

Estudo de análise granulométrica de materiais granulares a partir de fotogrametria de imagens ortorretificadas

Alexandre Junior da Silva Martins

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, alexandrejunior84127970@gmail.com

Sidnei Helder Cardoso Teixeira

Professor, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, s.teixeira@ufpr.br

Tennison Freire de Souza Junior

Eng. Geotécnico e Professor, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, tennisongeotec@gmail.com

RESUMO: A caracterização granulométrica de enrocamentos ainda representa um desafio significativo na engenharia geotécnica. Esses materiais, frequentemente provenientes de processos de britagem mecânica, possuem partículas de grandes dimensões e alta densidade, o que dificulta a aplicação dos métodos tradicionais de peneiramento, geralmente utilizados para solos. Diante dessa limitação, este estudo visa avaliar a viabilidade da análise granulométrica por meio de imagens ortorretificadas em material de enrocamento. Foram realizados estudos comparativos entre o peneiramento, conforme a NBR 7181 (2016), e a análise por imagens ortorretificadas em duas amostras distintas de pedregulho. Os resultados indicaram que a técnica proposta foi eficaz na identificação e quantificação das partículas, configurando-se como uma alternativa viável e promissora para obras de engenharia que envolvem materiais com características similares, além de dispensar o uso de peneiras de grandes dimensões. A técnica apresenta potencial para o controle expedito de obras, com redução de custos e riscos operacionais.

—

PALAVRAS-CHAVE: Enrocamento; imagem ortorretificada, Granulometria, Geotecnia

ABSTRACT: The granulometric characterization of rockfill materials remains a significant challenge in geotechnical engineering. These materials, often produced by mechanical crushing processes, contain large, high-density particles that hinder the application of traditional sieving methods commonly used for soils. Given this limitation, this study aims to assess the feasibility of particle size analysis through orthorectified images of rockfill material. Comparative studies were carried out using the NBR 7181 (2016) standard sieving method and granulometric analysis based on orthorectified images for two distinct gravel samples. The results indicated that the proposed technique was effective in identifying and quantifying the particles, proving to be a viable and promising alternative for engineering projects involving materials with similar characteristics, while also eliminating the need for large-scale sieves.

KEYWORDS: Rockfill; Rockfill, Orthorectified images, Particle size characterization, Geotechnical.

1 INTRODUÇÃO

A caracterização granulométrica de materiais de enrocamento representa um grande desafio técnico e operacional, principalmente devido à natureza heterogênea e às grandes dimensões dos blocos que compõem esse tipo de material. O método tradicional de peneiramento, amplamente utilizado para solos e agregados de menor granulometria, fundamentado na NBR 7181 (2016), é uma opção impraticável quando aplicado a materiais rochosos. A manipulação, o transporte e a separação desses blocos exigem equipamentos de grande porte, espaço físico significativo e mão de obra especializada, além de implicarem riscos operacionais e custos elevados.



Além disso, o peneiramento em escala real pode não refletir adequadamente a distribuição granulométrica de uma massa representativa de enrocamento, uma vez que a coleta de amostras pode ser limitada a porções acessíveis do maciço, o que compromete a representatividade dos dados obtidos.

Nesse contexto, a análise granulométrica por meio de técnicas de fotogrametria de imagens ortorretificadas surge como uma solução eficiente, inovadora e simplificada para as demandas das obras de engenharia. De acordo com Schowengerdt (1997), a ortorretificação consiste na correção da imagem, pixel a pixel, em relação à distorção topográfica. Com essa correção, toda a imagem passa a ser representada em projeção ortográfica, como se tivesse sido adquirida em visão de topo. A partir de imagens ortorretificadas e referências para dimensões no plano avaliado, podem ser realizadas medidas de dimensões a partir da régua digital de software especializado em imagens.

Além de reduzir custos e riscos associados ao manuseio direto do material, a técnica permite uma avaliação rápida e não destrutiva, com possibilidade de repetição em diferentes momentos ou locais da obra. Portanto, diante das dificuldades práticas do peneiramento convencional, o presente trabalho tem como objetivo propor a utilização da técnica de fotogrametria de imagens ortorretificadas para avaliação granulométrica de duas amostras de materiais pedregulhosos estudados.

