

O EMPREGO DA ANÁLISE DE IMAGENS NA DETERMINAÇÃO DA FORMA DE AREIAS

The use of image analysis to determine particle shape of sands

Georgia S. Araujo*

Kátia V. Bicalho**

Fernando A. Tristão***

RESUMO – É reconhecida a importância das características morfológicas dos solos arenosos nas áreas de geologia aplicada e engenharia geotécnica. A forma dos grãos tem um importante papel na avaliação da distribuição granulométrica das partículas. Entretanto, a maioria das técnicas de peneiramento, assume que os grãos são esféricos e descritos por um único parâmetro, o diâmetro. Esse artigo trata da aplicação da técnica de análise de imagens para medir os parâmetros texturais de duas areias quartzosas com diferentes origens que, em princípio, influenciam na forma dos seus grãos. Os resultados dos parâmetros de forma das amostras são mostrados e os resultados são discutidos. O consenso no campo da Engenharia Civil, de que a areia de rio, em função dos agentes de transporte e dos ambientes de sedimentação, teria um grau de arredondamento maior do que a areia de cordão litorâneo, não foi observado nos resultados obtidos através da técnica de processamento de imagens.

SYNOPSIS – The importance of morphological characteristics of sandy soil has been acknowledged for a long time both in applied geology and geotechnical engineering. The shape of the particles plays an important role in the assessment of particle size distribution. Most sizing techniques, however, assume that the sample being measured is spherical, as a sphere is the only shape that can be described by a single number. This paper deals with an image processing technique as a method of particle shape measurement of two sands of two different formations that, in principle, would influence its particle shape. The results from particle shape measurements of the two different sand samples are reported and discussed. The affirmation, widely considered in Civil Engineering, that river sands, in function of the sediment transportation, would have a higher degree of rounding that sea sands, was not proven by the results obtained from the image processing technique.

PALAVRAS CHAVE – Solos arenosos, forma dos grãos, análise de imagens.

1 – INTRODUÇÃO

É reconhecida a influência da forma dos grãos no comportamento mecânico dos solos granulares. Na geotecnia o procedimento mais utilizado para avaliação da morfologia dos grãos dos solos granulares é feita por comparação visual com uma carta padrão no qual se verifica o grau de ar-

* Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. E-mail: georgia@ifes.edu.br

** Professora Associada II, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: kvbicalho@gmail.com

*** Professor Adjunto III, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: fernandoavancini@ct.ufes.br

redondamento e textura superficial grão a grão (Lambe e Whitman, 1979; e McLane, 1995). Entretanto, além de demoradas, estas técnicas de ensaio acabam por serem subjetivas e muito dependentes da experiência do operador.

A análise de imagens é uma técnica de medição que reduz os prazos de execução e permite uma maior precisão das medidas de interesse (Martinez e Rubiera, 1995; Werner e Lange, 1999; Brzezicki e Kasperkiewicz, 1999; Lundqvist e Akersson, 2001). As diferentes etapas dessa técnica, captura, manipulação e armazenagem de imagens, estão cada vez mais facilitadas pelo crescente avanço tecnológico da informática e da eletrônica.

Este artigo apresenta um estudo para avaliar a forma dos grãos de dois solos arenosos do estado do Espírito Santo, uma areia de rio (AR) e outra procedente de uma jazida próxima à praia (AJ) e que, supostamente, possuem formas distintas em função dos diferentes agentes transportadores e ambientes de sedimentação, utilizando a análise de imagens bidimensionais como ferramenta de medição.

2 – ESTUDOS ANTERIORES

As características morfológicas dos solos arenosos são parâmetros que afetam diretamente o comportamento das obras de terra e é um tema de relevância nas áreas de geologia e geotecnia. Nessa linha, a análise da influência dos aspectos geométricos dos grãos de solo normalmente se restringe à composição granulométrica avaliada pelo ensaio de peneiramento. Entretanto, o referido ensaio não permite obter parâmetros texturais como a forma, por exemplo. Na Geologia o procedimento para avaliação da morfologia dos grãos é feita por comparação visual com uma carta padrão (Figura 1) no qual se verifica o grau de arredondamento e textura superficial grão a grão (McLane, 1995). Metodologia similar é apresentada por Pettijohn *apud* Lambe e Whitman (1979), cuja carta padrão é mostrada na Figura 2. Entretanto, além de demoradas, estas técnicas de ensaio acabam por serem subjetivas e muito dependentes da experiência do operador.

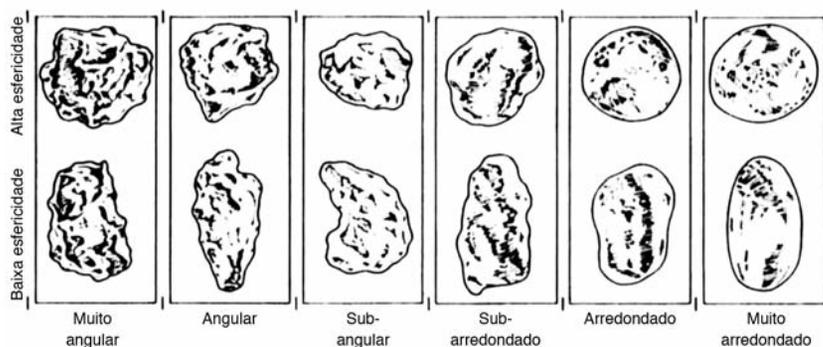


Fig. 1 – Padrão de imagens de arredondamento (McLane, 1995).

