

**TOMÓGRAFO DE RESOLUÇÃO MICROMÉTRICA
PARA ESTUDOS DE SOLOS**

Álvaro Macedo da Silva
Paulo Estevão Cruvinel
André Torre Neto
Ricardo Y. Inamasu
João da Mendonça Naime
Carlos Manoel Pedro Vaz
Silvio Crestana



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária

Ministério da Agricultura e do Abastecimento

Rua XV de Novembro, 1452 - Caixa Postal 741 - CEP 13560-970 - São Carlos - SP

Telefone: (016) 274 2477 - Fax: (016) 272 5958

TOMÓGRAFO DE RESOLUÇÃO MICROMÉTRICA PARA ESTUDO DE SOLOS¹

Álvaro Macedo da Silva²
Paulo Estevão Cruvinel²
André Torre Neto²
Ricardo Y. Inamasu²
João de Mendonça Naime²
Carlos Manoel Pedro Vaz²
Silvio Crestana²

RESUMO

A Ciência do Solo tem procurado compreender e modelar os fenômenos que ocorrem no solo, principalmente na zona não saturada, dada a sua importância no estudo e previsão do transporte e do destino de solutos nesse meio. Várias técnicas foram desenvolvidas, em nível global, visando encontrar respostas que subsidiem tal investigação. Como o entendimento de muitos desses fenômenos depende de uma investigação em nível de poros e agregados, desenvolveu-se, na Embrapa Instrumentação Agropecuária, um tomógrafo de raios X, visando a obtenção de imagens, de forma não destrutiva, do interior de amostras de solo, com resolução espacial de pelo menos 100 μ m. Este boletim de pesquisa mostra os conceitos básicos para a construção do tomógrafo de resolução micrométrica e os resultados obtidos com a aplicação do equipamento. São apresentadas imagens de amostras de solos peneirados com agregados de 212 μ m a 250 μ m.

¹Extraído, em parte, da tese de doutorado **Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em Ciências do Solo e do Ambiente** (Macedo, 1997), projeto financiado pela Embrapa Instrumentação Agropecuária (Projeto 12.0.94.093) e pela FAPESP (Processo 90/3773-7), defesa em 16/07/97, perante a USP - Escola de Engenharia de São Carlos - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada.

²Pesquisadores da Embrapa Instrumentação Agropecuária, Cx. Postal 741, CEP 13560-970, São Carlos - SP.

μm , sendo possível notar a presença de poros medindo 100 μm ou menos. Poros dessa dimensão foram visualizados, também, em tomografias de amostras compostas de grãos de areia de 1mm e raízes e em coluna de areia com duas camadas, possuindo, a superior, granulometria de 106 a 149 μm e, a inferior, 297 a 500 μm . Como um exemplo do potencial do método e do equipamento, foi possível detectar a presença de selamento superficial em amostras não deformadas de solo. Na tomografia desta amostra, nota-se, claramente, a formação de três camadas distintas com espessuras de 1000, 500 e 1700 μm , respectivamente. O potencial de aplicação do equipamento no estudo de danos mecânicos em sementes é ilustrado, com a apresentação de uma microtomografia mostrando uma fratura em grão de milho.

INTRODUÇÃO

Problema e sua importância

A Ciência do Solo, devido à importância do objeto de suas pesquisas, tem reunido pesquisadores das mais diversas especialidades, os quais têm unido esforços em caracterizar as propriedades deste meio, dando-lhe a devida atenção para que deixe de ser considerado, simplesmente, como um depósito infinito de despejos industriais e municipais ou mero sustentáculo de plantas para fins agrícolas. Suas pesquisas, em associação a outras áreas, têm buscado resultados que conduzam a uma qualidade de vida melhor, bem como a atividades, principalmente na agropecuária, orientadas para um desenvolvimento cuja base de recursos naturais possa ser mantida a longo prazo, de forma a beneficiar não somente a geração atual, mas também, as futuras gerações.

Têm sido uma preocupação constante dos pesquisadores dessa área, a conservação do solo e dos recursos hídricos, a minimização da poluição do ar, das águas e do solo, o desenvolvimento de sistemas de irrigação e drenagem mais

eficientes e com custos mais efetivos e a otimização da eficiência do uso da água e de nutrientes na produção agrícola. Apesar dessa preocupação e dos esforços realizados, nossos recursos naturais continuam a sofrer um desgaste causado pela pressão populacional, pelas perdas de cobertura vegetal, pela degradação do solo e pelas mudanças climáticas e pela poluição.

O cenário acima mostra que se faz necessária uma ação objetiva, com urgência, uma vez que os processos de degradação do meio ambiente são, em alguns casos, irreversíveis e, em outros, de recuperação lenta ou economicamente inviável. Para que novos métodos de produção agrícola possam ser encontrados, cria-se, do ponto de vista da pesquisa, a demanda por métodos modernos de investigação para que se possam classificar e quantificar os efeitos dos agentes de agressão ao solo e, principalmente, manejá-los adequadamente para evitá-los. Há, nesse sentido, uma busca cada vez mais crescente, de novas ferramentas e novas metodologias capazes de classificar, quantificar e prever o impacto que uma determinada prática agrícola possa ocasionar aos recursos dos solos e das águas. Assim, o estudo do transporte da água e dos solutos no solo, particularmente na região não saturada, traz problemas científico-tecnológicos e metodológicos, que as comunidades científicas nacional e internacional reconhecem como grandes desafios a serem vencidos (Crestana, 1994).

Dada a premente necessidade de se encontrarem respostas às diversas questões relacionadas aos vários mecanismos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo e considerando que as técnicas convencionais como sonda de nêutrons, gravimetria, transmissão direta de raios, traçadores, microscopia e intrusão de mercúrio têm se apresentado limitadas face à complexidade de tais mecanismos, novas técnicas têm sido procuradas. Estas técnicas devem possibilitar a previsão precisa para o manejo do fluxo dos contaminantes através da zona não saturada do solo. Essa necessidade é urgente, na medida em que o nosso solo e os nossos recursos hídricos estão sendo, crescentemente, submetidos às agressões da poluição de

fontes dispersas ou à própria escassez dos recursos naturais disponíveis no interior dos mesmos (Crestana, 1994).

Uma técnica que tem obtido uma boa repercussão, devido à não invasibilidade das amostras, aliada às resoluções alcançadas, é a Tomografia Computadorizada (TC) de raios-X, raios γ e RMN, que fornece imagens de secções transversais de objetos opacos. A TC por RMN, entretanto, possui fortes restrições para seu uso em meios porosos contendo materiais paramagnéticos, conforme comprovado por Crestana & Nielsen (1990), além de ser difícil ou, praticamente, impossível quantificar os resultados através da correlação do sinal de RMN e o conteúdo de água, por exemplo.

A TC de raios X, de radiação γ e de RMN tem se mostrado muito valiosa como técnica recente de imagem para estudos não invasivos bi e tridimensionais de processos multifásicos presentes em meios porosos. Até o momento, no entanto, a maioria dos resultados têm sido obtidos numa escala da ordem de milímetros, podendo ser citados, entre outros, os trabalhos de Petrovic et al (1982), Hainsworth & Aylmore (1983), Crestana et al (1985, 1986, 1988) e Cruvinel et al (1990). Muitas respostas, entretanto, são esperadas 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 (Crestana et al, 1996), que pode ser vista na Figura 1. No entanto, este equipamento está restrito a aplicações militares e industriais e seu custo é da ordem de um milhão de dólares, sendo dedicado à análise de objetos com densidade elevada e de grandes dimensões se comparados a amostras de solo. Outros resultados são apresentados por Cesareo et al (1993), Appoloni & Cesareo (1994), Assis (1992) e Cesareo et al (1994). Estes resultados, entretanto, estiveram restritos a amostras com três milímetros ou menos, impedindo sua aplicação com amostras de solo indeformadas. No trabalho aqui desenvolvido, o objetivo foi a construção de um equipamento que possibilitasse obter imagens tomográficas de amostras indeformadas de até 10 mm, com resolução de pelo menos 100 μm .

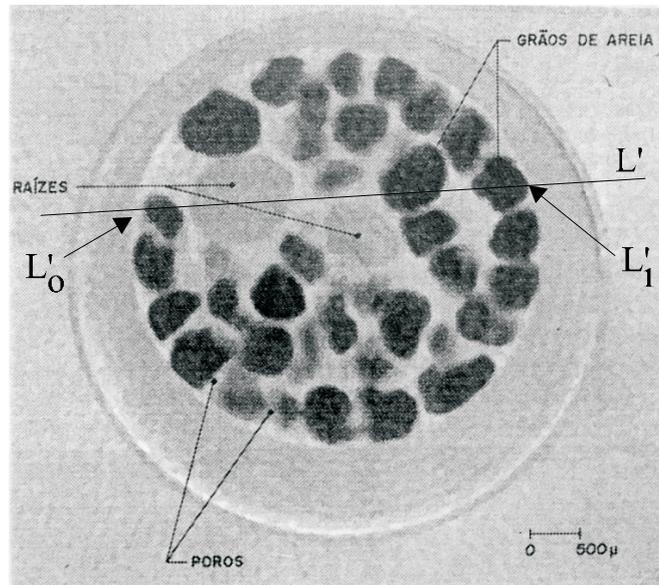


Figura 1 - Imagem tomográfica, mostrando grão de solo, raízes e poros, com resolução espacial de 20 μ m. (Fonte: Crestana et al, 1996).

Aspectos teóricos básicos

O histórico da tomografia computadorizada pode ser encontrado em Crestana et al (1996) e o detalhamento do algoritmo de reconstrução da imagem tomográfica pode ser visto, entre outras referências, em Rosenfeld & Kak (1982). Será apresentado, aqui, um breve resumo sobre o processo.

A TC por radiação γ ou X utiliza o princípio da atenuação da radiação pela matéria. Quando um feixe de radiação incide sobre uma amostra, conforme ilustrado na Figura 2, pode ter sua intensidade, ou número de fótons, atenuada segundo a seguinte relação, conhecida como lei de Beer:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (1)$$

onde I_0 é a intensidade ou número de fótons incidentes, I é o número de fótons que atravessam a amostra, x é a espessura da amostra e μ é a probabilidade, por unidade de comprimento, de um fóton atravessar a amostra, também conhecido como coeficiente de atenuação linear.

