

Sucção Mátrica de Areia Artificialmente Cimentada

Gonçalo de Lima Sonaglio

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, goncalo.sonaglio@gmail.com

Rafael Reinaldo Gracez Nedel

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, rafanedel@hotmail.com

Lucas Festugato

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, lucas@ufrgs.br

RESUMO: Os primeiros estudos em mecânica dos solos tiveram um foco voltado para o comportamento de solos saturados, com o passar do tempo tornou-se comum simplesmente ignorar o efeito da sucção e assumir que sua não utilização asseguraria um projeto seguro e conservador. O objetivo do trabalho foi, além de fazer a medição da sucção e obter as curvas características para uma areia artificialmente cimentada, tentar validar o uso da razão vazios/cimentos (η/C_{iv}) no controle da sucção. Foi realizado um programa laboratorial, que consistiu em medições da sucção através do método do papel filtro em corpos-de-prova de areia com cimento para diferentes valores da razão vazios/cimento (η/C_{iv}). Os resultados mostraram que é possível observar um aumento da sucção quanto menor o valor de η/C_{iv} e que as curvas características se comportam de forma esperada.

PALAVRAS-CHAVE: Sucção Mátrica, Areia cimentada, papel filtro.

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos sobre mecânica dos solos tiveram um foco voltado para o comportamento de solos saturados. Exemplos habituais na Engenharia Geotécnica envolvem a aplicação de conceitos em solos saturados. Com o passar do tempo tornou-se comum simplesmente ignorar o efeito da sucção e assumir que a não utilização dela asseguraria um projeto seguro e conservador.

Nos solos não-saturados, há a presença de pelo menos três fases: sólida, líquida e gasosa. Com a presença das fases distintas, ocorre uma interação entre a parcela líquida e a gasosa, parte do fenômeno é a capilaridade, que é fundamental para o fenômeno da sucção.

A sucção é parâmetro mais significativo quando se trata de solos não saturados (Fredlund e Rahardjo, 1993). Estudar a sucção é fundamental para entender o comportamento

desses materiais. A sucção é dividida em duas parcelas: mátrica e osmótica. A sucção mátrica representa a poro-pressão negativa da água do solo. A sucção osmótica é derivada da medida da pressão parcial de vapor d'água em equilíbrio com a água do solo. Neste trabalho foi abordada a sucção mátrica. É necessário ter em mente que quanto maior a sucção, mais resistente o solo se torna. A maioria dos problemas de Engenharia envolvendo os solos não saturados provém de mudanças no ambiente.

Outra maneira de atingir resistências mais elevadas é fazendo o melhoramento de solos. A influência da sucção em solos cimentados, utilizando o melhoramento com a adição de cimento ao solo foi analisada no presente estudo.

A primeira metodologia racional de dosagem de uma mistura solo-cimento desenvolvida por Consoli et al. (2007), mostrou que a relação vazios/cimento (η/C_{iv}), definida pela porosidade

da mistura compactada (η) dividida pelo teor volumétrico de cimento (C_{iv}), é adequada como parâmetro para avaliar a resistência à compressão simples (q_u) da mistura solo-cimento.

Neste trabalho, foi feita a análise do emprego dessa metodologia com as curvas caracterísicas do sistema solo cimentado-água.

2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E MATERIAIS

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência da sucção mátrica na resistência à compressão de uma amostra de solo artificialmente cimentada.

Visando uma comparação posterior com estudos realizados no mesmo laboratório, foram fixados os seguintes pontos de moldagem: (i) índice de vazios de 0,8, 0,72 e 0,64; (ii) teores de cimento de 1, 3, 5 e 9% em relação à massa de solo seco; (iii) teor de umidade de moldagem igual a 10% em relação a massa de solo seco e (iv) tempo de cura das amostras de 7 dias.

2.1 Materiais

Os materiais utilizados para a realização do programa experimental foram: solo, cimento, água e papel filtro.

