

Estudo de Laboratório das Propriedades Quanto à Resistência e Deformabilidade de Enrocamentos Considerando o Efeito de Escala

A. C. Corrêa dos Santos, UnB; S. V. Fleury, FURNAS e A. P. de Assis, UnB

Resumo- O estudo dos diversos fatores que influenciam o comportamento tensão x deformação dos enrocamentos tem por objetivo permitir a previsão de seu comportamento mecânico. Contudo, as dimensões dos ensaios de laboratório não conseguem representar a granulometria real, o que torna os parâmetros de projeto não representativos do comportamento da estrutura acabada. Aliado a este fato, os resultados de retroanálises de instrumentação de campo não podem ser aplicados indiscriminadamente em outras obras. O presente trabalho apresenta, de modo resumido, os resultados obtidos na avaliação experimental da influência da densidade relativa nos parâmetros de deformabilidade e resistência de um maciço de enrocamento, enfocando ainda o aspecto da composição granulométrica, com o intuito de melhorar as previsões de projeto.

Corroborar-se que a pesquisa supracitada é mais ampla e aborda o aprimoramento de equipamentos utilizados, a melhoria de metodologias empregadas e o desenvolvimento de um novo equipamento. Tais aspectos serão objeto de futuros trabalhos, em face da continuidade da pesquisa.

Palavras-chave – Enrocamento, compactação, efeito escala, densidade relativa.

I. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento tensão x deformação das barragens de enrocamento com núcleo impermeável se traduz na tentativa de compatibilizar as deformações ocorridas no elemento resistente (enrocamento) com as ocorridas no elemento impermeabilizante (núcleo), evitando concentrações elevadas de tensões e eventual fissuração do núcleo, o que compromete a funcionalidade da obra. Contudo, são nos casos de barragens de enrocamento com face de concreto que surgem os maiores problemas quanto aos deslocamentos admissíveis, devido à incompatibilidade de deformações entre o enrocamento e a laje, podendo induzir o aparecimento de trincas na laje e comprometer a estanqueidade do reservatório.

Portanto, a utilização de barragens de enrocamento pressupõe uma excelente previsão do comportamento da obra quanto as suas características de resistência mecânica e principalmente de deformabilidade. Com esta finalidade, tem-se observado um grande avanço no estudo do

Este trabalho foi apoiado financeiramente pelo Programa Anual de P&D de FURNAS Centrais Elétricas S.A. sob a gestão da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

A. C. Corrêa dos Santos é doutorando pela Universidade de Brasília (alexcsantos@cultura.com.br).

S.V. Fleury/Msc é engenheiro do DCT.T/FURNAS (sfleury@furnas.com.br).

A. P. de Assis/PhD é professor do Departamento de Geotecnia da Universidade de Brasília (aassis@unb.br).

comportamento mecânico de enrocamentos, tanto os relacionados à retro análises de instrumentação de campo, como os relacionados com os ensaios de laboratório, que buscam avaliar a influência dos diversos fatores que regem o comportamento deste material; reportados para o caso de barragens brasileiras pelas referências [1], [2], [3], [4] e [5].

A este respeito as referências [3] e [1] comentam que os resultados de retro análises de instrumentação de campo não podem ser aplicados indiscriminadamente em outras obras, a menos que haja similaridade dos materiais de enrocamento, da geometria da estrutura e do procedimento construtivo, o que não é nada corriqueiro. O custo proibitivo dos ensaios de campo, aliado ao fato de que as dimensões dos ensaios de laboratório não conseguem representar a granulometria real, torna a previsão dos parâmetros de projeto não representativa do comportamento real da estrutura acabada [6]. Essas são as principais razões para os critérios de projeto e construção adotados na engenharia de barragens de enrocamento serem ainda predominantemente empíricos.

A dificuldade em se prever os parâmetros que irão ditar o comportamento quanto à resistência e a deformabilidade de aterros de enrocamento a partir de ensaios de laboratório (que trabalham com uma escala reduzida) e através de retro análises de obras acabadas, motivou o Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A, em parceria com a Universidade de Brasília, a desenvolver pesquisas com o objetivo de identificar e dimensionar os principais fatores que condicionam o comportamento mecânico dos enrocamentos. Este trabalho apresenta resultados preliminares de pesquisas, ainda em andamento, que abordam os aspectos relacionados à representatividade dos ensaios de laboratório.

Outras etapas deste projeto de pesquisa, que envolvem a melhoria e o desenvolvimento de equipamento e metodologias serão apresentadas futuramente em outros trabalhos.

II. METODOLOGIA

A. Embasamento Teórico.

Torna-se adequada a apresentação dos principais fatores que condicionam as características mecânicas desses materiais, segundo referência [7]. A referência [3] apresentou uma divisão destes fatores de forma que representassem as tensões atuantes, as características das partículas constituintes do enrocamento, o enrocamento

como meio granular e os procedimentos de ensaio, como se segue:

- a. Tensões atuantes: estado de tensão, tempo;
- b. Partículas constituintes do enrocamento: resistência ao fraturamento das partículas, forma das partículas, dimensão das partículas, atrito entre partículas, mineralogia, estado de alteração da rocha;
- c. Enrocamento como meio granular: estado de compactidade, distribuição granulométrica, adição de água, inclusão de finos, dimensão da amostra (efeito de escala);
- d. Procedimentos de ensaio: trajetória de tensões, trajetória das deformações aplicada à amostra, velocidade de deformação ao cisalhamento.