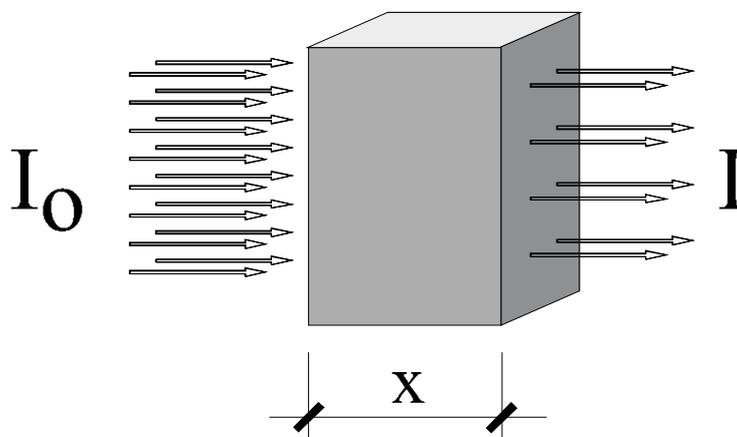


Figura 2 - Atenuação de um feixe de fótons por uma amostra homogênea.

O que se consegue medir em uma aquisição de dados de um processo tomográfico é o número de fótons incidentes e o número de fótons que atravessam a amostra. Na Figura 3, vê-se um esquemático de um tomógrafo onde podem notar-se a fonte de radiação e o detector. Neste esquema, em que se tem um feixe fino de fótons e um único detector, a arquitetura é conhecida como tomógrafo de primeira geração. Em outras arquiteturas, de segunda, terceira e quarta gerações, tem-se um feixe em leque e um maior número de detectores, otimizando-se o tempo de aquisição.

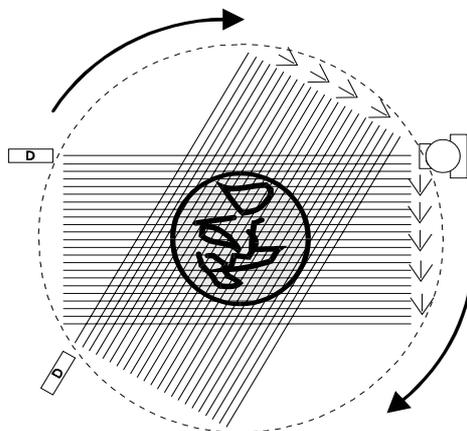


Figura 3 - Esquema de um tomógrafo de primeira geração.

No tomógrafo de primeira geração, para cada direção, são feitas várias translações em intervalos iguais, conhecidos como passos lineares. Em cada parada dessas translações, são contabilizados os fótons que atravessam a amostra durante um tempo de contagem pré-determinado. Ao final de cada varredura completa, o equipamento volta à sua posição inicial de translação e gira de um ângulo conhecido como passo angular. Inicia-se nova varredura com suas respectivas contagens de fótons. Esse processo se repete até que se complete um giro total de 180° . O valor do feixe quando a contagem está sendo feita fora da amostra, é considerado o feixe incidente e conhecido como feixe livre.

Obviamente, para o caso de solos, o que se tem não é uma amostra homogênea, mas sim uma amostra com heterogeneidades. Na Figura 4, ilustra-se um caso real, onde cada elemento de volume é considerado homogêneo. Para cada um desses elementos, pode-se aplicar a lei de Beer e pode-se provar que o resultado será uma soma da contribuição de cada uma das atenuações. Escreve-se, então, uma nova relação, conforme expresso na equação 2, onde L é o caminho que o feixe percorre no interior da amostra, s é uma medida sobre esse caminho e $f(s)$ é uma função que representa a distribuição dos coeficientes de atenuação ao longo do caminho.

$$I = I_0 \cdot \exp\left[-\int_L f(s) ds\right] \quad (2)$$

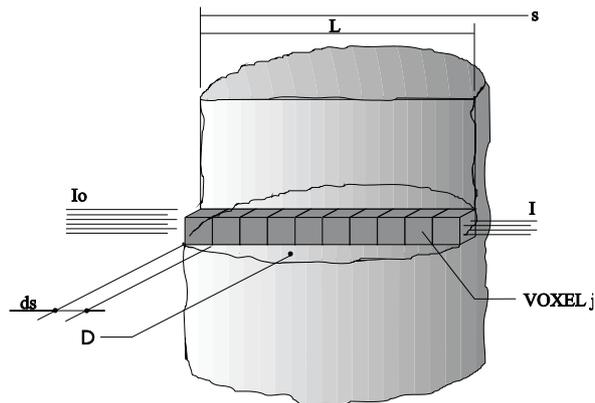


Figura 4 - Atenuação de um feixe de raios X por um bloco não homogêneo. O domínio D é uma fatia transversal ao bloco, acompanhando o feixe incidente.

Extrapolando-se para todas as direções, pode-se escrever a distribuição dos coeficientes de atenuação sobre toda a secção transversal como uma função $f(x,y)$, onde x e y são as coordenadas dos pontos desta secção. Uma vez conhecidos os valores para cada posição em cada direção, obtém-se, através de uma matemática de reconstrução, que pode ser vista nas referências citadas, a imagem da secção de interesse, sem que seja necessário fazer um corte real da amostra.

Aplicações da tomografia computadorizada em Ciência do Solo

Os trabalhos pioneiros, trazendo a TC do hospital para a área de solo foram desenvolvidos por Petrovic et al (1982) , Hainsworth & Aylmore (1983) e Crestana et al (1985).

Petrovic et al (1982) demonstraram que a TC pode ser utilizada para medir a densidade global de um solo.

Hainsworth & Aylmore (1983) utilizaram a TC para determinar a distribuição espacial do conteúdo de água de um solo.

Crestana et al (1985) demonstraram que é possível utilizar essa técnica para medir a umidade do solo e o movimento da água neste meio, em três dimensões além de calibrarem o tomógrafo em termos de números Hounsfield versus umidade e densidade.

Por possibilitar a medida de heterogeneidades em nível de pixel (*picture element* = elemento de imagem) e por permitir investigações não invasivas, a aplicação da TC, em ciência do solo, mostrou ser de grande vantagem sobre outras técnicas como a gravimetria e a transmissão de raios gama.

Alguns exemplos de processos que ocorrem no solo e que podem ser analisados com auxílio da TC (Crestana et al, 1996b) são:

Compactação;

Penetração de raízes;

Encrostamento;

Ciclos de umedecimento e secagem;

Deslocamentos miscível e imiscível de nutrientes na presença de raízes e

Fluxo preferencial de poluentes em solos fraturados.

Uma rápida observação na lista acima permite-nos identificar todos os processos como muito importantes em estudos de sustentabilidade de um agroecossistema.

Os tomógrafos médicos foram os primeiros utilizados nos trabalhos pioneiros com solos. Porém, a continuidade dos trabalhos com estes equipamentos via-se comprometida por várias limitações, como alto custo do equipamento, complexidade, taxa de ocupação elevada e tipo de dedicação do equipamento.

Crestana et al (1986) demonstraram ser possível utilizar um equipamento sem as limitações acima, trabalhando com um "mini-scanner" construído por Cesareo & Giannini (1980).

Visando construir um equipamento dedicado à ciência do solo, com menor custo, menor complexidade e maior disponibilidade, foi desenvolvido, na Embrapa Instrumentação Agropecuária, um minitomógrafo de primeira geração (Cruvinel, 1987; Cruvinel et al, 1990).

Um dos trabalhos, utilizando o minitomógrafo, foi desenvolvido por Vaz et al (1989), no estudo da compactação de solos causada pela ação de máquinas agrícolas. A técnica possibilita detectar pequenas variações na densidade, mesmo em camadas da ordem de milímetros.

Visando possibilitar obter tomografias de amostras *in situ*, Naime (1994) desenvolveu um tomógrafo de campo que permite a investigação de solo, raízes e árvores. Um dos trabalhos que esse equipamento viabilizou foi o estudo da densidade em solos colapsíveis em Campo Novo do Parecis / MT. O colapso ocorre quando o solo, já submetido a uma certa carga, é umedecido. Isso tem causado o recalque no piso de silos e o conseqüente prejuízo na produção de grãos na região (Naime et al, 1996).

Em outro trabalho, na Embrapa Instrumentação Agropecuária, Cássaro (1994) desenvolveu e utilizou tomografia de dupla energia simultânea, para a determinação, também simultânea, da densidade global e da umidade do solo. Neste trabalho foram utilizados uma fonte de raios X e filtros de estanho, de modo a se obterem dois picos distintos de energia.

Também trabalhando com dupla energia no minitomógrafo já citado, Biassusi (1996) utilizou a TC para determinar a umidade e densidade de vertissolos, visando avaliar, em laboratório, sua expansão e contração. Os vertissolos caracterizam-se por um predomínio de argilominerais em seus horizontes, tornando-os inadequados à agricultura, pois quando secos são extremamente duros e quando úmidos apresentam-se muito plásticos, o que dificulta a drenagem.

Pedrotti (1996) utilizou, também na Embrapa Instrumentação Agropecuária, a Tomografia Computadorizada para avaliação da compactação de um planossolo cultivado sob diferentes sistemas de manejo. Os planossolos caracterizam-se

por alta densidade, alta relação micro/macroporosidade com uma drenagem natural deficiente, normalmente causada pelo relevo, predominantemente plano. No trabalho de Pedrotti (1996), foi possível comparar a TC ao método do anel volumétrico, para a determinação da densidade do solo, tendo a TC apresentado vantagens, por permitir um detalhamento da variação da densidade ao longo do perfil, enquanto que com o anel volumétrico o que se obtém é um valor médio.

MATERIAL

Montagem do equipamento

Na Figura 5, pode-se ver o diagrama de blocos representando as principais partes do tomógrafo de resolução micrométrica, desenvolvido na Embrapa Instrumentação Agropecuária. Estas partes e outras complementares serão apresentadas a seguir.

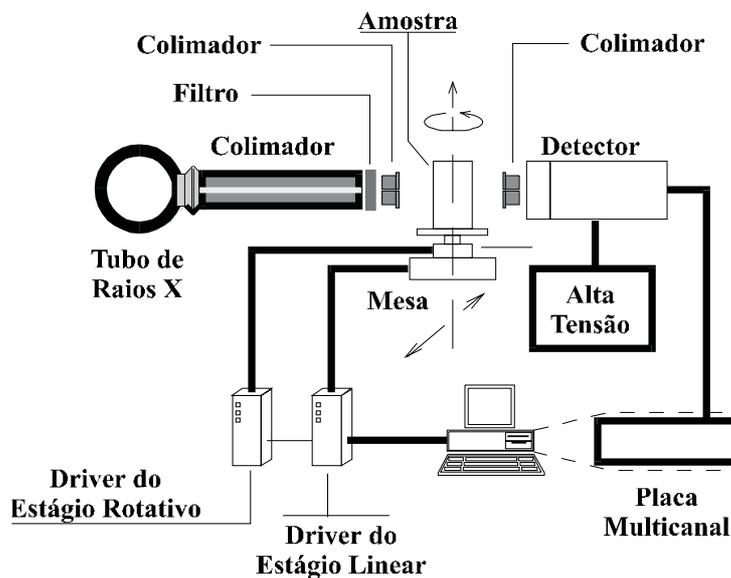


Figura 5 - Diagrama de blocos do tomógrafo de resolução micrométrica.

