

UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE IMAGEJ PARA DETERMINAR A MORFOLOGIA DOS AGREGADOS

Haline Dugolin Ceccato ¹; Ana Helena Back²; Andrea Valli Nummer³, Rinaldo José Barbosa Pinheiro ⁴,

Resumo – A forma do agregado influencia diretamente nas obras de engenharia, em que esse tipo de material é solicitado. A avaliação e a caracterização da forma do agregado são s por meio de normas nacionais e internacionais, que necessitam de operadores com conhecimento prévios desses ensaios. Além de demandar tempo, podem ocorrer erros ou equívocos durante a avaliação. Diante disso, este artigo apresenta um método para obtenção da morfologia dos agregados com o intuito de transformar esse tipo de avaliação mais rápida e eficaz. Para tanto, foi utilizada a análise computacional de imagem através do *software ImageJ*. a fim de avaliar a forma de dois tipos de agregados oriundos de províncias litológicas diferentes, localizadas no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. No geral, os resultados mostraram que o *software* mostra-se como uma importante ferramenta no tratamento e análise quantitativa de imagens para obter a morfologia dos agregados quanto a fator de forma, esfericidade e arredondamento.

Abstract – The shape of the aggregate directly influences the engineering works, in which this type of material is requested. The previous evaluation of the shape is through national and international methods, which are sets of standards with knowledge of these tests. In addition to demanding time, errors or mistakes may occur during the assessment. Therefore, this article presents a method for the type of morphology of the aggregates to make this assessment faster and more effectively. For that, a computational image analysis was used through the ImageJ software to evaluate the shape of two types of aggregates from different lithological provinces located in Rio Grande do Sul and Santa Catarina. Overall, the aggregates obtain the treatment and the result as an important tool for the analysis of aggregated images to obtain the morphology of the aggregates in terms of shape factor, sphericity and circularity.

Palavras-Chave – Morfologia; agregados; processamento digital de imagem.

¹ Geól., Mestra em Eng. Civil, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM (55) 9811724-33, haline.ceccato@gmail.com

² Eng. Civil, Doutora Eng. Civil, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM (51) 9990742278, anahback@hotmail.com

³ Geól. Dr. Geotecnia, Prof. Tit., Universidade Federal de Santa Maria – UFSM (55) 996071932, a.nummer@gmail.com

⁴ Eng. Civil, Dr. Geotecnia, Prof. Tit., Universidade Federal de Santa Maria – UFSM (55) 999473048, rinaldo@ufsm.br

1. INTRODUÇÃO

A caracterização dos agregados por meio da determinação da forma é de vital importância para sua utilização nas obras de engenharia. Ao longo dos anos, diversos pesquisadores vêm discutindo sobre a morfologia dos agregados, chegando a um consenso de que a geometria das partículas pode ser expressa por intermédio de três propriedades, sendo elas: forma, angularidade e textura superficial (MASAD et al., 2001; SUKHWANI et al., 2006; KIM e SOUZA, 2009; BESSA et al., 2011).

Dada a importância dessa característica do agregado, diversas metodologias, tanto brasileiras quanto estrangeiras, permitem avaliar a forma, qualitativamente e quantitativamente, por meio de medidas diretas da pedra britada. A NBR 7389-1 (ABNT, 2009) permite obter grau de esfericidade e arredondamento dos grãos, porém, para realização do ensaio, faz-se necessário um operador com conhecimento técnico acerca do assunto.

Conforme discutido por Al-Rousan e Masad et al. (2007), assim como na NBR 7389-1 (ABNT, 2009), alguns métodos acabam apresentando certa imprecisão nos dados por requerem que o ensaio seja executado por um técnico qualificado, além de exigir uma amostragem representativa do material, o que os torna limitados e trabalhosos.

Por isso, nos últimos anos, vários pesquisadores vêm utilizando metodologias de Processamento Digital de Imagens (PDI), com o propósito de caracterizar os agregados de forma mais rápida e precisa. Dessa forma, este artigo apresenta os resultados preliminares do uso do PDI por intermédio do *software ImageJ*, para caracterizar a forma de britas oriundas de diferentes litologias.

O PDI traz novas oportunidades no desenvolvimento de técnicas para determinação das características dos agregados. Nesse viés, essa metodologia é mais precisa e consome menos tempo, quando comparada com os métodos tradicionais (FERNLUND, 2005). O *ImageJ* foi desenvolvido em 1997 por Wayne Rasband, é um software livre, que não necessita de licença para sua utilização. É bastante utilizado para análise de imagens, atuando através da intensidade, ou nível de cinza dos pixels. Esse programa mede diversos valores geométricos, como área, que ocorre de acordo com a contagem de pixel das regiões selecionadas (Hannickel et al., 2012), além de fornecer dados como perímetro, diâmetro de *Feret*, entre outros parâmetros.

