

RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS, FÍSICAS E MECÂNICAS DE AGREGADOS DE ORIGEM METAMÓRFICA PARA UTILIZAÇÃO COMO LASTRO FERROVIÁRIO

André Fardin Rosa¹, Roberto Pasquale da Cruz Trotta² e Laura Maria Goretti da Motta³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Civil, Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Centro de Tecnologia, Rio de Janeiro, Brasil

email: andre.rosa@coc.ufrj.br www.coc.ufrj.br

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Avenida Athos da Silveira Ramos, 274, 21941-590, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil

³Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Civil, Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, Centro de Tecnologia, Rio de Janeiro, Brasil

Sumário

A estrutura mineralógica das rochas é um fator determinante das características morfológicas e propriedades mecânicas do material britado. No entanto, no contexto ferroviário, a maioria das especificações de lastro não fornece parâmetros claros para a análise petrográfica do material destinado à tal finalidade. O presente trabalho relaciona características mineralógicas de 3 materiais distintos de origem metamórfica com a sua morfologia e resistência. Os resultados indicaram, para os materiais estudados, que rochas com cristais mais finos apresentam maior resistência. A diminuição do teor de biotita também resultou em uma maior resistência, bem como a maior angularidade e menor esfericidade das partículas.

Palavras-chave: Lastro; Ferrovia; Petrografia.

1 INTRODUÇÃO

O aumento das cargas por eixo de vagão e a exigência por maiores velocidades fez com que as pesquisas mais recentes no setor ferroviário buscassem por materiais mais duráveis e por um controle de qualidade mais rigoroso. Quando se fala em durabilidade de um pavimento ferroviário, deve-se levar em conta as camadas que o compõe, com estruturas variadas que diferem entre si por várias condições e também pelo custo de construção e manutenção.

Nas vias férreas lastreadas, o lastro é a primeira camada geotécnica a receber as solicitações originadas da passagem dos trens, distribuindo altas tensões em áreas de contato pequenas entre pontos dos agregados. Os esforços transmitidos nestes contatos fazem com que as partículas se reorganizem e eventualmente se quebrem, modificando a geometria da camada de lastro e gerando finos que diminuem a capacidade drenante da mesma. A suscetibilidade do material à quebra está relacionada com as suas propriedades físicas e mecânicas.

Para a seleção do material a ser utilizado como lastro, normalmente são realizados ensaios para verificar a resistência das partículas e sua composição granulométrica. No entanto, atenção especial tem sido dada às características morfológicas das partículas, com tecnologias mais recentes de Processamento Digital de Imagens (PDI), permitindo também avaliar a forma, angularidade e textura das partículas como em [1] e [2]. Essas características, assim como a resistência das rochas, estão relacionadas com a origem do agregado e os processos que o alteraram com o passar dos anos, e podem ser justificadas em uma escala microscópica pela análise criteriosa de lâminas petrográficas.

Apesar da estrutura mineralógica ser fator determinante das outras propriedades do material britado, a maioria das normas não trata claramente de parâmetros que devem ser avaliados ao realizar uma análise petrográfica, e estes parâmetros deveriam ser variáveis dependendo da origem e composição do material analisado. Em uma visão geral, a NBR 5564 [3] apenas cita a petrografia como sendo uma análise importante, sem a descrição do que se deve procurar em tal análise. A EN-13450 [4] cita que alguns minerais devem ser procurados em tais análises por afetarem o comportamento mecânico do material. Por fim, a AREMA [5] define limites de propriedades dos materiais com base na classificação litológica realizada utilizando a petrografia.

Este trabalho tem como objetivo relacionar as propriedades de resistência à abrasão (Ensaio Los Angeles) e resistência à quebra (Impacto Treton) de três agregados originados de regiões diferentes, ambos classificados como gnaiss, com a sua formação e composição mineralógica determinadas pela análise de lâminas petrográficas. Além disso, são comparados os dados com os parâmetros morfológicos dos materiais, obtidos com o uso do Aggregate Image Measurement System (AIMS2).

2 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS

A caracterização de um material para utilização como lastro envolve uma série de ensaios, que podem variar quanto ao tipo e limites adotados, ficando a critério de cada empresa a adoção de uma norma própria, nacional, ou de outro país. Essas variações podem ser atribuídas em parte às variações regionais de materiais, mas também a dificuldade de classificar materiais rochosos quanto ao seu desempenho como lastro, levando ao questionamento de qual metodologia seria a mais adequada.

Para avaliar a resistência das partículas à quebra e ao desgaste, a maioria das normas preconiza a utilização do ensaio de abrasão Los Angeles (L.A). No entanto, outros ensaios como o Micro-Deval e o Impacto Treton também podem ser recomendados, para fornecer parâmetros de resistência do material submetido à carregamentos que geram diferentes mecanismos de quebra, como pode ser observado na Figura 1, por [6].

