

AVALIAÇÃO DA MACROPOROSIDADE E DA DENSIDADE DE PARTÍCULAS DO SOLO ATRAVÉS DA MICROTOMOGRÁFIA DE RAIOS-X⁽¹⁾

A. MACEDO⁽²⁾ & S. CRESTANA⁽²⁾

RESUMO

A Ciência do Solo procura compreender e modelar os fenômenos ocorridos no solo, principalmente na zona não saturada. Como o entendimento de muitos desses fenômenos exige determinações em escalas que permitam incorporar aos modelos a variabilidade de poros e agregados, desenvolveu-se, na Embrapa Instrumentação Agropecuária, um tomógrafo de raios-X, de resolução micrométrica, com o objetivo de se obterem imagens, de forma não-destrutiva, de amostras de solo, com resolução espacial igual ou inferior a 100 µm. Foi possível projetar e construir um equipamento, de alta resolução, com baixo custo, comparativamente aos equipamentos comerciais disponíveis, cujos preços são proibitivos para aplicações em solo. Obtiveram-se imagens de amostras de solos com estrutura deformada, compostos por agregados de 212 a 250 µm, nos quais foram identificados poros medindo 100 µm ou menos. Poros dessas dimensões foram visualizados, também, em tomografias de amostras compostas de grãos de areia de 1 mm e capilares de vidro com diâmetros internos de 100, 200 e 300 µm. Tomografias de amostras não deformadas de solos evidenciaram, além de poros de 200 a 800 µm, partículas de alta densidade não-detectáveis com a tomografia de resolução milimétrica.

Termos de indexação: tomografia, microtomografia, solo, raio-X, agricultura, meios porosos.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Projeto financiado pela Embrapa/Instrumentação Agropecuária (Projeto 12.0.94.093) e pela FAPESP (Processo 90/3773-7). Escola de Engenharia de São Carlos - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada - USP. Recebido para publicação em maio de 1998 e aprovado em maio de 1999.

⁽²⁾ Pesquisador da Embrapa Instrumentação Agropecuária. Rua XV de Novembro, 1452, Caixa Postal 741. CEP 13560-970 São Carlos (SP). E-mail: alvaro@cnpdia.embrapa.br.

SUMMARY: MACROPOROSITY AND SOIL PARTICLE DENSITY EVALUATION USING X-RAY MICROTOMOGRAPHY

Soil Science deals with the understanding and modelling of the phenomena occurring in soils, mainly those related to the non-saturated zone. Since understanding most of those phenomena requires determination of parameters in scales allowing the incorporation of pore and aggregate variability to the models, a microscopic scale X-ray tomograph was built at Embrapa Agriculture Instrumentation. The aim was to generate non-destructive images of soil samples, within at least 100 μm spatial resolution. It was possible to design and construct a low cost equipment as compared to commercially available scanners, whose prices are prohibitive to soil studies. Tomographs of disturbed soils showing 212 to 250 μm aggregates were obtained. Pores with 100 μm size or less were observed. Pores with the same size could be detected in tomographs of samples containing 1 mm sand grains and capillaries with internal diameter of 100, 200 and 300 μm . Tomographs of undisturbed soil samples are also shown with pores ranging from 200 to 800 μm and high density particles.

Index terms: tomography, microtomography, soil, X-ray, agriculture, porous media.

INTRODUÇÃO

Os solos e os recursos hídricos têm sido submetidos, cada vez mais, às agressões da poluição de fontes dispersas e às consequências de manejos que, em vários casos, não levam em consideração a sustentabilidade do sistema. Para classificar e quantificar os efeitos dos agentes de alteração, necessita-se da utilização de novas ferramentas e métodos modernos de investigação, que permitam, principalmente, manejá-los adequadamente, de forma a serem evitados (Crestana, 1994).

Como as técnicas convencionais têm-se mostrado limitadas diante da complexidade dos mecanismos físicos, químicos e biológicos que atuam no solo, novos métodos, originários de diversas áreas do conhecimento, têm sido utilizados pela primeira vez em solos (Crestana et al., 1996), a saber: as espectroscopias de ressonância magnética nuclear e paramagnética eletrônica; as espectroscopias de infravermelho, ultravioleta visível e PIXE; a espectroscopia de fluorescência; a espectroscopia de plasma; a tomografia sísmica; o sensoriamento remoto; a reflectometria no domínio do tempo; a voltametria e as microscopias de varredura, de tunelamento e de força atômica. Crestana & Vaz (1997) apresentam um panorama do emprego da instrumentação na pesquisa em manejo e conservação do solo.

Uma técnica que tem obtido boa repercussão, considerando a resolução e a possibilidade de investigar o interior de objetos opacos sem necessidade de seccioná-los (de forma não invasiva), é a Tomografia Computadorizada (TC). A TC pode ser de raios-X, raios γ e Ressonância Magnética Nuclear (RMN), entre outras formas. A TC por RMN,

entretanto, mostra fortes restrições para seu uso em meios porosos que contêm materiais paramagnéticos (Crestana & Nielsen, 1990).

