

Comparação Estatística entre Ensaios Mecânicos de Agregados Pétreos

João Antonio Curtis Neto

Escola de Engenharia de São Carlos EESC (USP), São Carlos, Brasil, geol.joaocurtis@gmail.com

Rogério Pinto Ribeiro

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC (USP), São Carlos, Brasil, rogerioprx@sc.usp.br

Denis Bertazzo Watashi

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC (USP), São Carlos, Brasil, denisbw@gmail.com

Antenor Braga Paraguassú

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC (USP), São Carlos, Brasil, nonus@sc.usp.br

Rony Souza dos Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC (USP), São Carlos, Brasil, rony.geologist@gmail.com

Gustavo de Castro Xavier

Universidade Estadual Norte Fluminense – UENF, Campos de Goytacazes, gxavier@uenf.br

RESUMO: O emprego de agregados rochosos na construção civil requer adequada caracterização tecnológica feita por ensaios laboratoriais, dentre eles os de resistência à abrasão Los Angeles e de desgaste Micro-Deval, que permitem o processamento de amostras na mesma faixa granulométrica. Isto possibilita estabelecer correlações relevantes, como as que foram feitas na presente pesquisa, por meio de estudo paramétrico, a partir da técnica de planejamento fatorial de experimentos em basalto, diabásio e monzodioritos da Formação Serra Geral, explotados em pedreiras no município de Limeira-SP. Para a aplicação do método estatístico foi selecionada como variável dependente a perda de massa e como variáveis independentes, o tipo de ensaio e o tamanho dos agregados. Os resultados obtidos indicaram que os dois fatores mais influentes na perda de massa são o tipo de ensaio e as características mineralógicas e texturais das rochas.

PALAVRAS-CHAVE: Agregados, Ensaios Mecânicos, Faixas Granulométricas, Estudo Paramétrico, Planejamento Fatorial.

1 INTRODUÇÃO

O setor de construção civil demanda muitos materiais, dentre eles os agregados que são empregados em diversos tipos de obras, sendo seu principal destino, cerca de 65 a 80%, para uso em concretos de cimentos *portland* (ANEPAC, 2016). As caracterizações tecnológicas de agregados na construção civil são essenciais para a correta aplicação e constituem as ferramentas que possibilitam o

seu controle e seleção. De acordo com Valverde (2016), para o futuro da indústria mineral de agregados, são esperadas ofertas diversificadas e customizadas de produtos. Sendo assim é presumível que os aspectos tecnológicos destes materiais tornam-se ainda mais relevantes, implicando em maior precisão dos métodos laboratoriais na busca e diferenciação da qualidade das rochas para produção de agregados.

O ensaio mais empregado no Brasil é o de

Abrasão Los Angeles normatizado pela ABNT, entretanto em termos mundiais o mais difundido é o de Desgaste Micro-Deval, utilizado em vários países, principalmente na Europa e América do Norte (EUA e Canadá). Para este ensaio existem normas do CEN (European Committee for Standardization) e da ASTM (American Society for Testing and Materials). O reconhecimento por vários autores de que o ensaio de desgaste Micro-Deval para agregados é relevante, se baseando principalmente nos estudos de casos em que foi aplicado, no desempenho dos agregados em obras de engenharia e das solicitações impostas durante a realização do ensaio.

Os procedimentos laboratoriais destes dois ensaios são semelhantes, pois em ambos as amostras de britas são desgastadas e fragmentadas por meio de um cilindro em rotação definida e com carga abrasiva (esferas metálicas). Além disto, há a possibilidade da realização dos ensaios com faixas granulométricas muito próximas. No que diz respeito às principais diferenças entre os dois tipos de ensaios tem-se: tamanho de cilindros, saturação prévia em água, presença de água, carga abrasiva, número e intensidade de rotações e massa das amostras. Portanto, pode haver interferências nos resultados destes ensaios quando comparados entre si, mesmo que realizados nos mesmos materiais.

