

Estudo do Efeito de Partículas Flutuantes na Resistência ao Cisalhamento de Solos Granulares

Raquel Carvalho de Souza

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, raquelbenevenuto@poli.ufrj.br.

Marcos Barreto de Mendonça

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, mbm@poli.ufrj.br.

RESUMO: Estudos indicam que para materiais granulares com partículas de diâmetros diferentes, quando as de maior diâmetro não se tocam, situação em que são denominadas partículas flutuantes, a resistência ao cisalhamento seria governada pelas partículas de menor diâmetro, sendo possível, portanto, remover as partículas maiores sem mudança na resistência ao cisalhamento. Visando contribuir para a avaliação dessa prática, foi realizada uma série de ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova contendo dois materiais de granulometria uniforme selecionados para representar as partículas de maior e menor diâmetro. Os ensaios foram, então, realizados com amostras contendo diferentes porcentagens de partículas menores (areia) e de partículas maiores (esferas de aço de 4 mm). Para cada amostra foi traçada a envoltória de resistência, sendo possível comparar os ângulos de atrito dos diferentes casos. Verificou-se a diminuição do ângulo de atrito das amostras quanto menor o percentual de esferas de aço. Observou-se que a presença de areia entre as esferas de aço, mesmo estas em condição flutuante, provocou um aumento do ângulo de atrito em relação aos observados para as amostras formadas somente por esferas de aço ou somente por areia.

PALAVRAS-CHAVE: Cisalhamento Direto, Resistência ao Cisalhamento, Esfera de Aço, Partículas Flutuantes.

1 INTRODUÇÃO

Apesar de apresentar limitações e deficiências, os ensaios de cisalhamento direto são comumente utilizados quando se deseja estudar a resistência ao cisalhamento dos solos devido à simplicidade de execução, principalmente para solos granulares.

A norma americana ASTM D3080, que regula os procedimentos do ensaio de cisalhamento direto, determina as dimensões mínimas dos corpos de prova de maneira proporcional ao maior diâmetro das partículas de solo que formam o corpo de prova. O comprimento mínimo de corpos de prova quadrados (ou diâmetro para corpos de prova circulares) deve ser de 50 mm, não podendo ser menor que 10 vezes o diâmetro da maior partícula. Já a altura mínima do corpo de prova

é de 12 mm, não devendo ser menor que 6 vezes o diâmetro da maior partícula.

Para solos que contenham partículas de grandes dimensões, os ensaios podem requerer caixas de cisalhamento de grandes dimensões, dificultando, às vezes, sua realização e suscitando a discussão quanto a uma adequação da metodologia existente de moldagem do corpo de prova.

Seif El Dine et al. (2010) citam dois métodos apontados como clássicos para a moldagem dos corpos de prova visando contornar o obstáculo causado pelo tamanho das partículas de amostras a serem ensaiadas nas caixas de cisalhamento convencionais. O primeiro método é chamado de “retirada e substituição”. Neste método as partículas maiores são removidas e substituídas por uma quantidade igual em massa de partículas do tamanho máximo permitido para o

equipamento. No segundo método as partículas maiores são apenas removidas e o corpo de prova é moldado com o material restante. A diferença está, portanto, na granulometria do material de substituição.

Visando avaliar a influência das partículas maiores em condição flutuante, ou seja, quando estas não se tocam, na resistência ao cisalhamento, Seif El Dine et al. (2010) realizaram ensaios triaxiais em misturas de areia e pedregulhos fazendo variar a inclusão da parcela mais grosseira em 0%, 12%, 20% e 35% do volume total da amostra, sabendo que nessas configurações as partículas grosseiras não estariam em contato. Os resultados indicaram que os parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras aumentaram com o aumento da inclusão de partículas grosseiras. Logo, o método de moldagem em que é feita a simples retirada de material grosseiro acarreta a diminuição da resistência ao cisalhamento mesmo quando estas estão em condições flutuantes.

