

Recomendações para utilização do microtomógrafo de raios-X Sky Scan 1172 em ciências agrárias e biológicas



ISSN 1518-7179

Novembro, 2008

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 37

Recomendações para utilização do microtomógrafo de raios-X Sky Scan 1172 em ciências agrárias e biológicas

Paulo Renato Orlandi Lasso
Carlos Manoel Pedro Vaz
João de Mendonça Naime

Embrapa Instrumentação Agropecuária
São Carlos, SP
2008

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação Agropecuária

Rua XV de Novembro, 1452

Caixa Postal 741

CEP 13560-970 - São Carlos-SP

Fone: (16) 2107 2800

Fax: (16) 2107 2902

www.cnpdia.embrapa.br

E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso

Membros: Dra. Débora Marcondes Bastos Pereira Milori,

Dr. João de Mendonça Naime,

Dr. Washington Luiz de Barros Melo

Valéria de Fátima Cardoso

Membro Suplente: Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann Junior

Supervisor editorial: Dr. Victor Bertucci Neto

Normalização bibliográfica: Valéria de Fátima Cardoso

Tratamento de ilustrações: Valentim Monzane

Foto da capa: Paulo Renato Orlandi Lasso

Editoração eletrônica: Manoela Campos

1ª edição

1ª impressão (2008): tiragem 300

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.

Embrapa Instrumentação Agropecuária

L347r Lasso, Paulo Renato Orlandi
Recomendações para utilização do microtomógrafo de raios-X Sky Scan 1172 em ciências agrárias e biológicas. / Paulo Renato Orlandi Lasso, Carlos Manoel Pedro Vaz, João de Mendonça Naime. -- São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008.
22 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos, ISSN 1518-7179; 37).

1. Microtomografia. 2. Tomografia computadorizada. 3. Raios-X. 4. Instrumentação. I. Vaz, Carlos Manoel Pedro. II. Naime, João de Mendonça. III. Título. IV. Série.

CDD 21 ED 620.197

© Embrapa 2008

Autores

Paulo Renato Orlandi Lasso

Físico e Eng. Eletricista, Msc., Analista,
Embrapa Instrumentação Agropecuária
C.P. 741, CEP 13560-970,
São Carlos (SP)
lasso@cnpdia.embrapa.br

Carlos Manoel Pedro Vaz

Físico, Dr., Pesquisador,
Embrapa Instrumentação Agropecuária
C.P. 741, CEP 13560-970,
São Carlos (SP)
vaz@cnpdia.embrapa.br

João de Mendonça Naime

Eng. Eletricista, Dr., Pesquisador,
Embrapa Instrumentação Agropecuária
C.P. 741, CEP 13560-970,
São Carlos (SP)
naime@cnpdia.embrapa.br

Apresentação

A Tomografia Computadorizada (TC) é uma técnica que permite a visualização de seções transversais (cortes internos) de um objeto de forma não destrutiva. O princípio de funcionamento do microtomógrafo de raios-X baseia-se na propriedade dos materiais absorverem esta radiação de forma diferenciada dependendo de sua composição química e densidade.

A Embrapa Instrumentação Agropecuária, que já tem experiência acumulada de cerca de 20 anos em TC, adquiriu um equipamento comercial de microtomografia de última geração, com apoio da FINEP (projeto multiusuário) para aplicações na pesquisa agrícola e biológica. O equipamento permite analisar amostras com diâmetro máximo de 7 cm e altura máxima de 10 cm, com resolução de algumas dezenas de micrômetros, para as amostras maiores, a cerca de 1 micrômetro, para amostras menores (menos de 1 cm de diâmetro).

O objetivo desta publicação é de apresentar recomendações de uso do equipamento, incluindo princípios de funcionamento e características técnicas, informações práticas sobre a operação (aquisição dos dados e reconstrução da imagem) e sugestões com relação a características específicas de diferentes tipos de materiais analisados (solos, sementes, plantas, madeira, ossos, compósitos plásticos, etc.).

Álvaro Macedo de Silva
Chefe Geral

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. Introdução | 9 |
| 2. Descrição da Sonda Termolástica | 10 |
| 3. Operação do Equipamento | 11 |
| 3.1. Ligando o sistema | 11 |
| 3.2. Ligando o tubo de raios-X | 12 |
| 3.3. Posicionando a amostra no equipamento | 12 |
| 3.4. Realizando ajustes para iniciar a aquisição das imagens | 13 |
| 3.5. Selecionando o filtro | 14 |
| 3.6. Iniciando a aquisição de imagens | 15 |
| 3.7. Fazendo a reconstrução dos cortes tomográficos | 16 |
| 3.8. Aplicações | 16 |
| 3.9. Seleção do filtro em função do tipo de material analisado | 20 |
| 3.10. Optimização de parâmetros para amostras de solo | 20 |
| Conclusões | 22 |
| Referências | 22 |

Recomendações para utilização do microtomógrafo de raios-X Sky Scan 1172 em ciências agrárias e biológicas

Paulo Renato Orlandi Lasso
Carlos Manoel Pedro Vaz
João de Mendonça Naime

1. Introdução

A tomografia computadorizada de raios-X é uma técnica que permite a visualização e a medida de parâmetros morfológicos do interior de materiais sem destruí-lo, sendo uma técnica de caracterização e medida de propriedades físicas de amostras e materiais.

Sua utilização mais difundida e de impacto na sociedade tem sido no diagnóstico médico, onde a técnica foi primeiramente introduzida e é mundialmente conhecida, tanto que em 1979 seus idealizadores foram agraciados com o Prêmio Nobel de Medicina.

Em outras áreas correlatas à área médica, como a veterinária e biomédicas, a tomografia tem sido também utilizada, mas o alto custo desses equipamentos tem inibido a sua utilização de forma mais massiva em outras áreas como a ciência dos materiais, botânica, zoologia, geologia, solos, eletrônica, mecânica, odontologia e farmácia, por exemplo.

Visando a criação de alternativas aos equipamentos médicos comerciais disponíveis, alguns grupos de pesquisa no Brasil e em outros países têm se dedicado ao desenvolvimento de equipamentos *home-made* para diversas aplicações como a ciência dos solos, fisiologia de plantas, geologia e paleontologia, dentre outras.