As exigências de prazos reduzidos e maior precisão nas medidas estimulam o uso de técnicas de medições alternativas como, por exemplo, a análise de imagens (Martinez e Rubiera, 1995; Werner e Lange, 1999; Brzezicki e Kasperkiewicz, 1999; Lundqvist e Akersson, 2001). Esta técnica vem sendo especialmente impulsionada pelos avanços tecnológicos nos campos da informática, da eletrônica e no desenvolvimento de computadores pessoais cada vez mais potentes e acessíveis. A junção de todos esses fatores permite capturar, manipular e armazenar imagens com resoluções cada vez maiores e, inclusive análises tridimensionais (Fernlund, 2005).

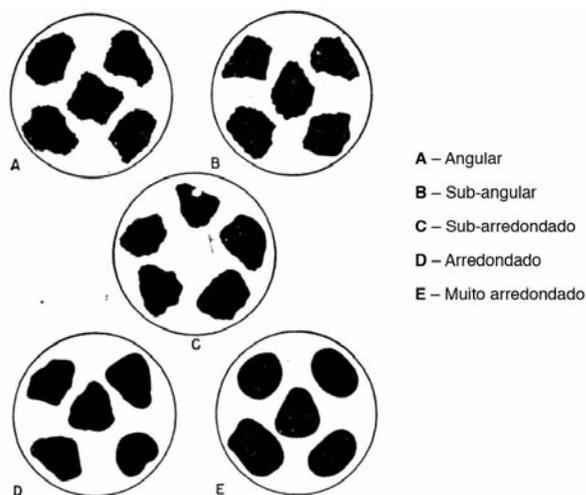


Fig. 2 – Grau de arredondamento das partículas (Pettijohn *apud* Lambe e Whitman, 1979).

2.1 – Grau de esfericidade

Algumas das principais propriedades índices dos sedimentos consideradas na Geotecnia são: tamanho (distribuição granulométrica), forma (arredondamento e esfericidade), aspecto ótico (textura superficial ou rugosidade) e composição mineralógica. Um dos principais fatores que influem nas características físicas dos grãos é o agente transportador a que são submetidos, uma vez que a distribuição granulométrica dos grãos depende da velocidade e do meio de transporte. Tanto a forma como a textura superficial estão relacionadas, em grande parte, com o meio de transporte, sendo que a forma dos grãos também depende da distância percorrida (Suguio, 1973).

Devido à facilidade de execução e ao fato de não necessitar equipamentos sofisticados para sua execução, a determinação da composição granulométrica pelo ensaio de peneiramento tem sido a técnica de caracterização física mais empregada para as areias. Se todos os grãos fossem constituídos de partículas cujas formas fossem esferas perfeitas, a classificação por meio de peneiramento seria simples, pois as aberturas de malha das peneiras corresponderiam ao diâmetro mínimo dos grãos retidos e os diâmetros máximos dos grãos que passam por ela. Mas, de fato, as partículas possuem formas irregulares e raramente sua superfície é lisa. Portanto, as informações obtidas mediante esse ensaio não são suficientes para avaliar os aspectos texturais como a forma e a textura superficial.

Por outro lado, Kwan *et al.* (1999) alertam que, na interpretação dos resultados de granulometria obtidos mediante o peneiramento, é preciso considerar que partículas que passam pela peneira de malha quadrada podem ter dimensões maiores do que a abertura de malha. Na Figura 3a) é possível observar uma partícula alongada com comprimento maior que a abertura da peneira e que pode passar através dela sem dificuldade. Nesse caso, a abertura da peneira é uma medida da dimensão lateral da partícula. Já as partículas lamelares podem passar através da peneira de malha quadrada, lateralmente (Figura 3b)). Nesse caso, a largura da partícula pode ser maior que a abertura, entretanto tem que ser menor que a diagonal da abertura da malha, tal como pode ser observado na Figura 4 (Maerz, 2004).

Como alternativa para minimizar estas deficiências observadas no ensaio de peneiramento, no que se refere à forma dos grãos, utilizou-se o grau de esfericidade que é o índice de forma mais comum e que dá a idéia de quão próximo o grão está de uma esfera.