Embora a TC de raios-X e de radiação γ tenham-se mostrado muito valiosas como técnicas recentes do uso de imagem para estudos não-invasivos em solos, os resultados, até o momento, têm sido obtidos numa escala da ordem de milímetros (Petrovic et al., 1982; Hainsworth & Aylmore, 1983; Cruvinel et al., 1990; Crestana et al., 1996). Muitas respostas, porém, devem ser obtidas, preferencialmente, em nível micrométrico. Alguns resultados expressivos foram alcançados, na escala submilimétrica. Este é o caso, por exemplo, de uma microtomografia com resolução espacial igual a 20 μm , obtida por Crestana et al. (1996). No entanto, este equipamento está restrito a aplicações militares e industriais e com elevado custo, sendo aplicado à análise de objetos com densidade elevada e de grandes dimensões, se comparados com amostras de solo. Outros resultados foram apresentados por Flannery et al. (1987), Cesareo et al. (1993, 1994), os quais estiveram restritos a amostras com secções iguais ou inferiores a 3 x 3 mm², impedindo sua aplicação em amostras de solo indeformadas. Por esse motivo, construiu-se, na Embrapa Instrumentação Agropecuária, um tomógrafo com capacidade de obter imagens de amostras de solo indeformadas, com resolução micrométrica, a um custo baixo, quando comparado com os tomógrafos comerciais, cujo custo se situa na ordem de meio milhão a um milhão de dólares, enquanto o equipamento aqui apresentado teve um custo em torno de US\$ 70 mil.

A microtomografia traz vantagens sobre técnicas invasivas, por possibilitar o exame das amostras sem alterar as suas características. Entende-se por

técnicas invasivas aquelas que podem trazer alteração na estrutura da amostra, tais como: dimensões dos agregados, dimensões e distribuição dos poros e distribuição do conteúdo de água e solutos. A porosimetria por intrusão de mercúrio, por exemplo, é uma técnica amplamente utilizada, trazendo informações importantes sobre a distribuição de poros do solo. Todavia, enfrenta problemas práticos graças à sua invasibilidade (Kutilek & Nielsen, 1994).

Breve explanação sobre o método tomográfico pode ser encontrada em Crestana et al. (1992) e Vaz et al. (1992). O detalhamento matemático do algoritmo de reconstrução pode ser visto em Rosenfeld & Kak (1982), entre outros.

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um tomógrafo de raios-X, com resolução micrométrica, e sua aplicação para investigação de macroporos e determinação da densidade de partículas do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido nos laboratórios da Embrapa Instrumentação Agropecuária, utilizando o tomógrafo de resolução micrométrica, desenvolvido neste Centro, constituído de: sistema de raios-X da Philips composto de gerador de 3 kW, tensão máxima de saída 160 kV, painel de controle eletrônico, painel de comando e tubo de 3 kW, com alvo de tungstênio; cadeia nuclear composta de detector de iodeto de sódio ativado com tálio - NaI(Tl) -, fonte de alta tensão de 50 a 3.000 V, fonte de baixa tensão com potência de 160 W e placa multicanal; mesa composta de estágio linear, com resolução de 1,25 µm, estágio rotativo, com resolução de 0,01° e um

controlador para cada estágio; colimadores de chumbo ou de resina epóxi com PbO₂, nos diâmetros de 215, 100 e 60 µm. O diagrama de blocos deste tomógrafo pode ser visto na figura 1.

Nas tomografias, foram utilizadas as seguintes amostras: uma amostra de Podzólico Vermelho-Amarelo, da Fazenda Galvão, Santa Bárbara (SP), com 19% de argila, 18% de silte e 63% de areia; uma amostra de Latossolo Vermelho-Escuro, da Fazenda Canchim, da Embrapa Pecuária do Sudeste, em São Carlos (SP), com 39% de argila, 8% de silte e 53% de areia; uma amostra de solo não classificado, de uma área na estrada Itirapina - Dois Córregos, no estado de São Paulo, com 66% de argila, 7% de silte e 27% de areia; uma amostra com grãos de areia de 1 a 2 mm e capilares de vidro com diâmetros de 0,1, 0,2 e 0,3 mm e uma amostra com grãos de areia de 0,5 a 1,0 mm.

Na calibração das unidades tomográficas em coeficientes de atenuação linear, empregou-se o método desenvolvido por Crestana et al. (1992). Essa calibração foi feita na energia de 58,5 keV, sendo utilizadas as seguintes amostras homogêneas: acrílico, água, álcool etílico, Latossolo Roxo distrófico (passado em peneira 53 µm para homogeneizá-la), nylon, Podzólico Vermelho (peneirado como a amostra anterior), PVC, teflon e microesferas de vidro (granulometria de 105 a 149 µm). Foram coletados dados de número de fótons atravessando nove pontos diferentes de cada amostra, para o cálculo de µ. Obteve-se a correlação apresentada na equação 1 (Macedo et al., 1999).

$$\mu = 0,9697 UT + 0,0036, \text{ com } R^2 = 0,9992 \quad (1)$$

Na calibração do tomógrafo, em termos de unidades tomográficas versus densidade dos minerais que o compõem, utilizaram-se amostras dos seguintes minerais, por estarem entre os

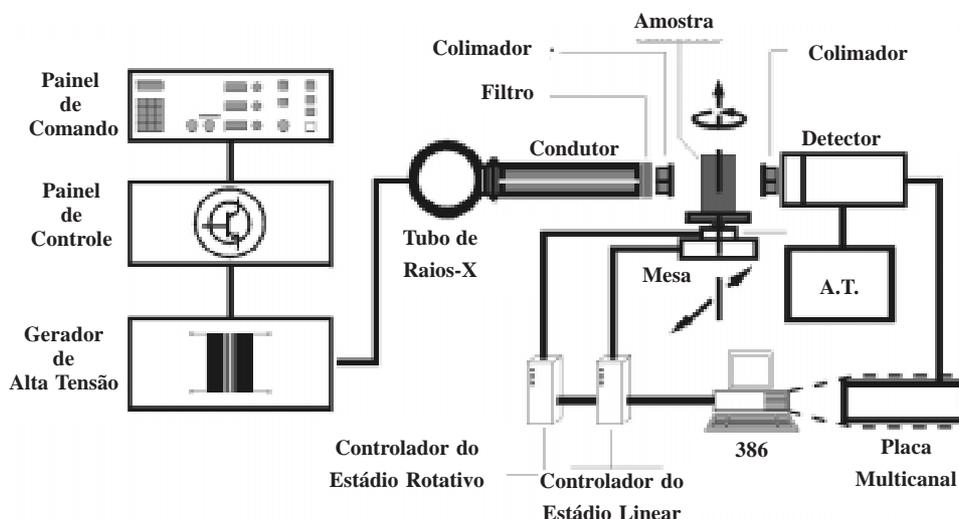


Figura 1. Diagrama de blocos do tomógrafo com resolução micrométrica.