Particularmente na área de ciência do solo, houve grande avanço na utilização da tomografia computadorizada para o estudo de processos de infiltração de água no solo e de medida de propriedades como a densidade, umidade e porosidade. Esses trabalhos foram pioneiramente desenvolvidos na década de 80 por Petrovic et al. (1982), Hainsworth e Aylmore, (1983) e Crestana et al. (1986). No Brasil, liderados pelo Dr. Sílvio Crestana, um grupo de pesquisadores da Embrapa Instrumentação Agropecuária iniciou trabalhos para o desenvolvimento de equipamentos simples, com preços muito inferiores aos comerciais e dedicados a estudos na área agrícola, como da caracterização de solos e avaliação de processos relacionados a irrigação, erosão, compactação, germinação de sementes, dentre outras.

Depois de duas décadas de pesquisas nesta área, o grupo da Embrapa Instrumentação Agropecuária desenvolveu um tomógrafo de raios gama de primeira geração com resolução milimétrica, um tomógrafo de raios-X com resolução micrométrica, um tomógrafo de raios gama para uso em campo e um tomógrafo de raios gama portátil com arquitetura de feixe em leque (segunda geração) que diminui para alguns minutos o tempo para aquisição das imagens, que é de algumas horas para os equipamentos de primeira geração.

Mesmo com toda essa dificuldade relacionada ao tempo de aquisição das imagens, um grande número de trabalhos de pesquisa, teses e trabalhos científicos foram gerados com o desenvolvimento desses equipamentos (CRESTANA et al., 1986; CRUVINEL, 1987; VAZ Et al., 1989; CRUVINEL et al., 1990; CRESTANA et al., 1992; NAIME, 1994; VAZ et al., 1996; NAIME et al., 1997; MACEDO, 1997; MACEDO et al., 1998; NAIME, 2001).

No sentido da popularização da técnica da tomografia na ciência agrária, o grupo da Embrapa construiu equipamentos de tomografia para outros grupos de pesquisa, como da UFPel e do CENA-USP, no intuito de que a mesma pudesse ser acessada e utilizada em projetos de pesquisa visando a solução de problemas na área de física e manejo dos solos, principalmente.

Mais recentemente, surgiram alternativas comerciais de equipamentos com uma faixa de preços muito inferiores aos equipamentos médicos e com resoluções e características mais favoráveis à utilização em áreas diferentes das médicas. Esses equipamentos possibilitam a obtenção de tomografias (imagens bi-dimensionais) em poucos segundos, com resolução de alguns micrometros em amostras de alguns centímetros de diâmetro. Os equipamentos permitem também a obtenção de múltiplas imagens e a posterior reconstrução 3-D do objeto, além da visualização e navegação no interior da imagem reconstruída, ou seja, com recursos computacionais sofisticados.

Atualmente, um grande número de universidades, centros de pesquisa e empresas privadas no mundo todo dispõem desses equipamentos em seus laboratórios para o desenvolvimento de pesquisa básica e aplicada, bem como para o controle de qualidade de materiais por testes não-invasivos.

No Brasil, a Petrobrás possui um equipamento de última geração com essas características e a Unicamp uma versão mais simples de um microtomógrafo comercial, mas em nenhum dos casos com aplicações nas áreas agrárias e biológicas.

A Embrapa Instrumentação Agropecuária, que já tem experiência acumulada de cerca de 20 anos em TC, adquiriu um equipamento comercial de microtomografia de última geração, com apoio da FINEP (projeto multiusuário) para aplicações na pesquisa agrícola e biológica. O equipamento permite analisar amostras com diâmetro máximo de 7 cm e altura máxima de 10 cm, com resolução de algumas dezenas de micrômetros, para as amostras maiores, a cerca de 1 micrômetro, para amostras menores (menos de 1 cm de diâmetro).

O objetivo desta publicação é de apresentar recomendações de uso do equipamento, incluindo princípios de funcionamento e características técnicas, informações práticas sobre a operação (aquisição dos dados e reconstrução da imagem) e sugestões com relação a características específicas de diferentes tipos de materiais analisados (solos, sementes, plantas, madeira, ossos, compósitos plásticos, etc.).

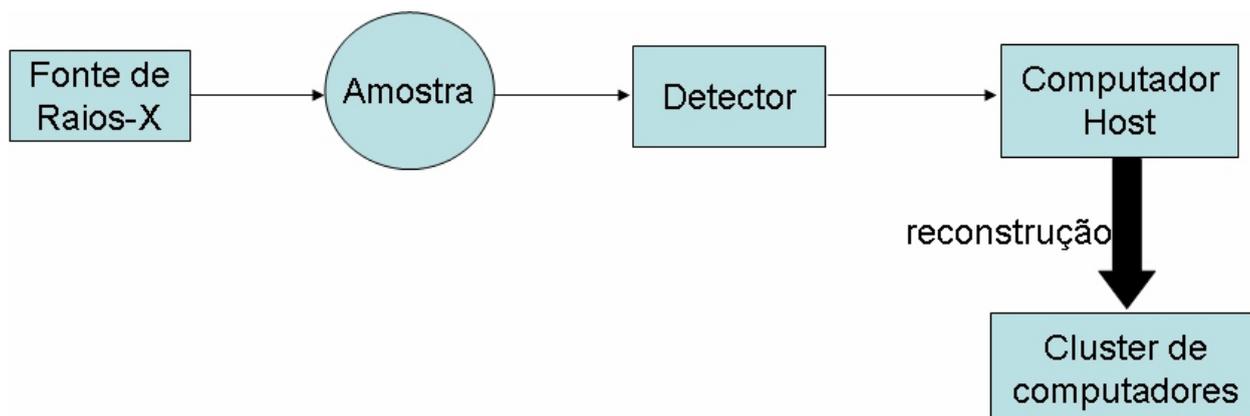
2. Princípios de Funcionamento e Características Técnicas

A Tomografia Computadorizada (TC) é uma técnica que permite a visualização de seções transversais (cortes internos) de um objeto de forma não destrutiva. O princípio de funcionamento do microtomógrafo de raios-X baseia-se na propriedade dos materiais absorverem esta radiação de forma diferenciada dependendo de sua composição química e densidade.

Mais que uma simples chapa radiográfica, a TC divide virtualmente o objeto de estudo em "fatias" nas quais são mapeados parâmetros físicos como a densidade e a porosidade de cada região interna do objeto que são apresentadas na forma de imagens bidimensionais que podem ser compostas de modo a obter objetos virtuais 3D, por meio de algoritmos computacionais. Por exemplo, no caso do solo é possível visualizar a estrutura interna de poros, canais, diferentes partículas e material orgânico, bem como se estudar processos dinâmicos de absorção e retenção de água. No caso de ossos pode se estudar a estrutura trabecular, verificar a existência de processos de osteopenia ou osteoporose e medir a densidade óssea. Em madeiras, é possível visualizar a estrutura das fibras e os anéis de crescimento.