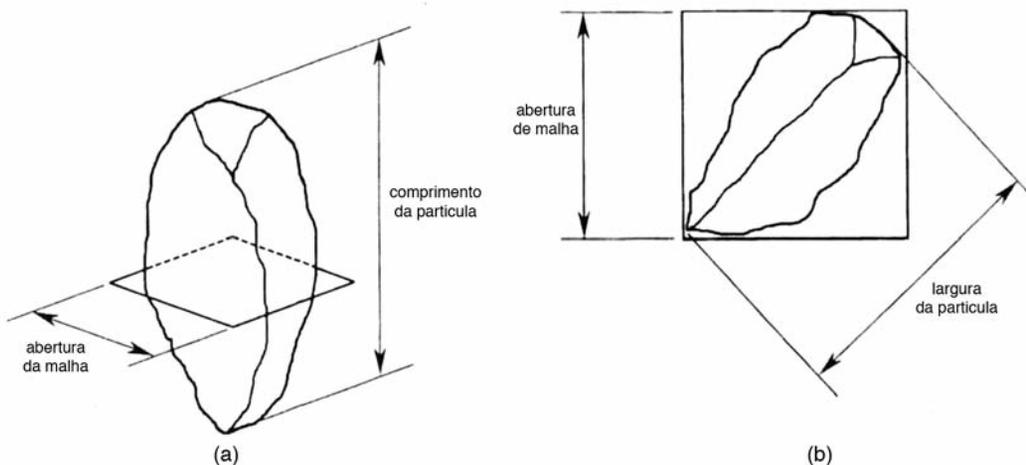


Fig. 3 – Partículas com comprimento (a) e largura (b) maiores que a abertura de malha da peneira (Kwan *et al.*, 1999).

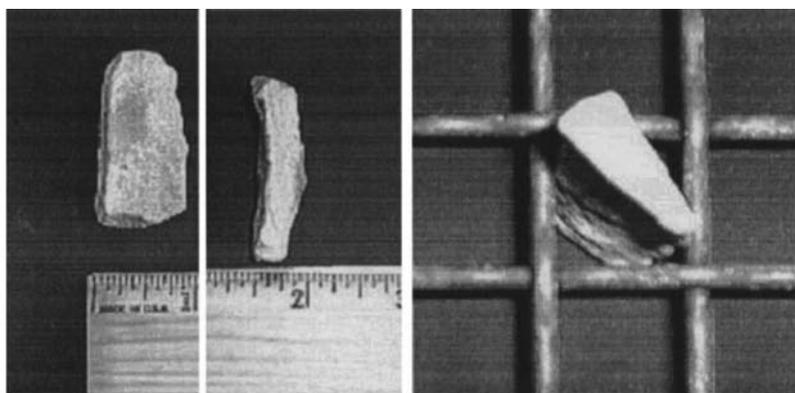


Fig. 4 – Exemplo de um grão lamelar passando pela peneira (Maerz, 2004).

A esfericidade possui diversas definições. Segundo McLane (1995), originalmente a esfericidade foi definida por Wadell como sendo a razão entre o diâmetro de uma esfera de mesmo volume que a partícula e o diâmetro da menor esfera circunscrita. Entretanto, o autor coloca que, de um ponto de vista prático, esse método não é muito usado. Além disso, Scarlett (1996) afirma que duas partículas que possuem forma semelhante, mas com tamanhos diferentes, podem ter a mesma esfericidade descrita por Wadell, não sendo esse parâmetro isolado um bom fator para representar a forma da partícula.

Mendes (1972) define a esfericidade como a relação entre a área superficial da partícula e o seu volume, sendo que, numericamente, essa medida indica o quão próximo o grão está de uma esfera na qual os valores de x , y e z nos eixos ortogonais são iguais.

Outra definição é apresentada por Mora e Kwan (2000). De acordo com os autores, a esfericidade é a razão da área superficial de uma esfera de mesmo volume da partícula e a sua área real. Como a área superficial tem que ser avaliada tridimensionalmente, a análise de imagens 2-D não pode ser diretamente empregada.

Leeder (1995) afirma que a melhor forma de calcular a esfericidade foi apresentada por Sneed e Folk, e é feita pela Equação 1:

$$\psi = (s^2/li)^{1/3} \quad (1)$$

McLane (1995) apresenta, além do método citado acima, um outro, onde o cálculo da esfericidade é feito através da Equação 2:

$$\psi = (is/l^2)^{1/3} \quad (2)$$

onde: ψ = a máxima projeção de esfericidade; l, i e s = maior, intermediária e menor dimensões do grão, respectivamente.

Já Ritenhouse *apud* Carr *et al.* (1990), define esfericidade como a relação entre o diâmetro do círculo com uma área igual à projeção da partícula e o diâmetro do menor círculo circunscrito à partícula, podendo variar de 0 a 1, sendo que na prática esses valores vão de 0,45 (alongada) a 0,97 (muito esférica). Dado que os diâmetros, que são os parâmetros requeridos para obter a esfericidade buscada, podem ser obtidos diretamente de uma análise bidimensional optou-se por usar a técnica de análise de imagens em 2-D no presente trabalho.

2.2 – Análise de imagens

O termo análise de imagens refere-se à análise computacional de imagens digitalizadas e que permite fazer medições nestas imagens. Atualmente, a análise de imagens inclui muitas classes de ferramentas, tais como tratamento de sinais, reconhecimento de amostras, inteligência artificial e este-reologia. Esta última pode ser definida como o campo da matemática que relaciona parâmetros tridimensionais através de medidas bidimensionais obtidas de seções da estrutura (Chermant, 2001). Portanto, o desenvolvimento tecnológico tem propiciado aos pesquisadores empregar programas computacionais cada vez mais avançados de maneira que já é possível avaliar a forma de grãos mediante análise de imagens em duas dimensões (Mertens e Elsen, 2006) e, inclusive, em 3-D (Fernlund, 2005).