componentes mais freqüentes dos solos do estado de São Paulo: hematita, caulinita, quartzo, calcita, ortoclásio e albita. Para obter amostras homogêneas e com geometria conhecida, neste procedimento de calibração, as amostras de minerais foram moídas em almofariz, passadas em peneiras com malha de 105 μm e colocadas em recipiente cilíndrico de acrílico com diâmetro interno de 10,81 mm, altura de 15,20 mm e parede com espessura de 0,92 mm.

A densidade é uma quantificação importante que se pode extrair da imagem tomográfica. Na tomografia milimétrica, obtêm-se, a partir das imagens, os valores das unidades tomográficas de amostras de solo com densidades conhecidas. Produz-se, assim, um gráfico da densidade em função das unidades tomográficas, em que valores médios são devidos à resolução empregada (Crestana et al., 1985, 1992). Na tomografia micrométrica, entretanto, surgem detalhes característicos dos minerais constituintes do solo. São necessárias, então, duas calibrações: uma para valores globais, seguindo o mesmo procedimento desenvolvido por Crestana et al. (1985, 1992), e outra para partículas ou cristais dos minerais. Para efetuar tal calibração, são escolhidos alguns minerais mais comuns ao solo que se pretenda estudar. Podem ser utilizadas, também, algumas misturas desses minerais, para obter maior número de pontos na curva. Uma alternativa para esse procedimento seria analisar o solo, determinando-se seus minerais e, a partir dessa informação, fazer as escolhas. Todavia, desde que, com o método proposto, sejam obtidos pontos suficientes para tal calibração, essa forma é mais rápida e suficiente.

Para determinar o coeficiente de atenuação linear dos minerais (μ_{cristal}), mede-se a atenuação da radiação X pelas amostras, que se apresentam na forma de pó, e calcula-se o seu coeficiente de atenuação em massa (μ_m), conforme indicado na equação 2. Obtém-se o μ_{cristal} por meio da equação 4.

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho_g} \quad (2)$$

em que ρ_g é a densidade do solo da amostra e μ é o coeficiente de atenuação linear da amostra, na forma de pó, dado por:

$$\mu = \frac{1}{x} \cdot \ln \left(\frac{I_{0a}}{I} \right) \quad (3)$$

sendo x a espessura da amostra, I_{0a} a intensidade do feixe de fótons que atravessa o recipiente vazio e I a intensidade do feixe de fótons que atravessa o recipiente com a amostra.

$$\mu_{\text{cristal}} = \mu_m \rho_s \quad (4)$$

em que ρ_s é a densidade das partículas da amostra.

Na medição do coeficiente de atenuação linear, utilizam-se, geralmente, amostras com faces planas

paralelas dispostas perpendicularmente ao feixe. No caso do tomógrafo de resolução micrométrica, torna-se difícil conhecer, de forma precisa, a direção do feixe, o que compromete a sua perpendicularidade em relação às faces planas e, portanto, a determinação de x é inexata. Para contornar essa limitação, foram usados um recipiente cilíndrico e amostras em pó. Não se perde informação com esse procedimento, dada a relação linear entre os coeficientes μ e μ_m . A amostra em pó é colocada no recipiente e faz-se uma varredura com passos de 10 μm . A menor contagem de fótons, se não houvesse a flutuação devida à estatística de Poisson, deveria ocorrer exatamente no centro da amostra e na espessura x , que corresponderia ao diâmetro interno do recipiente.

Para minimizar o erro causado por tal flutuação, tomou-se a média de três pontos, ou seja, o menor número de fótons e os valores das posições adjacentes. Em outras palavras, I é a média aritmética de I_{c-1} , I_c e I_{c+1} . (Figura 2). Como a amostra pode não estar homogeneamente distribuída, em termos de densidade, tanto vertical como horizontalmente, as medidas foram feitas em quatro planos horizontais distando 1mm entre si e em três direções em cada plano ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 60^\circ$ e $\theta = 120^\circ$). Considerou-se como feixe livre a média das três primeiras contagens de fótons fora da amostra e $I_{a0} = I_0 \cdot \exp(-\mu_{ac} x_{ac})$, em que $\mu_{ac} = 0,225 \text{ cm}^{-1}$ é o coeficiente de atenuação linear para o acrílico, em 58,5 keV, e $x_{ac} = 0,185 \text{ cm}$ é a espessura de acrílico que o feixe de fótons atravessa.

