



# CONSTRUÇÃO E USO DE UM TOMÓGRAFO COM RESOLUÇÃO MICROMÉTRICA PARA APLICAÇÕES EM CIÊNCIAS DO SOLO E DO AMBIENTE

Álvaro Macedo da Silva

Tese apresentada à Escola de Engenharia  
de São Carlos, da Universidade de São  
Paulo, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Doutor em Ciências  
da Engenharia Ambiental.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036449

ORIENTADOR: Prof. Dr. Sílvio Crestana



São Carlos

1997

Class.	TESE-EESC
Cutt.	5480
Tombo	T141/97

Área: Ciências da Engenharia Ambiental.

31100036449

st 0934063

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

S586c Silva, Álvaro Macedo da  
Construção e uso de um tomógrafo com resolução  
micrométrica para aplicações em ciências do solo  
e do ambiente / Álvaro Macedo da Silva. -- São  
Carlos, 1997.

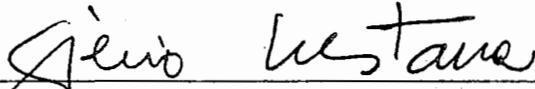
Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia  
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.  
Área: Ciências da Engenharia Ambiental  
Orientador: Prof. Dr. Sílvio Crestana

1. Tomografia. 2. Microtomografia. 3. Solo.  
4. Raio X. 5. Agricultura. 6. Meio-ambiente.  
7. Meios-porosos. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ALVARO MACEDO DA SILVA**

Tese defendida e aprovada em 16-7-1997  
pela Comissão Julgadora:



---

Prof. Doutor **SILVIO CRESTANA (Orientador)**  
(CNPDIA/EMBRAPA)



---

Prof. Doutor **PAULO ESTEVÃO CRUVINEL**  
(CNPDIA/EMBRAPA)



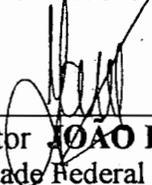
---

Prof. Titular **KLAUS REICHARDT**  
(Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo)



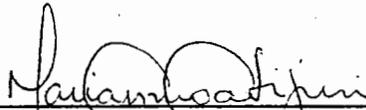
---

Prof. Doutor **RICARDO TADEU LOPES**  
(Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE)



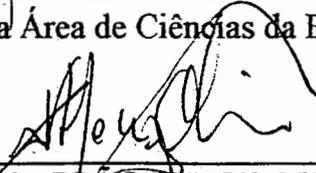
---

Prof. Doutor **JOÃO BORGES LAURINDO**  
(Universidade Federal de Santa Catarina)



---

**Profa. Dra. MARIA DO CARMO CALIJURI**  
Coordenadora da Área de Ciências da Engenharia Ambiental



---

**Prof. Tit. JOÃO VITOR MOCCELLIN**  
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação  
em exercício

*“Quando quiseres indagar a respeito dos mistérios do  
Céu, sonda o segredo divino que palpita na flor.”*

Mariano José Pereira da Fonseca

Aos meus pais Benício e Marina,  
à minha esposa Iveti,  
e aos meus filhos Daniel,  
Bruno e Maria Angélica.

## AGRADECIMENTOS

O momento de escrevermos os agradecimentos em uma tese é um momento mágico, porque é nesse instante que a nossa razão senta-se ao lado e observa o coração agindo num esforço de se expressar e mostrar, aos parceiros, familiares e orientador, o quanto a sua coexistência conosco é importante para o amálgama cultural, científico e emocional que nos tornamos. Por outro lado, é um momento delicado porque nossa memória tenta, travessamente, nos pregar peças. Vou, porém, tentar contornar essa pequena limitação, para dizer a essas estimadas pessoas e instituições o quanto sou grato pela parcela de cooperação que cada um deu para que eu pudesse estar vivendo este momento.

Em primeiro lugar quero lembrar ao Dr. Sílvio Crestana, que une um pouco de filósofo e psicólogo à sua carreira científica, o dia em que ele, numa conversa informal, porém profunda, fez um paralelo do meu trabalho com um barco, onde eu deveria ter claro de que porto estava partindo e em que porto queria chegar. Comunico-lhe que estou vendo terra firme e que as luzes da orla são um suave convite para aportar. Mas quero afirmar, emocionado, que devo isso ao capitão, que soube sentar com o timoneiro para planejar, corrigir rotas, incentivar com entusiasmo, empurrar para a frente, nos momentos de vacilação, e comemorar quando os êxitos intermediários aconteciam. Ao amigo e orientador meus sinceros e comovidos agradecimentos.

Ao Prof. Sérgio Mascarenhas que lançou, regou e cultivou a semente de tudo que está ao meu redor, com seu pioneirismo, garra e visão e, mais que isso, formou cérebros e corações que deram continuidade e expansão à sua obra.

Meus agradecimentos à Iveti que, mais uma vez, não se limitou ao apoio moral e espiritual de esposa, mas sim arregaçou mangas e colocou sua experiência em fechamento de projetos à nossa disposição, dando uma forte colaboração na edição final desse trabalho.

Agradeço ao Dr. Ladislau Martin Neto, pelo apoio, incentivo e compreensão que fizeram com que muitos momentos de dificuldades fossem superados e o equilíbrio retomado.

Ao Eng. Lúcio Jorge, por seu apoio paciente e pela transmissão de conhecimentos sobre programação em ambiente Windows, em particular com Visual Basic, e pelo desenvolvimento de algumas rotinas da interface homem-máquina.

Agradecimentos ao Dr. Carlos Vaz, com o qual foram discutidos vários detalhes e conceitos sobre física dos solos, interpretação de resultados e preparação de amostras.

Ao Dr. Paulo E. Cruvinel pela discussão e material bibliográfico sobre reconstrução de imagens e colimadores.

Ao Dr. Luís Alberto Colnago, pelo interesse e entusiasmo com que acompanhou este trabalho e pelas sugestões de aplicações.

Agradeço ao Dr. Clóvis I. Biscegli, pela troca de idéias sobre alguns detalhes instrumentais ao longo desse trabalho.

Ao Dr. André Torre Neto e ao MSc. João de Naime, que me salvaram inúmeras vezes em que a linguagem C despertava a ira dos deuses, dos bits e dos bytes.

Ao Dr. Ricardo Y. Inamasu, cujos conhecimentos de mecânica propiciaram boas discussões e despertaram a nossa criatividade na elaboração dos mecanismos.

Aos professores Roberto Cesareo, da Universidade de Roma, e Carlos R. Appoloni, da Universidade Estadual de Londrina, pelo intercâmbio sobre tomografia e incentivo entusiasmado.

Ao Flávio A. M. Cássaro, pela discussão e contribuição na confecção de filtros para seleção de faixa de energia.

Ao Sr. Luiz Hungaro Neto, cujo empenho e boa-vontade viabilizaram a continuidade do trabalho no momento em que foi necessário substituir o tubo de raios-X com urgência.

A todos os colegas da Embrapa/Instrumentação Agropecuária que sempre têm colocado sua competência e boa vontade à nossa disposição para que as metas sejam alcançadas, particularmente ao Luís Godoy e ao Jorge Novita, da Oficina Mecânica, ao Gilmar Victorino, com os ensaios fotográficos, ao Valentim Monzane, com os trabalhos de multimeios e às bibliotecárias Vera Octaviano e Janis Baldovinoti.

Agradeço também à Claudete, da secretaria do CRHEA, e ao Sr. Adão, dos Serviços Gráficos da USP, que se empenharam ao máximo viabilizando a conclusão no prazo planejado.

Agradeço, ainda, à minha sobrinha Bárbara e ao colega Ednaldo que forneceram parte da matéria prima para a confecção de alguns dos colimadores.

## **INSTITUIÇÕES QUE PATROCINARAM AS PESQUISAS DESSA TESE**

**EMBRAPA / CNPDIA** - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária

**FAPESP** - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

**USP / CRHEA** - Universidade de São Paulo / Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>ix</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA.....	3
1.2 TÉCNICAS ATUAIS PARA INVESTIGAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO.....	6
1.3 OBJETIVOS.....	9
1.4 DESCRIÇÃO SUCINTA DO CONTEÚDO DE CADA CAPÍTULO.....	9
<b>2. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA: ASPECTOS BÁSICOS</b> .....	<b>10</b>
2.1 FORMAS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA.....	11
2.1.1 <i>Efeito Fotoelétrico</i> .....	11
2.1.2 <i>Efeito Compton</i> .....	13
2.1.3 <i>Espalhamento Coerente</i> .....	15
2.2 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO DE MASSA.....	15
2.3 BLINDAGEM.....	17
2.3.1 <i>Definição de termos e unidades</i> .....	17
2.3.2 <i>Valores admissíveis e conversões</i> .....	18
<b>3. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA</b> .....	<b>20</b>
3.1 RETROPROJEÇÃO FILTRADA.....	21
3.1.1 <i>Retroprojeção filtrada por convolução</i> .....	25
3.2 TOMÓGRAFOS E SUAS GERAÇÕES.....	33
3.2.1 <i>Tomógrafo de primeira geração</i> .....	35

3.2.2 Tomógrafo de segunda geração.....	36
3.2.3 Tomógrafo de terceira geração.....	36
3.2.4 Tomógrafo de quarta geração.....	37
3.2.5 Tomógrafo de quinta geração.....	37
3.3 APLICAÇÕES DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA EM CIÊNCIA DO SOLO.....	37
<b>4. ALGUNS CONCEITOS E DEFINIÇÕES BÁSICAS DE FÍSICA DO SOLO.....</b>	<b>41</b>
4.1 CONCEITOS BÁSICOS.....	41
4.1.1 Fase sólida do solo.....	41
4.1.2 Fase líquida do solo.....	46
4.1.3 Fase gasosa do solo.....	50
4.2 INVARIÂNCIA DE ESCALA.....	50
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
5.1 MONTAGEM DO SISTEMA.....	55
5.1.1 Fonte de raios X.....	56
5.1.2 Cadeia nuclear.....	59
5.1.3 Mesa posicionadora.....	59
5.1.4 Microcomputador.....	60
5.2 PROGRAMAS DE CONTROLE E RECONSTRUÇÃO.....	60
5.2.1 Programa de controle do equipamento.....	61
5.2.2 Programa de reconstrução e visualização de imagens.....	63
5.3 MÉTODO.....	65
5.3.1 Confeção dos colimadores.....	65
5.3.2 Alinhamento do feixe.....	67
5.3.3 Paralelismo entre feixe e mesa posicionadora.....	68
5.3.4 Escolha da energia e do tamanho da amostra.....	69
5.3.5 Isolamento mecânico.....	70
5.3.6 Correção do tempo morto.....	71
5.3.7 Preparação das amostras.....	72
5.3.8 Calibração.....	73
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>83</b>
6.1 PRIMEIROS RESULTADOS OBTIDOS COM AMOSTRAS HOMOGÊNEAS.....	83
6.2 RESULTADOS OBTIDOS COM AMOSTRAS PERTURBADAS DE SOLOS.....	95
6.3 RESULTADOS OBTIDOS COM AMOSTRAS NÃO PERTURBADAS DE SOLOS.....	111
<b>7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>117</b>
7.1 CONCLUSÕES.....	117
7.2 TRABALHOS FUTUROS.....	119
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>122</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Atenuação de um feixe de fótons por uma amostra homogênea .....	10
FIGURA 2.2 - Interação do fóton com o elétron no efeito fotoelétrico.....	11
FIGURA 2.3 - Secção de choque do chumbo, por átomo, para o efeito fotoelétrico. (Fonte: Eisberg, 1966).....	13
FIGURA 2.4 - Interação de um fóton com um elétron no efeito Compton.....	14
FIGURA 2.5 - Secção de choque diferencial para o espalhamento Compton, para um elétron livre. (Fonte: Eisberg, 1966).....	15
FIGURA 2.6 - Coeficientes de atenuação de massa para os efeitos fotoelétrico, Compton e coerente, para um solo, em função da energia. (Fonte: Cesáreo et al, 1994).....	16
FIGURA 3.1 - 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.....	21
FIGURA 3.2 - Domínio de $f(x,y)$ e conversão entre as coordenadas cartesianas e polares.....	23
FIGURA 3.3 - (a) Duas projeções de um objeto homogêneo, sobre os planos x e y; (b) Retroprojeção sobre todos os pontos que compoem cada raio soma.....	24
FIGURA 3.4 - Ilustração do teorema da projeção.....	26
FIGURA 3.5 - Ilustração da composição do domínio da frequência, para uma imagem a partir das transformadas de Fourier de suas projeções em diversas direções.....	27
FIGURA 3.6 - Função transferência do filtro aplicado sobre projeções que são limitadas à frequência $1/2\tau$ .....	31
FIGURA 3.7 - Resposta impulsiva correspondente à função de transferência da Figura 3.6.....	32
FIGURA 3.8 - Tomografia plano focal.....	34
FIGURA 3.9 - Tomografia reconstitutiva (a) por transmissão e (b) por emissão.....	35
FIGURA 3.10 - Esquema de um tomógrafo de primeira geração.....	35
FIGURA 3.11 - Esquema de um tomógrafo de segunda geração.....	36
FIGURA 3.12 - Esquema de um tomógrafo de terceira geração.....	36
FIGURA 3.13 - Esquema de um tomógrafo de quarta geração.....	37
FIGURA 4.1 - Classificações texturais do solo, segundo (a) Departamento de Agricultura dos E.U.A e (b) Sociedade Internacional da Ciência do Solo.....	41
FIGURA 4.2 - Triângulo de classificação textural. (Fonte: Hillel, 1982b).....	42

