

Estudo de viabilidade de novo medidor de sucção confeccionado com impressão 3D.

Vitor Ferreira Morales de Oliveira

Doutorando, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, vitor_morales@hotmail.com

Marina Bellaver Corte

Professora Assistente, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, marina@puc-rio.br

RESUMO: A curva característica de água no solo é uma ferramenta importante na análise mecânica e hidráulica de solos não saturados, uma vez que expressa a relação entre a quantidade de água e a sucção do solo. O objetivo dessa pesquisa foi, através da curva de retenção, analisar a viabilidade da utilização de uma estrutura porosa, criada com impressão 3D, como medidor de sucção. Com o equipamento utilizado atingiu-se diâmetro mínimo do furo de 0,6 mm. Foram confeccionados nove corpos de prova (CP) cilíndricos, com furos idênticos de 0,6 mm de diâmetro e mesmo espaçamento entre si. Cinco CPs foram impressos com 30 mm de raio e 20 mm de altura, os demais com 20 mm de raio e 10 mm de altura. O método utilizado para a medição da sucção foi o do papel filtro, com período de equalização de 7 dias. Posicionou-se um papel no topo e outro na base do CP para verificar a equalização. Diferentemente do comportamento esperado, observou-se dois trechos lineares (na escala semi-log) conectados por uma descontinuidade. A diferença entre topo e base constatada foi aproximadamente constante para todo o intervalo da curva, com exceção apenas no trecho de descontinuidade, no qual essa diferença foi significativamente maior. Considerou-se que o medidor ainda não é adequado devido à região de descontinuidade, que inviabilizou leituras entre 10 e 1500 kPa. Em relação ao método de confecção, entendeu-se que a impressora possui precisão adequada, tendo sido observado comportamento homogêneo entre os diferentes CPs, mesmo com geometrias distintas. A resolução da impressora utilizada impediu a confecção de CPs com vazios menores para a otimização da curva. No entanto, o comportamento da curva e a precisão do equipamento sugerem que a manufatura aditiva pode ser capaz de contribuir para a mecânica dos solos com a criação de um novo tipo de medidor de sucção, desde que se utilize uma melhor configuração/geometria de vazios para otimizar o comportamento da curva de retenção.

PALAVRAS-CHAVE: Solos não saturados, impressão 3D, medidas de sucção, curva característica de água no solo.

ABSTRACT: The soil water characteristic curve is an important tool in the mechanical and hydraulic analysis of unsaturated soils, as it expresses the relationship between water content and suction. The objective of this research was to analyze, through the retention curve, the feasibility of using a porous structure created with 3D printing as a suction meter. The equipment used achieved a minimum pore diameter of 0.6 mm. Nine cylindrical specimens (CP) were produced, with identical 0.6 mm diameter pores and the same spacing between them. Five CPs were printed with a radius of 30 mm and a height of 20 mm, and the remaining ones with a radius of 20 mm and a height of 10 mm. The suction measurement method used was the filter paper method, with a 7-day equilibration period. Placing a paper at the top and another at the base of the CP allowed verifying the equilibrium. Two linear sections (on a semi-log scale) connected by a discontinuity were observed. The difference between top and base was approximately constant throughout the curve interval, except for the discontinuity section, where this difference was significantly higher. It was considered that the meter is not yet suitable due to the discontinuity region, which made readings between 10 and 1500 kPa unfeasible. Regarding the manufacturing method, it was understood that the printer has adequate precision, with a homogeneous behavior observed among different CPs, even with distinct geometries. The resolution of the printer used prevented the production of CPs with smaller voids to optimize the curve. However, the curve behavior and equipment precision suggest that additive manufacturing may be capable of contributing to soil mechanics with the creation of a new type of suction meter, provided a better void configuration/geometry is used to optimize the retention curve behavior.

KEYWORDS: Unsaturated soils, 3D printing, suction measurements, soil-water characteristic curve.

1 INTRODUÇÃO

A determinação da sucção é fundamental na análise de solos não saturados. Atualmente, há diversos ensaios capazes de realizar essas medições, cada um com suas vantagens e limitações. A sucção pode ser obtida *in situ*, com tensiômetros ou psicrômetros, por exemplo. Também é possível a determinação da curva característica, em laboratório, com técnicas como o papel filtro e a translação de eixo. No entanto, o foco da presente pesquisa está nos ensaios que medem a sucção utilizando um medidor poroso.