O sistema de microtomografia de raios-X adquirido pela Embrapa Instrumentação Agropecuária é de fabricação da empresa belga SkyScan, modelo 1172 que é composto por um tubo de raios-X de microfoco com fonte de alta tensão (100kV), um porta-amostra com manipulador de precisão e um detector baseado em uma câmera CCD de 10Mp (4000 x 2300 pixel) conectados a um computador de controle e aquisição de dados (host) interligado em rede a um cluster de computadores utilizado na reconstrução das imagens

tomográficas. Este sistema pode ser representado pelo seguinte diagrama de blocos:



A obtenção das imagens tomográficas (seções transversais) é realizada em duas etapas:

- aquisição das imagens radiográficas de diversas projeções angulares da amostra ao longo de uma rotação de 180° ou 360° com passos de rotação muito precisos (alguns décimos de graus);
- reconstrução das imagens das seções transversais a partir das imagens das projeções angulares por meio do algoritmo de reconstrução de feixe cônico de Feldkamp modificado que roda no *cluster* de computadores. Este processo de reconstrução cria uma completa representação 3D da microestrutura interna do objeto.

O quadro a seguir sintetiza as principais especificações do microtomógrafo de raios-X SkyScan 1172.

| Especificações | SkyScan 1172 100kV |
|--------------------------------------|--|
| Detectabilidade de detalhes | 1 μm |
| Tamanho do pixel (Max. Magnificação) | < 0,8 μm |
| Fonte de Raios-X | Tempo de vida > 10000 h 20 - 100kV, 0 - 250 μA (10W Max) |
| Detector de Raios-X | Câmera de 10 Megapixels (4000 x 2300) com CCD de 12 bits acoplado a cintilador por fibra ótica |
| Tamanho máximo de objeto | 68 mm de diâmetro (com câmera offset) |
| Algoritmo de reconstrução | Feixe cônico volumétrico (Feldkamp) |
| Níveis de radiação | < 1 $\mu\text{Sv/h}$ em qualquer ponto da superfície externa do equipamento |

3. Operação do Equipamento

3.1 Ligando o sistema

O primeiro passo para acionar o sistema é ligar o Microtomógrafo girando a chave do painel lateral no sentido horário, conforme mostrado na Figura 1.



Fig. 1. Chave de acionamento sistema.

Uma vez ligado, o painel frontal do equipamento indicará a marca e o modelo conforme Figura 2.



Fig. 2. Painel frontal após ligado.

Em seguida é necessário ligar o computador *host* e iniciar o *software* de controle e de aquisição do sistema com um duplo click no ícone



Esta seqüência de operações não deve ser invertida

3.2 Ligando o tubo de raios-X

Para acionar a fonte do tubo de raios-X deve-se clicar o botão  na barra de controle, mostrada na Figura 3.



Fig. 3. Barra de controle

Quando a fonte está acionada a tela mostra o indicador  e a lâmpada vermelha na parte superior do equipamento fica piscando.

Se a fonte tiver sido desligada há mais de oito horas, terá início o processo de *aging*, que trata-se de um pré-aquecimento do tubo de raios-X no qual a tensão e a corrente sobem suavemente com o objetivo de aumentar o tempo de vida do tubo. Este processo pode durar de 15 a 17 minutos.

3.3 Posicionando a amostra no equipamento

O compartimento de amostras é aberto clicando-se no botão  da barra de controle. A fonte desliga-se automaticamente quando o compartimento de amostras é aberto e torna-se a ligar quando é fechado.

A amostra deve ser fixada firmemente ao suporte de modo a impedir qualquer movimento desta em relação ao suporte durante a aquisição das imagens. Na Figura 4 são ilustrados alguns tipos de suportes para a amostra.

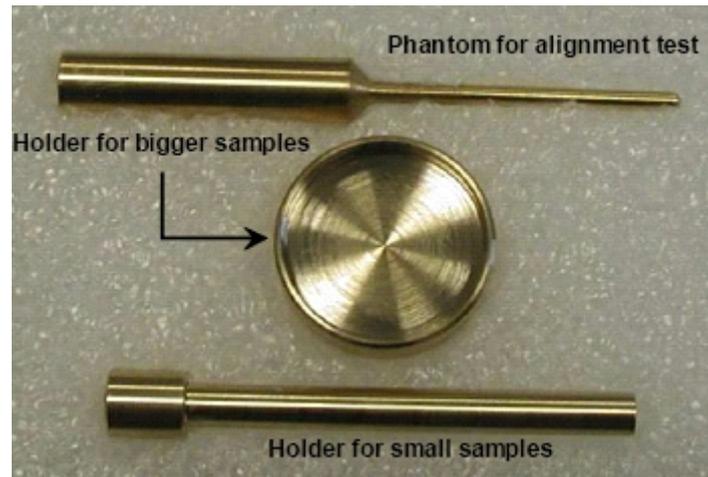


Fig. 4. Alguns exemplos de suportes de amostras e pino de alinhamento.

O suporte de amostras deve então ser firmemente fixado à mesa giratória por meio de um parafuso de aperto manual no centro da mesa, conforme ilustrado na Figura 5.

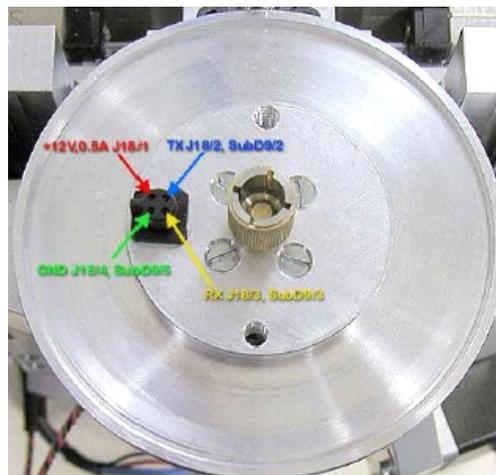


Fig. 5. Mesa giratória da amostra.

Depois de posicionada a amostra, fechar a porta do compartimento de amostras clicando no mesmo botão usado para abri-la.

É possível visualizar a amostra dentro do compartimento clicando em  para acionar

uma câmera de vídeo. Este recurso é particularmente interessante no caso de amostras grandes pois permite acompanhar a movimentação da fonte raios-X e checar sua distância da amostra evitando que se toquem.

3.4 Realizando ajustes para iniciar a aquisição das imagens

Com o compartimento de amostras fechado, clicar no botão  da barra de controle

para obter uma imagem radiográfica de forma contínua (em tempo real) da amostra.

A posição do objeto dentro do scanner pode ser controlada pela barra de status que aparece na base da tela da janela do software de controle (Fig. 6).



