.



Figura 3.6: Equipamento de degradação acoplado ao equipamento de compressão confinada



(a) somente ensaios de compressão confinada

(b) ensaios de compressão com degradação

Figura 3.7: Diferentes montagens do equipamento de compressão.

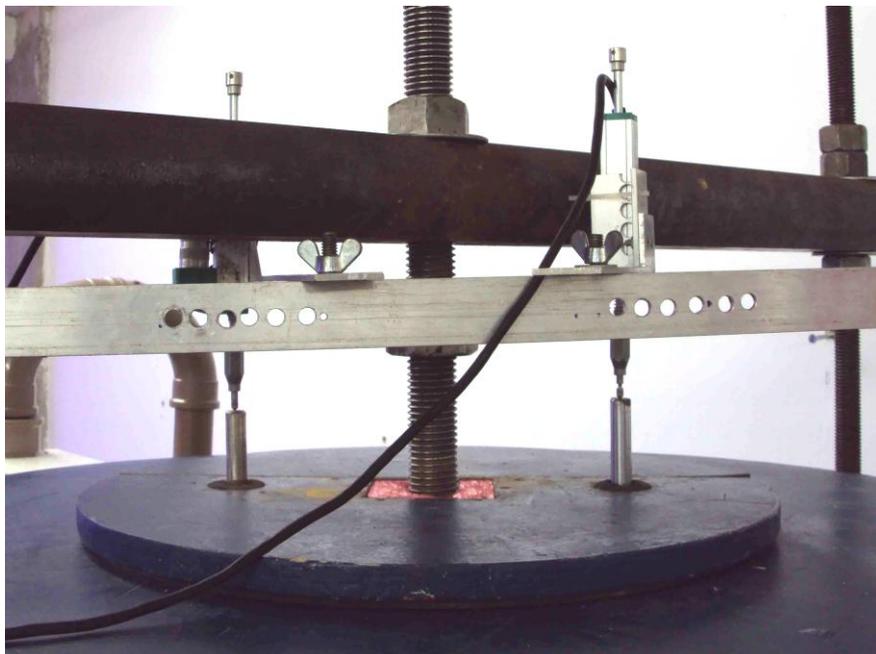
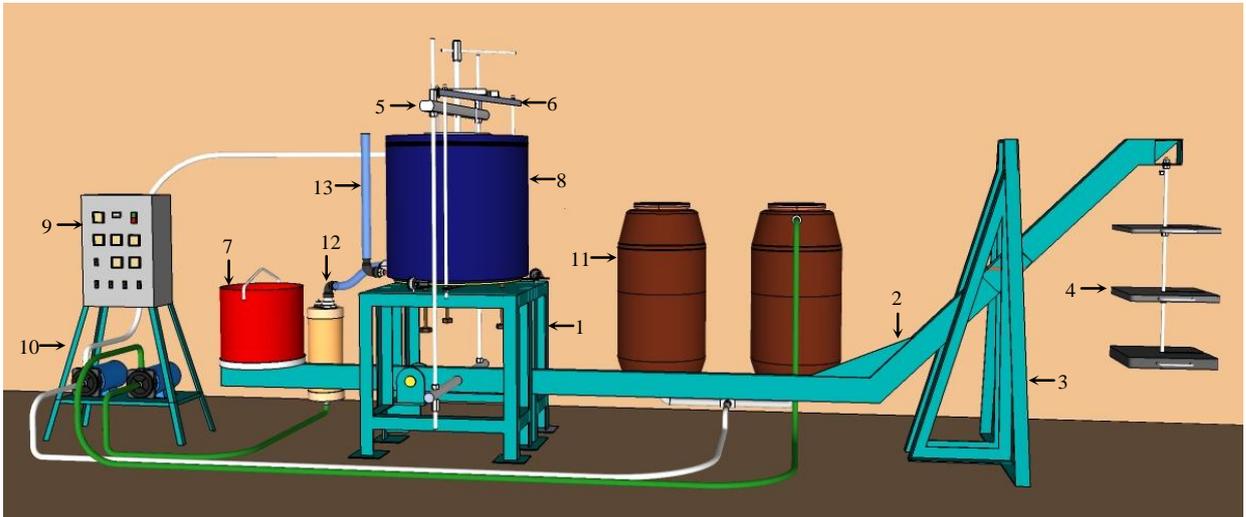


Figura 3.8: Topo da câmara de degradação e sistema de medida de deslocamento vertical

Finalmente, a Figura 3.9 apresenta um esquema onde está mais claramente ilustrado a montagem do equipamento de compressão associado ao equipamento de degradação e os diversos componentes do sistema.



Legenda: 1 – Mesa de reação; 2 – Braço; 3 – Guia do braço; 4 – Pendural; 5 – Viga de transmissão de carga; 6 – Base fixa do sistema de aquisição de dados; 7 – Contrapeso; 8 – Câmara de degradação; 9 – Painel de controle da câmara de degradação; 10 – Sistema de bombas; 11 – Reservatórios de água; 12 – Sistema de esvaziamento da câmara de degradação; 13 – Sensores de nível d'água.

Figura 3.9: Esquema do Equipamento.

Capítulo 4 – Materiais de estudo e programa experimental

Este capítulo apresenta a descrição dos materiais de estudo utilizados no programa experimental. Faz-se a apresentação das características das barragens de onde foram coletadas as amostras de enrocamento.

4.1. Enrocamento arenítico

O arenito utilizado na pesquisa é proveniente dos maciços de enrocamento da Barragem de Manso, mostrada na Figura 4.1, localizado no Rio Manso no Estado do Mato Grosso à aproximadamente 100 quilômetros de Cuiabá, de propriedade de Furnas. Este enrocamento é proveniente do talude de montante na faixa de variação do nível d'água do reservatório, mostrado na Figura 4.2.

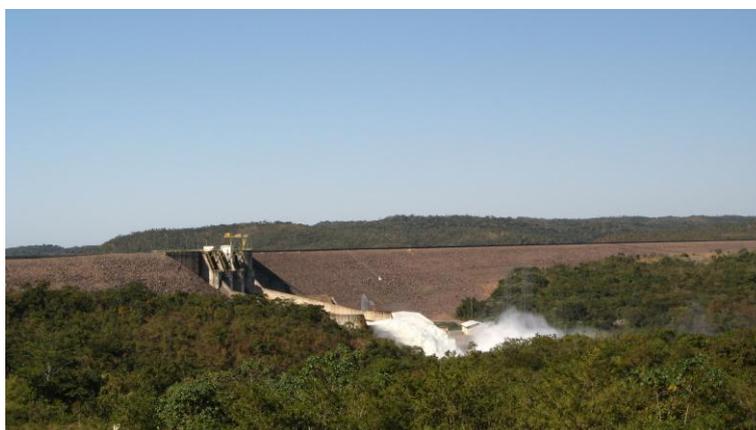


Figura 4.1: Barragem de Manso, Cuiabá – MT.

A Crista da Barragem de Manso possui 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.

A Figura 4.3 apresenta uma vista aérea da Barragem. Nota-se que o barramento é constituído por barragens à esquerda e direita, uma estrutura de

concreto central e diques na margem direita. A Figura 4.4 apresenta as seções transversais das barragens direita e esquerda da Barragem. Pode-se observar que a seção transversal da barragem é constituída por grandes maciços de enrocamento que fazem estabilização do núcleo central em argila.



(a) talude de jusante



(b) Talude de montante

Figura 4.2: Enrocamento da Barragem de Manso.

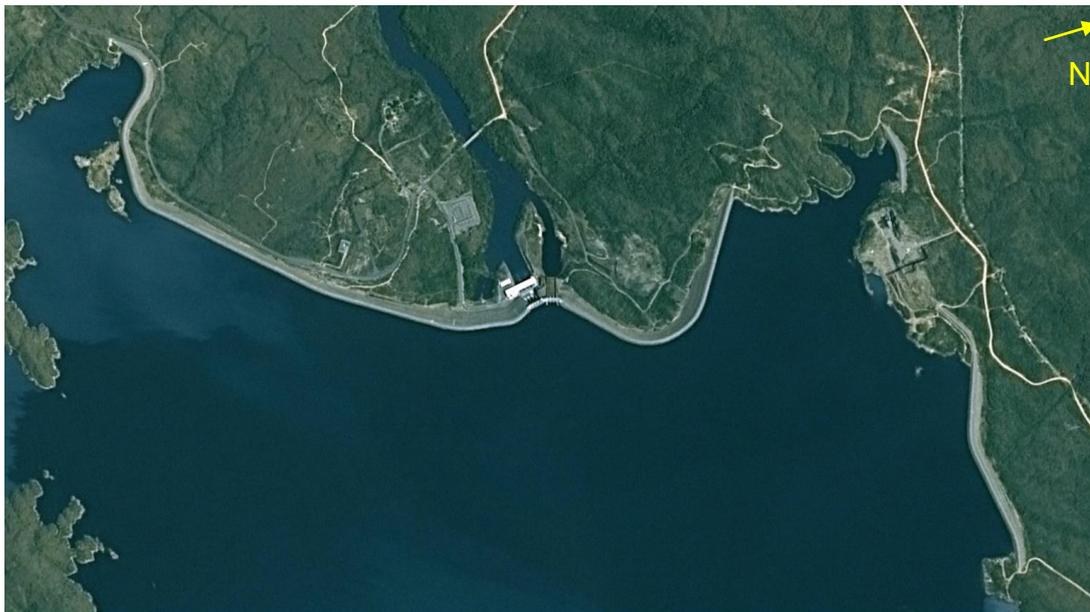
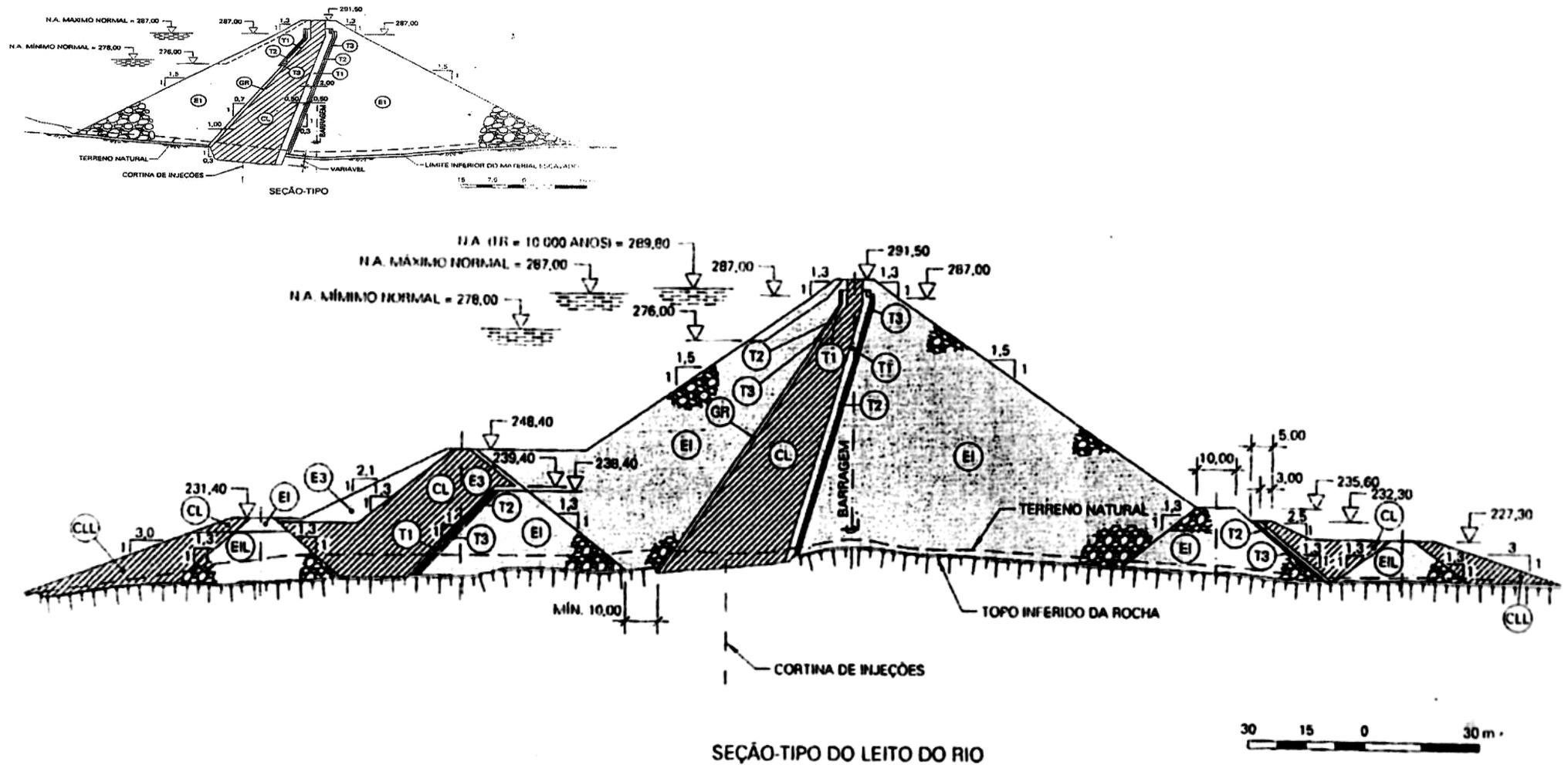


Figura 4.3: Vista aérea da Barragem de Manso (GOOGLE, 2010).