Fonte de raios X

O sistema de raios X corresponde ao modelo MG164, da Philips GmbH, composto de: gerador modelo MGG31, tensão máxima de saída 160 kV, corrente máxima de saída 45 mA; painel de controle eletrônico MGP 33; painel de comando MGC 30 e tubo MCN 165, tensão máxima 160 kV, potência máxima 3 kW.

Os três primeiros itens podem ser vistos na Figura 6.

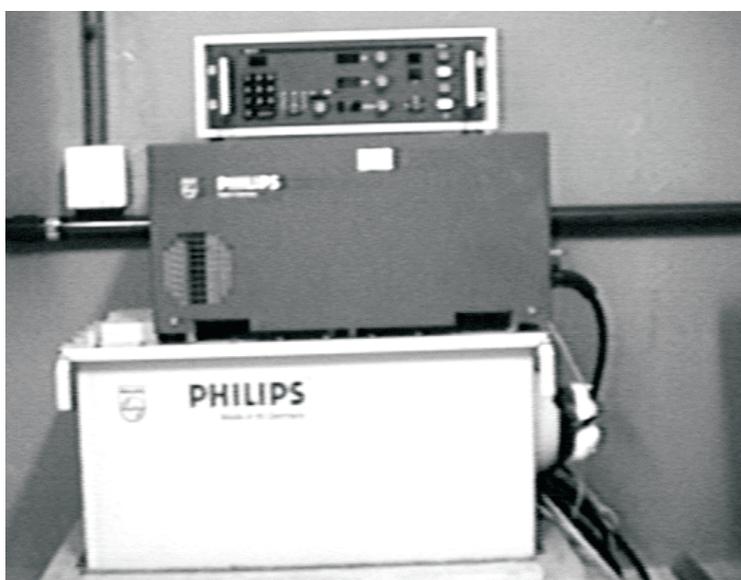
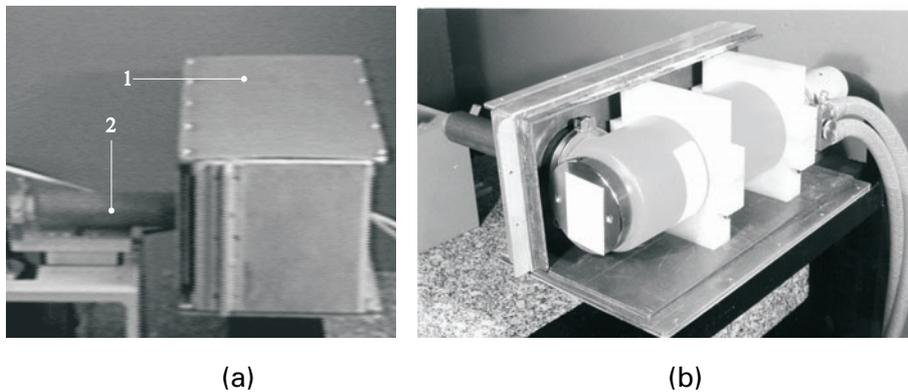


Figura 6 - Parte do sistema de raios X, onde se vêem, de cima para baixo o painel de comando, o painel de controle e o gerador.

O tubo de raios X, visando a proteção do usuário, foi acondicionado no interior de uma caixa de blindagem, com paredes de chumbo de 6 mm e revestida com alumínio, como pode ser visto na Figura 7. Como o ângulo do feixe de raio X, na saída do tubo, é de 40° e como a dimensão da caixa de blindagem não permite a devida aproximação entre o tubo e o colimador, foi instalado um pré-colimador de chumbo na saída da caixa, com 40 mm de diâmetro externo e 8 mm de diâmetro interno.



(a) (b)
Figura 7 - Montagem do tubo de raios X, onde podem ser vistos: (a) a caixa de blindagem, com paredes de 6mm de Pb (1) e pré-colimador de Pb com diâmetro externo de 40 mm e interno de 8 mm (2); (b) o tubo de raios X, no interior da caixa de blindagem.

Cadeia nuclear

A cadeia nuclear é composta de: detector de NaI(Tl), com fotomultiplicadora modelo 4SHA6M/1.5A, HARSHAW/FILTROL; fonte de alta tensão modelo 556, EG&G ORTEC, tensão de saída de 50 a 3000V; fonte de baixa tensão, modelo 4002D, EG&G ORTEC, 160 W; placa multicanal modelo 5000, VIKING INSTRUMENTS (ver foto da placa, na Figura 8).



Figura 8 - Placa multicanal modelo 5000, da Viking Instruments.

Mesa posicionadora

A mesa posicionadora, que pode ser vista nas Figuras 9 e 10, é composta das seguintes partes: estágio linear modelo U4008MP, TIME & PRECISION, resolução de 1,25 m, precisão linear 0,01/25 mm/mm, repetibilidade 5m e deslocamento máximo de 100mm; estágio rotativo modelo A3757TSP, TIME & PRECISION, resolução de 0,01°, precisão $\pm 0,05$ e repetibilidade 0,01; um controlador para cada estágio, modelo SX, TIME & PRECISION.

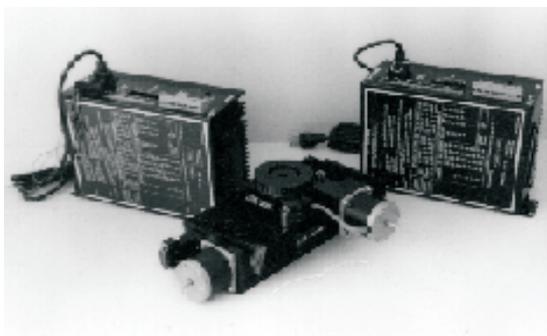


Figura 9 - Mesa posicionadora, onde podem ser vistos, nas laterais, os controladores e, no centro, os posicionadores, estando o estágio rotativo montado sobre o estágio linear.

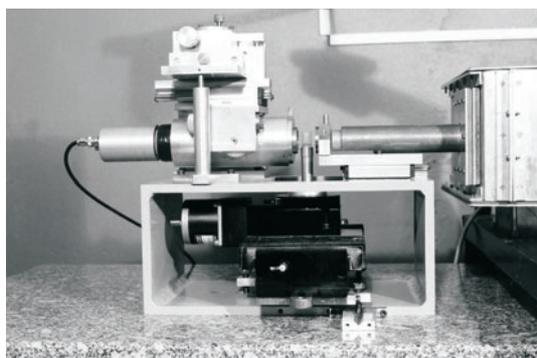


Figura 10 - Montagem dos posicionadores rotativo e linear e do sistema de alinhamento do feixe.

Dispositivos de alinhamento

Dois alinhamentos são críticos para o sistema microtomográfico: o alinhamento entre os colimadores da fonte e do detector e o ajuste do paralelismo entre o feixe de radiação e a mesa posicionadora.

O alinhamento entre os colimadores, em qualquer escala de tomografia, é um fator muito importante para que se excluam raios espalhados, que afetam o contraste da imagem, e para que não se excluam os raios do feixe fino central. Obviamente, o conceito de fino é relativo à escala na qual se está trabalhando, o que define, também, o grau de precisão necessário ao alinhamento. Na microtomografia trabalha-se com feixes da ordem de 100 μ m ou menores, o que torna este alinhamento muito crítico. Para se fazer esse alinhamento foi construído um dispositivo como pode ser visto na Figura 10, acima do detector.

O feixe de raios X e a mesa posicionadora devem estar paralelos para se evitar o efeito apresentado na Figura 11, onde se vê, ao invés de uma fatia, um sólido de revolução. Construiu-se um dispositivo que permite medir a distância entre o feixe de radiação e a mesa posicionadora.

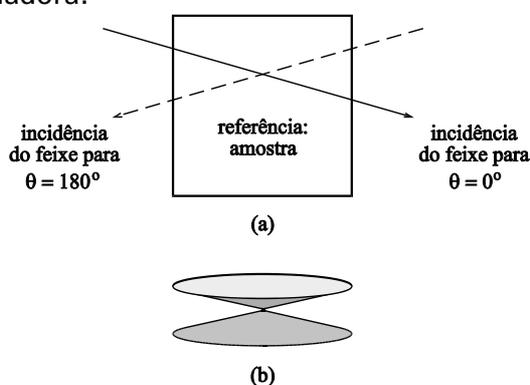


Figura 11 - Efeito produzido quando o feixe não está paralelo ao plano de translação. Em (a) mostra-se que o feixe não corta a amostra em um plano e em (b) vê-se que ao invés de uma fatia tem-se um sólido de revolução e, portanto, cada ponto é cruzado por apenas um raio soma.

Programas de Controle e Reconstrução

O tomógrafo computadorizado possui dois grupos de programas com atividades distintas: (1) Programa de controle do equipamento; (2) Programas de reconstrução e de apresentação de imagem.

Programa de controle do equipamento

O programa de controle é responsável por: movimentação da mesa (rotação e translação); centralização da mesa; inicialização e leitura da placa multicanal e armazenamento dos dados em disco.

A interface homem-máquina é feita via teclado e monitor de vídeo. Os parâmetros da tomografia, tais como tempo de contagem, passo linear, passo angular, faixa de energia, tamanho da amostra e nomes dos arquivos de parâmetros e de saída dos dados, podem ser inseridos pelo usuário, bem como ações como cancelar, iniciar e reiniciar uma tomografia. Essa última ação, graças à precisão e repetibilidade no posicionamento do equipamento, tem-se mostrado fundamental para que não se percam aquisições devido a interrupções causadas por queda de energia.

Programa de reconstrução e visualização de imagens

O programa de reconstrução e visualização é responsável pelos dois passos finais do processo: (1) processamento dos dados ou retroprojeção; (2) apresentação da imagem.

A interface homem-máquina, para o ambiente Windows, foi desenvolvida utilizando a linguagem Visual Basic, da Microsoft, versão 4.0.