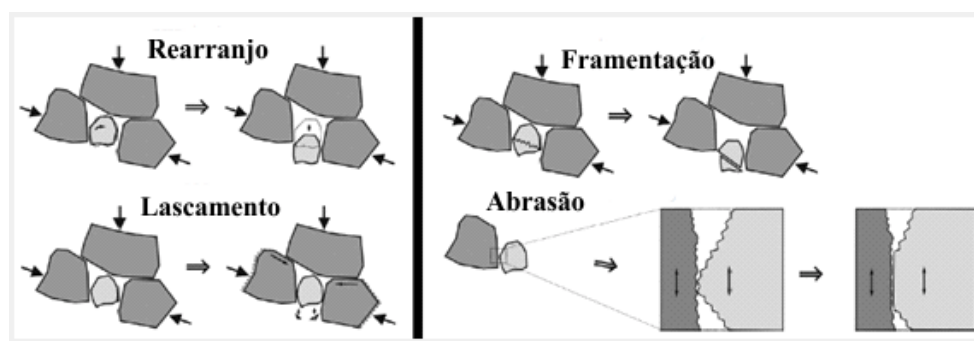


Fig.1. Mecanismos de quebra de partículas (adaptado de [6]).

Em [7] foi observado, em uma análise envolvendo 1062 dados de ensaios de resistência de agregados originados de diferentes locais dos Estados Unidos, que o ensaio Micro-Deval tem a tendência de ser mais conservador que o ensaio L.A. De acordo com o estudo, há uma alta probabilidade de um material que passou no critério do ensaio Micro-Deval passar também no critério do L.A. No entanto, aplicando estes mesmos ensaios a outros lastros ferroviários, [8] também analisou a relação que os resultados de Micro-Deval e L.A têm com o comportamento do material quando submetido à carregamento cíclico. O autor concluiu que o ensaio de Micro-Deval apresenta pouca relação com o comportamento do material, enquanto o L.A consegue separar bem um material de baixo desempenho de um com alto desempenho, não distinguindo bem materiais com comportamento intermediário. No Brasil, a NBR 5564 recomenda a utilização do ensaio de Impacto Treton, além do ensaio L.A. A realização deste ensaio adicional (Treton) tem o objetivo de analisar o material quando submetido a um carregamento de impacto sobre leito de partículas, com um mecanismo de quebra diferente do proposto pelos demais ensaios citados.

Com capacidade de influenciar diretamente no comportamento mecânico do material, como estudado por [8], [9] e [10], as características morfológicas de um material britado são consideradas propriedades de difícil obtenção. A dificuldade na caracterização morfológica está em grande parte na quantificação de propriedades antigamente consideradas subjetivas, como a angularidade e a textura. Uma das maneiras de se contornar as dificuldades citadas é a utilização de técnicas de processamento digital de imagens (PDI), com aquisição de imagens e análise digital,

com *softwares* específicos. Uma das metodologias utilizada no meio acadêmico brasileiro utiliza o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS2), adaptado por [9]. O AIMS2 obtém imagens 2D de agregados, classificando-os quanto à sua forma, angularidade e textura, dividindo estes parâmetros em intervalos calibrados previamente. Para a classificação completa da forma da partícula, o equipamento utiliza a distância de foco de cada partícula para obter a terceira dimensão, retornando relações 3D das dimensões de cada partícula com até 4,75 mm de diâmetro. Apesar da capacidade de atribuir valores às características morfológicas dos agregados, o AIMS2 tem como limitação o tamanho máximo de partícula que pode ser utilizado, que, na versão atual do equipamento é correspondente ao material retido na peneira de 25,4 mm e passante na 37,5 mm, ficando limitada para a maior parte da fração de lastro.

As propriedades microestruturais intrínsecas de um material rochoso governam tanto o comportamento mecânico quanto as suas características morfológicas. Para o entendimento dos termos utilizados para descrever estas propriedades, primeiro é necessário uma breve explicação.

Na mineralogia óptica, um microscópio petrográfico é utilizado para observação dos minerais existentes em uma lâmina de rocha. Este microscópio difere dos microscópios convencionais por possibilitar a rotação da platina e possuir dois filtros polarizadores, chamados de nicóis. A platina rotativa possibilita a observação de características de como a luz atravessa os cristais petrográficos em diferentes direções. Os nicóis, por sua vez, quando inseridos simultaneamente (nicóis cruzados) no caminho entre a fonte de luz e o observador, fazem com que as ondas vibrem em um único plano, levando a observação dos minerais sob a chamada luz polarizada. Por outro lado, quando o filtro denominado “analisador” é retirado do caminho entre a fonte de luz e o observador, os minerais são observados em luz natural (nicóis descruzados).

Ao analisar uma amostra no microscópio, diversas características podem ser observadas, como a cor dos minerais, a existência de padrões ao girar a platina, o contato entre os minerais e a sua forma. Na classificação da forma dos cristais, são classificados como euédricos os minerais com faces bem formadas, subédricos os que apresentam faces imperfeitas e anédricos os minerais que não possuem faces definidas.

