

# Influência das Características Morfológicas na Resistência ao Cisalhamento 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:** Este artigo apresenta e discute a influência das características de forma, tamanho, distribuição das partículas (grãos) e, densidade relativa na resistência ao cisalhamento de solo granulares. Para a investigação experimental foram utilizados solos naturais, com três faixas granulométricas definidas entre: 9,52 mm e 6,35 mm, 4,8 mm e 4,0 mm, e 1,18 mm e 0,84 mm. Análise de imagem dos grãos foram utilizadas para avaliar formas dos grãos em três níveis de circularidade: muito alta, alta e moderada. Foram realizados ensaios para determinação de índice de vazios máximo e mínimo e de cisalhamento direto na condição consolidado drenado nas tensões normais de 100 kPa e 200 kPa em três densidades relativas: 20%, 50% e 70% para cada uma das circularidades avaliadas. A substituição de 30% dos grãos com dimensões entre 9,52 mm e 6,35 mm por grãos com dimensões entre 1,18 mm e 0,84 mm reduziu os valores da tensão cisalhante máxima e do ângulo de atrito, e foi o fator de maior influência no comportamento tensão-deformação-resistência dos solos granulares investigados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Formas, Solos Granulares, Resistência ao Cisalhamento, Dilatância

**ABSTRACT:** The geomechanical behavior of soils in geotechnical engineering is influenced by compressibility, shear strength and permeability. This paper presents an experimental study on the stress-strain-resistance behavior of granular materials, focusing on the effects of interparticle interaction, particle shape and size, relative density, which are of fundamental importance, but are not yet well understood. Natural soils are used, with well-defined particle size ranges between 9.52 mm and 6.35 mm, 4.80 mm and 4.00 mm, and 1.18 mm and 0.84 mm. Grain image analysis is used to separate grain shapes into three levels of circularity: very high, high and moderate. of 100 kPa and 200 kPa in three relative densities: 20%, 50% and 70% in each of the circularities. Replacing 30% of grains with dimensions of 9.52 mm and 6.35 mm by grains with dimensions between 1.18 mm and 0.84 mm reduces the maximum shear stress and the friction angle, indicating that it is the most influential factor in the stress-strain-resistance behavior of the material.

**KEYWORDS:** Shapes, Granular Soils, Shear Strength, Dilatancy

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo da resistência ao cisalhamento de solos é importante em diferentes contextos na engenharia geotécnica, abrangendo desde a estabilidade de aterros, cortes e barragens até a capacidade de carga dos solos sob construções de diversos portes. Esses desafios são diretamente influenciados pelas características de compressibilidade, resistência ao cisalhamento e permeabilidade dos solos. Tais características são afetadas por diversos aspectos, como os minerais constituintes do solo, o grau de compactação e os aspectos morfológicos das partículas, como, por exemplo, sua forma e tamanho, (Shibuya et al., 1997).

A forma de uma partícula é, definida pelas proporções de suas três dimensões lineares: comprimento, largura e espessura. Definindo o quão próximo a partícula se aproxima de uma forma discoidal, forma lamelar, forma oblata. A redondeza de uma partícula, por outro lado, independe da forma, ela está relacionada ao grau de angularidade (presença de arestas afiadas) dos cantos e arestas. Já a esfericidade é considerada como uma medida do quanto a forma de uma partícula se aproxima de uma esfera perfeita, ou seja, uma forma tridimensional com um raio de curvatura constante. A esfericidade depende tanto da forma quanto do arredondamento, uma vez que uma esfera perfeita possui comprimento, largura e espessura iguais e é completamente arredondada (Blott & Pye, 2008). Descrever a morfologia de um grão de areia pode variar significativamente dependendo da escala de observação, sendo, seu formato geral possível de ser descrito em macro escala, o grau de angulosidade em meso escala e a rugosidade em micro escala, por exemplo (Guida et. al, 2020).

Os estudos de Zhuang et al. (2014) e Abbireddy & Clayton (2015) permitiram um aumento da compreensão do comportamento de materiais granulares naturais e artificiais no comportamento tensão x deformação, demonstrando que o aumento da angulosidade da partícula eleva a tensão cisalhante ou tensão desviatória de pico e a magnitude do ângulo de atrito do material, principalmente quando comparados com grãos artificiais esféricos (esferas de vidro).

