

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

ESTUDO DA DEFORMAÇÃO DE UM VERTISSOLO POR MEIO DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE DUPLA ENERGIA SIMULTÂNEA⁽¹⁾

M. BIASSUSI⁽²⁾, E. A. PAULETTO⁽³⁾ & S. CRESTANA⁽⁴⁾

RESUMO

Utilizando o método da tomografia de duplo feixe de raios gama, foi estudada a variação da densidade de um Vertissolo com a umidade em experimentos de laboratório. Para tanto, foram utilizadas imagens tomográficas de amostras de solo provenientes da atenuação de dois feixes de radiação gama, um de ^{137}Cs e outro de ^{241}Am , os quais forneceram duas equações de atenuação que permitiram determinar duas incógnitas: densidade do solo e umidade. As amostras foram montadas com um mesmo valor inicial de densidade do solo e submetidas a diferentes graus de hidratação. Os resultados mostraram que: (1) o sistema permitiu a determinação da umidade e densidade do solo satisfatoriamente; (2) houve uma variação de aproximadamente 23% no volume das amostras desestruturadas entre a condição seca e saturada; (3) possibilitou a análise da expansividade das amostras deformadas pelo modelo das três retas, o qual permitiu verificar a variação do volume específico do solo durante todo o intervalo de umidade estudado, bem como o conhecimento de alguns pontos característicos importantes da curva de deformação do solo.

Termos de indexação: densidade do solo, umidade, expansão e contração do solo, tomografia de dupla energia.

⁽¹⁾ Este trabalho foi realizado sob os auspícios da FAPESP, processo 90/3773-7, Embrapa Instrumentação Agropecuária. Recebido para publicação em junho e aprovado em novembro de 1998.

⁽²⁾ Mestrando em Agronomia, FAEM/Universidade Federal de Pelotas. Caixa Postal 354, CEP 96010-900 Pelotas (RS). Bolsista do CNPq.

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, FAEM/UFPel. Bolsista do CNPq.

⁽⁴⁾ Pesquisador da Embrapa Instrumentação Agropecuária. Caixa Postal 741, CEP 13560-970 São Carlos (SP).

SUMMARY: *STUDY OF A VERTISOL DEFORMATION BY SIMULTANEOUS DOUBLE ENERGY COMPUTERIZED TOMOGRAPHY*

The variation of bulk density in a vertisol was studied by gamma-ray double beam tomography. Tomographic images of samples deriving from ^{137}Cs and ^{241}Am gamma-radiation were used, providing two attenuation equations which allowed the determination of two variables: bulk density and moisture. The samples, initially with the same bulk density, were submitted to different moistening degrees. The results showed that: (1) the system allowed a satisfactory moisture and bulk density determination; (2) volume of destructured samples varied around 23% from dry to saturated conditions; and (3) the method allowed the analysis of deformed sample expansiveness by the three-straightline method, which allowed to verify the volumetric range during the whole moisture interval and major characteristic points of the soil deformation curve.

Index terms: bulk density, moisture, swelling and contractions soil, double beam tomography.

INTRODUÇÃO

Os Vertissolos caracterizam-se pela alta fertilidade natural e estabilidade no sustento de produções agrícolas por períodos muito longos, mesmo quando cultivados extensivamente (Hudson, 1984).

A principal dificuldade na sua utilização está no manejo adequado da água nas práticas agrícolas, pois apresentam em seus horizontes alto teor de argilominerais do tipo 2:1 que, quando umedecidos, caracterizam-se pelo aumento de volume devido à entrada de água entre as suas unidades estruturais, tornando sua consistência plástica e pegajosa, e, quando secos, apresentam consistência dura, formando aglomerados internos e fendilhamentos na superfície.

Somente no Rio Grande do Sul aproximadamente 852.500 hectares se compõem desse tipo de solo, representando 2,2 % da área total do estado (Pauletto et al., 1995).

As modificações estruturais ocorridas nesses solos trazem, como conseqüência, grandes variações no volume e densidade do solo, os quais são parâmetros básicos para a avaliação de práticas agrícolas.

Os conceitos formulados para as características de umidade do solo, assim como seu arranjo estrutural, são limitados a solos não-deformáveis. Sendo assim, as leis convencionais de fluxo de água, como a lei de Darcy-Buckingham, não são adequadas para sistemas trifásicos que apresentem variações de volume, o que acarreta sérias limitações na aplicação de parâmetros básicos voltados às práticas agrícolas.