Chermant (2001) apresenta as aplicações da técnica nos diversos campos da engenharia civil, a saber: investigação da morfologia do cimento, do concreto e das argamassas. Segundo Lundqvist e Akersson (2001), a técnica de análise de imagens tem um campo bastante amplo com potencial para ser empregado nas ciências geológicas, sendo especialmente aplicado no ramo da engenharia. Para Maerz (2004) ensaios usando imagens podem substituir os ensaios físicos para obtenção da forma de grãos com vantagens que vão desde custos mais baixos, menos subjetividade, resultados mais rápidos e a possibilidade de se ter um número de medidas que permitam uma análise estatística consistente.

O processo de análise de imagens é constituído de diversas etapas que, neste trabalho, serão tratadas separadamente, em ordem mais ou menos seqüencial (Figura 5), conforme descrito por Gabas (1999).

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a forma dos grãos, foram selecionadas uma amostra de areia de rio (AR) e outra procedente de jazida próxima à praia (AJ) e que, supostamente, possuem formas distintas em função dos diferentes agentes transportadores e ambientes de sedimentação.

3.1 – Preparação das amostras

As areias quartzosas ensaiadas foram separadas, através de peneiramento, em seis frações conforme recomendação da NBR NM 248 (ABNT, 2003), a saber: 4,76-2,36; 2,36-1,18; 1,18-0,600; 0,600-0,300; 0,300-0,150 e 0,150-0,075 mm.

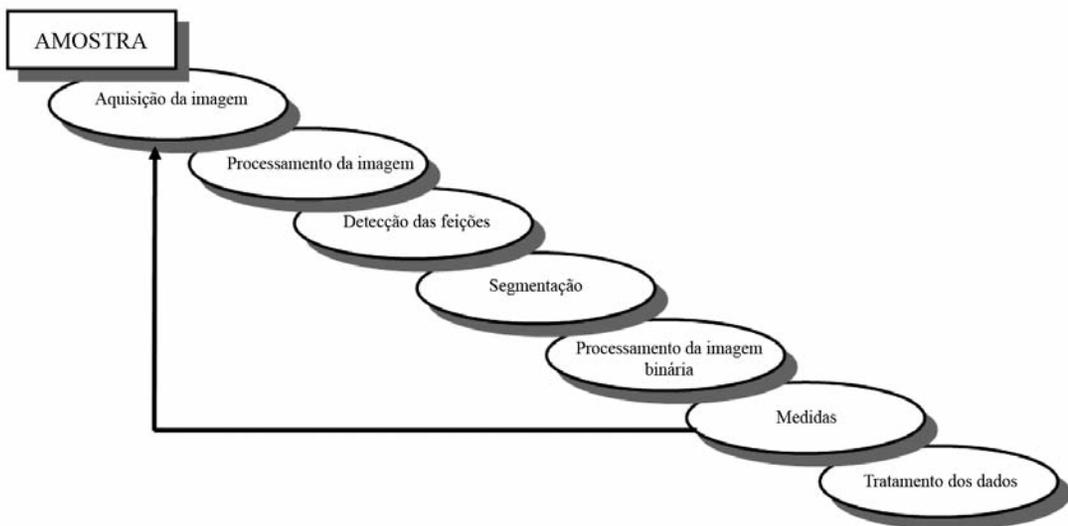


Fig. 5 – Etapas de análise de imagens (Gabas, 1999).

Para cada fração das duas areias, foi preparada uma amostra com uma determinada quantidade de grãos que fosse estatisticamente representativa. Com o objetivo de garantir a aleatoriedade na obtenção da imagem dos grãos, os mesmos foram lançados em uma base adesiva fixada em uma superfície plana através de um funil. As amostras das frações mais grossas e mais finas são mostradas nas Figuras 6a) e 6b), respectivamente.