Com relação aos fatores apresentados, a maioria é passível de serem simulados em escala de laboratório. A principal exceção fica por conta da dimensão máxima das partículas, que por sua vez altera a distribuição granulométrica, afetando o embricamento e fraturamento das partículas, que é diretamente responsável pelo estado de compactidade do material (efeito de escala).

De fato, é observada uma grande influência do índice de vazios no comportamento quanto à deformabilidade dos enrocamentos. A bibliografia mostra que enrocamentos de mesma mineralogia e distribuição granulométrica, submetidos à compressão unidimensional com índices de vazios diferentes, apresentam comportamentos distintos. Nota-se que a compressibilidade aumenta significativamente com o aumento do índice de vazios inicial.

Porém ao serem ensaiadas duas amostras com distribuições granulométricas paralelas, com o mesmo material e índice de vazios inicial, estas não apresentam comportamento semelhante [5]. Isto pode ser explicado fazendo uma analogia com o comportamento das areias, onde o mesmo índice de vazios pode representar um material fofo para uma dada distribuição granulométrica e compacto para outra, apresentando comportamento mecânico completamente distintos. Este fato tem sido apontado como principal responsável pela falta de representatividade dos ensaios em escala de laboratório.

Diversos autores afirmam que o parâmetro mais indicado para representar o grau de compactidade do enrocamento é a densidade relativa (D_R). Esta afirmativa está embasada no estudo do comportamento mecânico das areias, onde a densidade relativa é um parâmetro bastante difundido. A referência [8], estudando as propriedades de rejeitos de minério de ferro (material granular), mostrou que para uma mesma mineralogia e forma dos grãos, os parâmetros de resistência seguem uma curva característica em função da densidade relativa. Ou seja, desde que ensaiados na mesma densidade relativa, ensaios com grãos menores gerariam os mesmos resultados que aqueles feitos com grãos maiores. No entanto, devido ao tamanho das partículas do enrocamento, existem dificuldades experimentais na determinação das densidades máximas e mínimas destes materiais [3].

Para os enrocamentos existem duas dificuldades práticas que impedem a perfeita analogia com os estudos desenvolvidos para as areias. Primeiro, a falta de um ensaio padronizado para determinação das densidades máximas e mínimas. Ensaio diferentes apresentam valores distintos para estas densidades, pois são vários os fatores que interferem nestes resultados como: método de compactação (por impacto, pressão ou vibração), formato do molde e a relação entre o diâmetro máximo das partículas e o tamanho do molde. Segundo, a quebra das partículas durante o processo, que é agravada pelo aumento do diâmetro das mesmas, por distribuições granulométricas uniformes ou descontínuas e pela resistência das partículas.

A falta de padronização destes ensaios talvez tenha sido o principal obstáculo ao desenvolvimento das técnicas de laboratório para previsão do comportamento mecânico dos enrocamentos.

B. Material Utilizado.

Para realização desta pesquisa foram escolhidos materiais que foram utilizados como enrocamentos em diversas regiões do país, tentando abranger a grande variabilidade litológica encontrada em países de dimensões continentais como o Brasil e respeitando a disponibilidade destes materiais conforme o empreendimento.

Neste sentido foram destinadas a pesquisa basalto e brecha basáltica provenientes da UHE Campos Novos, granito da UHE Serra da Mesa, granito gnaisse da UHE Itapebi e metassilito da UHE Manso.

Na primeira etapa do trabalho foram realizadas as campanhas de caracterização das rochas que compreende as partículas dos enrocamentos e levantamento das condições de compactação em campo destes materiais.

Na etapa posterior iniciaram-se os ensaios para determinação das características quanto à deformabilidade e resistência destes enrocamentos. Notou-se, porém, a grande influência do fator quebra dos grãos em materiais menos resistentes como a brecha basáltica e o metassilito, o que evidenciou a necessidade de concentrar esforços para o entendimento do papel da densidade relativa nas características mecânicas do enrocamento em materiais mais competentes, permitindo assim diminuir a complexidade a fim de definir as primeiras diretrizes deste estudo. Desta forma serão apresentadas neste artigo apenas as campanhas de ensaios realizadas com os granitos de Serra da Mesa e de Itapebi.

C. Ensaio Realizados.

Foram realizados ensaios de caracterização da rocha intacta e para determinação de suas características quanto à resistência mecânica e a deformabilidade, listados a seguir:

- Peso específico aparente seco;
- Absorção;
- Porosidade aparente;
- Abrasão Los Angeles;
- Módulo de deformabilidade;
- Resistência à compressão;

- Resistência à tração em compressão diametral;
- Perda na ciclagem água-estufa;
- Perda na ciclagem acelerada com etilenoglicol.

Foram definidas para os enrocamentos no mínimo três curvas granulométricas de cada material no intuito de simular em ensaio o efeito da mudança de escala, bem como a variação na distribuição granulométrica. Para tanto foram definidas três campanhas básicas de ensaios, sendo uma para determinação das densidades máximas e mínimas destes enrocamentos em laboratório (espalhamento e compactação), outra para determinação do módulo de deformabilidade (compressão unidimensional) e por último para determinação das características quanto à resistência destes materiais (cisalhamento direto).

