

Análise Morfológica De Materiais Granulares Utilizando Diferentes Métodos

Amandda Lara Moreira Braga

Doutoranda em Geotecnia, Universidade de Brasília, Goiânia-GO, Brasil, amanddalara@gmail.com

Bruno Dos Santos Pereira

Engenheiro de Transportes, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil, brunodssantosp@gmail.com

Robinson Andrés Giraldo Zuluaga

Professor, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, Brasil, roangizu@gmail.com

Márcio Muniz De Farias

Professor, Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, mmuniz94@gmail.com

RESUMO: Os agregados são amplamente utilizados em diferentes áreas da Engenharia Civil devido às suas dimensões e propriedades, sendo crucial conhecer suas características. Estudos recentes indicam que essas características podem influenciar significativamente o comportamento e a qualidade dos compósitos. Nesse contexto, a avaliação das propriedades de tamanho e forma das partículas de um agregado é essencial. No entanto, as metodologias tradicionais para caracterizar essas propriedades têm limitações. Por essa razão, novos métodos de caracterização morfológica, baseados no Processamento Digital de Imagens (PDI), foram propostos. Esta pesquisa utilizou técnicas convencionais e dois métodos de PDI para caracterizar as propriedades de forma de agregados, empregando equipamentos de alta tecnologia, softwares gratuitos e equipamentos de fácil acesso e baixo custo. Foram analisadas duas frações de areia normal brasileira e duas de pedra britada, materiais amplamente utilizados em laboratório e em várias áreas da engenharia. O equipamento *PartAn3D MAXI* foi usado para o método de análise de imagem dinâmica, enquanto um *smartphone* convencional, com o *software ImageJ*, foi empregado como técnica alternativa de baixo custo. Os resultados demonstraram que a técnica de PDI foi adequada, permitindo a caracterização dos agregados com resultados consistentes, especialmente com o equipamento especializado. Por outro lado, o uso de *smartphone* com o *ImageJ*, embora eficaz, ainda apresenta algumas imprecisões que devem ser investigadas para aperfeiçoar o método.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais granulares, Morfologia das partículas, Análise de imagens, Caracterização.

Aggregates are widely used in various areas of Civil Engineering due to their dimensions and properties, making it crucial to understand their characteristics. Recent studies indicate that these characteristics can significantly influence the behavior and quality of composites. In this context, evaluating the size and shape properties of aggregate particles is essential. However, traditional methodologies for characterizing these properties have limitations. For this reason, new morphological characterization methods based on Digital Image Processing (DIP) have been proposed. This research utilized conventional techniques and two DIP methods to characterize the shape properties of aggregates, employing high-tech equipment, free software, and low-cost, easily accessible equipment. Two fractions of standard Brazilian sand and two of crushed stone, materials widely used in laboratories and various engineering fields, were analyzed. The *PartAn3D MAXI* equipment was used for the dynamic image analysis method, while a conventional smartphone with the *ImageJ* software was employed as a low-cost alternative technique. The results demonstrated that the DIP technique was adequate, allowing for consistent aggregate characterization, especially with specialized equipment. On the other hand, the use of a smartphone with *ImageJ*, although effective, still presents some inaccuracies that need to be investigated to improve the method.

KEYWORDS: Granular materials, Particle morphology, Image analysis, Characterization.

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais granulares é amplamente aplicado em diversas áreas da engenharia, exigindo estudos para otimizar e facilitar sua aplicação. Na mecânica dos solos, os solos granulares são definidos como uma combinação de sólidos classificados com base em sua granulometria, e mais recentemente, em sua morfologia. A estrutura morfológica das partículas, juntamente com a distribuição granulométrica, influencia significativamente o comportamento físico e mecânico do solo.

Pesquisadores destacam a importância de relacionar os materiais granulares com suas propriedades microscópicas para compreender a influência de suas características na resposta mecânica. Devido às suas propriedades, os agregados são componentes predominantes em revestimento asfáltico, lastro ferroviário, concreto, filtros, entre outros (Liu *et al.*, 2011; Diógenes, 2018).