Uma curva de calibração relaciona o teor de umidade gravimétrico (w) com a sucção. Dessa forma, é possível obter a sucção em um solo medindo o teor de umidade de uma estrutura porosa qualquer, desde que a curva de calibração desse medidor seja conhecida. Diversos medidores de sucção, usando essa teoria, já foram desenvolvidos, variando-se tanto a composição do medidor quanto a forma de realizar as leituras do teor de umidade, Fredlund et al. (2012) discutem alguns desses medidores com mais profundidade.

A impressão 3D, ou manufatura aditiva, é uma tecnologia que, apesar de recente, já contribuiu para o avanço do conhecimento em diversas áreas. Mahabadi et al. (2018) utilizaram uma impressora 3D para reproduzir uma areia e comparam a curva de retenção de ambas as amostras. Devido às limitações do equipamento, não foi possível realizar a impressão em escala real, tendo sido calculada uma curva equivalente. Apesar da curva impressa ser razoavelmente próxima da esperada, a presença de trechos muito verticalizados e horizontalizados inviabilizam o uso dessa estrutura como medidor.

No entanto, pesquisas mais recentes na área da geotecnia, já reportam o uso impressoras mais avançadas e capazes de criar estruturas menores, o que possivelmente permite a confecção de amostras com curva de retenção mais próxima do desejado. Li et al. (2021) e Gora et al. (2020), por exemplo, utilizaram equipamentos com resolução inferior a 1 micrômetro, enquanto Mahabadi et al. (2018) foram limitados a camadas de 50 μm .

Assim, acredita-se que a manufatura aditiva possa ser capaz de confeccionar estruturas porosas e, eventualmente, permitir o desenvolvimento de equipamentos com maior acurácia e menor custo. Por isso, o objetivo desse trabalho é confeccionar uma estrutura porosa com uma impressora 3D e avaliar a viabilidade da utilização dessa estrutura como um medidor.

2 METODOLOGIA

O modelo digital usado como base na confecção das amostras consiste em um cilindro com uma malha de furos equidistantes e com mesmo diâmetro, conforme Figura 1. A impressora utilizada foi uma Halot One e o material uma resina fotossensível. O diâmetro mínimo dos furos transpassantes que se obteve, com esse equipamento, foi de 0,6 mm. Nove corpos de prova foram impressos, os cinco primeiros cilindros (Tipo A) possuem 30 mm de raio e 20 mm de altura e os restantes (Tipo B) com 20 mm de raio e 10 mm de altura. As malhas de furos de todas as amostras foram idênticas, com furos de 0,6 mm de diâmetro e distância de 1,2 mm entre os centros.

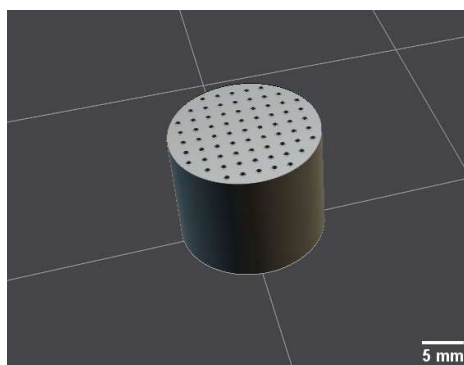


Figura 1. Exemplo de modelo digital.

Após a impressão, as amostras passaram por um processo de lavagem em álcool isopropílico, para a remoção de material indesejado dos furos, e um de cura, para a melhora das propriedades mecânicas. Antes

da medição da sucção, os corpos de prova passaram por uma etapa de secagem, para a determinação do peso seco. Segundo o fabricante, 3DLab (2021), o material atinge a temperatura de transição vítrea a 62°C . Por isso, para garantir a integridade da estrutura, a secagem foi feita mantendo-se as amostras na estufa a 49°C , por no mínimo 4 dias, intervalo no qual se observou a constância de massa.