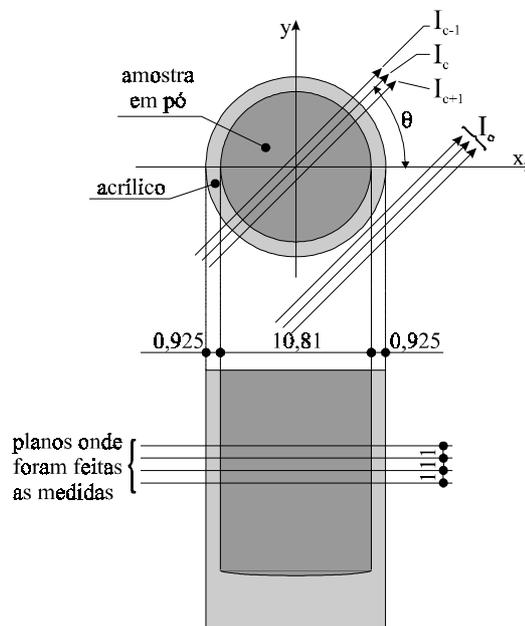


Figura 2. Diagrama mostrando as posições em que foram feitas as medidas para o cálculo dos coeficientes de atenuação linear, para calibração das tomografias em densidade das partículas.

Quanto à preparação das amostras de solos, trabalhou-se com amostras deformadas e não deformadas. No primeiro caso, as amostras foram peneiradas e colocadas em recipientes cilíndricos de acrílico, com diâmetros internos de 4,8 e 10,81 mm. Os agregados de Podzólico Vermelho-Amarelo foram separados em peneiras com malhas de 0,212 e 0,250 mm. Para a areia, utilizaram-se peneiras com malha de 1,0 a 2,0 mm e com malha de 0,5 a 1,0 mm.

No caso de amostras não deformadas, foram utilizados pequenos torrões de solo, obtidos por fragmentação manual ou por seccionamento com lâmina. Não se fez nenhum tipo de impregnação, para evitar qualquer deformação interior por arraste de agregados ou alteração na dimensão e distribuição dos poros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A calibração do tomógrafo, correlacionando a densidade das partículas com o coeficiente de atenuação linear, é sumariada no quadro 1, onde são apresentados estes dados para as amostras utilizadas na calibração⁽³⁾. A correlação entre ρ_s e μ pode ser vista na equação 5. Para as misturas, as densidades reais foram extrapoladas, calculando-se a média ponderada dos valores dos minerais utilizados na sua composição. A não-utilização desse artifício resultaria em $\rho_s = 0,6203 \mu + 2,0905$, com $R^2 = 0,9922$. Porém, a diferença entre as duas equações é inferior a 1%, além de se obterem apenas pontos próximos aos extremos do intervalo 0,654 a 5,341 cm^{-1} .

$$\rho_s = 0,6139 \mu + 2,1172, \text{ com } R^2 = 0,9898 \quad (5)$$

Os resultados seguintes mostram as imagens de amostras nas condições já descritas, sendo visíveis os poros. Na figura 3, vê-se a tomografia de uma amostra de Podzólico Vermelho, peneirado, com agregados de 212 a 250 μm . Os poros são visíveis e suas dimensões no plano em análise foram medidas no programa de reconstrução e visualização, apresentando valores da ordem de 100 μm . Utilizaram-se energia de 58,5 keV, colimador de 60 μm , tempo de contagem de 10s e feixe livre de 42.000 fótons. O tempo de contagem é o tempo durante o qual são contabilizados os fótons para cada posição da translação. O feixe livre citado representa o número de fótons contabilizado durante o tempo de contagem sem a presença da amostra.

Na figura 4, pode ser vista a microtomografia de uma amostra constituída de grãos de areia de, aproximadamente, um milímetro e capilares de vidro

Quadro 1. Densidade dos sólidos (ρ_s) e coeficiente de atenuação linear (μ) de amostras de minerais, para a energia de 58,5 keV

Amostra	μ cm ⁻¹	ρ_s ⁽¹⁾ g cm ⁻³
Hematita	5,090	5,27
Caulinita	0,756	2,62
Quartzo	0,788	2,65
Mistura 1 ⁽²⁾	1,921	3,47
Mistura 2 ⁽³⁾	2,971	3,92
Mistura 3 ⁽⁴⁾	3,968	4,50
Calcita	1,283	2,71
Ortoclásio	0,836	2,57
Albita	0,706	2,59

⁽¹⁾ Calculada pelo método do picnômetro (EMBRAPA, 1997).
⁽²⁾ 31,9% de hematita e 68,1% de caulinita. ⁽³⁾ 50,2% de hematita e 49,8% de caulinita. ⁽⁴⁾ 71,1% de hematita e 28,9% de caulinita.

com diâmetros internos de 100, 200 e 300 μm . Notam-se canais entre grãos com dimensões iguais ou inferiores a 100 μm . A energia utilizada nesta tomografia foi de 58,5 keV, o colimador de 60 μm , o tempo de contagem de 10s e o feixe livre de 39.700 fótons.

A amostra da figura 5 é constituída de grãos de areia situados na faixa de 0,5 a 1 mm, colocados num cilindro com 10,81 mm de diâmetro interno. Os contornos dos grãos podem ser vistos, bem como os poros na dimensão do pixel, de 59 μm . A energia do feixe foi de 61 keV, o colimador de 60 μm , o tempo de contagem de 6s e o feixe livre de 27.000 fótons.

