

AVALIAÇÃO DOS FATORES DE FORMA DE PARTÍCULAS DE MÁRMORE POR ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS PARA APLICAÇÃO EM PEDRAS SINTÉTICAS

Natalia Santos Rodrigues¹, Lorena da Paixão Nunes da Silva¹, Nathalia da Silva Marques^{1,2}, Luciano Moerbeck Miranda^{1,2}, Belmira Benedita de Lima-Kühn^{1,2}, Tessie Gouvêa da Cruz Lopes^{1,2}

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Brasil
(nataliasantosrodriguesr@gmail.com)

²Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - UFRRJ

Resumo: O reaproveitamento de resíduos de mármore na produção de pedras artificiais constitui uma alternativa sustentável para a indústria de rochas ornamentais. Este trabalho caracterizou partículas de diferentes frações granulométricas por microscopia óptica e análise digital de imagem, avaliando circularidade, razão de aspecto e arredondamento. Os resultados evidenciaram diferenças morfológicas entre as frações, fornecendo informações relevantes para o empacotamento granular e otimização de misturas.

Palavras-chave: mármore; circularidade; alongamento; empacotamento de partículas; rocha artificial.

INTRODUÇÃO

A indústria de rochas ornamentais gera grandes volumes de resíduos durante as etapas de corte e beneficiamento, tornando necessária a busca por alternativas sustentáveis para o reaproveitamento desses materiais (Chiodi Filho, 2022; Bacarji *et al.*, 2013; Souza *et al.*, 2017). Entre as aplicações de maior potencial destaca-se a produção de pedras artificiais, nas quais as características geométricas das partículas desempenham papel fundamental no empacotamento granular e, conseqüentemente, nas propriedades físicas e mecânicas do produto final (Lee *et al.*, 2008; Ribeiro *et al.*, 2014).

Neste contexto, evidencia-se a importância da caracterização morfológica como ferramenta de apoio ao aproveitamento sustentável de resíduos de mármore na produção de materiais compósitos do tipo pedra artificial. A caracterização dos fatores de forma permite avaliar a tendência geométrica das partículas e sua influência potencial na densificação do sistema particulado (Fischmeister, H. F., & Arzt, E., 1983). Partículas com maior circularidade e menor razão de aspecto tendem a favorecer o rearranjo e o empacotamento granular, reduzindo a quantidade de vazios e a demanda de resina na composição das pedras artificiais (Agrizzi, 2020). Dessa forma, a caracterização da forma das partículas fornecem subsídios para a seleção e combinação de diferentes faixas granulométricas para o desenvolvimento de formulações com maior densidade de empacotamento e melhor desempenho tecnológico.

Este trabalho teve como objetivo caracterizar os fatores de forma de partículas de resíduos de mármore por meio de técnicas de microscopia óptica associadas ao processamento e análise digital de imagens, visando sua aplicação como carga mineral em pedras artificiais. O resíduo de mármore foi segregado em classes granulométricas e imagens das partículas foram capturadas utilizando um microscópio óptico com câmera acoplada. Para o processamento e análise de imagens foram usadas rotinas utilizando o software ImageJ®. Foram extraídos os parâmetros forma: circularidade, razão de aspecto e arredondamento. Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente e apresentados histogramas de distribuição de frequência.

MATERIAL E MÉTODOS

Material

As partículas de mármore utilizadas neste estudo foram obtidas a partir da cominuição de resíduos de cacos de mármore provenientes de uma marmoraria localizada no município de Paracambi, Rio de Janeiro. O material foi previamente seco em estufa e submetido à classificação granulométrica por peneiramento, visando a obtenção de frações particuladas adequadas para a caracterização morfológica.

A distribuição granulométrica das partículas foi determinada por meio de ensaio de peneiramento mecânico utilizando um conjunto de peneiras normalizadas da série Tyler. O material foi submetido

à vibração durante tempo previamente estabelecido, promovendo sua separação em diferentes faixas granulométricas.

