



## A CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS OBTIDA PELA ANÁLISE DE IMAGENS TOMOGRÁFICAS

*J.A.T. de Oliveira<sup>1</sup>, C.M.P. Vaz<sup>2</sup>, F.A.M. Cássaro<sup>1</sup>*

(1) Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG, Avenida Carlos Cavalcanti, 4748, 84030-900, Ponta Grossa, PR, jossajato@gmail.com, fcassaro@uepg.br

(2) Embrapa Instrumentação, Rua XV de Novembro, 1452, 13560-790, São Carlos, SP, carlos.vaz@embrapa.br

**Resumo:** Características da retenção de água em um dado espaço poroso podem ser estudadas através da curva de retenção ou curva característica da água no solo (CR). Tal curva expressa a relação entre o potencial mátrico e a umidade do mesmo à base de massa ou volume, e serve para fornecer, de maneira indireta, uma estimativa da curva de distribuição de poros (CDP) de um meio poroso analisado. Essa estimativa pela derivada da CR, o qual dá origem à Função Capacidade de Água (FCA). A obtenção de uma CR pode ser muito demorada e trabalhosa, dependendo da distribuição granulométrica da amostra. Dessa forma, é desejável buscar uma alternativa para se obter a CR e subsequentemente a CDP. Nesse sentido, o principal objetivo deste trabalho foi o de adaptar metodologia para a construção da CDP via simulação computacional em imagens tomográficas. Para tal estudo, foram utilizadas amostras de areia e esferas de vidros com diferentes granulometrias para o levantamento das CRs por meio de um funil de Haines adaptado. Depois de serem obtidas, estas foram ajustadas através do modelo de van Genuchten e construídas as CDPs. Foram também obtidas as CDPs através da adaptação de um programa computacional que lança mão de informações das imagens tomográficas dessas amostras. As CDPs obtidas assim foram confrontadas e os resultados dos dois métodos revelaram boa concordância entre si.

**Palavras-chave:** curva de distribuição de poros, curva de retenção de água, imagens tomográficas, simulação computacional em imagens.

### *PORE DISTRIBUTION CURVE OBTAINED FROM TOMOGRAPHIC IMAGES ANALYSIS*

**Abstract:** Soil water retention characteristics can be studied by the so-called soil-water characteristic curve (SWCC) or retention curve (WRC). Such curve expresses the relationship between matric potential and soil moisture based on mass or volume, and can provide, indirectly, an estimate of the pore-size distribution (PSD) curve of any porous system analyzed. This estimate is from the derivative of the RC, which gives to the Capacity Function of Water (FCA). The experimental determination of the RC can be very time consuming, depending on the granulometric distribution of the sample. Thus, the development of an alternative method for obtaining WRC, and then PSD, becomes desirable. In this context, this work aimed to create and adapt a methodology for construction of the PSD via computer simulation in tomography images. For the study, samples of sand and glass beads with different particle sizes were used for WRC achievement by means of a Haines' funnel. Once obtained, the WRCs were adjusted using the van Genuchten model and then were built the PSDs. PSDs were also achieved through adaptation of a computer software that makes use of information from tomographic images of these samples. These PSDs were confronted with each other and the results between the two methods showed good concordances.

**Keywords:** pore-size distribution curve, water retention curve, tomographic images, computer simulation.

### 1. Introdução

Informações sobre o comportamento da retenção da água num determinado sistema poroso, como, por exemplo, o solo, são de grande relevância para sua caracterização física e hídrica. Tal caracterização pode ser feita através do levantamento de curvas de retenção da água pelo solo (ou curvas características). Essa curva exprime a relação entre o potencial da água no solo (dado em termos de um potencial mátrico) e o seu grau de umidade (expresso a base de massa ou volume de solo) (GIMENES, 2012).

A construção/levantamento se faz de maneira experimental, com o solo em condições de campo ou laboratório, utilizando-se equipamentos apropriados. Sua obtenção permite estimar indiretamente o tamanho dos poros de uma amostra de solo por meio da obtenção da Função Capacidade de Água (FCA) (LIBARDI, 1995; CÁSSARO et al., 2008).

Métodos alternativos para aquisição e construção da curva de distribuição de poros (CDP) via análise de imagens tomográficas foram apresentados em alguns poucos trabalhos na literatura tais como, por exemplos, nos

de: Lindquist (2006) e Yang et al. (2009). Uma das vantagens desse tipo de enfoque refere-se à questão da redução do tempo para o levantamento de uma CDP, e de que, dependendo da qualidade de uma imagem, informações muito mais detalhadas da morfologia tridimensional dos poros podem ser obtidas e estudadas. Outra vantagem, diz respeito ao modelamento do meio poroso que pode incorporar informações sobre a conectividade e tortuosidade do ambiente poroso de uma amostra.

O objetivo principal desse trabalho foi de comparar as CDPs obtidas das CRS com as advindas das análises das imagens tomográficas de algumas amostras modelo, compostas homogeneamente por esferas de vidro de diferentes diâmetros e amostras compostas por misturas de areia com diferentes diâmetros.