Várias críticas têm sido feitas aos métodos gravimétricos convencionalmente utilizados para determinar a variação de volume do solo, conforme

o seu teor de água (Tunny, 1970; Anderson et al., 1973; Shafer & Singer, 1976; Parker, 1977). Apesar de serem de relativa simplicidade são, em sua maioria, destrutivos, necessitando de grande número de amostras, são insensíveis às heterogeneidades internas, além de pressuporem a validade da hipótese de isotropia espacial.

A utilização da técnica de tomografia simultânea de dupla energia tem-se mostrado adequada para esse tipo de estudo, pois é um método não-destrutivo e pontual que permite o conhecimento do valor médio da distribuição de umidade e densidade do solo em amostras (Crestana & Nielsen, 1991; Aylmore, 1993).

Trata-se do emprego de duas fontes de energias dispostas em linha, visando obter, em um mesmo feixe de radiação, duas energias de intensidades diferentes, que, após serem atenuadas pela amostra, são quantificadas eletronicamente e armazenadas em computador. O computador, utilizando um algoritmo de reconstrução matemática apropriado, fornece duas matrizes de valores de atenuação, referentes às energias utilizadas, de uma mesma secção da amostra. Tais valores guardam uma relação de dependência com a densidade do solo e umidade para cada ponto discreto da secção da amostra (Crestana et al., 1992b).

Muitos pesquisadores têm desenvolvido modelos que permitem a avaliação das etapas do processo de expansão e contração do solo, baseado na variação ocorrida em seu volume (Fox, 1964; Sposito, 1973; Giráldez et al., 1983).

McGarry & Malafant (1987) idealizaram um modelo que engloba as três fases do solo, nas quais o processo de contração conforme o teor de água ocorre, chamado "modelo das três retas". Esse modelo é assim denominado, por caracterizar três regiões distintas no processo de contração da amostra, conhecidas como fase residual, normal e estrutural.

Neste modelo, apresentado na figura 1, a análise da expansão do solo é feita com base na variação do volume específico (v) do solo, o qual pode ser decomposto em fase sólida (v_s), líquida (θ_g) e gasosa (v_a) que compõem o solo, sendo o volume específico do solo (v) definido como o volume total por unidade de massa seca de solo ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$), ou o inverso da densidade do solo (ρ_s).

A fase normal é caracterizada por apresentar variações de volume específico numericamente iguais às variações de umidade gravimétrica (θ_g), ou seja $dv/d\theta = 1$, o que pode ser observado pelo paralelismo com a reta 1:1.

Na fase estrutural e residual, o coeficiente angular das retas assume valores entre 0 e 1, isto é, $0 \leq dv/d\theta < 1$, mostrando que, nessas etapas, o solo caracteriza-se por apresentar menores variações na expansão em relação à etapa normal. Tais etapas também se caracterizam por ocorrerem em intervalos distintos de umidade, sendo a fase residual para umidades próximas à condição seca e a fase estrutural à saturada.

O objetivo deste trabalho foi estudar a variação da densidade de um Vertissolo em função de sua umidade, utilizando a técnica da tomografia de dupla energia simultânea, sendo os resultados obtidos analisados pelo modelo das três retas.

MATERIAL E MÉTODOS

Para as determinações, utilizaram-se amostras do horizonte A₁₁ de um Vertissolo pertencente à Unidade de Mapeamento Aceguá (Brasil, 1973), do

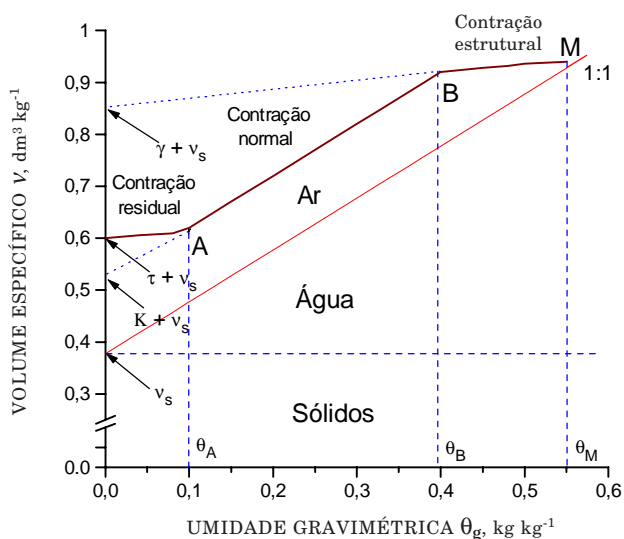


Figura 1. Representação do modelo das três retas, mostrando o comportamento variável do volume do solo sob diferentes condições de umidade (McGarry & Malafant, 1987).