FIGURA 4.3 - Representação visual comparativa dos tamanhos dos agregados de areia, argila e limo. (Fonte: Hillel, 1982b).	42
FIGURA 4.4 - Formas de agregados de solo. Fonte: Hillel, 1982c).	42
FIGURA 4.5 - Ilustração de amostra composta de duas fases, sólida e gasosa, separando-se as duas fases para efeito de cálculo.	44
FIGURA 4.6 - Ilustração de amostra composta de três fases, sólida, líquida e gasosa, apresentadas separadamente para efeito de cálculo.	47
FIGURA 4.7 - Imagem tomográfica de uma amostra saturada de latossolo vermelho-escuro (LE) da região de Araras/SP. (Fonte: Crestana et al, 1992).	52
FIGURA 4.8 - Perfis de densidade e umidade relativos ao caminho L da Figura 4.7. (Fonte: Crestana et al, 1992).	52
FIGURA 4.9 - Imagem tomográfica, mostrando grão de solo, raízes e poros, com resolução espacial de 20 $\mu\text{m}$ , realizada com o tomógrafo da ARACOR, Sunnyvale/CA, e onde pode-se ver, também, o caminho de investigação em escala micrométrica ( $L'$ ). (Fonte: Crestana & Nielsen, 1990).	53
FIGURA 4.10 - Curva hipotética da variação da massa específica $\rho(L')$ ao longo do caminho $L'$ da Figura 4.9, em escala micrométrica.	54
FIGURA 4.11 - Distribuição da umidade $\theta$ ao longo do caminho $L'$ da Figura 4.9, em escala micrométrica.	54
FIGURA 5.1 - Diagrama de blocos do tomógrafo com resolução micrométrica.	55
FIGURA 5.2 - Parte do sistema de raios X, onde se vêem, de cima para baixo o painel de comando, o painel de controle e o gerador.	56
FIGURA 5.3 - (1) Caixa de blindagem com paredes de 6mm de Pb, contendo tubo de raios X e (2) condutor de Pb com diâmetro externo de 40 mm e interno de 8 mm.	58
FIGURA 5.4 - Placa multicanal modelo 5000, da Viking Instruments.	59
FIGURA 5.5 - Mesa posicionadora, onde podem ser vistos, nas laterais, os controladores e, no centro, os posicionadores, estando o estágio rotativo montado sobre o estágio linear.	60
FIGURA 5.6 - Montagem dos posicionadores rotativo e linear.	60
FIGURA 5.7 - Tela principal do programa de controle da mesa, da placa multicanal e do arquivo de dados.	61
FIGURA 5.8 - Tela principal do programa de reconstrução e visualização de imagem.	64
FIGURA 5.9 - Largura do feixe de raios X ( $FWHM$ ), no centro da mesa, para o colimador de 60 $\mu\text{m}$ .	53
FIGURA 5.10 - Perfil do feixe do seu caminho.	67
FIGURA 5.11 - Alinhamento do feixe: (a) sistema que permite giro através de translação diferenciada nas direções T2 e T3, com resolução grosseira; (b) sistema que permite translações horizontal (T3) e vertical (T2) e rotações nos planos horizontal (R1) e vertical (R2).	68

FIGURA 5.12 - 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.....	69
FIGURA 5.13 - Espectro de energia do feixe de raios X, onde podem ser vistos o pico característico do filtro, de 28 keV, e o pico de cauda, de 88 keV. Esta imagem foi obtida com o programa de aquisição da placa multicanal.....	70
FIGURA 5.14 - Sistema antivibratório de suporte da mesa. (a) esquema de construção; (b) detalhe do apoio do tampo de granito e (c) foto do conjunto.....	70
FIGURA 5.15 - Tempo morto da placa multicanal.....	71
FIGURA 5.16 - Secção transversal de uma amostra fictícia homogênea, mostrando o caminho y a ser atravessado pelo feixe de radiação, numa posição genérica x. ....	74
FIGURA 5.17 - Tomografia de uma amostra homogênea, com simulação de radiação sem oscilação.....	75
FIGURA 5.18 - Comparação entre o número de fótons da primeira linha da matriz teórica, da matriz real e da linha média local.....	76
FIGURA 5.19 - Projeção filtrada da primeira linha da matriz teórica, sem oscilação.....	77
FIGURA 5.20 - Projeção filtrada da primeira linha da matriz teórica, com simulação de 1% de oscilação na matriz de dados. ....	78
FIGURA 5.21 - Imagens construídas a partir das matrizes teóricas, com simulação de oscilação de 1%. Em (a) tem-se a simulação considerando-se $\mu = 0,436 \text{ cm}^{-1}$ e em (b) $\mu = 0,223 \text{ cm}^{-1}$ .....	79
FIGURA 5.22 - Curva de calibração do tomógrafo micrométrico para energia de 28 keV. ....	82
FIGURA 5.23 - Curva de calibração do tomógrafo micrométrico para energia de 60 keV. ....	82
FIGURA 6.1 - Imagem tomográfica de um <i>phantom</i> de acrílico, com resolução submilimétrica. Dimensões dos orifícios em micrômetros. Diâmetro externo do <i>phantom</i> 30mm. ....	84
FIGURA 6.2 - Primeira tomografia obtida com o sistema completo do tomógrafo micrométrico. Dimensões dos orifícios em micrômetros. Diâmetro externo do <i>phantom</i> 30mm. ....	84
FIGURA 6.3 - Microtomografia de um <i>phantom</i> de acrílico com orifícios iguais a 700 $\mu\text{m}$ . ....	84
FIGURA 6.4 - Microtomografia de um <i>phantom</i> de acrílico com orifícios de 500 $\mu\text{m}$ , utilizando o dispositivo de ajuste do paralelismo do feixe em relação à mesa.....	85
FIGURA 6.5 - Tomografias de um fio de cobre de 200 $\mu\text{m}$ de diâmetro (a e b), de um <i>phantom</i> de resina epoxy com $\text{PbO}_2$ com orifícios de 200 $\mu\text{m}$ e 300 $\mu\text{m}$ (c e d) e de um <i>phantom</i> de resina epoxy com $\text{PbO}_2$ , com orifícios de 100 $\mu\text{m}$ (d e f). Na esquerda são apresentadas as imagens originais e na direita as imagens com a matriz centralizada, via <i>software</i> . ....	86
FIGURA 6.6 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L da imagem da Figura 6.5.....	87
FIGURA 6.7 - Tomografia de um cilindro de PVC com 970 $\mu\text{m}$ de diâmetro, contendo um orifício interno de 100 $\mu\text{m}$ . (Fonte: Appoloni & Cesáreo, 1994).....	88

FIGURA 6.8 - Variação das unidades tomográficas ao longo de um transecto passando pelo orifício central da imagem da Figura 6.7. (Fonte: Appoloni & Cesáreo, 1994). .....	89
FIGURA 6.9 - 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° .....	90
FIGURA 6.10 - Tomografia do mesmo <i>phantom</i> da Figura 6.4, porém, obtida com o novo procedimento de centralização e reconstruída com o programa desenvolvido nesse trabalho. .	90
FIGURA 6.11 - Tomografia de uma amostra composta de microesferas de vidro com diâmetros de 297 $\mu\text{m}$ a 500 $\mu\text{m}$ , acondicionadas em um recipiente de acrílico com diâmetro interno de 5mm. A borda escura mais externa corresponde ao ar em torno do recipiente. ....	91
FIGURA 6.12 - Tomografia de microesferas de vidro, com diâmetros de 212 $\mu\text{m}$ a 297 $\mu\text{m}$ , acondicionadas no mesmo recipiente da tomografia anterior. Também podem-se observar riscos ocasionados por variações instantâneas no fluxo de fótons, produzidos pelo tubo de raios X. ....	92
FIGURA 6.13 - Tomografia da mesma aquisição relativa à Figura 6.12, porém corrigindo-se, via programa de reconstrução, as baixas contagens causadas por falhas do tubo. ....	93
FIGURA 6.14 - Tomografia de esferas de vidro de 100 $\mu\text{m}$ , utilizando-se radiação sincrotron . (Fonte: Spanne et al, 1994). ....	93
FIGURA 6.15 - Tomografia de microesferas de vidro de 425 $\mu\text{m}$ a 600 $\mu\text{m}$ imersas em solução de 1% de iodo, em escala total, utilizando-se radiação sincrotron. (Fonte: Spanne et al, 1994). ..	94
FIGURA 6.16 - Idem Figura 6.15, porém com a faixa completa de tons de cinza, correspondendo à faixa de escala de 100 a 400, realçando o líquido. (Fonte: Spanne et al, 1994). ....	94
FIGURA 6.17 - Tomografia de um podzólico 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 1,5 a 2,0 unidades tomográficas. ....	95
FIGURA 6.18 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L1 da tomografia da Figura 6.17. ....	96
FIGURA 6.19 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L2 da tomografia da Figura 6.17. ....	96
FIGURA 6.20 - Tomografia de um solo podzólico vermelho peneirado, apresentando agregados de 212 $\mu\text{m}$ a 250 $\mu\text{m}$ . ....	97
FIGURA 6.21 - Binarização da tomografia da Figura 6.20, utilizando-se o tom de cinza dos aglomerados da área indicada, como limiar. O tom preto representa poros. ....	97