A forma e o tamanho das partículas do solo revelam as características do processo de formação do material. Na geotecnia tradicional, o tamanho das partículas é um parâmetro crucial para entender o comportamento do solo, sendo utilizado em classificações como indicador de potenciais fenômenos físicos (Norsyahariat *et al.*, 2016). Os métodos tradicionais para determinar os tamanhos das partículas que constituem um solo incluem a análise granulométrica para partículas maiores que 0,075 mm e análise por sedimentação para partículas menores. No entanto, o tamanho de uma partícula que não tem forma esférica ou cúbica não pode ser definido exclusivamente por uma dimensão linear (Lambe e Whitman, 2004), pois o significado de tamanho depende da dimensão medida e do método de medição.

Diversos parâmetros adimensionais são cruciais para caracterizar a forma de uma partícula, incluindo arredondamento, circularidade, solidez e razão de aspecto, entre outros (Zuluaga, 2016). O arredondamento se refere ao grau de suavidade das bordas de uma partícula, indicando quão próximo sua forma está de uma esfera. A circularidade mede a semelhança do contorno de uma partícula com um círculo perfeito, indicando sua regularidade. A solidez avalia a relação entre o volume da partícula e o volume de uma forma geométrica que a circunscreve, fornecendo uma medida da densidade ou compactação da partícula. Por último, a razão de aspecto se refere à razão entre o comprimento e largura de uma partícula, indicando quão alongada ou achatada.

Diversas pesquisas destacam a importância da forma das partículas, embora essa característica raramente seja considerada nas avaliações geotécnicas (Golchert *et al.*, 2004; Hanaor *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2019; Pereira, 2022; Braga, 2022). Os métodos tradicionais para caracterizar essas propriedades apresentam várias limitações, exigem trabalho manual intenso e não fornecem resultados precisos. Contudo, a literatura apresenta métodos baseados em Processamento Digital de Imagens (PDI) que promovem análises mais completas, rápidas, realistas e confiáveis. O PDI envolve um conjunto de técnicas para capturar, representar e transformar imagens por meio de software. Por meio desse método, é possível obter informações e características de qualquer imagem analisada, incluindo aquelas capturadas por *smartphones*.

As técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) permitem descrever a morfologia das partículas e caracterizar o solo de forma mais realista. Um exemplo dessas técnicas é a análise dinâmica de imagens, que determina parâmetros geométricos por meio do processamento de imagens capturadas durante o fluxo de partículas. Essa técnica permite a caracterização de dezenas de milhares de partículas em poucos minutos. Essa tecnologia envolve a passagem do material por uma área com uma fonte de luz LED e câmeras que capturam imagens simultaneamente, processadas por um software de análise. Para obter resultados válidos, é fundamental que o material esteja completamente disperso.

Outra técnica PDI, que elimina a necessidade de aquisição de equipamentos de alto valor e o uso de *smartphones* e software para caracterização de agregados. No entanto, os equipamentos utilizados para a execução desses métodos têm um custo elevado, dificultando o acesso à tecnologia para a maioria dos laboratórios e empresas. Assim, alternativas mais acessíveis foram propostas, como o uso de *smartphones* para a caracterização de agregados. Esta alternativa, de acordo com a literatura, pode eliminar a necessidade de aquisição de equipamentos de alto valor.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi comparar técnicas de caracterização de agregados por meio de caracterização física, caracterização por meio de Processamento Digital de Imagens (PDI) com equipamentos destinados a esse fim, além de softwares gratuitos e equipamentos de baixo custo, como *smartphones*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a condução da pesquisa, foram selecionados agregados amplamente utilizados em laboratórios e diversas áreas da engenharia, como areias e lastros. A análise desses agregados foi conduzida por meio de ensaios de granulometria, ensaios com paquímetro e análises de imagem utilizando o equipamento *PartAn 3D MAXI*. Além disso, foram realizadas análises de imagens capturadas por *smartphones*, com posterior processamento digital das imagens por meio do software *ImageJ*.

2.1 Materiais

Os agregados utilizados neste estudo foram: areia normal brasileira, abrangendo duas frações distintas do agregado miúdo, e pedra britada, incluindo duas frações do agregado graúdo, evidenciadas na Figura 1.