O ensaio utilizado para a determinação da curva de retenção foi o do papel filtro. Seguiu-se a metodologia descrita por Marinho (1994), referente a sucção mátrica. No caso dessa sucção, é possível encontrar na literatura diferentes sugestões do tempo mínimo necessário para a equalização. Para Al-khafaf (1972) após dois dias a equalização está essencialmente concluída, Chandler & Gutierrez (1986) adotaram cinco dias, enquanto McQueen & Miller (1968) optaram por sete dias.

De maneira geral, é possível afirmar que, para a medição de sucção com contato, há consenso de que sete dias é suficiente. Todavia, como se utilizou uma amostra não convencional, foram adotados sete dias, mas optou-se por colocar papel filtro no topo e na base dos CPs para verificar a equalização. Durante o ensaio o teor de umidade desejado foi obtido secando a amostra ao ar ou saturando por capilaridade. A sucção foi calculada com a curva de calibração proposta por Chandler et al. (1992).

3 RESULTADO E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta uma imagem obtida com microscópio óptico de uma amostra. Inicialmente é possível observar que, apesar da presença de algumas impurezas nos furos, a imagem comprova que os furos são transpassantes e, aparentemente, a amostra é condizente com o modelo digital. Ao analisar a imagem, constatou-se que o raio médio dos furos foi de 0,306 mm, isso significa que os furos da estrutura impressa possuem, em média, área 4,04% superior ao modelo digital.

O coeficiente de variação dos diâmetros foi 1,7%, indicando baixa dispersão dos dados. Entende-se que a metodologia adotada forneceu acurácia e precisão adequadas para o prosseguimento da pesquisa, mas, para o desenvolvimento de um medidor, é interessante que a metodologia seja aprimorada.



Figura 2. Imagem de uma amostra obtida com microscópio óptico.

O resultado do ensaio de papel filtro está apresentado na Figura 3. É possível notar que para leituras inferiores a 10 kPa e superiores a 1000 kPa a curva tem uma tendência linear. Na parte central da curva, por outro lado, há um trecho de descontinuidade, que une as regiões lineares, e grande dispersão das leituras. Nessa região de descontinuidade também foram observadas as maiores diferenças entre a sucção no topo e na base dos CPs.

É importante destacar que o comportamento observado na Figura 3 é diferente do comportamento esperado. Acreditava-se que, como todos os furos possuem o mesmo diâmetro, a curva de retenção seria uma reta. O menor diâmetro que se conseguiu imprimir, 0,6 mm, foi superior ao desejado e por isso, se optou por uma malha com todos os furos idênticos. Caso a amostra possuísse também furos maiores é esperado que o trecho inicial se torne mais curvo, menos inclinado e que seja possível a leitura de sucções menores.

Esse segundo trecho obtido para valores mais elevados de sucção, que não havia sido previsto, sugere que, durante a impressão e/ou o pós-processamento, houve a formação de vazios, interconectados, com

diâmetro significativamente menor. Adicionalmente, como essa região apresentou uma tendência linear, provavelmente há pouca variação no diâmetro desses vazios.

Existem diferentes possíveis causas para a formação desses vazios não intencionais. Em primeiro lugar, sabe-se que a técnica de impressão utilizada pode resultar na formação de vazios entre as camadas. Além disso, durante teste preliminares, se observou que tanto a permanência excessiva do corpo de prova no álcool isopropílico quanto a secagem na estufa com cura insuficiente são capazes de gerar fissuras visíveis a olho nu. Por isso, é possível que o tempo de lavagem e/ou cura adotados tenham resultado na formação de microfissuras, imperceptíveis visualmente. No entanto, a causa e geometria desses vazios não foi estudada com mais profundidade porque julgou-se que esse não é o foco principal da pesquisa.