FIGURA 6.22 - Exemplo de distribuição de fases líquida e gasosa em um micromodelo, construído em resina. As áreas escuras representam a fase líquida e as claras a fase gasosa. (Fonte: Laurindo, 1996).....	98
FIGURA 6.23 - Tomografia de uma coluna de areia com granulometria de 106 a 149 $\mu\text{m}$ , na camada superior, e 297 a 500 $\mu\text{m}$ , na camada inferior. Nota-se a presença de heterogeneidades na distribuição do espaço poroso. ....	99
FIGURA 6.24 - Coluna com duas camadas de areia, apresentando o fenômeno <i>fingering</i> . As camadas superior e inferior possuem 10 cm e 80 cm, respectivamente (Fonte: Onody & Posadas, 1995). ....	99
FIGURA 6.25 - Tomografia de uma amostra de grãos de areia de 1mm e raízes, apresentando poros da ordem de 100 $\mu\text{m}$ . ....	100
FIGURA 6.26 - Idem Figura 6.25, porém com realce das raízes, utilizando escala de 0,080 a 0,120 unidades tomográficas. ....	100
FIGURA 6.27 - Tomografia de uma amostra contendo grãos de areia de 1mm e capilares de vidro com diâmetros de 100 $\mu\text{m}$ , 200 $\mu\text{m}$ e 300 $\mu\text{m}$ . ....	101
FIGURA 6.28 - Tomografia de uma amostra, contendo grãos de areia de 0,5 mm a 1mm em um recipiente com 10 mm de diâmetro interno. ....	101
FIGURA 6.29- Tomografia de um fragmento de argila expandida: (a) amostra seca, onde podem ser vistos poros da ordem de 200 $\mu\text{m}$ e detalhes como o septo de 60 $\mu\text{m}$ , separando os dois poros de 1200 $\mu\text{m}$ e 950 $\mu\text{m}$ ; (b) mesma amostra com umidade gravimétrica de 42,8%. ....	102
FIGURA 6.30 - Tomografia de amostra contendo cinco grãos de solo, tendo cada um a medida de 500 $\mu\text{m}$ . (Fonte: Assis, 1992). ....	103
FIGURA 6.31 - Tomografia de uma amostra contendo cinco grãos de solo, imersos em argila. (Fonte: Appoloni, 1994). ....	104
FIGURA 6.32 - Sistema tomográfico utilizando um monocromador, uma tela fosforescente, um sistema de focalização óptico, um CCD plano e um microcomputador. (Fonte: Flannery et al, 1987).....	104
FIGURA 6.33 - Tomografia de uma amostra de arenito impregnada com resina epoxy, onde são vistos poros de 20 $\mu\text{m}$ a 100 $\mu\text{m}$ . (Fonte: Flannery et al, 1987). ....	105
FIGURA 6.34 - Quatro tomografias em planos consecutivos, de uma amostra de carvão. (Fonte: Flannery et al, 1987). ....	105
FIGURA 6.35 - Diagrama de bloco do tomógrafo por difração de raio X. (Fonte: Grant et al, 1993).....	106
FIGURA 6.36 - <i>Phantom</i> para a tomografia da Figura 6.37, composto de água, glicerol e óleo. (Fonte: Grant et al, 1992). ....	107
FIGURA 6.37 - Tomografias do <i>phantom</i> da Figura 6.36: (a) em transmissão direta; (b) por difração em 6,2°; (c) por difração em 8,6° e (d) por difração em 11,3°. (Fonte: Grant et al, 1993). ....	107

FIGURA 6.38 - Imagem de bolhas de ar imersas em cola, obtida por radiografia de contraste de fase. (Fonte: Wilkins et al, 1996).....	108
FIGURA 6.39 - Tomografia de uma amostra de PVC, com 2,0 mm de diâmetro externo e com orifícios de 100, 200 e 400 $\mu\text{m}$ . (Fonte: Appoloni & Cesáreo, 1994b). ....	109
FIGURA 6.40 - Tomografia de uma amostra de madeira com diâmetro externo de 3,5 mm e com um orifício de 200 $\mu\text{m}$ . (Fonte: Appoloni & Cesáreo, 1994b).....	109
FIGURA 6.41 - Tomografia de uma coluna cilíndrica, contendo solo argiloso em processo de secagem, podendo ser vistas fissuras. Resolução espacial de 100 $\mu\text{m}$ . (Fonte: Crestana & Nielsen, 1990). ....	110
FIGURA 6.42 - Tomografias de uma coluna cilíndrica com 25,4 mm de diâmetro, contendo solo argiloso úmido e uma semente de algodão. Da parte esquerda superior para a direita inferior, são vistas cinco imagens seqüenciais do topo da amostra para baixo, equidistantes em 2 mm. (Fonte: Crestana & Nielsen, 1990).....	110
FIGURA 6.43 - Tomografia de um torrão de latossolo vermelho escuro, onde podem ser vistos dois macroporos.....	111
FIGURA 6.44 - Tomografia de uma amostra de solo com selamento superficial, sendo visto em (a) as dimensões das camadas que se formaram no processo e em (b) os valores médios das unidades tomográficas por regiões.....	112
FIGURA 6.45 - Tomografia milimétrica de uma amostra do mesmo solo com selamento superficial, da Figura 6.44. (Cedida pelo Dr. Carlos M. P. Vaz).....	114
FIGURA 6.46 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L da tomografia da Figura 6.44a. ....	114
FIGURA 6.47 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L da tomografia da Figura 6. 45.....	115
FIGURA 6.48 - Microtomografia de um grão de milho, apresentando fratura: (a) plano do milho; (b) normal ao plano do milho. Obteve-se resolução de 80 $\mu\text{m}$ .....	116
FIGURA 6.49 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L, mostrando a largura naquela região. ....	116

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Dose equivalente permitida para trabalhadores conforme recomendado pelo "National Council on Radiation Protection" NCRP.....	18
TABELA 2.2 - Dose equivalente permitida por hora.....	19
TABELA 5.1 - Resumo das unidades tomográficas das imagens da Figura 5.21. ....	78
TABELA 5.2 - Valores de unidades tomográficas e coeficientes de atenuação para calibração do tomógrafo micrométrico, na energia de 28 keV.....	80
TABELA 5.3 - Valores de unidades tomográficas e coeficientes de atenuação para calibração do tomógrafo micrométrico, na energia de 60 keV.....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	- Analog-to-Digital Converter
Embrapa	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FWHM	- Full Width at Half Maximum
ICRP	- International Commission on Radiological Protection
ICRUM	- International Commission of Radiological Units and Measurement
MRA	- Método da Reconstrução Algébrica
MRF	- Método da Retroprojeção Filtrada
MTF	- Método da Transformada de Fourier
NCRP	- National Council on Radiation Protection
RMN	- Ressonância Magnética Nuclear
SIARCS	- Sistema Integrado de Análise de Raízes e Cobertura de Solos
TC	- Tomografia Computadorizada

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$	coeficiente de atenuação linear, $\text{cm}^{-1}$
$\frac{\mu}{\rho}$	coeficiente de atenuação de massa, $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
$\frac{d\sigma_{\text{sa}}}{d\Omega}$	sessão de choque diferencial, $\text{cm}^2 \cdot \text{sterrad}^{-1}$
$\sigma_c^e$	sessão de choque eletrônica, para o efeito Compton, $\text{cm}^2$
$\sigma_{\text{As}}$	sessão de choque, para o átomo, para o efeito Compton, $\text{cm}^2$
$\sigma_{\text{Pea}}$	sessão de choque, por átomo, para o efeito fotoelétrico, $\text{cm}^2$
$\rho$	densidade, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
$\tau$	passo linear, $\text{cm}$
$\alpha$	porosidade de uma amostra de solo, %
$\beta$	porosidade livre, $\% \text{ cm}^3 \cdot^{-3}$
$\theta$	umidade volumétrica, % ou $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$
$\delta_e$	densidade eletrônica, elétrons. $\text{cm}^{-3}$
$\rho_g$	densidade global de uma amostra de solo ou densidade aparente, $\text{g} \cdot \text{cm}^3$
$\rho_s$	densidade das partículas de uma amostra de solo ou densidade real, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
$\bar{A}$	número médio de quanta absorvido no efeito fotoelétrico, fótons. $\text{s}^{-1}$
$E$	energia de um fóton, eV
$E_c$	máxima energia absorvida permitida para o corpo humano, $\text{erg} \cdot \text{h}^{-1}$
$E_m$	máxima energia absorvida permitida para mãos e antebraço, $\text{erg} \cdot \text{h}^{-1}$
$I$	intensidade do feixe que atravessa uma amostra, fótons
$I_0$	intensidade do feixe incidente sobre uma amostra, fótons

$\bar{I}$	densidade de fluxo, fótons.s <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>
$m$	número de projeções de uma tomografia
$m_l$	massa da solução de uma amostra de solo, g
$m_p$	massa da fase gasosa de uma amostra de solo, g
$m_s$	massa das partículas sólidas de uma amostra de solo, g
$m_T$	massa total de uma amostra de solo, g
$N$	número de passos em uma projeção
$p(r,\phi)$	raio-soma
$Q(r,\phi)$	raio-soma corrigido através da aplicação de um filtro sobre $p(r,\phi)$
$S$	índice de saturação, %
$\bar{S}$	radiação espalhada em todas as direções, no efeito Compton, fótons.s <sup>-1</sup>
$\bar{S}(\Theta)$	radiação espalhada numa direção $\Theta$ , no efeito Compton, fótons.s <sup>-1</sup> .sterrad <sup>-1</sup>
$V_l$	volume da solução de uma amostra de solo, cm <sup>3</sup>
$V_p$	volume da fase gasosa de uma amostra de solo, cm <sup>3</sup>
$V_s$	volume das partículas sólidas de uma amostra de solo, cm <sup>3</sup>
$V_T$	volume total de uma amostra de solo, cm <sup>3</sup>
$w$	umidade gravimétrica, % ou g.g <sup>-1</sup>
$Z$	número atômico

## RESUMO

MACEDO, A. (1997). *Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em Ciências do Solo e do Ambiente*. São Carlos, 1997. 129p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A Ciência do Ambiente e a Ciência do Solo, há décadas, procuram compreender e modelar os fenômenos que ocorrem no solo, principalmente na zona não saturada. Como o entendimento de muitos desses fenômenos depende de uma investigação em nível de poros e agregados, desenvolveu-se, aqui, um tomógrafo de raios X, de resolução micrométrica, com o objetivo de se obterem imagens, de forma não destrutiva, do interior de amostras de solo, com resolução espacial de pelo menos 100  $\mu\text{m}$ . Foi possível projetar e construir um equipamento de baixo custo, comparativamente aos equipamentos comerciais disponíveis, de alta resolução, para uso, principalmente, na área médica e na indústria, com preços proibitivos para aplicações em solo e ambiente. Inicialmente, obtiveram-se imagens de *phantoms* de acrílico com orifícios de 500  $\mu\text{m}$ , *phantoms* de resina epoxy e  $\text{PbO}_2$ , com orifícios de 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ , amostras de solos peneirados com agregados de 212  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$  e de microesferas de vidro com diâmetros de 212  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ . Foram identificados poros medindo 100  $\mu\text{m}$  ou menos. Poros dessa dimensão foram visualizados, também, em tomografias de amostras compostas de grãos de areia de 1mm e raízes. Como um exemplo do potencial do método e do equipamento, foi possível detectar os fenômenos do selamento superficial em amostras não deformadas de solo, onde nota-se a presença de três camadas bem distintas, com diferentes densidades e composições texturais, nas dimensões de 1000 $\mu\text{m}$ , 500 $\mu\text{m}$  e 1700 $\mu\text{m}$ . Os colimadores, aqui construídos, possibilitaram operar com energias de 60 keV, viabilizando o trabalho com amostras de cerca de 10 mm.

*Palavras-chave: tomografia, microtomografia, solo, raio X, agricultura, meio-ambiente, meios-porosos.*

## ABSTRACT

MACEDO, A. (1997). *Construction and use of a microscale tomograph dedicated to Environmental Science and Soil Science applications*. São Carlos, 1997. 129p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

During the last decades Environmental Sciences and Soil Sciences are dealing with the understanding and modelling of the phenomena occurring in soils, mainly those related to the non-saturated zone. As the comprehension of most of those phenomena depend on the investigation at the pore and aggregate levels, a home made microscopic scale X-ray tomograph was built to get non-destructive images of soil samples, within a 100  $\mu\text{m}$  spatial resolution. It was possible to design and construct a low cost equipment as compared to commercially available tomographs designed principally for medical and industrial purposes, wich are very expensive and consequently of restricted using in soil and environmental studies. Tomographies of acrylic phantoms with internal 500  $\mu\text{m}$  holes and tomographies of epoxy-PbO<sub>2</sub> composite, with 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  and 300  $\mu\text{m}$  holes were obtained. Also images of sieved soils showing 212  $\mu\text{m}$  to 250  $\mu\text{m}$  aggregates and 212  $\mu\text{m}$  to 500  $\mu\text{m}$  glass beads were obtained. Pores with 100  $\mu\text{m}$  size or less can be observed. Pores with the same size can be detected in 1mm size sand grains and roots tomographies. Soil crusting and sealing were also observed in natural samples as an example of the potential of the method and equipment for soil investigations. The image shows three layers of different densities and soil textures with 1000  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  and 1700  $\mu\text{m}$  thick. It was possible to make tomographies of 10 mm size samples. The colimators built here made it possible to operate with 60 keV energies.