Apesar do *software ImageJ* ainda ser pouco utilizado, pesquisas que fizeram o uso dessa tecnologia apresentaram resultados positivos. Guilherme et al. (2015) avaliaram sedimentos arenosos de praia, através de imagens digitais com a premissa da criação de um protocolo de mensuração de partículas no *software ImageJ – Fiji*. Os autores destacaram bons resultados e complementam que a utilização de *softwares* livres é um forte condicionante para o sucesso dessa técnica. Mello (2018), em sua pesquisa de doutorado, utilizou o *software ImageJ* para incrementar a análise de forma das areias, obtendo os resultados de arredondamento e esfericidade.

Na pavimentação, cabe destacar os trabalhos desenvolvidos por Lantieri et al. (2016), Januthe et al. (2018) e Abed & Abed (2020). Lantieri et al. (2016) utilizaram o programa *ImageJ* como alternativa para avaliar a afinidade do betume com o agregado, pois, de acordo com a norma DNER ME 078/94, que rege este ensaio, o agregado é classificado de modo visual como satisfatório ou não satisfatório. Januthe et al. (2018) propuseram, por meio do PDI, a criação de intervalos numéricos para a classificação de agregados miúdo, pois os parâmetros fornecidos pela análise visual estabelecida pela NBR 7389-1 (ABNT, 2009) não são um método de classificação confiável por depender do conhecimento técnico do operador. Por fim, Abed & Abed (2020) fizeram o uso do *software ImageJ Fiji* com o objetivo de caracterizar os agregados utilizados na mistura asfáltica a quente, bem como compreender as propriedades de posição e orientação, após o processo de compactação. Os autores concluíram que o PDI é uma metodologia simples e rápida, para caracterizar as formas dos agregados e orientações. Além disso, permitiu compreender a tendência dos agregados estudados ao se estruturar durante processo de compactação. Os procedimentos adotados pelos autores em cada estudo mencionado mostraram que o software atendeu aos objetivos propostos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A rotina de aquisição de imagens tem sido usada, recentemente, para quantificar características de forma e uma série de parâmetros pode ser obtido por intermédio do *ImageJ*. Nesta pesquisa, foram extraídas medidas de forma (equação 1), conhecida como fator de forma (FF), calculada conforme proposto por Masad et al. (2001), onde A é a área e P o perímetro da partícula.

$$FF = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (1)$$

O FF compara o perímetro de um círculo equivalente ao perímetro da partícula. Um círculo equivalente tem a mesma área que a partícula e, como a angularidade e a textura influenciam no perímetro da partícula, o FF não expressa apenas a forma, mas também reflete angularidade e textura (Masad et al., 2001).

O arredondamento (*roundness*) descreve as principais características das superfícies, como as irregularidades e as saliências da partícula, sendo definida como a razão entre o raio médio de curva dos cantos e das arestas da partícula e o raio da esfera máxima em que pode ser inscrita. O arredondamento (R) é calculada conforme proposto no próprio *software* (equação 2), onde *major axis* refere-se ao maior comprimento do material analisado.

$$Round = \frac{4A}{\pi * major_axis^2} \quad (2)$$

Por fim, a esfericidade foi calculada (equação 3) com os diâmetros de *Ferret*, sendo designada por *aspecto ratio* (AR), que representa a razão entre o diâmetro mínimo e o diâmetro máximo.

$$Esfericidade (AR) = \frac{Diâmetro\ de\ Ferret\ Menor}{Diâmetro\ de\ Ferret\ Maior} \quad (3)$$

O estudo foi realizado com agregados selecionados, que são oriundos dos trabalhos de Back (2018) e Ceccato (2021), provenientes de duas jazidas, uma de origem ígnea (basalto) e a outra metamórfica (biotita gnaisse), localizadas nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, respectivamente. Para avaliar a forma, foram selecionados, ao total, 203 amostras coletadas das pilhas 3/4", que foram separadas pelo peneiramento em duas frações, a saber: 1/2" (12,5 mm) e 3/8" (9,5 mm). Para cada litologia foi preparada uma amostra com aproximadamente 100 agregados, sendo 50 para cada uma das frações (3/4" e 3/8"), representativas de cada pedreira.

A Figura 1 apresenta os parâmetros obtidos após o processamento digital da imagem, para obtenção do fator de forma, arredondamento e esfericidade.

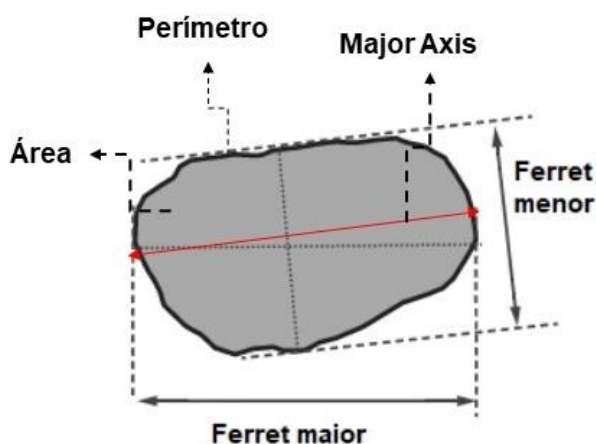


Figura 1. Parâmetros obtidos após o processamento digital da imagem utilizando o *software ImageJ*

A Figura 2 mostra as duas litologias utilizadas neste estudo, basalto (SJ) e biotita gnaisse (VOG), os agregados das respectivas rochas e as imagens obtidas após o processamento digital de imagem utilizando o *software ImageJ*.