município de Bagé (RS). Em laboratório, as amostras coletadas foram secas e peneiradas, usando peneira com malha de 1 mm de abertura. Em seguida, para que se pudessem fazer as tomografias, o solo foi colocado em canos de PVC com um volume interno $V_o = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ e 1 mm de espessura de parede em diferentes condições de umidade.

O acondicionamento do solo nos canos foi feito de modo que cada amostra possuísse inicialmente densidade do solo seco $\rho_s = 1,35 \text{ kg dm}^{-3}$. Isto foi obtido preenchendo os canos com uma massa de 0,0513 kg de solo seco. Conhecendo o volume e lembrando a definição da umidade à base de volume (θ_v), foram preparadas diferentes condições de umidade para as amostras de solo, adicionando-se quantidades predeterminadas de água, obtendo os seguintes níveis de umidade: 0,0; 0,05; 0,10; 0,16; 0,20; 0,27; 0,35; 0,40; 0,43; 0,45; 0,48; 0,51 e $0,56 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Para as umidades abaixo de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerando a dificuldade de distribuição uniforme da água no solo, foi feita uma homogeneização prévia da água+solo em sacos plásticos hermeticamente fechados para que não ocorressem perdas por evaporação, mantendo-os nesta condição até que apresentassem temperatura ambiente, para então serem preenchidos os canos de PVC.

A adição da água nas demais amostras foi feita por capilaridade. Após a adição de água, todas as amostras ficaram em repouso por um período de sete dias para melhor homogeneização da umidade no seu interior.

Na realização das tomografias das amostras, utilizou-se um minitomógrafo pertencente à Embrapa Instrumentação Agropecuária - São Carlos (SP) (Crestana et al., 1992a), ao qual foram acopladas duas fontes de raios gama (^{137}Cs , 100 mCi e ^{241}Am , 300 mCi), obtendo-se as duas energias em um único feixe de 2 mm de espessura (Figura 2).

Os mecanismos de rotação e translação da mesa tomográfica e armazenamento dos dados obtidos foram feitos por hardware e software desenvolvidos para este fim (Cruvinel et al., 1990). O movimento de translação foi feito com passo de mesma ordem de grandeza do colimador, para não ocorrer omissão nem sobreposição de informações no translado da secção da amostra. O tempo de coleta de cada raio soma, ou seja, a soma dos coeficientes de atenuação ao longo do percurso da radiação desde a emissão até a detecção foi de 15 segundos, e o conjunto de projeções foi tomado a cada $6,43^\circ$ graus de rotação da mesa tomográfica, num intervalo total de 0 a 180° graus.

Para a detecção, foram utilizados um detector de cristal cintilador (NaI(Tl)) com dimensões de $3'' \times 3''$ tipo S-1212-1, na base do qual foi acoplada uma fotomultiplicadora modelo 276, ambos de marca ORTEC, e uma fonte de alta tensão modelo 3102D

de marca CANBERRA para a alimentação da fotomultiplicadora, operando numa tensão de 680V, conforme especificações do fabricante do detector.

A amplificação, a discriminação e a contagem de fótons foram feitas de maneira diferenciada para cada uma das energias, sendo os dados armazenados em computador para posterior reconstrução da imagem tomográfica.

Para cada energia, obteve-se uma imagem tomográfica, a qual fornece a distribuição (a cada 2 mm) de unidades arbitrárias, denominadas Unidade Tomográfica (UT), que, para cada energia, guardam uma relação de linearidade com o coeficiente de atenuação linear (μ_l), por meio da calibração do sistema tomográfico. Como resultado, a reconstrução da imagem tomográfica permite o conhecimento da distribuição dos coeficientes de atenuação lineares em um plano da amostra investigada.