*Keywords: tomography, microtomography, soil, X-ray, agriculture, environment, porous media.*

## 1. INTRODUÇÃO

O trabalho desenvolvido nessa tese dá uma contribuição às áreas da Ciência do Solo e da Ciência do Ambiente, através de um equipamento e seu uso na investigação de características físicas de amostras de solo, sem destruí-las, em uma escala micrométrica. Cabe, porém, antes, mostrar quais foram as circunstâncias que motivaram esse trabalho, bem como apresentar os atores desse cenário que fizeram com que conhecimentos fossem acumulados, permitindo que se desse esse novo passo além da fronteira tecnológica.

Embora tendo sido motivados a procurar a formação básica superior pelos mesmos interesses que a maioria dos estudantes, com o amadurecimento profissional surgiu a consciência de que a única forma do nosso país sair do patamar econômico e social em que se encontrava era através da busca pelo avanço cultural e tecnológico. Isso fez com que em 1987, após dez anos de atividades profissionais em duas indústrias multinacionais, optássemos por um novo caminho e procurássemos o Grupo de Instrumentação Eletrônica do Instituto de Física de São Carlos, sendo ali desenvolvido o nosso programa de mestrado, com a construção de um equipamento para registro de ruídos em redes elétricas, sob orientação do Prof. Valentin Obac Roda.

A experiência adquirida durante o mestrado possibilitou o nosso ingresso na Embrapa / Instrumentação Agropecuária, em 1989. Isso nos colocou em contato com pesquisadores que fizeram parte de trabalhos pioneiros, internacionalmente, em tomografia aplicada a solos como o Prof. Sérgio Mascarenhas, o Dr. Paulo E. Cruvinel e o Dr. Sílvio Crestana. Ao início desse projeto, o grupo contava com uma experiência de dez anos nessa área. Os trabalhos desse grupo, bem como de outros pesquisadores e alunos que a ele se juntaram, como o Dr. Carlos M. P. Vaz, o MSc.

João M. Naime e muitos outros, são citados ao longo dessa tese, cabendo lembrar aqui, entre vários, o desenvolvimento da metodologia para aplicação da tomografia computadorizada em Ciência do Solo, a construção de um minitomógrafo para uso em Ciência do Solo, a determinação da densidade, da umidade e da compactação de solos devido ao manejo, utilizando a tomografia computadorizada.

Embora não relacionada com tomografia, não pode ser esquecida a contribuição multidisciplinar prestada por outros grupos da Embrapa/Instrumentação Agropecuária, através do seu conhecimento nas diversas áreas que esse centro atua e que, de uma forma ou de outra, acabaram enriquecendo o nosso desenvolvimento. Entre as diversas atividades, podem-se citar as aplicações da ressonância magnética nuclear e ressonância paramagnética eletrônica, espectroscopias de infravermelho, ultravioleta e PIXE, processamento de imagens digitais, processamento de dados, modelagem e simulação, desenvolvimento de equipamentos e manutenção de equipamentos laboratoriais.

Também grupos de outras instituições fizeram conosco um intercâmbio de idéias que trouxe bons frutos, estando entre eles o Grupo da Engenharia Nuclear do COPPE, através dos Profs. Ricardo Tadeu Lopes e Joaquim Teixeira de Assis, da Universidade de Roma, através do Prof. Roberto Cesareo, da Universidade de Londrina, através do Prof. Carlos Roberto Appoloni, da Universidade Estadual de Santa Catarina, através dos Profs. Paulo C. Philippi e João Borges Laurindo; do CENA, através dos Profs. Klaus Reichardt, Osny Bacchi e Paulo Libardi e da Universidade Estadual de Pelotas, através do Prof. Eloy Antônio Pauletto, do MSc. Alceu Pedrotti e do MSc. Marcelo Biassusi.

A seguir serão abordados aspectos relacionados a esse trabalho como caracterização do problema, estado da arte da tomografia, objetivos da tese e um breve panorama sobre o conteúdo dos capítulos.

### 1.1 Problema e sua importância

A preocupação nacional e internacional relativa à urgente necessidade de conservação do meio ambiente, bem como a preocupação de reverter o processo de destruição já existente, tem crescido progressivamente. Ela tem norteado a pesquisa na busca de 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 (Flores & Silva, 1992). Nesta linha de raciocínio, as diversas áreas do conhecimento têm procurado associar-se, viabilizando a consecução de projetos interdisciplinares e temáticos.

Uma área do conhecimento que tem merecido atenção, em função da importância do objeto de suas pesquisas é a Ciência do Solo. Pesquisadores das mais diversas especialidades 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, municipais ou mero sustentáculo de plantas para fins agrícolas. Do ponto de vista científico e metodológico mais recente e relacionado a esta tese, trabalhos importantes podem ser citados, estando entre eles a utilização de um tubo de raios X pelo grupo do COPPE, liderado pelo Dr. Ricardo T. Lopes, contando com a colaboração do Prof. Roberto Cesareo (Assis, 1992), o estudo do fenômeno *fingering* em um meio poroso através de imagens e teoria da percolação por invasão, liderado pelo Dr. Sílvio Crestana (Posadas, 1994), a simulação de processos de invasão de fluidos não molhantes, do grupo liderado pelo Dr. Paulo Phillippi (Fernandes, 1994), a construção de um tomógrafo de campo, liderado pelo Dr. Crestana (Naime, 1994), trabalhos em microtomografia de raios X, desenvolvidos pelo Dr. Carlos R. Appoloni, com a colaboração do Prof. Roberto Cesareo (Appoloni, 1994), o transporte, previsão do destino e balanço de pesticidas no solo, liderado pelo Dr. Crestana, em parceria com pesquisadores da USP, como Prof. Klaus Reichardt, do IAC, como o Prof. Francisco Lombardi e Prof. Sidnei Vieira, sob financiamento da FAPESP e da Embrapa (Crestana, 1995), a análise de transferência de massa de um sistema poroso capilar, liderado pelo Dr. Álvaro Toubes

Prata (Xuefeng, 1995), trabalhos sobre qualidade de imagens em tomografia, liderados pelo Dr. Paulo E. Cruvinel (Ribeiro, 1994; Ribeiro Júnior, 1995), o estudo experimental sobre evaporação em meios porosos, utilizando modelos de percolação (Laurindo, 1996), o uso da tomografia de dupla energia, para avaliar expansão e contração de vertissolos, liderado pelos Drs. Eloy Antônio Pauletto e Sílvio Crestana (Biassusi, 1996) e a avaliação, utilizando, entre outras técnicas, a tomografia computadorizada, de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo, também liderada pelos Drs. Pauletto e Crestana (Pedrotti, 1996). Outros trabalhos serão citados no decorrer de outros capítulos.

Nota-se, acima, a preocupação da comunidade científica com o solo. Para uma rápida reflexão sobre a questão do uso do solo, vejamos alguns aspectos a ele relacionados. Sposito & Reginato (1992) o descrevem como reproduzido a seguir:

*"O solo é um meio poroso estruturado, biologicamente ativo, que se desenvolveu na superfície de nosso planeta. Este material, suporte da vida, foi criado e continua a evoluir através de processos atmosféricos de desagregação causados por influências biológicas, climáticas, geológicas e topográficas. Apesar da variabilidade espacial e temporal dos solos, possuem uma característica que é única: o solo é uma seqüência vertical e sistemática de camadas produzidas pela ação combinada dos organismos vivos e da percolação das águas."*

A descrição acima nos leva a refletir que todo estudo sobre sustentabilidade de sistemas, aos quais o solo esteja integrado, deva dirigir seu foco para as suas características físicas, químicas e biológicas. Não podemos nos esquecer, também, de que o solo não é somente o substrato no qual se desenvolvem organismos vivos. Ele é, também, o meio sobre o qual edificações, silos, armazéns e estradas são construídos e no qual os resíduos líquidos e sólidos produzidos pela indústria, pelo comércio e pela população são armazenados ou distribuídos. Os solos são fontes essenciais dos recursos renováveis, são integradores e dissipadores da energia solar para produção de biomassa e são o filtro vivo e purificador dos nossos recursos hídricos e dos despejos ali colocados (Sposito & Reginato, 1992).

A Ciência do Solo, já há muito tempo, vem prestando sua contribuição na solução de muitos problemas relacionados à agronomia e aos recursos naturais, como pode ser visto nos trabalhos já citados. Alguns desses problemas são:

- Conservação do solo e dos recursos hídricos;
- Minimização da poluição do ar, das águas e do solo;
- Desenvolvimento de sistemas de irrigação e drenagem mais eficientes e com custos mais efetivos e
- Otimização da eficiência do uso da água e de nutrientes na produção agrícola.

Apesar do esforço dessa área, nossos recursos naturais continuam sofrendo um desgaste causado pela pressão populacional, pelas perdas da cobertura vegetal e da biodiversidade, pela degradação do solo, e pelas mudanças climáticas do planeta e poluição, tanto nas áreas desenvolvidas como em desenvolvimento (Sposito & Reginato, 1992). Todo este desgaste tem se manifestado na forma de:

- Erosão do solo, acelerada pela remoção da vegetação de proteção;
- Desertificação, provocada pela precipitação de agentes agressivos, concentração excessiva de animais, corte de árvores para combustível e pela fragilidade dos recursos do solo;
- Perda irreversível de áreas cultiváveis devido às rápidas industrialização e urbanização, sem um planejamento prévio de uso da terra ;
- Movimento de pesticidas e outros poluentes, provenientes da agricultura, para os recursos hídricos e
- Efeitos nocivos de depósitos ácidos sobre a vegetação, sobre o solo e sobre a vida aquática.

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).

### *1.2 Técnicas atuais para investigação de parâmetros físicos do solo*

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  $\gamma$ , 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 (Nielsen et al., 1986; Crestana & Nielsen, 1990; Crestana, 1994).

Com o advento de novas metodologias originárias das diversas áreas do conhecimento, algumas técnicas experimentais têm sido utilizadas pela primeira vez no domínio dos solos (Crestana et al, 1996a). Entre elas podem ser citadas; as espectroscopias de ressonância magnética nuclear e paramagnética eletrônica (Colnago et al, 1996); as espectroscopias de infravermelho, ultravioleta visível (Martin-Neto et al, 1996) e PIXE (Cruvinel et al, 1993); a espectroscopia de fluorescência (Jones, 1982); espectroscopia de plasma (Boaventura, 1991); a tomografia sísmica (Nolet, 1987); o sensoriamento remoto (Torre Neto, 1996); a reflectometria no domínio do tempo (Herrmann, 1993); as microscopias de varredura, de tunelamento e de força atômica (Vaz et al, 1993) e a voltametria (Vaz, 1994). Também em Crestana & Vaz (1997) pode-se ter um panorama do emprego da

instrumentação na pesquisa em manejo e conservação do solo, onde várias técnicas são apresentadas e entre elas descreve-se a microtomografia.

“A importância da TC como um novo método e um novo instrumento cresceu tanto em Ciência do Solo que a Sociedade Americana de Ciência do Solo organizou um simpósio específico sobre o tema.” (Anderson & Hopmans, 1994; Crestana et al, 1996b).