Além da reconstrução, o programa permite medir distâncias entre pontos da imagem e efetuar cálculos estatísticos como média, desvio padrão e coeficiente de variação das unidades tomográficas em áreas selecionadas na imagem. Outros recursos estão em fase de implementação no programa, como construção de histograma de áreas selecionadas, construção de gráfico mostrando a variação dos coeficientes de atenuação ao

longo de caminhos determinados pelo usuário e conversão dos coeficientes de atenuação em massa específica. A tela principal do programa de reconstrução pode ser vista na Figura 12.

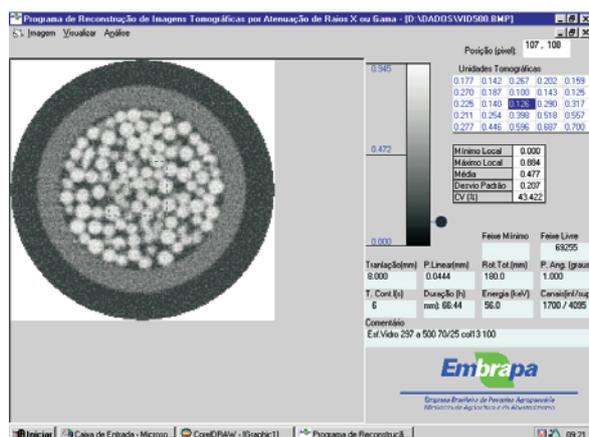


Figura 12 - Tela principal do programa de reconstrução e visualização de imagens.

MÉTODO

Ajustes e calibração

O primeiro passo, para ajuste do sistema, é o alinhamento entre os colimadores da fonte e do detector. Faz-se isto com a utilização do programa da placa multicanal e ajustando-se o sistema de alinhamento enquanto o número de fótons é acompanhado na tela do monitor de vídeo. O ajuste está pronto quando se obtém a maior contagem.

Estando os colimadores alinhados, ajusta-se o paralelismo entre o feixe e a mesa, medindo-se as suas distâncias em duas posições, sendo uma próxima ao colimador da fonte e a outra próxima ao colimador do detector.

O próximo passo, também fundamental, é a centralização da mesa em relação ao feixe. Esse novo procedimento consiste na translação de um corpo de prova, no caso uma broca de aço

rápido, à frente do feixe de raios X. São feitas duas varreduras, sendo a primeira na direção 0 graus e a segunda, na direção 180 graus. Faz-se, então a média de quatro pontos: quando a broca entra no feixe, em 0° (Figura 13a); quando a broca sai do feixe, em 0° (Figura 13b); quando a broca entra no feixe em 180° (Figura 13c) e quando a broca sai do feixe em 180° (Figura 13d). A referência, para centralização é dada, então, por $Ref = (Ref1 + Ref2 + Ref3 + Ref4) / 4$.

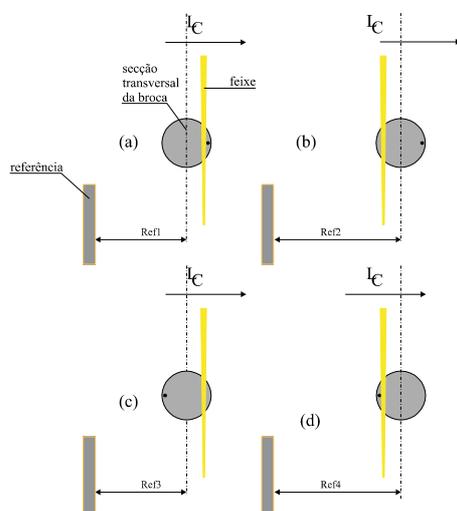


Figura 13 - Movimentação da broca para centralização da mesa. A marca na broca é fictícia, tendo apenas papel ilustrativo do giro de 180°. Em (a) vê-se a broca no ponto em que entra no feixe, na direção 0°; em (b), vê-se a broca no ponto de saída do feixe, na mesma direção; em (c) e (d) a situação é análoga, porém, na direção 180°.

O ponto de partida da tomografia, estando o sistema alinhado e centralizado e escolhida a energia na qual será feita a tomografia, ou seja, pronto para a utilização do programa de controle, é a calibração da escala de energia da placa multicanal. Faz-se isto, utilizando-se dois picos conhecidos de energia. Utilizou-se uma fonte de Am^{241} que, ao interagir com o cristal de

Nal(Tl) do detector, apresenta dois picos: o pico característico do amerício, de 59,5 keV, e o pico de escape do iodo, de 31 keV. O pico de escape pode ocorrer no processo de absorção de um fóton por efeito fotoelétrico, onde o elétron, deixa uma lacuna na camada da qual foi ejetado. Quando um outro elétron ocupa essa camada, ocorre uma emissão de raio X, com energia característica da camada em questão (Wang et al, 1975). No caso do iodo, essa energia é de 28.5 keV. Se essa emissão escapar do cristal de Nal(Tl), será detectada a diferença entre o fóton incidente e o fóton de escape, ou seja, 31 keV. O sistema eletrônico deve estar aquecido há, pelo menos, uma hora. Uma segunda forma de fazer-se tal calibração é utilizar o próprio tubo de raios X com dois filtros de materiais diferentes. Utilizaram-se, aqui, um filtro composto de resina epoxy com Sn e um filtro de Pb. Para conhecer os picos dos dois filtros, calibra-se, inicialmente a escala conforme já descrito. A seguir medem-se os picos, anotando-se as todas as condições como tensão, corrente, colimadores utilizados e tempo de aquecimento do sistema de raios X. Para uma calibração em outro momento, repetem-se as condições do sistema, porém, não sendo mais necessário o uso da fonte de Am²⁴¹. Os valores encontrados, respectivamente, foram de 28,3 keV e 79,5 keV. As condições foram as seguintes: ambos os colimadores eram de Pb, tendo o da fonte o diâmetro de 335 m e o do detector diâmetro de 1700 m; a corrente foi de 10 mA; as tensões foram de 50 kV e 100 kV, respectivamente; o tempo de aquecimento da eletrônica e do sistema de raios X, foi de uma hora.

Para que as unidades tomográficas apresentadas na tela do monitor tenham o significado de coeficiente de atenuação linear, faz-se necessária a calibração do tomógrafo. Como o coeficiente de atenuação depende também da energia, deve-se fazer uma calibração para cada energia de interesse. O procedimento dessa calibração foi o seguinte: Para cada material foi feita uma tomografia de uma amostra homogênea e calculado o valor médio das unidades tomográficas de uma região central com uma distância de pelo menos quatro passos lineares das bordas. Para a

mesma amostra, calculou-se o coeficiente de atenuação linear, utilizando-se o método da transmissão direta, onde medem-se o número de fótons do feixe livre e o número de fótons que atravessam uma espessura conhecida da amostra. Aplica-se, então, a equação de Beer. Os valores de unidades tomográficas e coeficientes de atenuação (μ) são colocados em um gráfico, obtendo-se a calibração. A Tabela 1 mostra os valores obtidos para os diversos materiais, na energia de 58,5 keV. Foram utilizados acrílico, água, álcool etílico, latossolo roxo distrófico (LRd), nylon, podzólico vermelho (PV), PVC, teflon e microesferas de vidro com diâmetros de 106 μ m a 149 μ m.

Tabela 1 - Valores de unidades tomográficas e coeficientes de atenuação para calibração do tomógrafo micrométrico, na energia de 58,5 keV.

Material	$\mu(\text{cm}^{-1})$	Desvio Padrão de $\mu (\text{cm}^{-1})$	Unid. Tom.	Desvio Padrão das Unid. Tom.
álcool	0,167	0,021	0,160	0,040
água	0,208	0,021	0,206	0,039
acrílico	0,233	0,017	0,186	0,046
nylon	0,228	0,018	0,204	0,045
teflon	0,400	0,018	0,394	0,044
PV	0,344	0,012	0,359	0,046
vidro	0,417	0,012	0,380	0,049
LRd	0,397	0,013	0,322	0,045
PVC	0,732	0,016	0,618	0,047

A curva de calibração pode ser vista na Figura 14. Foram inseridos, nesta curva, apenas os desvios padrões das unidades tomográficas, pois o valor dos desvios padrões para os coeficientes de atenuação medidos pelo método da transmissão

direta determinou tamanhos de barras menores que a espessura do traço de cada ponto.

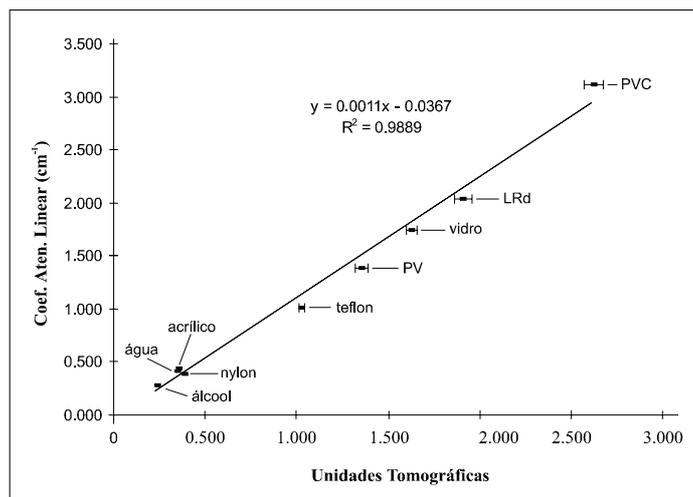


Figura 14 - Curva de calibração do tomógrafo para a energia de 58,5 keV.

Preparação das amostras

Para cada fase do desenvolvimento, foram utilizadas amostras condizentes com os parâmetros do projeto que se pretendiam avaliar. Primeiramente, construiu-se um *phantom* de acrílico com 30 mm de diâmetro externo, possuindo dois pares de orifícios com diâmetros de 9 mm e 11 mm, visando apenas um teste inicial do sistema sem a preocupação de resolução.

À medida que melhorias na parte mecânica e nas formas de centralização foram sendo incorporadas, novos *phantoms* foram construídos com orifícios de 100 m a 1000 m.

Uma primeira aproximação do caso real, em termos geométricos, foi simulada utilizando-se microesferas de vidro com diâmetros de 212 m a 500 m. O objetivo era simular grãos e poros, embora com um material relativamente homogêneo.

Amostras de solo foram utilizadas, primeiramente, peneiradas e colocadas em recipientes cilíndricos. Inicialmente,

trabalhou-se com um recipiente de 5mm de diâmetro interno e a *posteriori* com um recipiente de 10 mm de diâmetro interno.

Outras amostras perturbadas, compostas de grãos de areia, raízes e capilares, foram utilizadas para se obter uma maior heterogeneidade e uma maior aproximação com casos reais.