Em relação ao método de retirada e substituição por partículas do tamanho máximo permitido, apesar de causar menores distorções, Seif El Dine et al. (2010) indicam que houve um aumento da resistência ao cisalhamento.

Fragaszy et al. (1992) indicam que, em amostras de material granular, as partículas que excedem as dimensões máximas para serem ensaiadas em determinado equipamento não afetam significativamente a resistência ao cisalhamento se estiverem em condição flutuante. Segundo estes autores, pelo fato das partículas em condição flutuante estarem completamente circundadas por partículas de diâmetro menor (matriz), a amostra poderia ser representada em ensaios de cisalhamento direto, sem prejuízo na análise, por um corpo de prova formado somente pela matriz.

Diante do exposto, percebe-se uma demanda de se aprofundar o conhecimento sobre o efeito da retirada das partículas de maiores dimensões em estado flutuante na resistência ao cisalhamento de uma amostra de solo granular.

Visando contribuir para tal, procurou-se, no presente trabalho, apresentar uma série de ensaios de cisalhamento direto com material granular cujas partículas apresentassem

diâmetros significativamente distintos. As amostras seriam, portanto, constituídas de partículas maiores e de partículas menores, estas constituindo a matriz, fazendo variar as porcentagens das mesmas.

Desse modo, buscou-se comparar os parâmetros de resistência ao cisalhamento (ângulos de atrito; coesão nula) das diferentes amostras de solo, de forma a verificar a influência da retirada de determinados percentuais de partículas de maior diâmetro e do entrosamento entre as diferentes partículas.

Ressalta-se que a campanha experimental apresentada nesse trabalho (Souza, 2015) consiste em uma etapa inicial de uma pesquisa em andamento sobre o assunto.

2 METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO

2.1 Materiais Utilizados

Foram testados materiais que pudessem representar as partículas de maior diâmetro e a matriz (partículas de menor diâmetro). Para as de maior diâmetro foram escolhidas esferas de aço-cromo de 4 mm de diâmetro (Figura 1a). Para representar a matriz usou-se a parcela da areia de Hokksund (Figura 1b) retida entre as peneiras #60 (0,25 mm de abertura) e #40 (0,42 mm de abertura). A areia de Hokksund é proveniente da cidade norueguesa de mesmo nome, de origem fluvio-glacial, apresentando grãos médios, uniformes, angulosos, compostos, principalmente, pelos minerais feldspato, quartzo e mica (Parkin e Lunne, 1982 apud Telles, 2013).

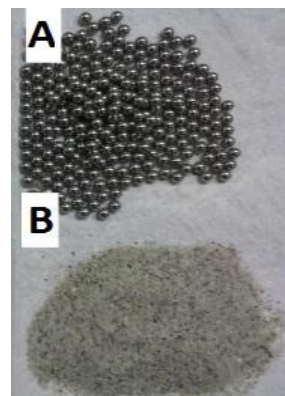


Figura 1 – Materiais granulares utilizados nos ensaios: (a) esferas de aço de 4 mm; (b) areia de Hokksund peneirada.

2.2 Procedimentos dos Ensaios

Foram programados ensaios drenados de cisalhamento direto com tensões normais iniciais de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, utilizando os materiais supracitados na condição seca.

Visou-se realizar ensaios variando o percentual de partículas grandes em relação às pequenas. Para saber se as partículas grandes encontravam-se na condição flutuante ou não flutuante definiu-se um índice físico que representasse o volume ocupado pelas partículas grandes em relação ao volume total do corpo de prova. Tal índice recebeu o nome, no presente trabalho, de índice de vazios das partículas grandes ($e_{\text{part. grandes}}$), expresso pela Equação 1.

$$e_{\text{part. grandes}} = \frac{\text{Volume total} - \text{Volume de partículas grandes}}{\text{Volume de partículas grandes}} \quad (1)$$

Se esse índice ($e_{\text{part. grandes}}$) for maior que o índice de vazios máximo que um corpo de prova constituído somente de partículas grandes pode ter ($e_{\text{máx teórico}}$), as partículas grandes não estariam se tocando em sua maioria, ou seja, estarão na condição flutuante. Caso contrário, as partículas estarão na condição não flutuante (Figura 2).

