

Influência das Características Morfológicas no Índice de Vazios de um Solo Natural Granular

Hélio Venceslau Santos Neto

Mestrando, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Brasil, helio.venceslau@ufpe.br

Ramon Duque Ferraz Burgos

Doutorando, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Brasil, ramon.burgos@ufpe.br

Kátia Vanessa Bicalho

Professora Titular, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória, Brasil, katia.bicalho@ufes.br

Hanène Souli

Professora, University of Lyon, Ecole Centrale de Lyon - ENISE, LTDS, Saint-Etienne, France, hanene.souli@enise.fr

Silvio Romero de Melo Ferreira

Professor Titular, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Brasil, silvio.mferreira@ufpe.br

RESUMO: O valor do índice de vazios tem sido utilizado para avaliar o comportamento geotécnico dos solos granulares. Neste artigo avalia-se a influência da forma das partículas e da adição de solos granulares finos na variação dos índices de vazios máximo e mínimo de um solo granular grosso. É utilizado um solo granular grosso com grãos compreendidos entre 9,62 mm e 6,35 mm (Mat 1). A forma dos grãos é avaliada por imagens, medidas geométricas e classificada quanto ao grau de circularidade em muito alta, alta e moderada. Ensaios de índice de vazios máximo ($e_{máx}$) e mínimo ($e_{mín}$) foram realizados no solo grosso (Mat 1) e no solo Mat 1 com a adição de solos granulares mais finos compreendidos entre 4,8 mm e 4,0 mm (Mat 2) e 1,18 mm e 0,84 mm (Mat 3). A proporção de finos adicionados, em massa, foram 10%, 30%, 40%, 50%, 70% e 100%. A influência da forma nos valores de $e_{máx}$ e $e_{mín}$, não foi significativa com o grau de circularidade. Entretanto a adição de 30% de solo granular fino (Mat 3) ao solo granular grosso (Mat 1) reduziu o índice de vazios mínimo de forma significativa (aproximadamente 2,1 vezes) para Circularidade Muito Alta e Alta, e a adição de 40% reduziu o índice de vazios mínimo em 2,0 vezes para a Circularidade Moderada nos solos granulares investigados neste estudo, praticamente o mesmo valor.

PALAVRAS-CHAVE: Índice de Vazios, Forma, Teor de Finos, Solo Granular

ABSTRACT: The void ratio plays an important role in the geotechnical behavior of granular soils. This study evaluates the influence of the shape of the particles and the addition of fine-grained soils on the variation of the maximum and minimum void ratios of a coarse soil with grains between 9.62 mm and 6.35 mm (Mat 1). The shape of the grains is evaluated by images, geometric measurements and classified according to the degree of circularity as very high, high and moderate. Maximum (e_{max}) and minimum (e_{min}) void ratio tests are carried out on coarse soil (Mat 1) and with the addition of fine grained soils between 4.8 mm and 4.0 mm (Mat 2) and 1.18 mm and 0.84 mm (Mat 3). The proportion of added fines, by mass, are 10%, 30%, 40%, 50%, 70% and 100%. The influence of shape on the values of e_{max} and e_{min} is not significant with the degree of circularity while the addition of 30% of fine-grained soil (Mat 3) to the coarse soil (Mat 1) reduced the minimum void ratio by 2.1 times for Very High and High Circularity and the addition of 40% reduced the minimum void ratio by 2 times for Moderate Circularity for the investigated soils.

KEYWORDS: Void Ratio, Particle Shape, Fine Content, Granular Soil

1 INTRODUÇÃO

O comportamento do solo granular sob tensão e deformação depende da natureza e seu estado físico. A natureza da areia inclui características como distribuição de tamanho dos grãos, teor de finos, forma dos grãos e mineralogia. O estado da areia se refere às condições físicas em que a areia se encontra, como densidade relativa, estado de tensão efetiva e estrutura. Tanto as propriedades materiais quanto as variáveis de estado têm um papel importante nas características de deformação e resistência das areias (Cubrinovski & Ishihara, 2002).

