



USO DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X PARA A GERAÇÃO DE MEIOS POROSOS ARTIFICIAIS

E.H. Zubeldia¹, L.C. de S.M.Ozelim¹, C.L. Tseng², S. Crestana³, A.L.B. Cavalcante¹

- (1) Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília, DF, ehzubeldia@aluno.unb.br, luanoz@gmail.com, abrasil@unb.br
(2) Universidade de São Paulo, USP, Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, São Carlos, SP, chientl86@gmail.com
(3) Embrapa Instrumentação, Rua Quinze de Novembro, 1452, Centro, 13560-970, São Carlos, SP, silvio.crestana@embrapa.br

Resumo: A tomografia computadorizada (TC) é uma técnica não destrutiva que permite a visualização bi e tridimensional de objetos. Portanto, a técnica de TC mostra-se como uma ferramenta valiosa para o estudo do solo, principalmente, em estado indeformado. Neste trabalho utilizou-se a TC de Raios-X para adquirir imagens de três materiais diferentes: esferas de vidro, areia pura e um solo de textura areia argilosa. O estudo teve como objetivo caracterizar o solo a partir das imagens reconstruídas dos materiais. Para esse propósito foram avaliados dois parâmetros. No primeiro foi considerada a relação entre a área de sólidos e a área total das imagens, enquanto o segundo foi o alinhamento dos vazios em quatro direções dentro da imagem. Dessa forma, as principais características que influenciam na percolação de um fluido num meio poroso saturado foram quantificadas. Os experimentos realizados mostraram que: 1) os parâmetros implementados para a caracterização do solo são sensíveis à diminuição da resolução das imagens tomográficas e ao alinhamento dos poros; 2) as amostras de solo com textura areia argilosa mostraram uma clara tendência ao alinhamento vertical dos poros, enquanto as amostras de vidro e areia pura exibiram um comportamento com maior tendência à isotropia.

Palavras-chave: tomografia computadorizada de Raios-X, meio poroso, fluxo.

THE USE OF X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY FOR ARTIFICIAL POROUS MEDIA GENERATION

Abstract: Computed tomography (CT) is a non-destructive technique that allows bi and three-dimensional visualization of objects. Therefore, the CT technique has been shown as a valuable tool for the study of soil, mainly at the undisturbed state. This paper presents the use of the X-ray CT to acquire images of three different materials: glass beads, pure sand and loamy sand soil. The aim of this study was to characterize the soil from the reconstructed images, using two proposed parameters. The first considered the relationship between the solid area and the total area of the image, while the second parameter was the alignment of the gaps in the four directions within the image. Thus, the main characteristics that influence the fluid percolation in a saturated porous medium were quantified. The experiments have shown that: 1) the parameters implemented for the characterization of soil are sensitive according to decreased resolution of CT images and the alignment of pores; 2) loamy sand soil samples showed a marked tendency towards vertical alignment of pores, while the glass samples and pure sand behavior exhibited a greater tendency to isotropy.

Keywords: X-Ray computed tomography, porous media, flux.

1. Introdução

No campo da ciência dos solos, o uso de modelos matemáticos aplicados ao fluxo das águas subterrâneas é cada vez mais frequente. De forma geral, os modelos matemáticos tentam descrever os processos físicos por meio de equações matemáticas. Nas últimas décadas, alguns métodos numéricos para o estudo de fluxo em meios porosos na escala dos grãos (mesoescala) têm sido desenvolvidos. Dentre eles podem ser citados o Método Lattice Gas Automata (LGA, em inglês) (BANDMAN, 2011) e o Método Lattice-Boltzmann (MLB) (MANWART et al., 2002). Esses métodos têm sido utilizados para avaliar o efeito da heterogeneidade do meio na permeabilidade (MANWART et al. 2002) e têm correlacionado os parâmetros usados na descrição macroscópica do fluxo em meios porosos, p.ex. permeabilidade, tortuosidade e porosidade (KOPONEN et al. 1997).