Os ensaios para determinação das densidades máximas e mínimas foram realizados em uma câmara cilíndrica rígida com diâmetro interno de 1,0 m e altura igual a 0,5 m (Figura 1). As amostras para os ensaios de determinação das densidades máximas foram compactadas com uma placa vibratória com diâmetro de 0,96 m e peso estático de 3,88 kN.



Figura 1: Câmara cilíndrica para determinação das densidades máximas e mínimas.

Os ensaios de compressão unidimensional foram realizados em câmara cilíndrica com diâmetro interno e altura iguais a 1,0 m (Figura 2). A câmara é constituída de anéis de alumínio e borracha, alternados e justapostos. Esta configuração minimiza o atrito entre as partículas de enrocamento e a parede interna da câmara, quando da aplicação da força vertical, assegurando a condição de deformação horizontal praticamente nula no corpo-de-prova [1]. A câmara cilíndrica é similar à confeccionada no LNEC, em Lisboa [9 e 10].

A força vertical é aplicada em estágios por meio de um cilindro hidráulico e controlada com uma célula de carga. O deslocamento vertical é obtido pelas leituras de extensômetros mecânicos ou LVDTs diametralmente dispostos na tampa superior. A tensão confinante é determinada pela média das leituras de 32 extensômetros elétricos (resistivos) posicionados nos anéis centrais de alumínio. O equipamento permite que a razão entre o diâmetro da câmara e o diâmetro máximo das partículas rochosas ($D/d_{\text{máx}}$) seja igual ou maior que 5,0, quando da utilização de amostras de enrocamento com partículas de até 200 mm. Detalhes sobre o equipamento e a sua calibração são apresentados na referência [1].



Figura 2: Equipamento de compressão unidimensional.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em equipamento constituído por um quadro de reação de aço e duas caixas de cisalhamento, cada uma com 80 x 80 x 20 cm. As tensões normal e cisalhante são aplicadas por meio de cilindros hidráulicos. O quadro de reação de aço é calculado para suportar a carga máxima dos cilindros sem deformações significativas. Os deslocamentos cisalhantes e normais são medidos por extensômetros mecânicos ou por meio de LVDTs.

III. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A. Resultados dos Ensaios de Caracterização

Para o granito de Itapebi os resultados dos ensaios de caracterização encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Ensaios de caracterização do granito gnaisse de Itapebi.

Características da rocha	Unidade	Resultados
Peso específico aparente seco	kN/m ³	25,1 – 25,6
Absorção	%	0,4 – 1,1
Porosidade aparente	%	1,2 – 2,9
Abrasão Los Angeles	%	57 – 63
Módulo de deformabilidade	GPa	12 – 14
Resistência à compressão	MPa	47 – 56
Resistência à tração em compressão diametral	MPa	4,8
Perda na ciclagem água-estufa	%	0,59
Perda na ciclagem acelerada com etilenoglicol	%	0,03

Para o granito de Serra da Mesa os resultados dos ensaios de caracterização encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Ensaios de caracterização do granito de Serra Mesa.

Características da rocha	Unidade	Resultados
Peso específico aparente seco	kN/m ³	26,35
Absorção	%	0,36

Características da rocha	Unidade	Resultados
Porosidade aparente	%	0,96
Abrásão Los Angeles	%	22
Módulo de deformabilidade	GPa	50
Resistência à compressão	MPa	160 – 180
Resistência à tração em compressão diametral	MPa	11,5

B. Distribuições Granulométricas Adotadas

Foram adotadas três distribuições granulométricas para os ensaios com o enrocamento de Itapebi (Figura 3). As distribuições adotadas foram baseadas na curva granulométrica de campo sendo as mesmas truncadas nos diâmetros máximos dos grãos para cada curva em 6", 3" e 1" respectivamente.

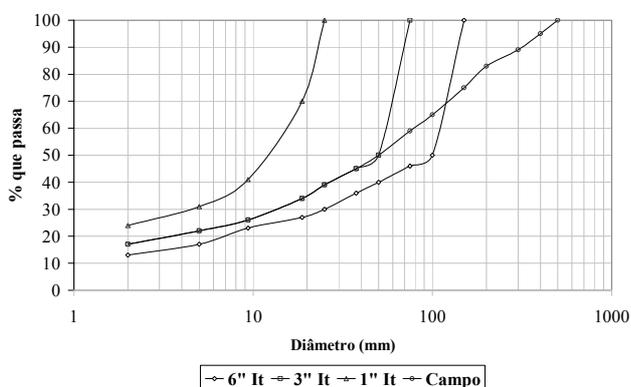


Figura 3: Curvas granulométricas adotadas para o enrocamento de Itapebi.

Nesta etapa foram adotadas para o enrocamento de Serra da Mesa quatro distribuições granulométricas distintas, sendo as mesmas denominadas pelo diâmetro máximo das partículas constituídas de cada distribuição como 8", 6", 3" e 1" (Figura 4). Por praticidade, todo o material passante na peneira #10 (abertura de 2 mm) foi denominado de finos. Como a quantidade de finos em um enrocamento não deve exceder um valor para o qual esta passa a dominar o comportamento mecânico e principalmente o comportamento quanto a permeabilidade, ela foi limitada a 10% para ambas as curvas. Desta forma, não foram adotadas curvas paralelas e nem truncadas, mas com limites superiores e inferiores resultando em curvas com a melhor distribuição possível (Figura 4).

