

Determinação da Resistência ao Fraturamento de Partículas de Enrocamento por meio de Ensaios de Tração Indireta

Alexandre Cristino Corrêa dos Santos
ACTEC Engenharia, Brasília, Brasil, actec@actec.eng.br

Kennia Carolina Nunes dos Santos
Ministério dos Transportes, Brasília, Brasil, kennia.santos@transportes.gov.br

Ricardo Moreira Vilhena
Furnas Centrais Elétricas, Goiânia, Brasil, rvilhena@furnas.com.br

André Pacheco de Assis
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, aassis@unb.br

RESUMO: O presente trabalho apresenta os resultados de campanha de caracterização de rocha para amostras de granito, basalto denso e brecha basáltica, além dos resultados de campanha de ensaios de tração indireta, com objetivo de avaliar a representatividade desse último ensaio na determinação do potencial de quebra das partículas de enrocamento e sua perda de resistência quando saturadas. A resistência a tração média para cada litologia foi determinada, sendo as amostras mais resistente provenientes do basalto denso, seguido pela brecha basáltica e por último o granito. No entanto, proporcionalmente, as maiores perdas de resistência quando da saturação das amostras se deram em ordem decrescente na brecha basáltica, no basalto denso e no granito. Verificou-se que a perda de resistência ao fraturamento da partícula de rocha quando saturada é proporcional a capacidade de absorção do material, e não guarda correlação direta com a resistência inicial da partícula. Verificou-se ainda que não existe proporcionalidade entre o diâmetro equivalente da partícula e a resistência ao fraturamento devido a carregamento puntiforme. Conclui-se que o ensaio de tração indireta se apresenta como uma boa alternativa para determinar a perda de resistência da partícula de enrocamento quando saturada, bem como permite a comparação direta entre amostras de diferentes litologias.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência, Fraturamento, Enrocamento, Ensaio de Tração Indireta.

1 INTRODUÇÃO

As primeiras aplicações do enrocamento como material de construção de barragens ocorreram durante a segunda metade do século XIX. A princípio, os aterros de enrocamento não eram compactados e sua granulometria se caracterizava por um baixo coeficiente de uniformidade e pela utilização de blocos de grandes dimensões de rocha sã. Devido ao elevado índice de vazios, ocorriam grandes deslocamentos no aterro, incompatíveis com

aqueles admissíveis nos elementos de vedação utilizados na face, levando a fuga excessiva de água.

O avanço tecnológico experimentado no século passado, principalmente em relação aos equipamentos e técnicas de compactação, o melhor controle das detonações e maior entendimento do fenômeno de colapso devido a saturação, proporcionou uma melhora substancial nas características mecânicas dos maciços de enrocamento compactados. Esta melhora pôde ser observada pela diminuição do

índice de vazios e redução drástica dos níveis de deformação.

Atualmente, apesar dos equipamentos pesados de compactação, técnicas de redistribuições granulométricas e molhagem do enrocamento, ainda observa-se alto grau de fraturamento/esmagamento das partículas em alguns casos. Isto se deve em parte a natureza mineralógica dos materiais e eventualmente a micro-fissuras induzidas durante o processo de detonação do material. Outro fator relevante é o aumento dos níveis de tensões dos projetos atuais de barragens atingindo a ordem de 200 m de altura, em relação as alturas de no máximo 50 m observadas há algumas décadas atrás.

Diante da dificuldade de se comparar o potencial de quebra/esmagamento das partículas e seus efeitos no comportamento mecânico dos enrocamentos *in situ*. Diante também da dificuldade de se comparar ensaios com enrocamentos em escala de laboratório, em modelos reduzidos, constituídos de rochas de mineralogias diferentes, carregamentos diversos, distribuições granulométricas e densidade relativa diferentes, faz-se necessário um ensaio que possa avaliar o potencial de quebra da partícula seca e saturada e traçar uma comparação entre diferentes materiais.

Marsal propôs ensaio de esmagamento, amplamente adotado no meio técnico, que apresenta problemas quanto a elevada dispersão dos resultados, em função da falta de padronização das amostras utilizadas. Neste contexto, é de grande interesse o desenvolvimento de um método de ensaio mais eficaz na determinação do potencial de quebra das partículas, que tenha repetitividade dos resultados para um mesmo material e que possa comparar materiais diferentes, bem como o efeito da saturação sobre a resposta a solicitações impostas à partículas de rocha.