A morfologia tem um impacto significativo nas propriedades das areias. No entanto, até o momento, os sistemas de classificação geotécnica do solo não levam em consideração a influência da forma das partículas no comportamento mecânico do solo (Sakar, 2020). Avaliar a influência da morfologia de uma partícula é uma tarefa desafiadora porque diversas características do material, como por exemplo, tamanho médio dos grãos, distribuição do tamanho dos grãos, teor de finos e forma das partículas, influenciam os valores dos índices de vazios máximo (e_{max}) e mínimo (e_{min}), o que dificulta quantificar as contribuições individuais de cada uma dessas características do material (Cubrinovski & Ishihara, 2002).

A descrição dos aspectos morfológicos de uma partícula pode ser feita de várias formas levando em consideração as proporções de suas dimensões lineares, como comprimento, largura e espessura, e a associação a formas específicas como discos, lâminas ou discos achatados. A redondeza que é relacionada ao grau de arredondamento ou angularidade dos cantos e arestas, e a esfericidade mede a proximidade da forma da partícula com uma esfera perfeita (Blott & Pye, 2008).

A presença ou não de materiais mais finos em um solo granular influencia o comportamento geomecânico, tornando a transição de teor de finos (TTF) uma informação importante para a compreensão do seu comportamento, ela indica o limite onde o comportamento do solo passa a ser regido por finos ou por partículas grossas, este fenômeno é explicado pelo preenchimento progressivo dos vazios entre as partículas grossas pelos finos, levando a uma redução do índice de vazios até que esses vazios sejam completamente ocupados, momento em que o índice de vazios atinge seu valor mínimo para a mistura investigada (Zuo & Baudet, 2015).

Considerando esses aspectos, o objetivo principal deste artigo é avaliar a influência da forma das partículas e do teor de materiais granulares finos na variação dos valores dos índices de vazios máximo e mínimo de um solo granular grosso para analisar as interações entre as partículas dos materiais investigados.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais Usados

Foi utilizado um solo granular grosso de origem sedimentar identificado como Material 1 (Mat 1 – considerado como material de referência nas misturas investigadas) constituído por grãos com dimensões entre 9,52 mm e 6,35 mm. O Material 2 (Mat 2) utilizado neste estudo é constituído por grãos variando entre 4,8 mm e 4,0 mm e o Material 3 (Mat 3) é constituído de grãos com dimensões entre 1,18 mm e 0,84 mm. O peso específico dos grãos (γ_g) dos materiais investigados é 26,32 kN/m³.

2.2 Determinação da Forma das Partículas

A determinação da forma foi realizada por meio da análise de imagens e quantificação das dimensões dos grãos. As partículas foram distribuídas em uma superfície plana dotada de uma escala métrica e de cor branca, que proporciona o maior contraste com as cores do material, garante não sobreposição entre as partículas colocadas dentro do aparato com incidência de luz branca, e evita sombreamento das partículas na imagem e distorções na determinação das características morfológicas do material granular, Figura 1.

No processamento da imagem, foi utilizado o software ImageJ. Inicialmente, procedeu-se à imposição de uma escala baseada na graduação presente na superfície plana. Em seguida, a imagem foi convertida para o formato binário (preto e branco, 8 bits), o que facilita a identificação e quantificação das características dos

grãos pelo programa. Após esse processo, realizou-se a determinação das dimensões da partícula, incluindo área, perímetro, maior e menor eixos.