É necessário isolar a influência da forma dos grãos para compreender melhor como características geométricas individuais afetam a resposta mecânica do solo, sem interferências de outras propriedades dos materiais naturais. Isso permitirá uma análise mais precisa e detalhada dos efeitos da forma na resistência ao cisalhamento do solo, fornecendo informações valiosas para o desenvolvimento de modelos geotécnicos mais precisos e eficazes.

O objetivo do artigo é analisar o comportamento tensão-deformação-resistência de materiais granulares, com foco nos efeitos da interação interpartículas, forma e tamanho das partículas e compactação.

## 2 METODOLOGIA

Foram utilizados solos granulares que inicialmente passaram por um processo de limpeza e secagem ao ar. O Material 1 (Mat 1 – considerado como referência no estudo) é constituído por grãos entre 9,52 mm e 6,35 mm, o Material 2 (Mat 2) é constituído por grãos variando entre 4,8 mm e 4,0 mm, o Material 3 (Mat 3) é constituído de grãos entre as dimensões 1,18 mm e 0,84 mm, o Material 4 (Mat 4) é constituído de 50% de grãos do Mat 1 e 50% de grãos do Mat 2, o Material 5 (Mat 5) é constituído de 60% de grãos do Mat 1, 10% de grãos do Mat 2 e 30% de grãos do Mat 3 e Mat 6 é constituído de 70% do Mat 1 e 30% do Mat 3. A Figura 1 mostra as distribuições granulométricas. O coeficiente de uniformidade dos Materiais 1, 2, e 3 ( $C_u$ ) são 1,18, 1,10 e 1,19 respectivamente; o Mat 4 tem coeficiente de uniformidade 2 e os materiais Mat 5 e Mat 6 tem coeficiente de uniformidade 8,9. O Peso Específico Real dos Grãos ( $\gamma_g$ ) é 26,32 kN/m<sup>3</sup>.

### 2.1 Determinação da Forma das Partículas

A determinação da forma é realizada por meio da análise de imagens. 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, garantindo que não houvesse sobreposição entre elas. As partículas foram colocadas dentro de um aparato de madeira com incidência de iluminação, Figura 2. No processamento da imagem, é utilizado o software ImageJ. Inicialmente, procedeu-se à imposição de uma escala baseada na graduação presente na superfície plana. A imagem é convertida para o formato binário (preto e branco, 8 bits) e quantifica-se as características dos grãos pelo programa na determinação das dimensões da partícula, incluindo área, perímetro, maior e menor eixos.

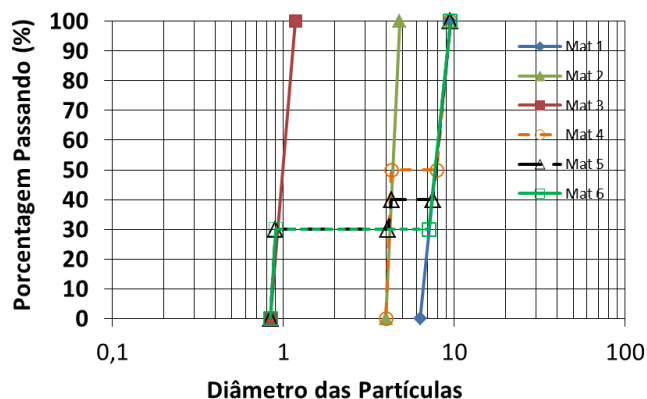


Figura 1. Distribuições granulométricas dos materiais granulares naturais investigados.