O coeficiente de atenuação linear (μ_l), a densidade do solo (ρ_s) e a umidade da amostra de solo (θ) obedecem à seguinte relação:

$$\mu_l = \mu_{ms1} \rho_s + \mu_{mag1} \theta \quad (01)$$

em que

μ_{ms1} = coeficiente de atenuação em massa do solo para a energia E_1 ;

μ_{mag1} = coeficiente de atenuação em massa da água para a energia E_1 .

Encontrando a relação (01) para cada uma das energias utilizadas, obteve-se o sistema de equações (02), cuja resolução permite encontrar, de forma simultânea, os valores da densidade do solo seco (ρ_s) e da umidade volumétrica (θ_v) no plano investigado.

$$\begin{cases} UT_1 - 5,58 = 923,00 & (0,0772 \rho_s + 0,0808 \theta_v) \\ UT_2 - 17,99 = 785,04 & (0,3183 \rho_s + 0,2002 \theta_v) \end{cases} \quad (02)$$

em que

UT_1 = unidade tomográfica para a energia do ^{137}Cs (662 keV);

UT_2 = unidade tomográfica para a energia do ^{241}Am (59,6 keV).

Para cada amostra montada nos canos, foram realizadas três tomografias de seções distanciadas 1 cm entre si, obtendo-se três pares de matrizes de valores das unidades tomográficas. De cada par de matrizes, obtidas a partir das duas energias, foram escolhidos 49 valores de unidades tomográficas (submatrizes 7 x 7) da região central da matriz, obtendo-se um valor médio das unidades tomográficas e seu respectivo desvio-padrão. Dessa forma resultaram seis valores médios (três para a energia do ^{137}Cs e três para energia do ^{241}Am) de unidades tomográficas para cada amostra, sendo então escolhidos, para elaboração dos resultados, os valores cujas unidades calculadas pelo sistema de equações (02) mais se aproximassem dos níveis de umidade preestabelecidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A expansividade do solo pode ser observada analisando os dados do quadro 1. Observa-se que, à medida que o solo passou de uma condição seca para

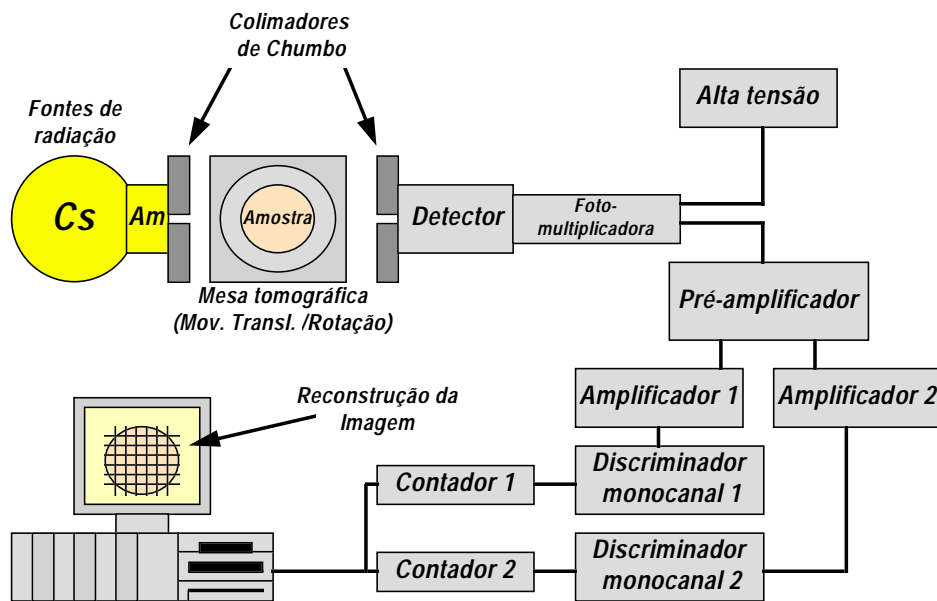


Figura 2. Representação esquemática do sistema tomográfico de dupla energia simultânea de radiação gama utilizado no experimento.

saturada, a densidade do solo (ρ_s) diminuiu de 1,36 para 1,08 kg dm⁻³, correspondendo a uma variação de aproximadamente 22%, enquanto o volume aumentou de 37,705 10⁻⁶ para 47,196 10⁻⁶ m³, o que representa uma variação de aproximadamente 23%. Também pode ser observado maior desvio-padrão associado às medidas para as condições de umidade do solo abaixo de 0,20 m³ m⁻³.

