

Considerações sobre a Produção de Finos em Ensaios de Compressão Diametral

João Antonio Curtis Neto¹; Rogério Pinto Ribeiro²; Rony Souza dos Santos¹; Jozias Caetano de Souza Bravo¹; João Paulo Monticelli³

Resumo – As etapas de desmonte e de britagem em minerações de agregados produzem britas de diversas granulometrias. Neste ciclo produtivo também são produzidos “finos” (com diâmetro menor que 4,75 mm) por vezes em quantidades excessivas e com baixa demanda comercial, revelando que estudos quantitativos sobre as faixas granulométricas resultantes do beneficiamento devem enfatizar as frações menores. Nesta perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo analisar quantitativamente os finos gerados em ensaios laboratoriais com três litotipos (basalto, diabásio e monzodiorito com diferentes granulações) amostrados em uma pedreira em Limeira-SP, constituindo geologicamente uma ocorrência intrusiva na Formação Serra Geral. Foram realizados cem ensaios de compressão diametral em corpos de provas preparados a partir de blocos representativos amostrados em campo. Os experimentos envolveram uma campanha com diferentes taxas de carregamento, visando atingir rupturas rápidas em torno de dez e vinte segundos de duração. Foi necessário a utilização cautelosa de uma embalagem plástica envolvendo o aparato experimental, possibilitando a coleta dos fragmentos resultantes das rupturas. Após a conclusão dos ensaios, efetuou-se o peneiramento dos fragmentos nos diâmetros de 4,75 mm e de 1,00 mm, resultando em índices de perda de massa para cada amostra. Em termos das relações entre as perdas de massa e a resistência à tração dos materiais observou-se um aumento dos finos relacionado as maiores resistências.

Abstract – The blasting and crushing stages in aggregate mining produce materials of different granulometries. In this productive cycle is also produced “fines” (with a diameter smaller than 4.75 mm) sometimes in excessive quantity and with lower commercial demand, what shows that quantitative studies about the granulometry ranges that are resulted from the beneficiation must also emphasize the smaller fractions. Based on these assumptions, the goal of this paper is to analyze quantitatively the fines generated in laboratory tests stem from three lithotypes (basalt, diabase, and monzodiorite with different granulometries) that were sampled in a quarry in Limeira City - São Paulo State, what constitutes geologically an intrusive occurrence in Serra Geral Formation. It was performed a hundred diametrical compression tests in specimen that were prepared from representative blocks sampled in the field. The experiments involved a campaign with different loading rates, that aimed to reach quick ruptures with a duration of about ten to twenty seconds. It was necessary the cautious application of a plastic package involving the experimental apparatus, what enables the picking of the fragments resulted from the ruptures. After the tests conclusion, it was executed the sieving of the fragments with diameters of 4.75 mm and of 1.00 mm, what results in mass loss rates for each sample. In terms of the relation between the mass loss and the tensile strength of the rocks, it was noticed an increase of the fine according to the strength increases.

Palavras Chave: Agregados; Finos; Ensaios laboratoriais; Beneficiamento.

¹ Geól., Mestrando em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos: São Carlos – SP, (16) 33739502, geol.joacurtis@gmail.com, rony.geologist@gmail.com, joziascaetano@gmail.com

² Geól., PhD, Escola de Engenharia de São Carlos: São Carlos – SP, (16) 33739491, rogerioprx@sc.usp.br

³ Geól., Mestrando em Engenharia Geotécnica, Escola Politécnica – USP: São Paulo – SP, (11) 3091-9074, jpmonticeli@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A utilização de agregados rochosos na construção civil brasileira está presente em diversos tipos de aplicações, sendo as principais no uso com ligantes. No caso dos concretos de cimento portland, cerca de 70% do volume pode ser constituído por britas. Desta forma o setor produtivo destes materiais tem grande importância na indústria mineral brasileira.