Com base nos resultados do peneiramento, o resíduo foi segregado em três classes de tamanho: partícula fina ($< 0,075$ mm), partícula média ($0,075\text{--}0,425$ mm) e partícula grossa ($0,425\text{--}1,7$ mm).

Caracterização morfológica usando processamento e análise de imagens obtidas por microscopia

As imagens foram obtidas em microscópio óptico metalográfico BEL MTM-1A, equipado com câmera digital USB de 5 MP. As aquisições foram realizadas com ampliação total de $50\times$, utilizando objetiva de $5\times$ e ocular de $10\times$. A captura da imagem das partículas grossas foi realizada usando um smartphone, no qual foi instalado um aplicativo que permite a ampliação da imagem (partículas) que se observa, simulando uma lupa (microscópio simples). Neste trabalho foi usado o aplicativo Magnifying Glass® para o sistema iOS.

O número mínimo de imagens necessárias para a análise foi determinado com base no modelo probabilístico proposto por Mainy (1996), adotando-se um nível de confiança de 95%. Inicialmente, foram adquiridas imagens preliminares, um total de 10 (dez) para estimativa do número médio de partículas por campo visual e definição da amostragem estatisticamente representativa.

As imagens obtidas foram processadas utilizando o software ImageJ® (National Institutes of Health, EUA). A metodologia para o processamento e análise de imagens foi usada para todas as imagens preliminares e para as definidas no cálculo da amostragem. Inicialmente foi realizada a segmentação das imagens por *limiarização* (thresholding), permitindo a separação das partículas em relação ao fundo. Em seguida, foram aplicados filtros aprimoramento dos contornos dos objetos. Nos casos em que ocorreram partículas em contato ou aglomeradas, foi empregado o operador morfológico *watershed*, permitindo a individualização dos objetos e reduzindo erros associados à extração dos parâmetros geométricos. Os parâmetros morfológicos foram extraídos por meio da ferramenta Analyze Particles do software. Os parâmetros de fatores de forma foram determinados: circularidade, razão de aspecto e arredondamento.

A circularidade foi utilizada para avaliar o grau de aproximação da partícula a uma geometria circular, enquanto a razão de aspecto permitiu quantificar o alongamento das partículas. O parâmetro de arredondamento foi empregado para avaliar a regularidade geométrica e a presença de arestas ou reentrâncias superficiais (GONZALEZ & WOODS, 2000). Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente por meio do cálculo dos valores

médios, desvios-padrão, valores mínimos e máximos, além da construção de histogramas de distribuição de frequência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1(a) e (b) apresenta exemplos de imagem para as partículas de mármore finas e médias obtidas por microscopia óptica. A Figura 1(c) apresenta exemplo de imagem das partículas grossas obtidas por aplicativo que simula uma lupa (microscópio simples).