Este artigo apresenta proposta de utilização do ensaio de compressão diametral (tração indireta), já bastante difundido no meio técnico, como alternativa ao ensaio de esmagamento de Marsal na avaliação do potencial de quebra das partículas. Inicialmente constata-se que o ensaio de compressão diametral possui a vantagem de trabalhar com amostras padronizadas, permitindo uma comparação direta entre

diferentes materiais e porcentagens de saturação da amostra.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO E OBJETIVOS

Sob o aspecto comportamental, Maranha das Neves (2002) definiu o enrocamento como sendo um “**material tipo**”, diferente das areias e argilas, pelo fato de exibir fraturação e esmagamento para estados de tensão muito baixos. Logo, a “mecânica dos enrocamentos” não se enquadra dentro dos conceitos clássicos da mecânica dos solos ou das rochas.

Maia em 2001 dividiu os principais fatores que condicionam as características mecânicas dos enrocamentos, segundo classificação de Veiga Pinto (1979), como se segue:

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

Um dos fenômenos mais proeminentes observados em decorrência de solicitações de esforços em uma massa de enrocamento é a fragmentação das partículas constituintes. A quebra de partículas interfere na distribuição granulométrica e altera apreciavelmente as características de deformação do material, podendo influenciar também na sua resistência ao cisalhamento (Fraiha Neto, 1996).

A porcentagem de quebra de partículas dentro da massa de enrocamento depende principalmente da distribuição granulométrica do mesmo, do tamanho máximo das partículas,

da resistência da rocha (litologia), da perda de resistência das partículas quando saturadas, da forma da partícula e do nível de tensão atingido. Dos fatores citados, o mais difíceis de serem representados em ensaios de laboratório são o tamanho máximo da partícula e a distribuição granulométrica adota em campo (efeito de escala).

Para manter a representatividade do comportamento mecânico do protótipo em escala real, o modelo reduzido deve manter a mesma relação forças de contato vs. resistência das partículas com a mesma liberdade de movimento entre partículas (imbricamento) do protótipo. Alguns fatores que interferem no comportamento mecânico dos enrocamentos se destacam na tentativa de manter essa relação e são apresentados na Figura 1.

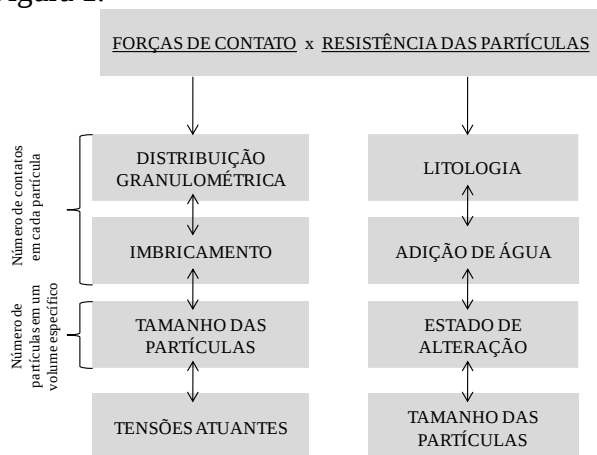


Figura 1. Fatores que afetam a representatividade do modelo reduzido de ensaio com enrocamentos.

Os blocos de enrocamento podem ser constituídos de vários tipos de rocha e minerais, os quais apresentam propriedades mecânicas diferentes. Podem também apresentar fissuras, vazios e serem afetados por intemperismo. Fora isso, as tensões em uma massa composta de blocos são transmitidas através de forças que atuam em áreas limitadas (contatos) da superfície dos blocos, o que gera **tensões de contato** bem superiores às tensões médias. Tais considerações realçam o grau de complexidade que envolve o processo de fraturamento das partículas.

Além disso, a adição de água no enrocamento pode causar deformações imediatas significativas, cuja magnitude vai

depende da resistência (tipo de rocha e mineralogia), tamanho e forma das partículas, distribuição granulométrica, imbricamento e magnitude das tensões aplicadas (tensões de contato). Esse comportamento, designado colapso, tem sido observado em diversos maciços de enrocamento.

Nos enrocamentos, o colapso está associado à quebra dos contatos entre as partículas ou até mesmo à quebra da própria partícula, enquanto que nos solos, o colapso se dá pela destruição de sua estrutura.