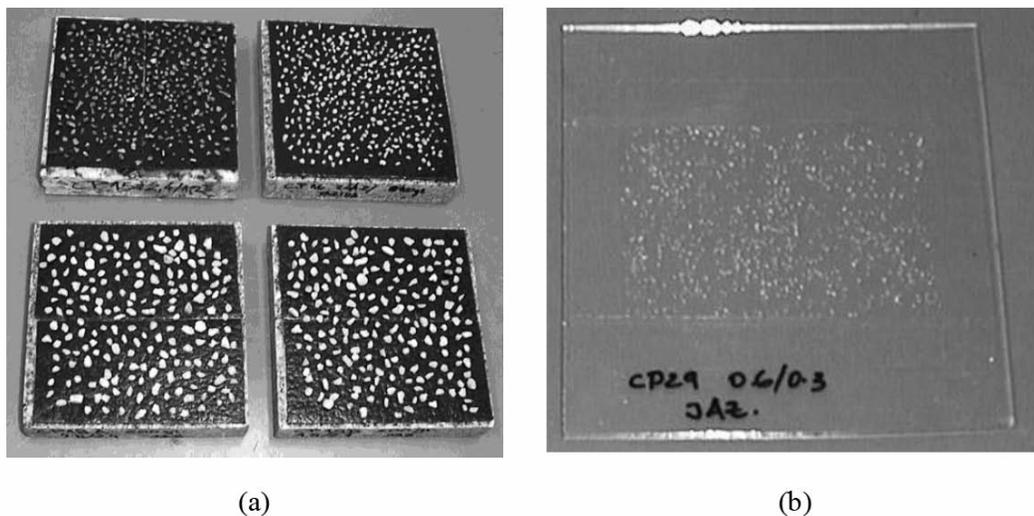


Fig. 6 – Amostras das frações mais grossas (a) e mais finas (b), preparadas para aquisição das imagens.

3.2 – Obtenção das medidas de interesse

A obtenção dos parâmetros requeridos para verificação da forma dos grãos seguiu as etapas da Figura 5 e é resumidamente descrita a seguir:

- a aquisição das imagens foi feita de duas maneiras distintas: as três maiores frações foram fotografadas em estúdio com uma câmara fotográfica e as imagens das frações menores foram obtidas com uma câmara digital acoplada a uma lupa (Figura 7),

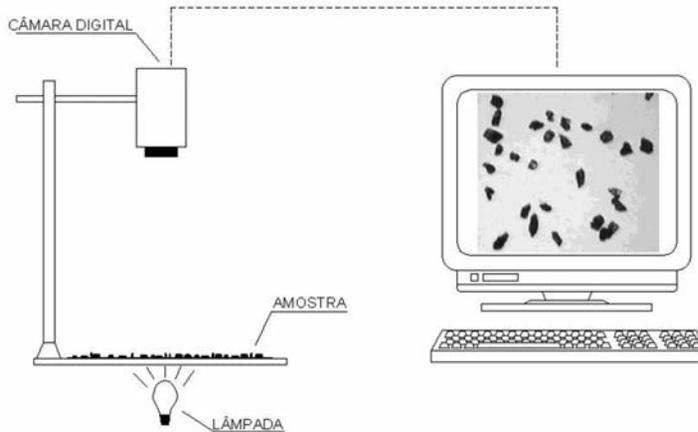


Fig. 7 – Lupa para aquisição das imagens das frações mais finas.

- uma régua foi fotografada junto com os grãos para obter a escala das fotos (Figura 8),

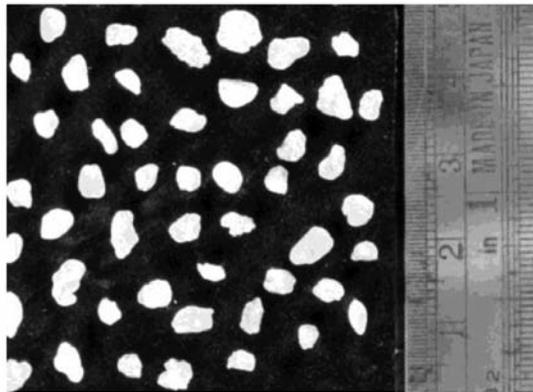


Fig. 8 – Exemplo de amostra de areia com a régua inserida na imagem para obtenção da escala.

- para cada fração foram analisados, aproximadamente, 400 grãos, baseado nos estudos de Persson (1998), que observou que amostras com menos grãos não permitiam uma análise estatística consistente,
- as imagens foram tratadas ajustando brilho e contraste para facilitar o reconhecimento das bordas dos grãos,
- as feições de interesse, no caso a borda dos grãos, foram detectadas e, ao final dessa operação, obteve-se uma imagem binária, que permite separar os contornos dos grãos do fundo,

– finalmente foram feitas as medições dos parâmetros requeridos para cálculo da esfericidade (áreas, perímetros e diâmetros equivalentes de uma circunferência), o tratamento estatístico e a análise.

4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para verificar a distribuição granulométrica das amostras, foram feitos os ensaios de peneiramento segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e cujas curvas são apresentadas na Figura 9.