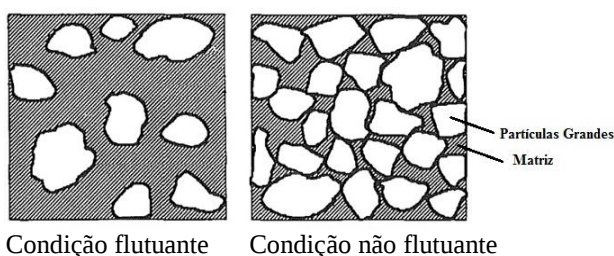


Figura 2 - Desenhos esquemáticos de partículas nas condições flutuante e não flutuante (Fragaszy et al. modificado).

O $e_{\text{máx teórico}}$ pode ser definido como o índice de vazios das partículas grandes dispostas na caixa de cisalhamento conforme o arranjo apresentado na Figura 3. Para o cálculo do $e_{\text{máx teórico}}$, o volume ocupado pela matriz é considerado volume de vazios. Para tal arranjo, o valor do $e_{\text{máx teórico}}$ é de 1,245, que é o volume da caixa de cisalhamento menos a soma do volume das esferas de aço dividido pelo volume das esferas.

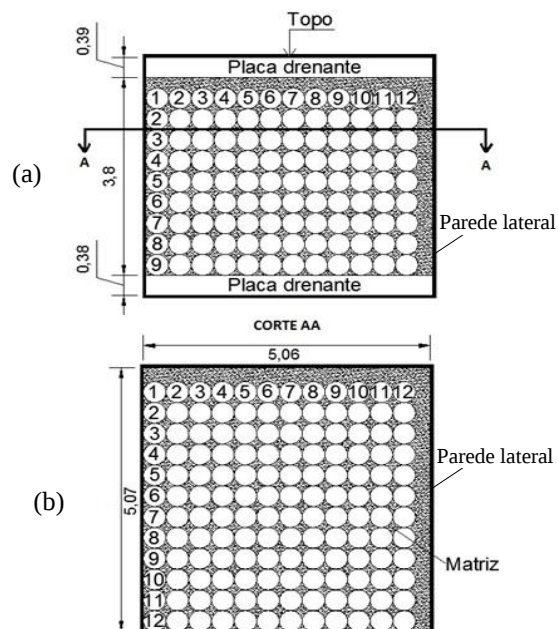


Figura 3 - Arranjo das partículas grandes para o índice de vazios teórico dentro da caixa de cisalhamento: (a) seção vertical; (b) seção horizontal.

Portanto, se $e_{\text{part. grandes}} > e_{\text{máx teórico}} = 1,245$ tem-se a condição flutuante, caso contrário as partículas grandes estarão se tocando em sua maioria, ou seja, estarão na condição não flutuante.

Diante do exposto, propuseram-se as seguintes configurações de amostras a serem ensaiadas.

- Amostra formada somente pela matriz (areia de Hokksund peneirada entre os diâmetros 0,25 mm e 0,42 mm);
- Amostra formada somente pelas esferas de aço de 4 mm;
- Amostra constituída por esferas de aço na condição não flutuante ($e_{\text{part. grandes}} \leq e_{\text{máx teórico}}$) e pela matriz;
- Amostra com menos 7,5% de volume de esferas de aço em relação ao volume de sólidos da condição não flutuante;
- Amostra com menos 15% de volume de esferas de aço em relação ao volume de sólidos da condição não flutuante;
- Amostra com menos 30% de volume de esferas de aço em relação ao volume de sólidos da condição não flutuante;
- Amostra com menos 45% de volume de esferas de aço em relação ao volume de sólidos da condição não flutuante;

Para moldagem dos corpos de prova somente de partículas grandes, as esferas de aço foram vertidas em um tubo de PVC de 4,25 cm de

diâmetro centralizado no interior da caixa de cisalhamento. O tubo era retirado na posição vertical em um tempo de 1 segundo, de forma que as esferas se acomodavam na caixa.