Fig. 6. Barra de status.

A primeira área mais à esquerda, com ajuste deslizante, desta barra permite definir a magnificação da imagem de raios-X, expressa em tamanho do pixel, dado em μm . A segunda área ajusta a posição angular do objeto e a terceira possui dois botões para movimentar o objeto para cima e para baixo com indicação da posição vertical em mm que pode variar de 0 mm, para posição mais baixa, até 50 mm para posição mais alta. Clicando-se neste número é aberto uma caixa de diálogo (Fig. 7) que permite fazer estes três últimos ajustes por meio de digitação de valores numéricos.

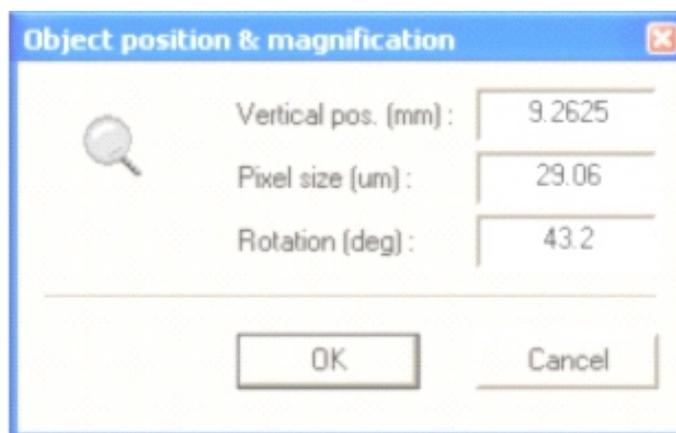


Fig. 7. Caixa de diálogo para ajuste de posição da amostra e magnificação da imagem.

A próxima área da barra de status indica a resolução atual da câmera e permite seu ajuste entre três níveis disponíveis: *best* (4000 x 2300 pixels), *high* (2000 x 1150 pixels) e *standard* (1000 x 575 pixels). Para fazer este ajuste basta clicar sobre esta área e selecionar um dos três níveis que aparecerão em um menu tipo *pop-up*.

O tempo de aquisição e o tamanho dos arquivos aumentam Consideravelmente com o aumento da resolução da câmera.

Neste ponto, é importante girar a amostra em 360° para certificar-se que durante toda a rotação nenhuma parte da amostra saia fora do campo de visão da câmera. Se isso ocorrer, é necessário centralizar melhor a amostra ou reduzir a magnificação para garantir que nenhuma parte da amostra saia do campo de visão da câmera durante a rotação completa.

A próxima área da barra de status mostra o indicador de progresso durante a aquisição ou ainda uma informação de status do sistema.

Finalmente a última área mais a direita mostra o filtro que está em uso ou, clicando sobre esta área, ela passa a mostrar uma estimativa do tempo de duração da aquisição com os parâmetros que foram ajustados. Durante a aquisição, esta área mostrará o filtro selecionado ou o tempo que falta para o fim da aquisição.

No equipamento SkYScan 1172, que é o modelo da Embrapa Instrumentação Agropecuária existem três opções de filtros: "No Filter" que não usa nenhum filtro, "Al Filter" que usa um filme de alumínio de 0,5mm de espessura e "Al + Cu" que usa uma composição de alumínio e cobre.

3.5 Selecionando o filtro

O filtro selecionado é posicionado em frente à câmera. Isto permite alterar a sensibilidade da câmera à radiação policromática da fonte de raios-X. A opção "No filter" é tipicamente usada para objetos com baixa absorção de raios-X ou materiais compostos por elementos com baixos números atômicos em média.

Diferentes metais podem ser usados para filtrar raios-X de baixa energia para reduzir o efeito chamado "endurecimento de feixe" (*beam hardening*). Este fenômeno está relacionado com o fato de a camada superficial de amostras densas funcionarem como um filtro de raios-X para o material do interior da amostra.

A radiação de baixa energia é absorvida preferencialmente nesta camada superficial restando o raio-X de alta energia que acaba atravessando a amostra sem sofrer uma absorção significativa. Isto reduz a informação proveniente do interior de amostras densas e distorce a distribuição de densidade na reconstrução dando a impressão de que a superfície é mais densa que o interior. Para reduzir este problema podem ser utilizados filtros metálicos colocados em frente à câmera para cortar a radiação de baixa energia permitindo que o sistema trabalhe apenas com a componente de alta energia, que é absorvida tanto na superfície como no interior de amostras densas de forma semelhante. Entretanto, é importante ter em mente que, ao filtrar uma parte da radiação, o número de fótons detectados será reduzido exigindo um tempo de exposição maior para cada imagem o que acarretará maior tempo de duração para a aquisição.

Um modo simples de fazer uma primeira seleção é visualizar imagens radiográficas de projeções da amostra com as três opções de filtro e escolher a que apresentar o melhor contraste visual.

3.6 Iniciando a aquisição de imagens

Uma vez que a amostra esteja corretamente posicionada e, selecionado o melhor filtro, é possível iniciar a aquisição das imagens clicando no botão  da barra de controle. Ao

fazer isso aparecerá a caixa de diálogo conforme ilustrado na Figura 8.

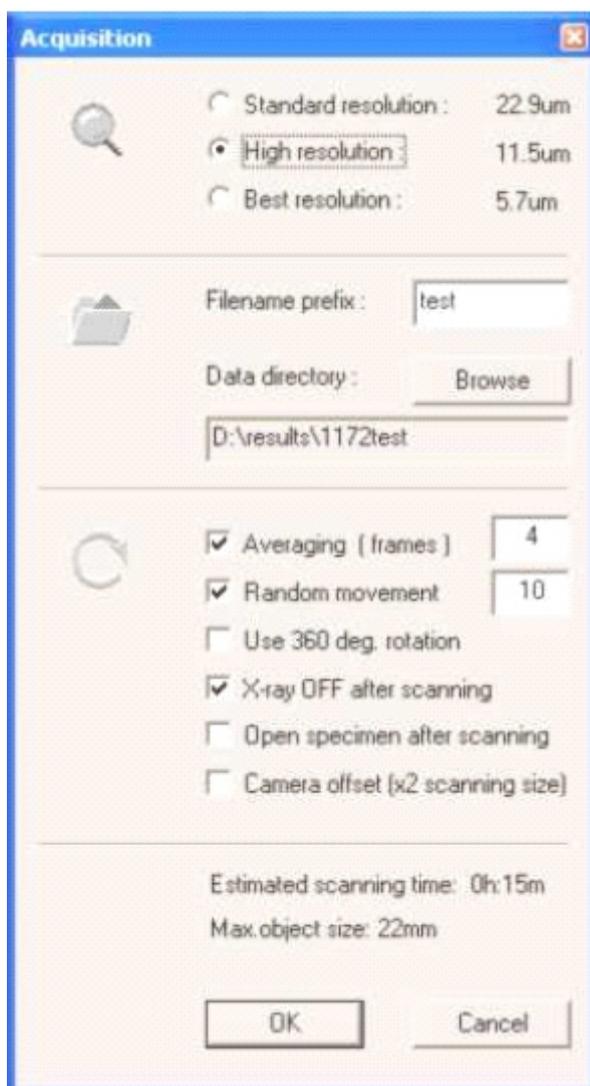


Fig. 8. Caixa de diálogo de configurações da aquisição.