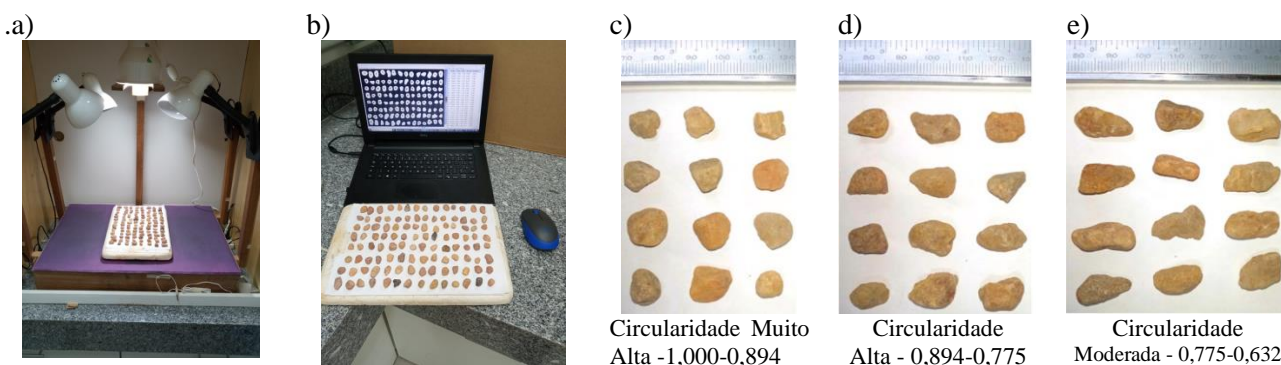


Figura 2. Avaliação da circularidade dos grãos: a) Aparato para coleta das imagens dos formatos dos grãos, b) material após a separação das circularidades, c) Circularidade Muito Alta, d) Circularidade Alta, e) Circularidade Moderada.

De acordo com a metodologia usada por Riley (1941), expressa na Equação 1, para a diferenciação de formas da partículas, e usando a classificação proposta por Blott & Pye (2008), foram obtidas 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 2.

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

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.

## 2.2 Índice de Vazios Máximos e Mínimos

O índice de vazios máximo foi determinado conforme a NBR 16840 e o índice de vazios mínimo de acordo com a norma NBR 16843, seguindo o método B1 nela especificado. O tempo de realização do ensaio foi estabelecido durante a fase inicial do procedimento. Este foi 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. 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.

A obtenção dos índices de vazios mínimo e máximo apresentados na

Tabela 1, usa-se a Equação 2, onde,  $e$  é o índice de vazios,  $\gamma_g$  o peso específico das partículas do solo e  $\gamma_s$  o peso específico seco.

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

Tabela 1. Índice de vazios máximo e mínimo para as circularidades Muito Alta, Alta e Moderada – Mat 1

Circularidade	$e_{max}$	$e_{min}$	$e_{max} - e_{min}$
Muito Alta	0,69	0,58	0,11
Alta	0,70	0,59	0,11
Moderada	0,72	0,61	0,11

### 2.3 Ensaio de Resistência ao Cisalhamento

A determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos Materiais 1, 4, 5 e 6 foi obtida por meio do ensaio de cisalhamento direto em conformidade com a norma ASTM D3080. Apesar das limitações, como a distribuição não uniforme de deformações de cisalhamento e tensões de cisalhamento, reorientações das tensões principais durante o cisalhamento e prefixação da superfície de ruptura que são reconhecidos há muito tempo (Shibuya et al. 1997), o ensaio de cisalhamento direto continua sendo um dos meios mais comumente usados e simples para investigar a resistência ao cisalhamento dos solos em laboratório. O ensaio foi conduzido na condição consolidada drenada (CD), inundado previamente, utilizando caixa de cisalhamento com dimensões de 100 x 100 mm e altura 3,87 mm. A velocidade de cisalhamento foi de 0,048 mm/min para não gerar excesso de pressão da água nos poros (tempo de ruptura maior que 60 minutos (ASTM, 2011) e as tensões normais aplicadas de 100 kPa e 200 kPa. Os materiais são compactados na caixa de cisalhamento em três densidades relativas ( $D_r$ ) diferentes: 20% (fofo), 50% (medianamente compacto) e 70% (compacto) determinados por meio da Eq. 3, para cada um dos três níveis circularidade.

$$D_r(\%) = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (3)$$

Sendo,  $D_r(\%)$  a densidade relativa,  $e_{max}$  o índice de vazios máximo,  $e_{min}$  o índice de vazios mínimo e  $e$  o índice de vazios para a densidade relativa estipulada.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta curvas de tensões x deslocamentos horizontais típicas para a densidade relativa de 20% (solo fofo) do Material 1. A Tabela 2 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as tensões normais de 100 kPa e 200 kPa, densidades relativas de 20%, 50% e 70% e as circularidades Muito Alta, Alta e Moderada e a Tabela 3 mostra os valores dos ângulos de atrito.