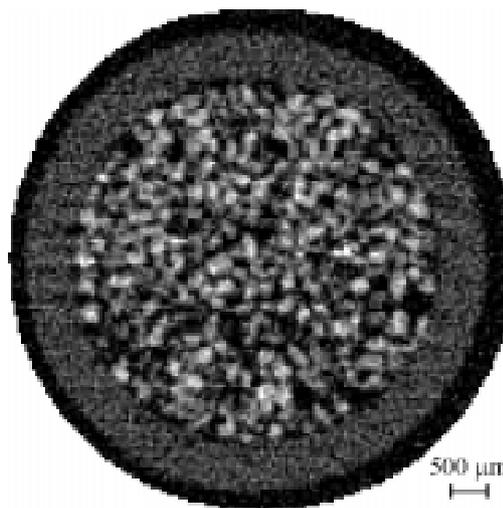


Figura 3. Tomografia de amostra deformada de Podzólico Vermelho, apresentando agregados de 212 a 250 μm . As regiões mais escuras representam o ar.

⁽³⁾ Amostras cedidas pelo Prof. José Eduardo Rodrigues, do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos/USP.

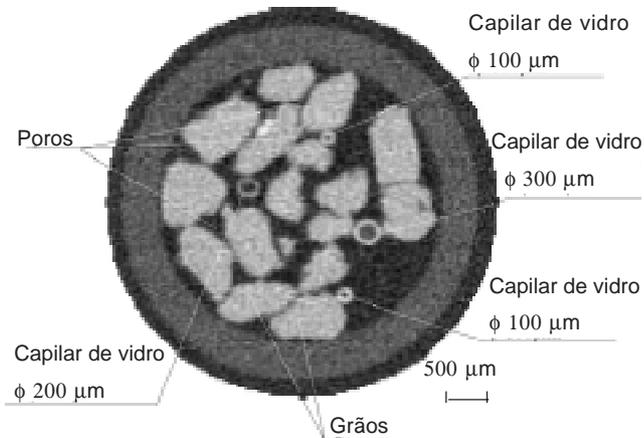


Figura 4. Tomografia de uma amostra de grãos de areia de aproximadamente 1 mm, capilares de vidro, sendo dois de 100, um de 200 e um de 300 μm.

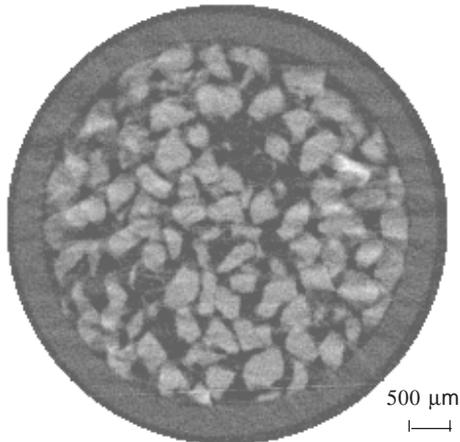


Figura 5. Tomografia de uma amostra de grãos de areia de 0,5 a 1 mm em recipiente com 10,81 mm de diâmetro interno.

Nos resultados com torrões, podem ser vistas as tomografias mostradas nas figuras 6 e 7. Na primeira, tem-se um pequeno torrão de um Latossolo Vermelho-Escuro, colocado no interior de um recipiente de acrílico com 4,8 mm de diâmetro interno. Podem ser notados, nessa imagem, dois macroporos com dimensões da ordem de 300 μm e alguns pontos com densidade mais elevada. A unidade tomográfica máxima encontrada foi de 1,465, que corresponde, pela aplicação das equações 1 e 5, a $\mu = 1,424 \text{ cm}^{-1}$ e a $\rho_s = 2,991 \text{ g cm}^{-3}$. O processo de aquisição e reconstrução resolveu, espacialmente, de forma satisfatória, essa imagem, podendo-se visualizar com nitidez os contornos do torrão, a região com ar no espaço não ocupado pela amostra e os contornos e espaços vazios formados entre este e o recipiente. Foram utilizados energia de 58,5 keV,

colimador de 100 μm, tempo de contagem de 5s e feixe livre de 38.000 fótons. A figura 7 mostra a microtomografia de um fragmento de torrão de solo⁽⁴⁾. Poros de, aproximadamente, 200 a 800 μm podem ser vistos, bem como as interconexões entre alguns deles. A presença de pontos com alta densidade também pode ser notada. A unidade tomográfica máxima encontrada foi de 3,167, correspondendo a $\mu = 3,075 \text{ cm}^{-1}$ e a $\rho_s = 4,005 \text{ g cm}^{-3}$.

Na figura 8, observou-se a tomografia de uma amostra construída com alguns cristais para se fazer uma comparação entre os valores obtidos pelo método aqui proposto e as densidades conhecidas dos materiais. Foram utilizados, conforme indicado, cristais de quartzo, ortoclásio, hematita e calcita. O quadro 2 mostra os valores obtidos, com erro máximo de 4,7%, ocorrido para o quartzo.

A microtomografia traz um novo enfoque e uma nova alternativa à investigação das características físicas do solo. Os conceitos densidade e umidade, por exemplo, consagrados para a macroescala, não podem ser estendidos para a microescala. Isto, pelo menos, não é possível ou evidente até o momento, a menos que se consiga fazer uma correlação entre escalas. Na macroescala, enquanto se avaliam massa e volume, na microescala utilizam-se conceitos de espaço poroso, vazios, densidades de poros, distribuição de poros, espaços ocupados por água, solutos, gases e assim por diante. Necessita-se, portanto, equacionar como conectar esses dois níveis

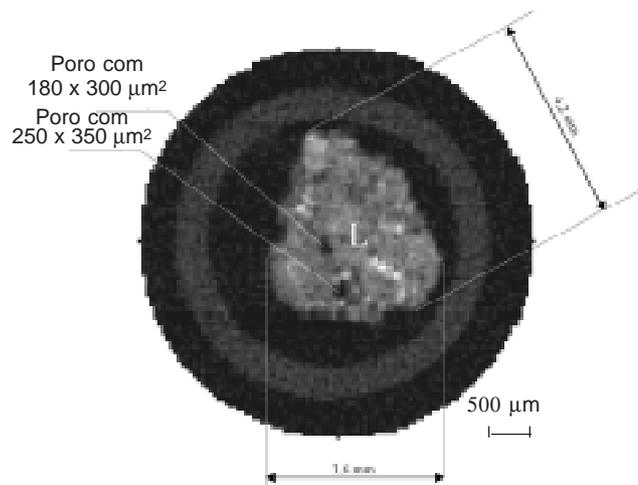


Figura 6. Tomografia de um torrão de Latossolo Vermelho-Escuro, onde podem ser vistos dois macroporos. O valor máximo de densidade das partículas encontrado foi de 2,991 g cm⁻³.