Levando em conta estas constatações o presente trabalho tem como objetivo principal investigar as influências sobre as perdas de massas e suas relações com: o tipo de ensaio, as diferentes faixas granulométricas e os diferentes materiais rochosos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e Amostragem

A unidade geológica estudada é uma intrusão pertencente a Formação Serra Geral, as rochas encaixantes são arenitos do Grupo Itararé, Bacia do Paraná. Geograficamente este corpo situa-se em Limeira (135 km a nordeste da capital paulista), onde duas pedreiras exploram rochas para produção de britas. Segundo Faria (2008) os processos geológicos de cristalização

fracionada foram responsáveis pela variada composição petrográfica, sendo possível encontrar basaltos, diabásios, monzodioritos, quartzo-monzodioritos e veios de riolitos. De acordo com Machado et al. (2005) as rochas da intrusão de Limeira são as mais diferenciadas de outras intrusões da Formação Serra Geral. Santos (2015) destaca que variações texturais e estruturais da borda ao centro indicam que este corpo geológico trataria-se de um lacólito (Figura 1).

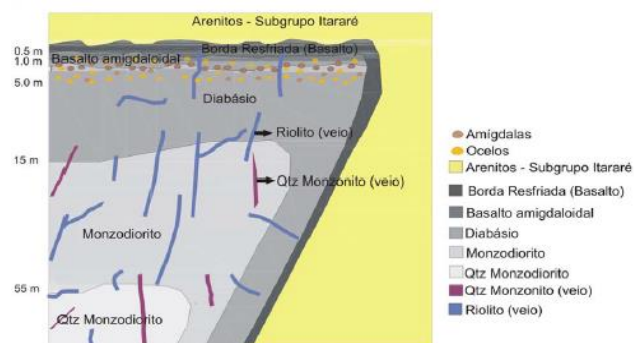




Figura 1. Perfil geológico típico da intrusão de Limeira (FARIA, 2008).

Levando em consideração a variada composição petrográfica apresentada por esse do corpo ígneo “lacólito”, a amostragem foi realizada dentro da cava a céu aberto, retirando blocos representativos das unidades: basaltos, diabásios e de dois tipos de monzodioritos com diferentes texturas. Todo material foi transportado ao laboratório para britagem, peneiramento e separação das frações de cada unidade, para realização dos ensaios obtendo-se, portanto, agregados representativos de cada litologia amostrada (Tabela 1).

2.2 Ensaios Mecânicos em Agregados

O ensaio de abrasão Los Angeles, de uso consagrado no Brasil em agregados para pavimentos asfálticos, NBR NM 51 (ABNT, 2001) é realizado em um recipiente cilíndrico giratório, onde é introduzida a amostra junto com uma carga abrasiva composta de esferas metálicas (Figura 2). Após o carregamento do recipiente, é acionado o motor a ele acoplado, de modo que o tambor entre em revolução, até atingir o número estipulado pela referida norma.

Tabela 1. Materiais rochosos utilizados

Amostra	Rocha	Sigla
	Basalto, Maciço, Afanítico, Granulação muito fina (< 1 mm)	BAS
	Diabásio, Maciço, Fanerítico, Granulação Fina a média (0,5 a 5 mm)	DIA
	Monzodiorito, Maciço, Fanerítico, Granulação Média a Grossa (1 a 5 mm)	MON _M
	Monzodiorito, Maciço, Fanerítico, Granulação Grossa (3 a 5 mm)	MON _G

As solicitações neste procedimento laboratorial são de atrito com as paredes do equipamento as esferas de aço e entre os fragmentos rochosos. Também é promovido impacto pela queda das esferas e fragmentos sobre a massa total da amostra (FRAZÃO, 2007).



Figura 2. (A) Equipamento do ensaio de Abrasão Los Angeles; (B) Bandeja com a carga abrasiva (esferas de

aço com diâmetro de 48mm) e agregado submetido ao ensaio. Departamento de Engenharia de Transportes (EESC/USP).

Este ensaio conta com a possibilidade de trabalhar com diversas granulometrias, caracterizando desde agregados miúdos até agregados graúdos utilizados em lastros ferroviários. Naslund (2014) comenta que este método é um bom indicador da qualidade mecânica de agregados, entretanto não há boas correlações com o desempenho prático de campo no caso de aplicações para lastros ferroviários

Por outro lado, o ensaio Micro-Deval é um método avaliativo de melhor precisão em comparação aos outros ensaios para caracterização mecânica dos agregados. Sua normatização foi desenvolvida na década de 1960 na França. Trata-se de um ensaio de desgaste simples e rápido, utilizando um aparato de menor tamanho comparado a outros testes laboratoriais (LIU *et al.*, 2012). Neste caso além da utilização de um cilindro giratório com amostras e cargas abrasivas, o diferencial é a presença de água, bem como a saturação das amostras efetuada antes do início do ensaio (Figura 3).