Maranha das Neves e Veiga Pinto (1990), ao ensaiar enrocamentos constituídos de rochas de diferentes resistências, concluíram que o colapso é mais importante em enrocamentos de baixa resistência e que se obtêm assentamentos finais iguais se as amostras são saturadas antes da aplicação de cargas ou se são ensaiadas secas e depois saturadas.

Oldcop (2000) mostrou que, para que se verifique colapso, é suficiente saturar os blocos de rocha. Isto é, a saturação dos blocos de rocha produz o mesmo efeito de colapso do que a inundação de enrocamento (preenchimento dos seus vazios com água).

2.1 Ensaio de Resistência ao Fraturamento

Com o intuito de obter o grau de fraturamento de uma amostra de enrocamento, Marsal (1973) definiu um índice de fraturamento **B_g**, 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).

No entanto, o grau de fraturamento determinado por essa metodologia não é influenciado apenas pelas características da partícula de rocha, como discutido anteriormente.

Para determinar a resistência ao fraturamento da partícula de rocha, Marsal (1969) propôs colocar três fragmentos de rocha (amostra de mão), com dimensões aproximadamente iguais, entre duas placas de aço e aplicar carga até a fratura de uma das partículas. Esse ensaio ficou conhecido como “**resistência ao**

esmagamento". A resistência ao esmagamento Q_a é dada pela relação P_a/N_c , sendo P_a a força vertical aplicada no momento da fratura da primeira partícula e N_c o menor número de contatos dos fragmentos com cada uma das placas (superior e inferior).

No entanto, salienta-se que o ensaio de resistência ao esmagamento apresenta dificuldades práticas, bem como de interpretação:

- O ensaio foi idealizado com amostras que não sofrem qualquer tipo de lapidação ou ajuste de suas formas. Logo, torna-se difícil ensaiar três partículas com aproximadamente as mesmas dimensões, mantendo o paralelismo entre as placas e evitando concentração de tensões em apenas um fragmento;
- Os contatos entre os fragmentos e as placas são aleatórios e em quantidades diferentes em cada fragmento. Logo, existe sempre o risco de concentração de tensões em alguns contatos de um mesmo fragmento e, com isso, resultados aleatórios em diferentes campanhas com o mesmo material;
- Ao saturar as partículas de rocha e ensaiá-las pelo método de Marsal (1969), não fica claro se variação na resistência ao esmagamento é devida a saturação da amostra ou devido a mudanças na forma e distribuição dos contatos entre a partícula e placa que aplica o carregamento;
- Não se pode avaliar com precisão a influência de planos de clivagem na resistência ao fraturamento das amostras.

Neste contexto, buscou-se um ensaio que pudesse avaliar a resistência ao fraturamento (quebra) das partículas de rocha do enrocamento, que utilizasse corpos de prova padronizados, permitindo assim a comparação direta entre amostras de diferentes litologias, graus de saturação e direção do carregamento em relação a planos preferenciais de quebra.

Nesta pesquisa, a resistência ao fraturamento das partículas de rocha foi avaliada pelo ensaio de compressão diametral. Esse ensaio, além de ser amplamente difundido no meio técnico, atende as prerrogativas necessárias para uma comparação dos resultados entre amostras de

diferentes materiais. Esse ensaio ainda tem a vantagem da ruptura do corpo de prova ser produzida por tensões de tração, o que se supõe ocorrer na maioria dos casos de quebra da partícula no interior da massa de enrocamento. Esta alternativa se mostra ainda adequada uma vez que o carregamento do ensaio de tração indireta se dá de forma concentrada na superfície do corpo de prova, representando o caso mais desfavorável de contato pontual entre partículas.

Foram realizados ensaios de compressão diametral de acordo com a metodologia indicada pela ISRM (International Society for Rock Mechanics) em 3 conjuntos de amostras de rocha com litologias diferentes, utilizadas como material constituintes de enrocamentos em diferentes regiões do país. O objetivo dessa campanha é obter a resistência a tração desses materiais quando secos e se ocorre alteração dessa resistência quando saturados.