Trabalhou-se, também, com fragmentos de argila expandida seca e com água, procurando-se obter a visualização de um sistema poroso.

Fez-se, ainda, a tomografia de amostras não perturbadas de solo apresentando selamento superficial. As amostras são compostas de um solo podzólico vermelho escuro, apresentando 32% de argila, 8% de silte e 54% de areia. As amostras foram irrigadas, por aspersão, durante períodos de 1 hora e secas à sombra, durante 24 horas entre uma irrigação e outra².

A energia, a corrente do tubo e o tempo de contagem utilizados eram tais de forma a se obter números de fótons iguais ou superiores a 20000 contagens, permitindo assim, erros estatísticos, nas contagens, da ordem de 0,7% ou inferiores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados com amostras homogêneas

Não serão apresentados, aqui, todos os resultados relativos às amostras homogêneas citadas em materiais e métodos, pois, embora tenham sido fundamentais às etapas de desenvolvimento a que se prestaram, não trariam a esse documento informações de relevância. Apenas os resultados com detalhes na escala submilimétrica serão mostrados. Os demais resultados poderão ser vistos em Macedo (1997).

Na Figura 15 pode ser vista a primeira tomografia obtida após a implementação dos recursos de centralização e ajuste de

²Amostras preparadas e cedidas por Flávio de Oliveira Silva, aluno do programa de mestrado da UNICAMP, na Faculdade de Engenharia Agrícola.

paralelismo do feixe. Nesta tomografia trabalhou-se com colimador de 100 m, energia do fotopico de 58,5 keV, passo linear de 56 m, feixe livre de 33300 fótons, tempo de contagem de 3 segundos, duração total de 75:45h e matriz de 250x250. Percebe-se uma boa geometria do sistema, onde tanto o cilindro de acrílico quanto os orifícios apresentam-se circulares.

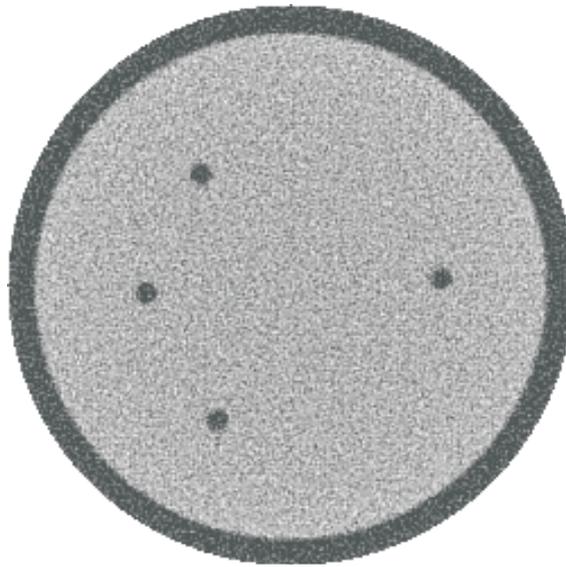


Figura 15 - Tomografia de um *phantom* de acrílico, com diâmetro externo de 12,7mm e orifícios de 500 m.

Trabalhando-se, ainda, com amostras com um certo grau de homogeneidade, porém já apresentando heterogeneidade quanto à geometria, foram feitas tomografias de microesferas de vidro acondicionadas em um recipiente com 5 mm de diâmetro interno. Na Figura 16, pode-se ver a tomografia de microesferas com diâmetros variando de 297 m a 500 m. Os poros apresentam dimensões da ordem de 100 m ou menores, quando medidos pelo programa de reconstrução e visualização. A energia do fotopico utilizado foi de 56 keV, passo linear de 44m, colimador de 100 m, tempo de contagem de 6 segundos,

duração total de 66:44h, matriz de 180x180 e feixe livre de 69000 fótons.

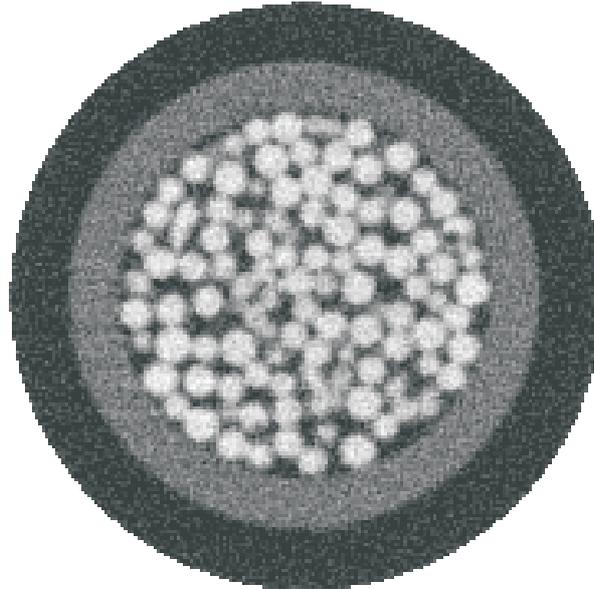


Figura 16 - Tomografia de uma amostra composta de microesferas de vidro com diâmetros de 297 m a 500 m, acondicionadas em um recipiente de acrílico com diâmetro interno de 5mm. A borda escura mais externa corresponde ao ar em torno do recipiente.

Resultados com amostras perturbadas de solo

Resultados obtidos com amostras perturbadas de solos

Visando-se uma primeira aproximação de casos reais, foram desenvolvidas aquisições com amostras perturbadas de solo.

Na Figura 17a pode-se ver uma tomografia de um solo podzólico vermelho amarelo, peneirado, acondicionado em um recipiente de 5 mm de diâmetro interno. Não é possível visualizar poros, pois foi utilizado colimador de 215 m, implicando em uma resolução espacial baixa. Notam-se, porém, devido à sua alta

atenuação, agregados de dimensões submilimétricas. O recurso de escala expandida, implementado também no programa de reconstrução aqui desenvolvido, foi utilizado para realçar os aglomerados, conforme mostrado na Figura 17b. Nesse recurso adotam-se dois novos limites para a escala, um inferior e outro superior. Todos os valores iguais ou inferiores ao limite inferior passam a assumir o tom 0 (preto) e todos acima do limite superior assumem o tom 255 (branco), da escala de cinza. Para a Figura 17b, o critério de escolha da escala utilizou, como auxiliar, o gráfico da Figura 18a, onde é vista a variação das unidades tomográficas ao longo do transcepto L1 dessa imagem. Procurou-se realçar os aglomerados representados pelos dois picos. Na Figura 18b mostra-se a variação das unidades tomográficas ao longo de L2. Avaliando essas variações podem-se estimar as dimensões dos dois aglomerados em 310 m e 400 m, respectivamente. Os dois gráficos da Figura 18 mostram que nessa resolução alguns conceitos ou definições, como no caso da densidade, começam a adquirir aspectos diferentes ao que se obtém em outras escalas. Em alguns trechos, os valores das unidades tomográficas oscilam em torno de valores médios, enquanto que, em outros, notam-se valores bem localizados, diferenciando-se dos demais. Com resoluções menores, como será visto adiante, esse fato pode se acentuar, perdendo sentido, devido à heterogeneidade, a descrição de determinado parâmetro através de sua média, ou ficando crítica a escolha de um volume para o cálculo de tal parâmetro. A energia do fotopico utilizado foi de 28 keV, passo linear de 133 m, tempo de contagem de 5 segundos, duração total de 5:58 h, matriz de 60x60 e feixe livre de 135000 fótons.

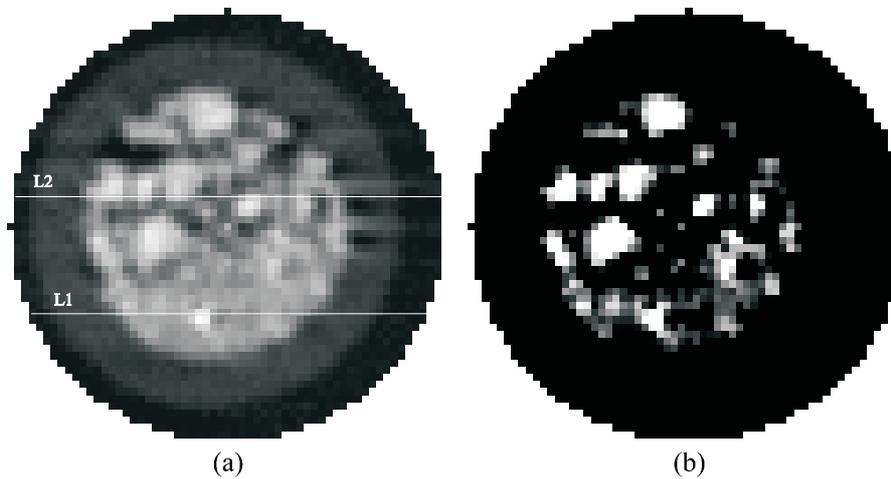


Figura 17 - Tomografia de um podzóico vermelho amarelo peneirado, acondicionado em recipiente com 5 mm de diâmetro interno: (a) escala completa de 0 a 2,897 unidades tomográficas; (b) realce dos aglomerados, utilizando escala expandida na faixa de 1,5 a 2,0 unidades tomográficas.

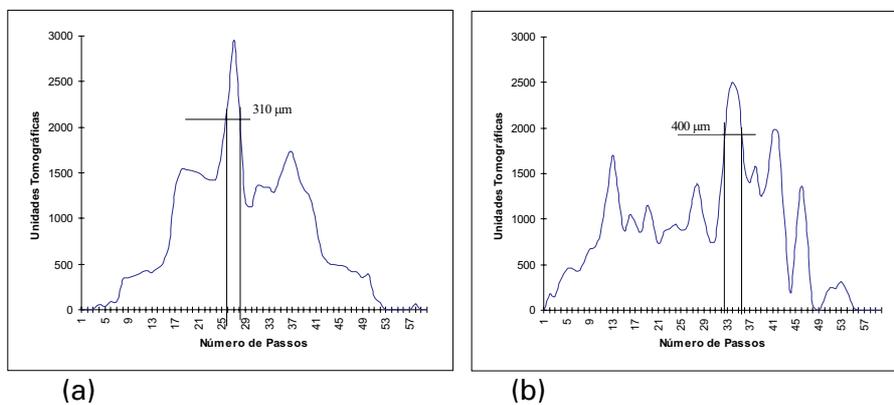


Figura 18 - Variação das unidades tomográficas (a) ao longo do transecto L1 da tomografia da Figura 17 e (b) ao longo do transecto L2.