Figura 3. (A) Equipamento do ensaio de desgaste Micro-Deval: motor de acionamento (esquerda) e cilindro (direita); (B) Cilindro e a carga abrasiva (esferas com diâmetro de 9,5mm) utilizada no ensaio. Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF-Campos dos Goytacazes/RJ.

Esse contato com a água representa com maior precisão às condições reais de campo, se comparado ao ensaio de abrasão Los Angeles que é processado em condição seca (ROGERS, 1998). Lang et al. (2007) realizaram estudos com mais de cem tipos de agregados para pavimentos rodoviários, onde foram empregados os ensaios Micro-Deval e de Sanidade a Sulfatos e concluíram que o Micro-Deval é melhor para classificação de agregados com boa ou má performance.

Quanto a influência de características geológicas nos resultados destes ensaios, destacam-se os parâmetros petrográficos. Nagalli et al. (2016) pesquisaram basaltos da Formação Serra Geral do do Estado do Paraná e obtiveram boas correlações entre a granulção e os resultados obtidos nos ensaios de abrasão Los Angeles. Os basaltos de texturas mais finas apresentavam melhor resistência, ou seja, menores perdas de massa. Entretanto Nalsund & Jense (2013) ao investigarem rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, com diversos tamanhos de grãos e cristais, não constataram correlações com resultados de abrasão Los Angeles. Isto se deve, principalmente, às diversas variáveis impostas pela natureza das rochas.

A realização do desgaste Micro-Deval pode ser feita pela norma norte americana D6928 (ASTM, 2017), que conta com a possibilidade de ensaiar em diferentes granulometrias, menores de 19 mm. Portanto tem principalmente aplicação para agregados em concretos e obras rodoviárias. Já a normalização europeia EN 1097 (DIN, 2011) apresenta anexo um equipamento Micro-Deval, com cilindro de maiores dimensões e possibilidade de testar agregados em faixas de lastros ferroviários. As Tabelas 2 e 3, mostram as principais diferenças nos procedimentos de ensaios aqui descritos.

Ambos os ensaios apresentam procedimentos semelhantes, partindo da preparação de amostras, sendo realizada por separação granulométrica, lavagem e secagem de britas. Após o desgaste feito via cilindro rotatório, os valores são calculados por meio de perdas de massa, como descrito nas equações 1 e 2. Como já citado por alguns autores, o método de

desgaste Micro-Deval utiliza de água, sendo que as amostras devem ser saturadas duas horas antes do início do ensaio.

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

Onde: MD_E = índice de desgaste Micro-Deval (%); M_i = massa inicial ao ensaio (g); M_f = massa final ao ensaio, material retido na peneira de abertura 1,19 mm (g)

$$ALA = \left(\frac{M_i - M_f}{M_f} \right) * 100 \quad (2)$$

Onde: ALA = índice de abrasão Los Angeles (%); M_i = massa inicial ao ensaio (g); M_f = massa final ao ensaio, material retido na peneira de abertura 1,7 mm (g)

Tabela 2. Procedimentos do ensaio de Abrasão Los Angeles, norma NBR NM 51 (ABNT, 2001).

Granulometrias do agregado	B: 19 – 9,5 mm C: 9,5 – 4,76 mm
Graduações	B: <19 mm e >12,5 mm: 2.500 ± 10g; <12,5 mm e >9,5 mm: 2.500 ± 10g C: <9,5 mm e >6,3 mm: 2.500 ± 10g; <6,3 mm e >4,75 mm: 2.500 ± 10g
Porção total de teste (massa)	B: 5000 ± 10g C: 5000 ± 10g
Massa total das esferas	B: 4.584 ± 25g C: 3300 ± 20g
Presença de Água	B; C: Não
Velocidade do tambor	B; C: Entre 30 e 33 rpm
Rotações (tempo)	B; C: 500 (15 minutos)
Retido na peneira para o cálculo	B; C: 1,7 mm

Tabela 3. Procedimentos dos ensaios de desgaste Micro-Deval, norma D6928 (ASTM, 2017)