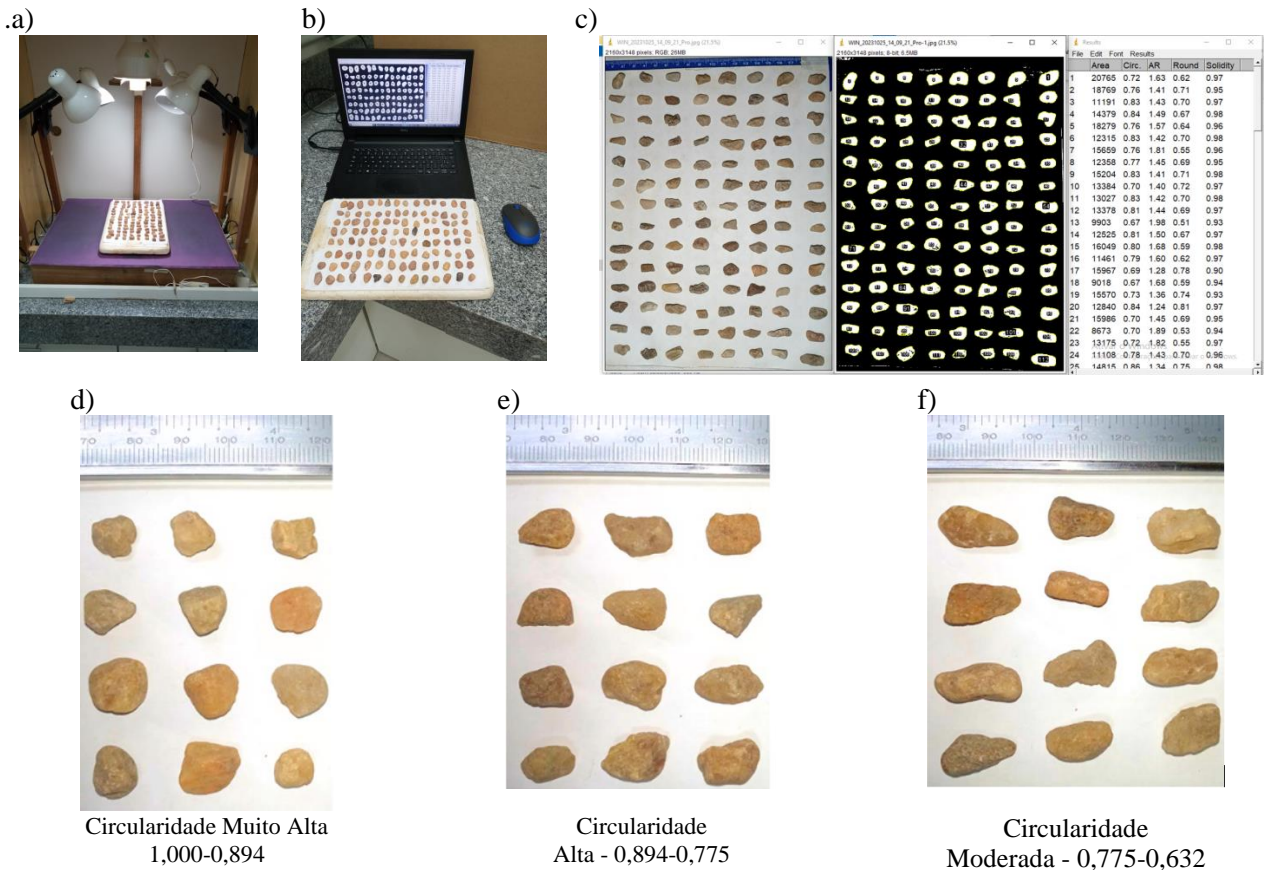


Figura 1. Avaliação da circularidade dos grãos: a) Aparato para coleta as imagens dos formatos dos grãos, b) material após a separação nas circularidades, c) imagem em formato binário e quantificação das características dos grãos, d) Circularidade Muito Alta, e) Circularidade Alta, f) Circularidade Moderada.

De acordo com a metodologia usada por Riley (1941), expressa na Equação 1, para a diferenciação de formas da partícula, e usando a classificação proposta por Blott & Pye (2008), foram determinadas as seguintes formas: Circularidade Muito Alta ($0,894 < C < 1,000$), Circularidade Alta ($0,775 < C < 0,894$) e Circularidade moderada ($0,632 < C < 0,775$), Figura 1.

$$c = \sqrt{\frac{D_i}{D_c}} \quad (1)$$

Onde, C é a circularidade, D_i o máximo diâmetro inscrito no interior da partícula e D_c o máximo diâmetro que circunscreve a partícula.