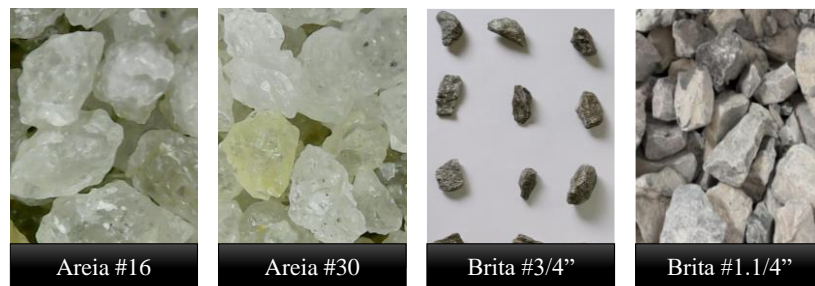


Figura 1. Materiais usados no estudo.

2.2 Caracterização Física

Foram realizados ensaios de granulometria convencional para todas as amostras. Para os agregados miúdos, os ensaios seguiram a ABNT NBR 7181/16, utilizando aproximadamente 1,5 kg de amostras de areia. A granulometria das britas foi conduzida conforme as especificações da ABNT NBR 17054/2022, enquanto a forma dessas partículas foi determinada pelo método do paquímetro.

A forma dos agregados utilizados em lastro ferroviário é caracterizada com base em ensaios normatizados pela ABNT e ASTM. A norma ABNT NBR 5564/2011 avalia a esfericidade das partículas com base em suas dimensões perpendiculares, classificando-as como cúbicas, alongadas, lamelares ou alongadas-lamelares. A norma ASTM D4791/2010 avalia a forma dos agregados pela relação entre largura e espessura, ou largura e comprimento, classificando as partículas em quatro tipos: não alongada e não lamelar; alongada; lamelar; ou alongada-lamelar. É recomendado evitar agregados alongados ou lamelares em lastros ferroviários.

Os métodos tradicionais de caracterização apresentam limitações e requerem trabalho manual intenso, resultando em imprecisões. Portanto, dois métodos distintos foram empregados para caracterização das partículas: paquímetro e análise de imagem dinâmica. A caracterização da forma das partículas pelo método do paquímetro, conforme a ABNT NBR 5564/2021, envolveu a medição de três dimensões de 100 partículas do lastro ferroviário.

2.3 Parâmetros de Forma por Análise Imagem no *PartAn3D Maxi*

A análise de imagem dinâmica é um método moderno e eficiente para caracterizar a morfologia das partículas. Equipamentos baseados nesse método geralmente consistem em um sistema óptico composto por câmeras, lentes objetivas e fontes de luz. Entre as vantagens desse método, em comparação com métodos estáticos e tradicionais, estão a capacidade de analisar as partículas individualmente e fornecer medições mais precisas (Wei *et al.*, 2020).

Um exemplo comum de equipamento utilizado para esse método é o analisador de imagens dinâmico *PartAn3D Maxi*, desenvolvido pela *Microtrac MRB*. O sistema emprega uma câmera de alta velocidade e resolução para capturar múltiplas imagens de cada partícula em diferentes posições e orientações espaciais. Essas imagens são digitalizadas e analisadas pelo *software* do sistema para medir o comprimento, largura, espessura, perímetro e área das partículas, calculando seus parâmetros morfológicos.

A quantidade de material usada nesse ensaio deve ser representativa, embora não haja uma quantidade especificada. O equipamento pode analisar milhares de partículas em poucas horas, facilitando a obtenção de amostras representativas.

Os ensaios foram realizados no *INFRALAB*, onde as frações de agregados foram ensaiados no *PartAn3D Maxi*. A Figura 2 mostra as imagens geradas pelo software do equipamento para uma areia.

Cada amostra passou por cinco análises, que evidenciou a quantidade de material necessário para detecção de estabilidade de resultados. Assim, convencionou-se usar 500 gramas de areia em cada determinação e 2000 gramas de brita.