Neste nicho de mineração, em geral, técnicas e/ou procedimentos geológico-geotécnicos avançados ainda não são sistemáticos na resolução de diferentes aspectos produtivos. Soluções empíricas são empregadas na maioria dos casos e estudos laboratoriais acabam não sendo realizados. Nesta perspectiva encontram-se os temas de desmonte e de britagem em pedreiras, bem como uma das grandes dificuldades no beneficiamento de rochas para agregados que é a produção de materiais menores que 4,75 mm.

Segundo a norma NBR 9935 (ABNT, 2011) as frações mais finas resultantes das britagens com diâmetro menor que 4.8 mm são classificadas em: areia de britagem com grãos passantes pela peneira com malha de 4.8 mm e retidos na peneira com abertura de 150 µm; e finos todo material granular passante na peneira de malha 150 µm Apesar de diversas caracterizações realizada para estes materiais, a demanda por os mesmos em geral é baixa. Desta forma, estudos que quantifiquem as quantidades de materiais menores de 4,8 mm são pertinentes.

Dentro desta perspectiva, este trabalho apresenta um estudo laboratorial com quatro diferentes rochas provenientes de uma pedreira ativa de agregados. Estas litologias estão geologicamente situadas em um mesmo corpo intrusivo, sendo um maciço com variações consideráveis. Portanto trata-se de uma pesquisa aplicada à indústria de produção de agregados.

A bateria de ensaios laboratoriais foi realizada em uma prensa servo controlada do Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). O ensaio *brazilian test* foi empregado na determinação dos valores de resistência à tração e na quantidade de finos produzidos passantes nas peneiras de abertura de 1,00 e 4,75 mm. As recomendações da ISRM (1978) foram seguidas para confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios. Também foram alteradas as taxas de carregamentos, para provocar rupturas rápidas.

2. FRAGMENTAÇÃO DE ROCHAS PARA PRODUÇÃO DE AGREGADOS

As principais operações realizadas em pedreiras para produção de agregados envolvem fragmentação de rochas, desde a extração do maciço rochoso até a cominuição ideal. Tratam-se de etapas onerosas, visto que se utilizam de explosivos e grande aporte energético na britagem, portanto ganha importância a otimização destas etapas.

Segundo Almeida (2003) são realizados furos no maciço rochas para carregamento com explosivos, estes furos devem estar numa malha ideal, de modo a produzir uma detonação satisfatória. Os blocos gerados no desmonte devem estar bem dimensionados para as próximas etapas, do contrário podem ser necessários outras detonações, ou a utilização de marteletes para a quebrar os blocos inadequados para britagem, incorrendo em custos adicionais de produção. Na prática é importante prever a distribuição dos tamanhos para otimizar a fragmentação, ou seja, o plano de desmonte, distribuição e carregamentos dos furos (ZHANG, 2016).

De acordo com McNally (1998), algumas propriedades dos maciços rochosos são mais significantes para os desmontes que em etapas de britagens. Neste quesito se encaixa os padrões de fraturamento dos maciços, aberturas de juntas que, por exemplo, quando maiores de 1 mm podem confinam tensões em um bloco muito fraturado. No entanto juntas fechadas com um pequeno espaçamento podem melhorar os desmontes, pois a transmissão das tensões seria

mais uniforme. A Tabela 1 organiza parâmetros importantes para planejamentos de desmontes e britagens em pedreiras. Wang *et al.* (1990) afirmam os métodos de *scanlines* têm como principal função o mapeamento de espaçamentos de famílias de descontinuidades. As análises destes dados trazem parâmetros básicos, para cálculos de distribuição dos blocos *in-situ*, ou seja, trata-se de um método de campo simples com propriedades do maciço para desmontes.

Tabela 1. Fatores geológicos importantes em desmonte e britagem. Modificado de McNally (1998).