T1 – Areia artificial; T2 e T3 – Materiais britados; E1 – Enrocamento.

Figura 4.4: Seção transversal da margem direita da Barragem de Manso. (FURNAS, 1997)

A Figura 4.5 apresenta a granulometria do enrocamentos de Manso, e as granulometrias utilizadas neste trabalho e por Carvalho (2009). Destaca-se que o material utilizado nesta pesquisa é proveniente do enrocamento E1 (Figura 4.4). Esse enrocamento é bem graduado com coeficientes C_u igual a 7,8 e C_c igual a 0,2. A curva granulométrica utilizada por Carvalho (2009) é uniforme com coeficientes C_u igual a 1,0 e C_c igual a 1,5.

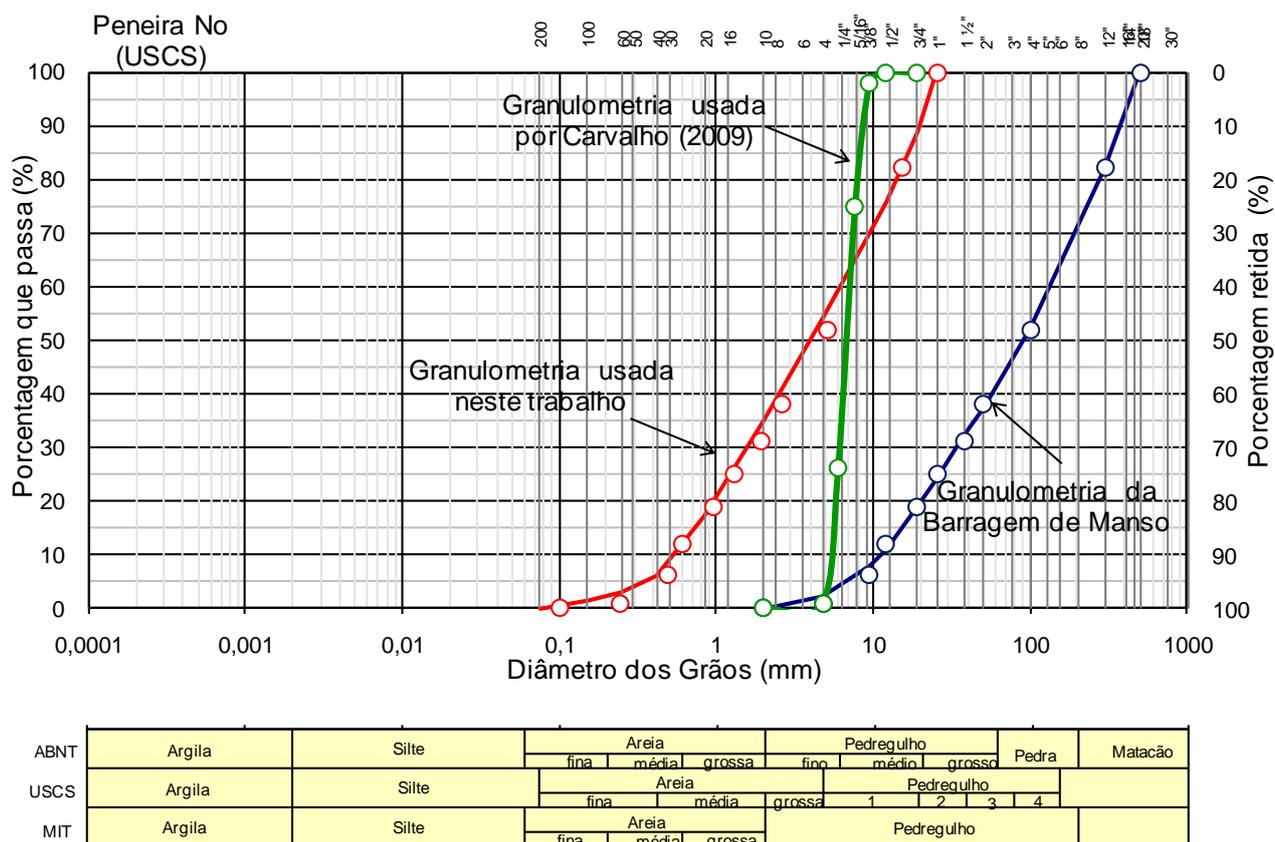


Figura 4.5: Faixa granulométrica do enrocamento E1 da Barragem de Manso.

Destaca-se que o enrocamento de Manso, como mostra a Figura 4.6 vem apresentando acentuado processo de degradação acelerada com o tempo. Especialmente o enrocamento de montante, localizado na faixa de variação do nível d'água do reservatório da Barragem, mostra deformações significativas devido à degradação do enrocamento. Tal efeito vem provocando sistemáticas intervenções na barragem para recuperação do talude.

É importante ressaltar que o enrocamento localizado abaixo do nível mínimo do reservatório não mostra sinais de desagregação (Figura 4.7).



(a) Bloco em processo de degradação



(b) bloco em avançado processo de degradação

Figura 4.6: Processo de degradação acelerado do enrocamento da Barragem de Manso.



Figura 4.7: Enrocamento abaixo do nível mínimo do reservatório da Barragem de Manso.

A granulometria utilizada para a realização dos ensaios no equipamento de grandes dimensões foi determinada utilizando-se a metodologia da curva paralela ao enrocamento (Penman *at al*, 1971). Foi utilizada uma relação de D/d_{max} de 1/5, sendo D a dimensão mínima do corpo de prova e d_{max} a dimensão máxima da partícula. Quanto a quantidade de finos, material que passa na peneira 200 (ASTM), a granulometria utilizada atende a condição sugerida por Veiga Pinto (1982), menor que 10%.

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

4.2. Enrocamento basáltico

O basalto utilizado neste trabalho é proveniente da Barragem de Chapecó – RS que será a primeira barragem brasileira de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico construída no Brasil. Está localizada no Rio Uruguai, na fronteira entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, na divisa dos municípios de Águas de Chapecó (SC) e Alpestre (RS), a cerca de 450 quilômetros de Porto Alegre. A Figura 4.8 apresenta uma vista do local de instalação do eixo da barragem.



Figura 4.8: Local de instalação do eixo da UHE Foz do Chapecó (Ramos, 2009).

A usina possui uma potência instalada de 855 MW. O cronograma de construção prevê a finalização do empreendimento em fevereiro de 2011 com o início da operação da quarta unidade geradora.

A barragem possui 48 metros de altura e 598 de extensão. A vazão máxima de projeto é igual a $62.190\text{m}^3/\text{s}$. A Figura 4.9 apresentam o arranjo geral da UHE Foz do Chapecó. A Figura 4.10 apresenta a faixa granulométrica do enrocamento da barragem e a utilizado no presente trabalho.

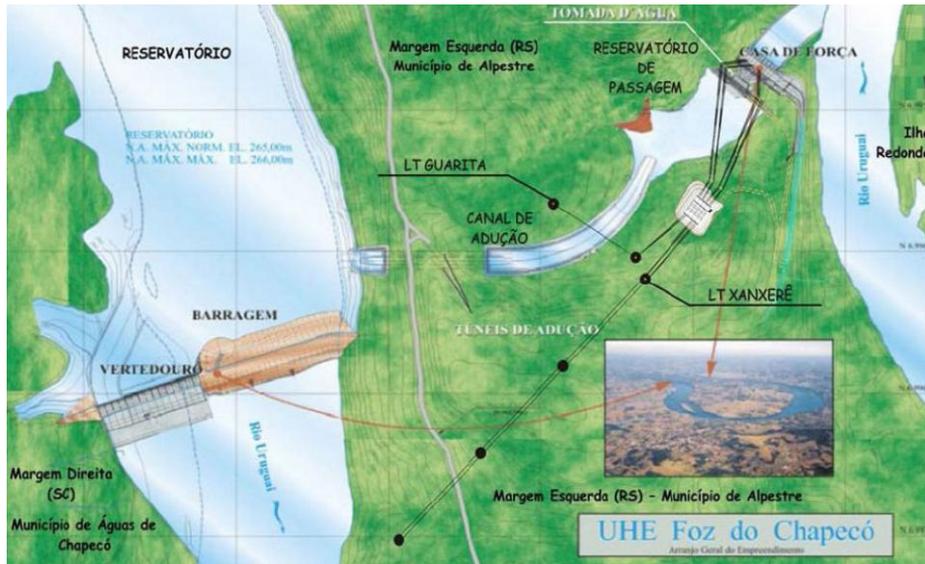
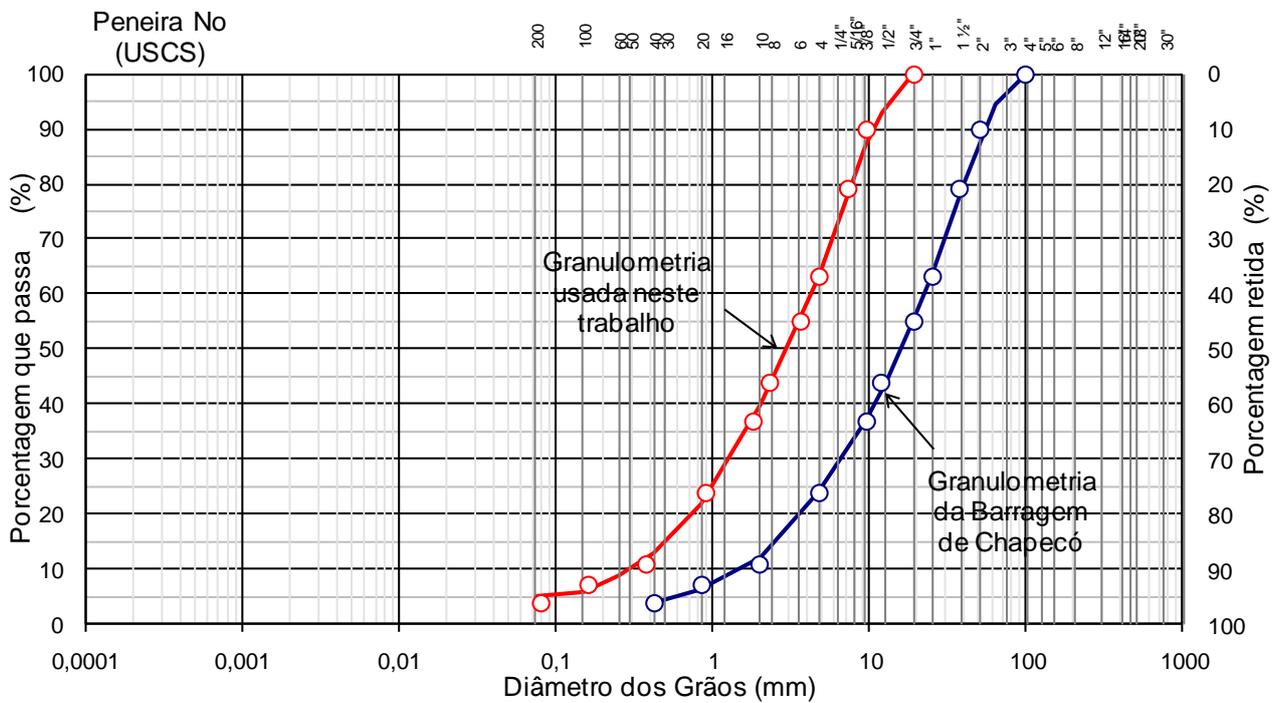


Figura 4.9: Arranjo geral da UHE Foz do Chapecó (Ramos, 2009)



ABNT	Argila	Silte	Areia			Pedregulho			Pedra	Matacão
			fina	média	grossa	fino	médio	grosso		
USCS	Argila	Silte	Areia			Pedregulho				
			fina	média	grossa	1	2	3	4	
MIT	Argila	Silte	Areia			Pedregulho				
			fina	média	grossa					

Figura 4.10: Faixa granulométrica do enrocamento da Barragem de Chapecó.

