

# CONSIDERAÇÕES SOBRE A PRODUÇÃO DE FINOS EM ENSAIOS DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

ON THE PRODUCTION OF FINES IN DIAMETRAL COMPRESSION TESTS

JOÃO ANTONIO CURTIS NETO

*Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Esc. Eng. São Carlos, Univ. de São Paulo, geol.joaocurtis@gmail.com*

ROGÉRIO PINTO RIBEIRO

*Departamento de Geotecnia, Esc. Eng. São Carlos, Univ. de São Paulo, rogerioprx@sc.usp.br*

RONY SOUZA DOS SANTOS

*Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Esc. Eng. São Carlos, Univ. de São Paulo, rony.santos@usp.br*

JOZIAS CAETANO DE SOUZA BRAVO

*Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Esc. Eng. São Carlos, Univ. de São Paulo, joziascaetano@gmail.com*

JOÃO PAULO MONTICELLI

*Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica, Esc. Eng. São Carlos, Univ. de São Paulo, jpmonticeli@gmail.com*

## RESUMO ABSTRACT

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, a partir de três litotipos (basalto, diabásio e monzodiorito com diferentes granulometrias), amostrados em uma pedreira em Limeira-SP, constituindo geologicamente uma ocorrência intrusiva na Formação Serra Geral. Foram realizados 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

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 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

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.

**Palavras-chave:** Agregados; Finos; Beneficiamento; Compressão diametral; Ensaio brasileiro

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.

**Keywords:** Aggregates; Fine material; Processing; Diametrical compression; Brazilian Test

## 1 INTRODUÇÃO

As principais aplicações das rochas na construção civil brasileira são na forma de blocos (paralelepípedos), de placas (pisos e paredes), e na forma granular, como pedra britada, pó de pedra, cascalho, dentre outros. Na forma granular, os agregados podem ser utilizados com ligantes na produção de asfalto e concreto de cimento Portland, e sem ligantes, na confecção de drenos, filtros e lastro de ferrovia (OLIVEIRA & MONTICELLI, 2018). Em concretos de cimento Portland, cerca de 40% a 70% do volume pode ser constituído por agregados, britas, influenciando diversas propriedades físico-mecânicas (METHA & MONTEIRO, 2008 e ASKELAND & FULAY, 2009), bem como em seu custo de produção.

O agregado (brita, por exemplo) é obtido a partir de blocos de rocha provenientes do desmonte da frente de lavra. Furos são realizados no maciço rochoso para carregamento com explosivos, organizados em uma malha ideal de modo a produzir uma detonação satisfatória (ALMEIDA, 2003). Os blocos gerados no desmonte devem estar bem dimensionados para as próximas etapas, do contrário podem ser necessários outras detonações, ou a utilização de martelotes para a quebra dos blocos. O uso de martelotes, inadequados para cominuição dos blocos, de certa forma, aumenta o custo final da brita. Desse modo é importante prever a distribuição dos tamanhos dos blocos para otimizar a fragmentação, ou seja, o plano de desmonte, distribuição e carregamentos dos

furos (ZHANG, 2016). No entanto, 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).

Se por um lado as propriedades do maciço rochoso, como as descontinuidades, regem o desmonte adequado dos blocos para as etapas subsequentes, por outro, no beneficiamento as propriedades da rocha intacta são mais relevantes. Segundo Frazão (2002), a etapa de britagem tem grande ligação com as propriedades da rocha beneficiada, quantidade e qualidade de produção, operação e manutenção de equipamentos. Chaves & Peres (2009) salientam que os processos de britagem geralmente são feitos em estágios, independentemente do tipo de britador, são processos sucessivos que podem acarretar maiores custos caso as propriedades da rocha intacta não sejam devidamente estudadas. Além disso, durante a britagem, a fragmentação da rocha se processa por meio de carregamentos lentos se comparada ao desmonte, e relacionada a uma combinação de mecanismos, sendo eles: tração indireta, carregamento dinâmico, atrito e cisalhamento (MCNALLY, 1998). Desta forma, parâmetros geomecânicos obtidos por meio de ensaios laboratoriais podem ajudar a levantar informações sobre as rochas e suas possíveis influências no beneficiamento. A Tabela 1 reuni as propriedades mais importantes no desmonte e na britagem de rochas em pedreiras.

As operações realizadas em pedreiras para produção de agregados envolvem as fragmentações de rochas, desde a extração do maciço rochoso até a cominuição ideal. Trata-se de etapas onerosas, visto que se utilizam de explosivos e grande aporte energético na britagem, portanto, as informações sobre o maciço e a rocha intacta são fundamentais para a otimização destas etapas. Muitas técnicas ou procedimentos geológico-geotécnicos avançados ainda não são sistemáticos na resolução de diferentes aspectos produtivos na exploração de pedreiras. Soluções empíricas são empregadas na maioria dos casos e estudos laboratoriais acabam não sendo realizados. Neste cenário a produção de materiais menores que 4,75 mm é desfavorável e denota baixa eficiência do britador, já que, comparativamente a outros agregados, a areia de britagem possui menor valor de mercado. 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  $\mu$ m; e finos com todo material granular passante na peneira de malha 150  $\mu$ m.