Propriedades	Descrição
Litológica	Tipo de rocha; mineralogia (especialmente teor de quartzo e argilominerais) e <i>fabric</i> (estrutura e textura).
Rocha intacta	Resistência: índice de carga pontual (Is50), resistência à compressão uniaxial (RCU) e tração indireta (<i>Brazilian test</i>); Módulo de elasticidade estático (E_s), Relação Módulo e RCU (E/RCU), características de rigidez e fragilidade; Peso específico, porosidade e absorção de água; Velocidades de propagação de ondas (V_p e V_s), módulo de elasticidade dinâmico (E_d), Relação entre módulos estático e dinâmico (E_s/E_d).
Maciço Rochoso	Orientação espacial e predomínio de cada família de juntas presentes; Espaçamento das juntas (se estão uniformemente espaçadas, agrupadas ou distribuídas de modo aleatório); Abertura das juntas, umidade (presença de água) e tipo de preenchimento e cimento; Espessura de camadas, posição e orientação de camadas ou níveis de materiais brandos e duros.

As soluções ideais para otimização dos desmontes não envolvem somente o custo por tonelada dos blocos de rocha detonados, mas também os impactos gerados no transporte, britagem e em etapas correlatas (KANCHIBOTLA, 2003).

A etapa de britagem tem grande ligação com as propriedades da rocha beneficiada, quantidade e qualidade de produção, operação e manutenção de equipamentos (FRAZÃO, 2002). Chaves & Peres (2009) comentam que os processos de britagem geralmente são feitos em estágios, independentemente do tipo de britador, ou seja, são processos sucessivos que podem acarretar em maiores custos caso não sejam devidamente estudados. Resultado desses processos de cominuição são as britas em diversos tamanhos e relocadas por correias transportadoras para britadores e peneiras, sendo as frações granulométricas finalmente separadas em pilhas de estoque de agregados (ALMEIDA, 2003).

Conforme McNally (1998) propriedades de rocha intacta são mais relevantes no tocante à britagem, visto que nesta etapa a fragmentação se processa por meio de carregamentos mais lentos, se comparada ao desmonte. Desta forma, parâmetros geomecânicos estáticos obtidos por meio de ensaios laboratoriais podem dar suporte a esta etapa, considerando que na maioria dos britadores ocorre uma combinação de mecanismos, sendo eles: tração indireta, carregamento dinâmico, atrito e cisalhamento.

Bohloli *et al.* (2001) realizaram estudos com diferentes rochas em ensaios de compressão diametral, com taxas de carregamento para rupturas rápidas, em menos de 10 segundos. As amostras foram testadas nas condições saturada e seca, com resultados prevendo geração de menor quantidade de finos nas amostras saturadas. Este tipo de ensaio em materiais rochosos na maioria das vezes geram uma fratura única no meio do corpo de prova, entretanto próximo aos pontos de carregamentos a tendência é que as amostras sejam fragmentadas em pequenos pedaços (ZHANG, 2016).

Segundo Bohloli & Hoven (2007) a avaliação de finos gerados em ensaios de compressão diametral com taxas de carregamentos altas, tem influência principalmente da rigidez e da resistência das rochas. Em outras palavras, a configuração deste ensaio promove a distribuição do esforço de modo que as bordas dos corpos de prova concentrem a tensão, provocando

rupturas nestas extremidades. Quanto ao carregamento pós-ruptura, fator relevante que é dependente da rigidez da prensa e da resistência da rocha ensaiada, faz com que rochas mais resistentes tenham um maior carregamento pós-ruptura, provocando mais fragmentos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais Rochosos e Amostragem