Granulometrias do agregado	A: 19 – 9,5 mm B: 9,5 – 4,75 mm
Graduações	A: <19,5 mm e >16 mm: 375 g; <16 mm e >12,5 mm: 375 g; <12,5 mm e >9,5 mm: 750 g B: <9,5 mm e >6,3 mm: 750 g; <6,35 mm e >4,76 mm: 750 g.
Porção total de teste (massa)	A: 1.500 ± 5g B: 1.500 ± 5g
Massa total das esferas	A; B: 5000 ± 25g
Presença de Água	A; B: Sim
Velocidade do tambor	A; B: 100 ± 1rpm
Rotações (tempo)	A: 12.000 (2 horas) B: 9.500 (95 minutos)
Retido na peneira para o cálculo	A; B: 1,19 mm

2.3 Planejamento Fatorial de Experimentos

Segundo Montgomery & Runger (2009) um planejamento fatorial é empregado quando todas as variáveis do experimento são relevantes. Desta forma todas as combinações entre os valores desta variáveis devem ser realizadas. Somente assim é possível identificar e avaliar a influência e interação das variáveis.

O planejamento fatorial mais simples de ser executado é quando somente dois fatores em dois níveis são investigados. Neste caso o planejamento fatorial completo deverá conter quatro experimentos, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3. Planejamento fatorial 2² completo

Teste	Parâmetros		Resultado
	A	B	
1	-	-	X_1
2	-	+	X_2
3	+	-	X_3
4	+	+	X_4

O efeito que cada variável tem no resultado X da análise é determinado através da diferença entre as médias dos valores nos níveis alto (+) e baixo (-), conforme as equações a seguir:
Cálculo das médias nos níveis altos (+):

$$A_+ = \frac{X_3 + X_4}{2} \quad (3)$$

$$B_+ = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (4)$$

Cálculo das médias nos níveis baixos (-):

$$A_- = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (5)$$

$$B_- = \frac{X_3 + X_4}{2} \quad (6)$$

Cálculo dos efeitos

$$E_A = A_+ - A_- \quad (7)$$

$$E_B = B_+ - B_- \quad (8)$$

Para a aplicação do método estatístico foi

selecionada como variável dependente a perda de massa, e como variáveis independentes, o tipo de ensaio e o tamanho dos agregados, conforme as tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Planejamento dos ensaios para os quatro materiais

Rochas	Ensaio	Faixa Gran.	
		Pedra 1	Pedrisco
BAS DIA	Abrasão Los Angeles	B	C
MON _M MON _G	Desgaste Micro-Deval	A	B
Variável independente		Variável independente	

Tabela 5. Índices de perdas de massa

Ensaio	Faixas equivalentes	Índices de perda de massa
Abrasão Los Angeles	B; C	ALA _B ; ALA _C
Desgaste Micro-Deval	A; B	MDE _A ; MDE _B
Variável dependente		

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios planejados se encontram na tabela 4. É possível observar uma tendência nos resultados devido o aumento de granulação entre as rochas, uma vez que o basalto e o diabásio são as rochas mais finas e apresentam sempre os menores valores.

Tabela 6. Resultados dos ensaios planejados

Tipo de Rocha	Tipo de Ensaio	Faixa Gr.	Perda de Massa [%]
BAS	ALA (+)	B(+)	11,8
	ALA (+)	C(-)	16,3
	MDE (-)	B(-)	6,85
	MDE (-)	A(+)	4,16
DIA	ALA (+)	B(+)	12,9
	ALA (+)	C(-)	17,3
	MDE (-)	B(-)	7,59
	MDE (-)	A(+)	5,13
MON _M	ALA (+)	B(+)	14,7
	ALA (+)	C(-)	18,8
	MDE (-)	B(-)	9,23
	MDE (-)	A(+)	6,75
MON _G	ALA (+)	B(+)	16,5
	ALA (+)	C(-)	20,1
	MDE (-)	B(-)	8,89
	MDE (-)	A(+)	6,54

São apresentados os gráficos da análise estatística do basalto (BAS) e do diabásio (DIA) nas figuras 4 a 8. Observa-se que os resultados são muito semelhantes, sendo possível ainda notar que o tipo de ensaio é a variável mais influente.