O solo utilizado neste trabalho é conhecido como areia de Osório. Proveniente do município de Osório, no estado do Rio Grande do Sul. A areia de Osório possui várias propriedades semelhantes à de areias utilizadas em pesquisas na prática internacional. Trata-se de uma areia fina quartzosa, proveniente de depósitos praias marinhos e eólicos e de retrabalhamento eólico atual da região costeira do estado do Rio Grande do Sul (Spinelli, 1999).

Segundo Casagrande (2005) e NBR 6502 (Associação Brasileira De Normas Técnicas), a areia de Osório caracteriza-se por ser uma areia fina limpa e de granulometria uniforme, que tem o quartzo como material correspondente a 99% da sua composição mineralógica, sendo o restante composto por glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita, não sendo observada a presença de matéria orgânica (Spinelli, 1999).

Segundo Consoli et al. (2010) o peso específico dos grãos é de 2,65. O diâmetro médio (D_{50}) de 0,16 mm, tendo coeficientes de uniformidade e de curvatura de 1,9 e 1,2, respectivamente. O índice de vazios mínimo e máximo são de 0,6 e 0,9, respectivamente.

Como material cimentante foi utilizado o Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI). Justifica-se a utilização do cimento Portland CP V-ARI pois as principais reações do cimento acontecem no período de cura, 7 dias, isso faz com que a amostra não tenha mudanças consideráveis na estrutura do solo-cimento, podendo ser avaliada a sucção 14 dias após o rompimento do corpo de prova.

A água utilizada para a moldagem dos corpos de prova foi a água destilada, é fundamental seu uso pois a presença de sais tem efeito na sucção e influi no resultado final. Será obtida através do processo de destilação da água. Será utilizado o papel filtro Whitman No. 42 com as curvas de calibração consideradas por Fredlund e Rahardjo (1993). Sendo assim, as curvas de calibração que fazem referência ao papel Whitman No. 42 poderão ser utilizadas sem problemas.

3 MÉTODOS

Serão apresentados os métodos de ensaio e demais procedimentos realizados durante o programa experimental. Para os ensaios que foram realizados baseando-se em procedimentos propostos em normas técnicas, será feita referência à mesma. No caso de modificação de algum procedimento descrito em norma ou na ausência de norma técnica referente ao assunto abordado, será realizada uma descrição mais detalhada do método adotado.

3.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras de solo para os ensaios de caracterização e para a moldagem dos corpos de prova seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 6457 (Associação Brasileira De Normas Técnicas, 1986). As amostras foram armazenadas até a data da sua utilização em sacos plásticos

identificados e vedados.

3.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

As amostras foram preparadas seguindo o mesmo procedimento baseado nos trabalhos de Corte (2013) e Cruz (2008). Seguindo as dosagens desejadas, os corpos de prova foram preparados em um molde cilíndrico tripartido com dimensões suficientes para obter dimensões de $10 \pm 0,5$ cm de altura e $5 \pm 0,1$ cm de diâmetro.

A pesagem dos materiais foi feita em uma balança de precisão de 0,01 g. Após pesados os materiais necessários, foi dado início ao procedimento do processo de moldagem.

Misturam-se os materiais secos até atingirem uma forma homogênea e, em seguida, adiciona-se a parte de água, e é misturado até atingir novamente uma forma homogênea.

Após as misturas dos materiais, a quantidade necessária para a moldagem do corpo de prova foi dividida em três partes iguais. Visando a posterior compactação, as misturas foram armazenadas em recipiente hermético até a hora de seu uso, evitando assim a perda de umidade.

Após a etapa de mistura foi necessário pesar duas cápsulas contendo o material recém misturado, para fins de realizar a verificação da umidade.

O processo de moldagem do corpo de prova foi dado pela compactação das camadas. Cada uma das três partes iguais foi compactada em uma mesma espessura de aproximadamente 3,33 cm. Destaca-se a necessidade de escarificar entre cada compactação de camada, visando aumentar a ligação entre as camadas.