Os materiais rochosos selecionados para a pesquisa são provenientes de uma das pedreiras ativas (aqui referida como "Pedreira B") que, há mais de 40 anos, vêm produzindo brita para construção civil no município de Limeira, SP. Estas unidades produtoras de britas lavram rochas do corpo geológico descrito na literatura (FARIA, 2008; SANTOS, 2015; LINO *et al.*, 2018) como Intrusão de Limeira, correlacionável aos magmatitos cretácicos da Formação Serra Geral. Segundo estes autores, há uma expressiva variação de litologias decorrentes dos processos de cristalização fracionada, ocorrendo rochas como basaltos nas bordas, diabásios e monzodioritos até quartzo-monzodioritos ao centro (Figura 1). Machado *et al.* (2005) reportam que as rochas desta intrusão são as mais diferenciadas em comparação às outras ocorrências da Formação Serra Geral. É previsível, portanto, que um maciço geologicamente com variação expressiva de rochas possa incorrer em condições tecnológicas distintas, considerando as utilizações de maior demanda de brita na construção civil e/ou obras de engenharia.

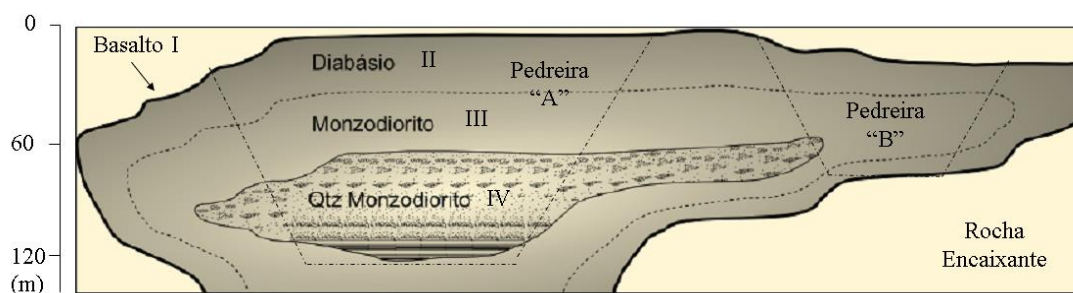



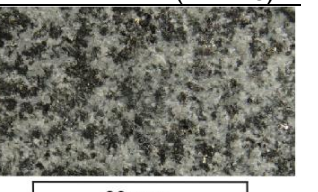


Figura 1. Perfil geológico esquemático da Intrusão de Limeira (SP). Modificado de Santos (2015).

Quanto à geologia local da Pedreira "B", em caráter expedito o basalto (BAS) configura uma rocha afanítica de granulação muito fina, que ocorre em faixas de 1 a 3 metros em contato com arenitos do Sub-Grupo Itararé. Subjacente ao basalto ocorrem diabásios (DIA) de textura fanerítica fina a média, até cerca de 30 metros das bordas do corpo geológico. O corpo central da intrusão é composto por monzodioritos e apresenta veios centimétricos de riolito, não tendo sido encontrado em campo a litologia (quartzo-monzodiorito) que ocorre em maiores profundidades, portanto monzodioritos de granulação diferente (MON_M e MON_G) foram amostrados. A Tabela 2 apresenta as informações petrográficas básicas das rochas estudadas.

Tabela 2. Rochas amostradas no campo para realização de ensaios

Basalto (BAS)	Diabásio (DIA)	Monzodiorito (MON _M)	Monzodiorito (MON _G):
			
Borda de resfriamento: E < 2 a 3 m.; T afanítica e G muito fina (<1mm)	Borda de transição: E < 30 m.; T fanerítica e G fina a média (< 1 a 2 mm)	Corpo central com E em torno de 60 m.; T fanerítica e G média (1 a 5 mm)	Corpo central com E em torno de 60 m.; T fanerítica e G média a grossa (3 a 6mm)
Legenda: E - espessura; T - textura; G - granulação.			