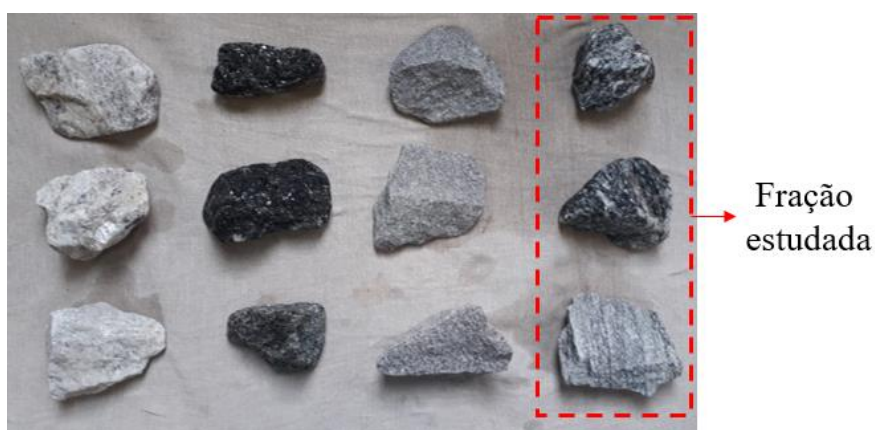
Em [11] foi estudada a quebra de quatro materiais distintos de um ponto de vista da microestrutura, identificando a grande influência do tamanho das partículas e das falhas preexistentes na forma das partículas geradas após a quebra. Os autores evidenciaram também a interferência das falhas iniciais na energia necessária para início e para propagação de fraturas. Em [12] foram listados parâmetros próprios do material que influenciam no comportamento da rocha como um todo, que são apresentados resumidamente a seguir:

- (i) Mineralogia: As propriedades de cada mineral formador da rocha individualmente afeta as propriedades da rocha, tais como a dureza, a resistência e o módulo de elasticidade de cada mineral.
- (ii) Tamanho dos grãos: Há uma tendência de maior resistência para a rocha com grãos minerais menores. A distribuição de tamanhos também é fator importante, de modo que rochas com distribuição de tamanhos menos uniforme apresentam maior resistência.
- (iii) Forma dos grãos e contatos: Minerais com grãos euédricos podem atuar como descontinuidades na estrutura da rocha, onde podem ser iniciadas fissuras. Quanto mais disforme o contato entre os grãos, maior a resistência.
- (iv) Orientação e distribuição espacial: A orientação de minerais como micas em foliações pode servir como plano para fratura da rocha.
- (v) Porosidade e falhas pré-existentes: Fraturas podem ser iniciadas a partir de poros ou de falhas, e a influência destes fatores está relacionada ao tamanho dos vazios existentes na estrutura.

Para quantificar minerais e falhas na microestrutura de uma rocha, normalmente são utilizadas técnicas visuais, aplicadas na observação de lâminas de petrografia utilizando microscópio petrográfico. Este tipo de quantificação é bastante trabalhoso, a depender da complexidade da estrutura analisada, e fica muitas vezes dependente do operador, com uma variação de resultados significativa de pessoa para pessoa. Uma alternativa para quantificação em lâminas petrográficas é a demarcação de pixels utilizando algum software de tratamento de imagens. Em [13] foi apresentada uma metodologia com a utilização do *software* Adobe Photoshop. A metodologia envolve a seleção de áreas em imagens obtidas de lâminas petrográficas, sendo que o *software* facilita a seleção de áreas e a contagem de pixels, mas não dispensa a necessidade de um geólogo para o reconhecimento correto dos minerais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram estudados três materiais de origem metamórfica, coletados em regiões diferentes. O primeiro material (Material 1) foi coletado na cidade de Japeri/RJ, o segundo (Material 2) na região de Queimados/RJ e o terceiro (Material 3) em Juiz de Fora/MG. Rochas típicas dos três materiais podem ser observadas na Figura 2. Ao analisar visualmente os materiais, é possível afirmar a maior heterogeneidade do Material 1 e Material 2, se comparados ao Material 3. O Material 1, composto pelas frações apresentadas na Figura 2, da esquerda para a direita, leucossoma, melanossoma, granitóide e paleossoma, foi separada manualmente, sendo analisada somente a fração do paleossoma no presente trabalho. Já com o Material 2, não foi possível realizar a separação em frações litológicas, uma vez que o material não apresentou partículas de diferentes litotipos, apenas partículas heterogêneas.



(a)



(b)



(c)

Fig.2. Materiais estudados: (a) Material 1; (b) Material 2; (c) Material 3.

Mesmo os três agregados sendo classificados como gnaiss e britados por britador cônico, a diferença visual foi observada logo na coleta deles, com o Material 3 apresentando arestas mais angulosas que os demais e o Material 1 soltando “folhas” de biotita no contato com a mão do operador. Para diferenciar os três materiais foram separadas rochas representativas de cada um deles, escolhido um plano de corte também representativo para cada rocha, definindo seções perpendiculares à foliações. Para o Material 2 foi necessário separar duas rochas para extração de lâminas petrográficas, devido à heterogeneidade do material. Lâminas petrográficas para análise em microscópio foram preparadas, das quais são exemplificados setores na Figura 3, utilizando os nicóis descruzados e cruzados. Com um microscópio petrográfico, os minerais de cada uma das rochas foram identificados, com a caracterização da granulação, formato das faces e contatos entre minerais. Com base nas lâminas são discutidas as características microscópicas que podem levar os materiais a comportamentos distintos.