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 para quantificar a produção de finos, areia de britagem. As rochas foram testadas nas condições saturada e seca, com resultados prevendo geração de menor quantidade de finos nas amostras saturadas. O ensaio de compressão diametral em materiais rochosos na maioria das vezes gera 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). 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 e produção de finos. 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 e ao carregamento pós-ruptura (BOHLOLI & HOVEN, 2007), isto é, rochas de alta resistência possuem um maior carregamento pós-ruptura e produzem mais fragmentos.

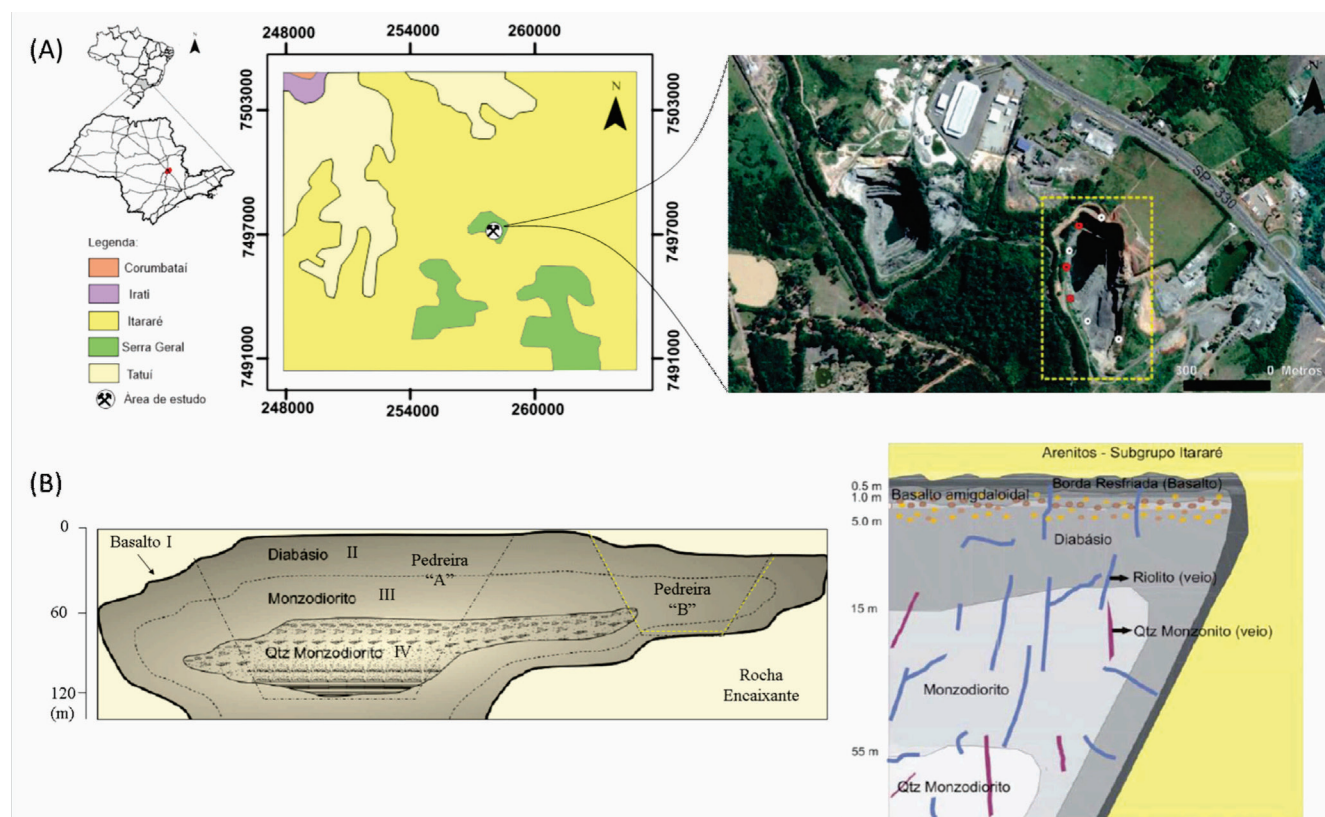
Nesse sentido é fundamental levantar informações sobre a resistência e a produção de finos dos litotipos lavrados, uma vez que seu conhecimento pode otimizar o beneficiamento da rocha, ou se, inerente do processo utilizado, ter estimativas sobre a produção de material de segunda classe, com baixo valor comercial, ou rejeito. O aproveitamento de materiais descartados, por exemplo, demanda ensaios específicos para sua caracterização e aplicabilidade na construção civil, como referido em Franklin Júnior *et al.* (2019) e Reis *et al.* (2020).