Essa campanha de ensaios é parte integrante de uma ampla pesquisa ainda em andamento para determinar o comportamento mecânico de enrocamentos e a influência dos principais fatores que interferem nesse comportamento. Com o andamento das pesquisas procura-se avaliar a influência da resistência ao fraturamento das partículas no comportamento mecânico do enrocamento seco e saturado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS DE ENSAIOS

Foram adotados três materiais nessa campanha de ensaios: granito (**Gr**) proveniente do sítio da Barragem de Serra da Mesa, basalto denso (**BD**) e bercha basáltica (**BB**) provenientes do sítio da Barragem de Campos Novos. A Figura 2 mostra testemunhos dos três materiais utilizados.

Foram realizados ensaios para determinação das propriedades-índice da rocha e ensaio de tração indireta. As propriedades-índice fornecem uma indicação da qualidade da rocha e nessa campanha foram determinados o peso específico da rocha, absorção, porosidade, velocidade de propagação de onda longitudinal, resistência a compressão puntiforme (amostra seca e saturada) e durabilidade como ciclagem

água estufa, ciclagem acelerada com etilenoglicol e abrasão Los Angeles.



Figura 2. Testemunhos de brecha basáltica, basalto denso e granito.

O índice de resistência à compressão puntiforme (I_s) foi determinado pelo ensaio de compressão puntiforme (point load test) proposto por Broch e Franklin (1972). Nesse ensaio, a rocha é carregada pontualmente através de dois cones metálicos, como mostra a Figura 3. A ruptura é provocada pelo desenvolvimento de fraturas de tração paralelas ao eixo de carregamento. O índice de resistência à carga puntiforme é dado pela Equação 1.

$$I_s = \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

Onde,

I_s – índice de carga puntiforme;

P – carga de ruptura;

d – distância entre os cones de carregamento.

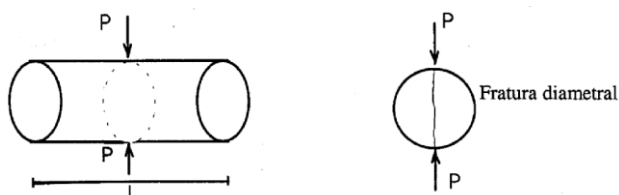


Figura 3. Ensaio de compressão puntiforme (Azevedo e Marques, 2002).

O índice de resistência ao carregamento puntiforme (I_s) foi obtido em ensaios com amostras de diâmetros diversos e corrigidos para um diâmetro equivalente a 50 mm, de acordo com as recomendações da ISRM, passando a ser renomeado para I_{s50} . O I_{s50} pode ser determinado multiplicando o valor de I_s por um fator de correlação $F_{50} = (d/50)^{0,45}$ (Franklin e Dusseault, 1989).

O ensaio de compressão diametral (tração indireta) consiste na aplicação de carregamento compressivo ao longo da geratriz de um disco. Os corpos de prova ensaiados foram serrados na relação h/d igual a 0,5 e diâmetro de 54 mm, a partir de testemunhos extraídos dos blocos de rocha sã. Para aplicação da carga foram utilizados mordentes curvos com objetivo de diminuir a concentração de tensões no contato rocha-aço. A Figura 4 apresenta o equipamento de ensaio e a Figura 5 apresenta corpos de prova ensaiados.



Figura 4. Ensaio de compressão diametral com Gr.



Figura 5. Corpos de prova ensaiados com a BB.

Os ensaios foram realizados com amostras secas ao ar e amostras saturadas por 72 h de imersão em água.

A resistência a tração é definida pela Equação 2.

$$\sigma_T = \frac{2P}{\pi dh} \quad (2)$$

Onde,

P – Carga na ruptura;

d – diâmetro do corpo de prova;

h – altura do corpo de prova;

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios para determinação das propriedades-índice da rocha são apresentados na Tabela 1. Dessa tabela pode-se obter duas informações importantes para serem confrontadas com os resultados dos demais ensaios. A primeira diz respeito a resistência da rocha obtida por meio dos resultados do ensaio de carga pontual, onde pode-se concluir que o basalto denso (BD) apresenta maior resistência, se comparado com as demais rochas avaliadas, seguido pelo granito (Gr) e com a menor resistência a brecha basáltica (BB). A segunda é absorção obtida para as três amostras de rochas avaliadas, sendo a maior absorção a amostra de BB, seguida pelo BD e com a menor absorção o Gr.