A primeira parte desta caixa de diálogo permite ajustar a resolução da câmera semelhantemente ao que foi exposto anteriormente.

A segunda parte permite atribuir nomes aos arquivos das imagens geradas e criar um novo diretório para conter estas imagens. Note que durante a aquisição o programa vai adicionar um número de quatro dígitos após o nome de cada arquivo de imagem para identificar a projeção. Assim, recomenda-se terminar o nome do arquivo com um *underscore* “_” se estiver usando números no nome. O programa irá salvar os arquivos das imagens das projeções no formato TIFF de 16 bits.

A próxima seção dessa caixa de diálogo define os parâmetros e as ações durante e logo após o término da aquisição, os quais são:

- *Averaging* permite definir quantos quadros (*frames*) serão tomados em cada projeção angular para calcular a média dos sinais a fim de melhorar a relação SINAL / RUÍDO. O aumento do número de quadros melhorará a qualidade da imagem, mas acarretará um tempo de aquisição maior.

- *Random movement* com uma determinada amplitude (dada em números de linhas da câmera) ajuda a reduzir os artefatos de anel (*ring artefacts*) das imagens das seções transversais reconstruídas, mas aumenta o tempo de aquisição, principalmente em baixas magnificações.

- *Use 360 degrees* realiza aquisição com rotação de 360°, o que ajuda a reduzir artefatos assimétricos de objetos densos. Este modo dobra o tempo de aquisição.

- *X-ray OFF after scanning* esta opção define que a fonte de raios-X será automaticamente desligada após a aquisição, o que é uma prática interessante para economizar a vida do tubo.

- *Open specimen after scanning* esta opção abrirá automaticamente a porta do compartimento de amostras após a aquisição.

- *Camera Offset* esta opção permite o aumento do campo de visão horizontal em duas vezes dividindo a aquisição em duas partes: primeiro é adquirido o lado esquerdo da amostra e depois o lado direito. Depois as duas partes são combinadas de modo a obter uma imagem mais larga. Este recurso pode ser usado para amostras com grande diâmetro de base, entretanto dobra o tempo de aquisição e o tamanho dos arquivos das imagens das projeções.

A última seção dessa caixa de diálogo mostra o tempo estimado para a aquisição e o máximo tamanho de objeto para os parâmetros definidos.

Clicando no botão “OK” a aquisição terá início.

3.7 Fazendo a reconstrução dos cortes tomográficos

Após concluída a aquisição das imagens é possível iniciar a reconstrução clicando no botão da barra de controle. Será mostrado uma janela para selecionar o *data set* a ser reconstruído de uma lista dos *data set* disponíveis no diretório corrente. Selecionando e clicando “OK” o programa de controle iniciará o programa de reconstrução para o *data set* selecionado. O programa de reconstrução trabalha de forma totalmente independente. Assim, é possível iniciar o programa de reconstrução e continuar a usar o programa de controle para fazer outra aquisição

3.8 Aplicações

O equipamento de Microtomografia Computadorizada SkyScan 1172 da Embrapa Instrumentação Agropecuária é ilustrado na Figura 9.

Além das Unidades da Embrapa, o equipamento adquirido pelo projeto FINEP Multiusuário intitulado “Microtomógrafo de raios-X para aplicações nas ciências agrárias e biológicas”,

visa atender pesquisadores das seguintes instituições: USP, UNICAMP, UNESP, UFSCar, UFPel e IAC dando contribuições nas seguintes linhas de pesquisa:

- Avaliação da macro e micro porosidades de solos sob diferentes sistemas de manejo, como plantio direto e convencional em diferentes solos;
- Correlação entre as técnicas de petrografia microscópica e microtomografia para a descrição micromorfológica dos solos;
- Estudos da dimensão fractal dos solos por meio de microtomografias e suas relações com manejo e grau de degradação;
- Estudos da variabilidade espacial de propriedades físicas do solo;
- Desenvolvimento de metodologias para avaliação de propriedades e características dos solos como a macro e microporosidades, distribuição de agregados, conectividade, infiltração da água, textura e densidades global e de partículas;
- Estudos morfológicos de raízes, macrofauna e matéria orgânica do solo em amostras não deformadas;
- Estudos de processos de compactação do solo pelo pisoteio de animais em pastagem e por maquinários em culturas anuais e perenes;
- Avaliação das propriedades física de solos com aplicação de lodo de esgoto e efluentes líquidos;
- Estudos e caracterização de materiais cerâmicos e vítreos porosos para a confecção de filtros bioativos;
- Estudos e caracterização de compósitos de polímeros com fibras naturais como juta, sisal e casca de coco verde;
- Caracterização micromorfológica de microeletrodos interdigitados de ouro, sensores poliméricos e substratos utilizados em análises por microscopia de força atômica;
- Avaliação de distúrbios fisiológicos em frutas por infestação de pragas;
- Dinâmica e estabilidade dos volumes gasosos intercelulares de frutas e hortaliças sujeitas a estresses de compressão;
- Estudos de transientes e distribuição estacionária da água no interior de elementos porosos de sensores de tensão de água em plantas e solo;
- Estudos volumétricos de tecidos radiculares e de caules sujeitos a pressurizações;
- Análise de tecido ósseo de ratos castrados, utilizados como modelo de osteoporose experimental, submetidos a diferentes tratamentos;
- Avaliação dos anéis de crescimento de madeiras de espécies tropicais e sub-tropicais para a determinação da idade, taxa de crescimento e reconstrução climática - dendrocronologia e dendroclimatologia;
- Avaliação da estrutura interna da madeira e seus produtos;
- Avaliação dos defeitos internos do lenho das árvores, resultantes do seu crescimento e que afetam a qualidade da madeira e seus produtos;
- Avaliação da estrutura anatômica da madeira de espécies florestais nativas e folhosas e suas relações com as propriedades físicas;
- Avaliação estrutural de frutos duros, especialmente os que contenham amêndoas ricas em óleo.