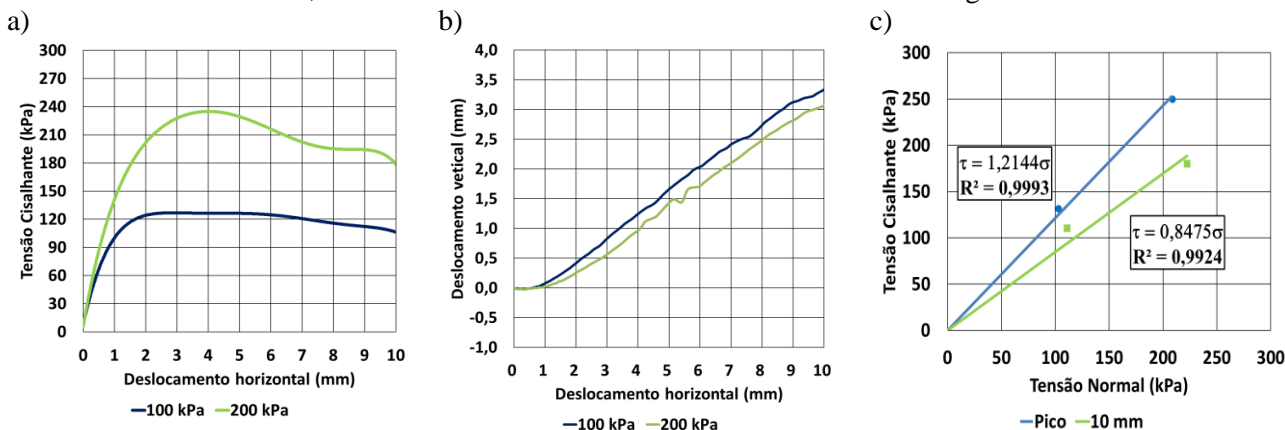


Figura 3: Comportamento tensão – deslocamento – resistência para densidade relativa de 20% para circularidade muito alta: a) Curva tensão X deslocamento horizontal, b) Curva deslocamento vertical X deslocamento horizontal, c) Envoltória de resistência.

Na densidade relativa de 20% (solo fofa) e tensão normal de 200 kPa, o comportamento tensão x deslocamento do solo com Circularidade Muito Alta, Alta e Moderada são semelhantes, apresentando a maior tensão cisalhante próximo ao deslocamento de 4 mm (deformação de 4%). Para as três circularidades a tensão cisalhante máxima é em torno de 250 kPa (Tabela 2). Para a tensão de 100 kPa o comportamento tensão x deslocamento é de material plástico para solo com Circularidade Muito Alta, e comportamento de pico nas Circularidades Alta e Moderada. O solo com Circularidade Alta apresenta a maior tensão cisalhante 151,8 kPa (Tabela 2). As curvas de deslocamento vertical x deslocamento horizontal para os três formatos apresentam dilatação, com a tensão de 100 kPa mostrando maiores dilatâncias em comparação a tensão normal de 200 kPa. Ao analisar o efeito da dilatância entre os três formatos, observam-se valores mais elevados nos formatos de Circularidade Muito alta e Alta.

Tabela 2. Resumo dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o Material 1 nas Densidades Relativas de 20%, 50% e 70% e Circularidades Muito Alta, Alta e Moderada.

	Densidade Relativa	20%			50%			70%		
		M. Alta	Alta	Moderada	M. Alta	Alta	Moderada	M. Alta	Alta	Moderada
Tensão Normal 100 kPa	Comportamento da Curva Tensão X Deslocamento	Plástico	Plástico	Plástico	Plástico	Pico	Plástico	Plástico	Plástico	Pico
	T. Cisalhante Máxima (kPa)	131,7	151,8	137,3	142,6	141,5	140,9	144,5	150,0	145,9
	Deslocamento na Tensão Máxima (mm)	2,8	6,1	5,2	3,3	5,1	4,5	5,1	5,3	4,3
	Deslocamento Vertical Máximo para 10 mm de Deslocamento Horizontal (mm)	3,4	3,6	3,0	3,3	3,5	3,6	3,5	3,4	3,4
Tensão Normal 200 kPa	Comportamento da Curva Tensão X Deslocamento	Pico	Plástico	Pico	Pico	Pico	Pico	Plástico	Pico	Pico
	T. Cisalhante Máxima (kPa)	250,1	253,7	251,7	276,0	266,1	266,1	273,1	278,0	292,9
	Deslocamento na Tensão Máxima (mm)	4,2	3,8	4,7	5,0	3,7	3,7	5,1	2,9	5,2
	Deslocamento Vertical Máximo para 10 mm de Deslocamento Horizontal (mm)	3,1	2,8	2,4	3,6	3,7	3,7	3,5	3,2	3,2