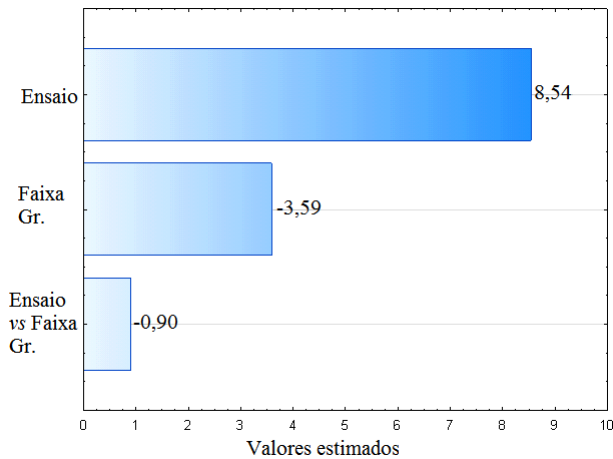


Figura 4. Diagrama de Pareto obtido para o BAS.

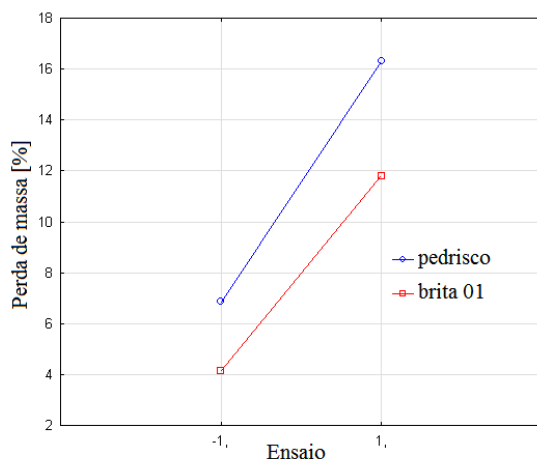


Figura 5. Gráfico de interação dos fatores Ensaio e faixa granulométrica obtidos para o BAS.

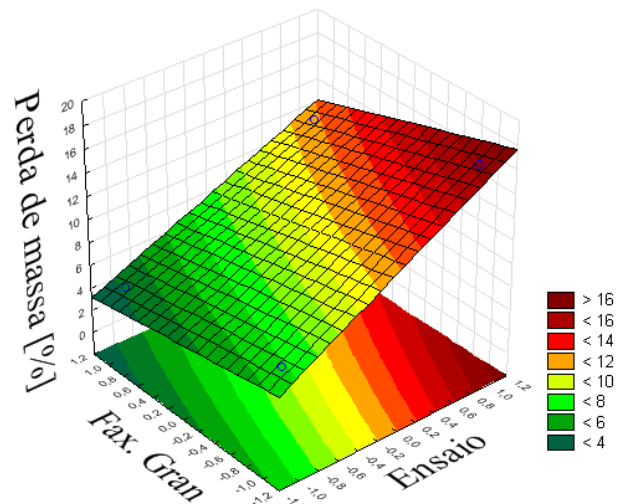


Figura 6. Gráfico tridimensional da superfície dos dados do BAS.

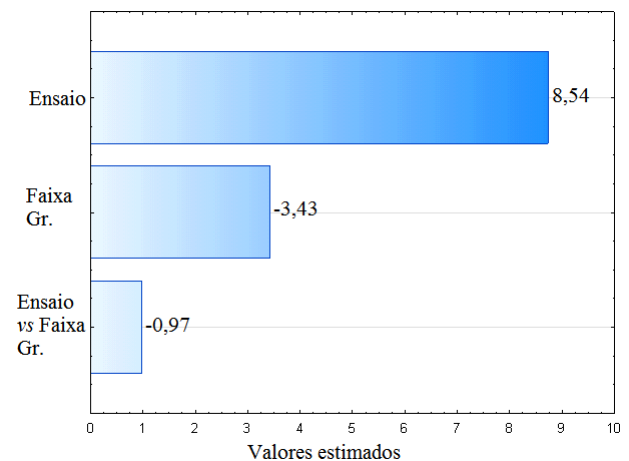


Figura 7. Diagrama de Pareto obtido para o DIA.