Após a descrição visual das lâminas, as mesmas foram divididas em setores para fotomicrografia, com imagens de dimensões aproximadas de 7,85 por 5,90 mm para contagem de minerais. O número de setores variou de 15 a 21, dependendo do tamanho da seção da rocha, sendo obtida uma imagem com os nicóis descruzados e uma com eles cruzados para cada setor. As imagens foram utilizadas na quantificação estimada do percentual de minerais félsicos e máficos, com a separação da biotita presente nos máficos. A separação das biotitas foi motivada por ser um

mineral com características mecânicas muito diferente dos demais, a sua dureza é baixa (entre 2,5 e 3,5) e é um mineral de comportamento flexível e elástico.

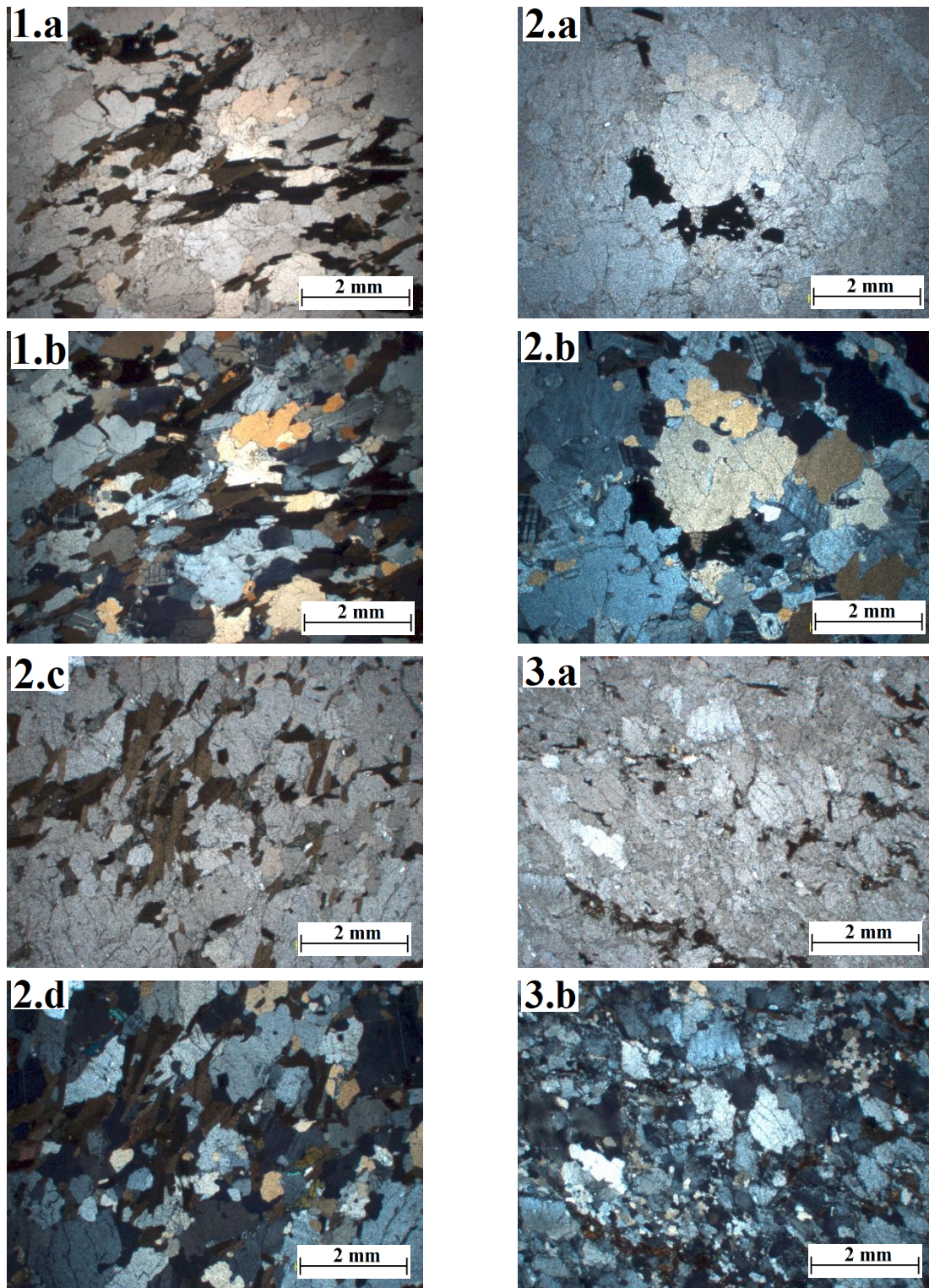


Fig.3. Setores das rochas analisadas: (1.a) Material 1 – Nicóis descruzados; (1.b) Nicóis cruzados; (2.a) Material 2, rocha 1 – Nicóis descruzados; (2.b) Nicóis cruzados; (2.c) Material 2, rocha 2 – Nicóis descruzados; (2.d) Nicóis cruzados; (3.a) Material 3 – Nicóis descruzados; (3.b) Nicóis cruzados.