Esse enrocamento é bem graduado com coeficientes C_u igual a 6,7 e C_c igual a 2,4.

4.3. Programa experimental

O programa experimental busca a avaliação dos efeitos do tipo de material de enrocamento e da tensão de confinamento no nível de colapso gerado pelo processo de degradação. Para o dimensionamento do número de ensaios foram considerados os seguintes aspectos:

- i. Tempo de duração de ensaios: o tempo necessário para realização de cada ensaio de colapso é da ordem de 15 dias. Neste procedimento considera-se desde a moldagem do corpo de prova até o peneiramento final do material ensaiado. Cada ensaio de compressão sem colapso dura em torno de 3 dias.
- ii. Disponibilidade de amostras: a quantidade de material disponibilizado por Furnas para realização do programa experimental sem reutilização limita o número de ensaios a aproximadamente 8 corpos de prova.

Deste modo foram realizados os seguintes ensaios, em cada material:

- i. Um ensaio de compressão unidimensional em corpo de prova seco;
- ii. Um ensaio compressão unidimensional em corpo de prova saturado;
- iii. Um ensaio compressão unidimensional em corpo de prova inicialmente seco; inundação na tensão de 30,8 kPa, e continuação do ensaio de compressão no corpos de prova saturado;
- iv. Compressão unidimensional em corpos de provas inicialmente secos; posterior degradação por saturação e secagem em diferentes tensões de confinamento; e continuação do ensaio de compressão nos corpos de prova saturado. Cada ensaio de colapso por degradação foi realizado em uma diferente tensão de confinamento e em um diferente corpo de prova. São considerados 3 ensaios de colapso por degradação.

A altura dos corpos de prova foram iguais a 10 cm, conforme proposto por Carvalho (2009).

Os ensaios foram conduzidos sob estado de tensão controlada aplicando-se estágios de carregamento, de forma similar aos ensaios de adensamento. Os estágios de

carregamento utilizados foram: 7,7; 30,8 e 122,9 kPa. Foi aplicado inicialmente um pré-carregamento com tensão igual a 0,9 kPa para ajuste da placa de topo. A tensão máxima considerada neste programa experimental é da ordem de 250 kPa. Esta tensão corresponde à tensão vertical gerada por uma coluna de aproximadamente 12 metros de enrocamento. Destaca-se que a flutuação do nível d'água do reservatório em barragens de enrocamento ocorre, em geral, entre 5 e 7m da crista da barragem.

4.3.1. Colapso por inundação

No processo de colapso por inundação o corpo de prova é saturado por inundação na tensão axial especificada no ensaio. Imediatamente após a inundação faz-se o acompanhamento dos deslocamentos axiais do topo do corpo de prova com o tempo até a estabilização das deformações. Considera-se que a estabilização das deformações quando os deslocamentos verticais medidos no topo do corpo de prova se mantêm estáveis nas duas últimas leituras. Os tempos adotados entre leituras foram: 0, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 min, similar aos ensaios de adensamento tradicionais. Destaca-se que não foram utilizados tempos maiores que 30 min., porque a partir deste tempo foi observado que as deformações estabilizaram.

Após a estabilização das deformações procede-se a continuação do carregamento em estágios com o corpo de prova saturado.

4.3.2. Colapso por degradação

No processo de colapso por degradação, o corpo de provas é submetido a ciclos de saturação, por imersão em água a 21°C, e secagem, a 100°C, até que se observe a estabilização das deformações.

O processo de saturação e secagem foi realizado em três níveis de tensão axial: 7,7 kPa, 30,8 kPa e 122,9 kPa.

Os tempos de saturação e de secagem utilizados neste procedimento de ensaio foram iguais a 360min, determinados através das curvas de saturação e secagem dos materiais (Figura 4.111 e

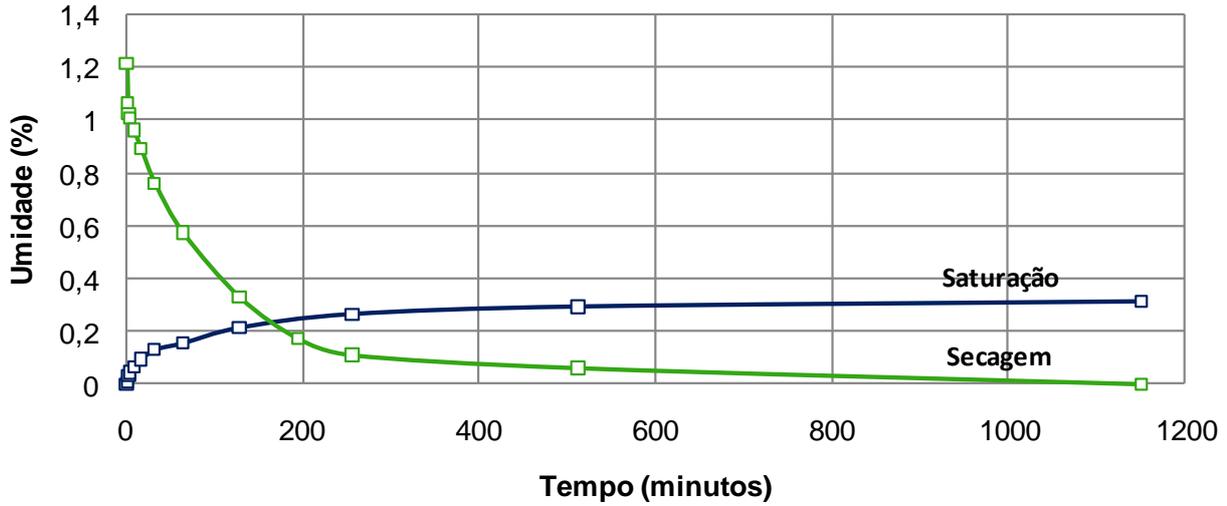


Figura 4.12). Destaca-se que o tempo utilizado correspondentes a aproximadamente 95% de saturação ou secagem do material.

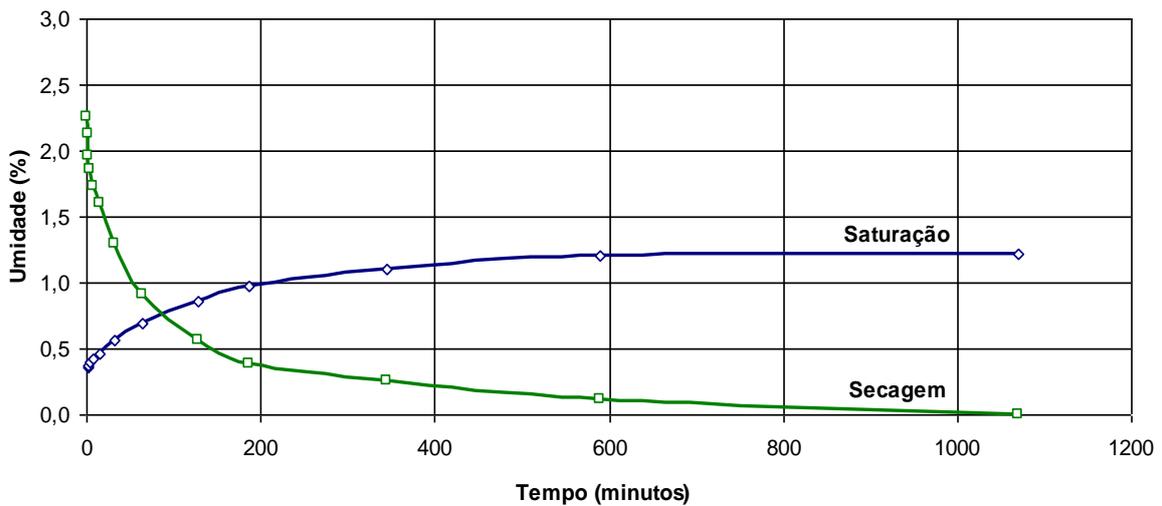


Figura 4.11: Curvas de saturação e secagem obtidas em ensaios de absorção e secagem para o enrocamento arenítico (Carvalho,2009).

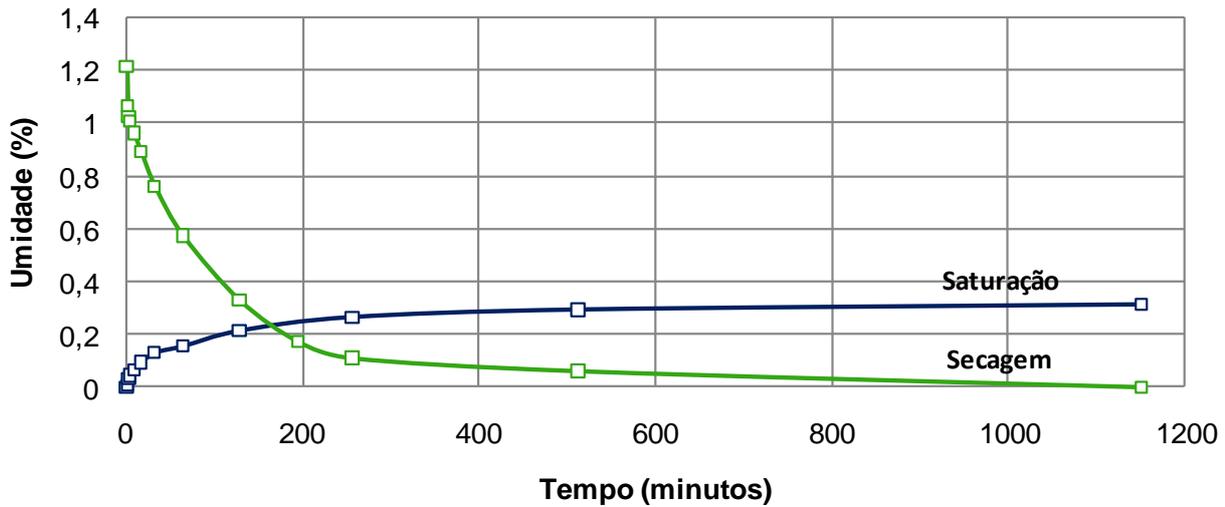


Figura 4.12: Curvas de saturação e secagem obtidas em ensaios de absorção e secagem para o enrocamento basáltico.

Após a secagem do corpo de provas é realizado o resfriamento da câmara para o início de um novo ciclo. O resfriamento é feito por ventilação forçada da câmara.

Após a estabilização das deformações geradas pelo colapso por degradação, procede-se a continuação do carregamento em estágios com o corpo de prova saturado.

Destaca-se que a variação de umidade no ensaio de saturação e secagem provoca a deformação por dilatação e retração dos componentes do equipamento de degradação. Neste sentido, foi realizado um procedimento de calibração do sistema para correção dos resultados dos ensaios. Este procedimento foi conduzido realizando-se o ensaio de saturação e secagem na câmara vazia sem o corpo de prova. A Figura 4.13 apresenta os resultados da calibração.