C. Resultados dos Ensaios de Determinação das Densidades Máximas e Mínimas

Para execução dos ensaios de determinação das densidades máximas e mínimas foi estipulado, com base em ensaio teste, um peso de 680 kg de material para cada curva a ser dividido em duas camadas. Este procedimento teve a finalidade de garantir que o somatório das duas camadas forneceria uma altura total de material compactado de aproximadamente 40 cm.

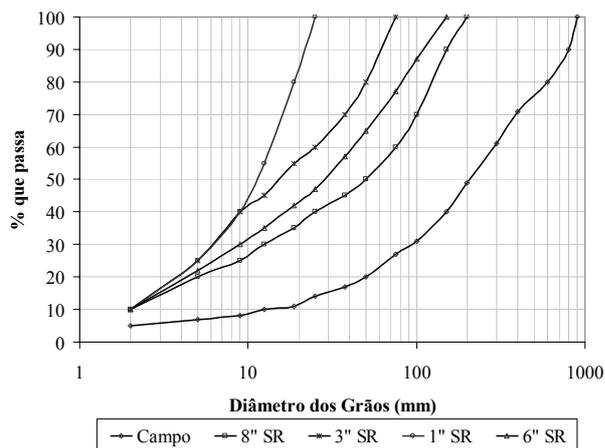


Figura 4: Curvas granulométricas adotadas para o enrocamento de Serra da Mesa.

A determinação da densidade mínima para cada curva granulométrica foi resultado da média de três ensaios, que consistiu no lançamento do material previamente misturado, praticamente sem altura de queda, dentro da câmara cilíndrica (Figura 1).

A determinação da densidade máxima para cada curva granulométrica foi resultado da média de três ensaios, que consistiu na compactação de duas camadas com aproximadamente 20 cm. O material de cada camada (340 kg) foi misturado previamente e lançado na câmara, tomando o cuidado de proceder o ajuste manual das partículas maiores em busca do arranjo mais denso. Ao final do lançamento de cada camada, foi executada a compactação com placa vibratória por um período de 20 min, tempo a partir do qual não foram observadas mudanças significativas no estado de compactidade deste enrocamento.

Os resultados dos ensaios de determinação das densidades máximas e mínimas para o enrocamento de Itapebi estão apresentados na Tabela 3, juntamente com o índice de quebra, Bg [11].

Tabela 3 – Média das Densidades Máximas e Mínimas do enrocamento de Itapebi.

Curvas	Peso Específico Mínimo (kN/m ³)	Peso Específico Máximo (kN/m ³)	Bg (%)
1" It	16,5	20,9	1,38
6" It	18,0	22,3	2,15

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de determinação das densidades máximas e mínimas do enrocamento de Serra da Mesa.

A análise dos dados mostrou que a utilização de um procedimento padronizado forneceu resultados coerentes tanto no que diz respeito a repetitividade (+/- desvio aceitável) dos dados encontrados para uma mesma distribuição granulométrica, quanto a comparação dos dados entre distribuições diferentes, sendo que as distribuições com diâmetro máximo maior apresentaram as maiores densidades máximas e mínimas.

Tabela 4 – Média das Densidades Máximas e Mínimas do enrocamento de Serra da Mesa.

Curvas	Peso Específico Mínimo (kN/m ³)	Peso Específico Máximo (kN/m ³)	Bg (%)
1" SM	16,3	19,1	3,67
3" SM	17,5	20,8	1,55
6" SM	18,75	21,4	1,83
8" SM	19,3	22,2	4,74

D. Resultados dos Ensaios de Compressão Unidimensional e Cisalhamento Direto

Os pesos específicos utilizados nos ensaios de compressão unidimensional e cisalhamento direto foram definidos fixando as densidades relativas. A densidade relativa pode ser definida pela Equação 1.

$$D_R(\%) = \frac{\gamma_{\max} \times \gamma_n - \gamma_{\min}}{\gamma_n \times \gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \times 100 \quad (1)$$

onde D_R é a densidade relativa em %; γ_{\max} é o peso específico aparente seco máximo em kN/m³; γ_{\min} é o peso específico aparente seco mínimo em kN/m³ e γ_n é o peso específico aparente seco da amostra em kN/m³.

A Tabela 5 apresenta as densidades relativas e os respectivos pesos específicos dos ensaios de compressão unidimensional e cisalhamento direto com o enrocamento de Itapebi.

Tabela 5 – Condições de moldagem dos corpos-de-prova com o enrocamento de Itapebi.

Compressão Unidimensional		
Curva	Peso Específico Seco (kN/m ³)	Densidade Relativa (%)
1" It	17,8	34
	18,6	56
	19,5	75
	20,9	99
6" It	18,7	10
	19,6	39
	20,7	67
	20,8	71
21,4	85	
Cisalhamento Direto		
1" It	18,6	56
	19,6	78
	20,6	99
3" It	17,7	12
	18,6	40
	19,6	65
	20,6	87

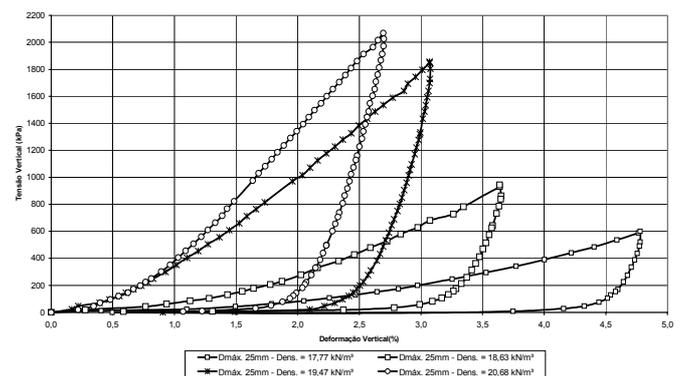
A Tabela 6 apresenta as densidades relativas e os respectivos pesos específicos dos ensaios de compressão unidimensional e cisalhamento direto com o enrocamento de Serra da Mesa.