Este trabalho apresenta um estudo sobre a produção de finos de quatro diferentes rochas provenientes de uma pedreira ativa de agregados em Limeira-SP. Essa localidade é vizinha da Região Metropolitana de Campinas (RMC), de considerável demanda de agregados pétreos notadamente para construção civil. As litologias investigadas são relacionadas à uma intrusão da Formação Serra Geral com variações composicionais devido à cristalização fracionada, típica desta forma de jazimento (Figura 1). A influência da heterogeneidade da rocha, os valores de resistência à tração e a quantidade de finos foram investigados por meio de procedimentos tátil visuais e ensaios laboratoriais.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). O ensaio de resistência à tração indireta, ensaio brasileiro, foi empregado na determinação dos valores de resistência dos litotipos e na produção de finos passantes nas peneiras de abertura de 1,00 e 4,75 mm, respectivamente as n° 18 e 4. As recomendações da ISRM (1978) foram seguidas para confecção dos corpos de prova e condições dos ensaios. No entanto, conforme sugerido por Bohloli & Hoven (2007), as taxas de carregamentos foram alteradas para provocar rupturas rápidas.

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

Propriedades	Descrição
Litologia	Tipo de rocha; mineralogia (especialmente teor de quartzo e argilominerais) e <i>fabric</i> (estrutura e textura).
Rocha intacta	Resistência: índice de carga pontual ( $I_s50$ ), 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.



**Figura 1.** (A) Contexto geológico da área de estudo, modificado de Perrotta et al. (2006); (B) Ilustração de perfis geológicos da Intrusão de Limeira (SP), modificados de Santos (2015) e Faria (2008).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais rochosos e amostragem

Os materiais rochosos selecionados para a pesquisa são provenientes de uma das pedreiras ativas da área de estudo (aqui referida como “Pedreira B”) (Figura 1), 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 como Intrusão de Limeira (FARIA, 2008; SANTOS, 2015, LINO *et al.*, 2018, entre outros), 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. Machado *et al.* (2005) reportam que

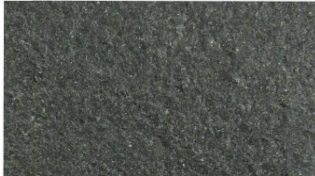
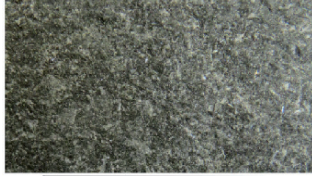
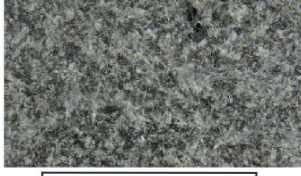
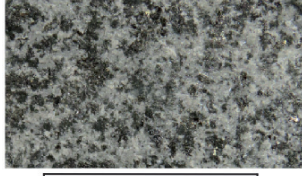
as rochas desta intrusão são as mais diferenciadas em comparação às outras ocorrências da Formação Serra Geral.

É previsível, portanto, que um maciço geologicamente com variação expressiva de rochas (Figura 1) possa incorrer em condições tecnológicas distintas, considerando as utilizações de brita na construção civil e/ou obras de engenharia. Conforme Curtis Neto (2019), alguns materiais da Intrusão de Limeira apresentam diferentes propriedades tecnológicas para o emprego em concretos hidráulicos e de asfalto.

A Pedreira “B” é caracterizada por um basalto (BAS) de borda, 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 e com variação ao núcleo da Intrusão, 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, como na pedreira ao lado (Figura 1). No entanto, foram observados que os monzodioritos possuem granulometrias diferentes ( $MON_M$  e  $MON_C$ ). A ilustração e a descrição petrográfica dos litotipos estudados estão dispostos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Rochas amostradas em campo para realização dos ensaios.

Basalto (BAS)	Diabásio (DIA)	Monzodiorito ( $MON_M$ )	Monzodiorito ( $MON_C$ ):
			
Borda de resfriamento: menor que 2 a 3 m. de espessura;	Borda de transição: menor que 30 m. de espessura	corpo central com espessura em torno de 60 metros	Corpo central com espessura em torno de 60 metros
Textura afanítica e granulação muito fina (< 1mm)	Textura fanerítica e granulação fina a média (< 1 a 2 mm)	Textura fanerítica e granulação média (1 a 5 mm)	Textura fanerítica e granulação média a grossa (3 a 6mm)