Este estudo avalia a viabilidade da análise granulométrica e enrocamentos por fotogrametria de imagens ortorretificadas. Foram usadas duas amostras de material pedregulhoso em laboratório e uma amostra de enrocamento em campo.

São descritos, de forma reprodutível, (i) o fluxo de aquisição com pontos de controle em campo e ortorretificação, e (ii) o procedimento de medição 2D de diâmetros equivalentes. A avaliação da abordagem é feita por comparação direta com o peneiramento NBR 7181 (2016), com discussão quantitativa dos resultados (curvas granulométricas e parâmetros característicos), explicitando as limitações inerentes à projeção bidimensional e a possíveis oclusões/sobreposições de partículas.

Neste estudo, optou-se pelo uso do *software* Fudaa-LSPIV unicamente pelas ferramentas de ortorretificação e georreferenciamento já disponíveis no grupo de pesquisa, sem aplicação das funcionalidades de velocimetria. Essa escolha se justifica pela experiência prévia dos autores com o programa, embora seja reconhecido que plataformas como o ImageJ/FIJI também se mostram adequadas e amplamente utilizadas em trabalhos similares, com potencial de maior automatização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fotogrametria consiste em uma técnica de obtenção de medidas confiáveis a partir de fotografias aéreas ou imagens, normalmente com objetivo de gerar mapas, modelos 3D e medir dimensões no terreno. A ortorretificação, é uma particularidade da fotogrametria, e que atua na correção das distorções do objeto ou de espaço tridimensional e as transforma em uma representação ortogonal.

Segundo Berveglieri et al. (2015), as dimensões das áreas dos pontos de apoio e a resolução do MDT local são parâmetros importantes para a geração da ortoimagem. Mikhail et al. (2001) explicam que o método de ortorretificação pode ser direto ou indireto (Figura 1). Cerqueira (2004) esclarece a diferença entre os métodos: no indireto, determina-se a posição de cada pixel na imagem resultante (como em uma ortoimagem) e, a partir dessa posição, identifica-se o pixel correspondente na imagem original por meio de uma transformação selecionada, conforme as Equações (1) e (2). Em seguida, o nível de cinza é interpolado com base em um método de reamostragem (Figura 1a). Por sua vez, o método direto parte da posição do pixel na imagem original, aplica a transformação para obter suas novas coordenadas na imagem resultante e atribui o valor de cinza do pixel inteiro mais próximo (Figura 1b).

$$x = f_x(x', y') \quad (1)$$

$$y = f_y(x', y') \quad (2)$$

Os valores de x e y representam as coordenadas do pixel na imagem original, os valores x' e y' representam as coordenadas do pixel na imagem resultados e por fim f_x e f_y representam a função transformação.

Como as coordenadas obtidas pelos dois métodos de transformação geralmente não coincidem exatamente com as posições inteiras dos pixels na imagem resultante, torna-se necessário aplicar uma

interpolação para determinar os níveis de cinza dos pixels da ortomagem. Esse procedimento é conhecido como reamostragem.