No entanto, as simulações têm sido realizadas em meios artificiais formados, principalmente, pela disposição de figuras geométricas (círculos ou paralelepípedos). Outras formas mais avançadas são realizadas por meio de fractais (WU et al., 2004), ou de autômatos celulares (AC) (BANDMAN, 2011).

O avanço das técnicas de aquisição e visualização de imagens tridimensionais do solo abriram caminho no desenvolvimento de técnicas de geração artificial do meio, incorporando parâmetros mais realísticos (MATRECANO, 2011; GAN; WANG, 2012). A tomografia computadorizada (TC) de Raios X, introduzida no Brasil por Crestana (1985), é um dos procedimentos mais utilizados para a visualização da estrutura do solo. A técnica tem a grande vantagem de ser não destrutiva, permitindo visualizar amostras indeformadas do meio poroso.

O desenvolvimento dos chamados micro-TC, que apresentam resoluções de até um micron, permitiu grandes avanços no estudo e caracterização da estrutura interna dos meios porosos (MATRECANO, 2011; VAZ et al. 2011; TSENG, 2013). Zubeldia (2013) propôs uma metodologia para a geração de meios artificiais por meio de autómatos celulares, a partir de imagens de solo obtidas por micro-TC.

Neste estudo, foram estudados três materiais diferentes: esferas de vidro, areia e solo com textura areia argilosa. Imagens desses materiais foram obtidas por meio de micro-TC de raios X. Dois parâmetros foram propostos para caracterizar o solo a partir das imagens reconstruídas. Os parâmetros podem ser utilizados como dados de entrada para a geração de domínios porosos artificiais que possam ser utilizados para realizar simulações por meio de métodos numéricos na escala dos grãos.

2. Materiais e Métodos

As esferas de vidro foram fornecidas pela Embrapa Instrumentação Agropecuária - Unidade de São Carlos (SP). Foram utilizadas esferas de 0.5 mm e 1 mm de diâmetro. A areia empregada foi fornecida pelo Laboratório de Geotecnia da UnB. O material foi peneirado, as frações superiores a 1.19 mm (peneira 16) e inferiores a 0.25 mm (peneira 60) foram removidas. O solo de textura areia argilosa foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Melchior, dependência da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), localizado em Samambaia, DF. Um bloco de material indeformado foi coletado a uma profundidade de 1m, abrindo um poço, segundo o estabelecido pela NBR 9604/86. Do bloco retirado foram moldados vários corpos de prova de 8 mm de diâmetro para serem analisados na TC.

A aquisição das projeções e a reconstrução de imagens bidimensionais foram feitas utilizando um microtomógrafo de raios-X de quarta geração, modelo SkyScan 1172, da Embrapa Instrumentação Agropecuária - São Carlos. Para a reconstrução das imagens utilizou-se o software NRecon versão 1.6.8.0, pertencente ao pacote de análise do equipamento SkyScan.

O processamento foi realizado utilizando o software DataViewer, versão 1.3.2, que faz parte do pacote de análise do equipamento SkyScan. Cinco imagens coronais de cada amostra foram exportadas em formato Bitmaps (BMP) para sua posterior segmentação no software Wolfram Mathematica®, versão 9.0.

Dois parâmetros foram propostos para caracterizar as imagens obtidas. O primeiro, denominado Razão de Ocupação Binária (ROB), leva em conta a relação entre a área de sólidos e a área total das imagens. Para imagens binárias, é definido como:

$$ROB = \frac{p}{p + b} \quad (1)$$

onde, p e b representam a quantidade de pixels pretos e brancos, respectivamente.