## 2.2 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 cilíndricos.

Foram realizados um total de 121 ensaios, alguns deles necessários à previsão de rupturas rápidas, principalmente as menores de 10 e 20 segundos. A taxa de carregamento 0,2 kN/s sugerida pela ISRM (1978), foi empregada em cinco ensaios para cada material rochoso para determinação da resistência a tração segundo procedimentos normativos. Os demais ensaios foram executados com rupturas rápidas, com duração de

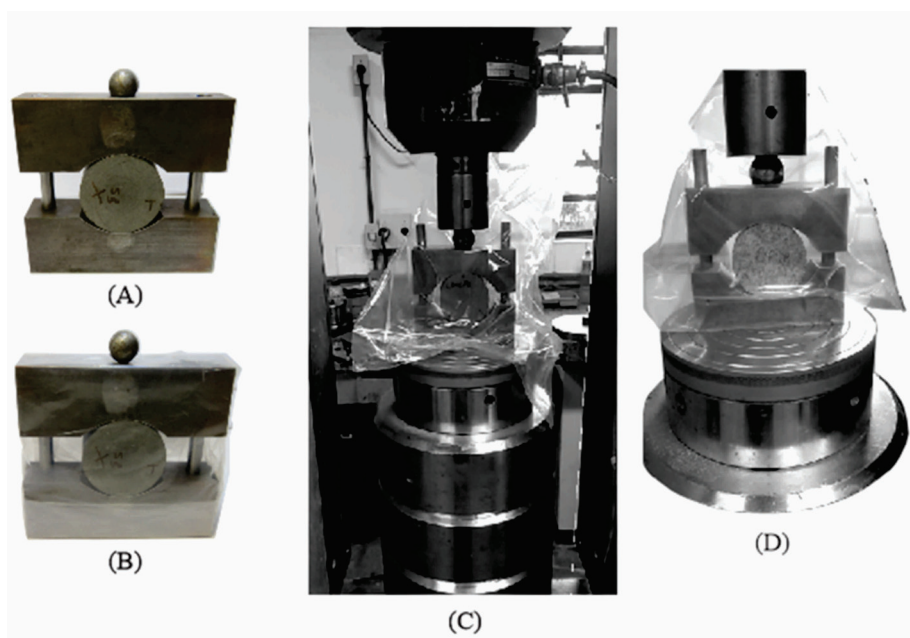
até 20 segundos, sendo as taxas de carregamentos previamente testadas e ajustadas em corpos de prova pilotos: taxas de 7 kN/e 3,5 kN/S para os materiais BAS e DIA, respectivamente; para os materiais do núcleo do corpo intrusivo ( $MON_M$  e  $MON_C$ ) as taxas são de 5kN/s e 2,5 kN/s.

Embalagens plásticas envolvendo todo o aparato do ensaio brasileiro foram adaptadas para viabilizar a coleta dos fragmentos gerados nas rupturas para posterior peneiramento (Figura 2). Para a quantificação dos finos foram utilizadas as peneiras de diâmetro equivalente a 1,0 (n° 18) e 4,75 mm (n° 4) (Figura 2E). Por meio da pesagem dos fragmentos retidos nas peneiras calculou-se o índice de perda de massa (P), equação 1, que quantifica a porcentagem de material passante de uma peneira.

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

Onde: P = valor de perda de massa (%) nas peneiras n° 4 ( $P_{4,75 \text{ mm}}$ ) ou n° 18 ( $P_{1,00 \text{ mm}}$ );  $M_i$  = Massa inicial (g) do corpo de prova;  $M_f$  = Massa final (g) retida nas peneiras n° 4 ou n° 18.

A execução do ensaio brasileiro foi acompanhada por uma câmera de *smartphone*, para documentar a propagação das fraturas e a geração dos finos.



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

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados médios de resistência à tração apresentados na Tabela 3 foram correlacionados com as taxas de carregamento na Figura 3, sendo obtido o valor de  $R^2 = 0,65$  por meio de uma equação exponencial. Isto representa o aumento

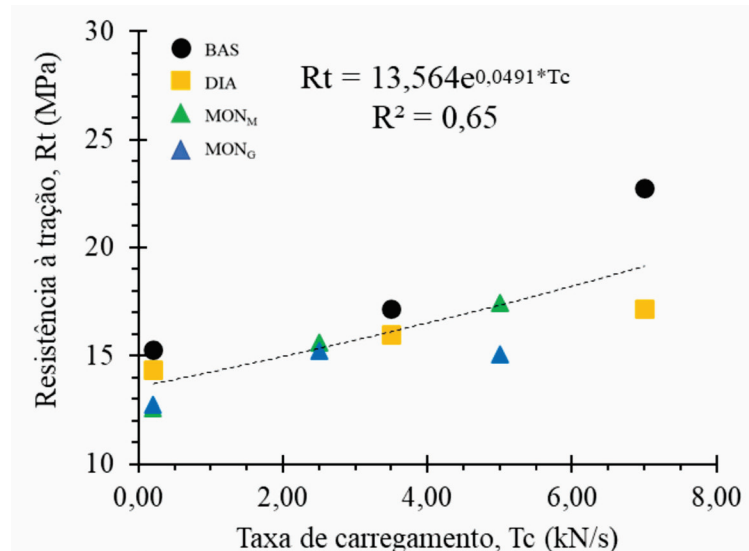
de resistência com maiores taxas de carregamento, ou seja, o comportamento dependente das taxas de carregamento ou do tempo (ZHANG, 2016; AYDAN, 2017), efeito este também notado em ensaios de compressão uniaxial (GREEN & PERKINS, 1970) e de tração indireta (NEWMAN & BENNET, 1990).