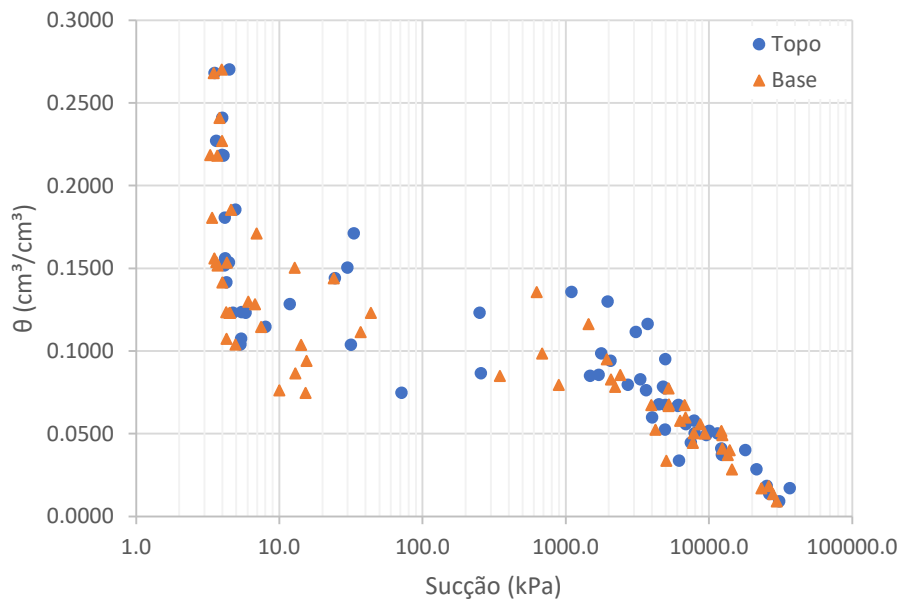


Figura 3. Curva de retenção, diferenciando leituras de topo e base.

Hasiuk (2019) observou que, devido ao processo de impressão, a escala com a qual se imprime um determinado modelo é capaz de afetar as propriedades macroscópicas da amostra. Por esse motivo, utilizou-se duas geometrias para analisar o efeito da escala. No entanto, observou-se comportamento similar em ambos os casos, conforme exibido na Figura 4, que apresenta apenas as leituras de topo, diferenciando as amostras maiores (Tipo A) das menores (Tipo B).

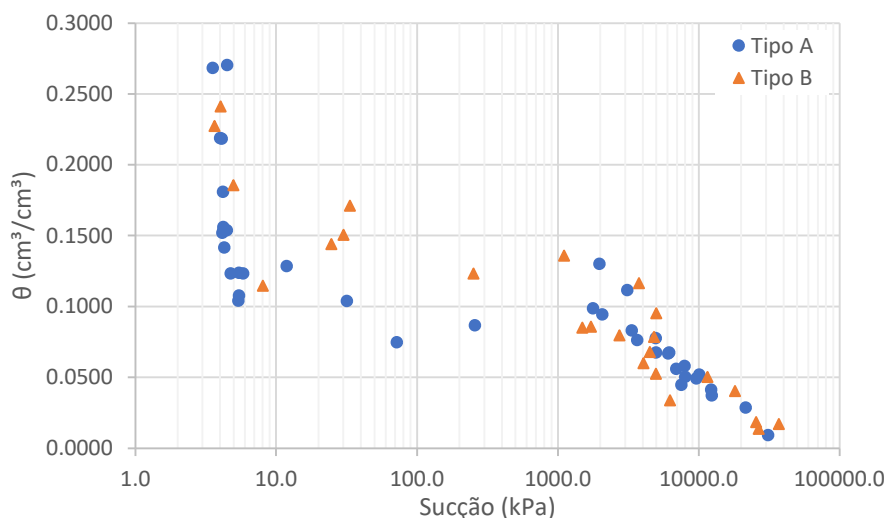


Figura 4. Curva de retenção, apenas leituras de topo, diferenciando as duas geometrias.

Outra questão de interesse dessa pesquisa é analisar a histerese do material utilizado. Ao se referirem aos medidores de sucção que realizam a leitura da condutividade térmica, Lu & Likos (2004) apontam que a histerese é uma das principais desvantagens desses medidores. Para estudar a histerese, as leituras de topo foram diferenciadas em trajetórias de umedecimento e secagem e expostas na Figura 5. Todavia, não se constatou histerese significativa.