Tabela 3. Ângulo de Atrito referente ao Material 1

Densidade Relativa	20%			50%			70%		
	M. Alta	Alta	Moderada	M. Alta	Alta	Moderada	M. Alta	Alta	Moderada
Ângulo de Atrito	51°	52°	51°	53°	52°	51°	53°	54°	54°
Ângulo de Atrito para 10 mm de Deslocamento Horizontal	40°	47°	42°	45°	44°	44°	48°	49°	48°

Na densidade relativa de 50% (solo medianamente compacto) o comportamento de pico é observado na tensão de 200 kPa em todas as formas. A Circularidade Muito Alta apresenta o maior valor de tensão cisalhante. Para a tensão de 100 kPa as curvas de tensões x deslocamentos predominam material de comportamento plástico. A tensão máxima de 140 kPa é praticamente a mesma para as três formas e a dilatância para o solo com Circularidade Muito Alta é menor do que as outras duas formas.

Na densidade relativa de 70% na condição de solo compacto, as curvas tensões x deslocamentos horizontais dos solos com Circularidade Muito Alta e Alta, exibiram características de deformação plástica para as tensões normais aplicadas de 100 kPa e 200 kPa. Por outro lado, na Circularidade Moderada apresenta um comportamento de pico para ambas as tensões. Ao observar a magnitude da tensão de cisalhamento entre os três formatos, destaca-se que a Circularidade Moderada apresenta o maior valor da tensão cisalhante (292,87 kPa) para a tensão normal de 200 kPa (Tabela 2) e as curvas deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais praticamente para as tensões normais de 100 kPa e 200 kPa são praticamente sobrepostas para todas as formas.

No Material 1 a tensão cisalhante máxima para as tensões normais aplicadas de 100 kPa tem pequena variação com a Circularidade (Muito alta, Alta e Moderada) e densidade relativa (20%, 50% e 70%) com valor médio de 146,80 kPa) o mesmo de verifica-se para a tensão normal de 200 kPa com valor médio de 281,31 kPa, (Figura 4a). O ângulo de atrito é praticamente constante e igual a 52° independente do valor da circularidade e varia de 51° da compacidade fofa ( $D_r = 20\%$ ) a 54° para compacta ( $D_r = 70\%$ ), Figura 4b.

Considerando agora as misturas do Material 1 com os Materiais 2 e 3, o comportamento tensão-deslocamento-resistência do Material 5 (constituído de 60% de grãos do Mat 1, 10% de grãos do Mat 2 e 30% de grãos do Mat 3) para a  $D_r$  de 50% (medianamente compacto) é apresentada na Figura 5. A curva Tensão Cisalhante X Deslocamento Horizontal apresenta um comportamento pico (Figura 5a). Observa-se no início do cisalhamento pequena compressão até 1,3 mm e 1,0 mm deslocamento horizontal para a tensão



normal inicial de 100 kPa e 200 kPa respectivamente, seguido de dilatação (1,3 mm) no final do cisalhamento igual para as duas tensões de consolidação usadas.