A estimativa da área representativa de cada mineral na lâmina foi realizada com a demarcação de áreas nas fotomicrografias, utilizando o software de tratamento de imagens ImageJ [14]. Das imagens com nicóis descruzados foi separada a parte máfica, a partir da cor natural dos minerais. Subtraindo a área de máficos da imagem total foi obtida a área de félsicos. Com base na área de máficos foi realizada uma nova análise, utilizando também a imagem com nicóis cruzados, subtraindo anfibólios, piroxênios e demais minerais que não fossem biotita. Após a subtração da área desses minerais, restou somente a área de biotita. Na Figura 4 pode ser observado um exemplo de quantificação de minerais máficos, realizada com o Material 1.

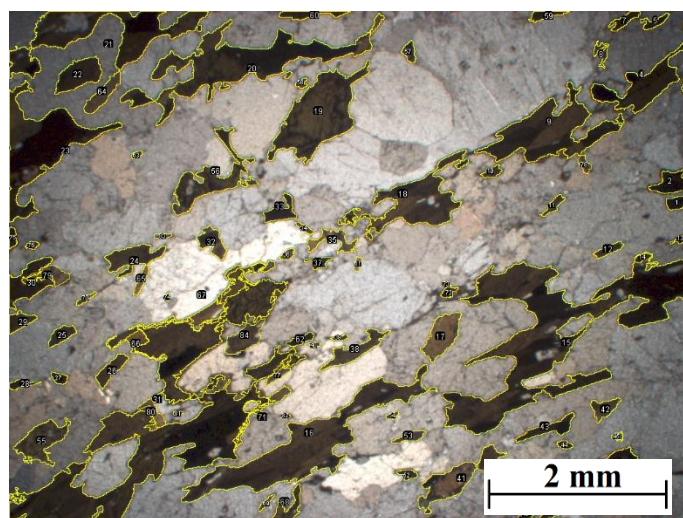


Fig.4. Quantificação de Minerais Máficos no Material 1 desta pesquisa.

Para obter parâmetros de resistência dos materiais estudados, realizou-se os ensaios L.A e Impacto Treton, de acordo com as especificações da NM 51 [15] e NBR 5564. No ensaio L.A foram ensaiadas duas amostras iguais de cada material para representar o tamanho das partículas de lastro ferroviário, enquadrada na Faixa F da norma. Para o ensaio de Impacto Treton foram ensaiadas três amostras iguais de cada material, posicionando um leito de 20 partículas em uma base, aplicando 10 golpes de um peso padronizado lançado a partir de uma altura também padrão. É importante enfatizar que tanto o material utilizado no Treton quanto o analisado no AIMS2 foram produto de uma britagem de laboratório, utilizando o mesmo britador e a mesma granulometria de alimentação para os três materiais.

A análise morfológica foi realizada no AIMS2, equipamento capaz de tirar fotos de alta precisão dos agregados e mensurar suas propriedades de forma, angularidade e textura. No processamento de imagens as fotos são analisadas por um software que dá pesos para as características analisadas, de modo que uma partícula com alta angularidade recebe um peso diferente de angularidade do que uma arredondada, e ainda, de forma que as partículas que estejam entre as duas em termos de angularidade também recebam pesos diferentes, para que não sejam consideradas como iguais. O mesmo acontece nas análises de textura e forma. A limitação do uso deste ensaio é que pode somente ser utilizado para partículas com todas as dimensões menores que 37,5 mm. Neste trabalho, para cada material foram analisadas 100 partículas passantes na peneira de 19 mm e retidas na peneira de 16 mm, a mesma fração utilizada para o ensaio de Impacto Treton.

Definições importantes para a compreensão das propriedades morfológicas analisadas são apresentadas no Operation Manual (Pine Instrument Company, 2011). Para as medidas de angularidade, o *software* utiliza de imagens 2D obtidas e quantifica mudanças ao longo das fronteiras da partícula, pela inclinação de vetores de gradiente. A textura é medida utilizando um método chamado de *wavelet*, que divide uma imagem de alta precisão de cada agregado em mosaicos e quantifica a textura de todas as divisões, calculando a média. Para descrever a forma do agregado é utilizada neste trabalho a esfericidade, que descreve a forma 3D de cada partícula com base nas suas 3 dimensões, determinada pela equação 1.

$$Esfericidade = \sqrt{\frac{dsdi}{dl^2}} \quad (1)$$

Com ds sendo a menor dimensão da partícula, di a dimensão intermediária e dl a maior dimensão.