3.2. Métodos

Por meio de blocos representativos dos materiais pétreos coletados em campo foram obtidas as amostras necessárias aos experimentos, levando-se em conta as diretrizes da ISRM (1978) para extração, corte e retífica dos corpos de prova (CPs) cilíndricos. Foram realizados um total de 115 ensaios, alguns deles necessários à previsão de rupturas rápidas, principalmente as menores de 10 segundos. A taxa de carregamento sugerida pela ISRM (1978), 0,2 kN/s, foi empregada em cinco ensaios para cada material rochoso, assim como previsto para determinação da resistência a tração. Os resultados médios são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados dos ensaios realizados de acordo com as recomendações da ISRM (1978)

Rocha	Taxa de Carregamento	σ_t (MPa)
BAS	0,2 kN/s	15,31
DIA		14,38
MON _M		12,59
MON _G		12,74

Estes resultados permitiram a determinação da resistência à tração das rochas. Fez-se necessária a adaptação de embalagens plásticas envolvendo todo o aparato e as amostras durante os ensaios, viabilizando a coleta dos fragmentos gerados nas rupturas, para posterior peneiramento (Figura 2). Os ensaios foram executados com rupturas rápidas, em menos de 10 segundos e 20 segundos, sendo as taxas de carregamentos previamente testadas e ajustadas em corpos de prova pilotos.



Figura 2. (A) Aparato do ensaio de compressão diametral com corpo de prova, (B) Envolvimento do equipamento para controle dos finos, (C) Configuração de ensaio em prensa servo controlada do Laboratório de Mecânica das Rochas do Depto. de Geotecnia da EESC/USP e (D) Detalhe da foto anterior.

No caso dos monzodioritos foram empregadas taxas menores de carregamento, pois tratam-se de rochas menos resistentes quando comparadas ao basalto e ao diabásio. A Tabela 4 organiza as diferentes especificações de ensaios quanto à taxa de carregamento, ao tempo de ruptura e ao jogo de peneiras (Figura 3) empregadas nos experimentos. Por meio da pesagem dos fragmentos calculou-se os índices de perda de massa "P", referentes aos materiais

passantes nas peneiras. A execução dos ensaios foi acompanhada por uma câmera de *smartphone*, para documentar a propagação das fraturas e a geração dos finos.

$$P = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde: P = valor de perda de massa (%) nas peneiras nº 4 ($P_{4,75\text{ mm}}$) ou nº 10 ($P_{1,00\text{ mm}}$); M_i = Massa inicial (g) do CP; M_f = Massa final (g) retida nas peneiras nº 4 ou nº 10.

Tabela 4. Especificações dos ensaios com alterações nas taxas de carregamentos.

Rocha	Taxa de Carregamento	Tempo de ruptura	Peneiras utilizadas
BAS	7 kN/s	Até 10 s.	Com aberturas de 1,0 (nº 18) e 4,75 mm (nº 4)
DIA	3,5 kN/s	Até 20 s.	
MON _M	5 kN/s	Até 10 s.	
MON _G	2,5 kN/s	Até 20 s.	



Figura 3. Jogo de peneiras utilizadas para peneiramento com material após ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A reprodução de vídeos realizados em câmera lenta mostra que uma pequena fratura se forma no centro do CP, assim como em um ensaio normal. Entretanto, quando acionado o comando de parar o carregamento, o atuador da prensa continua carregando o CP e produzindo mais fraturas e fragmentos (Figura 4). Há CPs em que diversas fraturas foram propagadas no instante inicial de ruptura, sendo estes os que geraram maior número de finos.