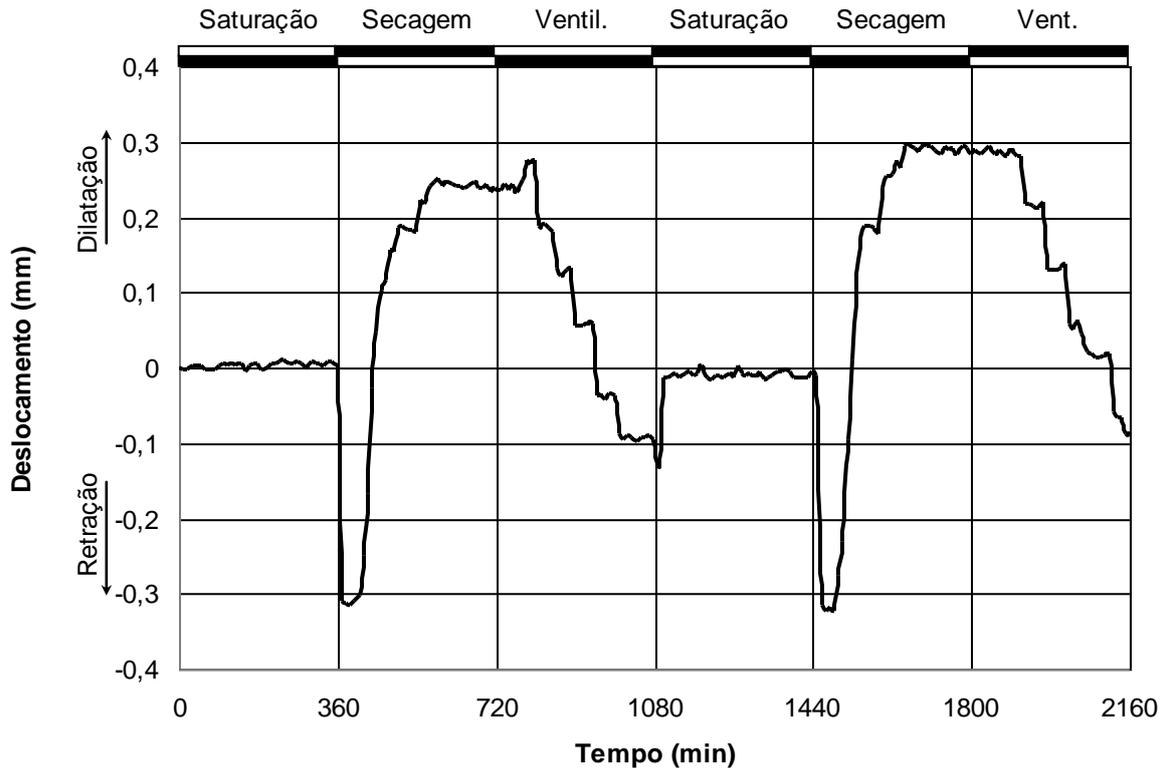


Figura 4.13: Ensaio de calibração do equipamento.

Do gráfico observa-se que na saturação o deslocamento é zero. Devido a esse fato, foi estabelecido que após a realização do colapso por ciclagem nos corpos de prova, a continuação do carregamento se daria com o corpo de prova saturado. Nota-se também que a dilatação do equipamento devido à secagem ocorre de forma muito rápida. A ventilação do equipamento se mostrou bastante eficiente, pois nesse período o equipamento mostrou uma retração bastante constante, com pequenos patamares.

A Figura 4.14 apresenta a variação da deformação axial com o número de ciclos de ensaio de saturação e secagem. Os resultados indicam que o número de ciclos necessários para estabilização das deformações geradas pelo colapso por degradação aumenta com a tensão axial. A Figura 4.14 indica que para o arenito de Manso o número mínimo de ciclos para estabilização das deformações devido ao colapso por degradação é 7 para tensão axial igual a 122,8kPa e 2 para tensões iguais a 30,7kPa. Para efeito de normalização do nível de degradação, considera-se na presente pesquisa um número de ciclos igual a 9.

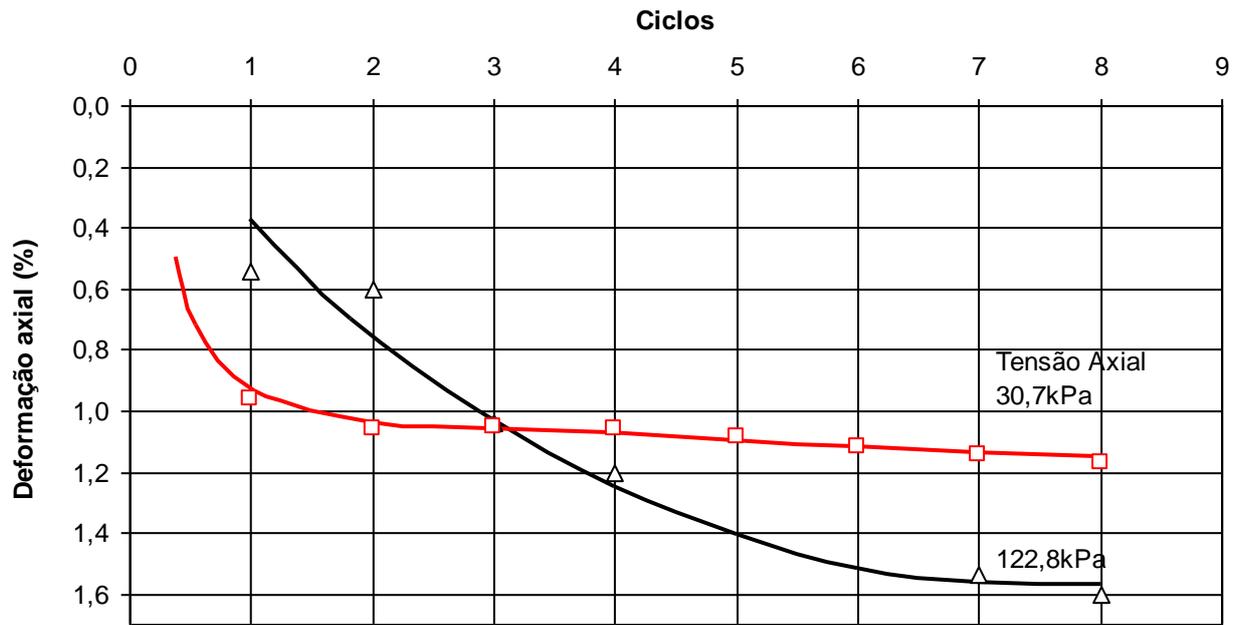


Figura 4.14: Variação das deformações axiais com o número de ciclos no ensaio de ciclagem em enrocamento arenítico (adaptado de Carvalho, 2009).

Capítulo 5 – Apresentação e análise de resultados

Neste capítulo faz-se a apresentação dos resultados buscando avaliar os seguintes efeitos, mostrados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Efeitos analisados no programa experimental.

	Colapso	Compressibilidade
Granulometria	x	x
Tipo de rocha	x	x
Tensão confinante	x	x
Tipo de colapso	x	
Saturação		x

5.1. Efeito da granulometria e tipo de colapso

As Figura 5.1 e Figura 5.2 apresentam os resultados dos ensaios de compressão confinada no material intacto seco, saturado e com inundação na tensão de 30,7 kPa realizados neste trabalho e por Carvalho (2009).

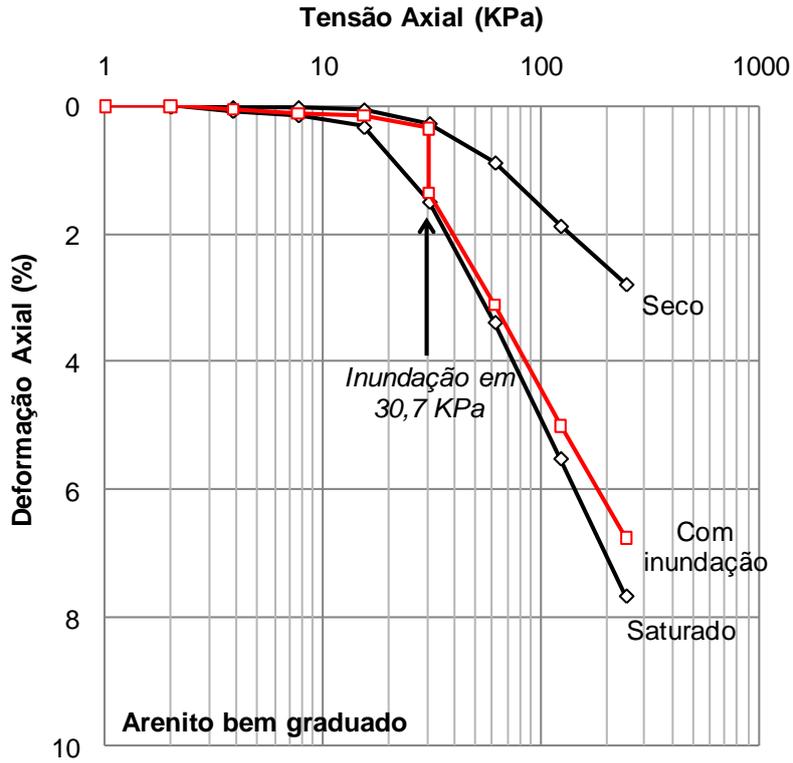


Figura 5.1: Variação da deformação axial com a tensão vertical no enrocamento bem graduado seco, saturado e com inundação.

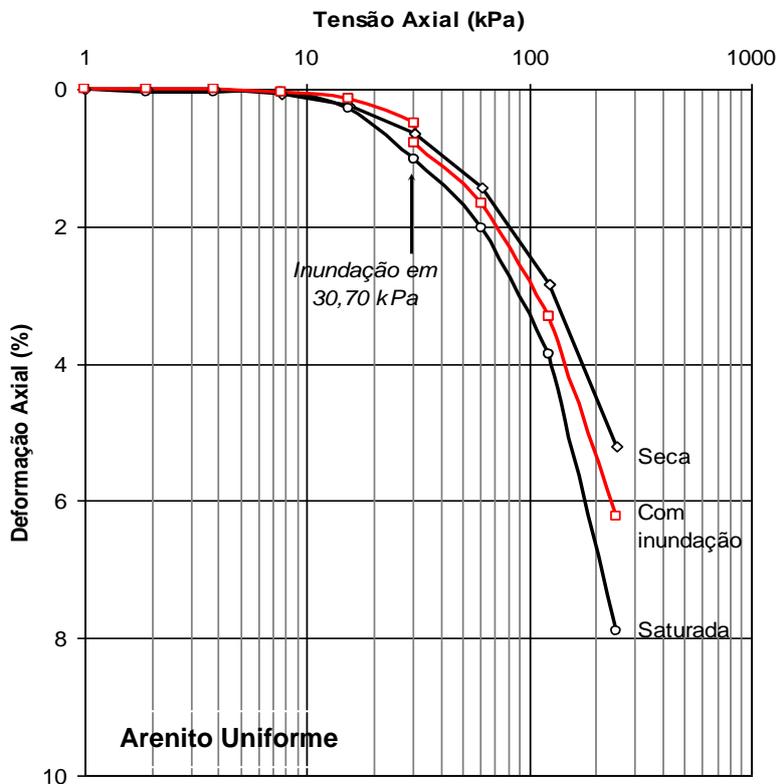


Figura 5.2: Variação da deformação axial com a tensão vertical no enrocamento uniforme seco, saturado e com inundação (Carvalho, 2009).

As Figura 5.3 e Figura 5.4 apresentam os resultados dos ensaios de compressão confinada no material intacto seco, saturado e com ciclos de saturação e secagem neste trabalho e por Carvalho (2009), respectivamente. Destaca-se que o ensaio após os ciclos de saturação e secagem foi conduzido com o corpo de provas saturado.