Tabela 6 – Condições de moldagem dos corpos-de-prova com o enrocamento de Serra da Mesa.

Compressão Unidimensional		
Curvas (mm)	Peso Específico Seco (kN/m ³)	Compacidade Relativa (%)
1" SM	17,33	41
	17,67	53
	19,09	100
3" SM	18,71	41
	19,17	55
	20,82	101
8" SM	19,91	25
	20,65	52
	22,03	96
6" SM	21,40	102
Cisalhamento Direto		
1" SM	16,85	22
	17,69	54
	19,09	100
3" SM	18,15	23
	19,14	54
	20,79	100

Para a campanha de ensaios com o material proveniente de Itapebi, primeira campanha de ensaios realizada nesta pesquisa, os primeiros corpos-de-prova foram moldados com referência ao valor de peso específico de campo (20,6 kN/m³). Esse procedimento deveu-se também às dificuldades e à falta de padronização na obtenção dos valores de índices de vazios máximo e mínimo, o que dificulta sua utilização como parâmetro de controle. Posteriormente, para permitir a comparação com outros resultados de ensaios e com valores diferentes de diâmetro máximo, procurou-se determinar a compacidade relativa (ou densidade relativa D_r) dos corpos-de-prova ensaiados.

Os resultados dos ensaios de compressão confinada para o enrocamento de Itapebi (Figuras 5 e 6) são apresentados através das curvas de tensão vertical vs. deformação vertical, para as amostras de enrocamento com diâmetro máximo de 25 mm (1" It) e 150 mm (6" It), respectivamente.

Figura 5: Ensaio de compressão confinada em enrocamento de Itapebi com $d_{\max} = 25\text{mm}$

Pode-se notar nas Figuras 5 e 6 um claro aumento do módulo de deformabilidade M com o nível de tensão vertical ao longo do carregamento. Isso provavelmente corresponde um maior imbricamento das partículas (diminuição do índice de vazios) e, conseqüentemente, a

uma melhor distribuição das tensões efetivas. As deformações axiais para os materiais mais compactos ($D_r = 99\%$ e 85% , com $d_{m\acute{a}x} = 25\text{mm}$ e 150mm , respectivamente) foram até quatro vezes inferiores àquelas obtidas para os materiais fofos ($D_r = 34\%$ e 10% , com $d_{m\acute{a}x} = 25\text{mm}$ e 150mm).

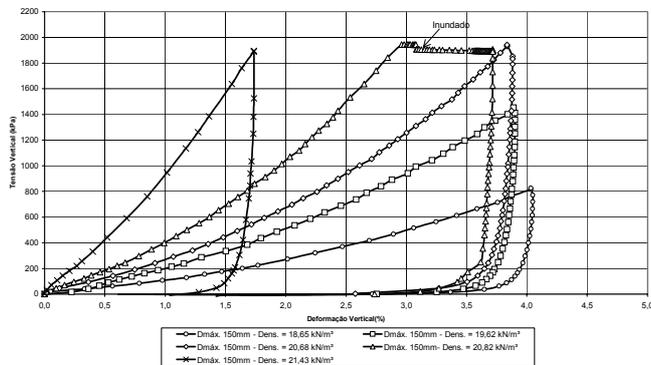


Figura 6: Ensaios de compressão confinada em enrocamento de Itapebi com $d_{m\acute{a}x} = 150\text{mm}$

Os ensaios de cisalhamento para o material de Itapebi tiveram corpos-de-prova com $d_{m\acute{a}x} = 75\text{mm}$ e 25mm . As tensões normais ao plano de cisalhamento utilizadas nesses ensaios foram de 500, 1000 e 1500 kPa.

Com os ensaios de cisalhamento direto com o enrocamento de Itapebi é possível observar a variação do ângulo de atrito ϕ' com o índice de vazios ou peso específico seco (Figura 7). Devido à existência de somente três ensaios por condição de moldagem foram consideradas envoltórias de ruptura lineares. O ângulo ϕ' aumenta com a densidade inicial de moldagem. Nos ensaios com material com $d_{m\acute{a}x} = 25\text{mm}$, ϕ' variou cerca de 5° para uma variação de 43% na densidade relativa. Nos ensaios com partículas mais grossas ($d_{m\acute{a}x} = 75\text{mm}$), ϕ' variou 6° para uma variação de 53% na densidade. Aumento similar não foi observado no ensaio com peso específico de $20,6 \text{ kN/m}^3$ e diâmetro $d_{m\acute{a}x} = 75\text{mm}$, que apresentou redução no ângulo de atrito.