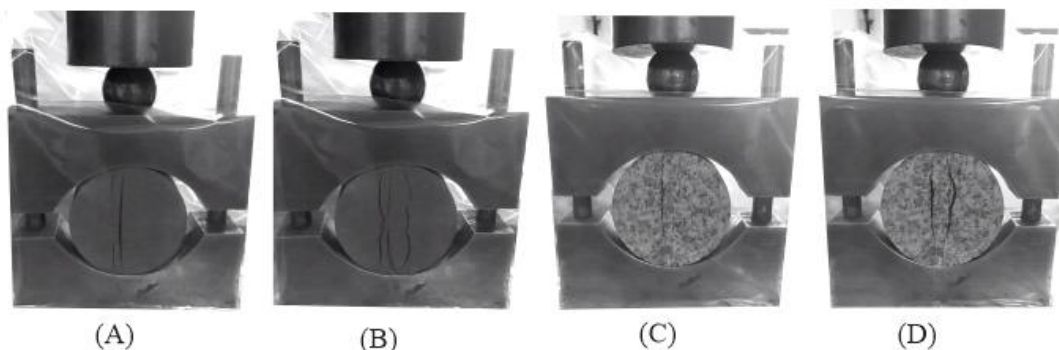
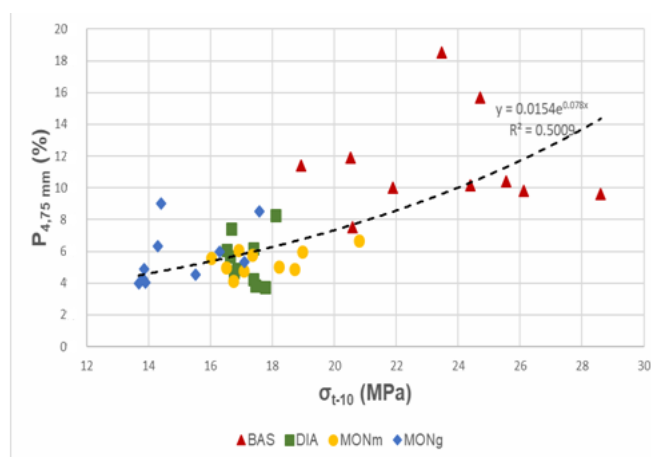
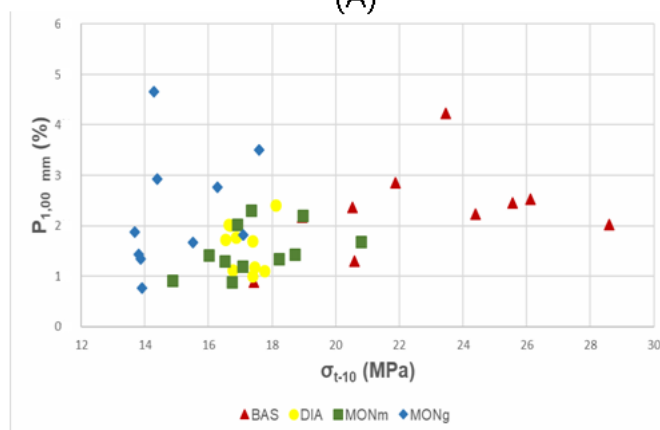


Figura 4. (A) Fratura propagada no instante inicial de ruptura e (B) Fraturas secundárias (BAS); (C) Primeira fratura propagada no centro do CP e (D) Fraturas secundárias (MON_G).

Nos casos das rupturas em menos de 10 s, o aumento dos valores de resistência a tração é notável, sendo que no caso do basalto (BAS) ocorreram acréscimos de 80% nesta resistência. De modo geral, as rochas mais resistentes produziram mais finos, no caso de rupturas em menos de 10 segundos, com valores de perdas de massa na peneira 4,75 mm próximos a 20%. Há uma tendência de correlação entre os valores de perda de massa na peneira nº 4 e os valores de resistência, conforme mostrado no ajuste da equação com R^2 de 0,50 (Figura 5A). Todavia, em alguns testes praticamente não foram produzidos fragmentos menores de 1,00 mm, sendo notável também que o monzodiorito de granulização grossa (MONg) produziu mais fragmentos deste tamanho, por conta da excessiva fragmentação dos CPs (Figura 5B).