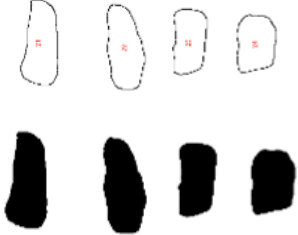
Rocha	Agregado	Imagem após processamento
 <p>A) Rocha Basalto (SJ)</p>	 <p>B) Fração 1/2"</p>	 <p>C) Fração 1/2" pós processamento</p>
 <p>D) Rocha Biotita Gnaisse (VOG)</p>	 <p>E) Fração 3/8"</p>	 <p>F) Fração 3/8" pós processamento</p>

Figura 2. Rochas utilizadas na pesquisa: SJ (basalto) e VOG (biotita gnaisse), agregados e imagens após o processamento das imagens

2.1. Processamento digital das imagens

A aplicação da técnica PDI envolve a digitalização de uma imagem real e, após são realizadas as análises, com a finalidade de obtenção dos parâmetros relacionados à forma (fator de forma, arredondamento e esfericidade). A técnica utilizada para a digitalização dos agregados baseou-se em: Guilherme et al. (2015), Lantieri et al. (2016), Obaidat et al. (2017) e Ghuzlan et al. (2019).

Para obtenção das imagens, foi utilizado o celular da marca Redmi note7 e confeccionado um pequeno estúdio fotográfico com o fundo e laterais de cor branca, para evitar interferência de sombra e obter uma melhor detecção das bordas de cada agregado. Os agregados foram posicionados no fundo do estúdio, deixando um espaçamento entre eles e, com auxílio duas lâmpadas (com fluxo luminoso de 840 lm e luz branca), foi projetado um feixe luminoso com ângulo de incidência de 45°, para evitar reflexões e diminuir os efeitos de sombras. O celular foi fixado no centro do estúdio e, a uma distância de 35 cm dos agregados, as imagens foram registradas. A rotina adotada no processamento das imagens por intermédio do *ImageJ* encontra-se detalhada no esquema apresentado na Figura 3.

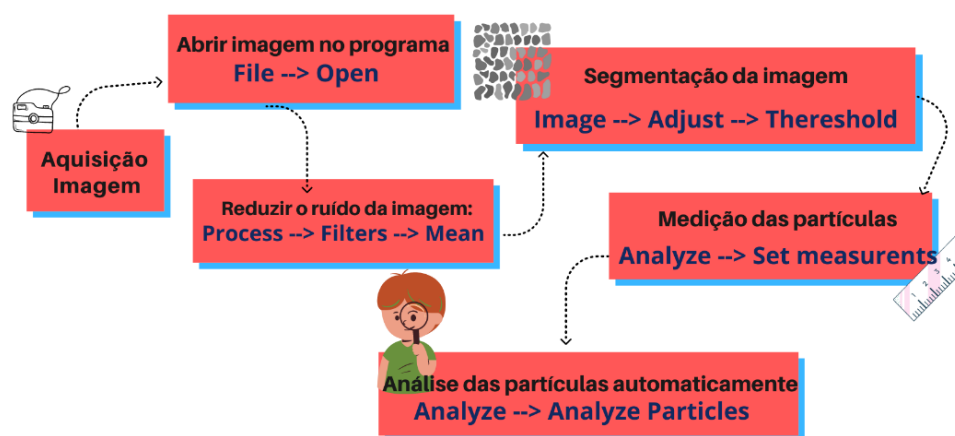


Figura 3. Metodologia aplicada no processamento das imagens.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 1, são apresentadas as análises estatísticas com os resultados das caracterizações dos agregados analisados, conforme valores obtidos para o parâmetro de arredondamento (R), fator de forma (FF) e esfericidade.

Tabela 1. Resultado obtido para o parâmetro de arredondamento (R), fator de forma (FF) e esfericidade.

Caracterização da forma	Parâmetros Estatísticos	Pedreira/Fração			
		VOG (1/2") - 50	VOG (3/8") - 50	SJ (1/2") - 50	SJ (3/8") - 53
Arredondamento (R)	Média	0,75	0,62	0,74	0,73
	Máximo	0,93	0,89	0,97	0,96
	Mínimo	0,54	0,36	0,36	0,45
	Mediana	0,76	0,60	0,78	0,74
	Desvio Padrão	0,9	0,14	0,15	0,13
Fator de Forma (FF)	Média	0,79	0,76	0,77	0,75
	Máximo	0,87	0,88	0,89	0,88
	Mínimo	0,52	0,63	0,63	0,60
	Mediana	0,81	0,77	0,79	0,77
	Desvio Padrão	0,07	0,06	0,06	0,06
Esfericidade	Média	1,36	1,68	1,41	1,42
	Máximo	1,85	2,76	2,76	2,19
	Mínimo	1,07	1,12	1,03	1,04
	Mediana	1,32	1,64	1,28	1,36
	Desvio Padrão	0,18	0,39	0,37	0,26