⁽⁴⁾ Amostra cedida pelo Prof. Dr. Orêncio Monje Vilar, do Departamento de Geotecnia, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

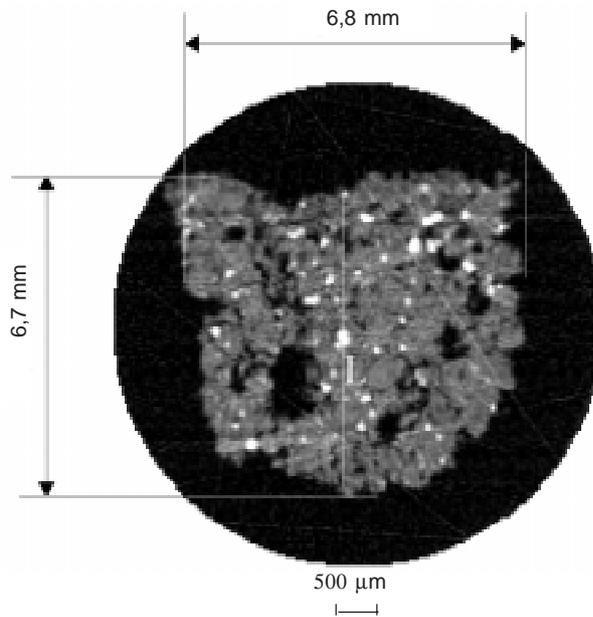


Figura 7. Microtomografia de um fragmento de torrão de solo, onde podem ser vistos poros de 200 a 800 µm e pontos de alta atenuação, invisíveis em tomografia de resolução milimétrica. O valor máximo de densidade das partículas encontrado foi de 4,005 g cm⁻³.

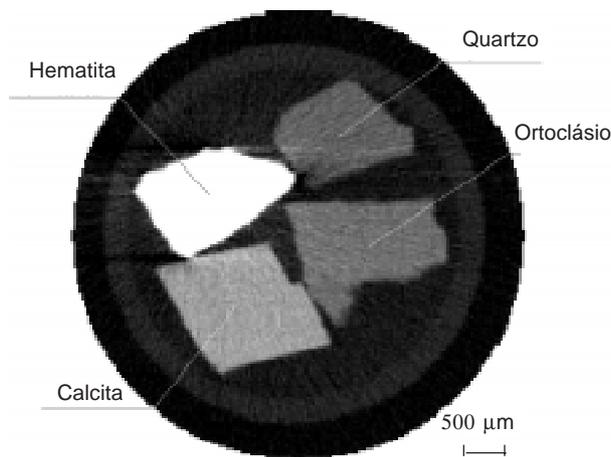


Figura 8. Tomografia de uma amostra composta por cristais de quartzo, ortoclásio, hematita e calcita, apresentando densidades reais, respectivamente, de 2,525, 2,586, 5,081 e 2,793 g cm⁻³. Os valores foram obtidos pelo método aqui proposto.

de escala (*downscaling* ou *upscaling*). Este desafio não é novo (Miller & Miller, 1955a,b), mas se torna cada vez mais evidente, quando se começa a investigar o solo com técnicas e equipamentos de imagem com alta resolução espacial, como no caso da

Quadro 2. Unidades tomográficas (UT), coeficiente de atenuação linear (µ) e comparação entre as densidades das partículas (ρ_s) tabeladas e determinadas pelo método tomográfico

Cristal	UT	µ	ρ _s ⁽¹⁾	ρ _s ⁽²⁾	Erro
		cm ⁻¹	— g cm ⁻³ —		%
Quartzo	0,682	0,665	2,650	2,525	4,7
Ortoclásio	0,784	0,764	2,570	2,586	-0,6
Hematita	4,974	4,827	5,240	5,081	3,0
Calcita	1,132	1,101	2,730	2,793	-2,3

⁽¹⁾ Valores tabelados. ⁽²⁾ Valores obtidos com o método aqui proposto.

microtomografia. Em outras palavras, o conceito de *scaling* precisa ser trazido à discussão, novamente, para se integrarem os resultados em várias escalas.

Como nova alternativa metodológica, a microtomografia pode associar-se a outras técnicas, estando entre elas, por exemplo, a porosimetria. Essa técnica enfrenta dificuldades de ordem prática na determinação do volume dos poros, tais como: o aprisionamento de bolhas de ar, a variação do volume, quando se utiliza água, e a fragilidade dos agregados do solo, quando se utiliza um líquido não-molhante, como na porosimetria de Hg (Kutilek & Nielsen, 1994).