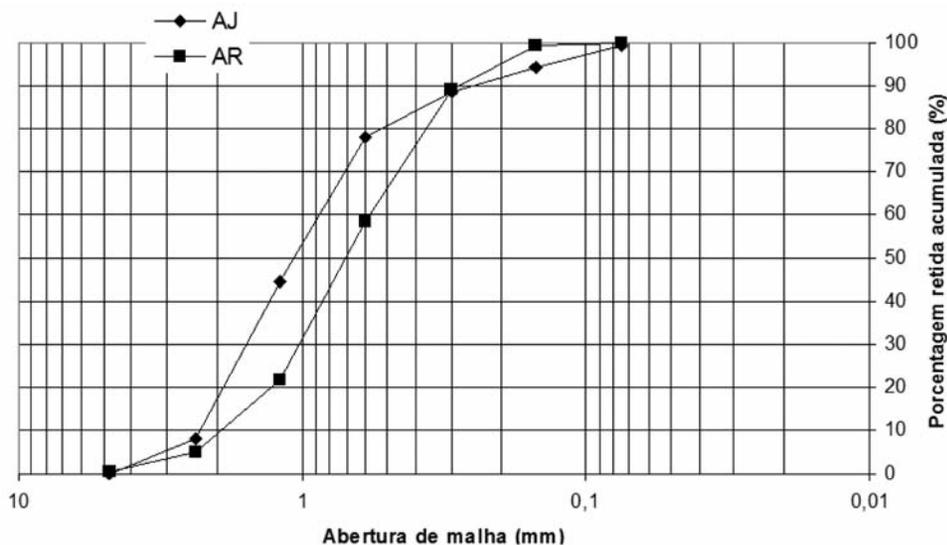


Fig. 9 – Curvas granulométricas das areias ensaiadas segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Também se procedeu a uma análise morfoscópica do grau de esfericidade dos grãos, utilizando o padrão de imagem de arredondamento apresentado na Figura 1. Nas Figuras 10a) e 10b) estão representados graficamente os resultados obtidos para as areias AJ e AR, respectivamente. Os resultados indicam que a areia de cordão litorâneo (AJ) apresentam uma maior concentração de grãos com alta esfericidade do que a areia de rio (AR).

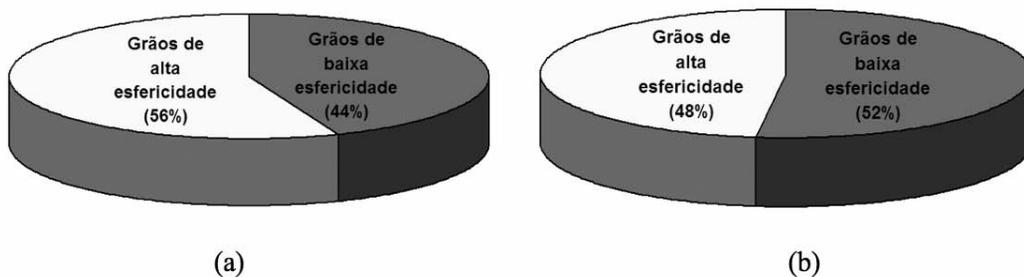


Fig. 10 – Gráfico de relação entre graus de esfericidade dos grãos das areias AJ (a) e AR (b) em função da distribuição granulométrica, através da análise morfoscópica.

A partir da definição de esfericidade descrita anteriormente e com os valores dos diâmetros da menor circunferência circunscrita (Quadro 1) e dos diâmetros equivalentes à área (Quadro 2) das projeções das partículas obtidos na análise de imagens, calculou-se a esfericidade média de cada fração das duas areias (Quadro 3), e que estão representadas graficamente na Figura 11.

Quadro 1 – Valores médios dos diâmetros da menor circunferência circunscrita às projeções das partículas nas respectivas frações, em mm.

Fração (mm)	AJ	AR
4,75 - 2,36	4,56	4,93
2,36 - 1,18	2,91	3,00
1,18 - 0,600	1,78	1,47
0,600 - 0,300	0,69	0,79
0,300 - 0,150	0,37	0,44
0,150 - 0,075	0,20	0,21

Quadro 2 – Valores médios dos diâmetros equivalentes de área das projeções das partículas nas respectivas frações, em mm.

Fração (mm)	AJ	AR
4,75 - 2,36	3,696	3,869
2,36 - 1,18	2,349	2,388
1,18 - 0,600	1,381	1,162
0,600 - 0,300	0,532	0,610
0,300 - 0,150	0,295	0,343
0,150 - 0,075	0,155	0,162

Quadro 3 – Médias da variável esfericidade.

Fração (mm)	AJ	AR
4,75 - 2,36	0,816	0,791
2,36 - 1,18	0,814	0,786
1,18 - 0,600	0,781	0,797
0,600 - 0,300	0,781	0,785
0,300 - 0,150	0,796	0,795
0,150 - 0,075	0,802	0,785

É possível observar na Figura 11 que a areia AR mostra uma pequena variação na esfericidade, com tendência a apresentar um valor próximo a 0,79 nas diversas frações estudadas. Já na areia AJ verificam-se três grupos de esfericidade bem distintos. As duas maiores frações (4,75-2,36 e 2,36-1,18 mm) possuem grãos com a maior esfericidade, em torno de 0,815. Nas duas frações seguintes (1,18-0,600 e 0,600-0,300 mm) os valores decrescem subitamente para 0,782 e novamente aumentam para um valor próximo de 0,80 nas duas frações mais finas (0,300-0,150 e 0,150-0,075 mm).