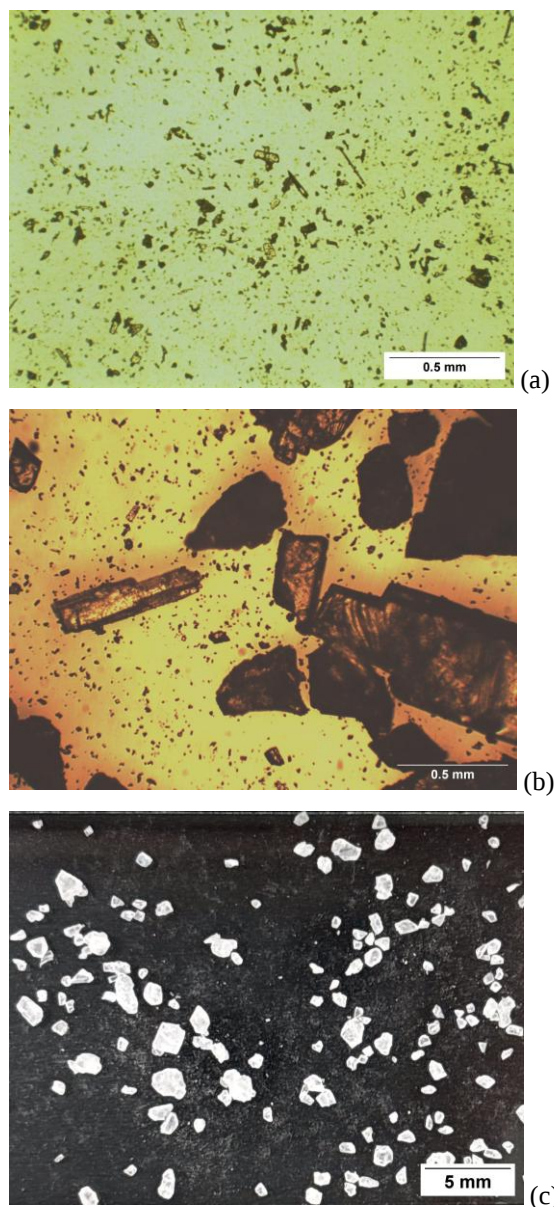


Figura 1. (a) e (b) Exemplo de imagem obtida por microscopia óptica das partículas de mármore (a) fina e (b) média; (c) apresenta exemplo de imagem das partículas grossas obtidas por aplicativo que simula uma lupa (microscópio simples).

A imagem original foi *segmentada* e determinado o número médio de partículas por imagem, permitindo avaliar a representatividade estatística da amostragem

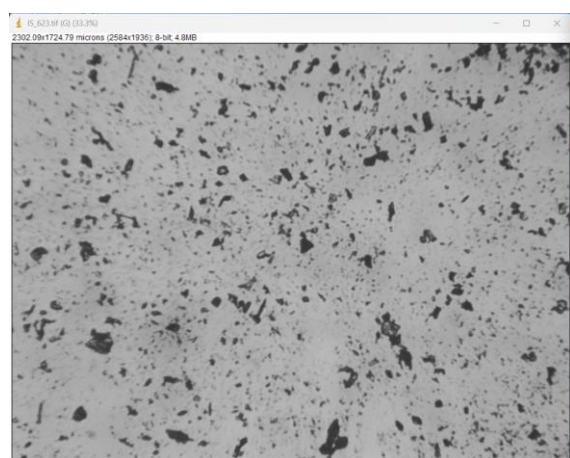
utilizada usando o modelo probabilístico proposto por Mainy (1996). Na Tabela 1 são apresentados os valores obtidos para cada imagem nos diferentes intervalos granulométricos.

Para uma confiabilidade de 95% a quantidade de imagens obtidas no cálculo da amostragem foi processada utilizando a metodologia proposta e extraídos os parâmetros de forma.

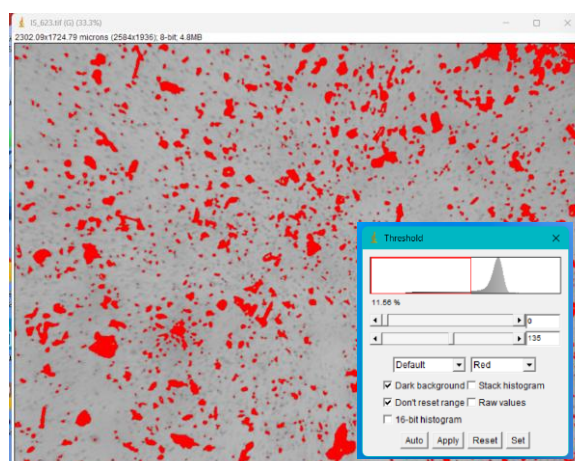
Tabela 1. Valores do número médio de partículas por imagem.