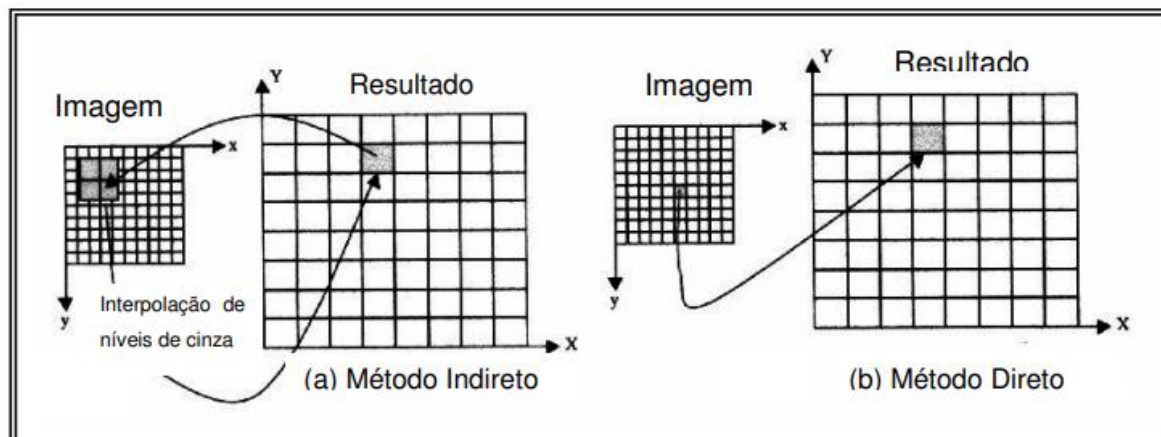


Figura 1. Diferença entre os métodos diretos e indiretos

A validação do método pode ser realizada ao se comparar medidas realizadas diretamente no objeto fotografado com as medidas realizadas na imagem ortorretificada. No caso de curvas granulométricas, a validação envolve a comparação direta com curvas granulométricas obtidas por peneiramento. Para sustentar a equivalência entre as técnicas, é prática corrente reportar parâmetros característicos como D_{10} , D_{30} e D_{60} , bem como coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c).

Apesar do potencial, a análise granulométrica por imagens apresenta limitações. Entre as principais fontes de erro estão a projeção bidimensional de partículas tridimensionais, que pode levar a viés de subestimativa ou superestimativa; a oclusão ou sobreposição de blocos, que dificulta a identificação precisa dos contornos; e a influência de iluminação, contraste e resolução da imagem sobre o processo de segmentação. Tais fatores reforçam a necessidade de protocolos criteriosos de aquisição de imagens e de ortorretificação, incluindo a definição do GSD (Ground Sample Distance), o número e a distribuição dos pontos de controle (GCPs) e a avaliação do erro residual geométrico.

Dessa forma, observa-se que a análise granulométrica por imagens ortorretificadas se apresenta como uma ferramenta inovadora e complementar, capaz de fornecer resultados rápidos e não destrutivos, especialmente em contextos de obra em que o peneiramento em escala real é inviável. Contudo, trata-se de uma abordagem que não substitui ensaios normativos quando estes são exigidos, mas que pode agregar valor ao controle expedito de campo, conciliando agilidade, segurança operacional e representatividade estatística.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa consistiu na obtenção de fotografias dos materiais granulares em que fossem visíveis quatro pontos de coordenadas conhecidas (GCPs). A imagem deve ser capturada a uma distância conhecida, definindo em um GSD (cm/pixel). As coordenadas dos GCPs foram levantadas por trena. Esses pontos permitiram estabelecer a escala métrica da imagem e corrigir distorções de perspectiva, conforme descrito por Schowengerdt (1997), que define a ortorretificação como a correção da imagem pixel a pixel em relação às deformações topográficas.

O processamento da ortorretificação foi realizado no *software* Fudaa-LSPIV, empregado aqui exclusivamente por suas ferramentas de referenciamento de imagens. Ressalta-se que não foi utilizada a técnica de velocimetria. De acordo com Jodeau et al. (2017), o Fudaa-LSPIV foi originalmente desenvolvido para medições de velocidade de superfície em rios, aplicando a técnica de Velocimetria de Imagem de Partículas em Grande Escala (LSPIV), derivada da Velocimetria de Imagem de Partículas (PIV) utilizada em laboratório (Adrian, 1991) e posteriormente estendida a fluxos naturais (Fujita et al., 1998). O *software* também tem sido aplicado em estudos de compactação dinâmica e modelagem física, como em Knut et al. (2018) e Hajjalilue-Bonab e Zare (2014). No presente trabalho, no entanto, o Fudaa-LSPIV foi utilizado apenas para garantir a ortorretificação da imagem, não havendo aplicação da técnica de velocimetria.

Na imagem ortorretificada são identificadas partículas visíveis, medidas individualmente. A determinação dos diâmetros equivalentes foi realizada de forma manual, por meio do traçado da menor dimensão visível de cada partícula com a régua digital do *software*; seguida do cálculo do diâmetro de círculo equivalente ou da medida de Feret. Independentemente do método, foi adotado um critério único de diâmetro representativo, assegurando consistência nos resultados.