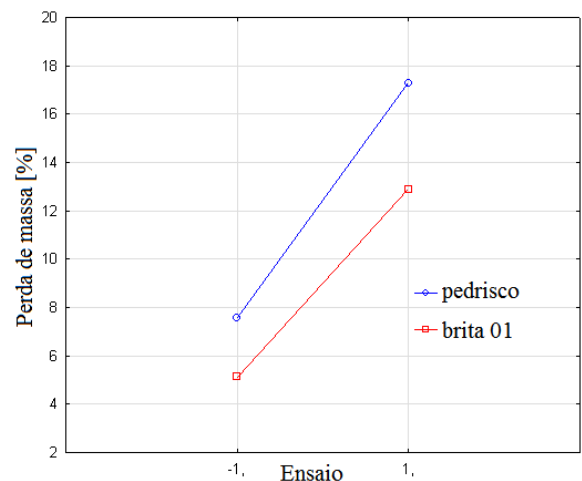


Figura 8. Gráfico de interação dos fatores Ensaio e faixa granulométrica obtidos para o DIA.

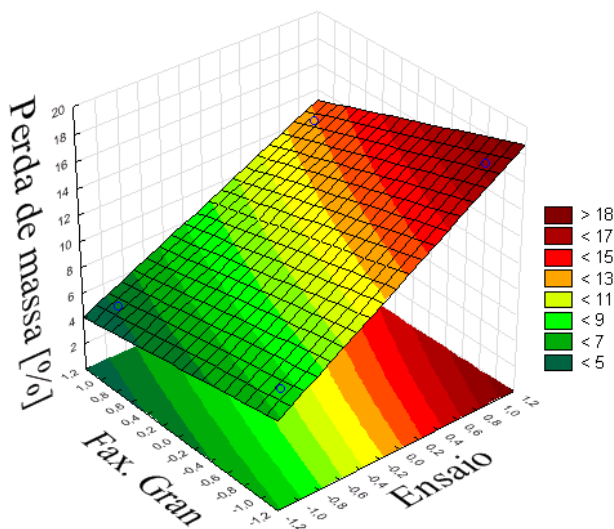


Figura 9. Gráfico tridimensional da superfície dos dados do DIA.

Para os demais, monzodioritos de granulação média (MONM) e grossa (MONG), os resultados estão dispostos nas figuras 9 a 13.

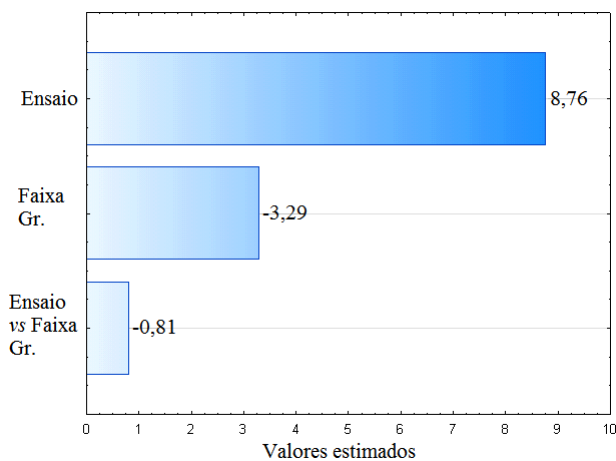


Figura 10. Diagrama de Pareto obtido para o MONM.

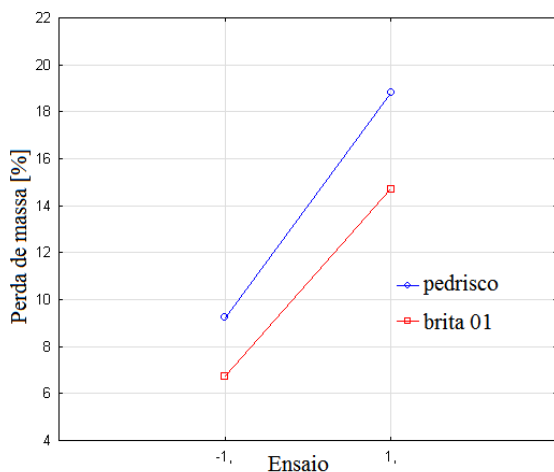


Figura 11. Gráfico de interação dos fatores Ensaio e faixa granulométrica obtidos para o MONM.