Nas microtomografias com amostras de solos, foram visualizados pontos com alta densidade que não eram detectados na tomografia com resolução milimétrica. Na figura 7, podem ser notados esses pontos, apresentando densidade de até 4,005 g cm⁻³. O mesmo não ocorre na tomografia milimétrica, mostrada na figura 9, onde se vê uma imagem da secção de uma amostra de solo não perturbado. Essa imagem foi obtida em um tomógrafo portátil (Naime et al., 1996, 1997), com resolução milimétrica. Não há visualização dos referidos pontos nessa imagem, tampouco em outra do mesmo lote.

Outra característica que merece menção é a variação das unidades tomográficas que, na microtomografia, perde a característica de médias locais. A figura 10 mostra a variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L, da figura 7, onde esse fato pode ser observado, quando em comparação com a figura 11, na qual se mostra a variação das unidades tomográficas da figura 9. Na figura 11, nota-se apenas a curva oscilando em torno de um valor médio local, enquanto, na figura 10, tem-se uma informação muito mais detalhada sobre a amostra.

Cabe mencionar que o tomógrafo aqui apresentado tem a sua aplicação dirigida à caracterização de parâmetros ou fenômenos estáticos, pois os tempos de aquisição estão na ordem de 50 h. O desenvolvimento,

tanto da técnica como do equipamento, poderá trazer novos avanços e novas possibilidades. Está em andamento, no momento, a transformação do equipamento, passando de tomógrafo de primeira geração para tomógrafo de terceira geração, o que

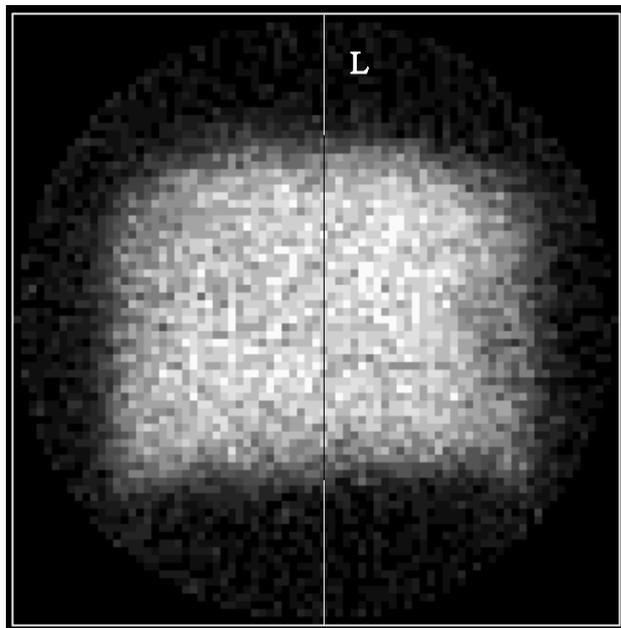


Figura 9. Tomografia em escala milimétrica de uma amostra não perturbada de Podzólico Vermelho-Escuro eutrófico, da Estação Experimental do IAC, em Mococa (SP).

Fonte: Dr. Carlos M.P. Vaz, da Embrapa Instrumentação Agropecuária.

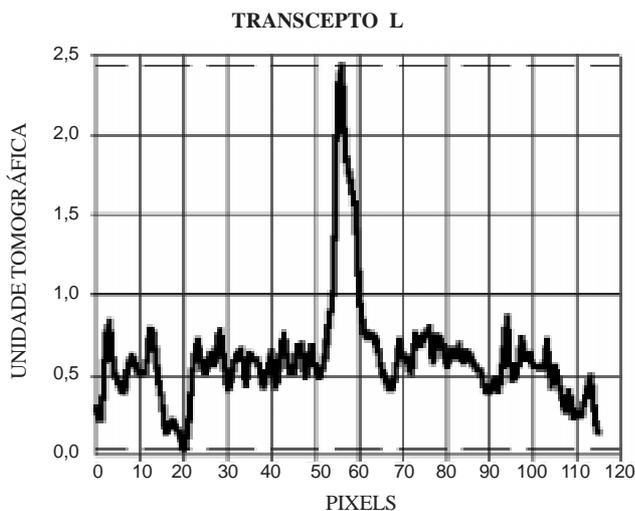


Figura 10. Variação das unidades tomográficas ao longo do transcepto L da microtomografia da figura 7.

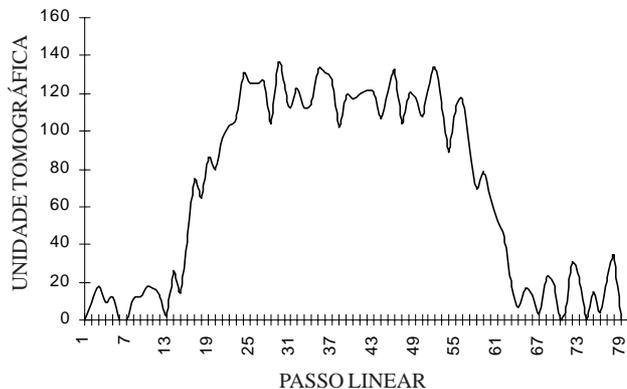


Figura 11. Variação das unidades tomográficas ao longo do transcepto L da figura 9.

reduzirá esse tempo para em torno de 15 min. Isto permitirá maior número de amostragens e, conseqüentemente, informações da variabilidade espacial da estrutura do solo. No estádio atual, a técnica já demonstra seu potencial de aplicações, apresentando resultados que antes não foram obtidos, pelo menos no que se refere à não-invasibilidade. Sua maior aplicação depende dos desenvolvimentos já citados e em andamento. Cabe citar, ainda, que entre eles encontra-se a implementação de ferramentas de análise de imagens, com o objetivo de avaliar a porosidade do solo, a partir das tomografias.