As medições foram ordenadas de forma decrescente e associadas às porcentagens de material retido e passante, de acordo com as expressões:

$$\%retido(i) = 100 \cdot \frac{i}{N} \quad (3)$$

$$\%passante(i) = 100 - \%retido(i) \quad (4)$$

Sabendo que i corresponde à posição da partícula no ranking com N medições. A cada partícula, se associa uma dimensão, o que possibilita relacionar a dimensão da partícula e os percentuais retido e passante. A partir dessas distribuições foram construídas as curvas granulométricas em escala logarítmica, determinando-se os valores de D_{10} , D_{30} , e D_{60} , bem como os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c).

As duas amostras adicionais (A e B) foram também submetidas ao ensaio de peneiramento tradicional, conforme a NBR 7181 (2016), resultando nas curvas de referência e avaliadas pelo método aqui proposto.

A validação da técnica baseou-se na comparação entre os resultados de peneiramento e os obtidos por imagem, utilizando indicadores objetivos: erros relativos de D_{10} , D_{30} e D_{60} obtido por imagem e por peneiramento em mostras de materiais granulares.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram amostrados dois tipos de materiais granulares distintos, apresentado na Figura 2, cada uma das amostras coletadas foi ensaiada por peneiramento tradicional, conforme o procedimento descrito na norma NBR 7181 (2016), e comparados com os resultados obtidos pela curva granulométrica obtida utilizando o método descrito acima, as imagens base utilizadas para a ortorretificação estão apresentadas nas Figuras 2a e 2b, para as amostras A e B respectivamente, caracterizada por serem materiais uniformes e bem graduados.

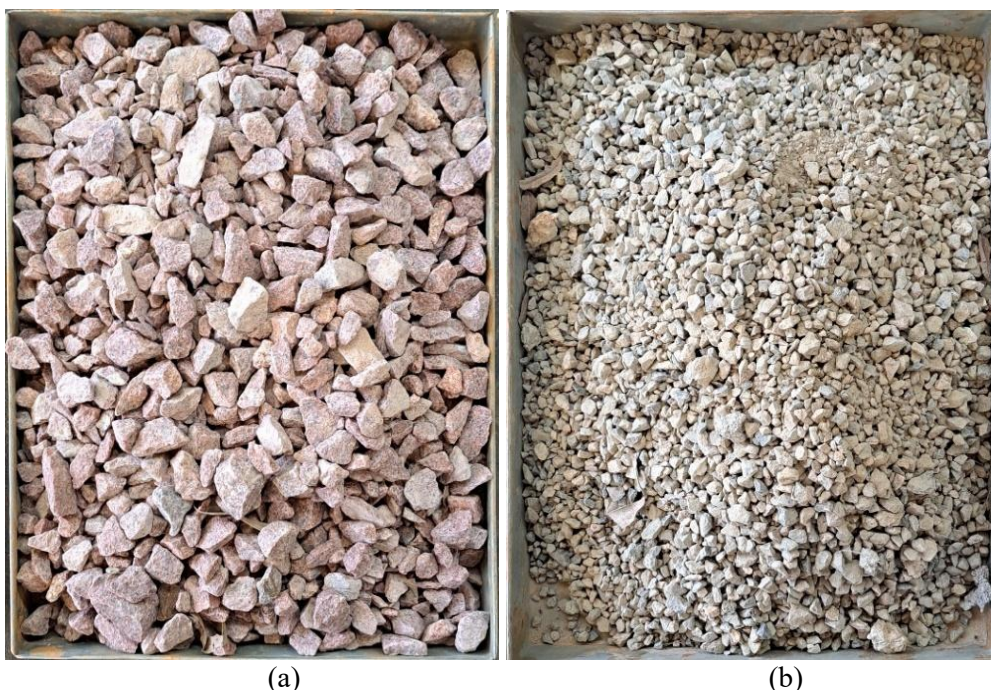


Figura 2. Imagens base usadas no ortorretificação: (a) Amostra A; (b) Amostra B

Como pode ser visto na Figura 3 e Figura 4, ao comparar as curvas granulométrica de imagens ortorretificadas com o resultado do ensaio tradicional de peneiramento, se observou uma boa aderência dos resultados obtidos por ambos os métodos, principalmente na proporção de grãos mais grosseiros.