A correlação entre a umidade determinada por gravimetria (θ_g) e tomografia (θ_{tomo}) para o Vertissolo é apresentada na figura 3.

Os resultados evidenciam boa correlação entre os dois métodos de análise: o método gravimétrico fornece o valor global de umidade da amostra, pressupondo sua homogeneidade interna, enquanto o método tomográfico fornece valores médios de umidade num plano da amostra, revelando heterogeneidades ocorridas a cada 2 mm no seu interior, correspondentes à melhor resolução espacial das imagens tomográficas obtidas.

As variações do volume e densidade do solo conforme o teor de umidade não se mostraram lineares, como pode ser observado nas figuras 4 e 5. A figura 4 mostra a correlação entre a umidade volumétrica obtida das tomografias (θ_{tomo}) e a variação de volume (V_f/V_i) ocorrida nas amostras, ajustada por uma relação cúbica.

A variação da densidade do solo em função dos diferentes níveis de umidade a que as amostras do solo expansivo foram submetidas ficou mais bem caracterizada na figura 5.

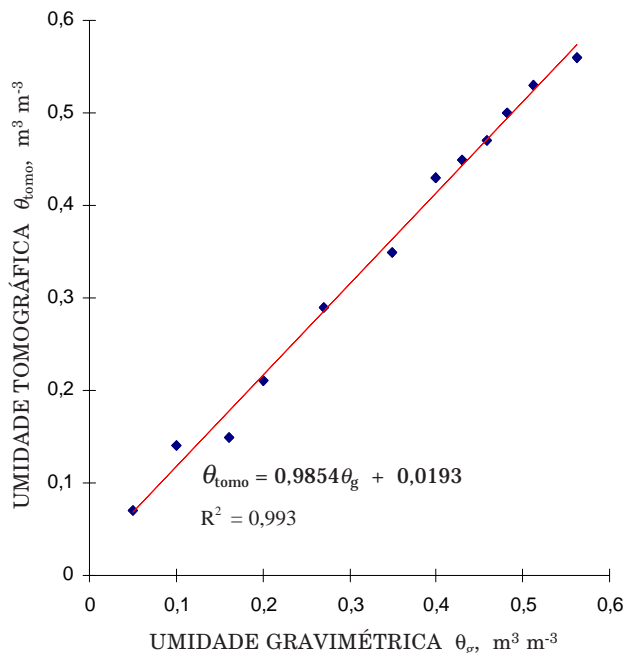


Figura 3. Correlação entre as umidades determinadas por gravimetria (θ_g) e tomografia (θ_{tomo}) para o Vertissolo.

Guerrini & Ferraz (1993), estudando a variação da densidade com a umidade de um solo expansivo do Nordeste brasileiro (Mandacaru), por meio do método da atenuação de duplo feixe de radiação

Quadro 1. Valores de umidade gravimétrica e volumétrica, densidade do solo, volume final e volume específico para o Vertissolo (médias de 49 valores da região central das tomografias)

$\theta_g^{(1)}$	$\theta_v^{(2)}$	$\theta_{\text{tomo}}^{(3)}$	$\rho_{\text{tomo}}^{(4)}$	$V_f^{(5)}$	$V_f/V_i^{(6)}$	$v^{(7)}$
kg kg ⁻¹	m ³ m ⁻³		kg dm ⁻³	dm ³	10 ⁻⁶ m ³	dm ³ kg ⁻¹
0,000	0,000	0,00 ± 0,06	1,36 ± 0,04	37,705	0,992	0,73 ± 0,05
0,037	0,050	0,07 ± 0,06	1,35 ± 0,04	37,962	0,999	0,74 ± 0,05
0,074	0,100	0,14 ± 0,04	1,31 ± 0,05	38,988	1,026	0,76 ± 0,04
0,120	0,162	0,15 ± 0,05	1,28 ± 0,04	40,014	1,053	0,78 ± 0,04
0,148	0,200	0,21 ± 0,06	1,26 ± 0,04	40,527	1,066	0,79 ± 0,05
0,200	0,270	0,29 ± 0,03	1,23 ± 0,03	41,553	1,093	0,81 ± 0,03
0,259	0,349	0,35 ± 0,03	1,15 ± 0,04	44,477	1,170	0,87 ± 0,03
0,296	0,399	0,43 ± 0,03	1,12 ± 0,02	45,657	1,201	0,89 ± 0,03
0,318	0,429	0,45 ± 0,02	1,11 ± 0,01	46,170	1,215	0,90 ± 0,02
0,340	0,459	0,47 ± 0,02	1,08 ± 0,01	47,196	1,242	0,92 ± 0,02
0,357	0,482	0,50 ± 0,02	1,09 ± 0,01	47,683	1,228	0,91 ± 0,01
0,380	0,513	0,53 ± 0,01	1,08 ± 0,02	47,196	1,242	0,92 ± 0,02
0,417	0,563	0,56 ± 0,01	1,08 ± 0,01	47,196	1,242	0,92 ± 0,01