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  $\gamma$  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 por raios X ou  $\gamma$ , entretanto, não sofre as restrições acima, podendo-se usá-la na presença de materiais paramagnéticos, bem como efetuarem-se calibrações, correlacionando os coeficientes de atenuação com valores de densidade e umidade. Uma descrição do método pode ser obtida em Cormack (1963), Hounsfield (1973), em Brooks e Di Chiro (1976), Hendee (1983 e 1984), em Ahluwalia (1989) e em Crestana et al (1996b).

A TC de raios X, de radiação  $\gamma$  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 (Petrovic, 1982; Hainsworth & Aylmore, 1983; Crestana et al, 1985; Crestana et al, 1986; Cruvinel, 1987; Crestana et al, 1988; Vaz et al, 1989; Warner et al, 1989; Crestana & Nielsen, 1990; Cruvinel et al, 1990; Aylmore, 1993) e muitas respostas 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  $\mu\text{m}$ , já disponível para examinar, geometricamente, as complexidades pertinentes à retenção, ao transporte, ao deslocamento da água e de seus solutos na presença de ar assim como fluidos orgânicos em sistemas multifásicos (Crestana & Nielsen, 1990; Crestana et al, 1996b). No entanto, este equipamento está restrito a aplicações militares e industriais. Foi construído pela ARACOR, Sunnyvale-CA, custa mais de um milhão de dólares e é dedicado à análise de objetos com densidade elevada e de grandes dimensões se comparados a amostras de solo. Outros resultados são apresentados por Flannery et al (1987), Cesareo et al (1993b), Assis et al (1992), Grant et al (1993), Appoloni & Cesareo (1994), Assis (1994) e Cesareo et al (1994b). Estes resultados, como pode ser visto no capítulo 6, entretanto, estiveram restritos a amostras com três milímetros ou menos, impedindo sua aplicação com amostras de solo indeformadas. No trabalho aqui desenvolvido, trabalhou-se com amostras indeformadas de até 10 mm. Um dos pontos críticos, aqui vencidos, foi a construção de colimadores que puderam trabalhar em energias de até 60 keV. A limitação de energia máxima de 60 keV, aliás, esteve mais ligada ao tubo que substituiu o tubo inicial, por motivos de vida útil.

Um outro fator importante no equacionamento dos fenômenos que ocorrem no solo é a invariância de escala, ou seja, a transferência do comportamento de alguns parâmetros em uma escala para outras, sem perda da informação. Há uma forte evidência de invariância de escala em níveis estrutural e comportamental, nos solos e argilas (Van Damme, 1995). Isto representa uma considerável simplificação na descrição dos fenômenos. Entretanto, as bases dos modelos atuais correlacionando os dados estruturais com as leis hidráulicas ou hidromecânicas carecem, ainda, de um maior desenvolvimento. No caso do solo, o principal problema é descobrir qual aspecto estrutural de um certo tipo de solo exibe invariância de escala: a interface sólido-poro, os espaços vazios ou o sólido. Para cada um destes aspectos, qual a faixa de validade desta invariância? As respostas atuais são ambíguas e, apesar da enorme quantidade de trabalhos sobre a estrutura e a hidráulica dos solos e do progresso em se relacionar o comportamento hídrico a dados simples como a distribuição granulométrica, ainda sente-se a falta de estudos de casos onde os vazios, os sólidos e a geometria de interfaces tenham sido caracterizados e reconstruídos,

tridimensionalmente, e relacionados a medidas físicas tais como retenção de água e capacidade de adsorção, entre outras. Dentro desta linha de raciocínio busca-se, nas pesquisas atuais, entender a evolução da interface sólido-vazio e a morfologia do espaço poroso, à medida que se vai do estado gel de saturação hídrica para o estado sólido não saturado e não completamente fragmentado.

### **1.3 Objetivos**

Os objetivos desse trabalho são o projeto e a construção de um tomógrafo com resolução espacial de pelo menos 100  $\mu\text{m}$ , e o seu potencial de uso explorado e testado através de algumas aplicações, utilizando amostras homogêneas construídas artificialmente (*phantoms* de acrílico e esferas de vidro) e amostras homogêneas e heterogêneas de solos, tanto indeformadas como deformadas.

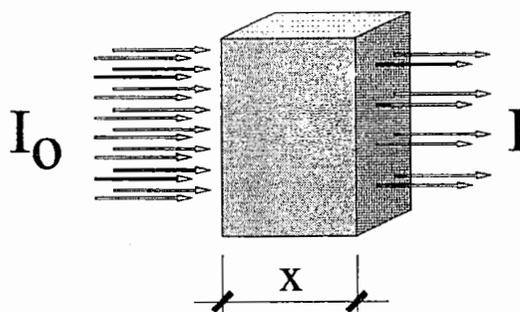
### **1.4 Descrição sucinta do conteúdo de cada capítulo**

A seguir, no capítulo 2, serão discutidos os principais tópicos relativos à interação da radiação com a matéria, concernentes com o presente trabalho. No capítulo 3, serão abordados os procedimentos para se obter a reconstrução de uma imagem a partir da atenuação da radiação incidente sobre uma amostra, bem como o funcionamento e as várias gerações de tomógrafos. Apresentam-se, neste capítulo, também, alguns exemplos de possíveis aplicações da TC em estudos de solo. No capítulo 4, serão apresentados alguns conceitos e definições básicas da física do solo, úteis neste trabalho. No capítulo 5, serão apresentados os elementos constituintes do tomógrafo de resolução micrométrica, a sua montagem, a metodologia empregada, os programas de controle e reconstrução. No capítulo 6, serão apresentados os resultados obtidos e uma discussão sobre eles e comparação com outros trabalhos da literatura. No capítulo 7 serão apresentadas as conclusões desse trabalho e algumas sugestões de trabalhos futuros.

## 2. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA: ASPECTOS BÁSICOS

A radiação, ao interagir com a matéria, pode ter a sua intensidade e o seu espectro de energia alterados.

Considere-se uma amostra homogênea, de espessura  $x$ , conforme mostrada na Figura 2.1, recebendo um feixe de fótons  $I_0$ .



**Figura 2.1 - Atenuação de um feixe de fótons por uma amostra homogênea.**

Definindo-se como  $\mu$  a probabilidade média de um único fóton ser absorvido em um comprimento unitário de uma amostra homogênea, a taxa de decréscimo da intensidade de um feixe monoenergético,  $-dI/dx$ , será igual ao produto da probabilidade de absorção de um fóton pelo número de fótons (Wang et al, 1975). Ou seja:

$$-\frac{dI}{dx} = \mu \cdot I_0 \quad (2.1)$$

Resolvendo-se a equação 2.1 acima, chega-se a:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (2.2)$$

A Eq.2.2 é conhecida como lei de Beer e  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) é conhecido como coeficiente de atenuação linear.

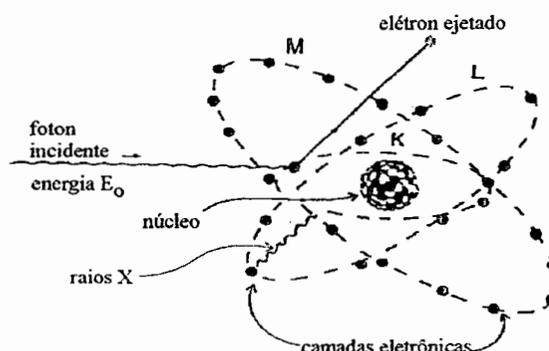
### 2.1 Formas de interação da radiação com a matéria

As três principais formas de interação da radiação com a matéria, para energias médias e baixas ( $E \leq 1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$ ), e que serão discutidas adiante, são:

- Efeito fotoelétrico
- Efeito Compton
- Espalhamento coerente

#### 2.1.1 Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é um fenômeno, no qual, um fóton transfere toda a sua energia a um elétron que, conseqüentemente, é ejetado do átomo, conforme ilustrado na Figura 2.2. Quando a radiação está na faixa do visível, esta possui energia para retirar elétrons apenas das camadas mais externas, pois estes possuem energia de ligação menores. Porém, no caso da radiação X ou  $\gamma$ , há energia suficiente para romper a energia de ligação de elétrons de camadas mais internas (Eisberg, 1966).



**Figura 2.2 - Interação do fóton com o elétron no efeito fotoelétrico.**

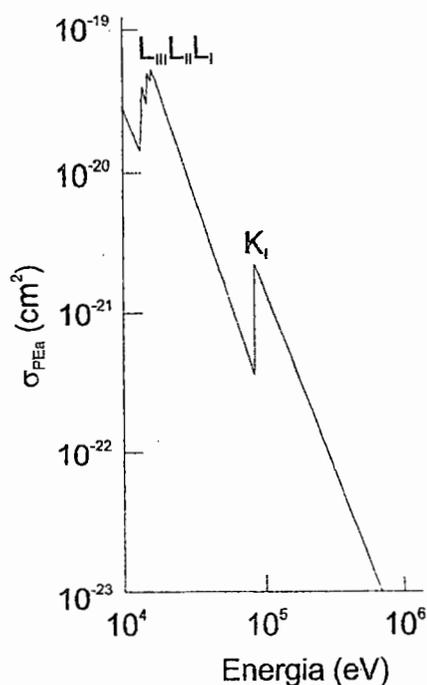
Pode-se definir uma constante de proporcionalidade entre a energia espalhada por um elétron ou por um átomo e a energia incidente sobre o mesmo. Essa constante é a

sessão de choque e pode ser considerada como uma probabilidade de interação. Para o efeito fotoelétrico, ela depende de  $Z^4$  para energias baixas e  $Z^5$  para energias altas, sendo  $Z$  o número atômico. A variação com a energia incidente  $E$  é de  $E^{3,5}$  (Eisberg, 1966). Cesareo & Storelli (1991) encontraram valores de 3,2 a 3,9 para o expoente de  $Z$ , ao trabalharem com materiais biológicos ( $Z = 4$  a  $16$ ). A sessão de choque, para o efeito fotoelétrico,  $\sigma_{Pea}$ , pode ser definida de tal forma que o número médio de quanta absorvidos por segundo e por átomo,  $\bar{A}$ , possa ser escrita como:

$$\bar{A} = \sigma_{Pea} \cdot \bar{I} \quad (2.3)$$

onde  $\bar{I}$ : número de quanta do feixe por segundo e por  $\text{cm}^2$ ;

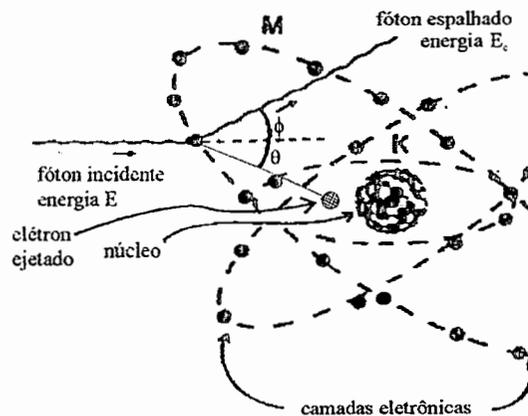
À medida que a energia diminui, cresce a probabilidade de interação, até atingir-se a energia de ligação onde a transferência cai abruptamente para zero, para o elétron da camada em questão. Continua a haver, porém, uma probabilidade de interação com o elétron da camada mais externa, até ser atingida a energia de ligação desse e assim por diante. Na Figura 2.3 vê-se a variação da secção de choque atômica para o chumbo, onde podem-se notar as descontinuidades nas várias energias de ligação.



