



Efeito da granulometria em ensaio de cisalhamento de grande escala em enrocamento de Tinguaíto

Paulo Henrique Marinelli

Engenheiro Civil, Indústrias Nucleares do Brasil, Caldas, Brasil, paulomarinelli@inb.gov.br

Renato Costa Góes

Engenheiro Civil, Indústrias Nucleares do Brasil, Caldas, Brasil, renatogoes@inb.gov.br

Letícia Oliveira Alves

Engenheira Civil, Indústrias Nucleares do Brasil, Caldas, Brasil, leticiaalves@inb.gov.br

Tennison Freire de Souza Junior

Eng. Geotécnico e Professor, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, tennisongeotec@gmail.com

Sidnei Helder Cardoso Teixeira

Professor, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, s.teixeira@ufpr.br

RESUMO: A rocha é amplamente empregada na construção de barragens de enrocamento com face de concreto, em barragens de rejeitos, na proteção de taludes de canais e na estabilização de taludes naturais. De modo geral, esses materiais apresentam alta resistência mecânica, elevada durabilidade, resistência à erosão e baixa deformabilidade (alta rigidez). Contudo, o enrocamento caracteriza-se por suas grandes dimensões geométricas, o que torna a execução de ensaios mecânicos particularmente complexa e onerosa. Portanto, este artigo tem como objetivo estudar o ângulo de atrito mobilizado (ϕ) a partir de ensaios de cisalhamento em grande escala em amostras de enrocamento de Tinguaíto com diferentes diâmetros médios (D_{50}). Após os ensaios foi observada uma relação de crescimento não linear entre ϕ e D_{50} .

PALAVRAS-CHAVE: Enrocamento, Tinguaíto, ângulo de ruptura, diâmetro médio das rochas.

ABSTRACT: Rock is widely used in the construction of concrete-faced rockfill dams, tailings dams, slope protection for channels, and the stabilization of natural slopes. In general, these materials exhibit high mechanical strength, durability, resistance to erosion, and low deformability (high stiffness). However, rockfill is characterized by its large geometric dimensions, which makes the execution of mechanical tests particularly complex and costly. Therefore, this article aims to study the angle of rupture (ϕ) based on large-scale shear tests on Tinguaite riprap samples with different average diameters (D_{50}). After the tests, a non linear growth relationship between ϕ and D_{50} was observed.

KEYWORDS: Riprap, Tinguaite, angle of rupture, Mean grain size.

1 INTRODUÇÃO

Enrocamento (ou *Riprap*) são camadas de rochas empregadas em obras geotécnicas para atender uma determinada necessidade construtiva. Esses materiais frequentemente são aplicados em barragens de terra (GAIOTO, 2003; SANDRONI E GUIDICINI, 2021), barragens de rejeitos (SANDRONI E GUIDICINI, 2021) e em obras de canais e costeiras (BLODGETT, 1986; FRACASSI, 2017) para proteção de taludes contra erosão. (VICK, 1990)

Especificamente nas barragens, o enrocamento é bastante utilizado para estabelecer proteção dos taludes de montante contra efeito de ondas e transiência (VICK, 1990; SANDRONI E GUIDICINI, 2021; GAIOTO, 2003; como dreno de pé (SANDRONI E GUIDICINI, 2021) e ao mesmo também como material denso com elevada resistência ao cisalhamento (SANDRONI E GUIDICINI, 2021). Para atender as condições estabelecidas em projeto, o enrocamento precisa ser analisado do ponto de vista mineralógico,



mecânico e de durabilidade com base em inspeções e ensaios de laboratório (SANDRONI E GUIDICINI, 2021).