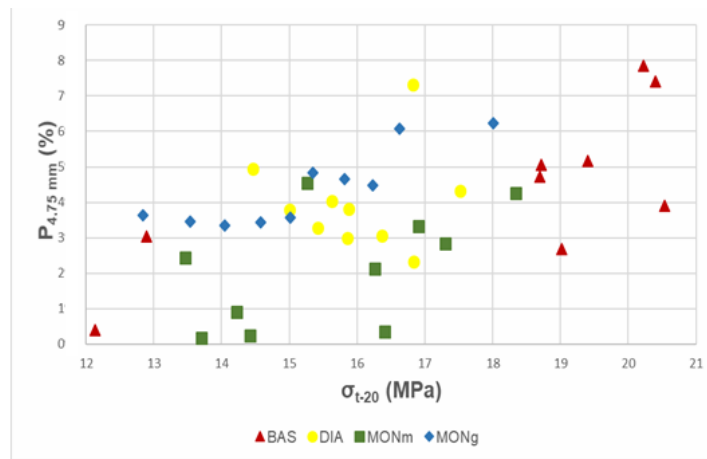
(A)



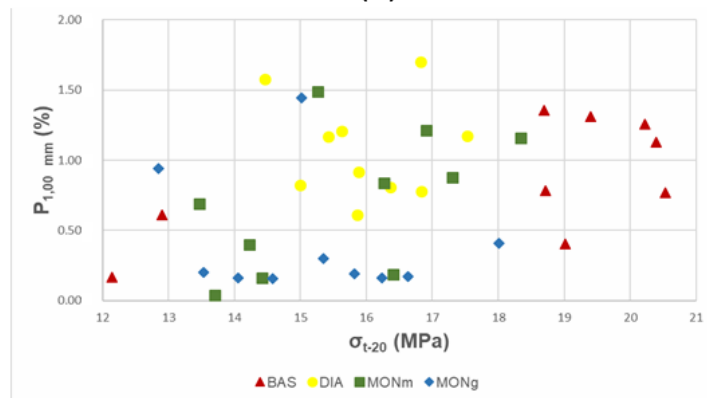
(B)

Figura 5. Relação entre perdas de massa " $P_{4,75mm}$ " na peneira nº4 (A) ou " $P_{1,00mm}$ " na peneira nº 10 (B) e resistência a tração (σ_{t-10}) (rupturas de 10 segundos).

A Figura 6A mostra que os finos gerados em rupturas em menos de 20 segundos mantêm ligeira correlação com a resistência das rochas, mas tem menor volume ao material produzido em condições muito rápidas (10 segundos). Os valores de resistência, neste caso, apresentam no máximo 45% de aumento se comparada as condições de ensaios normais com o roteiro sugerido pela ISRM (1978). Quanto à quantidade de fragmentos passantes na peneira nº10 é muito baixa, não ultrapassando em nenhum teste 2 % (Figura 6B).



(A)



(B)

Figura 6. Relação entre perdas de massa " $P_{4,75\text{mm}}$ " na peneira nº4 (A) ou " $P_{1,00\text{mm}}$ " na peneira nº 10 (B) e resistência a tração (σ_{t-20}) (rupturas de 20 segundos).

5. CONCLUSÕES

A análise dos dados permitiu comprovar correlações entre os valores de finos e resistência à tração, principalmente nas rupturas rápidas (menos de 10 segundos). Nos outros casos observou-se uma tendência ao aumento de resistência e geração de finos. Este fato está principalmente ligado as explicações deduzidas por Bohloli & Hoven (2007). A relação entre o acréscimo na resistência, quando há aumento da taxa de carregamento, deve ser por conta do comportamento dependente do tempo.

De modo geral, os dados deste trabalho poderão contribuir com estudos sobre a produção de finos nas etapas de britagens pois, como já afirmado por McNally (1998), desmontes são muito dependentes de propriedades dos maciços rochosos e as solicitações são dinâmicas. O desenvolvimento de experimentos adicionais em rocha intacta (basalto, diabásio e monzodioritos) permitirá estabelecer relações com aspectos de rigidez e de fragilidade dos materiais rochosos. Assim sendo, prevê-se a realização dos seguintes ensaios físico-mecânicos: Índices Físicos e Velocidade de Propagação de Ondas; Resistência à Compressão Simples e Determinação dos Módulos Estático e Dinâmico.