**Figura 2.3 - Secção de choque do chumbo, por átomo, para o efeito fotoelétrico.**  
(Fonte: Eisberg, 1966).

### 2.1.2 Efeito Compton

Segundo a teoria quântica da luz, os fótons comportam-se como partículas, a menos do fato de não possuírem massa em repouso. Desta forma, pode-se conceber a idéia de colisões entre fótons e elétrons da mesma forma que a mecânica clássica aborda os choques entre bolas de bilhar (Beiser, 1969). Na Figura 2.4 é mostrada uma interação deste tipo entre um fóton e um elétron. Inicialmente supõe-se que o elétron esteja em repouso em relação a um sistema de coordenadas de laboratório. O fóton, após a colisão, é espalhado, mudando a sua rota original e a sua energia e o elétron começa a movimentar-se. A energia do fóton espalhado é menor que a energia do fóton incidente.



**Figura 2.4 - Interação de um fóton com um elétron no efeito Compton.**

O espalhamento do feixe incidente pode dar-se em qualquer direção e a secção de choque, para todas as direções, pode ser definida como a relação entre os quanta incidentes  $\bar{I}$  e os quanta espalhados  $\bar{S}$  da seguinte forma:

$$\bar{S} = \sigma_{Sa} \cdot \bar{I} \quad (2.4)$$

Para um determinado ângulo de interesse  $\phi$  em relação à direção do feixe incidente, pode-se definir  $\bar{S}(\phi)$  como a energia média espalhada por segundo por ângulo sólido unitário e estabelecer a seguinte relação:

$$\bar{S}(\phi) = \frac{d\sigma_{Sa}}{d\Omega} \cdot \bar{I} \quad (2.5)$$

onde  $d\Omega$  é um elemento de ângulo sólido, na direção considerada.

A equação da variação da secção de choque em função de  $\phi$  e da energia podem ser vistos em Eisberg (1966). A Figura 2.5 mostra essa variação.

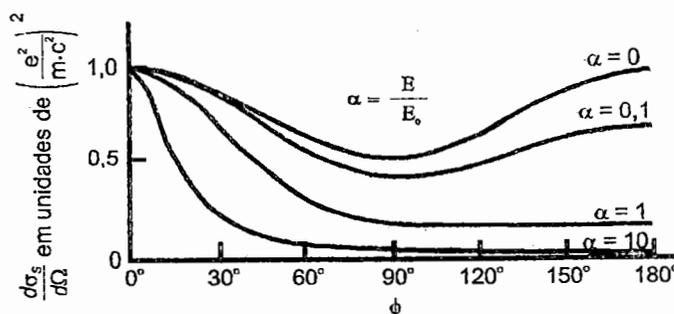


Figura 2.5 - Seção de choque diferencial para o espalhamento Compton, para um elétron livre. (Fonte: Eisberg, 1966).

O parâmetro  $\alpha$  é a relação entre energia do feixe incidente,  $E$ , e a energia do elétron em repouso,  $E_0$  (511 keV).

### 2.1.3 Espalhamento coerente

Quando um feixe de fótons passa pelo campo elétrico criado por um elétron, ocorre um espalhamento esférico centrado no elétron, devido à interação deste com a onda eletromagnética do feixe. Quando a interação ocorre com um grupo de elétrons, há em cada ponto do espaço uma soma das ondas espalhadas. Dependendo da fase de cada onda, o espalhamento, em parte, será coerente e, em parte, será incoerente. Este último é conhecido como efeito Compton e já foi visto, anteriormente.

O espalhamento coerente produz efeitos de refração bem como de difração do feixe de fótons incidente. Para o caso de solos, esse efeito pode ser desprezado (Cesareo et al, 1994a).

## 2.2 Coeficiente de atenuação de massa

Uma outra definição importante em medidas da interação da radiação com a matéria refere-se ao coeficiente de atenuação de massa. Para tal, pode-se reescrever a equação 2.2 da seguinte forma:

$$I = I_0 \cdot e^{-(\mu/\rho) \cdot \rho \cdot x} \quad (2.6)$$

onde  $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) é o coeficiente de atenuação de massa e  $\rho$  ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) é a densidade do material.

Segundo Cesareo et al (1993b e 1994a) o coeficiente de atenuação linear relaciona-se com o número atômico efetivo  $Z_{ef}$ , na faixa em que predomina o efeito fotoelétrico, e com a secção de choque eletrônica Compton  $\sigma_c^e$ , na faixa onde prevalece este efeito, conforme as equações 2.7 e 2.8, respectivamente, onde  $\delta_e = \rho \cdot (N_A \cdot Z/A)$  (elétrons por  $\text{cm}^3$ ) é a densidade eletrônica e  $\beta$  é uma constante.

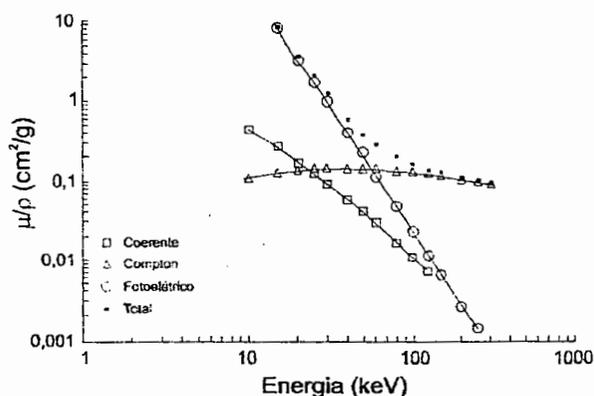
$$\mu = \beta \cdot \rho \cdot Z_{ef}^3 \quad (2.8)$$

$$\mu = \delta_e \cdot \sigma_c^e \quad (2.9)$$

$N_A \cdot Z/A$  para os átomos de baixo número atômico que, em geral, constituem os solos é uma constante, o mesmo ocorre com  $\sigma_c^e$ , para uma determinada energia. Pode-se escrever, nessas condições, que:

$$\frac{\mu}{\rho} = \text{constante} \quad (2.10)$$

Essa equação mostra que, na faixa onde predomina, fortemente, o efeito Compton, a atenuação é devida somente à densidade do material. A Figura 2.6 mostra a contribuição das três formas de interações citadas no item 2.1, para o caso de um solo típico. Conforme já citado, pode-se notar que o espalhamento coerente pode ser desprezado.



**Figura 2.6 - Coeficientes de atenuação de massa para os efeitos fotoelétrico, Compton e coerente, para um solo, em função da energia.** (Fonte: Cesareo et al, 1994a).

## 2.3 Blindagem

Por ser a proteção radiológica um capítulo extenso da física da saúde, serão abordados, aqui, somente os seus aspectos que interessaram ao cálculo da blindagem que foi construída para proteger os usuários do sistema, contra a radiação de fuga do tubo de raio X. O cálculo em si será apresentado no capítulo 5.

### 2.3.1 Definição de termos e unidades

Os termos, a seguir, estão em concordância com a International Commission of Radiological Units and Measurements (Morgan & Turner, 1982).

*Coefficiente de absorção linear*  $\mu_{ab}$  (unidade:  $\text{cm}^{-1}$ ): diferença entre o coeficiente de atenuação  $\mu$  e o coeficiente de atenuação devido ao espalhamento Compton.

*Densidade de fluxo* (unidade:  $\text{fótons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ): Fluência por unidade de tempo.

*Dose absorvida* (unidade: Gray): quantidade de energia cedida por uma radiação ionizante a uma amostra por unidade de massa.  $1 \text{ Gray} = 1 \text{ Joule} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

*Dose equivalente* (unidade: Sievert): definido para fins de proteção radiológica como o produto da dose absorvida pelo fator de qualidade QF.

*Exposição* (unidade: Roentgen - R): quantidade de carga (de qualquer sinal) produzida no ar por uma radiação  $\gamma$  ou X por unidade de massa do ar.  $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Coulomb/kg}$ .

*Fator de Qualidade QF*: fator numérico dependente do tipo e da energia da radiação incidente. Para radiações  $\gamma$  e X,  $QF = 1$ .

*Fluência* ( $\text{fótons} \cdot \text{cm}^{-2}$ ): relação entre o número de fótons ou partículas que penetram uma esfera imaginária colocada no campo de uma radiação e a secção transversal dessa esfera.

### 2.3.2 Valores admissíveis e conversões

Os valores admissíveis de dose equivalente para o corpo e para os órgãos para exposição ocupacional são apresentados na Tabela 2.1 (Morgan & Turner, 1982).

**Tabela 2.1 - Dose equivalente permitida para trabalhadores conforme recomendado pelo "National Council on Radiation Protection" NCRP, dos E.U.A.**

Órgãos	Dose equivalente máxima permitida em qualquer período consecutivo de 13 semanas (Sv)	Dose equivalente máxima permitida anual (Sv)
corpo todo, cabeça, tronco	0,03	0,05
pele, tireóide e ossos	0,10 (0,15)*	0,30
pés, tornozelos, mãos e antebraços	0,25 (0,38)*	0,75
outros órgãos	0,05 (0,08)*	0,15

\* Os valores recomendados pela "International Commission on Radiological Protection" ICRP são iguais aos do NCRP, exceto para os casos indicados entre parênteses.

#### *Conversão de exposição para fluência*

Morgan & Turner (1982) apresentam a seguinte conversão de exposição para fluência:

$$IR = \frac{2,08 \cdot 10^3 \cdot W}{E \cdot (\mu_{ab})_{ar}} \text{ fotons. cm}^{-2} \approx \frac{2,15 \cdot 10^9}{E} \text{ fotons. cm}^{-2} \quad (2.13)$$

onde  $W$  é a energia necessária para produzir um par de íons em eV por par de íons e considerado o valor médio de 34 eV.  $E$  é a energia dos fótons em MeV e  $(\mu_{ab})_{ar}$  é o coeficiente de absorção linear do ar. Essa equação aproximada possui um erro, para a faixa de 0,07 a 2,00 MeV, igual ou inferior a 13% e que foi considerado nos cálculos.

*Conversão da Tabela 2.1 para valores horários*

Foram considerados para a conversão para valores horários, os valores apresentados na coluna de dose equivalente anual, para uma jornada de 40 horas semanais e para um ano de 50 semanas.

**Tabela 2.2 - Dose equivalente permitida por hora.**

Órgãos	Dose equivalente máxima permitida ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ )
corpo todo, cabeça e tronco	25
pele, tireóide e ossos	150
pés, tornozelos, mãos e antebraços	375
outros órgãos	75

Considerando-se as partes mais envolvidas no trabalho com esse tomógrafo, os cálculos foram feitos para o corpo todo, para as mãos e antebraço. Para o corpo, considerou-se um indivíduo de 60 kg e com uma área frontal de  $180 \times 50 \text{ cm}^2$ . Para o caso das mãos e antebraços foi considerada uma massa de 1kg e uma área frontal de  $50 \times 10 \text{ cm}^2$ . Assim sendo, a energia máxima permitida para o corpo todo  $E_c$ , considerando-se que  $QF = 1$ , será dada por:

$$E_c = 25 \cdot 10^{-6} \times 60 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Joule} \cdot \text{h}^{-1} \quad (2.14)$$

Para o caso das mãos e do antebraço, tem-se a energia  $E_m$ , dada por:

$$E_m = 375 \cdot 10^{-6} \times 1 = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ Joule} \cdot \text{h}^{-1} \quad (2.15)$$

### 3. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

O estudo do interior de amostras, sem destruí-las ou alterar suas propriedades, sempre foi alvo da atenção de pesquisadores de diversas áreas. Com o advento da descoberta do raio X por Wilhelm Conrad Röntgen, em 1895, estava dado o primeiro passo para a solução de inúmeros problemas, cujas soluções estavam relacionadas ao conhecimento das propriedades internas dos corpos.

As primeiras aplicações do raio X foram no campo da radiografia, sendo a primeira registrada a da mão da esposa de Röntgen.

Na radiografia, o objeto a ser examinado é colocado entre uma fonte de raio X e um filme. O que se obtém é uma sombra projetada, cuja aparência dependerá da atenuação da radiação pelos diversos elementos constituintes do corpo. Esta sombra contém, apenas, informações médias na direção da projeção, devido à sobreposição dos diversos planos projetados sobre o filme. Perde-se a informação espacial.