4 RESULTADOS

Ao observar a lâmina do Material 1 com os nicóis descruzados para separar os minerais máficos dos félsicos, foi identificada a presença de biotita, anfibólio, piroxênio e titanita, ordenados da maior para a menor quantidade presente. A orientação das biotitas é clara, típica de uma rocha metamórfica. A forma dos grãos pode ser classificada como subédrica por causa da biotita, mas anédrica quando são considerados os demais minerais. Os contatos são irregulares. Dos minerais félsicos, observados com o cruzamento dos nicóis, é destacada a presença de plagioclásio (geminção polissintética), quartzo e microclina (geminção tartan).

Do Material 2 foram analisadas duas amostras de rocha, devido à alta heterogeneidade da amostra. Na primeira lâmina foi observada baixa quantidade de minerais máficos, da qual a minoria é biotita. Com os nicóis descruzados foi observada a alta presença de quartzo, os minerais apresentam granulação maior e também há presença tanto de plagioclásios quanto de microclinas. Os minerais da primeira lâmina apresentaram faces bem formadas, com classificação de subédricos e eúdricos e contatos regulares. Na segunda lâmina o Material 2 apresentou alto teor de minerais máficos, em sua maioria biotitas e anfibólios, os contatos predominantemente irregulares, e minerais de forma subédrica e anédrica. Para a segunda lâmina do Material 2, a presença de quartzo é superior à do Material 1, e há também a presença de plagioclásios em quantidade significativa.

No Material 3, a quantidade de minerais máficos foi visivelmente baixa, com a maior presença de anfibólios, piroxênios e epidotos do que biotita. Os minerais são notavelmente menores do que nos outros materiais, com contatos irregulares e forma predominantemente anédrica. Com os nicóis cruzados é possível observar o quartzo recristalizado entre os minerais, além da ondulação nos cristais maiores de quartzo ao girar a platina. O material apresentou estrutura mais complexa do que os demais, com a maior quantidade dos minerais félsicos sendo quartzo, mas também com a presença de feldspatos.

Adicionalmente foram estimados os percentuais de minerais máficos e félsicos, com a separação dos minerais máficos entre biotita e os demais minerais. Nesta quantificação foram considerados todos os setores separados na fotomicrografia, para abranger a maior parte da lâmina petrográfica. O Material 1 apresentou 24,4% de minerais máficos, dos quais 20,6% é biotita. A primeira lâmina do Material 2 resultou em 2,9% de minerais máficos, dos quais aproximadamente 1% é biotita. Já para a segunda lâmina do Material 2, obteve-se 27,2% de minerais máficos, com 20,4% de biotita. Por fim, o Material 3 apresentou 9,8% de máficos, com 5,5% de biotita.

Nos ensaios mecânicos foi possível observar que os três materiais estudados apresentam resistências muito distintas nos dois ensaios escolhidos. Os resultados médios dos ensaios realizados para cada material são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Resultados dos ensaios de resistência à quebra

Material	L.A (%)	Treton (%)
1	42	19
2	26	13
3	17	9

É possível notar, a partir do Quadro 1, que a ordem classificatória da resistência dos materiais se manteve do ensaio L.A para o Treton, indicando similaridade nas propriedades avaliadas pelos dois ensaios. Outra observação importante é a grande variação de resultados encontrados, com propriedades muito distintas para os três agregados de origem metamórfica.

Com base nos resultados da análise petrográfica e de resistência, é possível inferir algumas relações. A alta resistência do Material 3 está provavelmente atribuída ao baixo teor de biotita, grãos com contatos irregulares e de granulação bem distribuída, com um número considerável de grãos finos e o quartzo recristalizado. O Material 1 apresentou a maior perda nos ensaios de quebra, provavelmente justificada pelo alto teor de biotita. Por fim, o Material 2 apresentou resistência intermediária, o que pode estar relacionado tanto ao alto teor de quartzo na primeira lâmina analisada, aumentando a resistência, quanto ao tamanho maior dos grãos minerais, diminuindo-a. Na segunda lâmina do Material 2, foi possível observar uma quantidade de minerais máficos e biotita semelhante à do Material 1, mas provavelmente houve um balanceamento das características pela heterogeneidade do material.

Na análise das características morfológicas as 100 partículas analisadas de cada material foram separadas em percentuais, com a classificação dentro de intervalos fornecidos pelo próprio *software* do AIMS2. Os resultados de angularidade (a), textura (b) e forma (c) são apresentados na Figura 5.