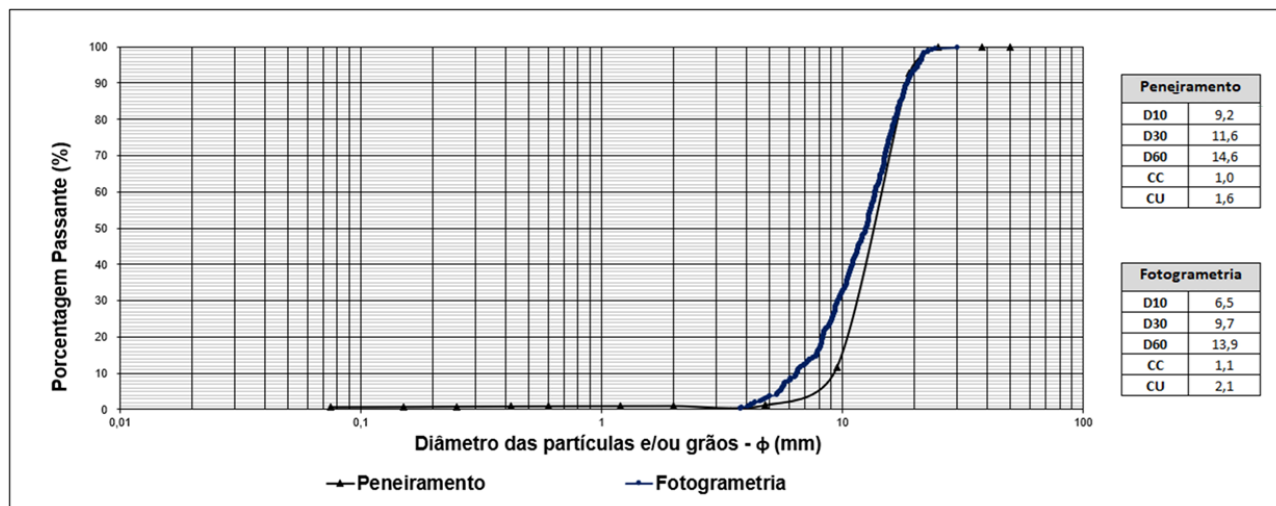


Figura 3. Comparação da curva granulométrica da amostra A a partir de ensaio de peneiramento e fotos ortorretificadas

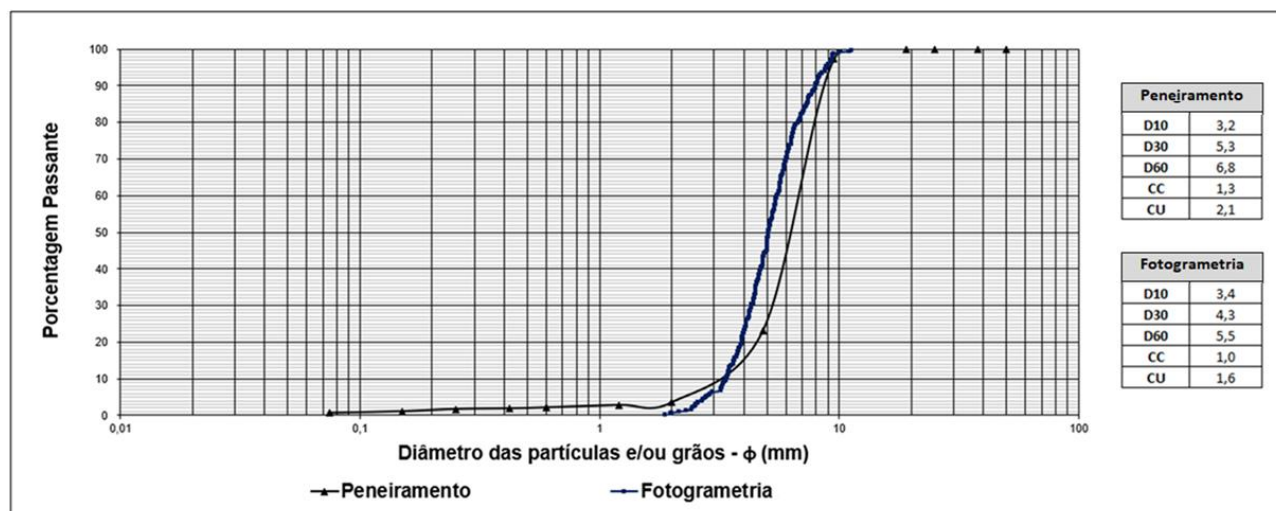


Figura 4. Comparação da curva granulométrica da amostra B a partir de ensaio de peneiramento e fotos ortorretificadas