Li et al. (2020) expressaram a dificuldade de se medir corretamente a resistência ao cisalhamento de enrocamentos, bem como questionaram a validade dos métodos convencionais de redução de escala (scalping, parallel, replacement, quadratic), e advertiram que os parâmetros mínimos de amostra segundo normas, para ensaios de laboratório, muitas vezes não são suficientes para evitar o viés de escala. Recentemente, Ahmad et al. (2021) desenvolveram algoritmos de aprendizado de máquina (machine learning) supervisionado (SVM, Random Forest, AdaBoost e KNN) para prever a resistência ao cisalhamento de materiais de enrocamento com base 165 casos de RFM, caracterizados por 13 propriedades-chave do material, utilizados para treinar e validar os modelos. Neste estudo, O SVM destacou-se como o modelo com melhor desempenho, seguido por Random Forest, AdaBoost, e por fim KNN, que apresentou resultados significativamente inferiores. Concluindo assim que a alternativa de machine learning mostrou-se promissora para estimar parâmetros geotécnicos complexos como a resistência ao cisalhamento de materiais de enrocamento.

No meio prático, a estimativa do ângulo de atrito interno (ϕ') ocorre por meio do gráfico de Leps (1970) por ser, na maioria das vezes, impraticável a realização de ensaios de cisalhamento direto ou triaxial em amostras de enrocamento. Barton e Kjaernsli (1981) desenvolveram o ensaio de caixa (ou cisalhamento de grandes dimensões) com o objetivo de avaliar o coeficiente de rugosidade de Juntas (JRC) em maciços rochosos, podendo também ser usdos com enrocamento. No ensaio, pode ser obtida a correlação entre o ângulo de atrito mobilizado, ϕ_{mob} , que é igual à inclinação da caixa durante o ensaio, θ , e o deslocamento relativo entre as semi caixas, δ . O ângulo de atrito interno do enrocamento é o máximo valor de ângulo de atrito mobilizado.

Este artigo tem como objetivo demonstrar a variação da resposta mecânica das rochas em função da relação estudar o ângulo de atrito na ruptura (ϕ) a partir de ensaios de cisalhamento em grande escala em amostras de enrocamento de Tinguaíto com diferentes diâmetros médios (D_{50}).

2 CONTEXUALIZAÇÃO LITERÁRIA

Segundo Cruz et al. (2014) existem variados fatores que afetam o comportamento geomecânico dos enrocamento, sendo eles a mineralogia, granulometria, índice de vazios, forma dos grãos, teor de umidade, resistência à compressão dos grãos, tamanho e textura e tempo (fluência). A Water management branch (2000) fez uma série de recomendações a respeito das dimensões, forma, densidade, angulosidade e demais outros pontos para uso de proteção de taludes em canais e piers. Ainda assim, essas recomendações podem ser extrapoladas para barragens de terra/enrocamento e de rejeitos para uso de filtros e riprap.

Enrocamentos bem graduados permitem maciços mais densos e menos deformáveis e consequentemente menos suscetíveis a fraturamento. A partir de amostras saturadas e não saturadas, Terzaghi (1960) concluiu que a água atua como um lubrificante dos contatos das rochas, porém o ângulo de atrito não é afetado. Ainda assim, a umidade tende a enfraquecer a rochas e as deformações aumentam em função do esmagamento no contato. Segundo o mesmo, a resistência dos blocos rochosos é afetada pelo nível de tensões e pelo fenômeno de fraturamento progressivo resultando em um comportamento curvilíneo, não linear.

De acordo com Cruz et al. (2014), as envoltórias curvas refletem a redução de resistência para valores elevadas de tensões octaédricas inicial (p'_{o}) ou tensão normal de modo que ao considerar a Teoria de Mohr-Coulomb, o valor de τ a partir da equação (1):

$$\tau = A\sigma_n^b \quad (1)$$

Onde:

τ – tensão de cisalhamento;

σ_n – tensão normal;

A e b – parâmetros característicos dos materiais de ajuste.



2 0 2 5

Durante o cisalhamento direto de grande escala, como o içamento da caixa desenvolve esforços em duas direções, os valores de τ e de σ_n ocorrem a partir da rotação θ , conforme as equações (2) e (3), respectivamente:

$$\tau = \gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$\sigma_n = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \theta \quad (3)$$

Onde:

τ – tensão de cisalhamento;
 σ – tensão normal;
 θ – Inclinação da caixa durante o ensaio
 Z – altura da semi-caixa;
 γ – Peso específico da rocha.