CONCLUSÕES

1. A construção do tomógrafo com resolução micrométrica, com aplicação em solos, bem como em outros meios particulados, permite avaliar a densidade de partículas de sólidos com dimensões da ordem de 80 μm ou superior.
2. A microtomografia permite realizar estudos de sistemas heterogêneos, porosos e opacos, como solos, com características inéditas na escala submilimétrica.
3. A visualização de macroporos e agregados do solo, trazendo informação mais detalhada sobre a amostra, coloca em discussão a aplicação de conceitos da macroescala para microescala, como, por exemplo, densidade e umidade do solo. Até o momento, não é óbvio que se possa fazer tal aplicação, sendo necessária, mais uma vez, a discussão do *scaling*.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa/Instrumentação Agropecuária (Projeto nº12.0.94.093) e à FAPESP (Processo 90/3773-7), pela infra-estrutura e pelo suporte financeiro.

Ao Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da USP/Escola de Engenharia de São Carlos, onde foi desenvolvida a tese de doutorado.

Aos Assessores Científicos da Revista Brasileira de Ciência do Solo, pelos comentários que muito contribuíram para a melhoria deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- CESAREO, R.; CRESTANA, S. & MASCARENHAS, S. Nuclear techniques in soil science. Trends in Agricultural Sciences: Soil Sci., 1:27-46, 1993.
- CESAREO, R.; APPOLONI, C.R.; BRUNETTI, A.; CASTELLANO, A.; CRUVINEL, P.E.; MASCARENHAS, S.; ASSIS, J.T. & GIGANTE, G.E. Industrial applications of tomography and microtomography. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTERIZED TOMOGRAPHY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS, Berlin., 1994. Proceedings. Berlin, 1994. p.295-302.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. & POZZI-MUCELLI, R.S. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computerized tomographic scanning. Soil Sci., 140:326-332, 1985.
- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; VAZ, C.M.P.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, R. & REICHARDT, K. Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. R. Bras. Ci. Solo, 16:161-167, 1992.
- CRESTANA, S. Técnicas recentes de determinação de características do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10., Florianópolis, 1994. Resumos. Florianópolis, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. p.86-97.
- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; MASCARENHAS, S.; BISCEGLI, C.I.; MARTIN-NETO, L. & COLNAGO, L.A., eds. Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1996. 291p.
- CRESTANA, S. & NIELSEN, D.R. Investigações não-destrutivas de sistemas porosos multifásicos através de microtomografia de raios-X, gama e ressonância magnética nuclear (RMN). In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS-ENEMP, 18., Nova Friburgo, 1990. Anais. Nova Friburgo, Colégio Anchieta, 1990. p.699-710.
- CRESTANA, S. & VAZ, C.M.P. A instrumentação como uma ferramenta na pesquisa em conservação e manejo dos solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Resumos. Rio de Janeiro, 1997. CD-ROM.
- CRUVINEL, P.E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S. & MASCARENHAS, S. X-ray and gamma-ray computerized minitomograph scanner for soil science. IEEE Trans. Instr. Meas., 39:745-750, 1990.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FLANNERY, B.P.; DECKMAN, H.W.; ROBERGE, W.G. & D'AMICO, K.L. Three-dimensional X-ray microtomography. Science, 237:1439-1444, 1987.
- HAINSWORTH, J.M. & AYLMOORE, L.A.G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. Aust. J. Soil Res., 21:1435, 1983.
- KUTÍLEK, M. & NIELSEN, D.R. Soil hidrology. Cremlingen-Destedt, Catena Verlag, 1994. 370p.
- MACEDO, A.; CRUVINEL, P.E.; INAMASU, R.Y.; JORGE, L.A.C.; NAIME, J.M.; TORRE-NETO, A.; VAZ, C. M. P. & CRESTANA, S. Micrometric X-ray CT Scanner dedicated to soil investigation. In: IEEE INTERNATIONAL MULTICONFERENCE ON CIRCUITS, SYSTEMS, COMMUNICATIONS AND COMPUTERS, 3., Atenas, 1999. (Trabalho completo aceito)
- MILLER, E.E. & MILLER, R.D. Theory of capillary flow: I. Experimental information. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 19:271-275, 1955a.
- MILLER, E.E. & MILLER, R.D. Theory of capillary flow: I. Practical implications. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 19:267-271, 1955b.
- NAIME, J.M.; CRUVINEL, P.E. & CRESTANA, S. *Tomógrafo portátil dedicado à pesquisa agropecuária*. São Carlos, EMBRAPA-CNPDI, 1996. 4p. (EMBRAPA-CNPDI, Comunicado Técnico, 11)
- NAIME, J.M.; CRUVINEL, P.E.; CRESTANA, S.; CONCIANI, W. & SOARES, M.M. Portable CAT scanner applied to collapsible soil studies. In: GAZZINELLI, R.; MOREIRA, R.L. & RODRIGUES, W.N., eds. PHYSICS AND INDUSTRIAL DEVELOPMENT: BRIDGING THE GAP – INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., Belo Horizonte, 1997. Proceedings. Singapore, World Scientific, 1997. p.327-331.
- PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E. & RIEKE, P.E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. Soil Sci. Soc. Am. J., 46:445-449, 1982.
- ROSENFELD, A. & KAK, A.C. Reconstruction. In: ROSENFELD, A. & KAK, A.C. Digital picture processing. 2.ed. San Diego, Academic Press, 1982. v.1. p.353-430. (Computer Science and Applied Mathematics)
- VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S. & REICHARDT, K. Tomografia computadorizada na avaliação da compactação de solos. R. Bras. Ci. Solo, 16:153-1159, 1992.