⁽¹⁾ θ_g é a umidade gravimétrica na qual as amostras de solo foram montadas. ⁽²⁾ θ_v é a umidade volumétrica das amostras, calculada a partir do conhecimento da densidade inicial do solo (1,35 kg dm⁻³) e da umidade gravimétrica. ⁽³⁾ θ_{tomo} é a umidade volumétrica, obtida das tomografias. ⁽⁴⁾ ρ_{tomo} é o valor de densidade do solo (ρ_s), obtido das tomografias, sendo, portanto, a densidade da amostra de solo na condição de umidade θ_{tomo} . ⁽⁵⁾ V_f é o volume final, adquirido pelo solo após o umedecimento e foi calculado a partir do valor de ρ_{tomo} e do valor de massa de solo seco utilizado. ⁽⁶⁾ V_f/V_i é a variação do volume da amostra, sendo V_i o volume ocupado inicialmente pela amostra, o qual é sempre de 38 10⁻⁶ m³. ⁽⁷⁾ v é o volume específico do solo, calculado a partir da sua densidade.

gama por transmissão direta, observaram uma variação de 10% no valor da densidade do solo, enquanto a umidade do solo subia de 0,30 para 0,50 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Neste trabalho, para o intervalo de umidade de 0,27 a 0,56 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, a variação da densidade foi de aproximadamente 13%.

Analisando os valores de volume específico mostrados no quadro 1, foi possível construir o gráfico apresentado na figura 6, o qual possibilita a análise da deformação do solo pelo modelo das três retas.

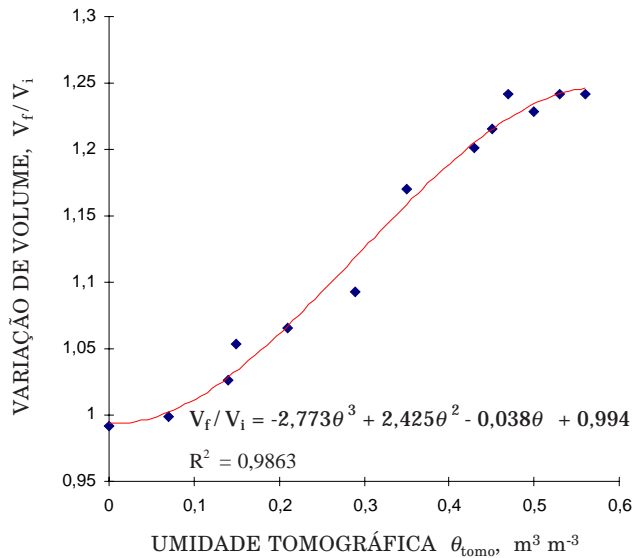


Figura 4. Variação do volume das amostras (V_f/V_i) do solo em função da umidade obtida das tomografias (θ_{tomo}).