Ao fim deste processo, a amostra foi retirada do molde, armazenados e curados em condições ideais pelo período de 6 dias em temperatura controlada ($23 \pm 2^\circ\text{C}$). Sob igual temperatura, no sexto dia, as amostras foram tratadas da seguinte forma: (i) totalmente imersas em água, (ii) adicionado 10% da massa do CP em água, (iii) adicionado 5% da massa do CP em água, e (iv) sem alterações. O objetivo destes procedimentos foi obter sucções diferentes para cada amostra, podendo compará-las posteriormente.

3.3 Método do papel filtro

A aplicação do método do papel filtro seguiu as diretrizes da D5298 – 10 (American Society For Testing And Materials, 2010), com algumas pequenas alterações. Os materiais e o processo de execução serão descritos a seguir.

Os materiais utilizados encontram-se na tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos materiais utilizados.

Material	Descrição
Papel filtro	Whitman No. 42
Recipientes	Serão utilizados recipientes de metal para colocar o solo e par a hora da pesagem do papel filtro serão utilizados recipientes plásticos.
Balança	Será utilizada uma balança com leitura de 0,0001 g e herméticamente fechada
Estufa	Controlada termostaticamente
Outros equipamentos	Pinças, tesouras, papel filme

O procedimento começa com a preparação do papel filtro, na qual foram utilizados somente os papéis filtro que foram previamente secos e que não estiveram em contato com o ambiente nem com outros materiais úmidos.

Para a medição da sucção com o papel filtro existem dois métodos que são possíveis de se utilizar: com contato com a amostra e sem contato com a amostra.

Como é desejada a medida da sucção mátrica, foi utilizada a técnica que o papel filtro fica em contato com a amostra. Foram colocados 3 papéis filtro juntos à amostra, todos em contato entre si e somente um em contato com o solo.

Através de um equilíbrio hidrodinâmico obtém-se a mesma umidade em todos os papéis. Os papéis ficaram pelo menos 14 dias em contato com o solo, para que ocorresse o equilíbrio.

Após atingir o equilíbrio, foi pesado o papel filtro úmido e, após, ele foi levado à estufa para secagem. Após a secagem, foi pesado o papel seco, uma vez que esse processo necessita ser extremamente rápido, propiciando o menor contato com o ambiente possível. Foi obtida uma relação de umidade no papel, que foi relacionado com curvas de calibração pré-existent.

4 CURVAS CARACTERÍSTICAS

As curvas característica do sistema solo cimentado-água (CCSA) nos dão um entendimento conceitual entre massa (e/ou volume) da água no solo e do estado de energia da fase líquida (Fredlund et al., 2012). As CCSA têm um papel importante na determinação das propriedades de um solo não saturado.

Os estudos das curvas características começaram da pesquisa em áreas relacionadas às ciências agrárias. É importante reconhecer a contribuição dada pelos estudos, mas é necessário adaptar para o uso na Engenharia Geotécnica.

Segundo Fredlund et al. (2012), as CCSA, nos anos 1980 e 1990, se tornaram a base para a estimativa de propriedades não-lineares dos solos não saturados para todos tipos de problemas geotécnicos. Todavia, um dos obstáculos para a implementação da mecânica dos solos não saturados era o custo excessivo e a demanda de técnicas de teste em laboratórios associadas com medidas experimentais das propriedades dos solos não saturados. Era necessário que estas fossem medidas mediante estado de tensões controladas.

As curvas surgiram como uma ferramenta prática e precisa para estimar as propriedades dos solos não saturados. Elas são vistas como a “chave” para implementação da mecânica dos solos não saturados na prática (Fredlund, 2002). As CCSA são fundamentais para solução de problemas em solos não saturados. As curvas estão diretamente relacionadas com as

propriedades ligadas ao volume e massa. Sendo a mudança de volume de um solo pequena, é possível utilizar a relação do teor de umidade gravimétrico versus sucção do solo para determinar o valor da entrada de ar e conteúdo de água residual de um solo particular.