Imagem	Fina	Média	Grossa
1	1083	22	68
2	1712	25	36
3	1176	41	55
4	2257	45	37
5	1992	35	54
6	2715	43	99
7	2371	13	91
8	2584	11	98
9	2848	23	132
10	2052	16	107
Amostragem (N)	2117	27,3	77,7

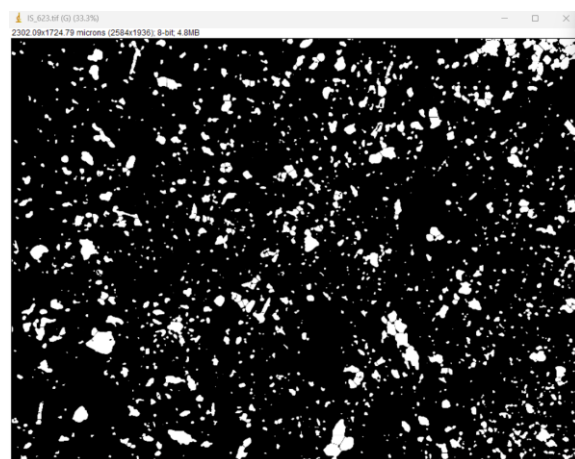
A Figura 2 apresenta as etapas empregadas na rotina de processamento digital, incluindo a imagem original, a segmentação por limiarização, a aplicação do operador morfológico watershed para separação de partículas em contato e a imagem final utilizada para extração dos parâmetros geométricos.



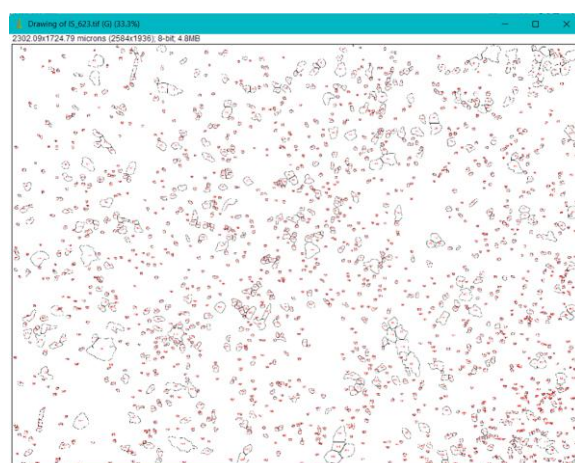
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2. Etapas empregadas na rotina de processamento digital: (a) imagem original; (b) a segmentação por limiarização; (c) a aplicação do operador morfológico watershed para separação de partículas em contato e (d) a imagem final utilizada para extração dos parâmetros geométricos.

Os valores para o parâmetro de circularidade obtidos para cada conjunto de partículas de mármore (fina, média e grossa) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios e desvios padrão da circularidade das partículas de mármore para as diferentes frações granulométricas.

Partícula	Média (Desvio Padrão)
Fina	0,79 (0,14)
Média	0,62 (0,16)
Grossa	0,78 (0,14)

O parâmetro de circularidade permite avaliar o grau de aproximação da partícula a uma forma circular, assumindo valores entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, mais circular é a partícula. Os valores obtidos indicam que as partículas de mármore apresentam predominância de formas arredondadas, com as frações fina e grossa exibindo maiores valores médios de circularidade em comparação à fração média. Esse comportamento sugere uma geometria mais regular das partículas, característica que pode favorecer o empacotamento granular e contribuir para uma melhor distribuição das partículas em compósitos e outros materiais.

A distribuição da circularidade para cada conjunto de partículas de mármore (fina, média e grossa) encontra-se apresentada na Figura 3.