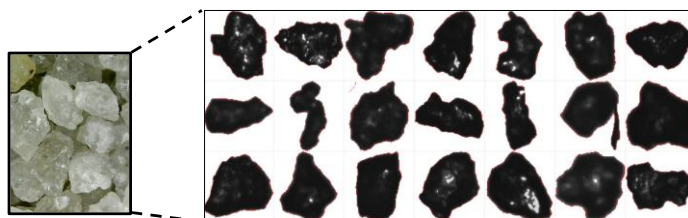


Figura 2. Imagens retiradas com o *PartAn3D Maxi*.

2.4 Parâmetros de Forma por Análise Imagem no *ImageJ*

A amostragem dos agregados foi realizada retirando-se cinco amostras de cada material. As quantidades foram definidas de acordo com a norma DNIT 432 (2020), que estabelece a quantidade mínima de partículas de agregados por fração. Foram coletadas 50 partículas para agregados graúdos e 200 partículas para agregados miúdos. Além disso, o processo de quarteamento foi conduzido conforme a norma DNER-PRO 199 (1996).

Para caracterizar os agregados com o software *ImageJ*, primeiramente, as amostras foram preparadas de acordo com as diretrizes das normas pertinentes. Após a preparação, foram capturadas imagens de alta resolução das amostras, garantindo uma representação precisa das partículas do lastro, utilizando um *smartphone* convencional da marca *Motorola* e modelo *One macro*. As imagens foram processadas no *ImageJ*, onde análises de segmentação identificaram e quantificaram propriedades morfológicas das partículas.

O *ImageJ* trata-se de um *software* livre, de processamento e análise de imagens, baseado em *Java*. O *software* pode ser utilizado como um aplicativo em um navegador *Web* ou como um programa instalado ao computador. O *software* possibilita exibir, editar, analisar, processar, salvar e imprimir imagens RGB.

No *ImageJ*, técnicas de binarização e limiarização foram aplicadas para separar as partículas do fundo da imagem. Além disso, filtros foram usados para remover ruídos, melhorando a precisão da análise, evidenciado na Figura 3. Com a imagem segmentada, ferramentas de análise de imagem permitiram calcular a circularidade, arredondamento e rugosidade das partículas. Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente para entender a distribuição e variação dessas propriedades. Os resultados foram interpretados à luz das condições reais do material e comparados com os resultados de outros ensaios de caracterização.

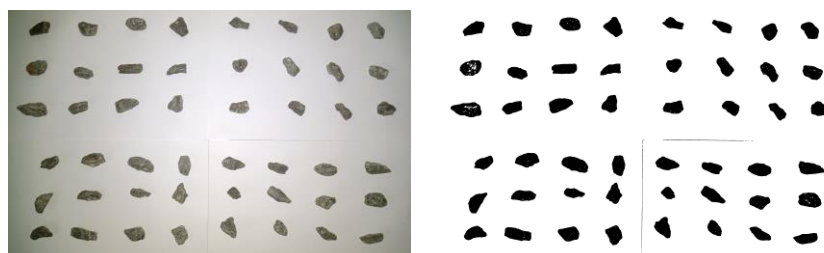


Figura 3. Captura e Renderização das Imagens do Agregado Graúdo.

3 RESULTADOS

As curvas granulométricas obtidas em ensaios convencionais foram comparadas com aquelas determinadas por meio das análises de imagem do *PartAn3D MAXI* e do *ImageJ*. Além disso, os resultados de dimensões das amostras e os parâmetros de forma foram extraídos dos ensaios mencionados anteriormente, incluindo o ensaio com paquímetro, conduzido com o lastro denominado de Brita #1.1/4.

3.1 Granulometria

A Figura 4 mostra os resultados das curvas granulométricas das quatro amostras analisadas. Em todas as amostras, o peneiramento foi realizado para determinar a distribuição granulométrica. As curvas de distribuição de tamanho das areias foram obtidas por meio de análises de imagem realizadas tanto com o *PartAn3D MAXI* quanto com o *ImageJ*. No caso do lastro, a amostra denominada Brita #3/4 foi analisada com o *ImageJ*, enquanto a amostra Brita #1.1/4 foi submetida à análise de imagem por meio do *PartAn3D MAXI*.