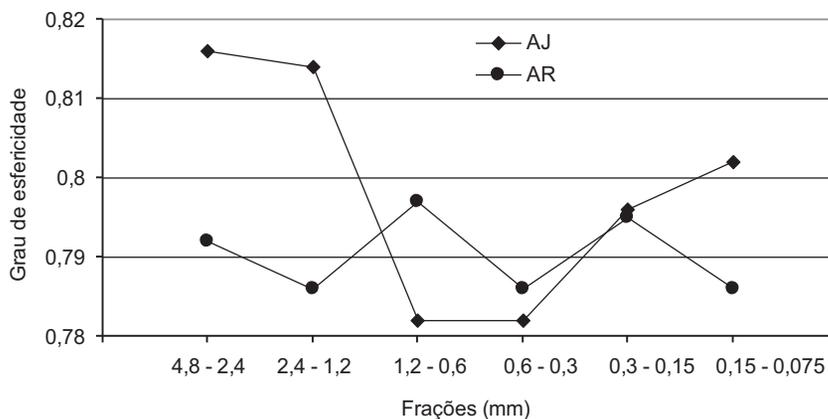


Fig. 11 – Gráfico de valores médios dos graus de esfericidade das frações das areias AJ e AR, obtidos pela análise de imagens, segundo definição de Ritenhouse *apud Carr et al.* (1990).

Se na prática a esfericidade definida por Ritenhouse *apud Carr et al.* (1990), varia de 0,45 (alongada) a 0,97 (muito esférica), é correto afirmar que as duas areias analisadas podem ser classificadas como esféricas.

Ao se calcular a esfericidade média das areias ensaiadas, aplicando-se as esfericidades médias das frações às porcentagens da material retido em cada peneira, obteve-se que a areia de cordão litorâneo (AJ) apresentou um valor de 0,792 e a areia de rio (AR) 0,786.

No que se refere a forma de agregados miúdos, no meio acadêmico, é comum considerar as areias de rio como possuindo grãos esféricos, em função do agente transportador. Os resultados de esfericidade apresentados nos ensaios de análise de imagens confirmam os resultados de morfoscopia apresentados por Araújo e Tristão (2001) e mostram uma forte tendência a contrariar esta afirmativa.

Os valores obtidos no ensaio foram analisados estatisticamente. As médias e os desvios padrões das areias AR e AJ segundo os fatores procedência e fração são representados graficamente na Figura 12. Novamente confirmou-se que a areia AJ possui grau de esfericidade ligeiramente superior à areia AR.

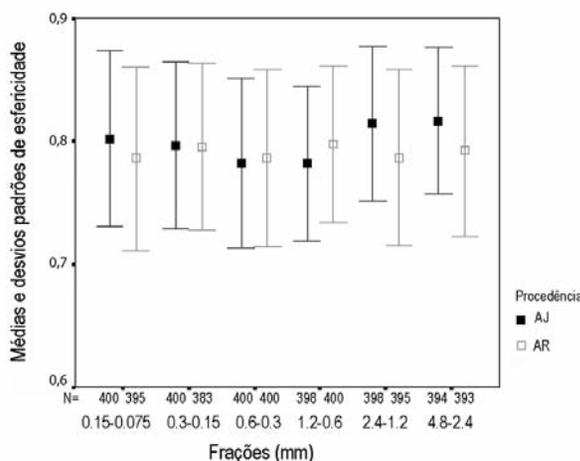


Fig. 12 – Representação gráfica das médias dos desvios padrões da variável esfericidade segundo os fatores fração e procedência.

Na Figura 13 (Gráfico Box-Plot) apresentam-se os valores do primeiro e terceiro quartil, mediana e os pontos discrepantes (círculo) segundo os fatores fração e procedência. Também é possível verificar a relativa simetria dos dados e a ocorrência de poucos pontos discrepantes e nenhum altamente discrepante, que seria representado por asteriscos.

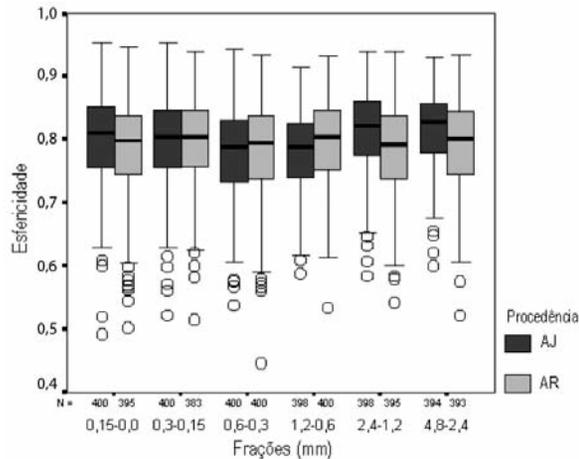


Fig. 13 – Valores do primeiro e do terceiro quartil, mediana e pontos discrepantes da variável esfericidade segundo os fatores fração e procedência (Gráfico Box-Plot).

Para verificar as diferenças entre as médias da variável esfericidade, foi realizada a análise de variância (Quadro 4). Os resultados encontrados indicam a existência de diferenças estatisticamente significantes entre todas as médias consideradas, confirmando então que as esfericidades são diferentes segundo fatores: fração, procedência e a interação entre eles. Esta confirmação vem fortalecer a afirmação de Suguio *apud* Albino (1992), que relata que a esfericidade depende da rocha matriz e não somente do agente transportador.

Quadro 4 – Análise de variância (ANOVA) das médias da variável esfericidade.