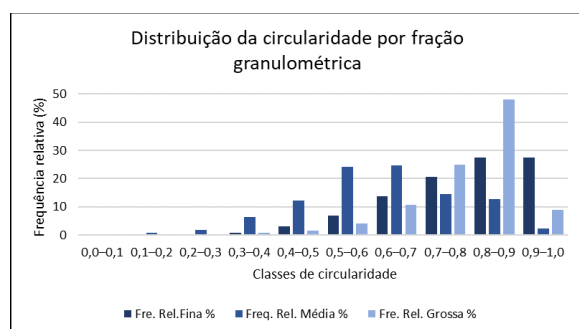


Figura 3. Distribuição da circularidade das partículas de mármore nas frações granulométricas fina, média e grossa.

Partículas com maiores valores de circularidade tendem a apresentar menor atrito interparticulado e melhor acomodação durante o empacotamento, favorecendo a redução dos vazios internos da mistura. Em contrapartida, partículas excessivamente angulares podem dificultar o rearranjo das frações granulométricas e aumentar a quantidade de espaços vazios.

Os valores para o parâmetro de fator de forma obtidos para cada conjunto de partículas de mármore (fina, média e grossa) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios e desvios padrão da razão de aspecto das partículas de mármore para as diferentes frações granulométricas.

Partícula	Média (Desvio Padrão)
Fina	1,60 (0,16)
Média	1,94 (1,09)
Grossa	1,46 (0,37)

Esse parâmetro expressa a relação entre os eixos principais da partícula e constitui um indicador do seu grau de alongamento. Os resultados mostram que a maior parte das partículas apresenta valores concentrados na faixa de 1,0 a 2,0, indicando predominância de partículas alongadas, com geometria próxima a equidimensional. A fração média apresentou maior razão de aspecto média, evidenciando maior alongamento em relação a fração fina e grossa.

A distribuição do fator de forma para cada conjunto de partículas de mármore (fina, média e grossa) encontra-se apresentada na Figura 4.

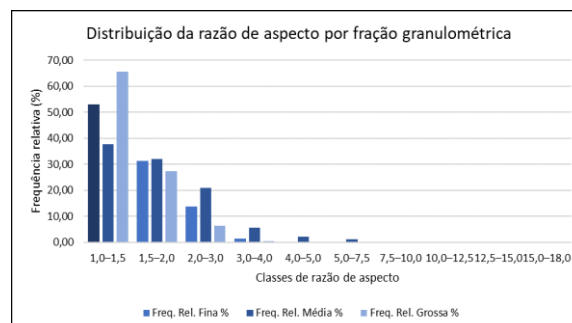


Figura 4. Distribuição da razão de aspecto das partículas de mármore nas frações granulométricas fina, média e grossa.

Do ponto de vista do empacotamento granular, partículas com razão de aspecto próxima da unidade tendem a apresentar melhor acomodação espacial, contribuindo para uma distribuição mais homogênea das tensões e para o aumento da densidade de empacotamento da mistura.

Os resultados de arredondamento são apresentados na Tabela 4. Esse parâmetro permite avaliar a regularidade geométrica das partículas e a presença de arestas ou reentrâncias superficiais. Valores próximos de 1 indicam partículas mais arredondadas, enquanto valores inferiores refletem partículas com contornos mais irregulares.

Tabela 4. Valores médios e desvios padrão do arredondamento das partículas de mármore para as diferentes frações granulométricas.

Partícula	Média (Desvio Padrão)
Fina	0,67 (0,16)
Média	0,59 (0,18)
Grossa	0,72 (0,14)

Observa-se que as partículas de mármore apresentam valores de arredondamento compreendidos entre 0,06 e 1,00, com médias variando de 0,59 a 0,72 entre as diferentes frações granulométricas. Esses resultados indicam predominância de partículas com moderado a elevado grau de arredondamento, evidenciando superfícies relativamente regulares e menor presença de arestas pronunciadas. Destaca-se que a fração grossa apresentou o maior valor médio de arredondamento, seguida da fração fina, enquanto a fração média apresentou o menor valor médio, sugerindo maior irregularidade superficial nessa faixa granulométrica.

A distribuição do alongamento para cada conjunto de partículas de mármore (fina, média e grossa) encontra-se apresentada na Figura 5.