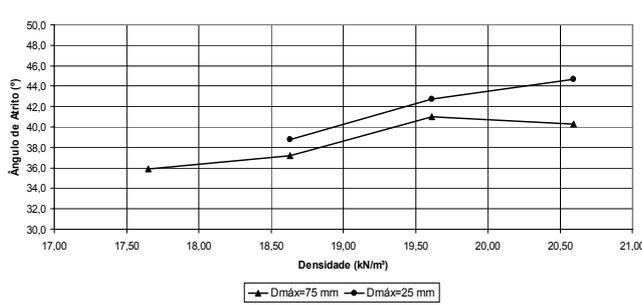


Figura 7: Variação do ângulo de atrito do enrocamento de Itapebi com o peso específico seco

A Figura 8 apresenta os resultados dos ensaios de compressão unidimensional realizados no granito de Serra da Mesa para as curvas 1", 3" e 8" com pesos específicos semelhantes, ou seja, com índice de vazios iniciais semelhantes. Nesta figura pode-se notar a diferença significativa do comportamento quanto a deformabilidade das três curvas. Este fato pode ser explicado pelas densidades relativas obtidas nos ensaios de compactação,

onde a curva 1" com $\gamma_n=19,09 \text{ kN/m}^3$ possui $D_r=100\%$, a 3" com $\gamma_n=19,17 \text{ kN/m}^3$ possui $D_r=55\%$ e a 8" com $\gamma_n=19,91 \text{ kN/m}^3$ possui $D_r=25\%$.

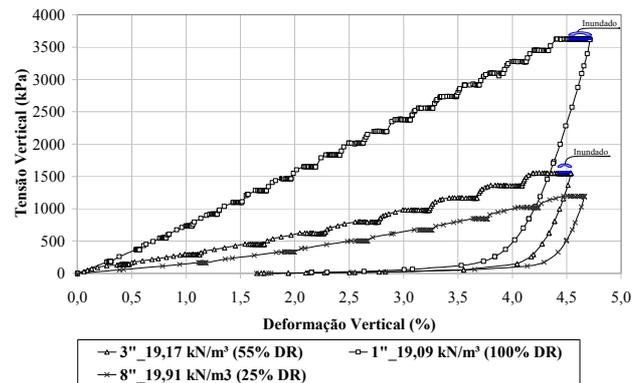


Figura 8: Ensaios de compressão unidimensional para as curva 1", 3" e 8" com pesos específicos semelhantes e diferentes densidades relativas.

As Figuras 9 e 10 apresentam o resumo dos ensaios de compressão unidimensional realizados para as distribuições granulométricas adotadas no caso do material de proveniente de Serra da Mesa. Pode-se observar a influência do índice de vazios no comportamento quanto a deformabilidade do material. Observa-se para uma mesma distribuição granulométrica que quanto maior o peso específico, ou seja, quanto menor o índice de vazios, menor a deformabilidade do material para uma mesma tensão vertical, sendo portanto, o índice de vazios inicial, um parâmetro marcante do comportamento. Contudo, comparando as diferentes curvas o índice de vazios deixa de ser o parâmetro que melhor representa o efeito da mudança de escala das partículas destas distribuições. Nota-se, nas mesmas figuras, a excelente correlação entre ensaios com pesos específicos diferentes, mas com a mesma densidade relativa. Logo, a densidade relativa passa a ser o parâmetro mais adequado na avaliação e correlação do comportamento quanto à deformabilidade das amostras para as curvas ensaiadas.

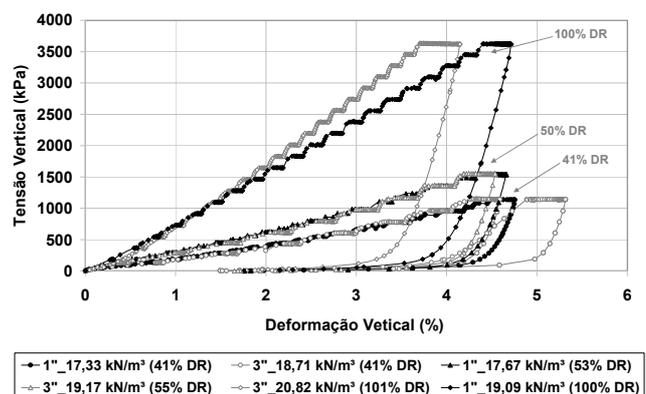


Figura 9: Resumo dos ensaios de compressão unidimensional para o enrocamento de Serra da Mesa (1" e 3").

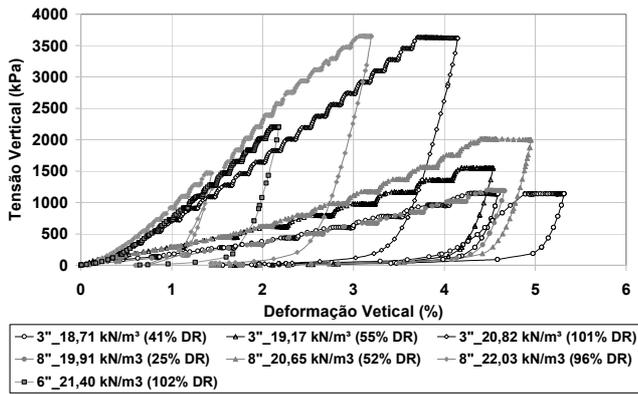


Figura 10: Resumo dos ensaios de compressão unidimensional para o enrocamento de Serra da Mesa (8'', 6'' e 3'').