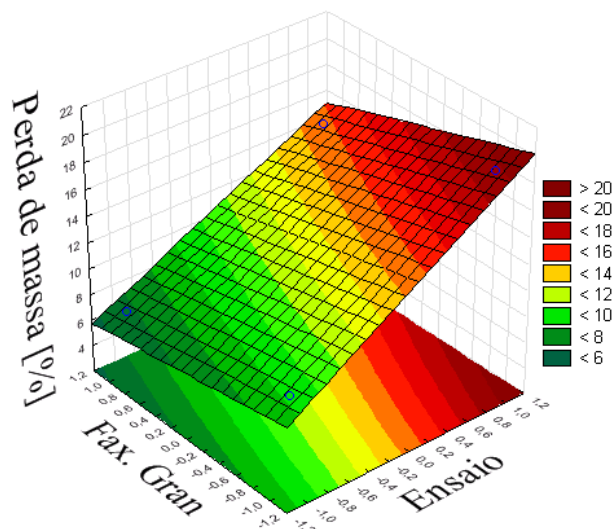


Figura 12. Gráfico tridimensional da superfície dos dados do MONM.

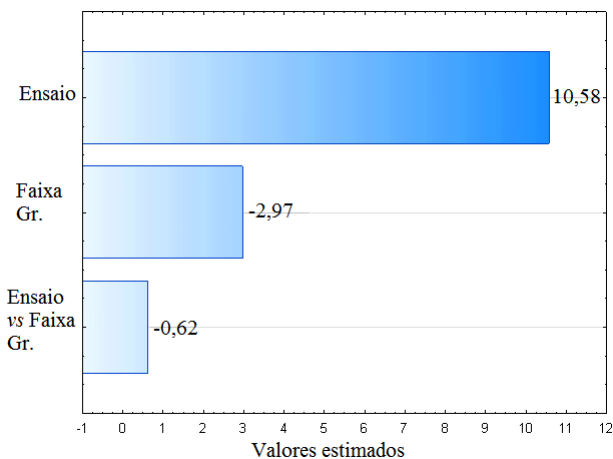


Figura 13. Diagrama de Pareto obtido para o MONG.

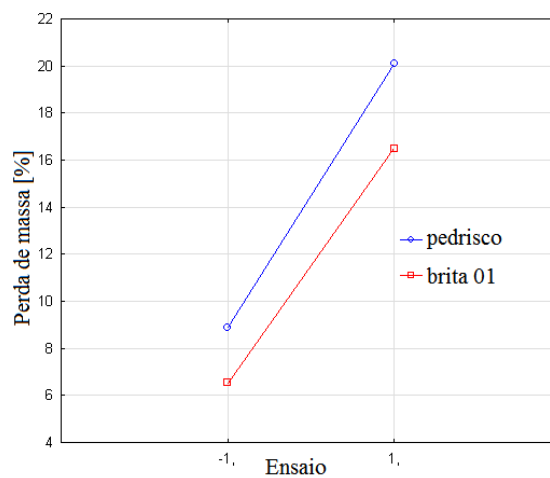


Figura 14. Gráfico de interação dos fatores Ensaio e faixa granulométrica obtidos para o MONG.

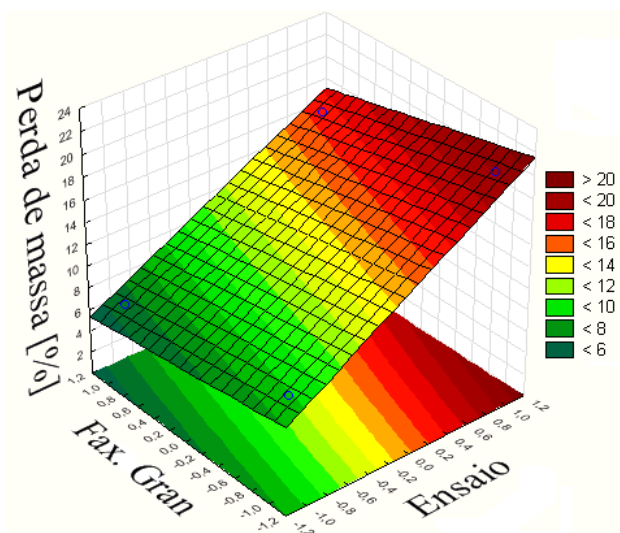


Figura 15. Gráfico tridimensional da superfície dos dados do MONG.