2.3 Índice de Vazios Máximos e Mínimos

O índice de vazios máximo foi determinado conforme as recomendações especificadas na NBR 16840. O ensaio para determinar o índice de vazio mínimo foi realizado de acordo com a norma NBR 16843 (método B1). O tempo de realização do ensaio foi estabelecido durante a fase inicial do procedimento conduzido em uma mesa vibratória com controle preciso de tempo e intensidade de vibração. Inicialmente, a frequência de vibração foi ajustada para 50Hz, enquanto o tempo variou incrementalmente, monitorando-se as variações na massa específica seca máxima do material, Figura 2. O momento em que a massa específica seca do material apresentou variações mínimas foi selecionado como o tempo de ensaio apropriado, mantendo-se a velocidade de vibração em 50 Hz por um período de 10 minutos.

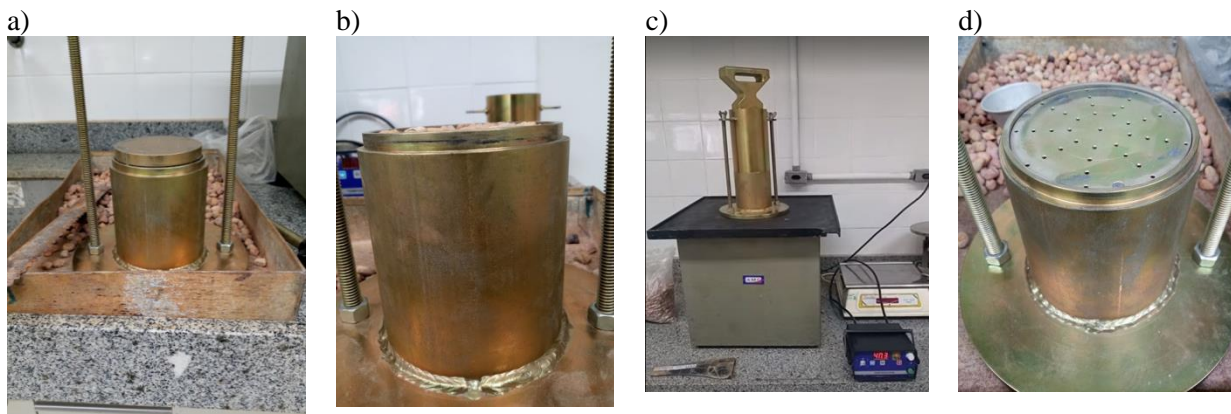


Figura 2. Aparado para determinação de do índice de vazios: a) Material em processo de preparação, b) e Cilindro de compactação c) Mesa vibratória com controle de frequência, d) Cilindro de compactação no final do ensaio.

Para a obtenção do índice de vazios mínimo e máximo usou-se a Equação 2, onde, e é o índice de vazios, γ_g o peso específico das grãos do solo e γ_s o peso específico seco.

$$e = \frac{\gamma_g}{\gamma_s} - 1 \quad (2)$$




Para a determinação do teor de material mais finos que possibilita ao material mais grosso o menor valor de índice de vazios usou-se o conceito de Transição de Teor de Finos (*Transition of Fines Content - TFC*), tal que um percentual de material mais finos é adicionado ao material mais grosso para uma mesma energia aplicada e verifica se houve alteração no volume da amostra com a mistura dos dois materiais. Não há padronização nos ensaios para determinar o índice de vazios com o teor de finos adicionados (TFC), assim os ensaios foram realizados conforme Lade, Liggio & Yamamuro (1998). A proporção em massa de finos no cilindro do ensaio variou-se nas porcentagens de 10%, 30%, 40%, 50%, 70% e 100%.

Para determinação do TFC foram analisadas as misturas: Mat1 com Mat 2 constituindo o Mat 4, do Mat 1 com o Mat 2 e o Mat 3 constituindo o Mat 5 e do Mat 1 com o Mat 3 constituindo o Mat 6. Nas análises foram condirada das as circularidades Muito Alta, Alta e Moderada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da variação do índice de vazios para Material 1 (grãos de dimensões entre 9,52 mm e 6,35 mm sem a adição de finos) são apresentados na Tabela 1, verifica-se que a influência da forma na variação do índice de vazios é muito pequena com valor de 0,03 tanto para o índice de vazios máximo (e_{max}) quanto o mínimo (e_{min}). No entanto, evidencia uma tendência em que materiais com maior circularidade apresentam valores menores tanto para o índice de vazios máximo quanto para o mínimo. Abbireddy & Clayton (2015) observaram um padrão semelhante em seu estudo, quando utilizaram uma variedade de formas com diferentes graus de angularidade, constatando que formas mais esféricas e menos angulares resultam em valores menores tanto para os índices de vazios máximos quanto para os mínimos. Esse padrão também foi corroborado por Maroof et al. (2022), que identificaram que materiais com uma forma mais alongada, ou seja, menos circular, tendem a apresentar valores maiores tanto para e_{max} quanto para e_{min} . Em ambos os estudos, também foi observado que, à medida que a forma se torna mais circular, a diferença entre os valores máximo e mínimo ($e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}$) do índice de vazios diminui. No entanto, esta observação não foi percebida neste trabalho, possivelmente devido à baixa variação entre os valores de índice de vazios do material mais circular em comparação com o de menor circularidade.