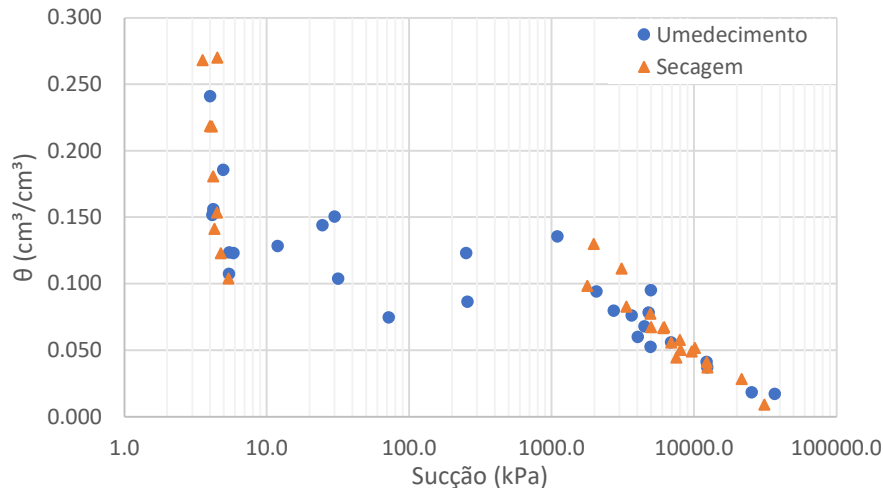


Figura 5. Curva de retenção, apenas leituras de topo, diferenciando as trajetórias.

Para a elaboração de uma curva de calibração, julgou-se mais adequado descartar os pontos que apresentaram diferença de sucção entre topo e base excessiva. Utilizou-se os métodos score z, score z modificado e boxplot para identificar esses outliers, resultando no descarte de oito pares de leituras, majoritariamente localizados na região de descontinuidade.

Considerou-se que, como a curva de retenção da amostra impressa não apresenta comportamento semelhante ao comportamento típico de solos naturais, modelos clássicos, como Brooks & Corey (1964), ou modelos de porosidade dupla, por exemplo Durner (1994), não seriam adequados para representar os dados obtidos. Optou-se por um modelo bilinear, análogo ao do papel filtro, porém adicionando-se uma descontinuidade, para obter a curva de calibração mais adequada.

Em ambos os trechos a sucção (ψ) é descrita como uma função exponencial do teor de umidade gravimétrico ($\psi = 10^{b+a}$), sendo b e a constantes. No primeiro trecho considerou-se apenas as leituras com sucção inferiores a 10 kPa, no segundo apenas valores superiores a 200 kPa e as demais leituras não foram consideradas na elaboração da curva de calibração. Os parâmetros mais adequados estão apresentados na Equação 1.

$$\begin{aligned} \text{Para } w > 9\% & \quad \psi = 10^{4,6177 - 0,15045w} \\ \text{Para } w < 9\% & \quad \psi = 10^{0,8485 - 0,01252w} \end{aligned} \quad (1)$$

O coeficiente angular dos trechos é fundamental para permitir a realização de medições. É possível constatar que em ambos os trechos a constante a é próxima de valores clássicos presentes na literatura, referente a curva de calibração do papel filtro. Por exemplo, o valor obtido, para teores de umidade mais elevados, de -0,150 é próximo ao proposto por Leong et al. (2002), de -0,191. Já para umidades menores, o valor obtido de -0,0125 é próximo de -0,0135, valor recomendado pela ASTM D 5298-16 (2016).

No entanto, é válido destacar que a amostra impressa apresenta uma amplitude de teor de umidade significativamente menor que o papel filtro. Consequentemente, apesar dos coeficientes angulares serem próximos, o intervalo de leitura de sucção no medidor é consideravelmente limitado, quando comparado com o papel filtro.

Um segundo fator determinante na viabilização do medidor é a diferença entre os valores obtidos com a curva de calibração proposta e os valores medidos no ensaio. O erro relativo foi calculado dividindo-se o módulo da diferença entre o valor obtido e o medido pela média desses valores. O erro relativo médio global foi de 39,5%, no entanto, limitando-se os intervalos foi possível diminuir esse erro. Para sucções inferiores a 10 kPa, o erro foi de 13,7% e para sucções superiores a 1500 kPa de 27,5%.