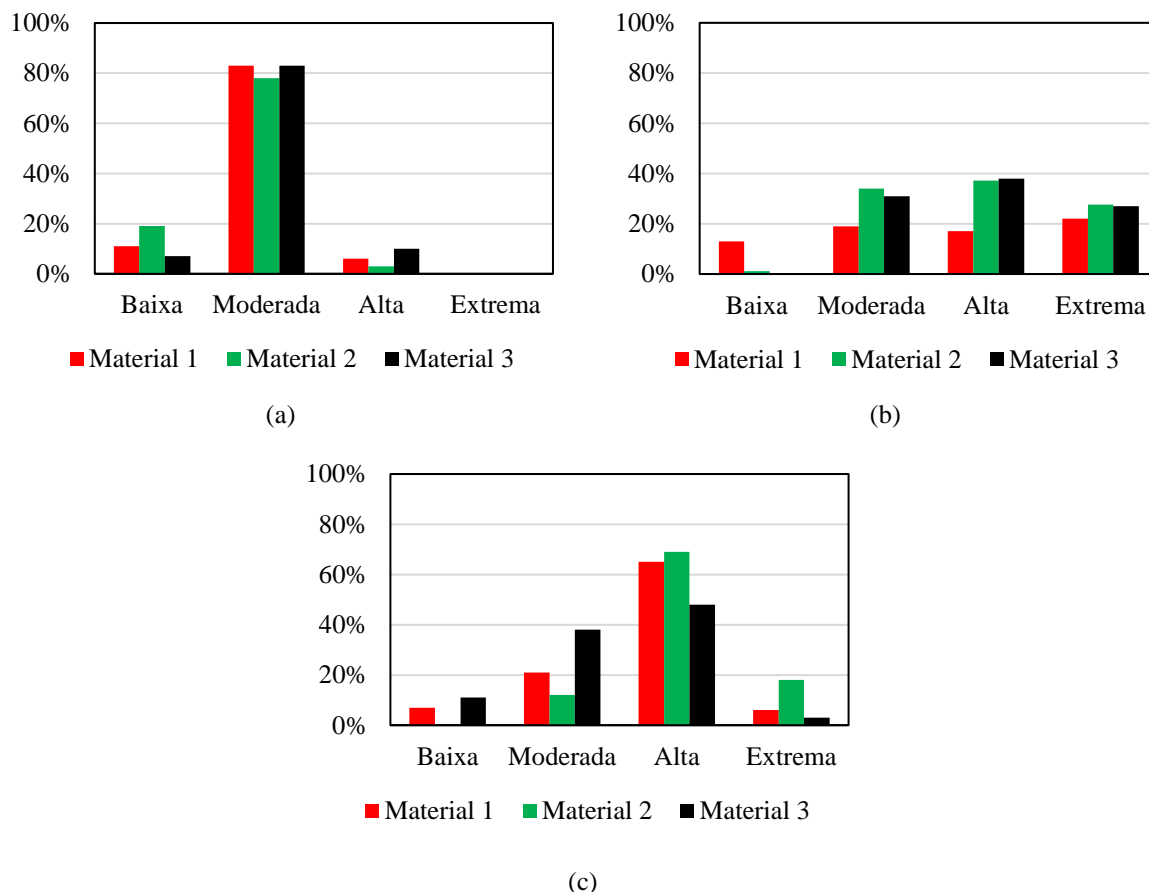


Fig.5. (a) Angularidade, (b) Textura e (c) Esfericidade dos Materiais Estudados.

A partir dos resultados obtidos do AIMS2, é possível notar que o Material 2 apresentou a menor angularidade, seguido do Material 1, o que provavelmente pode ser atribuído ao alto teor de biotita, que é facilmente removida da superfície dos agregados, resultando em variações menos acentuadas do vetor gradiente que varre a superfície dos mesmos.

Quanto à textura, normalmente é atribuída ao tamanho dos minerais. Para os agregados analisados é possível observar que a textura do Material 1 é menor que a do Material 3. Isso provavelmente se deve ao fato de que ao aproximar a visão na superfície da rocha, em uma mesma área haverá menor número de cristais no material com minerais maiores, fazendo que haja nessa área menos irregularidades no contato entre minerais, resultando em uma rugosidade menor. O Material 2 não segue a lógica, provavelmente devido à sua heterogeneidade. Na Figura 6 são apresentados três exemplos de imagens obtidas pelo AIMS2 para determinação da textura dos materiais.

Ao analisar o parâmetro de esfericidade, é possível notar que o Material 1 e 2 são compostos por rochas mais esféricas que o Material 3. Essa observação está provavelmente relacionada novamente ao alto teor de biotita nos dois primeiros materiais, o que leva os agregados a sofrerem abrasão nos processos anteriores à sua aplicação, nos processos de produção. Comparando o Material 1 ao Material 2, é possível observar que o Material 2 apresentou maior esfericidade, provavelmente provocada pelos grãos maiores que os do Material 1 e pelo teor de biotita semelhante entre os dois materiais.