**Tabela 3.** Resultados do ensaio brasileiro segundo a norma e as modificações.

Rocha	Taxa de Carregamento (kN/s)	Tempo de ruptura (s)	Número de amostras	Resistência à tração, Rt (MPa)			
				Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
A - Ensaio usual, conforme ISRM (1978)							
BAS	0,2	~120s	5	15,3	17,7	13,5	1,59
DIA			5	14,4	16,6	11,1	1,94
MON <sub>M</sub>			5	12,6	13,5	11,1	0,84
MON <sub>G</sub>			5	12,7	13,6	11,7	0,64
B - Ensaio acelerado, modificado							
BAS	3,5	até 20	10	17,2	20,5	9,7	3,79
	7,0	até 10	10	22,8	28,6	17,4	3,32
DIA	3,5	até 20	10	16,0	17,5	14,5	0,88
	7,0	até 10	10	17,2	18,1	16,5	0,51
MON <sub>M</sub>	2,5	até 20	10	15,6	18,3	13,5	1,58
	5,0	até 10	11	17,5	20,8	14,9	1,55
MON <sub>G</sub>	2,5	até 20	10	15,2	18,0	12,8	1,47
	5,0	até 10	10	15,0	17,6	13,7	1,40

Na taxa da norma (0,2 kN/s), a variação da resistência entre o BAS e o MON<sub>G</sub> pode chegar a 3 Mpa, provocada basicamente pela granulação dos minerais formadores dos litotipos, característica mineral intimamente relacionada à cristalização fracionada do corpo geológico (Figura 1 e Tabela 2). Além disso, a pronunciada dispersão de

resultados do BAS tanto em baixas como altas taxas de carregamento se deve basicamente a veios milimétricos de calcita cortando o litotipo, conforme relatado em análises petrográficas de basaltos da Intrusão de Limeira, realizadas por Santos (2015) e Santos (2018).



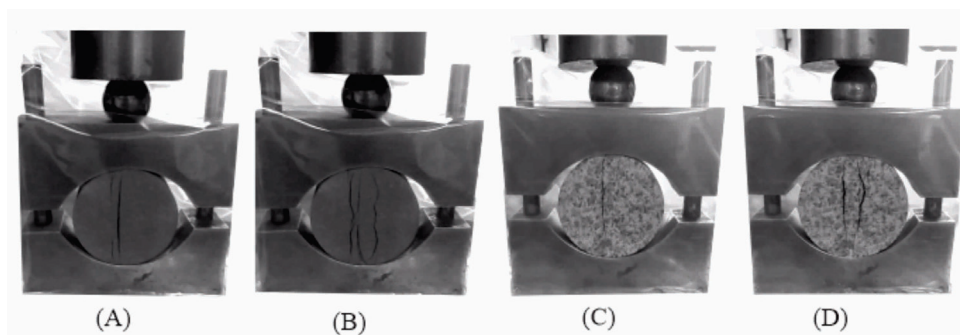
**Figura 3.** Relação entre a resistência à tração média dos litotipos e a taxa de carregamento do ensaio brasileiro.

A reprodução dos vídeos em câmera lenta mostrou que uma pequena fratura se forma no centro do corpo de prova (CP) tanto no ensaio normal como no modificado. Entretanto, em taxas maiores, diversas fraturas foram propagadas no instante inicial de ruptura com maior produção de finos. Além disso, notou-se que quando acionado o comando de parar o carregamento da prensa, o atuador de carga, por inércia, continua carregando o CP e produzindo mais fraturas e fragmentos que o ensaio normal (Figura 4).

Em taxas de 7 a 5 kN/s, rupturas em menos de 10 segundos, o BAS apresentou maior de ganho de resistência e maior produção de finos nas peneiras n° 4 e 18 do que os outros litotipos (Figura 5A). Há uma tendência de correlação entre os valores do índice P para a peneira n° 4 e os valores de resistência, conforme o coeficiente de correlação  $R^2$  igual a 0,56, indicando a melhor correlação. As curvas mais bem ajustadas foram as obtidas por equações exponenciais (Figura 5A), indicando que quanto maior a taxa de carregamento, maior é

a quantidade de finos produzida. Por outro lado, em taxas de 3,5 e 2,5 kN/s, rupturas em menos de 20 segundos, não foi possível estabelecer uma correlação de forma satisfatória nem diferenciar de forma clara a produção de finos entre os litotipos, mas percebe-se uma tendência similar dos resultados, maior resistência maior produção de fragmentos menores que 4,75 mm (Figura 5B).