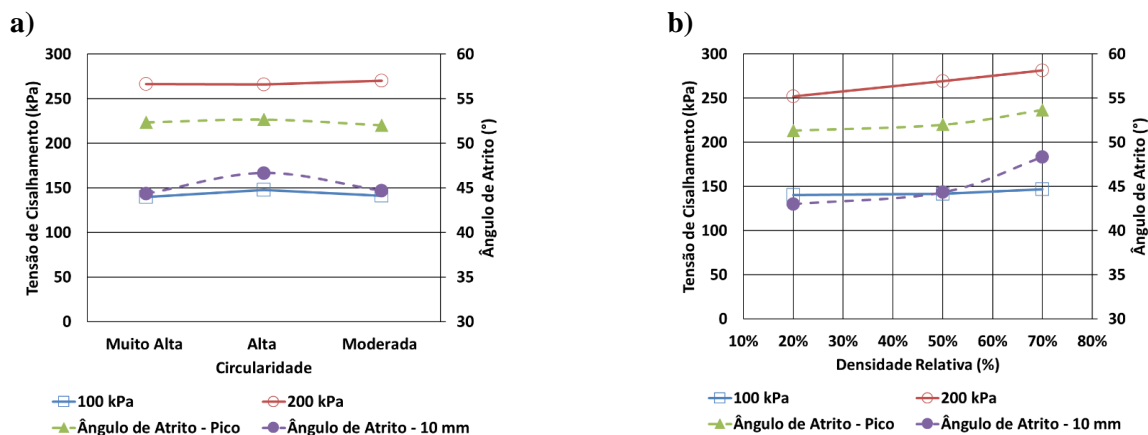


Figura 4. Variação da tensão cisalhante máxima e ângulo de atrito com a circularidade e densidade relativa a) circularidade, b) densidade relativa.

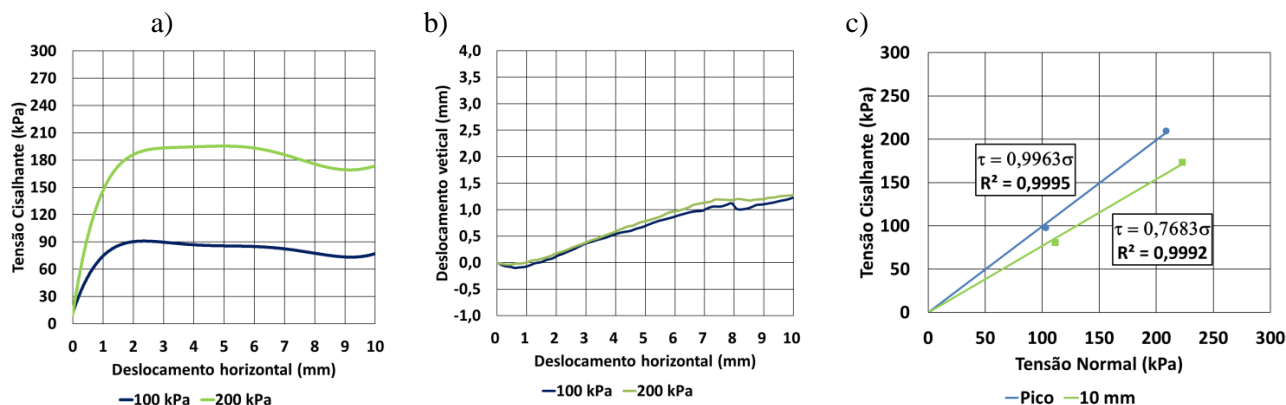
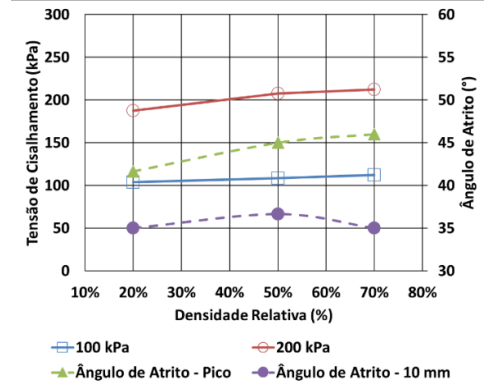
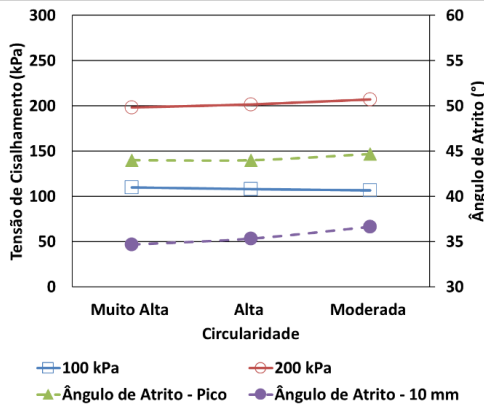


Figura 5. Comportamento tensão-deformação-resistência para o Material 5 com densidade relativa de 50%: a) Curvas tensão cisalhante X Deslocamento horizontal, b) Deslocamento Vertical X Deslocamento Horizontal, c) Tensão cisalhante X Tensão normal.