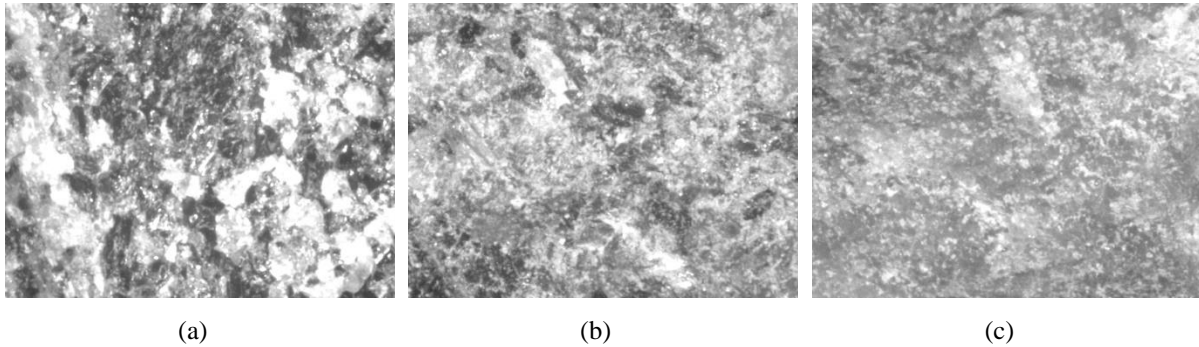


Fig.6. Imagens de textura: (a) Material 1; (b) Material 2; (c) Material 3.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi avaliada a resistência de três agregados de origem metamórfica, relacionando os resultados obtidos com as características morfológicas e mineralógicas dos mesmos.

Rochas com classificações geotécnicas semelhantes podem apresentar resultados de resistência muito distintos, governados por suas estruturas microscópicas. Rochas com grãos mais finos e de tamanhos mais distribuídos podem apresentar maior resistência se comparadas com as de grãos maiores e de tamanhos mais uniforme. Outro fator determinante para a resistência é o teor de biotita, que pode ser quantificado a partir de imagens obtidas com os nicóis descruzados e a demarcação de áreas utilizando um *software* como o ImageJ.

A partir de informações obtidas de lâminas de petrografia, é possível inferir relações com as características morfológicas dos materiais. Rochas com maior teor de biotita costumam apresentar angularidade mais baixa e esfericidade mais alta, dado ao possível desgaste que ocorre no processo de preparo do material para os ensaios, como na fase de peneiramento. Quanto à textura, não foi possível obter conclusões muito claras, provavelmente devido à heterogeneidade das rochas metamórficas analisadas.

A heterogeneidade de um material, como no caso dos gnaisses analisados, pode tornar necessária a realização de um maior número de lâminas petrográficas, com exemplares distintos. No entanto, o aumento do número de lâminas torna a análise mais complexa e dificulta relações diretas claras entre as propriedades mineralógicas e as morfológicas e mecânicas dos agregados, o que também já é um indicativo de que aquela rocha tem estruturas mais complexas e variáveis ao longo da sua massa, gerando agregados mais variados quanto às suas características.

6 AGRADECIMENTOS

O Programa de Engenharia Civil da COPPE tem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

7 REFERÊNCIAS

1. E. Tutumluer, C. Rao e J. A. Stefanski, Video Image Analysis of Aggregates, *Final Project Report, FHWA-IL-UI-278*, Urbana, IL, 2000.
2. D. F. Diógenes, Avaliação das Propriedades de Forma de Agregados Utilizados em Lastro Ferroviário a Partir do uso do Processamento Digital de Imagens, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
3. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 5564, *Via Férrea – Lastro Ferroviário – Requisitos e Método de Ensaio*, 2014.
4. European Standard, EN 13450, *Agregados para balastro de via férrea*, 2005.

5. American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association, AREMA, Lanham, 2013.
6. V. Hofer, H. Bach, Statistical Monitoring for Continual Quality Control of Railway Ballast, *Expert Systems With Applications*, 1-16, 2015.
7. E. Cuelho, R. Mokwa, K. Obert e A. Miller, Comparative Analysis of Micro-Deval, L.A. Abrasion and Sulfate Soundness Tests, *TRB 2008 Annual Meeting*, pp. 1-17, Washington, D.C., 13-17 January 2008.
8. R. Nalsund, Railway Ballast Characteristics, Selection Criterion and Performance, Tese de Doutorado, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2014.
9. T. Al Rousan, Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Texas A&M University, 2004.
10. J. Wu, L. Wang, Y. Hou, *et al.*, A digital image analysis of gravel aggregates using CT scanning technique, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 160-167, 2018.
11. L. M. Tavares, P. B. Neves, Microstructure of quarry rocks and relationships to particle breakage and crushing, *International Journal of Mineral Processing*, 28-41, 2008.
12. J. E. Lindqvist, U. Akesson, K. Malaga, Microstructure and functional properties of rock materials, *Materials Characterizations*, 1183-1188, 2007.
13. X. Zhang, B. Liu, J. Wang, *et al.*, Adobe photoshop quantification (PSQ) rather than point-counting: A rapid and precise method for quantifying rock textural data and porosities, *Computers & Geosciences*, 62-71, 2014.
14. J. Schindelin, I. Arganda-Carreras, E. Frise *et al.*, Fiji, an open-source platform for biological-image analysis, *Expert systems with Applications*, v.42, 2015.
15. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NM 51, *Agregado Graúdo – Ensaio de Abrasão “Los Angeles”*, 2001.