A necessidade de conhecer detalhes internos das amostras levou Cormack (1963) ao desenvolvimento de uma técnica matemática para resolver o problema de, dado um conjunto de projeções em várias direções de um feixe de raios X ou  $\gamma$ , determinar-se a distribuição espacial dos coeficientes de atenuação em uma fatia da amostra. Com este procedimento, consegue-se, através de uma projeção no sentido inverso, reconstituir a imagem da fatia em questão. Daí o nome da técnica: **Tomografia por Retroprojeção**. Com a utilização de filtros para eliminar artefatos, como será visto no item 3.1, acrescentou-se o termo **Filtrada**.

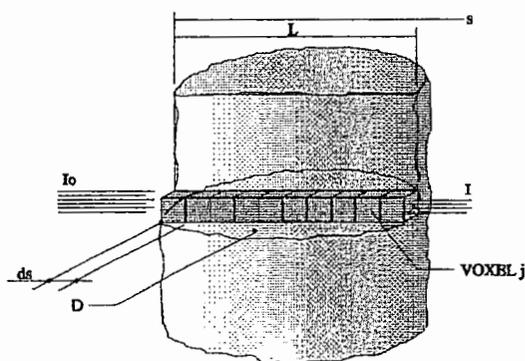
Esse desenvolvimento matemático será apresentado, aqui, apenas nos aspectos diretamente ligados a este trabalho, uma vez que já foi tratado, amplamente, por outros autores, além de Cormack (Brooks & Di Chiro, 1976; Hounsfield, 1973; Hendee, 1983 e 1984; Ahluwalia, 1989; Rosenfeld & Kak, 1982). Será feita, apenas, uma breve revisão dos aspectos mais relevantes da tomografia.

### 3.1 Retroprojeção filtrada

No ano de 1956, a absorção exponencial de raios X ou gama, atravessando meios homogêneos, já era conhecida e utilizada havia muito tempo, em radiologia e radioterapia. Nesta época, Cormack, convidado a ser o físico responsável pelo Hospital Groote Schuur, na Cidade do Cabo, atentou para a importância do desenvolvimento de um método que permitisse medir os coeficientes de atenuação de meios heterogêneos, como é o caso do corpo humano.

O conhecimento dessas medidas teria importância não só para os diagnósticos radiológicos, mas também em radioterapia, onde necessita-se aplicar uma dose conhecida de radiação em uma determinada região interior do paciente, enquanto outras partes recebem a menor dose possível.

O método a ser desenvolvido deveria fazer as suas medições externamente ao paciente. Cormack imaginava, por aquela ocasião, que esse problema já teria sido pensado e tratado por alguém, tanto do ponto de vista matemático quanto prático. Por não encontrar nenhuma referência sobre o assunto, fez o desenvolvimento que será descrito, a seguir. Cormack descobriu, após 14 anos, que o matemático alemão J. H. Radon já havia proposto, anteriormente (Radon, 1917),



**Figura 3.1 - 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.**

já havia proposto, anteriormente (Radon, 1917),

uma solução de se obter a função que descreve uma imagem no espaço n-dimensional a partir de suas integrais de linha.

Quantitativamente, o problema foi formulado como se segue. Seja D um domínio finito, bidimensional, no qual existe um material caracterizado por um coeficiente de absorção  $f$  que varia ponto a ponto em D e que é nulo fora do domínio. Suponha que um feixe monoenergético, infinitamente estreito, atravesse a região D num caminho reto L e que a intensidade do feixe incidente seja  $I_0$  e que, após atravessar a região, seja I. Ver Figura 3.1.

Considerando-se "s" uma medida de distância sobre L e  $f(s)$  a atenuação linear em cada ponto sobre L, pode-se fazer uma extensão da equação 2.1 para um meio não homogêneo e escrever que:

$$I = I_0 \cdot \exp\left[-\int_L f(s) ds\right] \quad (3.1)$$

Ou, escrevendo-se para todo o domínio D:

$$I = I_0 \cdot \exp\left[-\int_L f(x, y) ds\right] \quad (3.2)$$

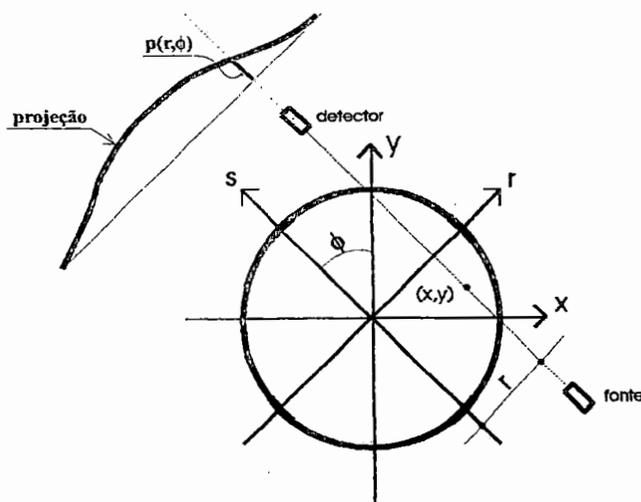
Para uma dada direção  $\phi$  em relação ao sistema de coordenadas x,y e sobre um caminho distando r da origem, a integral de linha da equação 3.2 é conhecida como raio-soma (ver Figura 3.2). Ao conjunto de raios-soma de uma mesma direção  $\phi$  dá-se o nome de projeção e sua notação é dada por:

$$p(r, \phi) = \int_{r, \phi} f(x, y) ds = p_\phi(r) \quad (3.3)$$

Das equações 3.2 e 3.3 pode-se verificar que cada raio-soma pode ser determinado medindo-se a radiação incidente e a que atravessa a amostra e estabelecendo-se a seguinte relação:

$$p(r, \phi) = \ln \frac{I_0}{I} \quad (3.4)$$

O problema da tomografia, portanto, é determinar-se  $f(x,y)$  sendo conhecidas as diversas integrais de linha, ou raios-soma que interceptam D.



**Figura 3.2 - Domínio de  $f(x,y)$  e conversão entre as coordenadas cartesianas e polares.**

Tendo-se os dados da matriz de raios-soma, pode-se reconstruir a imagem da secção transversal do objeto a partir, entre outros, de um dos seguintes métodos: (a) Método da Reconstrução Algébrica (MRA); (b) Método da Transformada de Fourier (MTF) e (c) Método da Retroprojeção Filtrada (MRF).

No MRA, utiliza-se um processo iterativo, onde as integrais de linha são calculadas e comparadas às integrais dos raios-soma medidos. Por aproximações sucessivas, chega-se, dentro de uma margem de erro pré-estabelecida, à imagem procurada (Gordon et al, 1970).

No MTF, calculam-se, inicialmente as transformadas de Fourier de  $p(r, \phi)$  em  $r$ . A função  $f(x,y)$  pode, então, ser dada pela transformada inversa bidimensional de Fourier como se segue (Bracewell, 1956; Brooks & Di Chiro, 1976):

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y) \exp[2\pi i(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y \quad (3.5)$$

Sendo

$$F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(r, \phi) \exp(-2\pi i k r) dr = P(k, \phi) \quad (3.6)$$

onde:

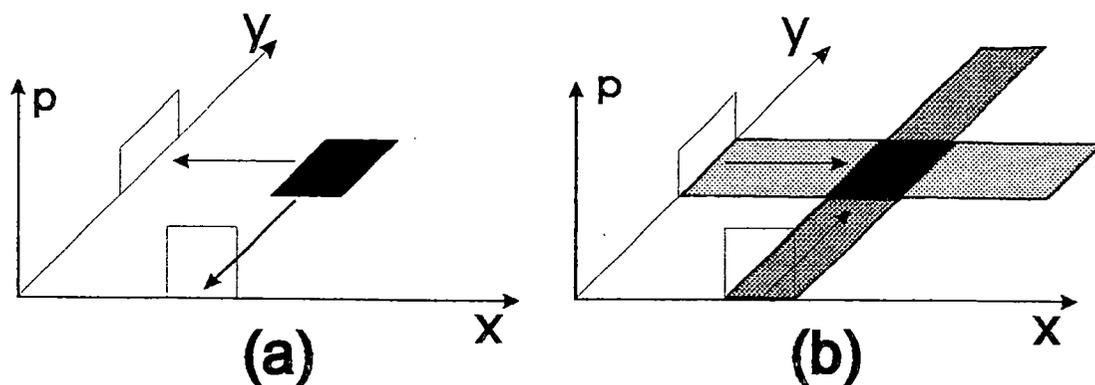
$k_x, k_y$ : frequências nas direções x e y, respectivamente

$F(k_x, k_y)$ : coeficientes de Fourier

$P(k, \phi)$ : transformada de Fourier de  $p(r, \phi)$

$$k = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$$

Na MRF, as amplitudes dos raios-soma são somadas, ao longo de todo o plano (x,y), sobre todos os pontos que constituem o raio-soma, conforme indicado na Figura 3.3b.



**Figura 3.3 - (a) Duas projeções de um objeto homogêneo, sobre os planos x e y; (b) Retroprojeção sobre todos os pontos que compoem cada raio soma.**

Como pode ser visto, a retroprojeção simples acrescenta à figura artefatos causados pelo fato de que cada perfil contribui também para pontos fora da imagem. Para um número maior de projeções, estes artefatos terão a aparência de uma estrela.

Para evitar a formação desse artefato, deve ser aplicado um filtro que elimine ou minimize as contribuições dos raios-soma, nas regiões fora da imagem. O método de reconstrução utilizado neste trabalho será apresentado a seguir.

### 3.1.1 Retroprojeção filtrada por convolução

Seja  $F(u,v)$  a transformada de Fourier da imagem  $f(x,y)$ . Por definição

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \cdot e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (3.7)$$

Seja, também,  $S_{\phi}(w)$  a transformada de Fourier de  $p_{\phi}(r)$ , a projeção para uma determinada direção  $\phi$ , ou seja:

$$S_{\phi}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{\phi}(r) \cdot e^{-j2\pi wr} dr \quad (3.8)$$

Considerem-se os valores de  $F(u,v)$  sobre a linha  $v = 0$ , no plano  $uv$ . Da equação 3.7 tem-se:

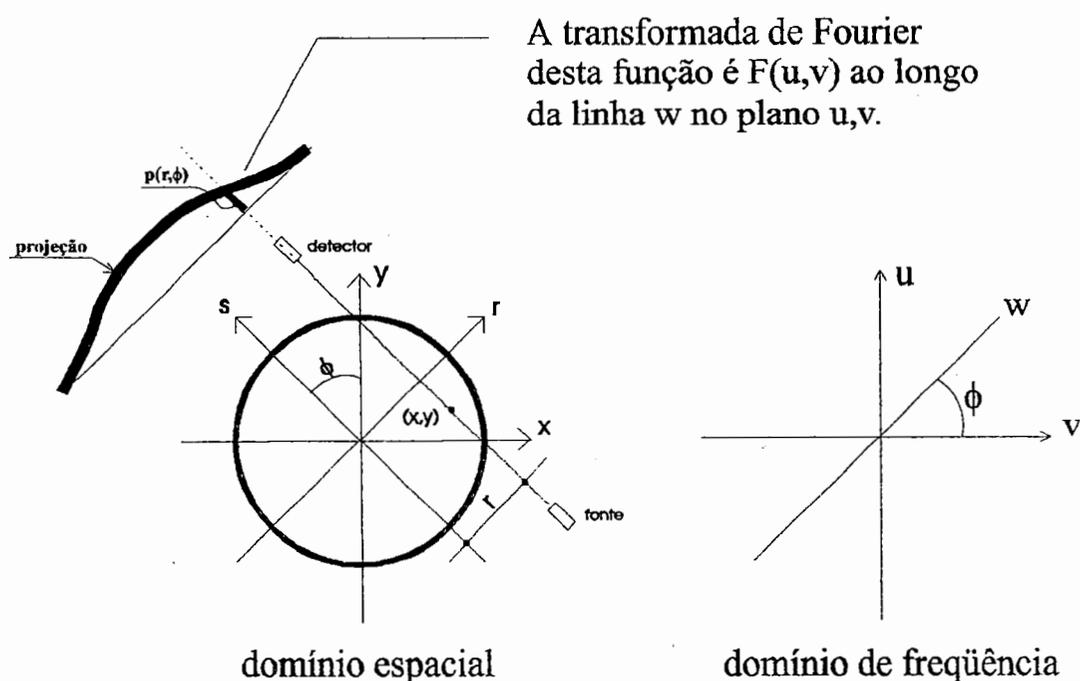
$$\begin{aligned} F(u,0) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \cdot e^{-j2\pi ux} dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) dy \right] \cdot e^{-j2\pi ux} dx \\ &= \int_{r,0} p_0(r) \cdot e^{-j2\pi ur} dr = S_0(w) \end{aligned} \quad (3.9)$$

A equação 3.9 é válida porque  $\int f(x,y) dy$  representa a projeção para  $\phi = 0$ . Note-se, também, que, para esta projeção,  $x$  e  $r$  são iguais.