Tabela 1. Índice de vazios máximo e mínimo sem adição de finos para as circularidades Muito Alta, Alta e Moderada no Material 1.

Circularidade	Imagem representativa	$e_{máx}$	$e_{mín}$	$e_{máx} - e_{mín}$
Muito Alta		0,69	0,58	0,11
Alta		0,70	0,59	0,11
Moderada		0,72	0,61	0,11

A Figura 3 mostra as variações do índice de vazios mínimo obtidas das misturas do Mat 1 (grãos entre 9,52 mm e 6,35 mm,) com o Mat 2 (grãos entre 4,8 mm e 4,0 mm) constituindo o Mat 4, das misturas do Mat 1 com o Mat 2 e com o Mat 3 (grãos entre 1,18 mm e 0,84 mm) constituindo o Mat 5 e das misturas do Mat 1 com o Mat 3 constituindo o Mat 6, todas as misturas continham diferentes circularidades do Mat. 1. A Tabela 2 mostra o índice de vazios mínimo para cada adição de finos no Material 1 para as Circularidades Muito Alta, Alta e Moderada.

No Mat 4 (Figura 3a) a mistura de 50% do Mat 1 e 50% do Mat 2 é a que conferiu na mistura o menor índice de vazios, entretanto, a circularidade praticamente não teve influência no valor do $e_{mín}$. A variação do índice de vazios mínimo com a circularidade é de 0,53 a 0,55 e o menor valor foi obtido na Circularidade Alta. O comportamento do $e_{máx}$ segue a dinâmica do $e_{mín}$ com valores mínimos na mesma proporção de mistura, entretanto, sem grande variação.

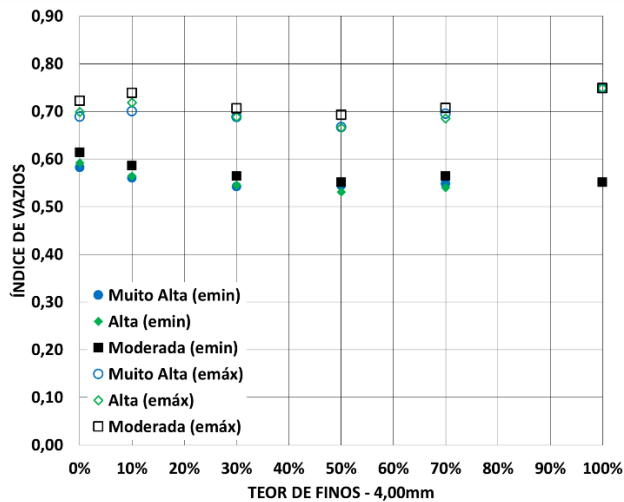
No Mat 5 (Figura 3b) a mistura de 60% do Mat 1 e 10% do Mat 2 e 30% do Mat 3 é a que conferiu na mistura o menor índice de vazios e a circularidade praticamente não teve influência no valor do $e_{mín}$. (variando de 0,28 a 0,31) e o menor valor foi obtido na Circularidade Alta. Os valores de índice de vazios máximos obtiveram estabilidade nos valores para todas as proporções entre os materiais.