Outro resultado obtido com solo perturbado pode ser visto na tomografia da Figura 19. Trata-se de um solo podzólico vermelho, peneirado, contendo agregados de 212 μm a 250 μm . Os poros são visíveis e foram medidos no programa de reconstrução e visualização, apresentando valores da ordem de 100 μm . Os parâmetros da tomografia foram: energia do fótópico de 58,5 keV, passo linear de 49 μm , tempo de contagem de 10 segundos, duração total de 62:39h, colimador de 60 μm , matriz de 144x144 e feixe livre de 42000 fótons.

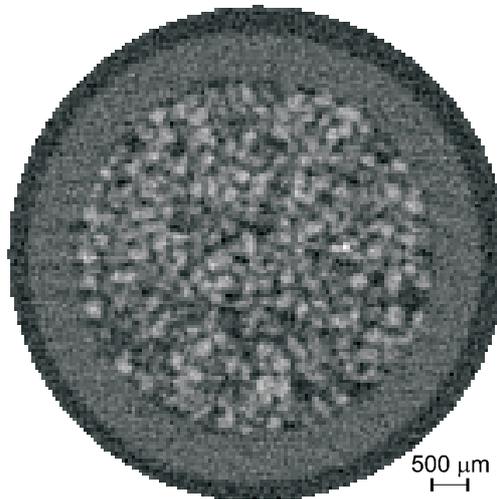


Figura 19 - Tomografia de um solo podzólico vermelho peneirado, apresentando agregados de 212 μm a 250 μm .

Na Figura 20 pode-se ver a tomografia de uma coluna constituída de uma camada superior de areia com granulometria indo de 106 μm a 149 μm e uma camada inferior com granulometria de 297 μm a 500 μm , acondicionadas em um recipiente de acrílico com diâmetro interno de 8mm e altura interna de 8 mm. Seus parâmetros são: energia de fótópico de 58,5 keV, passo linear de 62 μm , tempo de contagem de 6s, duração de 95:19h, colimador de 60 μm , matriz de 225x225 e feixe livre de 28000 fótons.

Pode-se notar, na imagem, a distribuição heterogênea dos espaços vazios. Os trabalhos de Posadas (1994), Onody et al (1995) e Posadas et al (1996) mostraram a existência de caminhos preferenciais para o movimento da água no solo, através do estudo do fenômeno *fingering*. A Figura 20 mostra detalhes, em nível de macroporo, que podem ser associados a esse fenômeno.

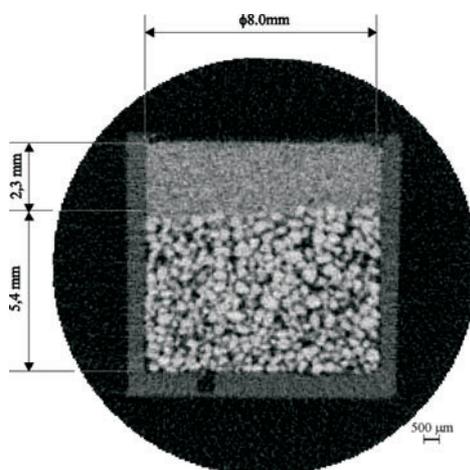


Figura 20 - Tomografia de uma coluna de areia com granulometria de 106 a 149 m, na camada superior, e 297 a 500 m, na camada inferior. Nota-se a presença de heterogeneidades na distribuição do espaço poroso.

Uma amostra com um alto grau de heterogeneidade foi obtida utilizando-se grãos de areia de aproximadamente um milímetro e duas raízes de grama com dimensões também dessa ordem. As raízes foram retiradas de um solo de jardim. A tomografia dessa amostra é apresentada na Figura 21. Como se pode notar, as raízes, destacadas em círculos tracejados, perderam parte de sua água durante a realização da tomografia, apresentando um gradiente radial, com maior umidade no centro. Notam-se, claramente, poros com dimensões iguais ou inferiores a 100 μm . Num dos grãos pode-se notar, também, uma falha. As dimensões dessa falha são de 110 μm de largura por 460 μm de

comprimento. Os parâmetros da tomografia são: energia do fotopico de 58,5 keV, colimador de 60 m, passo linear de 49 m, tempo de contagem de 10 segundos, duração de 62:39h, matriz de 144x144 e feixe livre de 42000 fótons. Para uma melhor visualização das raízes, foi feita uma extensão de escala para os valores de 0,08 a 0,120, mostrada na Figura 22.

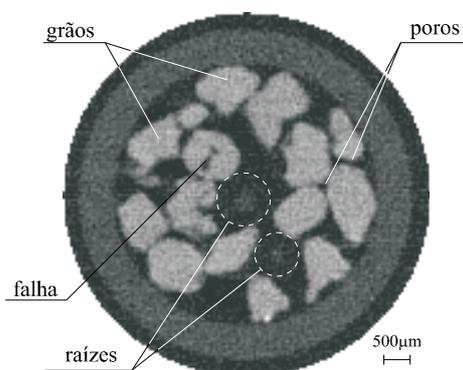


Figura 21 - Tomografia de uma amostra de grãos de areia de 1 mm e raízes, apresentando poros da ordem de 100 m.



Figura 22 - Idem à Figura 21, porém com realce das raízes, utilizando escala de 0,080 a 0,120 unidades tomográficas.

Na Figura 23, vê-se uma imagem semelhante à obtida acima, porém, com grãos de areia menores, na faixa de 0,5 mm a 1 mm, colocados em um cilindro maior, com diâmetro interno de 10 mm e externo de 12,65 mm. Os contornos dos grãos podem ser claramente vistos, bem como poros na dimensão do pixel, de 59 m. A energia do fopico foi de 58,5 keV, o colimador de 60 m, o passo linear de 59 m, o tempo de contagem de 6 segundos, a duração de 95:19h, a matriz de 225x225 translações e rotações e o feixe livre de 27000 fótons.

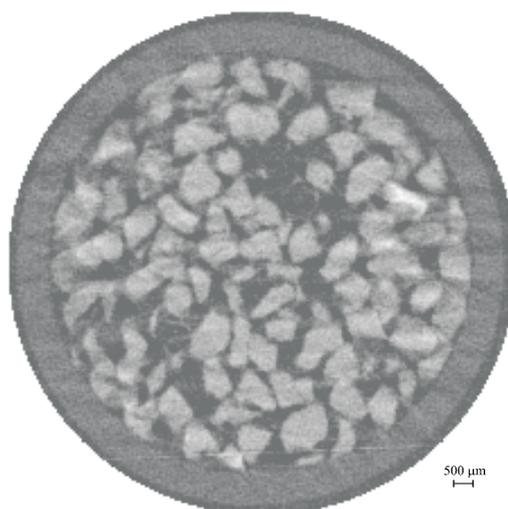


Figura 23 - Tomografia de uma amostra, contendo grãos de areia de 0,5 mm a 1mm em um recipiente com 10 mm de diâmetro interno.

A amostra da tomografia seguinte é um fragmento de argila expandida, utilizada na construção civil. O material é altamente poroso e apresenta uma baixa densidade da ordem de $0,4 \text{ g.cm}^{-3}$. Detalhes menores que 100 m podem ser notados, como o septo que separa os dois poros de 1200 m e 950 m. Na Figura 24a, trabalhou-se com amostra seca, enquanto que na tomografia da Figura 24b foi acrescentada água, obtendo-se o valor de 42,8% para a umidade gravimétrica. Nota-se que não

houve um contraste sensível entre a água e a argila expandida, diminuindo o número de detalhes da imagem. Para manter a umidade durante a aquisição, a amostra foi envolvida em um filme plástico, que aparece nas bordas da imagem. Esse filme foi responsável por um pequeno deslocamento vertical da amostra, alterando ligeiramente a posição do plano da tomografia. Isso fez com que dois pontos de alta atenuação, não presentes na primeira imagem, surgissem na segunda. Os parâmetros da tomografia são: energia do fotopico de 58,5 keV, passo linear de 61m, tempo de contagem de 7 segundos, duração total de 70:16h, matriz de 180x180 e feixe livre de 28000 fótons.

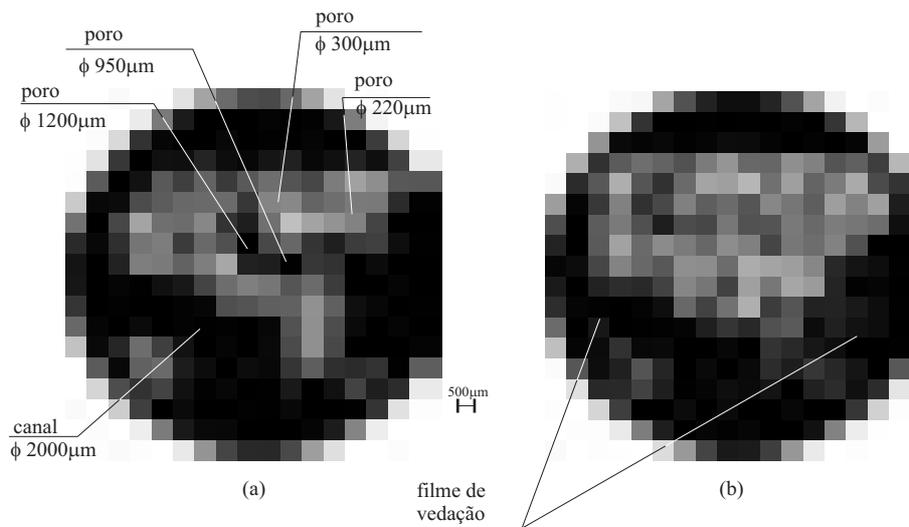


Figura 24 - Tomografia de um fragmento de argila expandida: (a) amostra seca, onde podem ser vistos poros da ordem de 200 m e detalhes como o septo de 60 m, separando os dois poros de 1200 m e 950 m; (b) mesma amostra com umidade gravimétrica de 42,8%.

Resultados com amostras não perturbadas de solos

Na imagem da Figura 25, tem-se um pequeno torrão de um latossolo vermelho escuro, colocado no interior de um recipiente de acrílico com 5 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. 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. Utilizou-se energia do fotopico de 56 keV, passo linear de 80 μm , colimador de 100 μm , tempo de contagem de 5 segundos, duração total de 20:35h, matriz de 100x100 e feixe livre de 38000 fótons.