O segundo parâmetro, denominado Grau de Anisotropia (GA), considera o alinhamento dos vazios em quatro direções dentro da imagem. Em um corpo formado por duas fases (p.ex. solo e ar, ou trabécula e medula), o método consiste, basicamente, na medição do comprimento médio de uma das fases ao longo de uma linha que atravessa o corpo. Para o cálculo do parâmetro de anisotropia em imagens binárias, uma série de linhas paralelas a uma direção (ω) é desenhada. Conta-se o número de interseções dessas linhas com a interface dos materiais e finalmente, o parâmetro de anisotropia na direção selecionada, $MIL(\omega)$, é dado por (SKYSCAN, 2005).

$$MIL(\omega) = \frac{L}{I(\omega)} \quad (2)$$

Os parâmetros propostos (ROB e GA) visam quantificar a distribuição espacial dos vazios do meio poroso, que exerce grande influência no comportamento do fluxo num meio saturado. Estes podem ser utilizados como variáveis de entrada para a geração de um meio poroso artificial, por meio de alguma técnica computacional. A vantagem da geração artificial é que permite criar domínios de qualquer tamanho e escala. Assim, as condições do domínio podem ser adaptadas às condições de qualquer experimento numérico, desde que os parâmetros do meio artificial coincidam com os do meio real. Outros parâmetros podem ser propostos para uma caracterização mais completa do solo.

3. Resultados e Discussão

Na Tabela 1 são apresentados os resultados dos cálculos dos parâmetros ROB e GA para as imagens obtidas em cada experimento tomográfico. Observa-se que com a diminuição da resolução (tamanhos de pixel maiores), o valor da ROB diminui também. Por exemplo, a ROB média da amostra Areia 1 é menor do que a da Areia

2, embora ambas as amostras pertençam ao mesmo corpo de prova (A-1). O mesmo fenômeno pode ser observado ao comparar o valor médio da ROB das amostras Areia argilosa 1 e Areia argilosa 2. Isto se deve ao fato de que resoluções maiores conseguem captar um maior número de poros, enquanto a redução da resolução faz com que os poros menores não possam ser percebidos.

Tabela 1. Parâmetros representativos das imagens tomográficas.

Amostra	Corpo de Prova	Tamanho do pixel	ROB [#]	COV	Grau de anisotropia (GA) [#]	COV
Vidro 0.5	V-1	5.9 μm	0.455	1.20	0.314	1.40
Vidro 1	V-2	5.9 μm	0.434	5.22	0.342	2.60
Areia 1	A-1	14.5 μm	0.454	5.55	0.363	4.97
Areia 2	A-1	5.9 μm	0.500	1.68	0.327	2.60
Areia 3	A-2	5.9 μm	0.460	3.42	0.344	3.50
Areia Argilosa 1	Arg-1	2.2 μm	0.531	5.84	0.580	2.67
Areia Argilosa 2	Arg-1	9.8 μm	0.152	11.87	0.421	1.70

[#] média dos valores calculados em cinco imagens coronais obtidas para cada amostra.

Na Figura 1 é apresentada a rede de poros das duas amostras de areia argilosa, reconstruídas a partir de experimentos tomográficos feitos no mesmo corpo de prova com duas resoluções diferentes. Com a resolução maior (Figura 1a) a rede poros é visivelmente bem conectada, enquanto que a resolução menor (Figura 1b) gerou uma rede de poros muito mais pobre, sendo que muitos deles estão isolados.

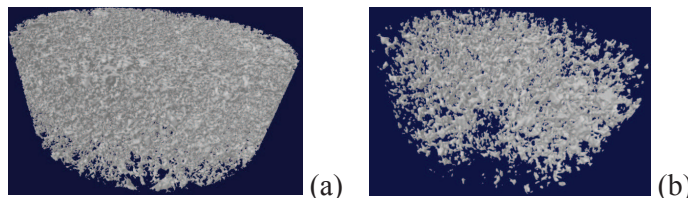


Figura 1. Rede de poros do corpo de prova "Arg-1": a) *Areia argilosa 1*, tamanho de pixel: 2.2 μm ; b) *Areia argilosa 3*, tamanho de pixel: 9.8 μm

A análise do GA, como esperado, mostrou que as amostras de vidro e areia apresentam uma maior tendência à isotropia. No caso do GA das argilas os valores são um pouco mais elevados, mas ainda bastante distantes do valor máximo 1, que indica a anisotropia total.