## 2. Materiais e Métodos

As amostras utilizadas foram constituídas de areias de duas granulometrias, uma delas com diâmetros de partículas entre 0,106 e 0,212 mm e a outra com grãos entre 0,5 e 1,0 mm, sendo denominadas, respectivamente, de areias 0,212 mm e 1 mm. Foram confeccionadas também amostras homogêneas compostas de esferas de vidro (70% de SiO<sub>2</sub>) com diâmetros de 0,5, 1,0 e 2,5 mm.

O levantamento dos pontos para as CRS foi realizado através de funis de Haines adaptados, entre potenciais que variaram de 0,1 à 2,5 kPa para as esferas de vidro e a areia 1 mm, e de 1 à 6 kPa para a areia de menor diâmetro (a 0,212 mm). As CRS foram obtidas usando o modelo de interpolação de van Genuchten e as CDPs, dela advindas, representam a primeira derivada da CR, ou seja, suas FCAs.

As imagens tomográficas foram adquiridas em um tomógrafo de mesa, com feixe de geometria cônica, modelo SkyScan 1172 de alta resolução espacial entre 30 μm para amostras de 4 cm de diâmetro e cerca de 3 μm para amostras de 0,5 cm de diâmetro.

O tubo de raios X do equipamento operou em 100 kV e 100 μA, e uma combinação de filtros de Al/Cu (0,5/0,04 mm de espessura) posicionados entre a fonte e o detector foram utilizados. Tal combinação de filtros visou a redução de artefatos nas imagens produzidas. O passo de rotação utilizado foi de 0,3° e a média de 15 radiografias foi adotada para representar uma projeção.

Um algoritmo de Feldkamp modificado para essa geometria de feixe foi utilizado para a reconstrução das imagens. Este processo é realizado após a coleta das imagens por pacotes fornecidos pelo fabricante, os quais são denominados de NRecon e CTAn (VAZ et al., 2011).

O processo de simulação realizado pelo uso do programa de Yang é esquematizado na Figura 1, apresentada a seguir:

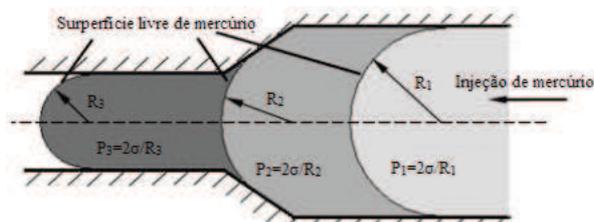


Figura 1. Representação esquemática do processo de simulação de intrusão de mercúrio realizado por Yang, 2009.

De acordo com a equação de Yang-Laplace (equação 1), quanto maior o raio do poro, menor é a pressão que deve ser aplicada para a invasão do espaço poroso pelo mercúrio e vice versa.

$$R = \frac{2\sigma}{P} \quad (1)$$

na qual R é o raio do poro,  $\sigma$  é a tensão superficial do mercúrio no vácuo, P é a pressão aplicada.

Desta forma, à medida que se aumenta a pressão usada na intrusão, poros de raios cada vez menores são invadidos e o processo se dá, como no exemplo da Figura 1, com o mercúrio invadindo porções cada vez maiores do estrangulamento, ou seja, ocupando inicialmente a porção com raio R1, depois  $R1 < R < R3$  e finalmente a porção do poro com raio R3 ( $R1 > R2 > R3$ ), o menor deles.

Com o programa de Yang et al. (2009), além de se poder simular esse processo, é possível contabilizar o volume, no caso da análise tridimensional, correspondente a cada raio invadido no processo simulado de intrusão.

O programa computacional opera da seguinte maneira:

I- Ao encontrar o poro de raio inicial R1, exemplificado na Figura 1, o programa o preenche, seção a seção da imagem tridimensional, com uma semiesfera de raio R1, até que o início do estrangulamento ocorra. O programa atribui aos voxels pertencentes a essa porção do poro o valor R1;

II- Ao encontrar o estrangulamento, o raio da semiesfera muda, e o programa identifica a mudança, atribuindo aos pixels dessa nova porção o valor R2, o raio da nova semiesfera;

III- Ao longo do estrangulamento, a cada seção ultrapassada, o raio da semiesfera passa a ser algo entre R3 e R1

( $R3 < R < R1$ );

IV- E finalmente o raio da semiesfera passa a ser R3;

Contabilizando-se os voxels (elementos unitários de volume da imagem tomográfica) identificados com valores R1 obtém-se o volume do poro cujo raio de curvatura é R1, os voxels identificados com o valor R3 compõem o volume do poro com raio de curvatura R3 e os voxels restantes são correspondentes aos poros com raios de curvaturas entre R1 e R3.

A soma de todos os voxels identificados corresponde ao volume total  $V_i$  do poro analisado. Assim, obtém-se a distribuição dos poros com o gráfico dos Rs identificados contra  $V(R)/V_i(R)$  ( $R3 < R < R1$ ), o que representa finalmente a curva de distribuição de poros.