Existem alguns trabalhos apresentam valores dos parâmetros da equação (1) para rochas basálticas e gnaissicas a partir de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais e os respectivos parâmetros adimensionais (CRUZ e NIEBLE, 1970; MIDEA, 1973). Como os ensaios de resistência em enrocamento são de difícil execução quando se tratar de rochas de grandes dimensões, comumente muitos engenheiros geotécnicos costumam utilizar o gráfico de LEPS (1970) para estimativa dos parâmetros, porém esse modelo correlaciona o valor de φ' a tensão confinante (σ_n) e atribui condições qualitativas do material para orientar na tomada de decisão. Essa estimativa pode ser considerar limitada quando se considera outros aspectos como angulosidade, mineralogia e a granulometria (D_{50}).

3 MATERIAIS

Os blocos de rochas testados, de acordo com a ABNT NBR 17054 (2022), são classificados como Tinguaíto. Essas rochas de origem ígnea subsaturada, de grão médio a grosso, composta essencialmente de feldspato alcalino, nefelina e aegirina (com ou sem anfíbol sódico ou biotita). Tinguaíto é o equivalente hipabissal do fonólito, conforme Allaby (2008). Como pode ser observado na Tabela 1, as amostras de Tinguaíto ensaiadas a resistência à compressão não confinada, conforme ASTM D7012 (2014), em estado natural, apresentam valores de 72,83 MPa com coeficiente de variação de 23,93%. Em condições saturadas, o tinguaíto reduz 25% da sua resistência à compressão não confinada, porém as amostras avaliadas apresentaram uma condição de heterogeneidade elevada (CV=65,34%).

Tabela 1. Resistência à compressão simples (ASTM D7012-14)

| Amostra | Condição | Corpo de prova | Tensão de ruptura (MPa) | Média (MPa) | Desvio padrão (MPa) | Coeficiente de variação (%) |
|-----------------|----------|----------------|-------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|
| Tinguaíto sô | Natural | 1 | 53,9 | | | |
| | | 2 | 88,2 | 72,83 | 17,43 | 23,93 |
| | | 3 | 76,4 | | | |
| | Saturado | 4 | 80,4 | | | |
| | | 5* | 13,9 | 54,30 | 35,48 | 65,34 |
| | | 6 | 68,6 | | | |

* Com fratura pre-existente

Water Management Branch (2020) estabelece critérios de aceitação do enrocamento para obras de canais. Com base nesses critérios e os dados expostos na Tabela 2 foi possível observar que o material apresenta ρ_{ap} médio igual a 2,550 g/cm³ aceitáveis (entre 2,4 g/cm³ e 2,8 g/cm³). O índice de forma apresentou valores um pouco maior que 2, porém não tanto. As amostras de enrocamento apresentaram capacidade de absorção de água superior a 0,5%, fator que corrobora para a aceleração do processo de intemperismo do material (PICHLER, 1992) Por fim, DNIT 141 (2002) classifica esse material como graduação E, condizendo com o cenário de enrocamento.



Tabela 2. Caracterização do material de enrocamento

| Amostra | Índice de forma | Massa específica do material seco ρ_s (g/cm ³) | Massa específica aparente m ³) | Absorção de água A (%) | Desgaste D (%) | Graduação |
|----------|-----------------|---|--|------------------------|----------------|-----------|
| BR-PI-05 | 2,24 | 2,307 | 2,557 | 4,24 | 20,1 | E |
| BR-PI-06 | 2,24 | 2,298 | 2,542 | 4,18 | 21,6 | E |
| Média | 2,24 | 2,303 | 2,550 | 4,21 | 20,85 | E |