Tabela 1. Caracterização das propriedades-índice da rocha são.

Propriedades-Índice	Unid.	Gr	BD	BB
γ_{dg}	kN/m ³	26,35	28,2	21,74
γ_{satg}	kN/m ³	26,68	28,50	23,55
Absorção	%	0,36	3,00	8,70
n_p	%	0,96	1,00	18,10
e	-	0,010	0,010	0,234
V_l	m/s	3.032	5.492	4.677
Ciclagem água – estufa	%	0,09 ($N_{cl}=24$)	-	-
Ciclagem acelerada - etilenoglicol	%	-	13,63 ($N_{cl}=6$)	8,68 ($N_{cl}=6$)
Abrasão Los Angeles	%	22	12	26
I_{s50}	MPa	6,56 ($N_a=49$)	10,5 ($N_a=25$)	3,79 ($N_a=25$)
$I_{s50-sat}$	MPa	7,57 ($N_a=22$)	11,22 ($N_a=25$)	3,34 ($N_a=25$)

N_a – Número de amostras ensaiadas

N_{cl} – Número de ciclos

A Figura 6 apresenta a carga de ruptura pontual em função do diâmetro das 49 amostras secas e 22 amostras saturadas por imersão ensaiadas com o Gr.

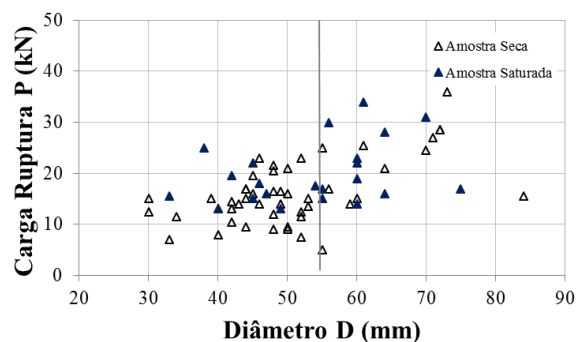


Figura 6. Carga de ruptura pontual (P) em função do diâmetro da amostra de Gr.

A Figura 7 apresenta a variação encontrada para o índice de resistência pontual corrigido (I_{s50}) em função do diâmetro das amostras ensaiadas de Gr.

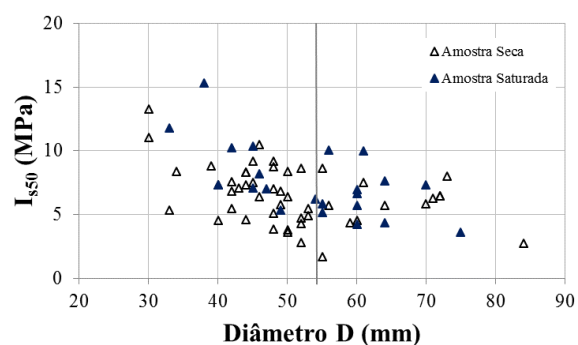


Figura 7. Variação do índice de resistência pontual (I_{s50}) em função do diâmetro da amostra de Gr.

A Figura 8 apresenta a carga de ruptura pontual em função do diâmetro das 25 amostras secas e 25 amostras saturadas por imersão ensaiadas com BD e com a BB. A Figura 9 apresenta a variação encontrada para o índice de resistência pontual corrigido (I_{s50}) em função do diâmetro das amostras ensaiadas de BD e BB.

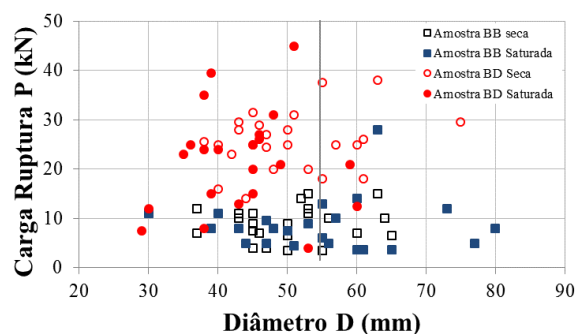


Figura 8. Carga de ruptura pontual (P) em função do diâmetro da amostra de BD e BB.