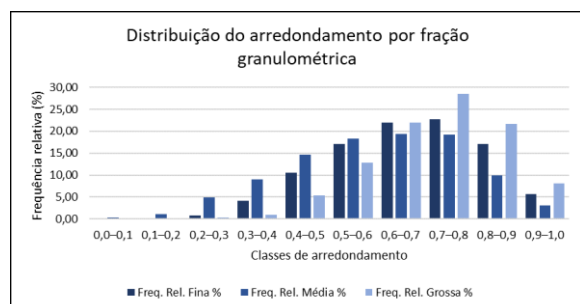


Figura 5. Distribuição do arredondamento das partículas de mármore nas frações fina, média e grossa.

A combinação dos parâmetros de circularidade, razão de aspecto e arredondamento permite concluir que as partículas de mármore analisadas possuem potencial para utilização como carga mineral em pedras artificiais. A morfologia observada influencia diretamente a eficiência do empacotamento granular, podendo contribuir para a redução da porosidade, diminuição do consumo de resina e melhoria das propriedades mecânicas da pedra artificial.

Dessa forma, a análise dos fatores de forma constitui uma ferramenta importante para a seleção e otimização das frações particuladas empregadas na fabricação de pedras artificiais, permitindo correlacionar características geométricas das

partículas com o desempenho tecnológico do material produzido.

CONCLUSÃO

A análise digital de imagens utilizando o software ImageJ® mostrou-se uma ferramenta eficiente para a caracterização dos fatores de forma das partículas de resíduos de mármore, permitindo a determinação da circularidade, razão de aspecto e arredondamento das frações fina, média e grossa.

Os resultados evidenciaram diferenças morfológicas entre as frações granulométricas, indicando que as partículas finas e grossas apresentaram maiores valores de circularidade e arredondamento, enquanto a fração média apresentou maior razão de aspecto, caracterizando partículas relativamente mais alongadas. Essas características influenciam diretamente o comportamento das partículas durante o empacotamento granular, podendo afetar a densificação da mistura, a distribuição de vazios e a demanda de resina na produção de pedras artificiais.

De forma geral, a caracterização dos fatores de forma forneceu informações relevantes sobre a geometria das partículas, demonstrando o potencial da análise digital de imagens como ferramenta para a seleção e otimização de cargas minerais. Dessa forma, os resultados obtidos contribuem para o desenvolvimento de misturas mais eficientes e para o aproveitamento sustentável de resíduos de mármore na fabricação de materiais compósitos.

A análise dos fatores de forma permitiu avaliar o potencial de empacotamento das partículas de mármore, uma vez que partículas mais equidimensionais e arredondadas tendem a favorecer a redução dos vazios e o aumento da densidade de empacotamento em compósitos do tipo pedra artificial.

REFERÊNCIAS

- AGRIZZI, C. P. Desenvolvimento de rocha artificial a partir de resíduos de quartzito utilizando resinas epóxi e poliuretana vegetal. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2020.
- BACARJI, E. *et al.* Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. *Construction and Building Materials*, v. 45, p. 1-10, 2013.
- CHIODI FILHO, Cid. A problemática dos rejeitos de rochas ornamentais. *Revista Brasil Mineral*, n. 423, ago. 2022.
- CRUZ, T.G. da. Monitoramento por microscopia óptica e processamento digital de imagens do processo de conformação cerâmica por



conformação com amidos comerciais. 2007. 132 f.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2007.

FISCHMEISTER, H. F., & ARZT, E. (1983).
Densification of Powders by Particle Deformation.
Powder Metallurgy, 26(2), 82–88.

GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. Processamento de
Imagens Digitais. Edgard Blücher. São Paulo.
2000.

SOUZA, L. G. M. *et al.* Composite utilizing residues
of marble and granite for building popular
homes. Journal of Building Engineering, v. 9, p.
192-197, 2017.