Por fim, é apresentado na Figura 6 o modelo proposto reescrito na forma de uma curva de retenção. Fica evidente, conforme já discutido, que a estrutura impressa possui comportamento satisfatório para valores de sucção extremos, mas a descontinuidade limita, significativamente, o intervalo de medição. Como os furos foram criados com o menor diâmetro possível, não foi possível otimizar a malha para a obtenção de uma curva com comportamento mais próximo do desejado.

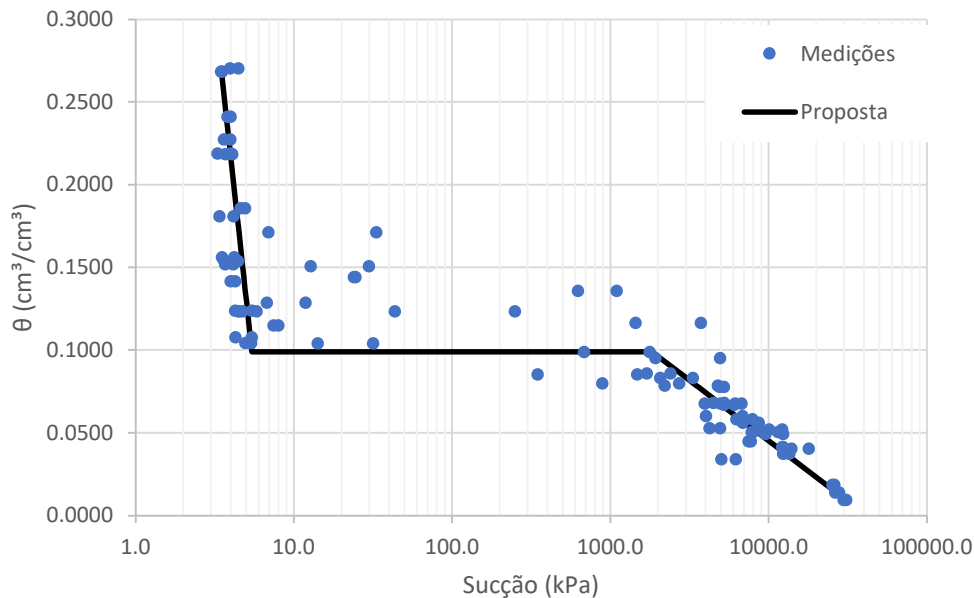


Figura 6. Comparação da curva proposta com os dados medidos.

Apesar de não se ter atingido a curva desejada, devido ao equipamento utilizado, é possível estimar o diâmetro necessário para a obtenção de uma curva adequada. A pressão capilar (P_c) pode ser calculada em função da tensão superficial (T_s), ângulo de contato (α) e raio do tubo (r), conforme apresentado na Equação 2. Não havendo mudança no material usado na confecção das amostras ou nas condições de ensaio, a tensão superficial e o ângulo de contato são constantes.

$$P_c = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (2)$$

Assim, considerando que com o diâmetro de 0,6 mm foi possível realizar leituras até 10 kPa, para a obtenção de um medidor capaz de realizar leituras até 100 kPa, limite de um tensiômetro convencional, por exemplo, é possível concluir que seria necessária uma amostra com furos de 0,06 mm. Outra possibilidade é a mudança no ângulo de contato do material utilizado. Não se dispõem de informação sobre o ângulo do material utilizado, contudo é evidente que caso se utilize materiais com α menor é possível aumentar P_c . Como esse é apenas um estudo de viabilidade, não se realizou os ensaios com outra resina. No entanto, a utilização de um material com características mais adequadas aparenta ser um caminho promissor para contornar, parcialmente (até $\cos \alpha = 1$), as limitações da impressora.

4 CONCLUSÃO

Nesse artigo estudou-se a viabilidade da utilização da impressão 3D para confeccionar medidores de sucção. Em relação a metodologia adotada, os resultados da análise de imagem, controle do peso das amostras e dispersão das leituras de sucção sugerem que se obteve uma precisão adequada, não havendo diferenças significativas entre os corpos de prova.

No entanto, ainda há questões na metodologia de confecção das amostras que podem ser aprimoradas, como técnica de limpeza mais eficaz, para minimizar a presença de impurezas nos furos, e utilização de material que suporte temperaturas mais elevadas, para facilitar a determinação do peso seco. Além disso, aparentemente, houve o desenvolvimento de microfissuras durante a impressão e/ou pós processamento.