Notou-se também que o  $MON_M$  e  $MON_G$  produziram maior quantidade de fragmentos menores que 1 mm do que o BAS e o DIA (Figura 5B). Esse aspecto pode estar relacionado à granulação dos minerais formadores dos litotipos. Curtis Neto (2019) obteve resultados de resistência a compressão uniaxial do BAS de 277,33 MPa em comparação ao  $MON_G$  com 197,79 MPa. Portanto, o aumento da granulação do BAS ao  $MON_G$  pode ser responsável pela maior produção de finos, devido ao aumento do número de fissuras e defeitos cristalinos dos minerais plagioclásios e piroxênios, concordando com as análises petrográficas de Curtis Neto (2019).

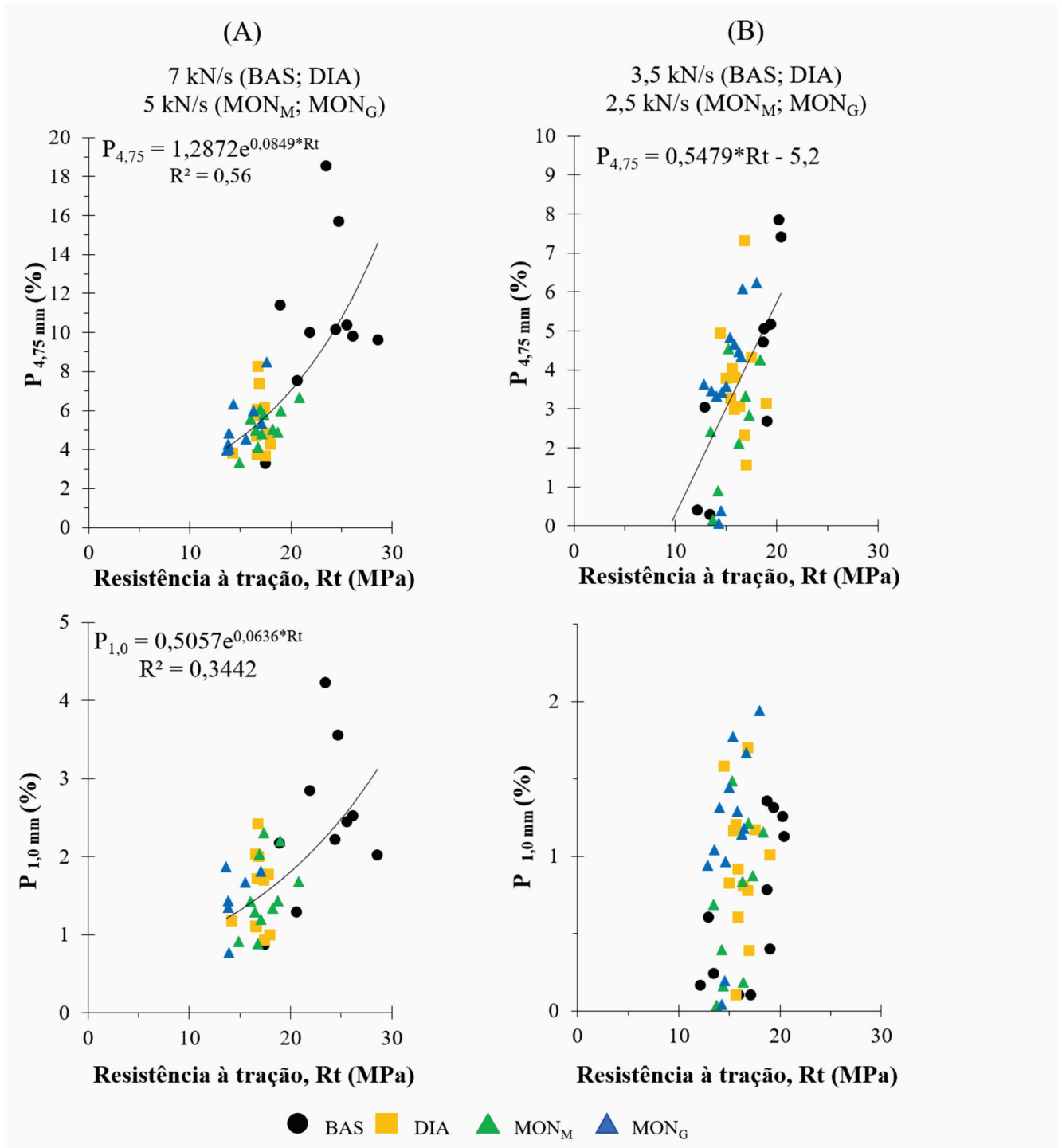


**Figura 4.** Propagação da fratura e produção de fragmentos em ensaio diametral. (A) Fratura propagada no instante inicial de ruptura e (B) Fraturas secundárias (BAS); (C) Primeira fratura propagada no centro do CP e (D) Fraturas secundárias ( $MON_G$ ).