Os ensaios de cisalhamento para o material de Serra da Mesa tiveram corpos-de-prova com $d_{\text{máx}} = 75\text{mm}$ e 25mm . As tensões normais ao plano de cisalhamento utilizadas nesses ensaios foram de 185, 500, 910 e 1500 kPa.

Com os ensaios de cisalhamento direto para o enrocamento de Serra da Mesa é possível observar a variação do ângulo de atrito ϕ' com o índice de vazios ou peso específico seco (Figura 11) e com a densidade relativa (Figura 12). Para o cálculo do ângulo de atrito foram consideradas envoltórias de ruptura lineares. Nota-se pela Figura 11 que o ângulo ϕ' aumenta com a densidade inicial de moldagem e para um mesmo peso específico a curva 1'' apresenta ângulo de atrito superior a curva 3''. Tal fato pode ser explicado pela densidade relativa do estado inicial de moldagem dos corpos-de-prova, onde nota-se na Figura 12 que comparando a mesma densidade relativa a curva 3'' tende a apresentar ângulos de atrito superiores aos encontrados na curva 1'' (54 e 100% DR), evidenciando a influência da densidade relativa, da distribuição granulométrica e do tamanho máximo das partículas (efeito da dilatância) na determinação do parâmetro de resistência.

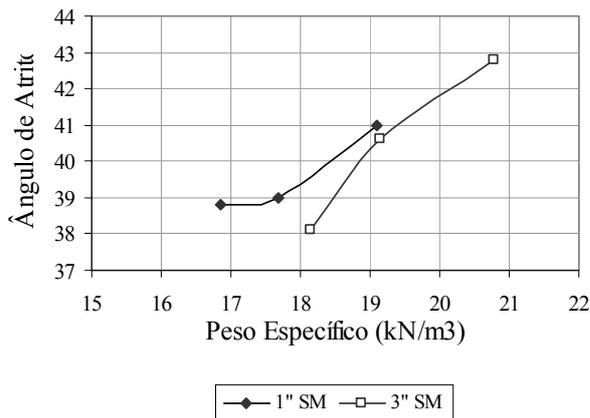


Figura 11: Ângulo de atrito x Peso específico seco do enrocamento de Serra da Mesa.

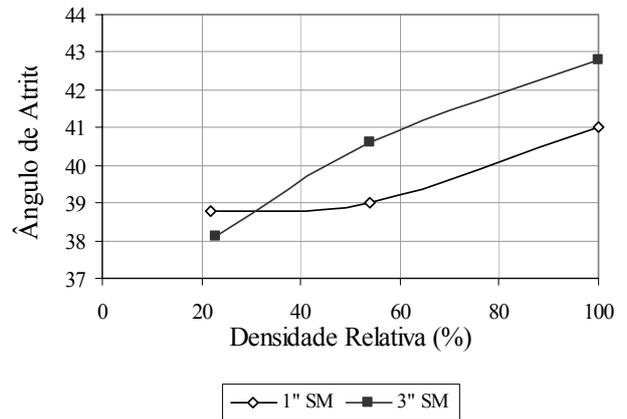


Figura 12: Ângulo de atrito x Densidade relativa do enrocamento de Serra da Mesa.

IV. CONCLUSÕES

Pela apresentação dos resultados, conclui-se que para as amostras ensaiadas com uma mesma mineralogia e distribuição granulométrica o comportamento quanto à deformabilidade é ditado pelo seu índice de vazios inicial (Figuras 5, 6, 9 e 10). Tal fato ficou comprovado para dois materiais distintos e para diferentes distribuições granulométricas. Porém, ao serem ensaiadas amostras com distribuições granulométricas diferentes; e mesmo material e índice de vazios inicial, seus comportamentos são bastante distintos (Figuras 8). Nota-se que a razão entre o diâmetro máximo das duas curvas ensaiadas com o enrocamento de Serra da Mesa ($d_{\text{máx}}=200\text{ mm} / d_{\text{máx}}=25\text{ mm}$) é de 8, não sendo incomum esta razão entre o diâmetro máximo na escala real de campo e o ensaiado em laboratório ser maior do que 10.

A observação das curvas tensão x deformação do programa experimental tornou evidente a forte dependência do módulo de compressibilidade M em relação ao nível de tensão vertical e ao valor do índice de vazios. O aumento do módulo M com o nível de tensão aplicada indica que o aumento do imbricamento do enrocamento deve exercer influência maior que o fraturamento das partículas, para o caso dos materiais estudados.

Com os resultados dos ensaios de compactação é observado que, para uma curva bem distribuída, quanto maior o diâmetro máximo dos grãos, maiores as densidades máximas e mínimas. Ou seja, ensaios de amostras em laboratório com o mesmo índice de vazios de campo fornecem resultados quanto a deformabilidade contrários a segurança, isto é, superestimando o módulo de deformabilidade. Tal fato pode ser explicado analisando a densidade relativa, onde um mesmo peso específico pode significar um material mediantemente compacto na granulometria de campo e um material muito denso na granulometria de laboratório. Como é prática comum adotar em laboratório o mesmo índice de vazios de campo, esta pode ser uma das principais razões da falta de representatividade dos parâmetros quanto a deformabilidade obtidos em ensaios em relação aos enrocamentos de obras reais.