Para a moldagem dos corpos de prova somente com a matriz (areia) procurou-se um método que alcançasse o índice de vazios o mais próximo do obtido na matriz dos corpos de prova mistos ($e_{\text{médio matriz}} = 1,1$), que serão abordados adiante. O método que encontrou o índice de vazios mais próximo do desejado foi o mesmo adotado para a moldagem dos corpos de prova de esferas de aço.

Houve a preocupação em manter o índice de vazios da matriz nos diversos tipos de corpos de prova mistos dentro de uma faixa pequena de variação, para que este não fosse o fator responsável por uma possível variação do parâmetro analisado (ângulo de atrito). Além disso, era necessário garantir que, nos corpos de prova mistos, o índice de vazios das partículas grandes se mantivesse maior que o $e_{\text{máx teórico}}$ para ficarem na condição não flutuante.

3 RESULTADOS DOS ENSAIOS E ANÁLISES

A partir de resultados foram elaboradas as envoltórias de resistência retilíneas considerando o intercepto de coesão igual a zero para as diferentes amostras, conforme apresentado nas Figuras 4 a 10, onde estão indicados também os ângulos de atrito obtidos. Os dados sobre os corpos de prova das diferentes amostras ensaiadas e os respectivos ângulos de atrito estão apresentados na Tabela 1.

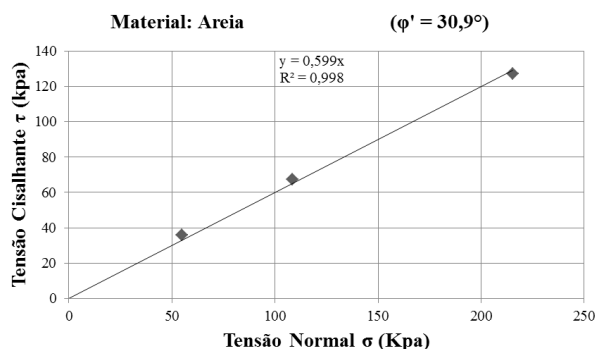


Figura 4 - Envoltória de ruptura para a amostra de areia.

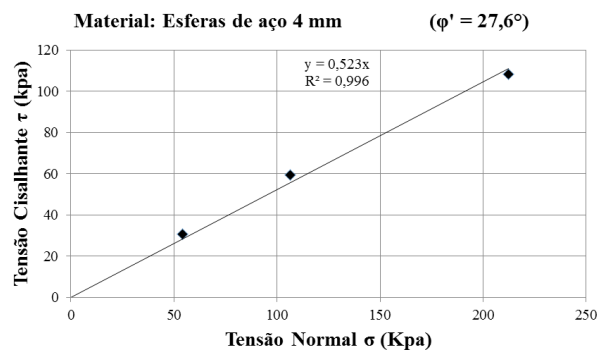


Figura 5 - Envoltória de ruptura para a amostra de esferas de aço 4 mm.

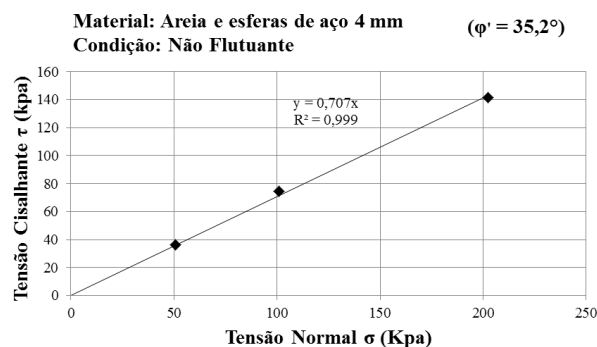


Figura 6 - Envoltória de ruptura para a amostra de areia e esferas de aço na condição não flutuante.