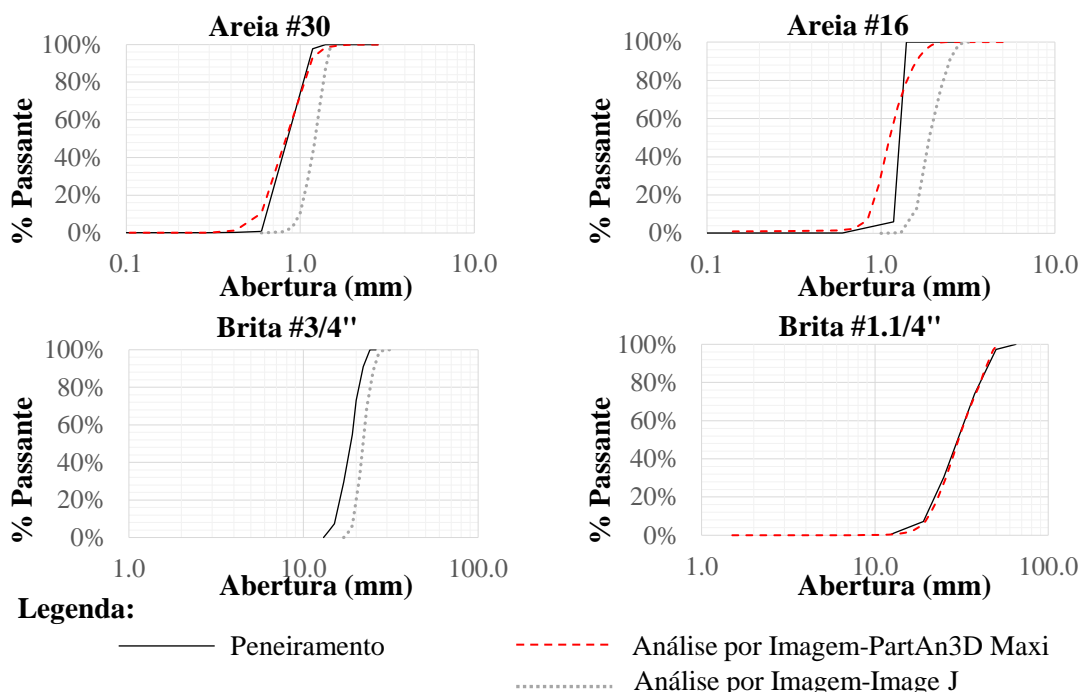


Figura 4. Determinação das Granulometrias.

A Tabela 1 apresenta os valores de D_{50} obtidos pelos três métodos utilizados. Observou-se que os desvios padrão, em relação ao ensaio de peneiramento, foram maiores em relação ao ensaio realizado com um *smartphone* e o *software ImageJ*. Os resultados das curvas obtidos com o *PartAn3D MAXI* apresentaram desvios inferiores a 0,2, enquanto os desvios associados ao uso do *ImageJ* atingiram até 1,13.

Tabela 1. Resultados dos D_{50} das amostras para cada ensaio.

Amostra	Peneiramento (mm)	<i>PartAn3D MAXI</i> (mm)	<i>ImageJ</i> (mm)
Areia #30	0,832	0,820	1,100
Areia #16	1,281	1,028	1,950
Brita #3/4	18,80	-	20,40
Brita #1.1/4	30,00	30,00	-

3.2 Tamanho das Partículas

O método tradicional de determinação da granulometria não considera aspectos de dimensão, classificando o grão com base no tamanho do seu menor lado. Já as análises de imagem permitem avaliar dimensões como comprimento e largura das partículas. Além disso, o *PartAn3D MAXI* possibilita a análise da espessura das partículas.

A Figura 5 e a Tabela 2 apresenta as comparações dos métodos de análise de imagem. Neste caso, não é possível determinar qual método é o mais adequado, pois as partículas são muito pequenas para serem medidas com um paquímetro ou outro método tradicional.