No Mat 6 (Figura 3c) Para a Circularidade Muito Alta o valor de $e_{mín}$ está em torno de 30%; para a Circularidade Alta está presente na faixa entre 30% e 40%; e para Circularidade Moderada, os valores mínimos foram observados na faixa entre 40% e 50% do teor de finos, demonstrando a influência da circularidade para essa mistura. Comparativamente a adição de 10% do Mat 2 não teve influência no valor do $e_{mín}$ da mistura do Mat 5 para as circularidades Muito Alta e Alta, visto que, os valores de $e_{mín}$ são bem próximos entre estas misturas, entretanto, os 10% do Mat 2 que não estava presente no Mat 6 os influenciou na Circularidade Moderada requerendo 40% do Mat 3 para obter o mesmo $e_{mín}$ do Mat 5.

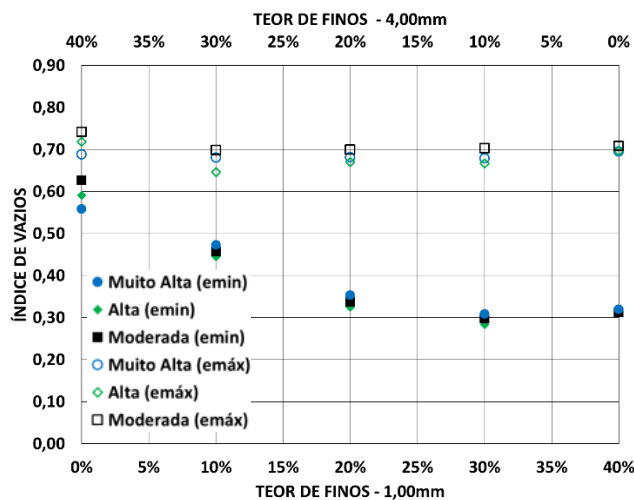
Para o índice de vazios máximo verifica-se uma variação não observada nas duas misturas anteriores (Figura 3a, 3b). Para a Circularidade Muito Alta o $e_{máx}$ (0,69) ocorre para a adição de 40% de finos, para a Circularidade Alta o $e_{máx}$ (0,71) ocorre para a adição de 30% de finos e para a Circularidade Moderada o $e_{máx}$ (0,72) ocorre para o teor de 40% de finos. Praticamente a adição dos finos do Mat 3 ao Mat 1, não modificou o índice de vazios máximo do Material 1. A variação encontrada no $e_{máx}$ das misturas pode está relacionada ao efeito de soltar os grãos no molde de ensaio em queda livre próximo a base, os grãos mais finos podem segregar (mesmo estando misturados e homogêneos) deslocando-se para a parte inferior do molde.

Cubrinovski & Ishihara (2002) indicam que solos grossos, geralmente com menos de 20% de finos, apresentam um comportamento deformacional na sua estrutura semelhante ao dos solos grossos. Por outro lado, quando a porcentagem de finos ultrapassa os 30%, o comportamento tende a se assemelhar ao de um solo fino. Assim, a faixa entre 20% e 30% representa os pontos de índice de vazios mínimo da composição, onde o comportamento transita entre características de solo fino e solo grosso.

A



B



C

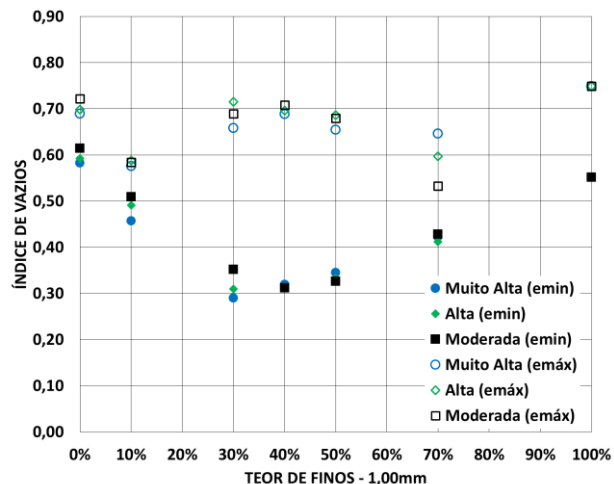


Figura 3. Variação do índice de vazios mínimo com adição de finos: a) Mistura do Mat 1 + Mat 2, b) Mistura do Mat 1 + Mat 2 + Mat 3, c) Mistura do Mat 1 + Mat 3.