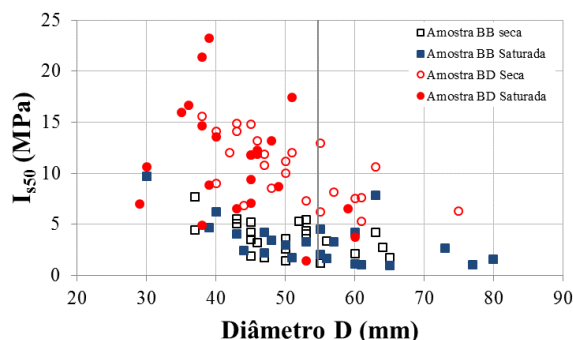


Figura 9. Variação do índice de resistência pontual (I_{s50}) em função do diâmetro da amostra de BD e BB.

Analisando as Figuras 6 a 9 pode-se concluir que não há correlação direta entre o diâmetro da amostra e a resistência ao carregamento puntiforme. Adotando esse método de ensaio, não é possível apontar alteração na resistência da partícula quando se compara a amostra seca com a saturada.

A média e desvio padrão dos resultados dos ensaios de compressão diametral são apresentados na Tabela 2. Observa-se nos resultados apresentados que o BD apresenta maior resistência a tração, seguido pela BB (amostra seca) e com menor resistência o Gr. Tem-se pela bibliografia especializada que a resistência a tração da rocha é proporcional a resistência a compressão, sendo essa última representada nessa pesquisa pela resistência ao carregamento puntiforme. No entanto, comparado os resultados dos dois ensaios, observa-se que a resistência média ao carregamento puntiforme do Gr é maior do que a resistência média da BB, mas a resistência a compressão diametral média da BB é maior do que a resistência média do Gr. Logo, para o Gr e BB não houve uma boa correlação entre a resistência a tração fornecida pelo ensaio de compressão diametral com a resistência ao carregamento puntiforme.

Na Tabela 2 verifica-se ainda que em todas as litologias ensaiadas houveram perda de resistência média a tração quando da saturação das amostras (Figura 10).

A Figura 10 apresenta a resistência a tração média de amostras de Gr, BD e BB, obtida por meio do ensaio de compressão diametral, tanto para amostras secas como saturadas, em função da absorção obtida para cada tipo de rocha.

Tabela 2. Apresentação dos resultados de ensaios de tração indireta.

Resistência à tração em compressão diametral	P kgf	σ_T Média MPa	Desvio Padrão MPa
Gr seco ($N_a = 33$)	1790	6,81	0,87
Gr saturado ($N_a = 31$)	1698	6,46	1,00
BD seco ($N_a = 9$)	4731	18,00	5,82
BD saturado ($N_a = 10$)	3566	13,57	6,57
BB seco ($N_a = 33$)	2118	8,06	2,73
BB saturado ($N_a = 27$)	1332	5,07	2,37

N_a – Número de amostras ensaiadas

Tomando o ensaio de compressão diametral como mais representativo da resistência da partícula seca e saturada, a análise da Figura 10 mostra que a maior perda de resistência não se dá nas amostras com menor resistência, mas nas amostras com maior absorção.

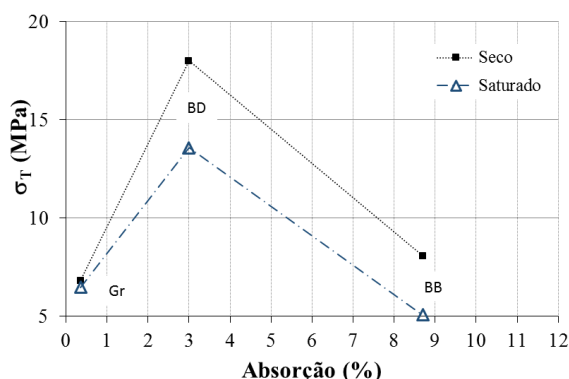


Figura 10. Variação da resistência a tração média em função da taxa de absorção de amostras de Gr, BD e BB.

A Figura 11 apresenta redução (%) da resistência a tração média do Gr, BD e BB, interpretada a partir dos resultados dos ensaios apresentados na Tabela 2, em função da absorção obtida para cada tipo de rocha.