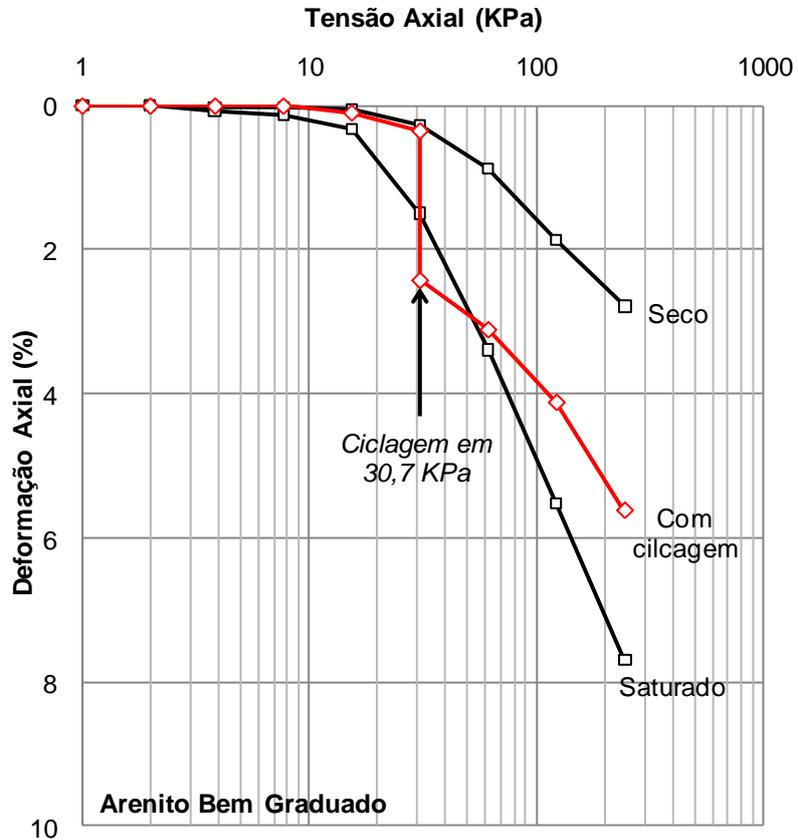


Figura 5.3: Variação da deformação axial com a tensão vertical depois da ciclagem.

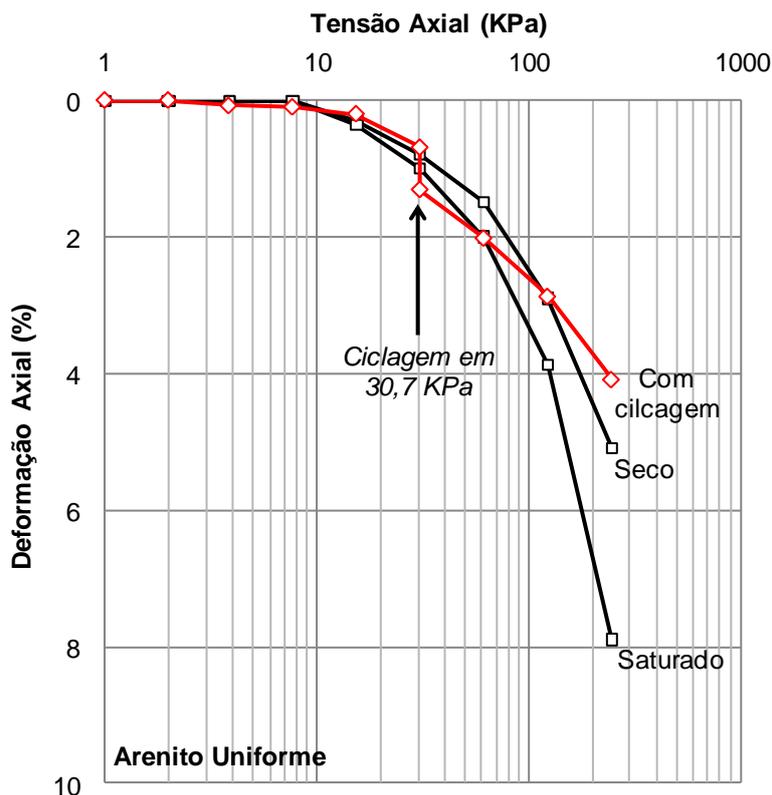


Figura 5.4: Variação da deformação axial com a tensão vertical (Carvalho, 2009).

A Tabela 5.2 apresenta os valores de deformação gerado pelos procedimentos de colapso por inundação e por degradação. A deformação por colapso é definida como a diferença em percentual da deformação causada pelo colapso.

Tabela 5.2: Níveis de deformação provocados pelo procedimentos de colapso na tensão de confinamento igual a 30,7kPa para os enrocamentos de areito

Tipo de colapso	Tipo de granulometria	
	Bem graduado	Uniforme
Inundação	1%	0,35%
Degradação	2,15%	0,70%

Da Tabela 5.2 nota-se que o processo colapso é mais pronunciado no enrocamento bem graduado, indicando uma deformação três vezes maior no enrocamento bem graduado em relação ao uniforme, aproximadamente, e de forma independente do tipo de colapso. Este comportamento indica que o colapso está mais associado a um maior número de contatos entre partículas que ao nível de tensão entre contatos, para uma mesma tensão de confinamento do corpo de prova.

Dos resultados apresentados na Tabela 5.2 nota-se que o colapso por degradação é aproximadamente duas vezes o colapso por inundação, independentemente da granulometria do enrocamento. Isso se justifica pelo maior nível de rearranjo entre partículas que ocorre no processo de degradação quando comparado com a inundação.

Esse comportamento sugere que durante a vida útil do enrocamento as deformações geradas pela degradação natural da rocha podem ser duas vezes maiores que as deformações geradas na primeira inundação do material, que ocorre na fase de enchimento do reservatório.

5.2. Efeito da tensão axial e tipo de rocha

As Figura 5.5 e Figura 5.6 apresentam os resultados dos ensaios de compressão confinada no enrocamento arenítico submetido a colapso por ciclagem nas tensões de 7,7 e 122,9 kPa, respectivamente.

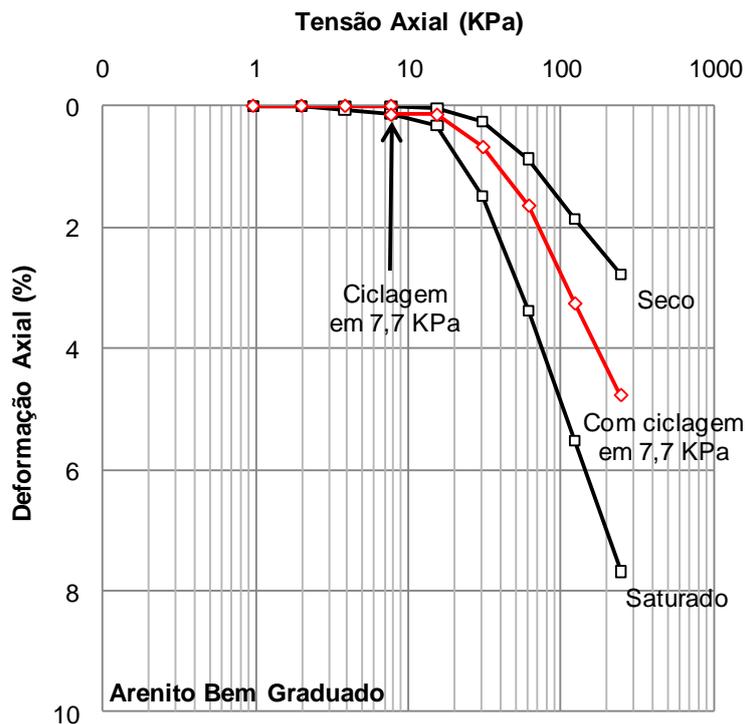


Figura 5.5: Variação da deformação axial com a tensão vertical.

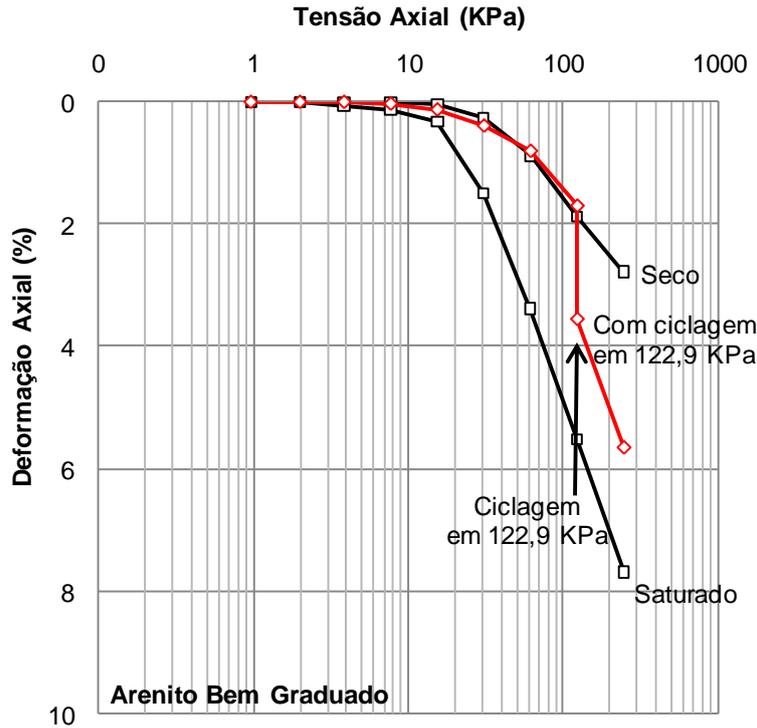


Figura 5.6: Variação da deformação axial com a tensão vertical.

As Figura 5.7 e Figura 5.8 apresentam os resultados dos ensaios de compressão unidimensional no enrocamento basáltico submetido a colapso por inundação ou por ciclagem, respectivamente. Destaca-se que os processos de colapso foram realizados na tensão axial igual a 30,7 kPa. Nota-se que as deformações geradas pelo colapso por inundação e por ciclagem são iguais a 0,8% e 2,9%, respectivamente.

Observa-se que após inundação o enrocamento apresenta comportamento similar ao material inicialmente saturado. Esse comportamento é característico dos enrocamentos (Nobari e Duncan, 1972).

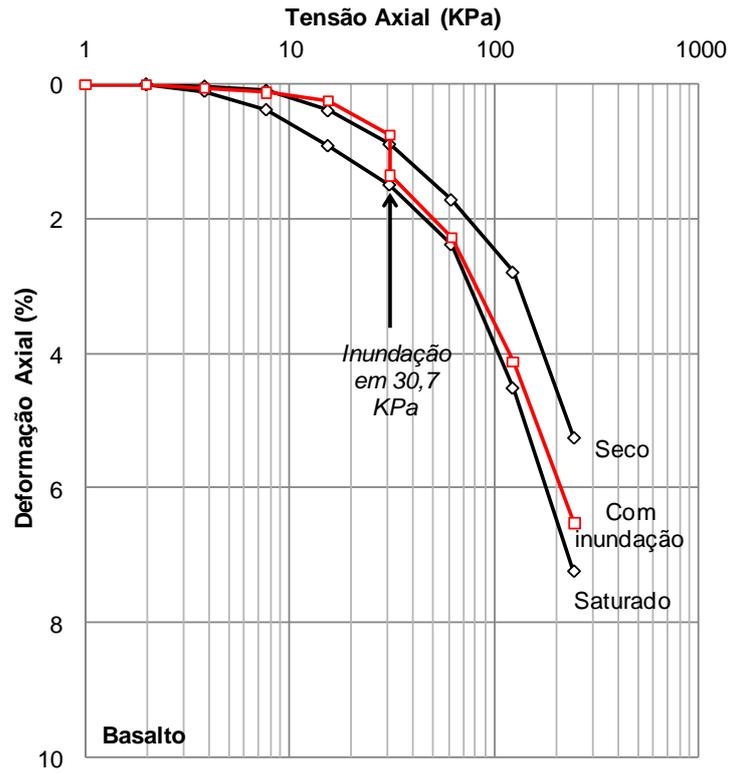


Figura 5.7: Variação da deformação axial com a tensão vertical no enrocamento bem graduado seco, saturado e com inundação.