Estatisticamente, os resultados apresentaram baixo valor de desvio padrão, ou seja, os dados mostraram pouca variação entre as amostras. Embora a baixa variação das médias entre as frações de uma mesma jazida, nota-se uma tendência do parâmetro de arredondamento e fator de forma, à medida que diminui a fração, também diminuem. Ressalta-se que, quanto mais próximo de 1 forem esses parâmetros, maior a tendência à forma esférica o agregado terá, portanto, para ambas as jazidas estudadas, pode-se inferir que os agregados da fração 1/2" (12,5 mm) tendem a ser mais esféricos/cúbica em comparação aos agregados da fração 3/8" (9,5 mm). Por sua vez, a esfericidade apresentou comportamento inverso, mas coerente com os demais parâmetros, pois quanto maior o valor, menor a esfericidade, mais alongado é o agregado.

Ceccato (2021) realizou para os agregados da rocha VOG (biotita gnaiss) a avaliação da forma por intermédio dos ensaios de laboratório: DNER-ME 086/94 (índice de forma com crivo redutor), DAER-EL 108/01 (índice de lamelaridade) e ASTM d 4791/15 (Paquímetro Calipter). De acordo com os critérios utilizados nessas normas, o crivo redutor pode ser correlacionado ao índice de arredondamento e os ensaios de lamelaridade, com a esfericidade. Ao comparar os resultados obtidos em laboratório com aqueles do PDI, observou-se que os resultados de arredondamento

apresentaram comportamento semelhante ao obtido pelo crivo redutor, com valores iguais a 0,82 para fração 1/2" e 0,66, 3/8", ou seja, quanto maior o valor, mais cúbica é a forma do agregado.

Os valores de lamelaridade avaliados pela placa DAER apresentaram comportamento oposto ao avaliado pela esfericidade, enquanto os obtidos pelo paquímetro calíper foram semelhantes. Em outras palavras, os agregados da fração 3/8" exibiram forma mais lamelar em comparação a fração 1/2". A lamelaridade avaliada pelo paquímetro calíper tende a ser mais compatível à esfericidade obtida no PDI. Tal análise não foi possível de ser realizada com os dados de Back (2018), pois, em seu trabalho, a autora mensurou o índice de forma e lamelaridade da pilha, ou seja, incorporou no resultado às diversas frações granulométricas presentes.

Nas figuras 4 a 5, podem ser vistos os gráficos da distribuição de frequência dos valores de arredondamento, fator de forma e esfericidade, respectivamente, com base nos resultados de 203 agregados.