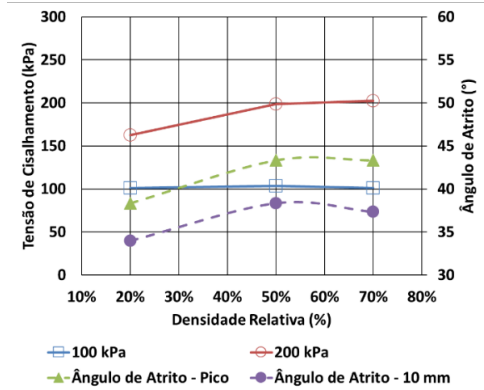
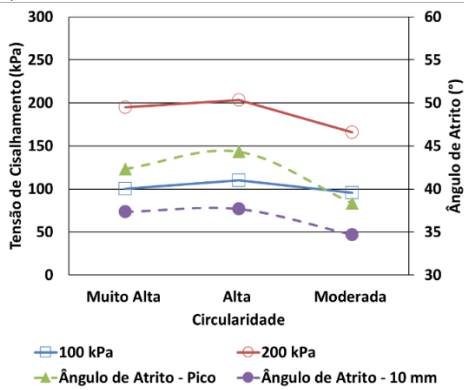
A Figura 6 apresenta a variação da tensão cisalhante máxima e ângulo de atrito com a circularidade e densidade relativa para os Materiais 4, 5 e 6. No Material 4 (substituído de 50% de grãos do Mat 1 por 50% de grãos do Mat 2), verifica-se que a influência da substituição é pequena na circularidade apresentando ângulo de atrito com valor médio de  $42^\circ$  considerando tensões cisalhantes máxima (pico) e  $35^\circ$  para tensões cisalhantes associada ao deslocamento 10 mm, Figura 6a. Quando a densidade relativa cresce de 20% para 70% há um acréscimo no valor do ângulo de atrito de pico de  $42^\circ$  para  $46^\circ$  (9% de acréscimo) e na tensão de cisalhamento máxima de 103 kPa para 120 kPa (16% de acréscimo) para tensão normal aplicada de 100 kPa e de 180 kPa para 212 kPa (17% de acréscimo) na tensão normal de 200 kPa. A substituição de 50% de grãos do Mat 1 por 50% de grãos do Mat 2 reduz em média as tensões cisalhantes máximas e as correspondentes a 10 mm de deslocamento em 24% para as tensões normais aplicada de 100 kPa e 200 kPa, no ângulo de atrito para tensão cisalhante máxima a redução é 15% e o ângulo de atrito para tensão cisalhante do final do ensaio é de 21%. O fator de maior influência no comportamento tensão-deformação-resistência do Material 1 é a substituição de 50% de grãos do Mat 1 por 50% de grãos do Mat 2 que constitui o Mat 4.

No Material 5, constituído de 60% de grãos do Mat 1, 10% de grãos do Mat 2 e 30% de grãos do Mat 3, verifica-se que a circularidade passa a ter maior influência no comportamento tensão-deformação-resistência do que no Material 4. Os menores valores obtidos para as tensões cisalhantes e ângulos atritos são observados para a circularidade moderada e os maiores na circularidade alta, Figura 6b. A inserção de

a) Material 4



b) Material 5



c) Material 6

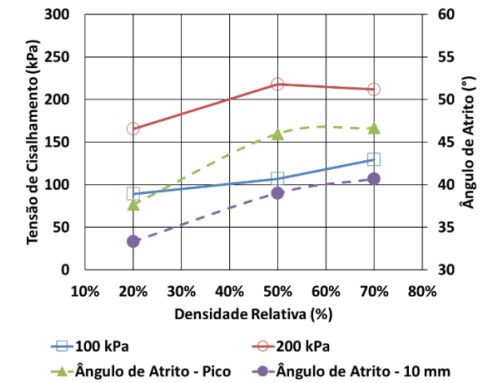
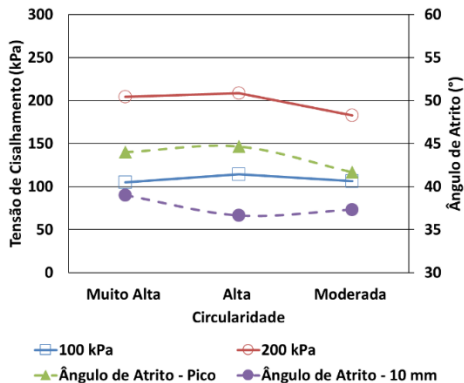


Figura 6. Variação da tensão cisalhante máxima e ângulo de atrito com a circularidade e densidade relativa para o a) Mat 4, b) Mat 5 e c) Mat 6.