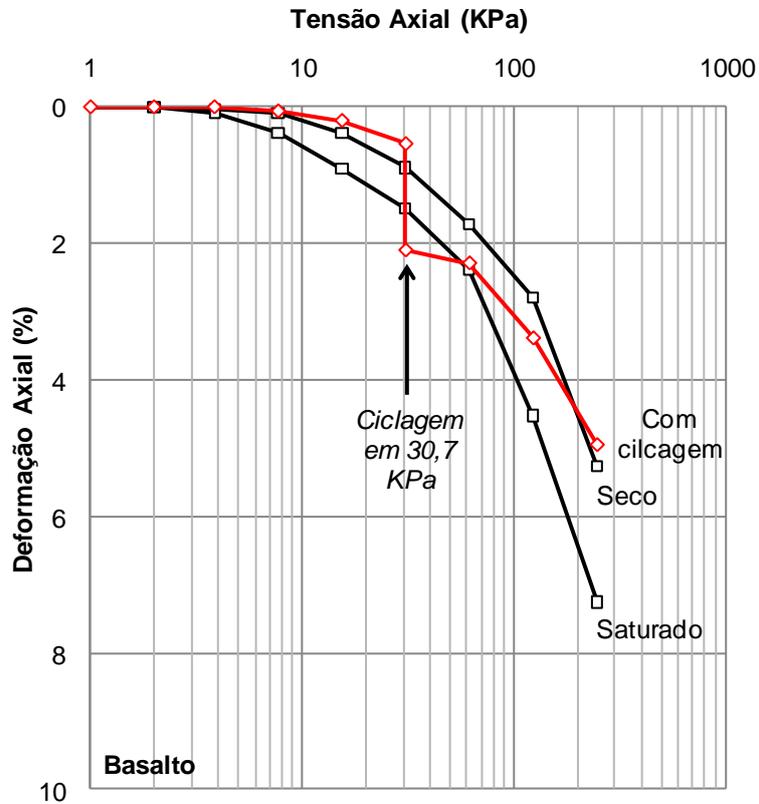


Figura 5.8: Variação da deformação axial com a tensão vertical.

As Figura 5.9 e Figura 5.10 apresentam os resultados dos ensaios de compressão confinada no enrocamento basáltico submetido a colapso por ciclagem nas tensões axiais iguais a 7,7kPa e 122,9kPa. As deformações geradas pelo colapso neste caso foram iguais a 0,8% e 650%, respectivamente.

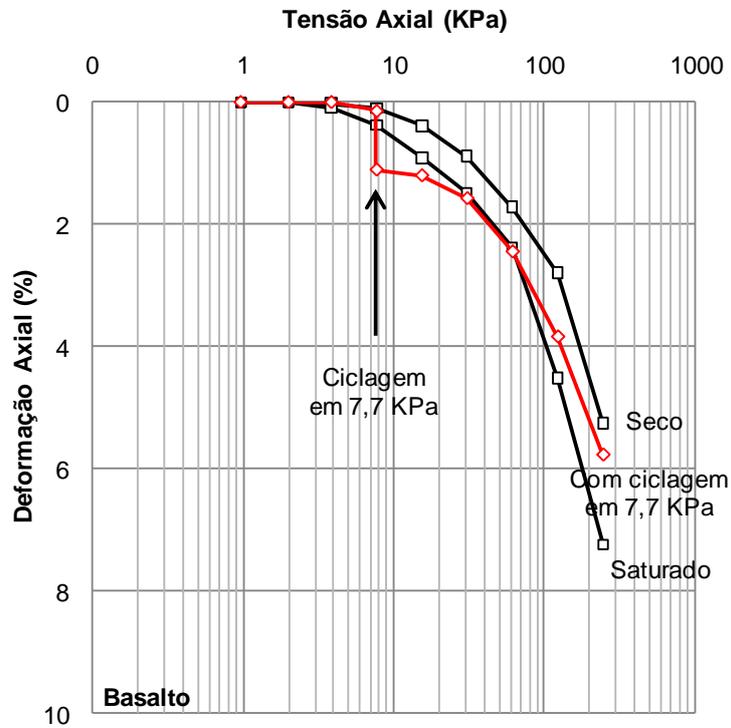


Figura 5.9: Variação da deformação axial com a tensão vertical.

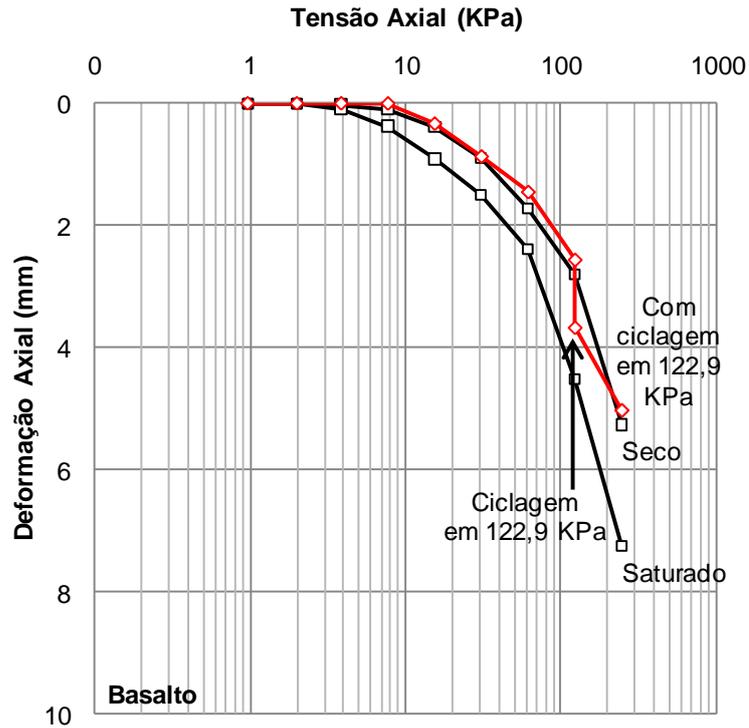


Figura 5.10: Variação da deformação axial com a tensão vertical.

A Figura 5.11 apresenta as variações das deformações por colapso por inundação e ciclagem no arenito e basalto bem graduados.

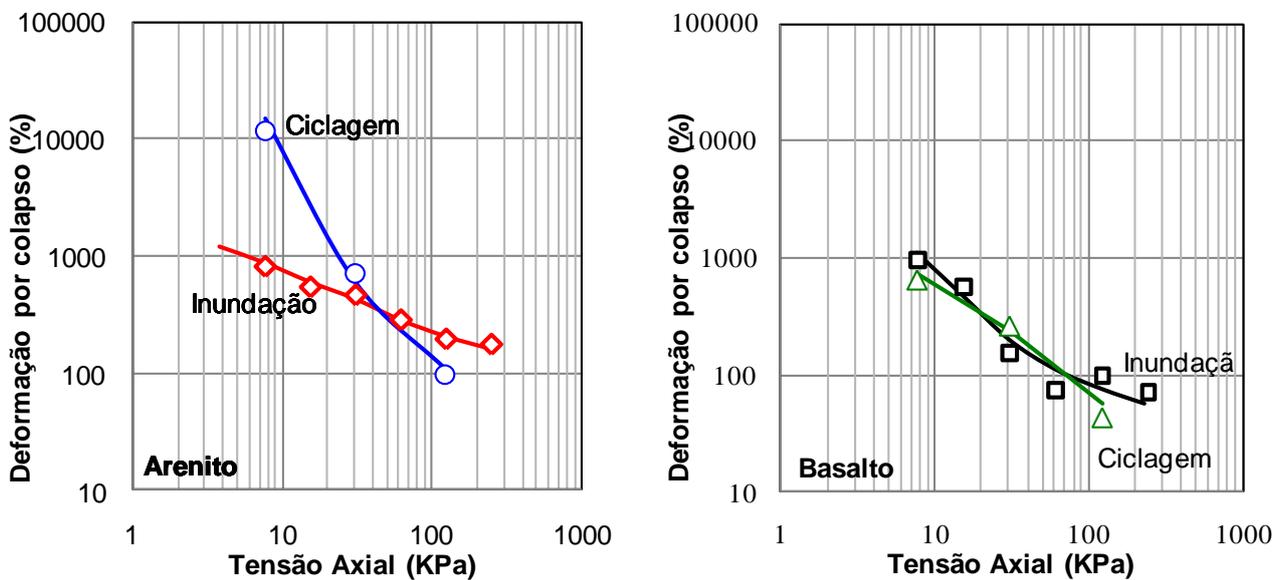


Figura 5.11: Variações das deformações por colapso por inundação e ciclagem no arenito e basalto bem graduados.

Nota-se que o nível de deformação por colapso no arenito é maior que no basalto, independentemente do tipo de procedimento de colapso. Esta deformação diminui com a tensão axial independentemente do tipo de procedimento de colapso.

Para maiores níveis de tensão, o colapso por ciclagem é menor do que por inundação independentemente do tipo de rocha.

Para o enrocamento basáltico, não há grande diferença entre os tipos de colapso nas deformações. Tanto para o colapso devido aos ciclos de saturação e secagem quanto para o colapso por inundação, o comportamento foi semelhante. Enquanto que o enrocamento arenítico é mais sensível ao tipo de procedimento de colapso do que o enrocamento basáltico.

5.3. Efeito da granulometria na compressibilidade

Para efeito de análise dos resultados do programa experimental considera-se que a variação da compressibilidade do material com o estado de tensão após o colapso não representa uma situação real de campo. Isso se justifica pelo fato que o processo de colapso ocorre sob estado de tensão constante e também não se altera após as deformações geradas pelo colapso.

A Figura 5.12 apresenta as variações do Módulo M para o arenito bem graduado e uniforme nos estados seco e saturado para níveis de tensões axiais maiores que 15 kPa. Para tensões axiais inferiores a 15 kPa o nível de deformabilidade dos enrocamentos estudados é desprezível.

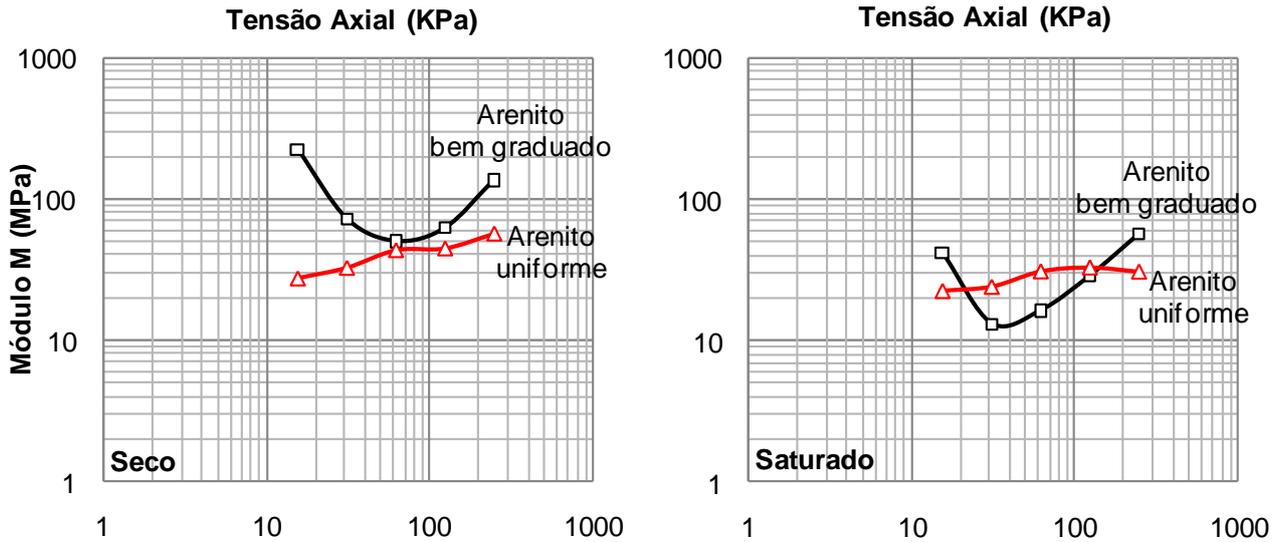


Figura 5.12: Variação do Módulo M para o arenito bem graduado e uniforme nos estados seco e saturado.