A curva de calibração obtida possui inclinação adequada, quando comparada com valores da literatura. Todavia, devido à menor variação do teor de umidade, os intervalos de leitura de sucção no medidor desenvolvido foram limitados. A diferença entre os valores obtidos com a equação proposta e os valores medidos é superior ao desejado, contudo, como se trata de um medidor preliminar e se espera que seja possível minimizar esse erro, considera-se que o erro obtido foi satisfatório.

Por fim, o principal obstáculo para a utilização do medidor foi a região de descontinuidade, que limitou significativamente o intervalo de leitura. Acredita-se que otimizando a malha de furos do corpo de prova seja possível minimizar esse trecho e obter uma curva de calibração mais adequada. No entanto, a impressora empregada nessa pesquisa não permitiu essa otimização. Além da diminuição do diâmetro dos furos, outra alternativa para a obtenção de uma curva mais adequada é a substituição da resina utilizada na impressão por um outro material com ângulo de atrito menor

Assim, conclui-se, nesse estudo de viabilidade, que o medidor obtido não é adequado para o desenvolvimento de um ensaio de sucção. Por outro lado, considera-se que a impressão 3D é uma técnica promissora para a confecção de medidores de impressão 3D, uma vez que apresentou boa precisão e há disponível comercialmente impressoras com resolução melhores do que a utilizada. Todavia, para a criação desse medidor ainda é necessário estudar o efeito da geometria/dimensão dos furos na curva de retenção, otimizar malha de furos, analisar os diferentes materiais disponíveis na impressão 3D, observar quais propriedades físico-químicas desses materiais são relevantes e determinar o material ideal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3DLab. (2021). Ficha técnica resina standard 3D Lab. Disponível em: <https://imagens.3dlab.com.br/wp-content/uploads/2021/11/Data-Sheet-Resina-3D-Satandard-Clear-2-1.pdf>. Acesso em: 20 mai. de 2023.
- Al-Khafaf, S., (1972). Evaluation of the Filter Paper Method for Estimating Soil Water Potential. Master Degree Thesis. Department of Soil Science and Biometeorology. *Utah State University*. Logan, Utah.
- ASTM 5298 (2016). Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. *ASTM International*, West Conshohoken, PA. <https://doi.org/10.1520/D5298-16>
- Brooks, R.H. & Corey, A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper*, Vol. 3, Colorado State University, Fort Collins.
- Chandler, R. J., Gutierrez, C. I. (1986). The filter-paper method of suction measurement. *Géotechnique*, 36(2), 265–268. <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.2.265>
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*. Vol. 30, N°2, 211–233.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118280492>
- Goral, J., & Deo, M. (2020). Nanofabrication of synthetic nanoporous geomaterials: from nanoscale-resolution 3D imaging to nano-3D-printed digital (shale) rock. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78467-z>
- Leong, E. C., He, L., Rahardjo, H. (2002). Factors Affecting the Filter Paper Method for Total and Matric Suction Measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 25(3), 8198. <https://doi.org/10.1520/GTJ11094J>
- Li, A., Zhang, S., Xu, C., Zhao, X., Zhang, X. (2021). 3D Printing of True Pore-Scale Berea Sandstone and Digital Rock Verification. *SPE Journal*, 26(6), 3719–3724. <https://doi.org/10.2118/205383-PA>
- Lu, N. Likos, W.J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

- Mahabadi, N., BeGell, D., Zheng, X., Paassen, L. van, Jang, J. (2018). The Soil Water Characteristic Curve for 3D Printed Soil Samples. *PanAm Unsaturated Soils 2017*, 68–76. <https://doi.org/10.1061/9780784481684.008>
- Marinho, F. A. M. (1994). Shrinkage Behavior of Some Plastic Soils. PhD. Thesis, *Imperial College, University of London*.
- McQueen, I. S., Miller, R. F. (1968). Calibration and Evaluation of a Wide-Range Gravimetric Method for Measuring Moisture Stress. *Soil Science*, 106(3), 225–231. <https://doi.org/10.1097/00010694-196809000-00012>