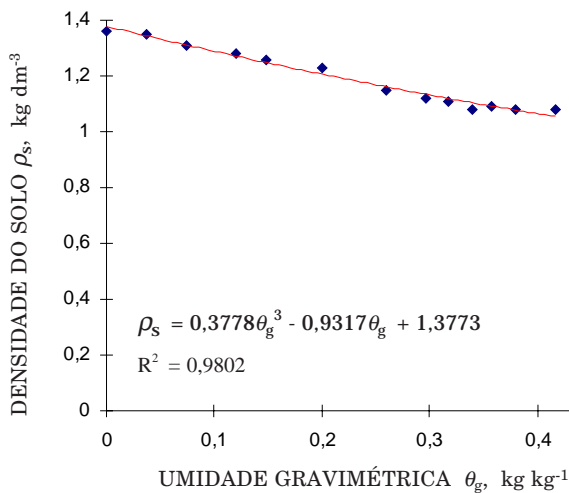


Figura 5. Variação da densidade do solo (ρ_s) em função dos diferentes níveis de umidade a que as amostras foram submetidas.

Com a interpolação dos dados pelo modelo, foi possível conhecer o valor de $\theta_A = 0,148 \text{ kg kg}^{-1}$ o qual representa, teoricamente, o ponto de entrada de ar na amostra analisada (McGarry & Malafant, 1987). Observa-se, entretanto, o não-paralelismo da fase normal com a reta 1:1, ocorrendo aumento do volume específico do espaço poroso (v_e) no ponto A quando comparado com o ponto B, caracterizando uma entrada de ar durante a fase normal. Esse fato pode ser verificado pelo ajuste das retas que compõem o modelo, em que, para a fase normal, o esperado seria $dv/d\theta_g = 1$, porém o determinado foi $dv/d\theta_g = 0,64$. Isto provavelmente ocorreu devido à desestruturação imposta às amostras, o que, de certa forma, facilitou as trocas ocorridas entre a fase líquida e gasosa.

Trabalho realizado por Reeve & Hall, citados por McGarry & Daniells (1987), mostrou que uma prolongada fase estrutural durante o decréscimo do conteúdo de água em amostras de solo expansivo está associada a uma estrutura com predominância de microagregados e possíveis fissuras que possam ocorrer nesses agregados.

Segundo Hillel (1980), entretanto, o conteúdo de água na saturação e a faixa de umidade na fase estrutural decrescem com o aumento da compactação, estando associado com um decréscimo do volume dos grandes poros interagregados.

Pela análise da figura 6, também foi possível determinar alguns pontos característicos da curva de deformação do solo em função da sua umidade, conforme proposto por Braudeau (1995), sendo SL definido como o limite de contração do solo, AE o

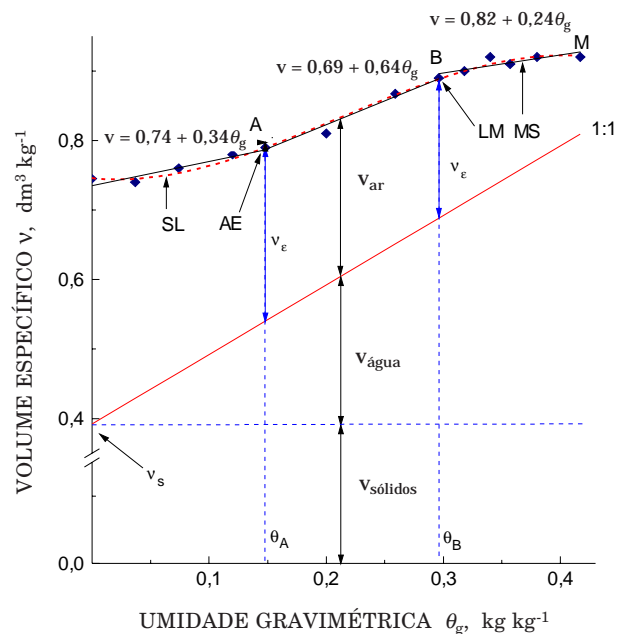


Figura 6. Análise da deformação do solo em função do seu volume específico (v).

volume no qual ocorre a entrada de ar nos microporos, LM volume no qual ocorre a secagem dos macroporos e MS o volume referente à máxima expansão dos microporos.

CONCLUSÕES

1. A avaliação da densidade e umidade do solo em amostras deformadas pelo método da tomografia computadorizada de dupla energia simultânea, utilizando as fontes radioativas do ^{241}Am e ^{137}Cs , mostrou-se plenamente satisfatória, estando os desvios associados às medidas, na mesma ordem que os obtidos pelo método gravimétrico.