Destaca-se que o Módulo M é definido como a relação entre a variação da tensão e a deformação axiais em uma condição de deformação horizontal nula, como mostra a equação 5.1:

$$\text{Módulo } M = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \times 100 \quad (5.1)$$

onde:

σ_2 : tensão axial final

σ_1 : tensão axial inicial

ε_2 : deformação axial final

ε_1 : deformação axial inicial

Foi observado que o enrocamento no estado seco com granulometria uniforme utilizado por Carvalho (2009) se apresenta mais compressível que o enrocamento bem graduado estudado no presente trabalho. Este comportamento se deve provavelmente ao maior volume de vazios iniciais, com conseqüente menor densidade, que o enrocamento com granulometria uniforme possui em relação ao enrocamento bem graduado. Conclui-se deste modo que o estado seco de umidade reduz a mobilidade das partículas dentro da estrutura granular durante a compressão confinada no enrocamento bem graduado.

Nota-se que a que a distribuição granulométrica influencia significativamente na variação da compressibilidade com o estado de tensão na compressão confinada, independentemente do teor de umidade.

Da Figura 5.12 nota-se que o enrocamento saturado é mais compressível que o enrocamento seco independentemente do coeficiente de uniformidade. Esta figura indica que a efeito do teor de umidade influencia significativamente o comportamento do enrocamento.

A Figura 5.13 mostra a variação do Módulo M com a tensão axial gerado pela saturação do enrocamento de arenito. Nota-se que o aumento da deformabilidade é significativamente influenciado pela tensão axial e pela granulometria. Enquanto que para o enrocamento bem graduado ocorre uma redução da porcentagem de aumento da deformabilidade com a tensão axial, no enrocamento uniforme observa-se o aumento da porcentagem de aumento da deformabilidade. Para os níveis de tensão utilizados neste trabalho, as porcentagens de aumento para o enrocamento uniforme são menores que para o enrocamento bem graduado. Este comportamento sugere que o maior rearranjo granular propiciado pela saturação do enrocamento bem graduado reduz seu efeito com o aumento do estado de tensão axial, enquanto que, no enrocamento uniforme a saturação do enrocamento propicia em maiores níveis de tensão axial um maior rearranjo granular.

Nota-se ainda da Figura 5.13 que para os enrocamentos de arenito seco a deformabilidade do material bem graduado é menor que do material uniforme independentemente do nível de tensão. No caso do enrocamento saturado, este comportamento não é observado. Este comportamento pode ser justificado pela maior influencia gerada pela saturação na deformabilidade do enrocamento bem graduado em relação ao uniforme. Deste modo, conclui-se que o enrocamento bem graduado é mais sensível à saturação que o enrocamento uniforme.

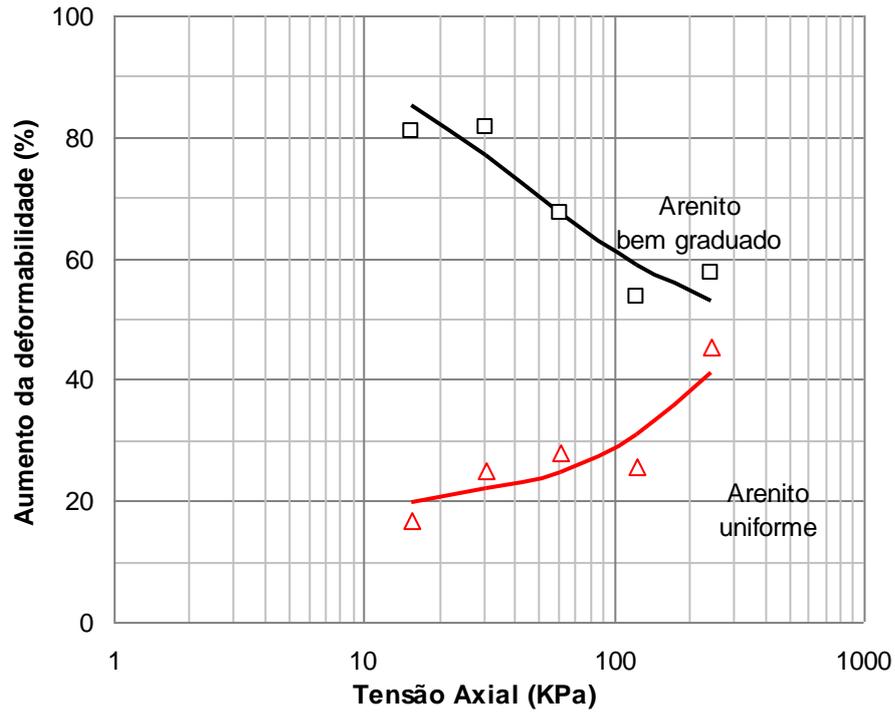


Figura 5.13: Variação do Módulo M com a tensão axial gerado pela saturação no enrocamento de arenito.

5.4. Efeito do tipo de material na compressibilidade

A Figura 5.14 apresenta a variação do Módulo M com a tensão vertical no enrocamento arenítico bem graduado e uniforme e no enrocamento basáltico.

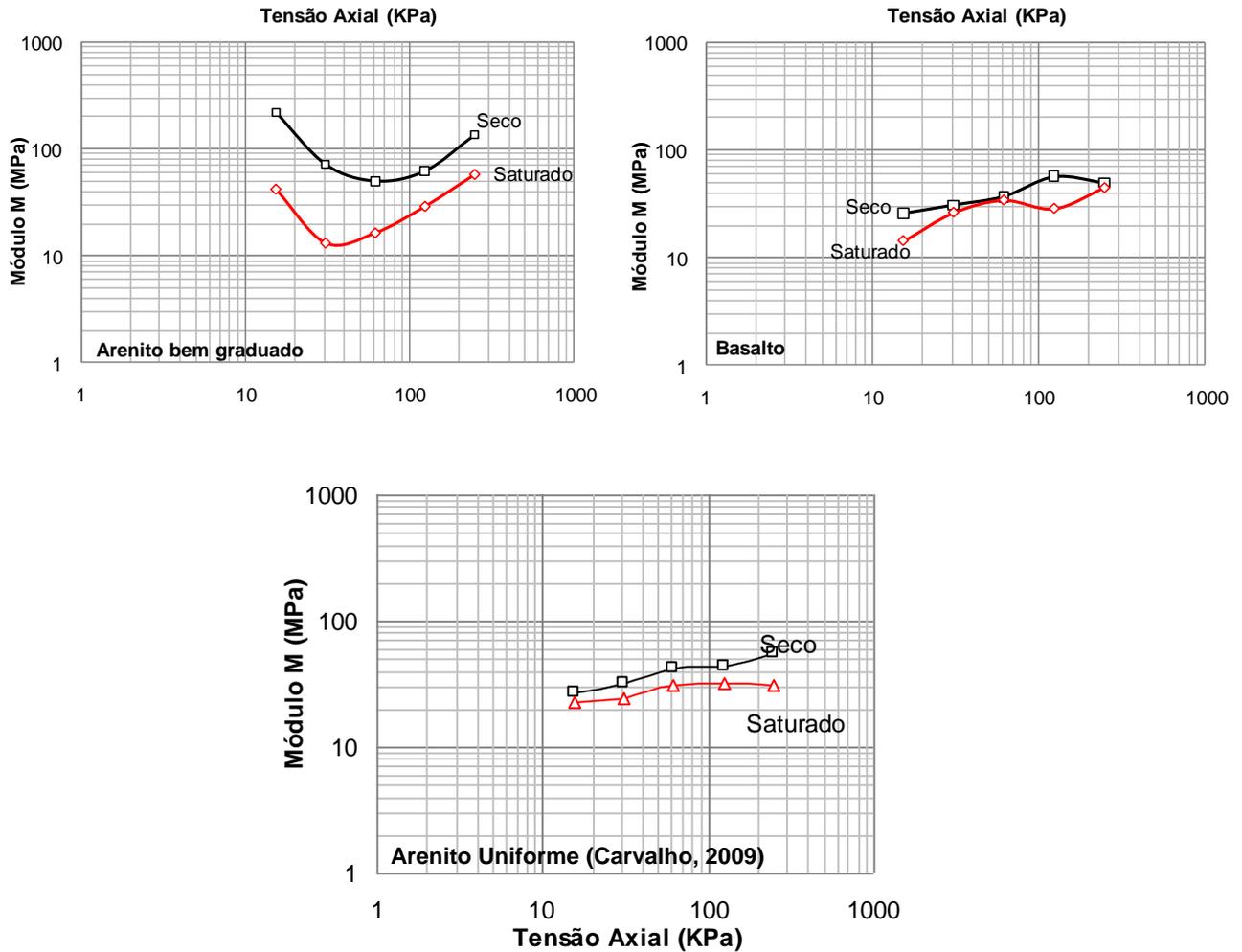


Figura 5.14: Variação do Módulo M com a tensão vertical no enrocamento arenítico bem graduado e uniforme e basáltico.

Da Figura 5.14 nota-se que a litologia da rocha constituinte do enrocamento influencia significativamente a variação da compressibilidade com o estado de tensão em compressão confinada. No entanto, a compressibilidade do enrocamento de basalto é pouco influenciada pela saturação do material. Este comportamento indica a maior sensibilidade à saturação do enrocamento arenítico que o enrocamento basáltico. Apesar disso, na condição de material seco, a Figura 5.14 indica que o enrocamento de basalto está mais suscetível ao rearranjo granular que o enrocamento arenítico. No caso do material saturado, o comportamento dos enrocamentos é similar do ponto de vista de variação da compressibilidade com a tensão axial.

5.5. Efeito da tensão axial na compressibilidade

As Figura 5.15 e Figura 5.16 apresentam as variações da compressibilidade por colapso gerada por inundação e ciclagem, respectivamente, nos enrocamentos de arenito e basalto bem graduados com a tensão axial.

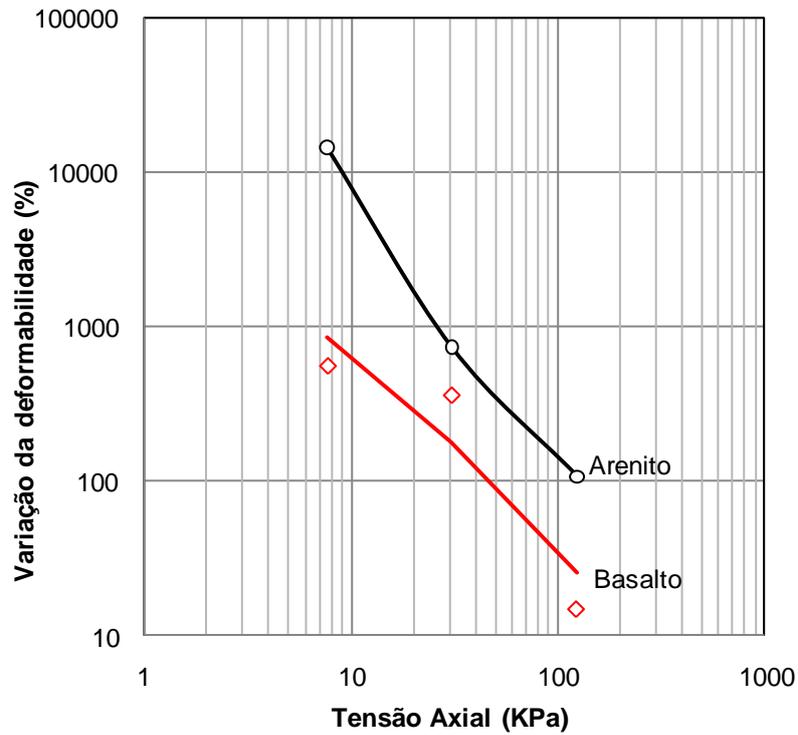


Figura 5.15: Variações do Módulo M por colapso e ciclagem no arenito e basalto bem graduados nas diferentes tensões axiais.