Fig. 9. Microtomógrafo SkyScan 1172

A Figura 10 ilustra alguns exemplos de imagens tomográficas obtidas com o equipamento da Embrapa Instrumentação Agropecuária.

Com o objetivo de documentar os trabalhos conduzidos com microtomógrafo da Embrapa Instrumentação Agropecuária, foi desenvolvida uma ficha que reúne as principais informações referentes a cada experimento conforme ilustrado na Figura 11.

A Figura 12 ilustra parte da equipe do projeto FINEP que adquiriu o equipamento em treinamento com engenheiro da SkyScan no dia sete de julho de 2008.

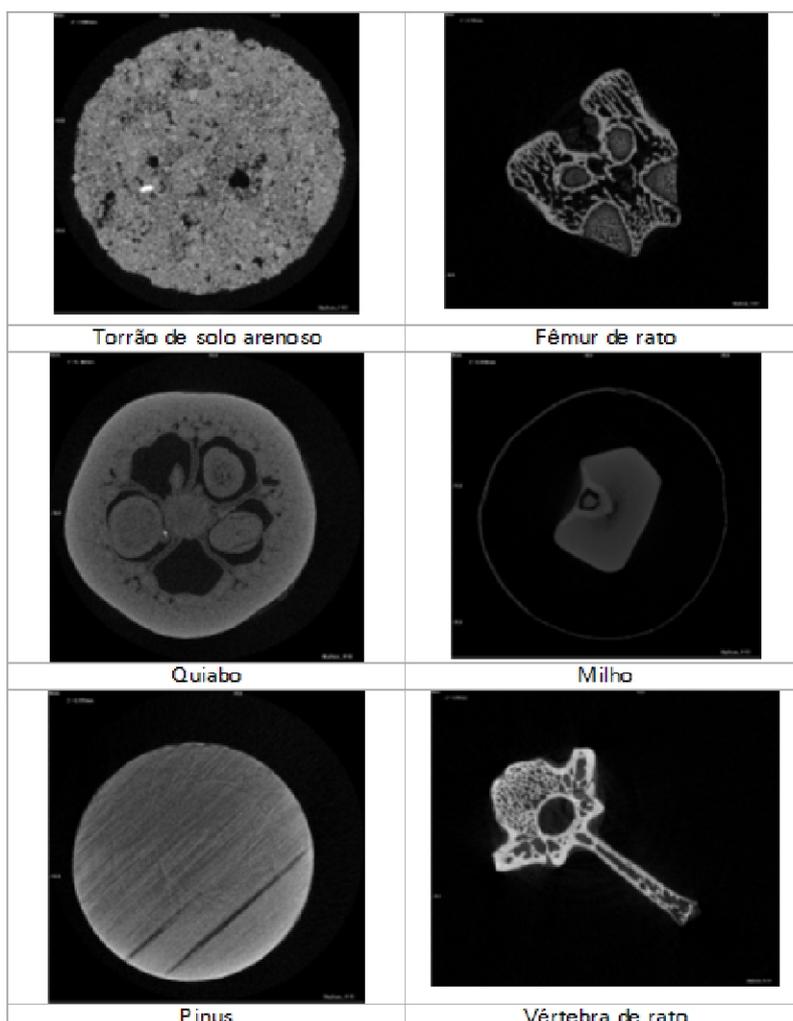


Fig. 10. Alguns exemplos de imagens tomográficas.

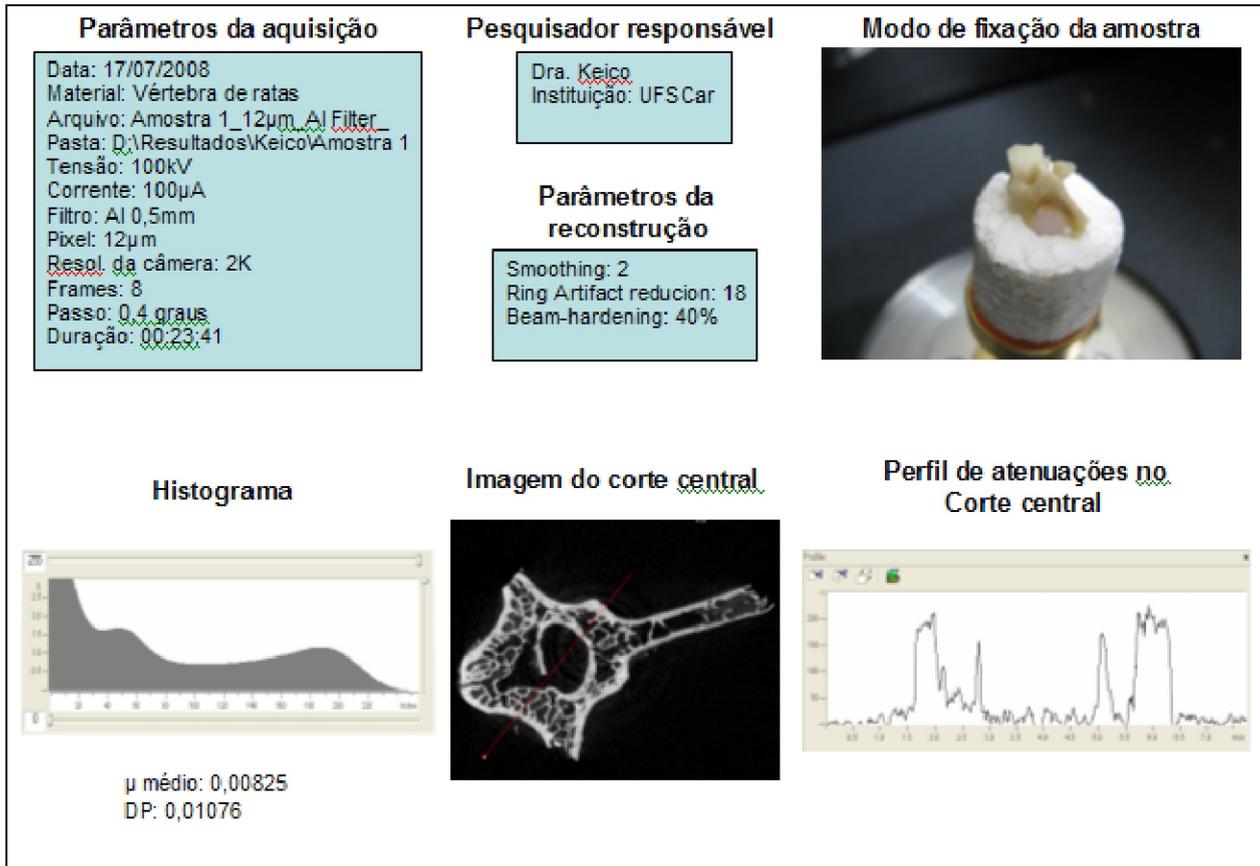


Fig. 11. Exemplo de ficha de documentação de experimento.