Quanto a durabilidade do enrocamento, apenas as partículas com granulometria entre 12,7 e 9,5mm apresentam perda de massa superior a 18%, indesejáveis para a construção de estruturas em enrocamento (YOSHIDA, 1972), porém as demais granulometrias apresentaram sanidade dentro da faixa de aceitabilidade, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Teste de durabilidade das amostras enrocamento

| Abertura das peneiras (mm) | Peso do ensaio (g) | Amostra BR-PI-05 | | Amostra BR-PI-06 | |
|----------------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| | | Peneiramento (g) | Perda de massa (%) | Peneiramento (g) | Perda de massa (%) |
| Fração grossa | 60,3 a 50,0 | 1463,80 | 2,41 | 1462,40 | 2,51 |
| | 50,0 a 38,0 | 1492,20 | 0,52 | 1487,30 | 0,85 |
| | 38,0 a 25,0 | 980,40 | 2,45 | 983,53 | 2,14 |
| | 25,0 a 19,0 | 442,97 | 10,51 | 440,20 | 11,07 |
| | 19,0 a 12,7 | 596,70 | 10,94 | 571,05 | 14,77 |
| | 12,7 a 9,5 | 251,07 | 23,92 | 268,99 | 18,49 |
| Fração fina | 9,5 a 4,8 | 107,66 | 2,13 | 107,66 | 2,13 |
| | 4,8 a 2,4 | 108,00 | 1,82 | 108,00 | 1,82 |
| | 2,4 a 1,2 | 102,90 | 6,45 | 102,90 | 6,45 |
| | 1,2 a 0,6 | 106,20 | 3,45 | 106,20 | 3,45 |
| | 0,6 a 0,3 | 103,00 | 6,36 | 103,00 | 6,36 |

Os ensaios de cisalhamento foram realizados com amostras com diâmetros médios D₅₀ iguais a 150mm, 400 mm e 600 mm. A Figura 1 ilustra amostras com diâmetros médios de 150mm e 600 mm.



(a)



(b)

Figura 1. Granulometria do enrocamento estudado: (a) D₅₀=150mm; (b) D₅₀=600 mm.

Fonte: Autores

4 MÉTODOS

Foi seguida a metodologia conforme preconizado pelos idealizadores do ensaio, Barton e Kjaernsli (1981). O ensaio utilizado é análogo ao ensaio de cisalhamento direto, previsto na ASTM D3080-04(2012),



2 0 2 5

porém o cisalhamento ocorre por meio inclinação da caixa e em grande escala, obedecendo a dimensão do enrocamento. Basicamente, o ensaio foi composto por 4 etapas (ver Figura 2), e foi realizado conforme descrito a seguir.

- Inicialmente ocorre a montagem da caixa. Nesta etapa foram utilizadas duas semi-caixas com as dimensões 1,00 m x 2,00 m x 5,00 m (altura x comprimento x largura) que foram montadas sobrepostas com um espaçamento de 5 cm entre si. Este espaçamento foi garantido a partir de parafusos instalados nas laterais e posteriormente removidos para o ensaio. Além disso, na semi-caixa foram feitas marcações para monitorar o deslocamento entre as partes superior e inferior durante o içamento. Para a leitura do ângulo foi utilizado um medidor de base magnética e para leitura dos deslocamentos, foram utilizadas fotografias tiradas ortogonalmente à superfície da caixa;
- Em seguida, ocorreu o preenchimento da caixa com a amostra de rocha. Foram ensaiadas 3 amostras de material, as quais variaram em termos de diâmetro médio dos blocos (D_{50}). Os blocos de enrocamento foram separados em amostras com diferentes diâmetros, sendo a amostra de blocos pequenos ($D_{50}=150$ mm) representativa do material de transição de bica corrida do barramento e as amostras de blocos médios e grandes ($D_{50}=400$ mm e $D_{50}=600$ mm, respectivamente), ilustrado na Figura 1;
- Posteriormente, ocorre a remoção dos parafusos laterais (liberação das semi-caixas) e início do levantamento do conjunto com auxílio de guindaste e realização de leituras de deslocamento entre as caixas e do respectivo ângulo de inclinação das semi-caixas. A velocidade de içamento obedeceu uma taxa de 10°/min;
- Por fim, a identificação do ângulo de atrito (ϕ), assim como a relação entre θ vs δ .