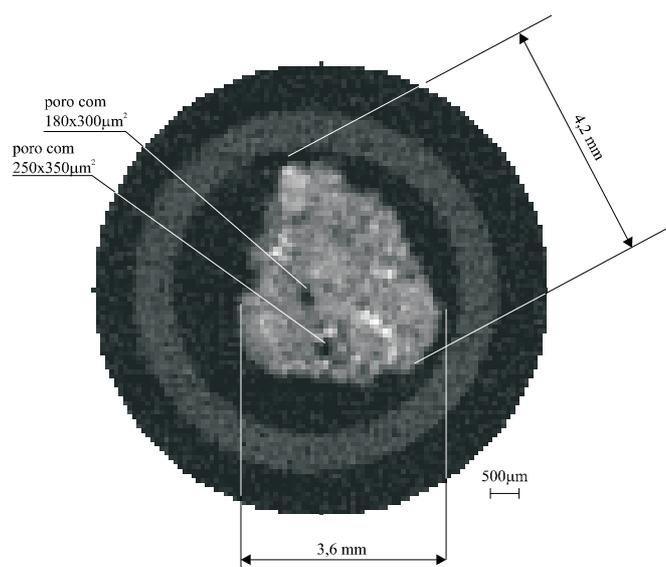


Figura 25 - Tomografia de um torrão de latossolo vermelho escuro, onde podem ser vistos dois macroporos.

Um bom exemplo do potencial do equipamento é mostrado na Figura 26, onde vê-se uma imagem de uma amostra de solo

apresentando selamento superficial. Esta imagem, não invasiva deste fenômeno é inédita, em nível internacional. O selamento superficial é um fenômeno que pode ser causado pelo impacto de gotas de chuva ou de irrigação que desagregam as partículas do solo, produzindo um salpicamento ao longo da superfície. Essas partículas ocupam os espaços formados pelos poros, formando uma fina lâmina tal que a infiltração da água é dificultada. Dessa forma, a água de chuva ou de irrigação corre pela superfície do solo, levando a processos de erosão. Não existe, ainda, um consenso sobre os diversos fatores que possam estar associados à formação do selo superficial, havendo necessidade de mais estudos para o entendimento desse processo (Slattery & Bryan, 1994).

Como pode ser visto, a imagem apresenta três camadas bem distintas, sendo uma superior com espessura de 1mm, uma intermediária de 0,5 mm e uma inferior com 1,7 mm, aproximadamente. A Figura 26b mostra valores médios das unidades tomográficas por regiões. Para a faixa de energia que foi utilizada, de 58,5 keV, pode-se calcular o coeficiente de atenuação médio de cada região, através da equação do gráfico da Figura 14. Como esta equação é linear e para esta energia prevalece o efeito Compton, havendo uma correspondência direta entre a densidade e o coeficiente de atenuação, é possível quantificar-se a relação entre as densidades das camadas. A segunda camada possui uma densidade média 2,1 vezes maior que a superior e a relação entre as densidades médias da terceira e da primeira camadas é em torno de 1,2. Pode-se fazer, também, estimativas para os valores locais, comparando-os com materiais com coeficiente de atenuação conhecidos para essa energia. Na camada intermediária, notam-se pontos de alta densidade (tons mais claros). Na terceira camada, surgem também alguns pontos de alta densidade, porém em menor número, e uma quantidade de macroporos cerca de duas a três vezes em relação às camadas superiores. Essa formação sugere uma migração de partículas da segunda camada para as demais.

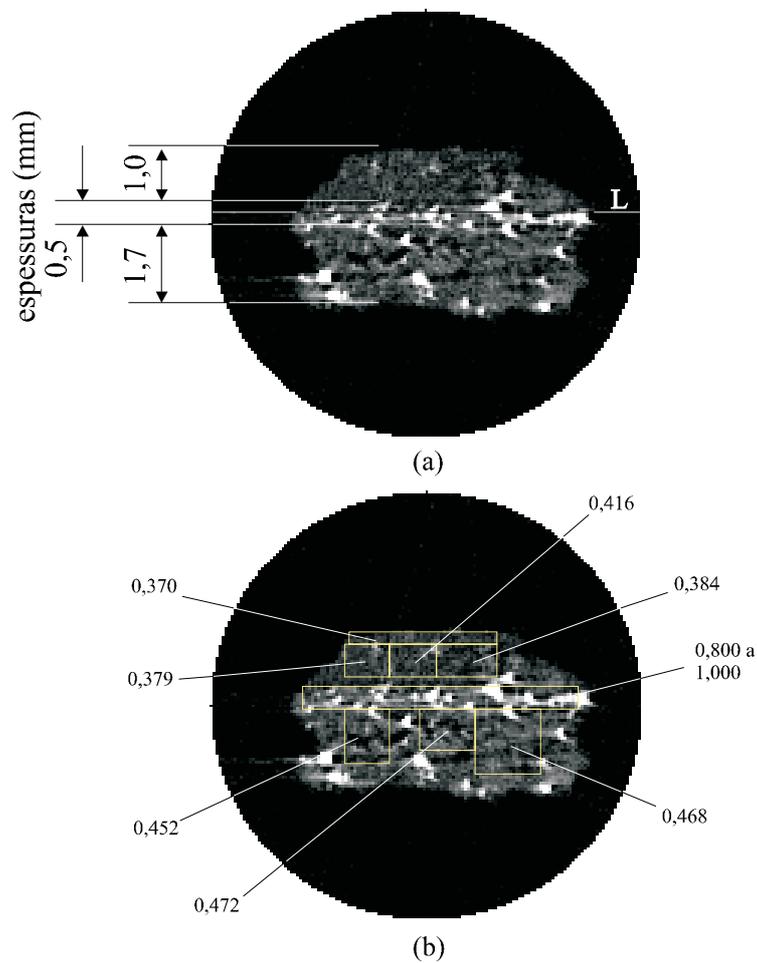


Figura 26 - Tomografia de uma amostra de solo com selamento superficial, sendo vistos em (a) as dimensões das camadas que se formaram no processo e em (b) os valores médios das unidades tomográficas por regiões.

Os parâmetros dessa tomografia foram: energia do fotopico de 58,5 keV, passo linear de 63 m, tempo de contagem de 8 segundos, duração total de 50:58h, matriz de 144x144, colimador de 60 m e feixe livre de 32000 fótons.

Um detalhe interessante de se notar, nas microtomografias com amostras de solos, é a visualização dos pontos com alta atenuação que não eram detectados na tomografia milimétrica. Na tomografia da Figura 26, podem ser notados esses pontos, principalmente na segunda camada, com valores de unidades tomográficas de até 4,0. O mesmo não ocorre na tomografia milimétrica, conforme mostrado na Figura 27, onde se vê uma imagem da secção de uma amostra do mesmo lote de solos de onde foi retirado o fragmento da Figura 26. Nenhuma das imagens, em resolução milimétrica, desse lote mostrou a presença individual de tais pontos. Essa é uma informação que se obtém somente quando se atinge a escala micrométrica.

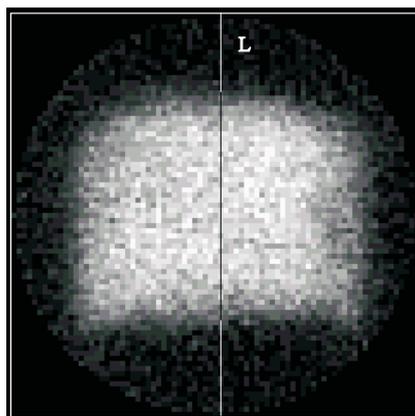


Figura 27 - Tomografia milimétrica de uma amostra do mesmo solo com selamento superficial, da Figura 26. (Cedida pelo Dr. Carlos M. P. Vaz, da Embrapa/Instrumentação Agropecuária).

Outra característica que merece menção é a variação das unidades tomográficas que, na microtomografia perde a característica de médias locais. A Figura 28 mostra a variação das unidades tomográficas ao longo do transcepto L, da Figura 26a, onde esse fato pode ser observado, quando em comparação com a Figura 29, na qual se mostra a variação das unidades tomográficas da Figura 27.

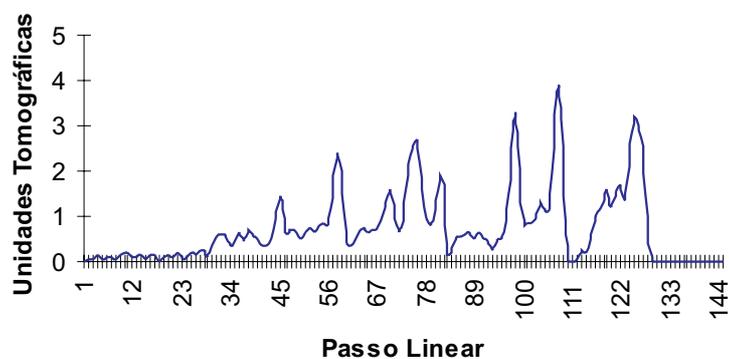


Figura 28 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L da tomografia da Figura 26a.

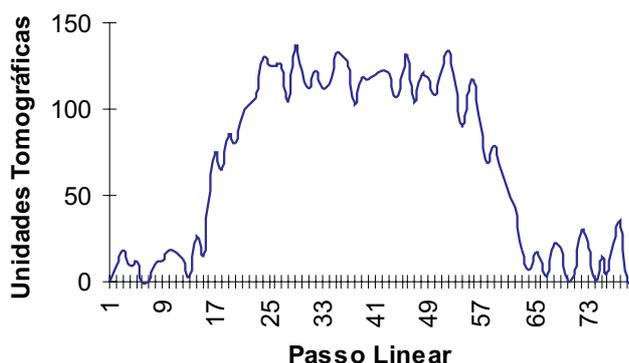


Figura 29 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L da tomografia da Figura 27.

Conforme já foi dito, o tomógrafo de resolução micrométrica, aqui desenvolvido, possui potencial de aplicação não somente em solos. Um exemplo disso é o estudo de danos mecânicos em sementes. Na Figura 30, mostra-se a microtomografia de um grão de milho, onde vê-se, claramente, uma fratura, com uma largura de 80 m na região onde ela cruza com o transecto L. O estudo de danos mecânicos tem

importância tanto na seleção genética de grãos, pois a fratura pode comprometer a germinação da semente, como no uso da semente pela indústria, pois a fratura pode ser um ponto de entrada de microorganismos (Strazzi & Setti, 1995). A Figura 31 mostra o gráfico da variação das unidades tomográficas ao longo do transcepto L.