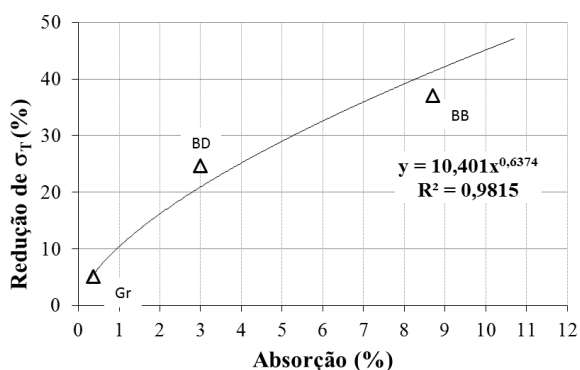


Figura 11. Redução percentual da resistência a tração média se comparado ensaios com amostras secas e saturadas com o Gr, BD e BB.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pela apresentação dos resultados, pode-se concluir que o ensaio de compressão diametral é uma boa alternativa para avaliar não só a resistência da partícula de rocha intacta, como também avaliar a perda de resistência dessa partícula quando saturada (colapso). O ensaio é normatizado, amplamente difundido no meio técnico, utiliza corpos de prova com formas regulares e padronizadas, o que permite a comparação direta entre amostras de diferentes litologias. O carregamento pode ser aplicado de forma paralela ou perpendicular a planos preferenciais de quebra e a ruptura se dá pelo desenvolvimento de fraturas de tração. Os resultados apresentam boa repetitividade e baixa dispersão.

O ensaio de carregamento puntiforme apresentou grande dispersão dos resultados e não apontou perda de resistência da amostra saturada se comparada com a seca para as três litologias avaliadas (Gr, BD e BB). Um resultado interessante dessa campanha de ensaios é que para as três litologias, e para corpos de provas de dimensões aleatorias, o aumento do diâmetro equivalente (distância entre os cones de aplicação de carga) não resultou em aumento na resistência, contrapondo o conceito difundido no meio técnico. Pode-se então afirmar que, para uma mesma litologia, o aumento da partícula não necessariamente resultará em maior resistência da mesma, mas que a forma e distribuição do carregamento em conjunto com a forma da partícula condicionará sua resistência ao fraturamento.

No ensaio de compressão diametral, a maior resistência média a tração foi obtida para as amostras de basalto denso (BD), seguido pela brecha basáltica (BB) e por último o granito (Gr). No entanto, quando as amostras foram saturadas, aquelas que apresentaram a maior perda de resistência relativa foram as de BB, seguidas pelo BD e por último o Gr. Tal fato

contradiz a afirmação de Maranhã da Neves & Veiga Pinto (1990) que concluíram que o colapso (quebra e rearranjo das partículas) é mais importante em enrocamentos de baixa resistência. Dos resultados apresentados, observa-se que a perda de resistência da partícula de rocha quando saturada possui correlação direta com a capacidade de absorção da rocha e não com sua resistência.

Os resultados aqui apresentados serão comparados com o resultados de ensaios de enrocamentos ensaiados em escala reduzida em laboratório, com as mesmas litologias, para verificar representatividade perante o comportamento mecânico desses enrocamentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FURNAS Centrais Elétricas S.A por possibilitar a realização do programa experimental e aos laboratoristas do laboratório de Mecânica das Rochas de FURNAS pelo auxílio nos ensaios.

REFERÊNCIAS

- Azevedo, I.C.D. e Marques, E.A.G. (2002). *Introdução à Mecânica das Rochas*. Caderno Didático 85, Editora UFV, Viçosa, MG, 361 p.
- Broch, E. e Franklin, J.A. (1972). The Point Load Strength Test. *Int. Journal Rock Mech. Min. Sci* 9, p. 669-697.
- Frahia Neto, S.H. (1996). *Estudo do Comportamento da Barragem de Xingó Objetivando uma Contribuição à Validação Experimental de Modelos Teóricos de Análise*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 283 p.
- Maranhã das Neves, E., Veiga Pinto, A. (1990). Colapso de enrocamentos. *Geotecnia*, 54: p. 25-33.
- Franklin, J.A e Dusseault, M.B. (1989). *Rock Engineering*. McGraw-Hill, USA, 600 p.
- Marsal, R.J. (1969). The Behaviour of granular soils. Curso ministrado na Universidad Nacional Autónoma de México.
- Marsal, R.J. (1973). *Mechanical properties of rockfill. Embankment-Dam Engineering - Casagrande Volume*. R.C. Hirschfeld & Poulos (eds.), John Wiley & Sons, New York, USA, p. 109-200.