A produção de finos provenientes da ruptura do CP durante o ensaio brasileiro dependeu da taxa de carregamento empregada. De modo geral, em taxas mais altas, 5 a 7 kN/s, em comparação a mais baixas, 2,5 a 3,5 kN/s, houve maior produção de materiais passantes nas peneiras n° 4

(4,75 mm) e n° 18 (1 mm) (Figura 6). Esses resultados estão de acordo aos apontados por Bohloli (2001) e Bohloli & Hoven (2007), onde rochas mais resistentes apresentam maior geração de fragmentos em ensaios de tração, quando carregadas com altas taxas.





**Figura 5.** Relação entre o índice P e a resistência à tração em taxas de carregamento de 7 e 5 kN/s (A), rupturas em até 10 segundos, e de 3,5 e 2,5 kN/s (B), rupturas em até 20 segundos.

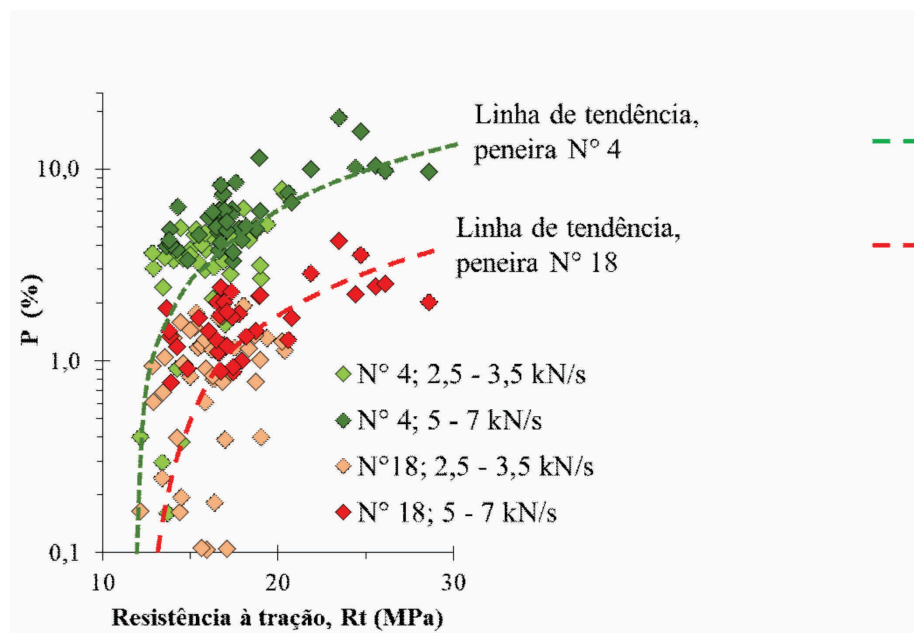


Figura 6. Relação entre o índice P e a resistência à tração de todos os litotipos.

#### 4 CONCLUSÕES

Os valores de resistência à tração de rochas presentes em pedreira correlacionável à Intrusão de Limeira são sensivelmente afetados por suas características mineralógicas e texturais, notadamente as variações da granulação. O aumento da granulação deste corpo geológico é relacionado a processos de cristalização fracionada, que promoveram a diferenciação litológica conforme Figura 1 e Tabela 2. O BAS, rocha afanítica de granulação muito fina apresentou resistência de 15,3 MPa enquanto o  $MON_G$  teve resultado de 12,7 MPa, ambos valores médios para os ensaios brasileiros usuais, conforme Tabela 3. Em rupturas rápidas de até 10 segundos, o efeito da granulação aumenta diferenciando os valores de resistência das rochas. A diferença que era de 2,6 MPa passou a ser 7,8 MPa, portanto havendo dependência entre as propriedades mineralógicas, taxas de carregamento e resultados de resistência.

A análise dos dados permitiu indicar correlações, entre os valores de finos e resistência à tração, principalmente nas rupturas rápidas, em menos de 10 segundos (Figura 5A). Para os outros casos, de rupturas em menos de 20 segundos, as correlações não foram tão conclusivas (Figura 5B), situações estas já reportadas por Bohlioli & Hoven

(2007) sobre a configuração do ensaio acelerado. Quanto maiores as taxas de carregamento, maior a produção de finos, pois maiores são as taxas de ruptura, havendo assim um maior carregamento pós ruptura (Figura 6).