Fig 12. Parte da equipe do projeto FINEP em treinamento com especialista da SkyScan

3.9 Seleção do filtro em função do tipo de material analisado

A Tabela 1 apresenta sugestões de utilização de filtros em função dos tipos de materiais analisados. Observa-se, por exemplo, que materiais biológicos moles apresentam melhor contraste no modo “sem filtro” e materiais mais densos como solos e minerais apresentam melhor contraste nos modos “alumínio” ou “alumínio + cobre”.

| Material | Filtro |
|-------------------------|------------------------------|
| Solos e rochas | Alumínio ou Alumínio + Cobre |
| Ossos | Alumínio |
| Frutos e legumes macios | Sem filtro |
| Castanhas duras e secas | Sem filtro |
| Sementes | Sem filtro |
| Madeira | Sem filtro |

Tabela 1. Sugestões de filtros para alguns tipos de materiais.

3.10 Otimização de parâmetros para amostras de solo

A Figura 13 apresenta imagens tomográficas de uma amostra de solo LVA (Latossolo Vermelho Amarelo) nos modos sem filtro, alumínio e alumínio + cobre. Observa-se que os picos dos histogramas dos coeficientes de atenuação estão mais separados para os filtros de Al e Al + Cu o que indica melhores definições das imagens obtidas com estes filtros.

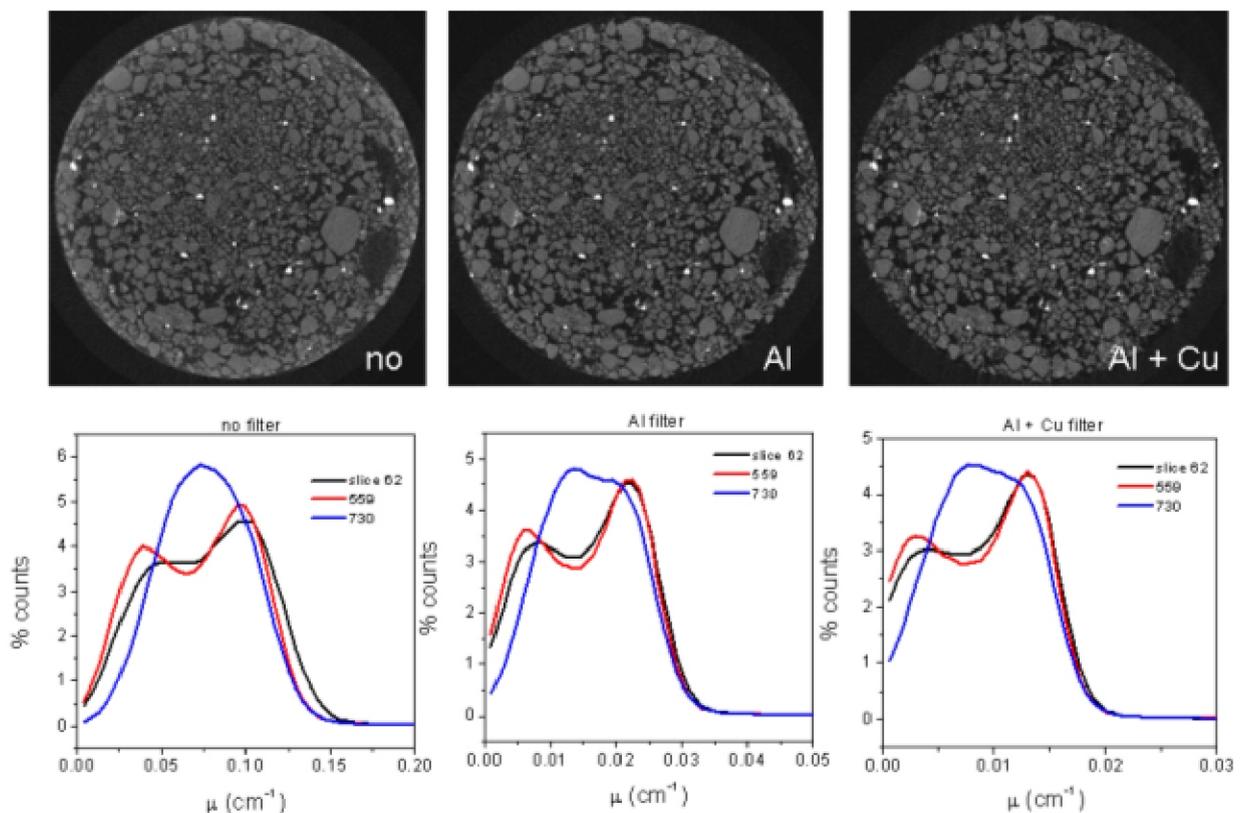


Fig. 13. Imagens tomográficas de uma amostra de solo LVA obtidas nos três modos de filtros disponíveis: sem filtro, alumínio e alumínio + cobre.

A Figura 14 mostra imagens obtidas com o número de quadros crescente. Para cinco quadros, o histograma de coeficientes de atenuação apresenta apenas um pico e desvio padrão alto. Entretanto, a medida que o número de quadros aumenta, o histograma

começa a esboçar a existência de dois picos sobrepostos e o desvio padrão diminui, indicando melhoria na definição da imagem. A partir de 15 quadros pode-se considerar que não há mais ganhos, pois o desvio padrão fica constante.