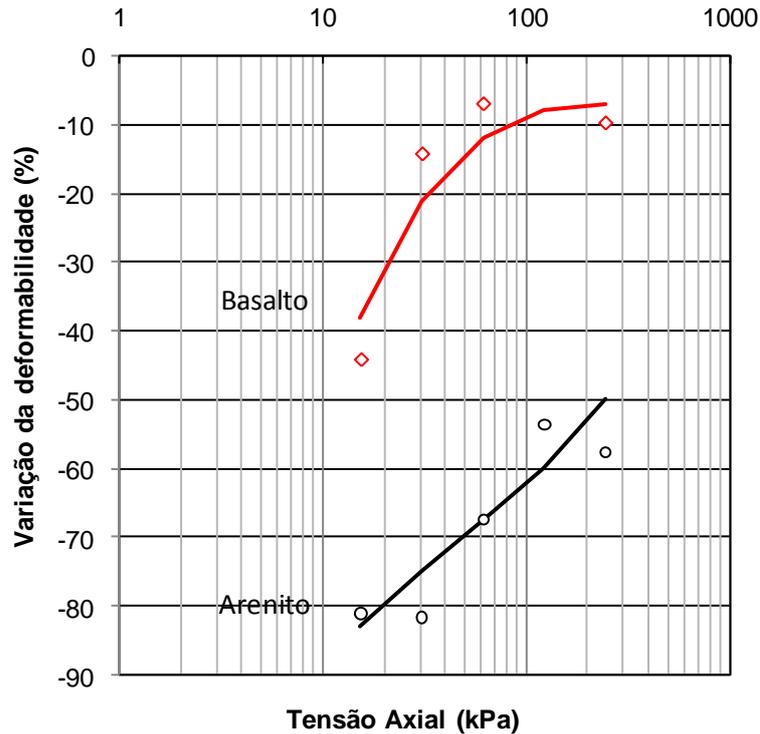


Figura 5.16: Variações do Módulo M por inundação no arenito e basalto bem graduados.

Os resultados apresentados nas Figura 5.15 e Figura 5.16 indicam o aumento da deformabilidade imediatamente após o colapso por ciclagem, enquanto que por inundação ocorre a redução da deformabilidade. Além disto, a ordem de grandeza das variações da deformabilidade por ciclagem são consideravelmente superiores que por inundação.

O nível de colapso a baixas tensões gera uma significativa densificação do material, o que sugere que o rearranjo foi pleno, ou seja, o enrocamento atingiu o imbricamento máximo para o receptivo nível de tensão axial. Para níveis de tensão maiores, o material ainda pode sofrer deformações significativas devido a variações no estado de tensão, o que pode indicar que o número de ciclos de saturação e secagem empregados no ensaio para a tensão de 122,9 kPa pode ter sido insuficiente.

Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões

6.1. Conclusões

A metodologia utilizada mostrou-se eficiente para a avaliação das características de compressibilidade do enrocamento da Barragem de Manso e da Barragem de Chapecó associadas aos processos de colapso geados por inundação e por degradação no laboratório através de ciclos de saturação e secagem.

O programa experimental indica que a granulometria, o teor de umidade, o tipo de rocha e a tensão axial influenciam significativamente na variação das deformações e da compressibilidade dos enrocamentos estudados.

O processo colapso é mais pronunciado no enrocamento bem graduado, indicando uma deformação três vezes maior no enrocamento bem graduado em relação ao uniforme, aproximadamente, e de forma independente do tipo de colapso.

Para uma mesma tensão de confinamento do corpo de prova, o colapso está mais associado a um maior número de contatos entre partículas que ao nível de tensão entre contatos.

Conclui-se que durante a vida útil do enrocamento as deformações geradas pela degradação natural da rocha podem ser duas vezes maiores que as deformações geradas na fase de enchimento do reservatório, na primeira inundação do material.

O imbricamento foi pleno para baixos níveis de tensão por causa do rearranjo provocado pela ciclagem, densificando ao máximo o material para este tipo de solicitação. No entanto no campo, caso ocorra a migração das partículas finas para as camadas mais inferiores do enrocamento, pode-se considerar a continuidade das deformações do colapso por ciclagem ainda em baixos níveis de tensões de confinamento.

Foi possível notar que o processo de inundação, que provoca o colapso da estrutura granular, é observado com maior intensidade no enrocamento bem graduado, devido ao maior número de contatos entre partículas.

Como era esperado, após a inundação o enrocamento apresenta comportamento similar ao material inicialmente saturado.

No enrocamento basáltico, tanto para o colapso devido aos ciclos de saturação e secagem quanto para o colapso por inundação, o comportamento foi semelhante.

O enrocamento arenítico se apresentou mais sensível ao tipo de procedimento de colapso.

O enrocamento bem graduado estudado no presente trabalho se apresenta menos compressível que o enrocamento no estado seco com granulometria uniforme utilizado por Carvalho (2009). Esse comportamento se deve provavelmente ao maior volume de vazios iniciais, com conseqüente menor densidade, que o enrocamento com granulometria uniforme possui em relação ao enrocamento bem graduado. Pode-se concluir deste modo que o estado seco de umidade reduz a mobilidade das partículas dentro da estrutura granular durante a compressão confinada no enrocamento bem graduado.

Nota-se que a que a distribuição granulométrica influencia significativamente na variação da compressibilidade com o estado de tensão na compressão confinada, independentemente do teor de umidade.

O efeito do teor de umidade possui grande influência no comportamento do enrocamento.

As porcentagens de aumento da deformabilidade para o enrocamento uniforme são menores que para o enrocamento bem graduado para os níveis de tensão utilizados neste trabalho. Este comportamento sugere que o maior rearranjo granular propiciado pela saturação do enrocamento bem graduado reduz seu efeito com o aumento do estado de tensão axial, enquanto que, no enrocamento uniforme a saturação do enrocamento propicia em maiores níveis de tensão axial um maior rearranjo granular.

Com o estado de tensão em compressão confinada, a litologia da rocha constituinte do enrocamento influencia significativamente a variação da compressibilidade. No entanto, a compressibilidade do enrocamento de basalto é pouco influenciada pela saturação do material. Isso indica uma maior sensibilidade à saturação do enrocamento arenítico que o enrocamento basáltico. Apesar disso, o enrocamento de basalto está mais suscetível ao rearranjo granular que o enrocamento arenítico na condição de material seco. No caso do material saturado, do ponto de vista de variação da compressibilidade com a tensão axial, o comportamento dos enrocamentos é semelhante.

Enquanto que por inundação ocorre a redução da deformabilidade, observa-se um aumento da deformabilidade imediatamente após o colapso por ciclagem. Somado a isso, a ordem de grandeza das variações da deformabilidade por ciclagem são consideravelmente superiores que por inundação.

Os equipamentos desenvolvidos juntamente com Carvalho (2009) se mostraram eficientes na análise do comportamento de materiais de enrocamento, visto que os resultados foram satisfatórios. Tanto a parte responsável pelos ensaios de compressão confinada quanto a câmara de degradação.

6.2. Sugestões

Sugere-se que para os ensaios de ciclagem nas tensões de confinamento mais elevadas, sejam empregados mais ciclos de saturação e secagem, visto que o material se mostrou mais deformável nesses níveis.

Devem ser realizados estudos em enrocamentos basálticos com granulometria uniforme, para efeito de comparação com os resultados do presente trabalho.

Referências Bibliográficas

- 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. 1998. Deformabilidade de um Enrocamento Obtida em Ensaio 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, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 128 p.
- CARVALHO, N. de O. V. e MAIA, P. C. de A. (2009). *Desenvolvimento de Equipamento para Estudo da Compressibilidade de Enrocamentos Durante Processos de Degradação*. COBRAMSEG 2008, Armação dos Búzios. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Rio de Janeiro : ABMS-NRRJ, 2008. v. 1. p. 1625-1629.
- CEA, J. C. 1998. *Resistencia al Corte de Escolleras Obtenida a Partir de Ensayos de Laboratorio*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales e Puertos, Madrid, pp. 1-367.
- DONAGHE, R.; COHEN, M. 1978. Strength and Deformation Properties of Rockfill. U.S. Army Engineer W. E. S., *Technical report S-78-1*, Vicksburg, pp. 1-24.
- FRAHIA NETO, S.H. (1995). *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.
- FRAHIA NETO, S.H. (1995). *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. 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.
- FUMAGALLI, E. Test on cohesionless materials for rockfill dams. *ASCE, Journal of the soil mechanics and foundation division*, SM1, January, 1969. p. 313-330.
- GOODMAN, R. E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. John Wiley & Sons, second edition, New York.
- HORN, H. M.; DEERE, D. U. 1962. Frictional Characteristics of Minerals. *Géotechnique*, vol.12, no. 4, pp. 319-335.
- INDRARATNA, B.; WIJEWARDENA, L. S. S.; BALASUBRAMANIAM, A. S. 1993. Large-scale Triaxial Testing of Greywacke Rockfill. *Géotechnique*, vol. 43, no. 1: pp. 37-51.
- LEINZ, V.; MENDEZ, J. C. 1963. *Vocabulário Geológico*. Editora Nacional, 3ª edição, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1-198.
- LEPS, T. M. 1970. Review of Shearing Strength of Rockfill. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol. 96, no. SM4, Proc. paper 7394, July, pp. 1159-1170.
- 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.
- 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.

- MAIA, P. C. A.; SAYÃO A. S. F. J.; NUNES, A. L. L. S. 2004. Resistência e Compressibilidade de enrocamentos submersos. *XII Congresso Brasileiro de Mecânico dos Solos e Engenharia Geotécnica*.
- 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.
- MARSAL, R.J. 1973. Mechanical properties of rockfill. Embankment-Dam Engineering. *Casagrande Volume*, John Wiley & Sons Pub., pp. 109-200.
- MATHERSON, G. M. 1986. Relationship Between Compacted Rockfill, Density and Gradation. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, December, no. 12, vol. 112, pp. 1119-1124.
- MINETTE, E. 1982. *Quantificação Geomecânica e de Alterabilidade de um Diorito*. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1-262.
- MITCHELL, J. K. 1976. Fundamental of Soil Behavior. *John Wiley & Sons, Inc.* New York, pp. 1-422.
- NOBARI. E.; DUNCAN, J. 1972. Effect on Reservoir Filling on Stresses and Movements in Earth and Rockfill Dams. *Department of Civil Engineering*, Report no. TE-72-1, University of California, pp. 1-186.
- PENMAN, A. D.; CHARLES, J. A. 1971. The Quality and suitability of Rockfill Used in dam Construction. *14th International Conference on Large Dams*, vol.5, Rio de Janeiro, pp. 526-163. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 351p.
- PESSANHA. C. A. 2010. Considerações sobre os procedimentos de campo e de laboratório para estudo de degradação de geossintéticos. *XV Congresso Brasileiro de Mecânico dos Solos e Engenharia Geotécnica*.
- PINTO, V. da C. 2006. *Estudo de degradação de Geotêxteis Tecidos*. Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, pp. 1-152.
- RAMOS, P. P. M. 2009. *Análise de deformações em Misturas Asfálticas aplicadas como elemento impermeabilizante em barragens de enrocamento*. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. 182p.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- XAVIER, G. C. 2006. *Resistência, Alterabilidade e Durabilidade de Peças Cerâmicas Vermelhas Incorporadas com Resíduo de Granito*. Tese de doutorado, UENF.
- ZELLER, J.; WULLIMANN, R. 1957. The Shear Strength of the Shell Materials for the Göschenenalp Dam - Switzerland. *4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol.2, pp.399-415.