Variável dependente: dimensão média (mm)		
Fonte de Variação	F	P
Modelo	11,480	0,000
Constante	650060,914	0,000
FRAÇÃO	8,954	0,000
PROCEDÊNCIA	17,878	0,000
FRAÇÃO x PROCEDÊNCIA	12,742	0,000

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise granulométrica por peneiramento, apesar de largamente empregado para caracterizar os solos arenosos, mostrou-se ineficiente ao analisar a forma das areias estudadas neste trabalho (uma amostra de areia de rio, AR, e outra procedente de jazida próxima à praia, AJ). Já a análise de imagens apresentou-se como uma alternativa viável para obtenção dos parâmetros de forma requeridos para o comportamento dos solos arenosos ensaiados. Na engenharia civil é consenso consi-

derar a areia de rio, em função do retrabalho sofrido, como areia esférica. Entretanto, neste trabalho, esta afirmativa é contestada, uma vez que a areia proveniente de litoral (AJ), supostamente mais alongada, apresentou o maior grau de esfericidade. Os resultados de grau de esfericidade através da análise de imagens confirmam os valores obtidos pela análise morfooscópica anteriormente aplicadas a essas mesmas amostras. Os valores obtidos no ensaio foram analisados estatisticamente e novamente confirmou-se que, nas amostras analisadas, a areia AJ possui grau de esfericidade ligeiramente superior à areia AR.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albino, J. (1992). *Morfodinâmica e processos de sedimentação das praias da Barra e São José do Barreto, Macaé* - RJ. Rio de Janeiro, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.
- Araújo, S. A.; Tristão, F. A. (2001). *Métodos de determinação de forma e área específica das areias para agregados de revestimento*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 4, Brasília.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *Agregados: determinação da composição granulométrica*. NBR NM 248. Rio de Janeiro.
- Brzezicki, J. M.; Kasperkiewicz, J. (1999). *Automatic image analysis in evaluation of aggregate shape*. Journal of Computing in Civil Engineering. ASCE, v. 13, n. 2, pp. 123-128.
- Carr, J. R.; Norris, G. M.; Newcomb, D. E. (1990). *Characterization of aggregate shape using fractal dimension*. Transportation Research Record - National Academy Press, Washington, n. 1278, pp. 43-50.
- Chermant, J. (2001). *Why automatic image analysis? An introduction to this issue*. Cement and Concrete Composites, Elsevier Science Ltd., v. 23, pp. 127-131.
- Fernlund, J. M. R. (2005). *Image analysis method for determining 3-D shape of coarse aggregate*. Cement and Concrete Research, Elsevier Science Ltd, v. 35, pp. 1629– 1637.
- Gabas, S. G. (1999). *Análise de imagens aplicada à caracterização de minérios - análise modal e liberação*. São Paulo. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP.
- Kwan, A. K. H.; Mora, C. F.; Chan, H. C. (1999). *Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing*. Cement and Concrete Research, Elsevier Science Ltd., v. 29, pp. 1403-1410.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics*, New York: John Wiley & Sons.
- Leeder, M. R. (1995). *Sedimentology process and product*. London: Chapman e Hall. pp. 35-43.
- Lundqvist, J. E.; Akersson, U., (2001). *Image analysis applied to engineering geology, a literature review*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 60, pp. 117–122. <http://www.springerlink.com/content/c8vqrvaf1nlw4rt4/fulltext.pdf>
- Maerz, N. H. (2004). *Technical and Computational Aspects of the Measurement of Aggregate Shape by Digital Image Analysis*, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, v. 18, pp. 10 - 18.
- Martínez, C. A.; Rubiera, N. P. (1995). *Análisis microestructural de granitos, por técnicas de processo digital de imágenes, para su utilización como áridos en hormigones*. In: Revista Ingeniería Civil, n. 99, Madrid.

- McLane, M. (1995). *Sedimentology*. New York: Oxford University Press.
- Mendes, J. C. (1972). *Estratigrafia e sedimentologia: geologia estrutural e aerofotogeologia*. Brasília: Instituto Nacional do Livro.
- Mertens, G.; Elsen, J. (2006). *Use of computer assisted image analysis for the determination of the grain-size distribution of sands used in mortars*. Cement and Concrete Research, Elsevier Science Ltd, v. 36, pp. 1453–1459.
- Mora, C. F.; Kwan, A. K. H. (2000). *Sphericity, shape factor and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing*. Cement and Concrete Research, Elsevier Science Inc., v. 30, pp. 351-358.
- Persson, A. L. (1998). *Image analysis of shape and size of fine aggregates*. Engineering Geology, Elsevier Science Ltd, v. 50, pp. 177-186.
- Scarlett, B. (1996). *Materials science and technology: a comprehensive treatment*. New York: Editora Weinhein.
- Suguio, K. (1973). *Introdução a Sedimentologia*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.
- Werner, A. M.; Lange, D. A. (1999). *Quantitative image analysis of masonry mortar microstructure*. Journal of Computing in Civil Engineering. ASCE, v. 13, n. 2, pp. 110-115.