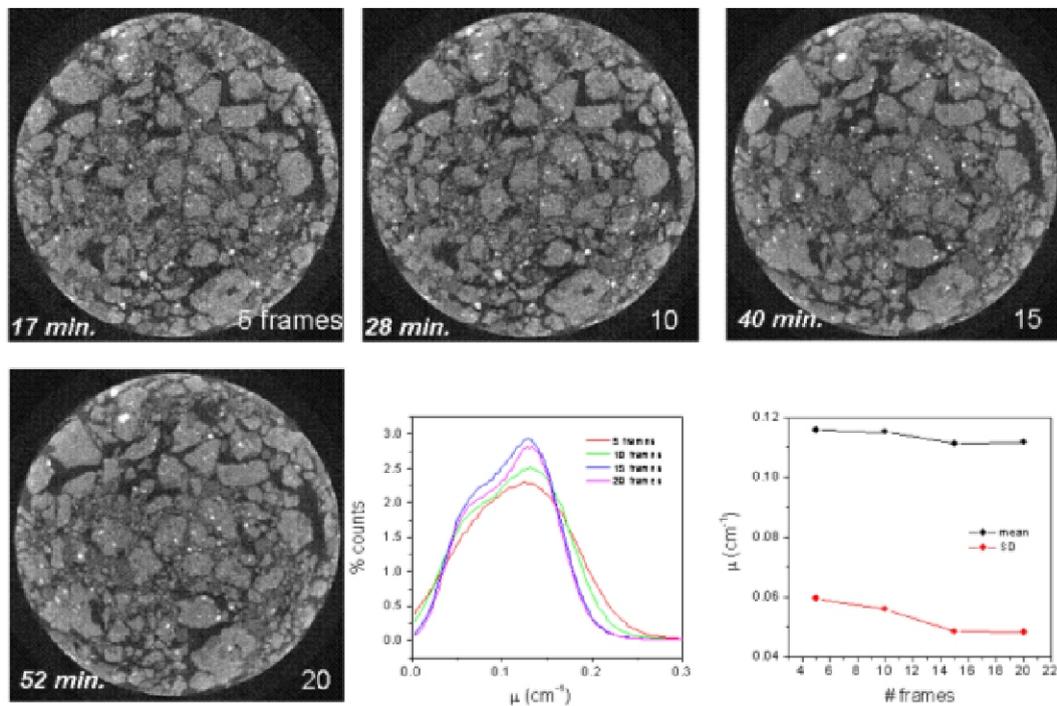


Fig. 14. Imagens tomográficas obtidas com o número de quadros crescente.

A Figura 15 ilustra imagens obtidas no modo 180° e 360°, onde verifica-se a melhor definição dos histogramas para a imagem obtidas em 360°, pois apresentam dois picos independentes de forma mais definida.

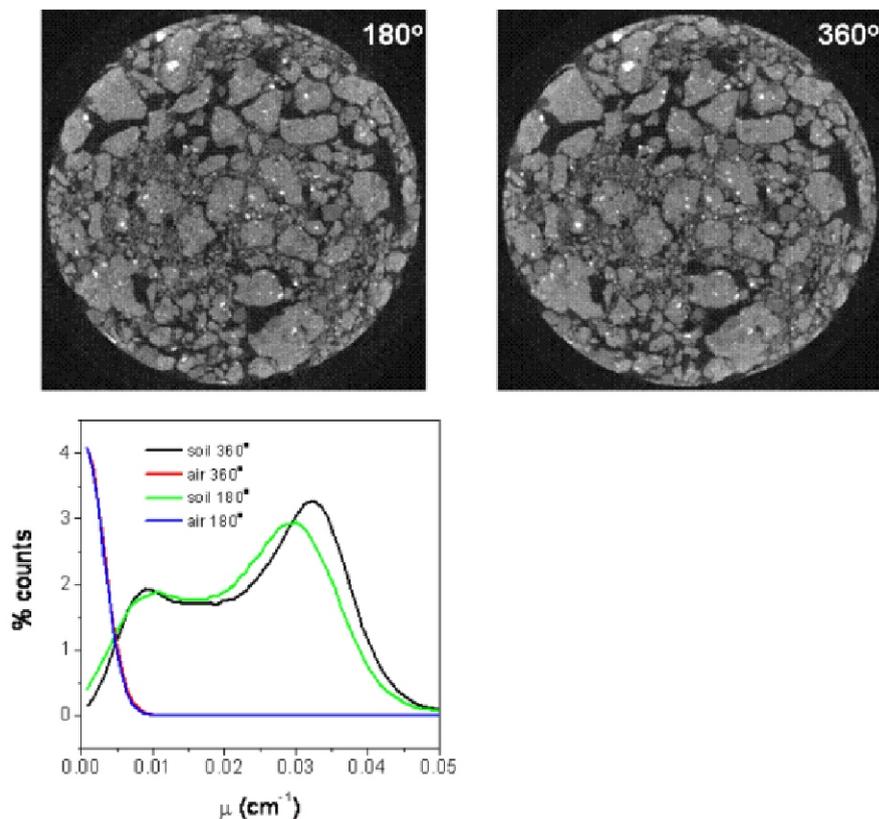


Fig. 15. Imagens tomográficas obtidas no modo 180° e 360°.

Conclusões

O microtomógrafo de raios-X SkyScan 1172 mostrou-se uma poderosa ferramenta para o estudo de diversos materiais tanto de origem mineral como biológica. Entretanto, é de fundamental importância o adequado ajuste dos parâmetros de aquisição e escolha do filtro para se obter os melhores resultados que a técnica pode fornecer.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio financeiro à FINEP (proc. 01.06.0555.00) e à EMBRAPA.

Referências

CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. Using a computed miniscanner in soil science. **Soil Science**, Baltimore, v. 142, p. 56-61, 1986.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, n. 2, p. 161-167, 1992.

CRUVINEL, P. E. **Minitomógrafo de raios X e raios-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares**. 1987. 329 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CRUVINEL, P. E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. X- and gamma- rays computerized minitomograph scanner for soil science. **IEEE - Transactions on Instrumentation and Measurements**, 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 Research**, Victoria, v. 21, p. 435-440, 1983.

MACEDO, A. S. **Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em ciência do solo e meio ambiente**. 1997. 129 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Paulo (CRHEA), Universidade de São Paulo, São Carlos.

MACEDO, A.; CRESTANA, S.; VAZ, C. M. P. X-ray microtomography to investigate thin layers of soil clod. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, p. 249-253, 1998.

NAIME, J. M. **Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de Ciência do Solo e plantas, em campo**. 1994. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

NAIME, J. M. **Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo**. 2001. 146 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

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. (Ed.). **INTERNATIONAL CONFERENCE, 2., 1997, Belo Horizonte-MG. Physics and industrial development: bridging the gap. Proceedings...** Singapore: World Scientific, 1997. p. 327-331.

PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E.; RIEKE, P. E. Soil bulk density in three dimensions by computed tomography scanning. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 445-450, 1982.

VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P. E.; REICHARDT, K.; STOLF, R. Using a computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. **Soil Technology**, Cremlingen, v. 2, p. 313-321, 1989.

VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S.; OLIVEIRA, J. C. M.; REICHARDT, K. **Avaliação do adensamento de um solo cultivado com cana-de-açúcar, usando a tomografia computadorizada**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 1996. 15 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa, 03).



Embrapa Instrumentação Agropecuária

**Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