Diversos autores afirmam que o melhor parâmetro para representar este efeito de escala é a densidade relativa (D_R). Porém dificuldades práticas na determinação deste parâmetro dificultaram o desenvolvimento de técnicas de ensaios em enrocamentos. Na bibliografia não é raro encontrar resultados de ensaios que utilizam densidades relativas obtidas por metodologias diferentes e que apresentam incoerência na tentativa de comparar estes resultados. Com o objetivo de padronizar os ensaios de determinação das densidades máximas e mínimas de enrocamentos, este projeto apresentou uma metodologia simples, que proporcionou repetitividade dos resultados, utilizando uma técnica de compactação compatível com as adotadas em campo, além de trabalhar com uma amostra de volume mais representativo da escala do material adotado.

Os materiais utilizados, granito de Serra da Mesa e Itapebi, apresentaram grande resistência mecânica, o que proporcionou baixo índice de quebra no processo de compactação, garantindo que o material ensaiado na compressão unidimensional não apresentasse diferenças significativas quanto à distribuição granulométrica inicialmente definida.

Para o caso do enrocamento de Serra da Mesa, a tentativa de representar uma curva com maiores diâmetros máximos, utilizando curvas com menores diâmetros máximos, que não fossem paralelas e nem truncadas, mostrou-se adequada, pois para uma mesma densidade relativa as diferentes distribuições granulométricas apresentaram comportamento semelhante quanto a deformabilidade tendo em vista o grau de precisão dos ensaios realizados.

Conforme os resultados dos ensaios, a densidade relativa (D_R) provou ser o parâmetro mais representativo do efeito de escala na análise do comportamento quanto a deformabilidade de enrocamentos. Nota-se a excelente aproximação do comportamento tensão x deformação das curvas obtidas com amostras de mesma densidade relativa, ou seja, uma curva com granulometria menor consegue representar o comportamento quanto à deformabilidade de uma curva com granulometria maior, desde que ensaiadas na mesma densidade relativa. A este respeito, presume-se que ensaios de laboratório, com a mesma mineralogia e densidade relativa de campo, podem representar o comportamento do enrocamento numa escala real de obra.

Nos ensaios de Cisalhamento Direto nota-se que o ângulo ϕ' aumenta com a densidade inicial de moldagem e para um mesmo peso específico a curva 1" apresenta ângulo de atrito superior a curva 3" (Figuras 7 e 11). Tal fato pode ser explicado pela densidade relativa do estado inicial de moldagem dos corpos-de-prova, onde nota-se nos ensaios realizados com o material de Serra da Mesa (Figura 12) que comparando a mesma densidade relativa a curva 3" tende a apresentar ângulos de atrito superiores aos encontrados na curva 1" (54 e 100% DR), evidenciando a influência da densidade relativa, da distribuição granulométrica e do tamanho máximo das partículas (efeito da dilatância) na determinação do parâmetro de resistência.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAPRONI JR., N. & ARMELIN, J.L. (1998). "Deformabilidade de um Enrocamento Obtida em Ensaio de Compressão Unidimensional". 11º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Brasília, Brasil, vol. II, p. 705-712.
- [2] CAPRONI JR., N., ARMELIN, J.L., CASTRO, C.H., SHIMABUKURO, M. (1999). "Um Estudo de Deformabilidade em Laboratório. Enrocamento da UHE Serra da Mesa". II Simpósio sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, CBDB, Florianópolis, Brasil.
- [3] MAIA, P.C.A. (2001). "Avaliação do Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade de Enrocamentos". Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil.
- [4] DIAS, A.C. (2001). "Caracterização Mecânica de Enrocamentos Através de Ensaio de Grande Escala Visando Barragens com Face de Concreto". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasil, 114 p.
- [5] FLEURY, S.V, SAYÃO, A.S.F.J., ASSIS, A.P., LIMA, F.O., DIAS, A.C. (2004). "Estudo em Laboratório da Deformabilidade e Resistência do Enrocamento da Barragem de Itapebi". II Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Lisboa, Portugal.
- [6] NEVES, E.M. (2002). "Algumas Considerações Sobre a Mecânica de Enrocamentos". Solos e Rochas, Revista Latino-Americana de Geotecnia, ABMS/ABGE, v.25, no.3, pp.161-203
- [7] VEIGA PINTO, A.A. (1979) "Características de Resistência e Deformabilidade dos Materiais de Enrocamento" – Geotecnia, nº 27, Lisboa, pp. 03-41.
- [8] LOPES, M.C.O. (2000). "Disposição Hidráulica de Rejeitos Arenosos e Influência nos Parâmetros de Resistência". Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-068º/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 157p.
- [9] VEIGA PINTO, A. (1983). "Previsão do Comportamento Estrutural de Barragens de Enrocamento", Tese de Especialização, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 157 p.
- [10] VEIGA PINTO, A.A. (1982) "Modelação de Enrocamentos" - Dissertação de Mestrado da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 76 p.
- [11] MARSAL, R.J. & RESENDIZ, D. (1975). "Earth and Earth-Rock Dams (in Spanish)". Limusa, Mexico City, Mexico; 546 p.

[1] CAPRONI JR., N. & ARMELIN, J.L. (1998). "Deformabilidade de um Enrocamento Obtida em