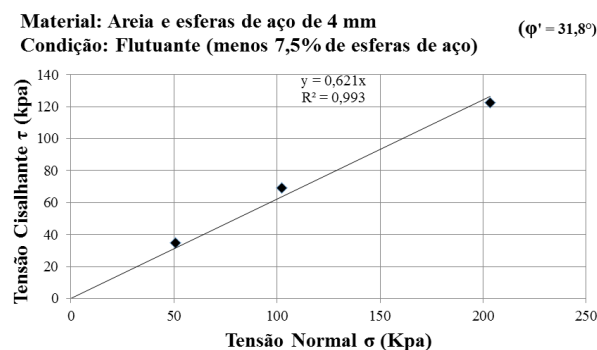


Figura 7 - Envoltória de ruptura para a amostra com menos 7,5% de volume de esferas de aço em relação ao volume de sólidos da condição não flutuante.

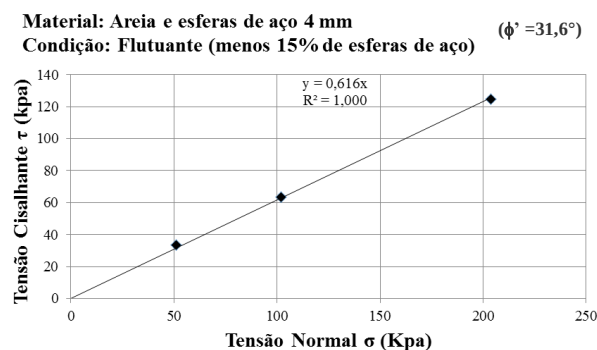


Figura 8 - Envoltória de ruptura para a amostra com menos 15% de volume de esferas de aço em relação ao volume de sólidos da condição não flutuante.

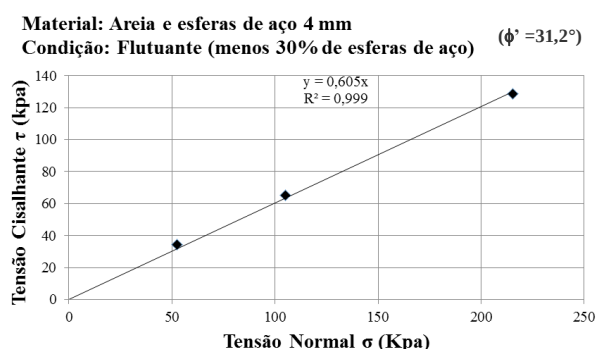


Figura 9 - Envoltória de ruptura para a amostra com menos 30% de volume de esferas de aço em relação ao volume de sólidos da condição não flutuante.

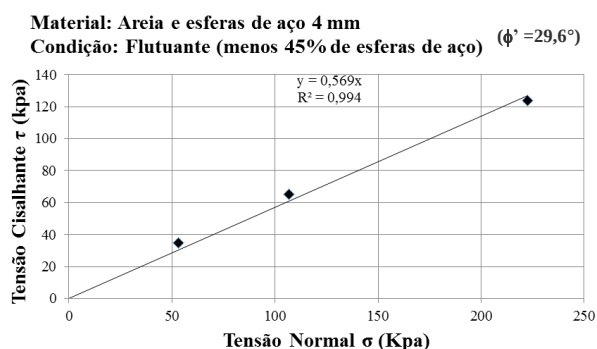


Figura 10 - Envoltória de ruptura para a amostra com menos 45% de volume de esferas de aço em relação ao volume de sólidos da condição não flutuante.

Tabela 1 – Dados sobre corpos de prova ensaiados e ângulos de atrito das amostras obtidos.