Tabela 2. Índice de vazios mínimo com adição de finos ao Material 1 para as Circularidades Muito Alta, Alta e Moderada

Mistura	Índice de vazios mínimo					
	Muito Alta		Alta		Moderada	
	$e_{\text{mín}}$	% de finos	$e_{\text{mín}}$	% de finos	$e_{\text{mín}}$	% de finos
Mat 1	0,58	0	0,59	0	0,61	0
Mat 4 = Mat 1+Mat 2	0,54	50	0,53	50	0,55	50
Mat 5 = Mat 1 +Mat 2 + Mat 3	0,31	10 Ma 1+ 30 Mat 3	0,28	10 Ma 1+ 30 Mat 3	0,30	10 Ma 1+ 30 Mat 3
Mat 6 = Mat 1 + Mat 3	0,31	30	0,28	30	40	

4 CONCLUSÃO

Ensaio para determinação de valores de índice de vazios máximo ($e_{\text{máx}}$) e mínimo ($e_{\text{mín}}$) foram realizados em um solo granular grosso (Mat 1) com grãos compreendidos entre 9,52 mm e 6,35 mm e com a adição de solos granulares mais finos com grãos compreendidos entre 4,8 mm e 4,0 mm (Mat 2) e 1,18 mm e 0,84 mm (Mat 3). Os seguintes valores percentuais de finos foram adicionados ao solo grosso usado como material de referência nas misturas investigadas neste estudo (Mat 1), em massa: 10%, 30%, 40%, 50%, 70% e 100%. Os resultados experimentais sugerem que:

- Os valores de índice de vazios mínimo variaram entre 0,58, 0,59 e 0,61 e os valores de índice de vazios máximo variaram entre 0,69, 0,70 e 0,72 para as circularidades Muito Alta, Alta e Moderada respectivamente.
- O valor índice de vazios mínimo do solo grosso (Mat 1) com Circularidade Alta reduziu de 0,59 para 0,28 (2,1 vezes) com adição de 30% de finos (grãos entre 1,18 mm e 0,84 mm) ao solo grosso Mat 1 (usado como referência) para a mesma energia aplicada.
- O solo grosso Mat 1 com Circularidade Moderada e com a adição de 40% de finos (Mat 3, grãos entre 1,18 mm e 0,84 mm) reduziu do índice de vazios mínimo do solo grosso (Mat1) em 2 vezes, , enquanto nos solos com Circularidade Muito Alta e Alta a adição necessária para aproximadamente a mesma redução no valor do índice de vazios mínimo do solo grosso (Mat1) foi de 30% de finos.
- Os solos com Circularidade Alta apresentaram menores valores de índice de vazios mínimo para as misturas de solos granulares grossos e finos investigadas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbireddy, C. O. R., & Clayton, C. R. I. (2015). The impact of particle form on the packing and shear behaviour of some granular materials: an experimental study. *Granular Matter*, 17, 427-438.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16840. *Solo—Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16843. *Solo—Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2008). Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology*, 55(1), 31-63.

- Cubrinovski, M., & Ishihara, K. (2002). Maximum and minimum void ratio characteristics of sands. *Soils and foundations*, 42(6), 65-78.
- Lade, P. V., Liggio, C. D., & Yamamuro, J. A. (1998). Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *Geotechnical testing journal*, 21, 336-347.
- Maroof, M. A., Mahboubi, A., Vincens, E., & Noorzad, A. (2022). Effects of particle morphology on the minimum and maximum void ratios of granular materials. *Granular Matter*, 24(1), 41.
- Riley, N. A. (1941). Projection sphericity. *Journal of Sedimentary Research*, 11(2), 94-95.
- Sarkar, D., Goudarzy, M., König, D., & Wichtmann, T. (2020). Influence of particle shape and size on the threshold fines content and the limit index void ratios of sands containing non-plastic fines. *Soils and Foundations*, 60(3), 621-633.
- Zuo, L., & Baudet, B. A. (2015). Determination of the transitional fines content of sand-non plastic fines mixtures. *Soils and Foundations*, 55(1), 213-219.