O teor de umidade gravimétrico não requer medida de volume em laboratório, enquanto que o grau de saturação e teor de umidade volumétrico necessitam que o volume da amostra de solo seja conhecido. Porém é o teor volumétrico que é diretamente necessário para representar a água armazenada em um solo não saturado e o volume de água é importante para determinar as CCSA.

A sucção mátrica em um solo varia conforme a quantidade de água presente no mesmo, já a osmótica não se mostra tão sensível a isso. Com isso em mente, variações na sucção total representam variações na sucção mátrica. Fredlund et al. (2012) diz que medições da sucção total podem ser usadas na Engenharia Geotécnica para indicar mudanças na sucção mátrica. O mesmo autor ainda afirma que a energia livre da água do solo (sucção total) pode ser determinada a partir da medição da pressão de vapor adjacente ao composto solo-água ou a umidade relativa no solo. Existem métodos diretos e indiretos para se obter a umidade relativa em um solo. Neste trabalho será utilizado o método do papel filtro, que é um método indireto.

Além de ser um método de fácil transporte para o local de investigação, barato e, relativamente, simples, contempla uma grande gama de resultados variando, segundo Houston et al. (1994), de valores próximo a zero até cerca de 100MPa. Os autores ainda comentam que mesmo que o método tenha recebido críticas, que limitaram o seu uso para investigações de rotina, as vantagens do método superam as desvantagens.

O método é classificado como indireto pois é necessário ter ou fazer uma calibração com o teor de umidade do papel filtro em relação à sucção do solo. O método é baseado na premissa de que o papel filtro irá atingir um equilíbrio hidrostático com a parcela de água do solo, podendo fazer as relações com a sucção.

O equilíbrio do teor de água no papel filtro deve

corresponder à sucção mátrica se o papel estiver em contato direto com o solo, caso não haja contato será medida a sucção total. É apresentado um modelo na figura 1.

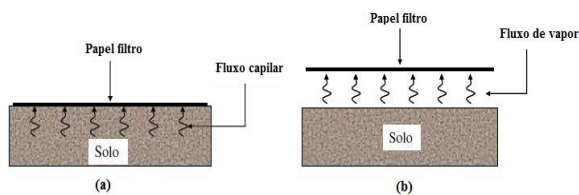


Figura 1. (a) técnica com contato e (b) técnica sem contato. Adaptado de Vivian (2008)

As vantagens e desvantagens do uso de cada parâmetro são mostradas na figura 2.

Designação	Vantagens	Desvantagens
teor gravimétrico de água, w	Consistente com o uso na mecânica dos solos clássica	Não permite diferenciação entre mudança no volume e mudança no grau de saturação
	Modo mais comum de medição	Não fornece o valor de entrada de ar correto
	Não requer medição de volume	
	Valor de referência é a "massa do solo" que permanece constante	
	É a forma básica que surge na derivação do transiente de infiltração e no armazenamento de fluidos em solos não saturados	Requer medição de volume
teor volumétrico de água, θ	Utilizada em base de dados nos resultados obtidos em ciências agrônomas	Para uma rigorosa definição requer medição de volume para cada sucção É o menos familiar e menos utilizado historicamente na engenharia geotécnica
	Define mais claramente o valor de entrada de ar	Requer medição de volume
Graus de saturação, S	Parece ser a variável que melhor controle as propriedades do solo não saturado	Mesmo que medição de volume seja necessária, a variação do grau de saturação não quantifica a mudança geral de volume

Figura 2. Vantagens e desvantagens para medida de água. Adaptado de Fredlund et al. (2012).

5 RESULTADOS

Analisando os resultado foi possível determinar as curvas características do sistema. A equação de calibração do papel fitro utilizada foi a de Chandler (1992).

Na figura 3 é obtido um resultado esperado, quanto mais seca a amostra, maior a sucção e quanto menor a relação η/C_{iv} maior a sucção.