Ao comparar as curvas da amostra A peneirada com a curva obtida por fotogrametria nota-se que uma variação de erro relativo (ER) entre 4,79% e 29,35% a depender da dimensão dos grãos em função da % passante, já quanto ao Cc e Cu se observou erros relativos de 10% e 31,25%, respectivamente. Quanto a amostra B, observa-se erro relativo (ER) entre 6,75% e 19,12% a depender da dimensão dos grãos em função da % passante, já quanto ao Cc e Cu se observou erros relativos de 23,08% e 23,81%, respectivamente. Estas informações podem ser observadas de forma consolidada na Tabela 1.

Tabela 1. Análise estatística das análises granulométricas das amostras A e B.

Parâmetro	Granulometria A				Granulometria B			
	Peneiramento	Fotogrametria	Δ	ER (%)	Peneiramento	Fotogrametria	Δ	ER (%)
D ₁₀ (mm)	9,2	6,5	2,7	29%	3,2	3,4	0,2	6%
D ₃₀ (mm)	11,6	9	2,6	22%	5,3	4,3	1	19%
D ₆₀ (mm)	14,6	13,9	0,7	5%	6,8	5,5	1,3	19%
C _c	1	1,1	-0,1	10%	1,3	1	0,3	23%
C _u	1,6	2,1	-0,5	31%	2,1	1,6	0,5	24%

Legenda: ER = Erro Relativo.

Tendo em vista a relativamente boa aderência entre os dados obtidos pelos procedimentos distintos, realizou-se a determinação da curva de distribuição granulométrica de um depósito de blocos rochosos (enrocamento), mostrado na Figura 5, para fins de verificação da viabilidade de se utilizar a técnica proposta em campo.

Na imagem ortorretificada (Figura 5b) foram identificadas N=297 partículas, medidas individualmente conforme ilustrado na Figura 5c. A determinação dos diâmetros equivalentes foi realizada de forma manual, por meio do traçado da menor dimensão visível de cada partícula com a régua digital do *software*.