Material	Condição de flutuação	e_{areia}	e_{esferas}	ϕ'
Areia de Hokksund peneirada	-	1,082	-	30,9°
		1,082	-	
		1,084	-	
Esferas de aço 4 mm	-	-	0,997	27,6°
		-	0,995	
		-	0,997	
Areia de Hokksund peneirada e esferas de aço 4 mm	Não flutuante	1,144	1,232	35,3°
		1,154	1,238	
		1,152	1,229	
	Flutuante (com 7,5% de retirada)	1,098	1,53	31,8°
		1,087	1,525	
		1,098	1,544	
	Flutuante (com 15% de retirada)	1,025	1,909	31,6°
		1,073	1,912	
		1,078	1,926	
	Flutuante (com 30% de retirada)	1,189	3,225	31,2°
		1,189	3,225	
		1,162	3,213	
	Flutuante (com 45% de retirada)	1,127	6,615	29,6°
		1,125	6,615	
		1,119	6,615	
Intercepto de coesão de todas as amostras = 0				

A Figura 11 apresenta a curva de variação do ângulo de atrito de cada amostra, obtido da envoltória de resistência retilínea passando pela origem, permitindo a avaliação do efeito das diferentes configurações quanto ao percentual de esferas de aço no parâmetro de resistência.

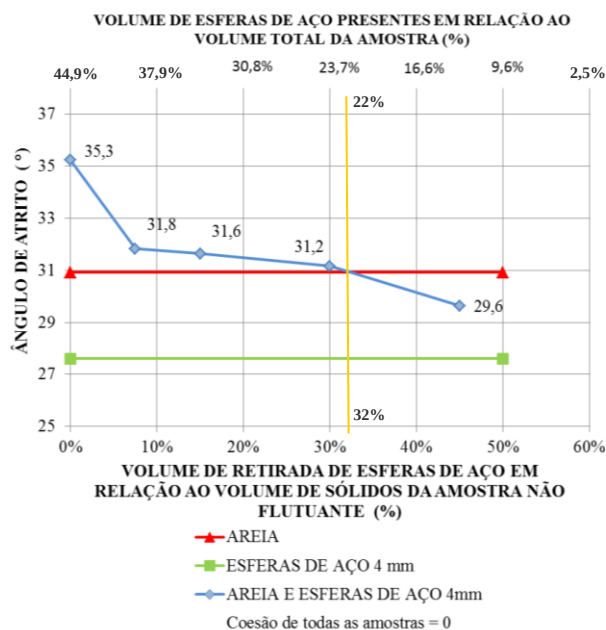


Figura 11 - Variação do ângulo de atrito com a variação da quantidade de esferas de aço.

A Figura 11 indica que a presença de areia entre as esferas de aço fez com que o ângulo de atrito aumentasse consideravelmente ($\phi' = 35,3^\circ$) comparando com a amostra só de esferas ($\phi' = 27,6^\circ$). Poder-se-ia pensar que os ângulos de atrito das amostras misturadas ficassem entre os ângulos de atrito da areia e da esfera. Porém observou-se que os ângulos de atrito das amostras misturadas, com exceção da amostra com a menor quantidade de esferas (menos 45% de esferas), foram maiores que o da amostra de areia ($\phi' = 30,9^\circ$). Esse aumento do ângulo de atrito devido à mistura de areia com esferas indica o efeito positivo do entrosamento entre essas partículas, o que também foi observado por Seif El Dine et al. (2010).

Foi observada também a diminuição do ângulo de atrito das amostras mistas com o aumento da retirada de esferas de aço dos corpos de prova, em outras palavras, com o aumento da condição de flutuação dos mesmos.

Ainda segundo a curva apresentada na Figura 11, estima-se que somente uma amostra mista com a retirada de 32% em volume de esferas de

aço (valor estimado através de interpolação), o que significa que 22% do volume total do corpo de prova está ocupado por esferas de aço, apresentaria ângulo de atrito da mistura igual ao da matriz. Com uma retirada menor que 32%, o ângulo de atrito da mistura é levemente maior que o da matriz e o contrário quando a retirada é maior que 32%.