Finalmente, cabe reforçar a importância de levantamentos lito-estruturais mais específicos sobre os parâmetros de descontinuidades, para se obter previsões mais acuradas sobre custos e desempenhos na etapa de desmonte. Métodos de *scanline* são opções econômicas neste caso, pois através de levantamentos de campo as propriedades de descontinuidades são notadas. De modo que, os espaçamentos possam ser calculados, produzindo os parâmetros básicos para a distribuição de tamanhos de blocos *in-situ* como o proposto por Wang *et al.* (1990).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo Estrutural pelo suporte oferecido e por ter permitido o acesso às suas instalações. O primeiro autor foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- ABNT. (2015) NBR 9935: Agregados Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 12 p.
- ALMEIDA, A. S. (2013) "*Métodos de Mineração*" in TANNO, L. C., SINTONI, A. (Cords.) Mineração & município: bases para planejamento e gestão dos recursos minerais. Publicação IPT. 194 p.
- BOHLOLI, B., GUSTAFSON, G., RONGE, B. (2001) "*A laboratory study on reducing the quantity of rock fines at failure: application to rock blasting and crushing*" in *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 60, n. 4, p. 271-276.
- BOHLOLI, B., HOVEN, E. (2007) "*A laboratory and full-scale study on the fragmentation behavior of rocks*" in *Engineering Geology*, Vol. 89, n. 1-2, p 1-8.
- CHAVES, A. P., PERES, A. E. C. *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem*, Vol 3., Signus Editora, São Paulo, 2009, 260 p.
- FARIA, C. A. (2008) "*Evolução magmática do Sill de Limeira: petrografia e geoquímica*", Dissertação de Mestrado (Petrologia Ígnea e Metamórfica), Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 145 p.
- FRAZÃO, E. B. *Tecnologia de Rochas na Construção Civil*, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, 2002, 131 p.
- ISRM (1978) "*Suggested Method for Determining Tensile Strength of Rock Materials*" in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 15, n. 3, p 99-103.
- KANCHIBOTLA, S, S. (2003) "*Optimum Blasting? Is it Minimum Cost Per Broken Rock or Maximum Value Per Broken Rock?*" in *International Journal for Blasting and Fragmentation*, Vol. 7, n. 1, p 35-48.
- MACHADO, F .B.; NARDY, A. J. R. ; MELLO, R. P. ; OLIVEIRA, M. A. F. ; SQUISATO, E. (2005) "*As rochas intrusivas da Formação Serra Geral na porção leste da Bacia do Paraná no estado de São Paulo: aspectos petrográficos e geoquímicos - resultados preliminares*" in *Geociências*, Rio Claro (SP), Vol. 24, n. 1, p 5-17.
- MCNALLY, G. *Soil and Rock. Construction Materials*. New Fetter Lane, London, 1998, 403 p.
- SANTOS, L. M. L. A. (2015) "*A Intrusão Toleítica de Limeira (SP): Contribuição à Geologia, Petrografia e Alteração Hidrotermal*", Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 66 p.
- LINO, L. M., CAVALLARO, F. A., VLACH, S. R. F., COELHO, D. C. (2018) "*2D magnetometric modeling of a basic-intermediate intrusion geometry: geophysical and geological approaches applied to the Limeira intrusion, Paraná Magmatic Province (SP, Brazil)*" in *Brazilian Journal of Geology*, Vol. 48, n. 2, p. 305-315.
- WANG, H., LATHAM, J. P., POOLE, A. (1990) "*In-situ block size assessment from discontinuity spacing data*" in 6th Congress of International Association of Engineering Geology, Balkema, Rotterdam, p. 117-127.
- ZHANG, Z. *Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications*, Elsevier, New York, 2016, 528 p.