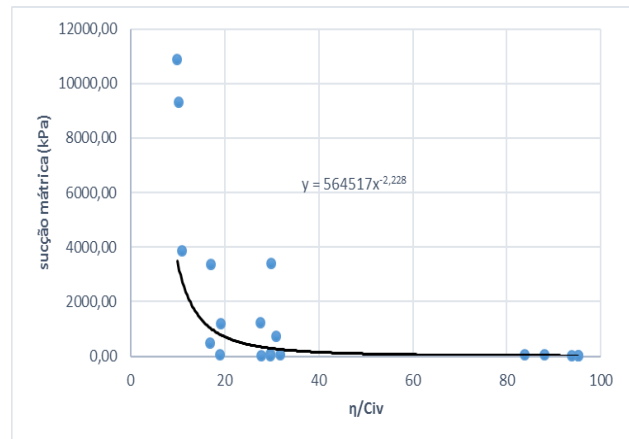


Figura 3. Sucção mátrica x η/C_{iv} .

Na figura 4 são apresentados os resultados agrupados em função de uma das curvas características do sistema solo cimentado-água (w x sucção). Apesar de apresentar uma curta dispersão, foi possível identificar que existe um valor do ponto de entrada de ar, que corresponde ao ponto de inflexão da curva, neste caso o valor é inferior ao de 10 kPa.

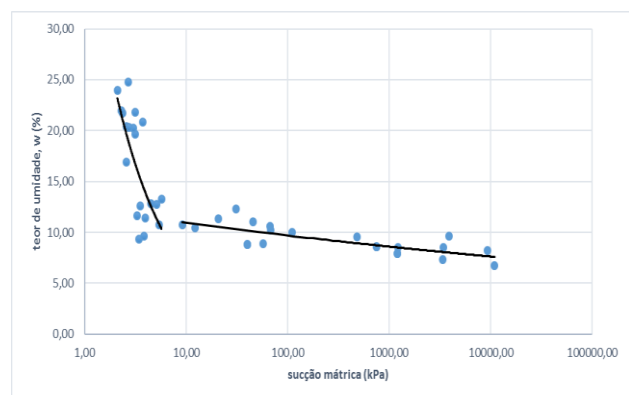


Figura 4. teor de umidade w (%) x sucção mátrica (kPa).

6 CONCLUSÃO

Nota-se um comportamento padrão em relação ao teor de umidade, quanto menor o teor de

umidade maior a sucção. O valor do ponto de entrada de ar é menor do que 10 kPa. Foi visto que quanto menor a relação η/C_{iv} maior a sucção. São necessários mais estudos para se validar o uso da relação η/C_{iv} no controle da sucção.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer ao CNPq-MCT pelo suporte financeiro ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- American Society For Testing And Materials. (2010) *D5298-10: standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper*. Conshohocken.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (1986). *NBR 6457: amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- _____. (1995). *NBR 6502: rochas e solos*. Rio de Janeiro.
- Casagrande, M. D. T. *Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações*. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 243 p.
- Chandler, R. J., Crilley, M. S. & Montgomery- Smith, G. (1992). *A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings*. Proc. Instn. Civ. Engrs Civ. Engng.92, May, 82-89.
- Corte, M. B. (2013) *Misturas solo-cal-fibra: comportamento mecânico à compressão e tração*. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 70 f.
- Cruz, R. C. (2008) *Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada*. Tese (Doutorado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 216 f.
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L. e Heineck, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* ASCE, 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007) 133:2(197), 197–205
- Consoli, N. C., Cruz, R. C., Floss, M. F. e Festugato, L. (2010) Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 10.1061/(ASCE)GT. 1943-5606.0000278, 759–763
- Fredlund, D. G. (2002). Use of soil-water characteristic curve in the implementation of unsaturated soil mechanics. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3RD, 2002 RECIFE. Proceedings...* Recife: [s. n.]. p. 20-23.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993) *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H.; Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated soils mechanics in engineering practice*. New York: John Wiley & Sons.
- Houston, S. L.; Houston, W. N.; Wagner, A. M. (1994). Laboratory filter paper suction measurement. *Geotechnical Testing Journal*, Conshohocken: ASTM, v. 17, n. 2, p. 185-194.
- Spinelli, L. F. (1999). *Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados*. 1999. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 133 f.