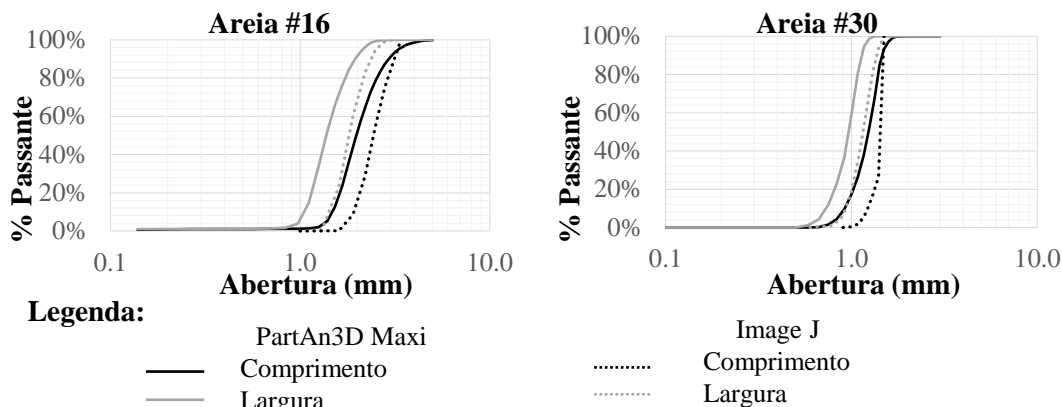


Figura 5. Determinação das Dimensões das Partículas.

Tabela 2. Resultados dos D_{50} das amostras para cada ensaio.

Amostra	<i>PartAn3D MAXI</i>		<i>ImageJ</i>	
	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
Areia #30	0,980	1,100	1,100	1,450
Areia #16	1,150	1,850	2,050	2,300

A amostra Brita #1.1/4 foi submetida a análise de imagem com o *PartAn3D MAXI* e também analisada em relação às suas dimensões com o método do paquímetro, conforme mostrado na Figura 6. Nesse caso, tanto os comprimentos quanto as espessuras apresentaram valores bastante semelhantes, conforme ilustrado na Tabela 3. No entanto, as larguras não apresentaram a mesma compatibilidade.

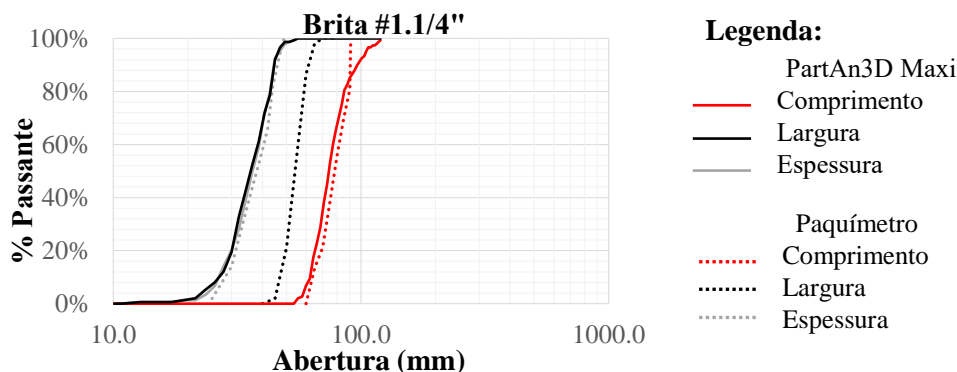


Figura 6. Determinação das Dimensões dos Lastros.

Tabela 3. Resultados dos D_{50} das amostras para cada ensaio.

Amostra	<i>PartAn3D MAXI</i>		Paquímetro		<i>PartAn3D MAXI</i>		Paquímetro	
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
Areia #16	46,0	48,0	47,0	53,0	74,0	77,0		

3.3 Determinação da Forma

Os índices de forma das partículas foram calculados pelos softwares com base nas dimensões das partículas. A Figura 7 apresenta os índices de forma das amostras de Areias e da Brita #3/4, obtidos a partir dos métodos de análise de imagem. Observa-se uma diferença significativa nos resultados entre os dois métodos. Os resultados encontrados pelo *ImageJ* sugerem que as partículas são mais próximas de círculos do que as obtidas pelo *PartAn3D MAXI*.