### 3. Resultados e Discussão

As CRs ajustadas mediante ao modelo analítico de van Genuchten (1980) para as amostras de areias e esferas de vidro são apresentadas na Figura 2.

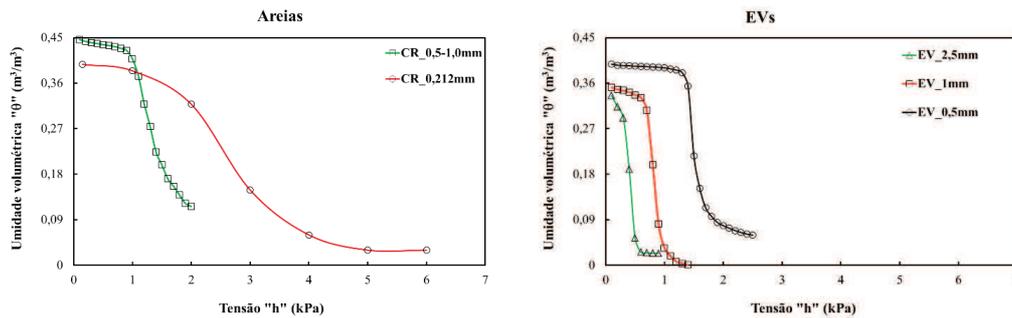


Figura 2. CRs das amostras de areias e esferas de vidro.

Na Figura 3 são apresentadas as FCAs construídas a partir dos parâmetros de van Genuchten (1980) e as CDPs obtidas através da análise de imagens tomográficas via o programa de Yang et al. (2009).

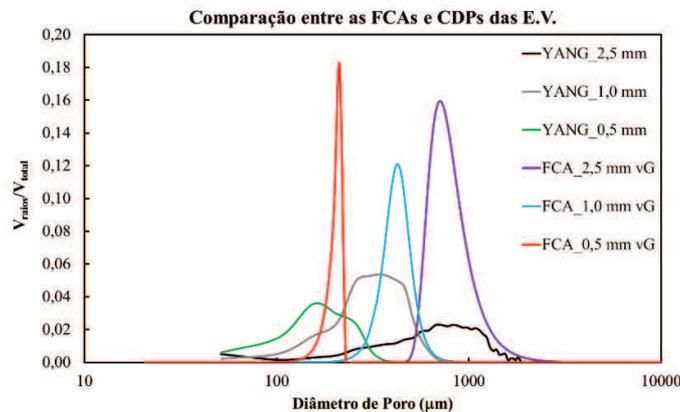


Figura 3. Comparação entre as FCAs (van GENUCHTEN, 1980) e CDPs (YANG et al., 2009).

A primeira observação a ser feita, refere-se à posição dos picos das CDPs (obtidas via simulação) em comparação às FCAs (obtidas experimentalmente via CRs). De acordo com alguns modelos que tratam da retenção da água por meios porosos simplificados (tais como os aqui investigados), verifica-se, que a extração de grande parte da água desses tipos de amostras é feita em um único potencial (HILPERT, MILLER, 2001 e MASON, MORROW, 1991), correspondente a poros de calibres maiores. Pela observação da Figura 3, constata-se uma boa concordância entre as posições apresentadas pelos picos advindos da FCA em relação à CDP gerada pelo programa de Yang et al, 2009.

No entanto, não se pode dizer o mesmo em relação à largura apresentada por essas curvas. A maior largura apresentada pelas CDPs refere-se, em análise pouco aprofundada, ao fato de que os processos de intrusão e extração de água não são exatamente de mesma natureza e de que o estudo da geração da CDP via análise de imagens encontra-se em seus estágios iniciais de investigação.

### 4. Conclusões

Observou-se uma relativa concordância entre os resultados relativos às FCAs e CDPs, constatado pelas semelhanças entre as mesmas. Contudo, inicialmente pode se dizer que pelo uso da simulação computacional analisa-se uma gama mais extensa de poros.

### Referências

- CÁSSARO, F. A. M. et al. Funil de Haines modificado: curvas de retenção em solos próximos à saturação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2555-2562, 2008.
- GIMENES, F. H. S. Curva de retenção na avaliação da qualidade física do solo. 2012. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2012.
- HILPERT, M.; MILLER, C. T. Pore-morphology-based simulation of drainage in totally wetting porous media. *Advances in Water Resources*, v. 24, p. 243-255, 2001.
- LINDQUIST, W. B. The geometry of primary drainage. *Journal of Colloid and Interface Science*: n. 296, p. 655-668, 2006.
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: Do Autor, 1995. 497 p.
- MASON, G.; MORROW, N. R. Capillary behavior of a perfectly wetting liquid in irregular triangular tubes. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 141, n. 1, p. 262-274, 1991.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 44, p.892-898, 1980.
- YANG, Z. et al. An Image-Based Method for Obtaining Pore-Size Distribution of Porous Media. *Environmental Science & Technology*, v. 43, n. 9, p. 3248-3253, 2009.