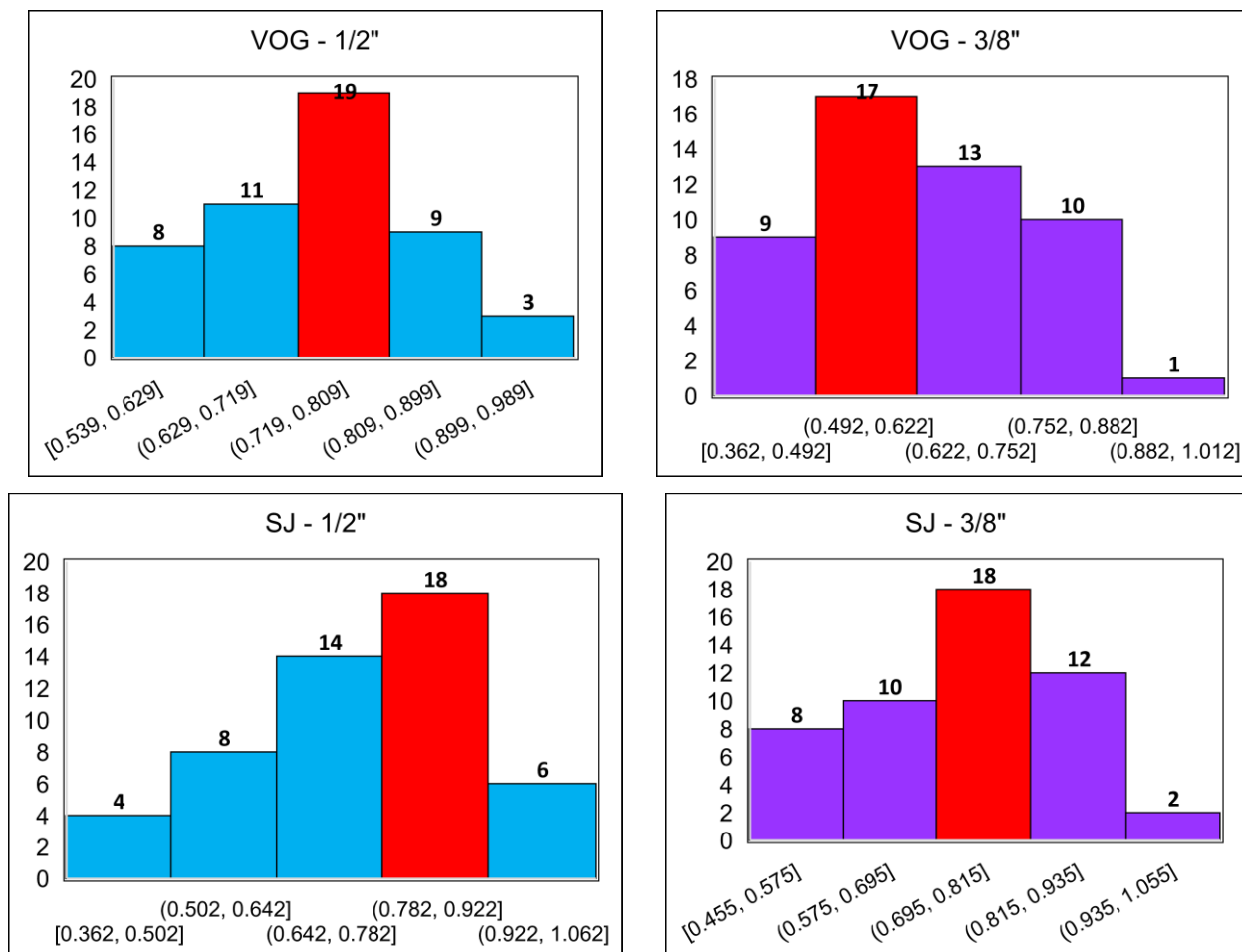


Figura 4. Distribuição da frequência acumulada – arredondamento.

Com base na Figura 4, observa-se que, com exceção da fração 3/8" da pedra VOG, as demais apresentam assimetria negativa, ou seja, os dados tendem a concentrar valores de arredondamento superior à média, enquanto a fração 3/8" da pedra VOG, a assimetria positiva, indica que o arredondamento para o conjunto de amostra analisado mostrou valores inferiores à média.

Os agregados da pedra SJ (fração 1/2" e 3/8") apresentam forma mais esférica com concentrações nos