4. Conclusões

Analisando-se os resultados obtidos, conclui-se que:

A tomografia computadorizada é uma ferramenta valiosa para a caracterização do solo como material poroso. No entanto, deve ser usada criteriosamente, já que a resolução máxima do equipamento estabelece um limite para os objetos que podem ser visualizados, impedindo, por exemplo, visualizar microporos nos materiais argilosos.

Os parâmetros implementados para a caracterização do solo, mostraram-se sensíveis à diminuição da resolução das imagens tomográficas. A avaliação do parâmetro de ocupação (ROB) em imagens tomográficas do mesmo corpo de prova, obtidas com resoluções diferentes, mostrou que com a diminuição da resolução, a área de poros visualizada nas imagens, é menor.

As amostras de solo de textura areia argilosa mostraram uma clara tendência ao alinhamento vertical dos poros, enquanto as amostras de vidro e areia pura exibiram um comportamento com maior tendência à isotropia.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior e a Embrapa Instrumentação/USP-São Carlos.

Referências

- BANDMAN, O. Using cellular automata for porous media simulation. *The Journal of Supercomputing*, v. 57, n. 1, p. 121-131, 2011.
- CRESTANA, S. A tomografia computadorizada como um novo método para estudos da física da água no solo. 1985, 140p. Tese (Doutorado em Ciências-Física Aplicada) – Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 1985.

- GAN, M.; WANG, J. Applications of image processing technique in porous material characterization. *Advanced Image Acquisition, Processing Techniques and Applications*, Dimitrios V (eds). InTech, Rijeka, Croatia, 2012. p. 109-122.
- KOPONEN, A.; KATAJA, M.; TIMONEN, J. Permeability and effective porosity of porous media. *Physical Review E*, v.56, n. 3, p. 3319-3325, 1997.
- MANWART, C.; AALTOSALMI, U.; KOPONEN, A.; HILFER, R.; TIMONEN, J. Lattice-Boltzmann and finite-difference simulations for the permeability for three-dimensional porous media. *Physical Review E*, v. 66, n. 1, p. 016702-1 - 016702-11, 2002.
- MATRECANO, M. Porous media characterization by micro-tomographic image processing. 2011, 126 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Telecomunicação) – Università degli studi di Napoli “Federico II”, Naples, Italia, 2011.
- SKYSCAN. Structural parameters measured by the Skyscan™ CT-analyser software. 2005, 15p. (Artselaar, Bélgica). Disponível em: < http://www.skyscan.be/next/ctan_ctvol_02.pdf>. Acesso em 25 aug. 2014.
- TSENG, C. L. Tomografia Computadorizada de Raios-X Aplicada à Análise da Qualidade Ambiental de Solo no Entorno da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira – SP. 2013, 92p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2013.
- VAZ, C.M.P.; DE MARIA, I.C.; LASSO, P.O.; TULLER, M. Evaluation of an Advanced Benchtop Micro-Computed Tomography System for Quantifying Porosities and Pore-Size Distributions of Two Brazilian Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v.75, n. 3, p. 832-841, 2011.
- WU, K.; NUNAN, N.; CRAWFORD, J. W.; YOUNG, I. M.; RITZ, K. An efficient Markov chain model for the simulation of heterogeneous soil structure. *Soil Science Society of America*, v. 68 , n. 2, p. 346-351, 2004.
- ZUBELDIA, E.H. Uso dos autômatos celulares bidimensionais e imagens tomográficas na geração de meios porosos artificiais. 2013. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, UnB, Brasília, DF, 2013.