Tais resultados contribuem para a avaliação do método de se usar uma amostra de solo constituída somente pela matriz para representar a amostra mista completa (matriz e partículas grandes) em condição flutuante como forma de contornar o obstáculo devido à limitação do tamanho máximo das partículas permitido no ensaio de cisalhamento, segundo a norma ASTM D3080 (Fragaszy et al.,1992).

No caso estudado no presente trabalho observou-se que essa substituição da amostra mista (esferas de aço e areia) por uma amostra formada somente pela matriz (areia) só seria viável para o caso da amostra com 22% do volume total do corpo de prova ocupado por esferas de aço. Quando esse percentual é maior que 22%, o procedimento citado acima subestima o ângulo de atrito e o contrário quando é menor que 22%, entretanto com uma diferença pequena.

Ressalta-se que a variação dos ângulos de atrito das amostras mistas na condição flutuante em relação ao ângulo de atrito encontrado para a matriz foi de no máximo 1,3°.

4 CONCLUSÕES

Através de ensaios de cisalhamento direto realizado com amostras constituídas de partículas de areia e de esferas de aço (diâmetro de 4 mm), com diferentes percentuais de mistura, observou-se que a presença de areia entre as esferas de aço, mesmo estas em condições flutuantes (as esferas não se tocam), provocou um aumento do ângulo de atrito (considerando coesão nula) em relação aos verificados para as amostras formadas somente por esferas de aço. Comparando com o ângulo de atrito da amostra constituída somente de areia, observou-se o mesmo, com exceção para a amostra mista com a presença de 13,1% de esferas de aço. Esse aumento do ângulo de

atrito devido à mistura de areia com esferas indica o efeito positivo do entrosamento entre essas partículas.

Constatou-se também que os ângulos de atrito das amostras mistas diminuíram com a intensidade da condição de flutuação.

Visando atender a um dos objetivos do estudo, pode-se dizer que a amostra mista (esferas de aço e areia) pode ser representada por uma amostra formada somente pela matriz (areia), para fins de estimativa da resistência ao cisalhamento, quando a mistura possuir 22% do volume total do corpo de prova ocupado por esferas de aço. Quando esse percentual de esferas de aço é maior, o ângulo de atrito é maior que o da matriz e o contrário quando o percentual é menor.

Ressalta-se que os ensaios realizados referem-se a uma mistura de materiais específicos e, portanto, o comportamento mecânico observado através dos ensaios não pode ser generalizado. Entretanto, as observações constatadas contribuem para se avançar no entendimento da interação entre partículas menores e maiores e avaliar o método de se usar uma amostra de solo constituída somente pela matriz para representar uma amostra mista (matriz e partículas grandes) em condição flutuante.

REFERÊNCIAS

- ASTM D3080 (2011). *Standard Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.
- Fragaszy, R. J., Su, J., Siddiqui, S.H. e Ho, C.L. (1992). Modeling Strength of Shady Gravel, *Journal of Geotechnical Engineering*, v.118, n.6, pp.920-935.
- Parkin, A.K. e Lunne, T. (1982). Boundary Effects in the Laboratory Calibration of a Cone Penetrometer for Sand, *Norwegian Geotechnical Institute Publication*, n. 138.
- Seif El Dine, B., Dupla, J. C., Frank, J., Canou, J. e Kazan, Y. (2010). Mechanical Characterization of Matrix Coarse Grained Soils With a Large-sized Triaxial Device, *Canadian Journal*, v.47, pp. 425-438.
- Souza R. C. (2015). *Estudo do Efeito de Partículas Flutuantes nos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento de Solos Granulares Artificiais*,

Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 64p.

Teles G. L. V. (2013). *Estudo sobre os Parâmetros de Resistência e Deformabilidade da Areia de Hokksund*, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 87p.