intervalos 0,782 – 0,922 e 0,695-0,815, respectivamente, em comparação aos agregados da pedra VOG (0,719-0,809 e 0,492-0,622, respectivamente).

Por sua vez, na Figura 5, todas as frações apresentaram assimetria negativa, portanto, a maior concentração dos dados é superior ao apresentado na média. Entretanto, diferente dos

resultados obtidos no arredondamento, para o fator de forma, a pedreira VOG apresentou agregados em intervalo de classe superiores aos agregados da pedreira SJ.

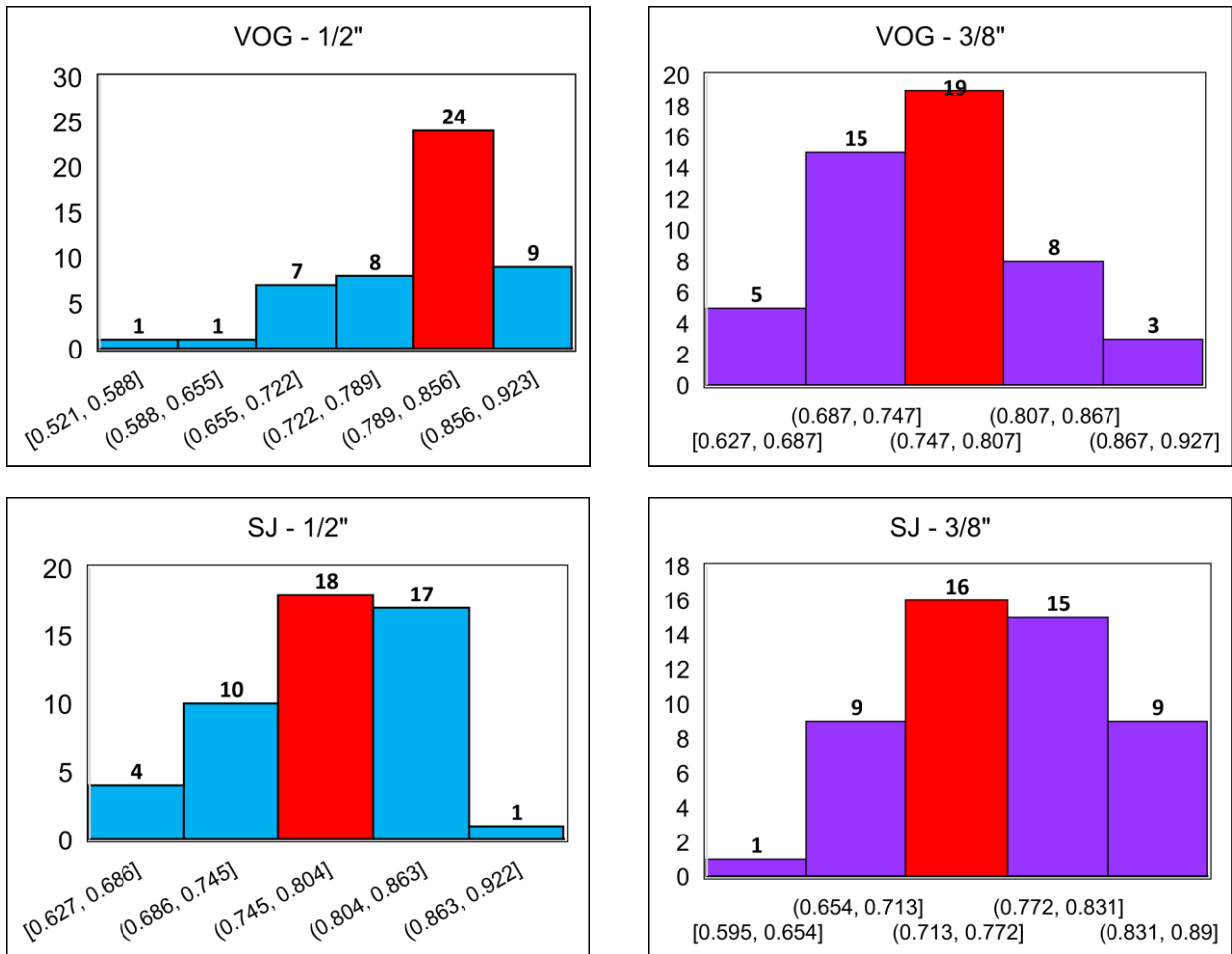
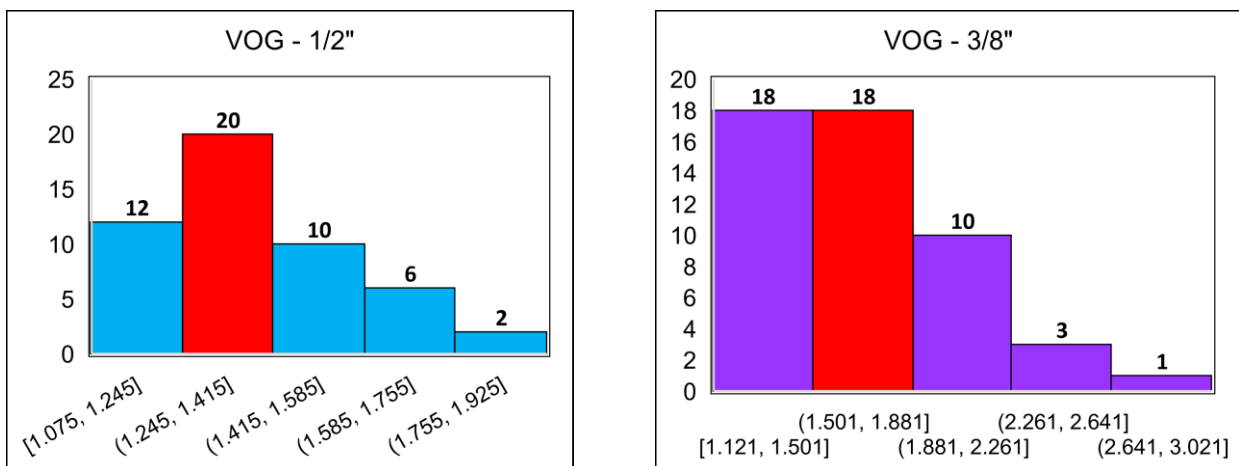