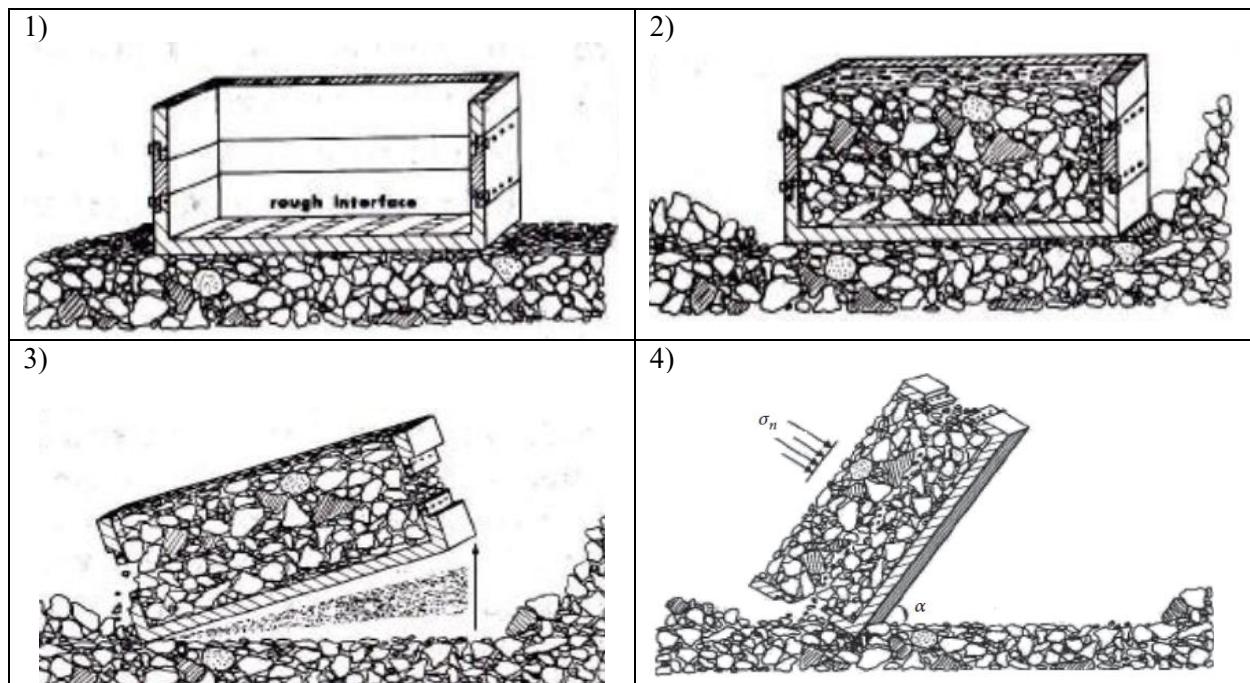


Figura 2. Passo a passo da realização do ensaio.

Fonte: Barton e Kjaernsli (1981)

5 RESULTADOS E DICUSSÕES

A Figura 3 ilustra o comparativo entre as diferentes granulometrias do enrocamento estudado. Inicialmente, nota-se que em todos os ensaios, o comportamento relação ângulo de atrito mobilizado (ϕ) para grandes deslocamentos (δ), deslocamentos acima de 10 mm no contexto do material, em relação ao diâmetro médio das rochas (D_{50}), as rochas atenderam um comportamento com tendência hiperbólica. A partir de deslocamento entre 10 mm a 13 mm, os blocos de rochas se deslocavam lentamente, em função da elevação da declividade, até atingir ϕ referência para cada respetivo ensaio, o que representava a condição de ruptura.



De modo geral, após a realização dos ensaios foi possível observar que ocorreu uma relação em crescente entre o valor de ϕ em relação a D_{50} , ou seja, quando maior o D_{50} , maior foi o valor de ϕ , conforme ilustrado na Figura 4.