partículas menores (Mat 3), em maior proporção, a energia gerada na dilatância é menor (Figura 5), por outro lado, as partículas com circularidade moderada tendem a deslizar mais em relação ao rolamento no contato entre as partículas gerando também menor dilatância. As tensões cisalhantes e os ângulos de atrito crescem com o acréscimo da densidade relativa. A substituição de 40% do Mat 1 por 10% do Mat 2 e 30% do Mat 3 em relação ao Mat 1 reduz em média as tensões cisalhantes máximas e as correspondentes a 10 mm de deslocamento em 29% para as tensões normais aplicadas, o ângulo de atrito para tensão cisalhante máxima e o ângulo de atrito para tensão cisalhante do final do ensaio em 20%. De igual modo ao Mat 4 o comportamento tensão-deformação-resistência do Mat 5 é a substituição dos grãos maiores (Mat 1) pelos menores (Mat 2 e 3).

No Material 6 (constituído de 70% do Mat 1 e 30% do Mat 3) a circularidade tem influência no comportamento tensão-deformação-resistência do que Material 6 tal como no Material 5. Os menores valores obtidos para as tensões cisalhantes e ângulos atritos são observados na circularidade moderada, Figura 6c. O

acréscimo 10% (70% - 60%) do Mat 1 presente no Mat 6 em relação ao Mat 5 eleva os valores tensões cisalhantes e dos ângulos de atritos nas diferentes circularidades e densidade relativa em relação ao Mat 5. As tensões cisalhantes e os ângulos de atrito crescem com o acréscimo de densidade relativa. A substituição de 30% do Mat 1 por 30% do Mat 3 reduz em média as tensões cisalhantes máximas e as correspondentes a 10 mm de deslocamento em 24% para as tensões normais aplicadas, o ângulo de atrito para tensão cisalhante máxima e o ângulo de atrito para tensão cisalhante do final do ensaio em 17%. De igual modo aos Mat 4 e 5 o fator que mais influencia o comportamento tensão-deformação-resistência do Mat 6 é a substituição dos grãos maiores (Mat1) pelos menores no caso do Mat 2 e Mat 3.

#### 4 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um estudo experimental para avaliar a influência das características de forma, tamanho, distribuição das partículas (grãos) e, densidade relativa na resistência ao cisalhamento de solo granulares. Para a investigação experimental foram utilizados solos naturais, com três faixas granulométricas definidas entre: 9,52 mm e 6,35 mm, 4,8 mm e 4,0 mm, e 1,18 mm e 0,84 mm. Os principais resultados e observações são resumidos para o solo granular com grãos entre 9,52 mm e 6,35 mm, tal que:

- A circularidade dos grãos e o acréscimo da densidade relativa tem maior influência no comportamento do solo granular quando os grãos de dimensões entre 1,18 mm e 0,84 mm (30%) substituem os grãos da faixa 9,52 mm e 6,35 mm, devido à interação dos dois fatores.
- Quanto menor o coeficiente de uniformidade ( $C_u = 1$ ) e maior a dimensão dos grãos o acréscimo da densidade relativa e a circularidade tem menor influência na variação do ângulo de atrito.
- A substituição de 30% dos grãos de dimensões de 9,52 mm e 6,35 mm por grãos de dimensões entre 1,18 mm e 0,84 mm reduz a tensão cisalhante máxima e o ângulo de atrito. Esse foi o fator de maior influência no comportamento tensão-deformação-resistência dos solos granulares investigados.

#### 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.
- ASTM International (2011). D 3080-04, *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2008). Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology*, 55(1), 31-63.
- Guida, G., Viggiani, G. M., & Casini, F. (2020). Multi-scale morphological descriptors from the fractal analysis of particle contour. *Acta Geotechnica*, 15(5), 1067-1080.
- Riley, N. A. (1941). Projection sphericity. *Journal of Sedimentary Research*, 11(2), 94-95.
- Shibuya, S., Mitachi, T., & Tamate, S. (1997). Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear. *Géotechnique*, 47(4), 769-790.
- Zhuang, L., Nakata, Y., Kim, U. G., & Kim, D. (2014). Influence of relative density, particle shape, and stress path on the plane strain compression behavior of granular materials. *Acta Geotechnica*, 9, 241-255.