Figura 5 Distribuição da frequência acumulada – Fator de forma

Os resultados de esfericidade apresentados na distribuição da frequência acumulada (Figura 6) mostram uma assimetria positiva, indicando que, no geral, os agregados encontram-se concentrados nos valores inferiores ao obtido na média com todos os dados. Além disso, os agregados da pedreira VOG, para ambas as frações (1/2 e 3/8), indicam esfericidade superior aos agregados da pedreira SJ. Tal resultado já era esperado, pois os agregados da pedreira VOG podem sofrer influência da estrutura foliada presente na biotita gnaisse, resultando uma forma mais alongada.



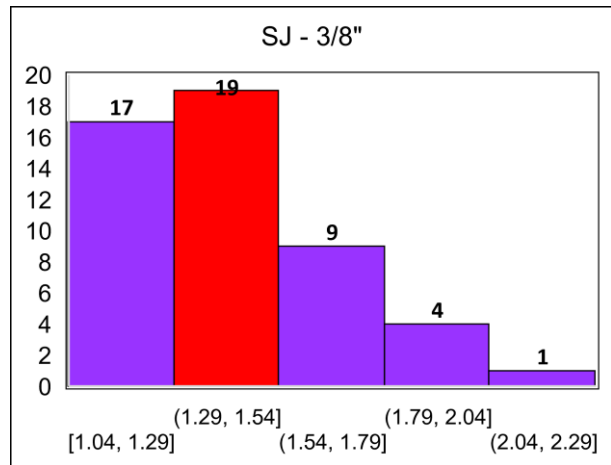
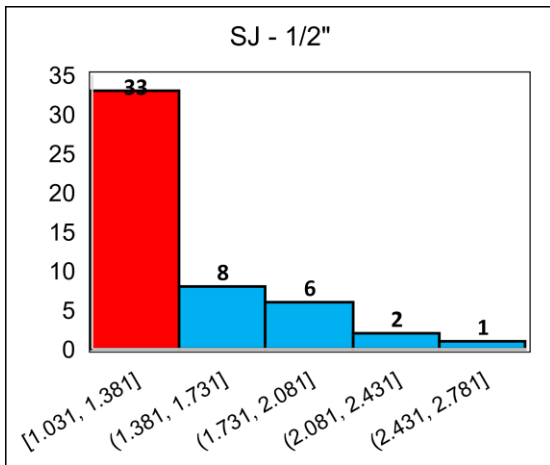
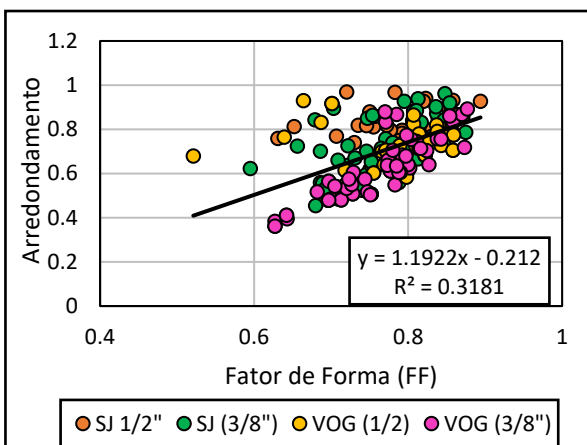
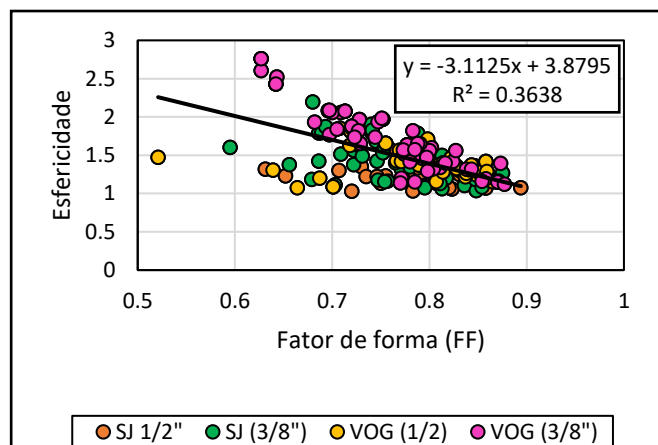


Figura 6. Distribuição da frequência acumulada – Esfericidade

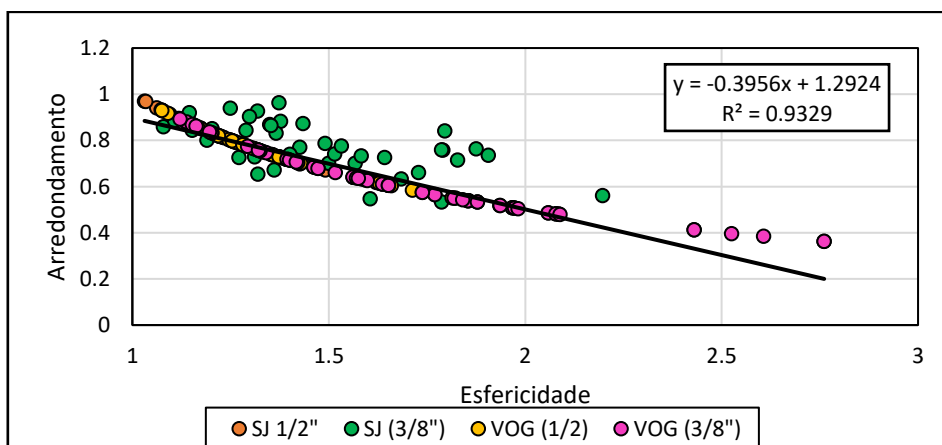
Foram realizadas análises de regressões lineares, com um nível de significância de 95%, tendo, como variável dependente, o arredondamento e a esfericidade e variáveis independentes o fator de forma e a esfericidade, conforme apresentado na Figura 7.



A)



B)



C)

Figura 7. Análise de regressão entre as variáveis: A) Arredondamento vs Fator de forma (FF); B) Esfericidade vs Fator de Forma (FF); e, C) Arredondamento vs esfericidade.

Como esperado, arredondamento vs fator de forma (FF) (Figura 7A) apresentaram comportamento oposto entre esfericidade vs fator de forma (FF) (Figura 7B), ou seja, no primeiro caso, a relação é positiva (à medida que o arredondamento aumenta o fator de forma também aumenta) e, no segundo caso, a relação é negativa (à medida que a esfericidade aumenta, o fator de forma diminui), embora o R^2 , em ambas as regressões, tenha apresentado valor de apenas 0,32 e 0,36, respectivamente, sendo compatíveis com o observado neste estudo.

A Figura 6C mostra a relação entre arredondamento vs esfericidade, como esperado, essas variáveis correlacionam muito bem entre si, com uma relação negativa e R^2 próximo a 1, ou seja, à medida que o arredondamento diminui, a esfericidade aumenta, o que significa afirmar que, neste caso, o agregado tende a apresentar forma mais alongada.

4. CONCLUSÃO

Os procedimentos utilizados neste estudo, desde a aquisição das imagens, até a etapa de processamento, permitiram uma análise rápida e padronizada para obtenção morfológica dos agregados. O *software ImageJ* mostrou-se uma ferramenta eficaz na obtenção de medidas das diferentes partículas estudadas. Apresenta, como vantagem, ser simples, de código aberto e com uma quantidade significativa de outros plugins que permitem estender a análise.