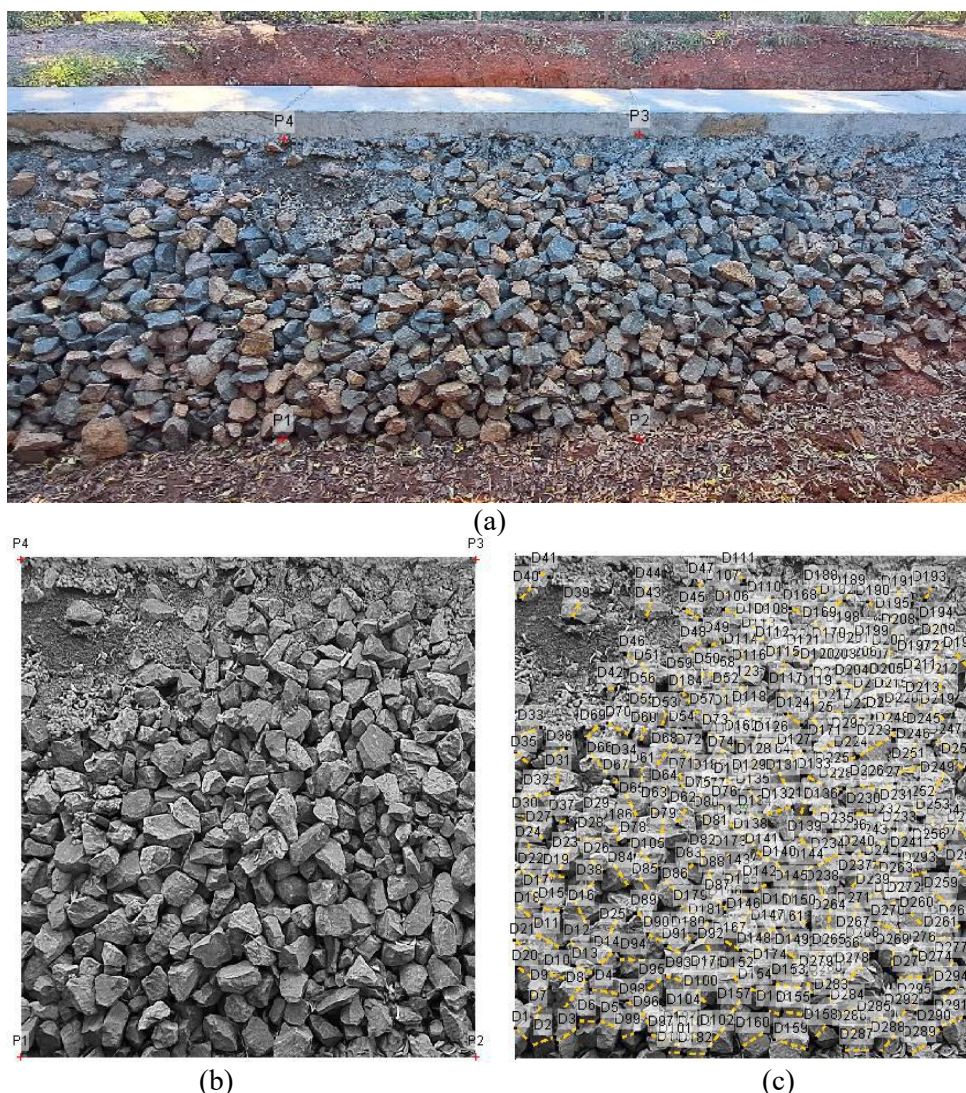


Figura 5. Material rochoso utilizado com pontos de coordenadas: (a) Imagem base; (b) Imagem ortorretificada; (c) Medições realizadas na imagem ortorretificada.

Na Figura 6 está apresentada a curva de distribuição granulométrica obtida por meio da técnica fotográfica apresentada. Assim, se verifica a viabilidade de se obter curvas de distribuição granulométrica de enrocamentos a partir de fotografias ortoretificadas.

Apesar de apresentar diversas vantagens, a análise granulométrica por meio de fotogrametria de imagens ortoretificadas pode apresentar algumas limitações em comparação ao ensaio tradicional de peneiramento. Dentre as principais restrições, destaca-se a dificuldade em identificar partículas sobrepostas ou parcialmente ocultas, o que pode comprometer a precisão na estimativa do tamanho e da distribuição das partículas.

Algo que deve ser considerado como fonte de imprecisão é que a análise por imagem considera apenas a projeção bidimensional das partículas na superfície, desconsiderando sua dimensão no plano perpendicular ao da fotografia, o que pode levar a subestimações ou superestimações dos diâmetros equivalentes.