De modo geral, os dados deste trabalho poderão contribuir com estudos sobre a produção de finos nas etapas de britagens, onde ganham destaque as propriedades da rocha intacta (McNALLY, 1998; FRAZÃO, 2002; BOHLOLI & HOVEN, 2007). Nesta perspectiva, estudos laboratoriais em rocha intacta devem ser realizados em situações mais próximas a carregamentos dinâmicos, portanto com variações nas taxas de carregamento a depender das características mineralógicas dos materiais. Adaptações dos ensaios convencionais configuram alternativas na obtenção de dados mais bem correlacionados e ajustados com aspectos do beneficiamento e de variações geológicas do maciço rochoso, completando assim outra etapa de pesquisa de maior detalhe em termos de levantamentos de campo.

#### 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

- Almeida A.S. 2003. Métodos de Mineração. In: L.C. Tanno & A. Sintoni (Coords.) *Mineração & município: bases para planejamento e gestão dos recursos minerais*. Publicação IPT, São Paulo, 194 pp.
- Askeland, D.R., Fulay P.P. 2009. *Essentials of Materials Science & Engineering*. Cengage Learning, Boston, 624 pp.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. 2015. NBR 9935: Agregados- Terminologia. ABNT, Rio de Janeiro, 12 pp.
- Aydan Ö. 2017. *Time-Dependency in Rock Mechanics and Rock Engineering*. CRC Press, London, 260 pp.
- Bohlooli B., Gustafson G., Ronge B. 2001. A laboratory study on reducing the quantity of rock fines at failure: application to rock blasting and crushing. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 60(4): 271-276.
- Bohlooli B., Hoven E. 2007. A laboratory and full-scale study on the fragmentation behavior of rocks. *Eng. Geol.*, 89(1-2): 1-8.
- Chaves A.P. & Peres A.E.C. 2009. *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios Britagem, Peneiramento e Moagem*. Signus Editora, São Paulo, 260 pp.
- Curtis Neto J.A. 2019. *Estudos tecnológicos de rochas da intrusão de Limeira, visando aplicação como agregados em obras de engenharia*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 167p.
- Faria C.A. 2008. *Evolução magmática do Sill de Limeira: petrografia e geoquímica*. 2008. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 145 p.
- Frazão E.B. 2002. *Tecnologia de Rochas na Construção Civil*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, 131 pp.
- Francklin Júnior I., Ribeiro R.P., Da Silva M.H., Aureliano F.S., Costa A.A.F., Garcia V.L.G. 2019. Study of reactive powder concrete using quartzite tailings from the state of Minas Gerais- Brazil. *Procedia Manuf*, 38: 1758-1765.
- International Society of Rock Mechanics. 1978. Suggested Method for Determining Tensile Strength of Rock Materials. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 15(3): 99-103.
- Kanchibotla S.S. 2003. Optimum Blasting? Is it Minimum Cost Per Broken Rock or Maximum Value Per Broken Rock? *Int J Blast Frag*, 7(1): 35-48.
- 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). *Braz J Geol*, 48(2): 305-315.
- 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. *Geociências*, 24(1): 5-17.
- McNally G. 1998. *Soil and Rock Construction Materials*. New Fetter Lane, London, 403 pp.
- Mehta P.K. & Monteiro P.J.M. 2008. *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ibracon, 674p.
- Newman D.A., Bennett D.G. 1990. The effect of specimen size and stress rate for the Brazilian test—A statistical analysis. *Rock. Mech. Rock. Eng.*, (23) 123-134.
- Oliveira A. & Monticeli J. (Eds.) 2018. *Geologia de engenharia e ambiental*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, 479 pp.
- Perkins R.D., Green S.J. 1970. Uniaxial stress behaviour of porphyritic tonalite at strain rates

to  $10^3\text{s}^{-1}$ . *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, (7):527-35.

Perrotta M.M., Salvador E.D., Lopes R.C., D'Agostino L.Z., Chierigati L.A., Peruffo N., Gomes S.D., Sachs L.L.B., Meira V.T., Garcia M.G.M., Lacerda Filho J.V. 2006. Geologia e recursos minerais do estado de São Paulo: Sistema de Informações Geográficas - SIG. CPRM, Rio de Janeiro, 195 pp.

Reis F.M.D., Ribeiro R.P., Reis M.J. 2020. Physical-mechanical properties of soil-cement bricks with the addition of the fine fraction from the quartzite mining tailings (State of Minas Gerais - Brazil). *Bull Eng. Geol. Env. Publish Online*. 10p.

Santos L.M.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, Universidade de São Paulo. 66p.

Santos L.M.A. 2018. Geometry and stratigraphy of the Limeira tholeiitic intrusion, Paraná; magmatic province (SP-Brazil). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 94p.

Zhang Z. 2016. Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications. Elsevier, New York, 528 pp.