A amostra de Brita #1.1/4 foi submetida a uma medição das partículas pelo método do calibre. As dimensões encontradas foram relacionadas entre si, calculando-se as relações largura/comprimento e

espessura/largura. Esses mesmos índices também foram fornecidos pelo *PartAn3D MAXI*. Os resultados foram bastante semelhantes, conforme ilustrado na Figura 08.

Ferreira (2022) realizou uma classificação de acordo com a norma ABNT NBR 5564 (2011), que determina a forma dos fragmentos com base na esfericidade das partículas de agregado. Essa avaliação é feita por meio das relações entre dimensões perpendiculares entre si, como comprimento, largura e espessura. Com base nessas relações, cada partícula é classificada em quatro tipos de forma: cúbica, alongada, lamelar ou alongada-lamelar. Em sua pesquisa, concluiu que o método de análise dinâmica é bastante fiel a outros métodos, como o paquímetro, conforme apresentado na Tabela 4.

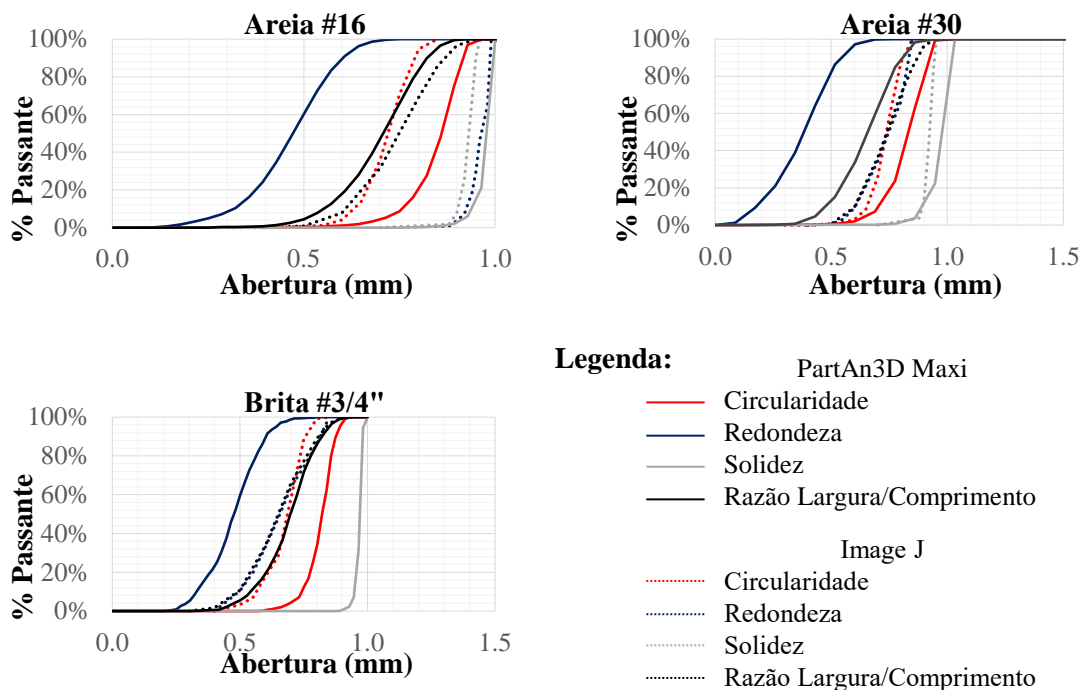


Figura 7. Índices de Forma.

Tabela 4. Classificação da Brita #1.1/4 de acordo com a ABNT NBR 5564 (Ferreira,2022).

Forma /Método	Paquímetro	Análise de Imagem Dinâmica
Lamelares e Alongadas	0%	0%
Alongadas	2%	2%
Lamelares	11%	8%
Não Lamelares e Não Alongadas	87%	90%

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compreensão das propriedades morfológicas dos agregados empregados em obras de construção é amplamente reconhecida como necessária. No entanto, os métodos tradicionais de obtenção desses parâmetros ainda apresentam desafios para a caracterização adequada desses agregados.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as possibilidades oferecidas pelos métodos disponíveis atualmente para caracterizar agregados de forma eficiente. A elucidação das propriedades desses materiais por meio de ensaios convencionais é uma prática comum, mas a demora para obter uma caracterização representativa de grandes quantidades de materiais ainda é um obstáculo para obras que utilizam agregados graúdos.