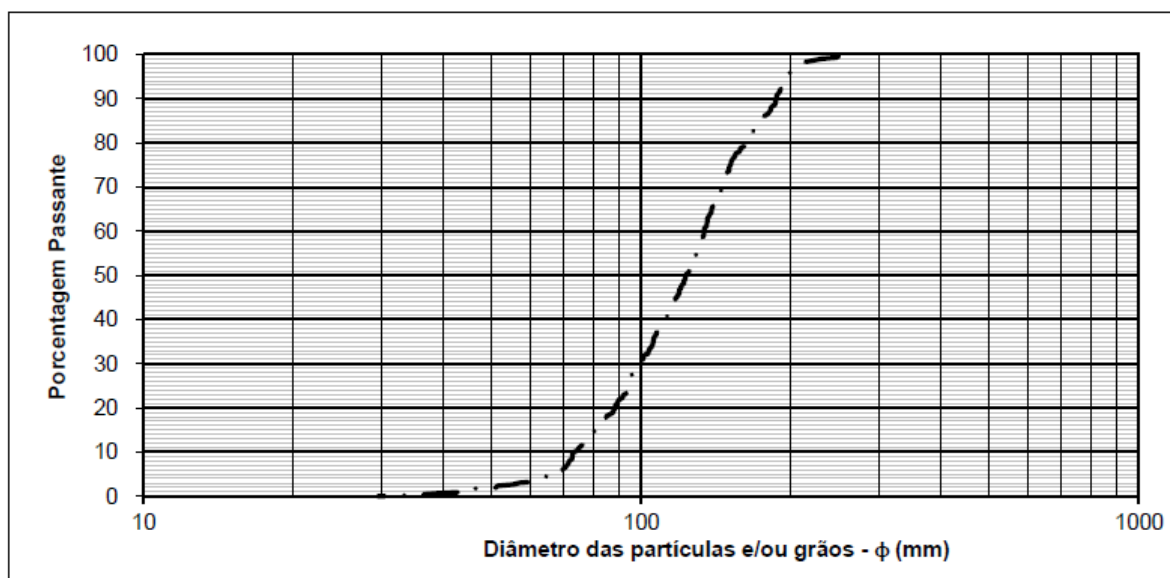


Figura 6. Curva de distribuição granulométrica do enrocamento.

Por fim, os autores entendem que o processamento de imagem deve ser usado de modo criterioso e cuidadoso, envolvendo etapas de calibração, segmentação e filtragem, as quais podem ser influenciadas por fatores como iluminação, resolução da imagem e contraste entre partículas. Já o método de peneiramento, apesar de mais trabalhoso e dependente de equipamentos volumosos, fornece resultados diretos e tridimensionais da massa retida em cada malha, sendo considerado mais preciso para materiais com ampla variação de tamanhos.

CONCLUSÕES

Após a realização dos estudos conclui-se que a utilização da fotogrametria por imagens ortoretificadas, aplicadas ao estudo de enrocamentos, proporciona ganhos significativos na avaliação granulométrica destes materiais, visto que torna a avaliação bastante simplificada e viável tecnicamente. Esse processo corrige distorções oriundas da perspectiva da câmera e do relevo, assegurando uma escala uniforme e precisão métrica em toda a imagem;

No presente estudo, a ortoreificação demonstrou ser satisfatória na geração de curvas granulométricas dos diferentes enrocamentos. Notou-se que a depender da dimensão do grão, a % passante pôde apresentar erros relativos próximos de 30% que podem estar vinculados a calibração do processo, geometria dos grãos (formatos poliédricos), sobreposição de partículas etc;

A adoção da imagem ortoretificada a partir da técnica de velocimetria de Imagem de Partículas em Grande Escala (LSPIV) por meio do *software* Fudaa-LSPIV demonstrou ser uma alternativa eficiente na obtenção da curva granulométrica do enrocamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam os seus agradecimentos ao CNPQ (Conselho Nacional de Pesquisa) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fomento à pesquisa no Brasil, como também a Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo incentivo aos seus colaboradores quanto a publicações científicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 7181 (2016) *Solo — Análise granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 13 p.

Adrian, R. (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics* 23, 261–304.

Cerqueira, J.D.M.(2004) Ortorretificação digital de imagens de satélites de alta resolução espacial. Dissertação de Mstrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Pernambuco, 80 p.

Fujita, I., M. Hara, Morimoto, T., & T. Nakashima (1998). *Visualization and PIV measurement of river surface flow*. In *Proceedings of VSJ-SPIE98*.

Hajjalilue-Bonab, M., Zare, F. S. (2014). *Investigation on tamping spacing in dynamic compaction using model tests. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 167(3), 219–231.

Knut, A., Ocaña Atencio, R.E., Pankrath, H., Thiele, R., Beitelschmidt, M. (2018) Measuring soil compaction on dynamic compaction technologies - Field tests and laboratory investigations using the PIV method. In: *Anniversary Symposium – 40 Years of Roller Integrated Continuous Compaction Control (CCC)*, Vienna, Austria.

Jodeau, M., Hauet, A., Le Coz, J., Bercovitz, J., Lebert, F. (2017) *Laboratory and field lspiv measurements of flow velocities using fudaa-lspiv, a free user-friendly software*. In: *International Symposium and Exhibition on Hydro-Environment Sensors and Software*. Marid, Spain.

Mikhail, E. M.; Bethel, J. S.; Mcglone, C. J. (2001) *Introduction to modern photogrammetry*. New York: John Wiley & Sons, 479 p.

Schowengerdt, R. A. (1997) *Remote Sensing, Models and Methods for Image Processing*. Second Edition. Academic Press.