Este comportamento se deve ao fato de que ainda ao atrito esteja vinculado ao contato intergranular, o valor de D_{50} exerce uma forte influência pois a relação entre a densidade e a dimensão dos blocos de rochas aumenta a tensão de atrito nos contatos.

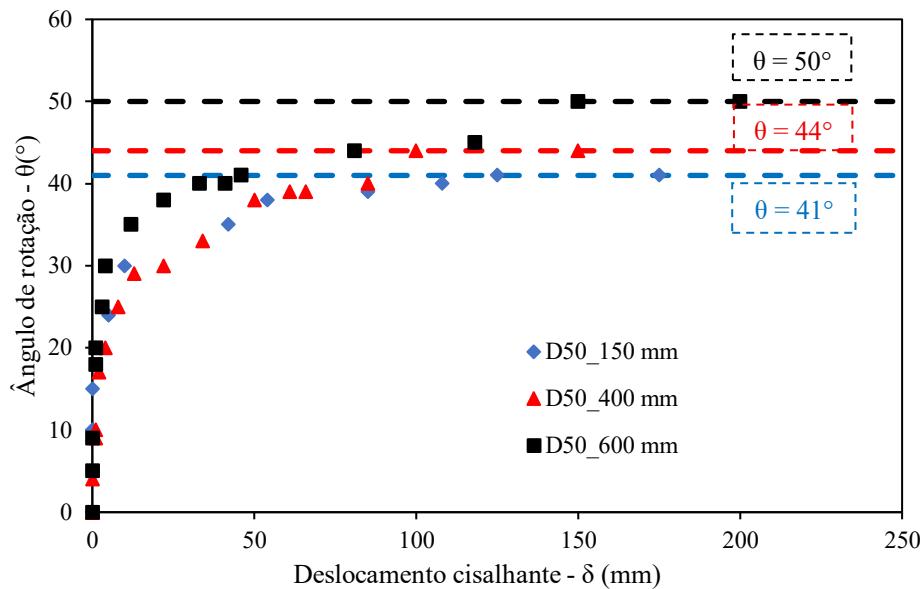


Figura 3. Comparativo entre as curvas δ vs θ para os diferentes granulometrias estudadas ($D_{50}= 150\text{mm}$.
 $D_{50}=400\text{mm}$ e $D_{50}=600\text{mm}$)

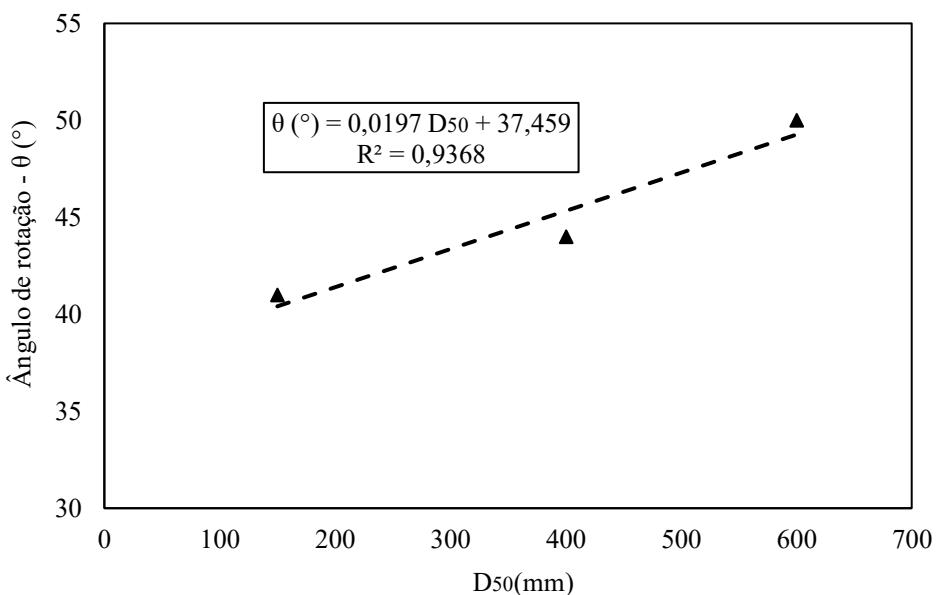


Figura 4. Relação entre D_{50} vs ϕ .