No caso de agregados miúdos, como as areias, é comum que laboratórios de geotecnia se limitem à caracterização por granulometria. No entanto, descobrir a morfologia desses materiais ainda é uma tarefa dispendiosa. Nesta pesquisa, foram analisados três métodos distintos de caracterização morfológica. O método padrão utilizou peneiramento para encontrar a granulometria e um paquímetro para caracterizar a morfologia dos lastros. O segundo método empregou um equipamento de análise de imagem dinâmica, que realiza toda a

caracterização por meio de equipamento e processa os dados com software associado. Por fim, foi utilizado um método de análise de imagem com um smartphone para capturar fotografias das partículas, que foram analisadas por software livre para gerar parâmetros de tamanho e forma.

Os resultados encontrados foram satisfatórios, especialmente com o equipamento de análise de imagem dinâmica. Os resultados obtidos com o *ImageJ* apresentaram maiores dispersões, possivelmente devido à capacidade do smartphone de gerar imagens precisas ou à capacidade de processamento do dispositivo.

O uso do método de análise de imagem dinâmica para realizar a composição granulométrica apresentou resultados satisfatórios quando comparado ao método convencional de peneiramento. Na caracterização da forma dos agregados, o método também produziu resultados semelhantes aos métodos atualmente utilizados, como o calibre e o paquímetro. Assim, deve-se avaliar a viabilidade da aplicação desses ensaios, considerando o tempo e o custo de uso dessa nova técnica.

A pesquisa foi concluída de forma satisfatória, dentro das limitações enfrentadas ao longo do projeto. A caracterização de agregados por meio do processamento digital de imagens com software gratuitos e equipamentos convencionais proporcionou resultados consistentes, ainda que não precisos. Além disso, os resultados permitiram obter a noção da granulometria morfológica do material. Em conclusão, as técnicas utilizadas para a caracterização de agregados mostraram-se adequadas para algumas propriedades de forma, mas ainda há espaço para avanços na caracterização completa.

Como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se explorar o uso de equipamentos e softwares mais avançados para obter uma caracterização mais completa das propriedades morfológicas dos agregados. Além disso, o desenvolvimento de métodos automáticos para a análise de partículas pode otimizar o processo de caracterização e fornecer resultados mais precisos e consistentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Furnas Centrais Elétricas S.A. pelo apoio financeiro desta pesquisa, mediante o Projeto de P&D BRAMS II, a qual é uma empresa estatal e subsidiária da Eletrobrás, e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 16915: Agregados – Amostragem. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2022.
- ABNT NBR 5564: Via Férrea – Lastro-Padrão – Requisitos e Métodos de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.
- DNIT 432/2020. Pavimentação – agregado – determinação das propriedades de forma por meio de processamento digital de imagens (PDI) – método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2020.
- Braga, A. L. M. (2022). Estudo da influência do tamanho e forma das partículas no comportamento mecânico de solos granulares. xx 114 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2022). DISSERTAÇÃO de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
- Diógenes, L. M. (2018). Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem.
- Liu, Q. B., Xiang, W., Budhu, M., & Cui, D. S. (2011). Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*, 32(1), 190–197.
- Norsyahariati, N. D. N., Hui, K. R., Juliana, A. G. A., (2016). The Effect of Soil Particle Arrangement on Shear Strength Behavior of Silty Sand. *EDP Sciences*.
- Pereira, B. S. (2022). Avaliação da Influência do Intemperismo nas Propriedades de um Lastro Ferroviário.
- Zuluaga, R. A. G., (2016). Relação entre características microestruturais e o comportamento macroscópico de solos granulares. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília.
- Wei, H. (2020) Quantifying the morphology of calcareous sands by dynamic image analysis. *International*.