Os diagramas de Pareto das figuras 4, 7, 10 e 13 indicam que o parâmetro mais influente para a perda de massa é o tipo de ensaio. A alteração no ensaio de Abrasão Los Angeles para o Micro-Deval resulta em decréscimos da perda de massa de 8,54%, 8,54%, 8,76% e 10,58% para o basalto, diabásio, monzodiorito de granulção média e de granulção grossa respectivamente.

Os gráficos das figuras 6, 9, 12 e 15 mostram que não há interação entre o ensaio e a faixa granulométrica. Significa dizer que o efeito conjunto destes parâmetros não influencia de forma substancial o resultado da perda de massa.

Observa-se nas figuras 5, 8, 11 e 14 os efeitos principais dos dois fatores tipo de ensaio e faixa granulométrica. As perdas de massa no ensaio de Micro-Deval são sempre inferiores as do abrasão Los Angeles, entretanto a granulometria do pedrisco resulta em maiores perdas de massa.

4 CONCLUSÕES

A metodologia paramétrica de análise baseada no planejamento fatorial permitiu a identificação da importância dos fatores que podem influenciar na perda de massa durante ensaios abrasivos.

Os resultados indicam que o tipo de ensaio altera significativamente o resultado da perda de

massa e, por isso, não devem ser utilizados um em substituição ao outro.

As variações nos valores de perda de massa para os diferentes tipos de rocha são influenciados por características petrográficas, principalmente o tamanho dos cristais. Como já constatado rochas de granulção mais fina são mais resistentes à perda de massa.

Finalmente deve ser ressaltado que pesquisas envolvendo o método estatístico empregado, auxiliarão no planejamento de campanhas experimentais, assim como na identificação de tendências das variáveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR NM 51 (2001) Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles” Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 6p.
- ANEPAC (2016) O mercado de agregados no Brasil. Relatório. Disponível em: http://www.anepac.org.br/agregados/mercado/item/download/69_04062b071b7171f3481b7a0e8f36f5ac
- ASTM D6928-17 (2017) Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 6 p.
- EN 1097-1 (2011) Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 1: Determination of the resistance to wear (Micro-Deval).
- Faria, C.A. (2008) *Evolução magmática do Sill de Limeira: petrografia e geoquímica*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências (Geotectônica), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 145 p.
- Frazão, E.B. (2007) Agregados para construção civil no Brasil. Cap 01. Org: Tannús, M.B., Cardoso, J.C.C.. Contribuições para a formulação de políticas públicas. CETEC.
- Santos, L.M.L.A. (2015) *A intrusão toleítica de Limeira (SP): Contribuições à geologia, petrografia e alteração hidrotermal*, Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 66 p.
- Lang, A., Range, P., Fowler, D., Allen, J. (2007) Prediction of Coarse Aggregate Performance by Micro-Deval and Other Soundness, Strength, and Intrinsic Particle Property. *Tests. Journal of the Transportation Research Board*, Nº 2026, p. 3-8.
- Liu, J., Mullin, A., Rein, J., (2012) Use of the Micro-Deval Test for Assessing Alaska Aggregates. Final Report. Alaska University Transportation Center. 60 p.
- Machado, F.B; Nardy, A.J.R.; Oliveira, M.A.F. (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, Unesp, Rio Claro – SP. Vol. 24. N  1, p 5-17.

Montgomery, D. C., Rungner, G. C. (2009) Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. LTC, 4^a Ed, 464p.

Nalsund, R. (2014) Railway Ballast Characteristics, Selection, Criterion and Performance. PhD Thesis. Faculty of Engineering Science and Technology. Norwegian University. 85 p.

Nalsund, R., Jensen, V. (2013) Influence of mineral grain size, grain size distribution and micro- cracks on rocks' mechanical strength. *14th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*. Copenhagen, Denmark, Vol 1. 12p.

Nagalli, B. ; Vasconcellos, E. M. G. ; Nagalli, A. (2016) Correlation between petrographic and physico-mechanical variables of basalts of the Paraná Magmatic Province. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, EJGE*, Vol. 21, p. 363-374.

Rogers, C. (1998) Canadian Experience with the Micro-Deval Test for Aggregates. *Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation*. Geological Society of London, Engineering Geology Special Publication, London, UK, p. 138-147.

Valverde (2016) Cen rios da minera  o de agregados. Anais do F rum Minera  o de Agregados. Porto Alegre, Brasil, Vol 1. 43 p.