Em suma, os resultados obtidos para fator de forma, arredondamento e esfericidade mostraram-se compatíveis com os materiais estudados e as diferenças existentes entre a forma dessas litologias. No geral, conforme discutido por Back (2018), Diógenes (2018) e Ceccato (2021), à medida que o tamanho do agregado diminui, devido aos processos de britagem e rebitagem, os agregados tendem a apresentar forma mais alongada, fato também observado neste estudo. Além disso, a diferença existente entre as litologias também foi evidenciada nos resultados, pois a estrutura foliada presente nas rochas biotita gnaisse, apresenta forma mais alongada por influência dessa estrutura, fato que foi possível evidenciar por meio dessa técnica.

A obtenção da morfologia dos agregados utilizando o *software ImageJ* que também demanda certo treinamento e tempo para a calibração das imagens, mesmo assim, é uma alternativa viável por ter um custo operacional baixo e apresentar resultados que têm se mostrado satisfatórios. A utilização de *softwares* livres é um fator condicionante para o sucesso da utilização dessa técnica como método de avaliar índices de forma de agregados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo fomento à pesquisa e às bolsas de pesquisa, e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pelo suporte oferecido.

REFERÊNCIAS

- ABED, M.A.; ABED A.H. Effect of compaction methods on the morphology of aggregates in hot mix asphalt. *Materials Science and Engineering*, vol. 671, 2020.
- AL – ROUSAN, T.; MASAD, E.; TUTUMLUER, E.; PAN, T. (2007) "Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics" in *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 978-990.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ATSM d4791 – Partículas achatadas e alongadas no agregado graúdo (Paquímetro Calípter), 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7389-1 (2009) - Agregados – Análise Petrográfica de agregado para concreto. Parte 1: Agregado miúdo. Rio de Janeiro.
- BESSA, I., CASTELO BRANCO, V., & SOARES, J. (2011). "Avaliação da resistência ao polimento e à degradação de agregados utilizando a abrasão Los Angeles e o processamento digital de imagens". 7º congresso brasileiro de rodovias e concessões.

BACK, A. H. (2018) Avaliação das propriedades químicas e Geomecânicas de agregados oriundos de jazidas de rochas de diferentes litologias do Estado do RS. Santa Maria, 2018, 166p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.

CECCATO, H. C. (2021) Avaliação e caracterização do comportamento geomecânico de agregados oriundos de jazidas da região sudeste do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, 2021, 284p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria.

DEPARTAMENTO AUTONOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DAER-EL 108/01. Determinação do índice de lamelaridade. Porto Alegre, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 086/20. Agregado – Método de Ensaio. Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2020.

DIÓGENES, L.M. Avaliação das Relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, 2018.

FERNLUND J.M.R. (2005) “Image analysis method for determining 3D shape of coarse aggregate”.

GUILHERME, P. D. B.; BORZONE, C. A.; BUENO, M. D. L.; LAMOUR, M. R. Análise granulométrica de sedimentos arenosos de praias através de imagens digitais. Descrição de um protocolo de mensuração de partículas no software ImageJ - Fiji. Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology, v. 19, n. 2, 2015.

GHUZLAN, K.A.; OBAIDAT, M.T.; ALAWNEH, M.M. Cellular-phone-based computer vision system to extract shape properties of coarse aggregate for asphalt mixtures. Engineering Science and Technology, and International Journal, v. 22, p.767-776, 2019.

HANNICKEL, A.; SILVA, M.H.P da.; BARROS, H.L. de.; ALBURQUERQUE, M.P. de. ImageJ como ferramenta para medida da área de partículas de magnetite em três escalas nanométricas. Revista Militar de Ciência e Tecnologia. Vol. XXIX, p.16-26, 2012.

JANUTHE, M.; PRATA, W. C. A.; FIALHO, P. F. Caracterização de agregados miúdos por análise de imagem. Revista espaço acadêmico, v.8, n.1,2018.

KIM, Y.R.; SOUZA, L.T. (2009) Effects of aggregate angularity on mix design characteristics and pavement performance. Report on research No. MPM-10. Mid-America Transportation Center and University of Nebraska-Lincoln.

LANTIERI, C.; LAMPERTI, R.; SIMONE, A.; VIGNALI, V.; SANGIORGI, C.; DONDI, G.; MAGNANI, M. (2016) “Use of image analysis for the evaluation of rolling bottle teste results” – ins International Journal of Pavement Research and Technology.

MASAD, E.; OLCOTT, D.; WHITE, T.; TASHMAN, L. (2001) “Correlation of fine aggregate imaging shape indices with asphalt mixture performance”. Transportation Research Record 1757, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., pp.148-156, 2001.

MELLO, C.W. (2018) Influência dos parâmetros de forma do agregado na formulação de argamassas de projeção. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SUKHWANI, R.; LITTLE, D.N.; MASAD, E. “Sensitivity of HMA performance to aggregate shape measured using conventional and image analysis methods” TTI Report 0-1707-5, Texas Transportation Institute, College Station, TX, 2006.