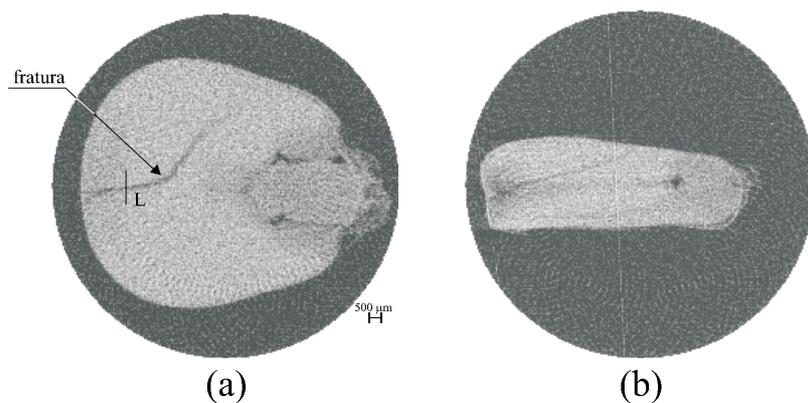


Figura 30 - Microtomografia de um grão de milho, apresentando fratura: (a) plano do milho; (b) normal ao plano do milho. Obteve-se resolução de 80 m.

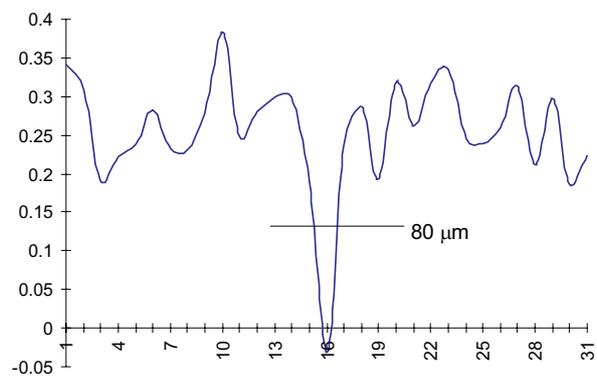


Figura 31 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transcepto L, mostrando a largura da fratura naquela região.

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados nesse trabalho mostraram um tomógrafo, construído a um custo relativamente baixo quando comparado a tomógrafos médicos, de alta resolução, dedicado à pesquisa de solos e meios porosos em geral, mas que poderá, certamente, integrar-se e ser aplicado a diversas outras áreas. O desenvolvimento do tomógrafo micrométrico, como, em geral, ocorre na construção de um equipamento dedicado, trouxe vantagens ao se restringirem os recursos às necessidades específicas de uma certa área, reduzindo-se de forma muito sensível o custo final, além da versatilidade própria do equipamento construído, do domínio da tecnologia, da capacitação de recursos humanos em instrumentação avançada, da facilidade de manutenção, dentre outros. Em geral, as necessidades são comuns a mais de uma área.

O desenvolvimento obteve um produto final capaz de obter imagens tomográficas com resolução espacial de 80 μ m. Outros resultados em microtomografia utilizando equipamentos de custos de uma ordem de grandeza próxima à apresentada acima já foram obtidos por outros autores, como já citado na introdução. Porém, os resultados estavam restritos a baixas energias das fontes, utilizando amostras de dimensões muito reduzidas, comprometendo a representatividade do estudo de casos reais e a investigação de amostras não perturbadas. Também nesse trabalho, utilizaram-se, numa fase inicial, amostras semelhantes a estas, como *phantoms* em epoxy com diâmetros externos de 2mm, com o objetivo de uma primeira validação e de facilitar ajustes no projeto. Obtiveram-se, entretanto, ao final, tomografias de pequenos torrões de aproximadamente 10 mm, possibilitando a utilização de amostras não perturbadas. Com isso, foi possível pela primeira vez, em nível internacional, examinar uma amostra de solo natural, com selamento superficial e encrostamento, além de uma amostra com dupla camada de areia, não apenas fazendo-se uma microscopia de superfície, mas também, investigando-se o seu interior. Foi possível observar detalhes como regiões com predominância de partículas de alta densidade e camadas com

densidades e texturas diferenciadas. O estudo do selamento superficial e do encrostamento do solo têm despertado o interesse de vários pesquisadores, devido à sua importância em processos de erosão e de germinação.

Outro resultado interessante obtido neste trabalho, que ilustra o potencial do equipamento, foi o da fratura de um grão de milho. O estudo de danos mecânicos em sementes é de fundamental importância na seleção genética de grãos.

Como consequência da construção do microtomógrafo, abre-se a perspectiva da realização de estudos de sistemas heterogêneos, porosos e opacos, como solos, com validação de modelos em duas e três dimensões, com características inéditas, na escala submilimétrica. Há claras evidências, por exemplo, de que o fluxo de água e solutos, na região não saturada do solo, é dependente e governado pela distribuição de poros da matriz do meio poroso (Onody et al, 1995).

O equipamento e métodos, apresentados neste trabalho, mostraram-se totalmente apropriados para caracterização da porosidade de sistemas particulados na aludida escala, não havendo nada similar e disponível, do ponto de vista metodológico.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo suporte financeiro a esse desenvolvimento, através do projeto temático "Transporte, previsão do destino e balanço de pesticidas no solo", processo N° 90/3773-7.

Ao Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, da USP - Escola de Engenharia de São Carlos, onde foi desenvolvida a tese de doutorado, da qual a construção e a aplicação do equipamento foram objetos (Macedo, 1997).

À Embrapa Instrumentação Agropecuária, pela infraestrutura e suporte logístico que viabilizaram esse projeto.

Aos colegas da Embrapa Instrumentação Agropecuária, que de uma forma ou de outra viabilizaram ações que culminaram no êxito desse projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPOLONI, C.R.; CESAREO, R. Microscanning and microtomography with X-ray tubes. Roma: Università Degli Studi di Roma "La Sapienza". Centro Interdipartimentale de Ricerca per L'analisi dei Modelli e Dell'Informazione nei Sistemi Biomedici. 83p, 1994.
- ASSIS, J.T. Microtomografia utilizando tubo de raios X. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPE, 1992.
- BIASSUSI, M. Estudo da deformação de um vertissolo através da tomografia computadorizada de dupla energia. Pelotas. 80p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, 1996.
- CÁSSARO, F.A.M. Tomografia de dupla energia simultânea para caracterização física de um meio poroso deformável. São Carlos. 119p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.
- 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, 1994, Berlin. S.l.:s.n.,. p.295-302, 1994.
- CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. Nuclear techniques in soil science. Trends in Agricultural Sciences: Soil Science, Amsterdam, v.1, p.27-46, 1993.
- CESAREO, R.; GIANNINI, M. Elemental analysis by means of X-ray attenuation measurements. Nuclear Instrum. Methods, v.168, p.551-555, 1980.
- CRESTANA, S. Técnicas recentes de determinação de características do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10., 1994, Florianópolis. Resumos... Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.86-97. (Artigo convidado), 1994.

- CRESTANA, S. et al. Tomografia reconstitutiva. In: CRESTANA, S. et al., ed. Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século. Brasília: EMBRAPA-SPI, Cap.4, p.152-200, 1996.
- CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. Using a computed tomograph miniscanner in soil science. Soil Science, Baltimore, v.142, n.1, p.56-61, 1986.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CESAREO, R.; CRUVINEL, P.E. Soil research opportunities using X- and Y- ray computed tomography techniques. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOP ON THE VALIDATION OF FLOW AND TRANSPORT MODELS FOR THE UNSATURATED ZONE, 1988, Ruidoso-Novo México. Proceedings... Ruidoso: College of Agriculture and Home Economics. p.44-49. (New Mexico State University. Department of Agronomy and Horticulture. Research Report, 88-SS-04), 1988.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R.S. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computerized tomographic scanning. Soil Science, Baltimore, v.140, n.5, p.326-332, 1985.
- 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., 1990, Nova Friburgo. Anais... Nova Friburgo: Colégio Anchieta. v.2, p.699-710, 1990.
- CRUVINEL, P.E. Minitomógrafo de raios X e raios-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares. Campinas. 329p. Tese (Doutorado)- UNICAMP, 1987.
- CRUVINEL, P.E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. X-ray and gamma-ray computerized minitomograph scanner for soil science. IEEE Transactions on Instrumentations and Measurement, New York, v.39, n.5, p.745-750, 1990.

- HAINSWORTH, J.M.; AYLMOORE, L.A.G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Australian Journal of Soil Resesearch*, Melbourne, v.21, p.1435, 1983.
- MACEDO, A. Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em Ciências do Solo e do Ambiente. São Carlos. 129p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, 1997.
- NAIME, J.M. Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de ciência do solo e plantas, em campo. São Carlos. 87p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.
- NAIME, J.M.; CONCIANI, W.; SOARES, M.M.; CRESTANA, S. Estudo de solos colapsíveis utilizando um tomógrafo portátil. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13. Águas de Lindóia. Solo suelo 96. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 4p. CD-ROM, 1996.
- ONODY, R.N.; POSADAS, A.D.; CRESTANA, S. Experimental studies of the fingering phenomena in two dimensions and simulation using a modified invasion percolation model. *Journal of Applied Physics*, S.l., v.78, n.5, p.2970-2976, 1995.
- PEDROTTI, A. Avaliação da compactação de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. Pelotas. 83p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, 1996.
- PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.46, p.445-449, 1982.
- POSADAS, A.D. Estudo do fenômeno "fingering" em um meio poroso através de imagens e teoria da percolação por invasão. São Carlos. 187p. Tese (Doutorado) - Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.

- POSADAS, D.A.N.; TANNÚS, A.; PANEPUCCI, H.; CRESTANA. Magnetic resonance imaging as a non-invasive technique for investigating 3-D preferential flow occurring within stratified soil sample. *Computers and electronics in agriculture*, Amsterdam, v.14, p.255-267, 1996.
- ROSENFELD, A.; KAK, A.C. Reconstruction. In: ROSENFELD, A.; KAK, A.C. *Digital picture processing*. 2ed. San Diego: Academic Press. Cap.8, v.1, p.353-430. (Computer Science and Applied Mathematics), 1982.
- SLATTERY, M. C.; BRYAN, R. B. Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding surface. *Catena Supplement 22*, Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, p.17-34, 1994.
- STRAZZI, S.A.; SETTI, T. Qualidade do milho para a indústria moageira a seco. In: SEMINÁRIO SOBRE A CULTURA DO MILHO "SAFRINHA", 3, Assis - SP, fev. 1995. Resumos... Campinas: IAC, p.9-10, 1995.
- VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P.E.; REICHARDT, K.; STOLF, R. (1989). Using a computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. *Soil Technology*, Cremlingen, p.313-321, 1989.
- WANG, C.H.; WILLIS, D.L.; LOVELAND, W.D. *Radiotracer methodology in the biological, environmental, and physical sciences*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 480p, 1975.