2. Por meio da avaliação da densidade das amostras de solo em diferentes condições de umidade pelo método da tomografia computadorizada de dupla energia simultânea, foi possível verificar um aumento de aproximadamente 22% no volume das amostras desestruturadas e uma diminuição de aproximadamente 23% na densidade do solo, entre a condição seca e saturada.

3. O método tomográfico possibilitou a análise da expansividade das amostras deformadas pelo modelo das três retas, obtendo-se o valor de umidade de $0,148 \text{ kg kg}^{-1}$ referente ao ponto de entrada de ar na amostra, bem como alguns pontos característicos da curva de deformação do Vertissolo.

LITERATURA CITADA

- ANDERSON, J.V.; FADUL, K.E. & O'CONNOR, G.A. Factors affecting the coefficient of linear extensibility in Vertisols. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:296-299, 1973.
- AYLMORE, L.A.G. Use of Computer Assisted Tomography in studying water movement around plant roots. *Adv. Agron.*, 49:1-53, 1993.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Serviço Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul. Recife, 1973. 431p. (Boletim Técnico 30)
- BRAUDEAU, E. Water uptake by swelling aggregates. In: VADOSE ZONE HYDROLOGY: CUTTING ACROSS DISCIPLINES. Davis, 1995. International Conference Proceedings. Davis, University of California, 1995. p.9-10.
- CRESTANA, S. & NIELSEN, D. Investigações não-destrutivas de sistemas porosos multifásicos através de microtomografia de raios-X, gama e ressonância magnética nuclear (RMN). In: ENCONTRO NACIONAL DE ESCOAMENTO DE MEIOS POROSOS - ENEMP, 18., Nova Friburgo, RJ. Anais. Nova Friburgo, 1991. v.1, p.152-159.
- CRESTANA, S.; PESSOA, J.D.C.; TORRE, A. & CALHEIROS, R. Uso da Tomografia de Dupla Energia para medir simultaneamente densidade e umidade de um meio poroso expansivo. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESCOAMENTO DE MEIOS POROSOS - ENEMP, 19, Campinas, 1992. Anais. Campinas, UNICAMP, 1992a. v.1, p.152-162.
- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; VAZ, C.M.P.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. & REICHADT, K. Calibração e uso de um Tomógrafo Computadorizado em Ciência do Solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:161-167, 1992b.
- CRUVINEL, P.E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S. & MASCARENHAS, S. X-ray and gamma ray coputerized minitomograph scanner for soil science. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 39:745-750, 1990.
- FOX, W.E. A study of bulk density and water in a swelling soil. *Soil Sci.*, 98:307-316, 1964.
- GIRALDEZ, J.V.; SPOSITO, G. & DELGADO, C. A general soil volume change equation: I. The two-parameter model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:419-425, 1983.
- GUERRINI, I.A. & FERRAZ E.S.B. Uso de um duplo feixe de radiação gama no estudo da variação da densidade com a umidade de um solo expansivo. *Cientifica*, 21:295-300, 1993.
- HILLEL, D. *Fundamentals of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. 413p.
- HUDSON, N.W. Soil and water management on cracking black clay in India. In: McGARITY, J.W.; HOULT, E.H. & SO, H.B., eds. *The properties and utilization of cracking clay soils*. Reviews in Rural Science. Armidale, University New England, 1984. v.5, p.341-343.
- McGARRY, D. & DANIELLS, I.G. Shrinkage curve indices to quantify cultivation effects on soil structure of a Vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1575-1580, 1987.
- McGARRY, D. & MALAFANT, K.W.J. The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:290-297, 1987.
- PARKER, J.C.; AMOS, D.F. & KASTER, D.L. An evaluation of several methods of estimating soil volume change. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:1059-1064, 1977.
- PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; FRANZ, A.F.H. & SOUZA, R.O. Manejo da água e do solo em arroz irrigado. In: PESKE, S.; NEDEL, J. & BARROS, A., eds. *Produção de sementes de arroz*. Pelotas, UFPel, 1995. p.64-144.
- SCHAFFER W.M. & SINGER M.J. A reinvestigation of the effect of Saran coatings on the extensibility of swelling soil clods. *Soil Sci.*, 122:360-364, 1976.
- SPOSITO G. Volume changes in swelling clays. *Soil Sci.*, 110:315-320, 1973.
- TUNNY, J. The influence of Saran resin coatings on swelling of natural soil clods. *Soil Sci.*, 109:254-256, 1970.