Ao avaliar com a devida cautela os resultados, pode ser observado que os resultados se encontram aderentes ao expresso no gráfico de Leps (1970), ainda que o modelo não tenha contemplado estudos com rochas de Tinguáito. Por fim, ao comparar as curvas tensão cisalhante (τ) vs tensão Normal (σ) foi possível



notar um aumento no valor da tensão cisalhante para uma mesma tensão normal, conforme o aumento de D_{50} (ver Figura 5).

Na etapa da ruptura, podem ser estimadas as tensões cisalhantes e normais, por meio de decomposição trigonométrica da tensão geostática vertical. Após isso, o círculo de Mohr e as direções dos planos principais podem ser determinadas e consequentemente estabelecida a envoltória de resistência. Um ponto importante a ser comentado é que não há geração de poropressão positiva ($\Delta u = 0$) no ensaio, o que automaticamente enquadra as respostas mecânicas a uma condição drenada.

Importante salientar que neste trabalho não foi avaliado o efeito da tensão normal, que é algo relevante quando se trata de enrocamento, uma vez que no presente estudo a ênfase foi voltada para material de enrocamento aplicado a riprap de barragens, que geralmente possui espessuras curtas e portanto baixas tensões confinantes.

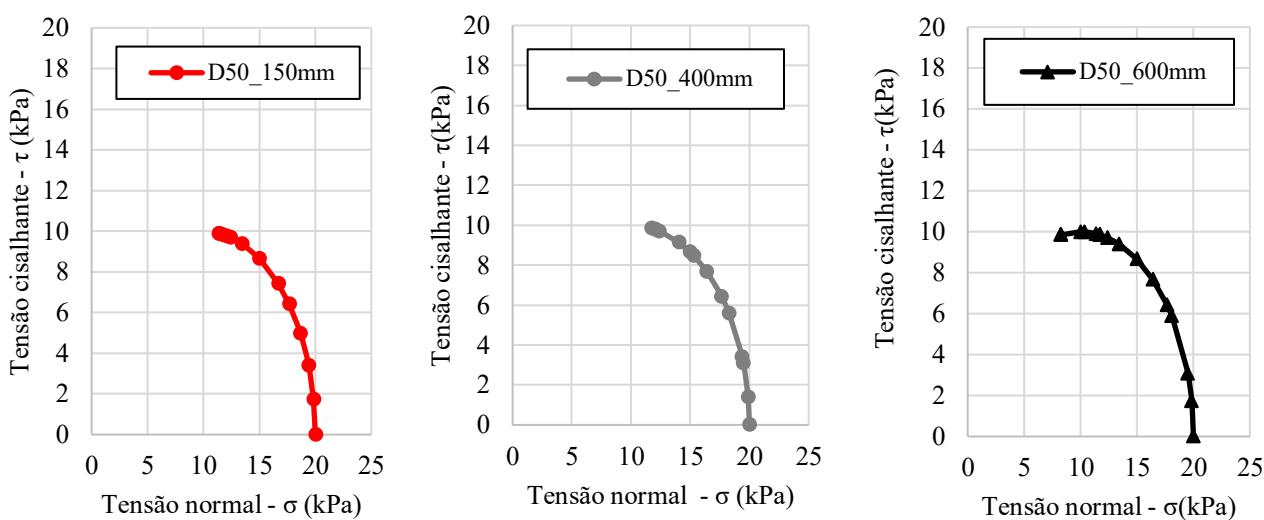


Figura 5. Curva τ vs σ : (a) $D_{50} = 150\text{ mm}$; (a) $D_{50} = 400\text{ mm}$; (a) $D_{50} = 600\text{ mm}$.

7 CONCLUSÕES

Após a realização dos estudos realizados foi observado que ainda que o método exija um aparato de equipamentos pesados e de grandes dimensões, o ensaio possui procedimentos simplificados de controle e execução. Os resultados dos ensaios, nota-se que o ângulo de atrito do material é maior quanto maiores os blocos de enrocamento, crescendo de maneira não linear.

Importante salientar que os resultados se encontram aderentes a proposta de estimativa de Leps (1970), o que de alguma maneira valida os dados. Por fim se observou que ao comparar as curvas τ vs σ das diferentes dimensões das rochas, conclui-se um aumento de τ em função do aumento de D_{50} .

Embora os resultados demonstrem distinções nas respostas ao cisalhamento do material em função da granulometria, o presente trabalho possui um conjunto de ensaios e amostrais limitados. Assim como expresso no trabalho de Leps (1970), a resposta ao cisalhamento dos enrocamentos são variáveis em função granulometria, fator de forma, grau de saturação, mineralogia, rugosidade e outros, sendo necessário uma bateria de ensaios ampla para melhor estabelecer a influência de cada variável.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, M.; Kamiński, P.; Olczak, P.; Alam, M.; Iqbal, M. j.; Ahmad, F.; Sasui, S.; Khan, B. J. (2021) Development of Prediction Models for Shear Strength of Rockfill Material Using Machine Learning Techniques. *Applied Sciences*, v. 11, n. 13, p. 61-67.



2025

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 17054. *Determinação da Composição Granulométrica - Miúdo e Graúdo*. Rio de Janeiro.

American Society for Testing and Materials (2012). ASTM D3080-04. *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. West Conshohocken.

Allaby, M. (2008) *A dictionary of earth sciences (3º edition)*. Oxford University press: Oxford, 720p.

Barton, N., Kjaernsli, B. (1981) Shear strength of rockfill. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 107, no. 7, pp. 873–891.

Blodgett, J.C. (1986) *Rock riprap design for protection of stream channels near highway structures*. Volume 1-Hydraulic characteristics of open channels. US Geological Survey Water-Resources Investigation Report 86-4127. Prepared in cooperation with the Federal Highway Administration. 60 p.

Cruz, P. T.; Materón, B. and FREITAS, M. (2014) *Barragem de enrocamento com face de concreto*. Oficina de textos: São Paulo, 359p.

Cruz, P. T., Nieble, C. M. (1970) *Engineering properties of residual soils and granular rocks originated from basalts – Capivara dam – Brazil*. São Paulo: IPT.

Dnit 141 (2022) *Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço*. Brasília, Brasil.

Fracassi, G. (2017) Proteção de rios com soluções maccaferri. Oficina de textos: São Paulo, 336 p.

Gaioto, N. (2003) Introdução ao projeto de barragens de terra e enrocamento. EESC-USP: São Paulo, 126 p.

Leps, T. M. (1970). Review of shearing strength of rockfill. *Journal of Soil Mechanics and foundations – proceedings of the american society of civil engineers*. vol. 96, Nº SM-4, pp. 1159–1170.

Li, Deiminiat, A. L.; Zeng, F.; Pabst, T.; Chiasson, P.; Chapuis, R. (2020). Determination of the Shear Strength of Rockfill from Small-Scale Laboratory Shear Tests: A Critical Review. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, Article ID 8890237, 19 p.

Midea, N. F. (1973) *Ensaio de cisalhamento direto (em laboratório) sobre enrocamento de gnaisse – Obra Paraibuna*. LEC/CESP, Relatório G-07/73.

Sandroni, S.S., Guidicini, G. (2021) Barragens de terra e enrocamento. Oficina de textos: São Paulo, 167 p.

Terzaghi, K. (1960) Discussion on Wishon and Coutright concrete face dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, 125, part II.

Water Management Branch (2000) *Riprap Design and Construction Guide*. Ministry of Environment, Lands and Parks, 87p.

Yoshida, R. (1972) *Contribuição ao Conhecimento das Características Tecnológicas dos Materiais Rochosos - São Paulo*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 90p.