O resultado da equação 3.9 indica que os valores da transformada de Fourier  $F(u,v)$  para a linha  $v = 0$  podem ser obtidos calculando-se a transformada de Fourier da projeção vertical da imagem. Este resultado pode ser generalizado para mostrar que, se  $F(w,\phi)$  representa os valores de  $F(u,v)$  ao longo de uma linha formando um ângulo  $\phi$  com o eixo  $u$ , conforme indicado na Figura 3.4, e se  $S_\phi(w)$  for a transformada de Fourier de  $p_\phi(r)$ , então pode-se ter a seguinte relação (Rosendfeld & Kak, 1982):

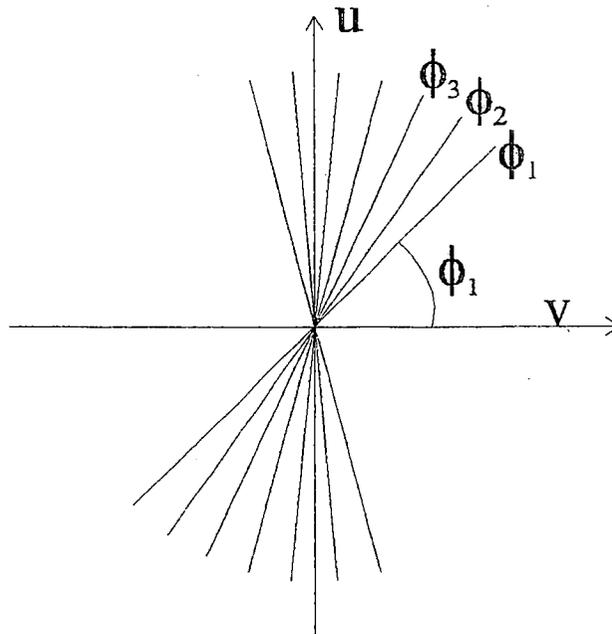
$$F(w,\phi) = S_\phi(w) \quad (3.10)$$

Esse resultado é conhecido como teorema da projeção.



**Figura 3.4 - Ilustração do teorema da projeção.**

Tem-se, portanto, que, conhecidas as projeções de uma imagem, em diversas direções  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_k$ , e aplicando-se a transformada de Fourier destas projeções, obtêm-se os valores de  $F(u,v)$  sobre linhas radiais, conforme indicado na Figura 3.5. Se um número infinito de projeções fosse conhecido, ter-se-ia  $F(u,v)$  para todo o plano  $uv$  e aplicando-se a transformada inversa de Fourier sobre esse plano obter-se-ia a função  $f(x,y)$  da imagem. Ou seja:



**Figura 3.5 - Ilustração da composição do domínio da freqüência, para uma imagem, a partir das transformadas de Fourier de suas projeções em diversas direções.**

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) \cdot e^{j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (3.11)$$

Se utilizarmos as coordenadas polares  $(w, \phi)$  no plano  $uv$ , a equação 3.11 pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(w, \phi) \cdot e^{j2\pi w(x \cos \phi + y \sin \phi)} \cdot w \cdot dw \cdot d\phi \\ &= \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} f(w, \phi) \cdot e^{j2\pi w(x \cos \phi + y \sin \phi)} \cdot w \cdot dw \cdot d\phi + \\ &\quad \int_0^{\pi} \int_0^{\infty} F(w, \phi + \pi) \cdot e^{j2\pi w[x \cos(\phi + \pi) + y \sin(\phi + \pi)]} \cdot w \cdot dw \cdot d\phi \end{aligned} \quad (3.12)$$

Usando a propriedade  $F(w, \phi + \pi) = F(-w, \phi)$ , aplicando a equação 3.10 e considerando  $r = x \cdot \cos \phi + y \cdot \sin \phi$ , a equação 3.12 pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}
 f(x, y) &= \int_0^{\pi} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} F(w, \phi) \cdot |w| \cdot e^{j2\pi w r} \cdot dw \right] \cdot d\phi \\
 &= \int_0^{\pi} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} S_{\phi}(w) \cdot |w| \cdot e^{j2\pi w r} \cdot dw \right] \cdot d\phi
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Pode-se, ainda, escrever a equação 3.13 como:

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} Q_{\phi}(x \cos \phi + y \sin \phi) \cdot d\phi \tag{3.14}$$

onde

$$Q_{\phi}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\phi}(w) \cdot |w| \cdot e^{j2\pi w r} \cdot dw \tag{3.15}$$

O processo de reconstrução, a partir das projeções  $p_{\phi}(r)$ , é feito, primeiramente, calculando-se a *projeção filtrada*  $Q_{\phi}(r)$ , através da equação 3.15 e, a seguir, utilizando-se a equação 3.14 para reconstruir a função  $f(x, y)$ .

O parâmetro  $w$  tem a dimensão de frequência espacial e a integração deveria ocorrer sobre todas as frequências. Porém, na prática, a energia contida nas componentes da transformada de Fourier acima de uma certa frequência são desprezíveis e, portanto, a banda de frequência das projeções pode ser considerada limitada. Considere-se  $W$  a frequência a partir da qual as componentes de Fourier podem ser desprezadas. Pode-se, então, pelo teorema de Nyquist, representar a projeção  $p_{\phi}(r)$  como (Oppenheim & Schaffer, 1975):

$$p_{\phi}(r) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_{\phi}\left(\frac{k}{2W}\right) \cdot \frac{\text{sen } 2\pi W\left(t - \frac{k}{2W}\right)}{2\pi W\left(t - \frac{k}{2W}\right)} \tag{3.16}$$

Substituindo-se a equação 3.16 na equação 3.8, tem-se:

$$S_{\phi}(w) = \frac{1}{2W} \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_{\phi}\left(\frac{k}{2W}\right) \cdot e^{-j2\pi w(k/2W)} \cdot b_w(w) \quad (3.17)$$

onde:

$$b_w(w) = 1, \text{ para } |w| \leq W$$

$$b_w(w) = 0, \text{ para } |w| > W$$

Para o caso finito de  $N + 1$  amostragens, a equação 3.17 reduz-se a:

$$S_{\phi}(w) = \frac{1}{2W} \sum_{k=-N/2}^{N/2} p_{\phi}\left(\frac{k}{2W}\right) \cdot e^{-j2\pi w(k/2W)} \cdot b_w(w) \quad (3.18)$$

Como  $S_{\phi}(w)$  é nula fora do intervalo  $(-W, W)$ , supondo-se que se queira conhecer os seus valores para um conjunto de pontos, igualmente, espaçados de  $2W/N$ . tem-se:

$$S_{\phi}\left(m \frac{2W}{N}\right) = \frac{1}{2W} \sum_{k=-N/2}^{N/2} p_{\phi}\left(\frac{k}{2W}\right) \cdot e^{-j2\pi(mk/N)} \quad (3.19)$$

onde  $m = -N/2, \dots, 0, \dots, N/2$

A equação 3.19 é conhecida como a transformada discreta de Fourier. Conhecidas as amostragens de uma projeção, pode-se, portanto, usando esta equação, calcular as suas transformadas de Fourier. Considerando-se a limitação em frequência de  $S_{\phi}(w)$ , a equação 3.15 pode ser escrita como:

$$Q_{\phi}(r) \equiv \frac{2W}{N} \sum_{m=-N/2}^{N/2} S_{\phi}\left(m \frac{2W}{N}\right) \left| m \frac{2W}{N} \right| e^{j2\pi m(2W/N)r} \quad (3.20)$$

Para o caso em que se desejam conhecer os valores de  $Q_{\phi}(r)$  apenas para os pontos onde  $p_{\phi}(r)$  foi amostrada, tem-se:

$$Q_{\phi}\left(\frac{k}{2W}\right) \equiv \frac{2W}{N} \sum_{m=-N/2}^{N/2} S_{\phi}\left(m \frac{2W}{N}\right) \left| m \frac{2W}{N} \right| e^{j2\pi m(2W/N)r} \quad (3.21)$$

onde  $k = -N/2, \dots, 0, \dots, N/2$

Ou seja,  $Q_\phi(r)$ , nos pontos amostrados, é dada, aproximadamente, pela transformada de Fourier inversa do produto de  $S_\phi(m.2W/N)$  e  $|m.2W/N|$ .

Uma vez conhecida  $Q_\phi(r)$ , a imagem reconstruída  $f(x,y)$  pode ser obtida pela aproximação discreta de 3.14, ou seja:

$$\hat{f}(x,y) = \frac{\pi}{K} \sum_{i=1}^K Q_{\phi_i}(x \cos \phi_i + y \sin \phi_i) \quad (3.22)$$

Onde  $K$  é o número de projeções e  $\phi_i$  são os ângulos para os quais as projeções são conhecidas. O símbolo  $\hat{f}$  foi utilizado para explicitar que essa é uma aproximação da imagem.

O valor  $x \cos \phi_i + y \sin \phi_i$  pode não corresponder a um dos valores de  $r$  para os quais  $Q_{\phi_i}$  foi determinada. É possível utilizar-se uma interpolação. Como sugerem Rosenfeld & Kak (1982), utilizou-se interpolação linear.

Para desenvolver a implementação computacional do algoritmo assumir-se-á que os dados são amostrados em intervalos espaciais de  $\tau$  cm e que no domínio das frequências, as projeções não possuem nenhuma energia fora do intervalo  $(-W,W)$ , onde:

$$W = \frac{1}{2\tau} \text{ cm}^{-1} \quad (3.23)$$

A equação 3.15 pode, então, ser escrita como:

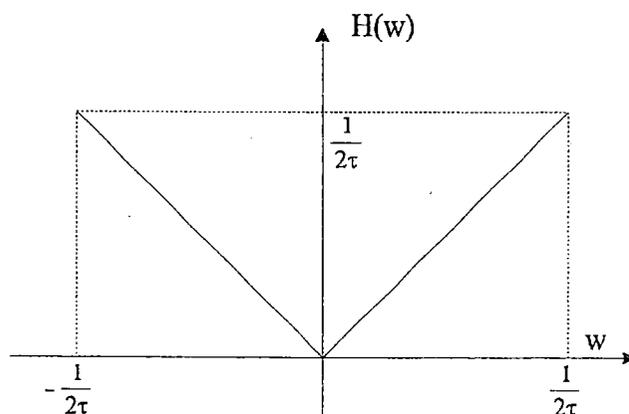
$$Q_\phi(r) = \int_{-\infty}^{\infty} S_\phi(w) \cdot H(w) \cdot e^{j2\pi wr} \cdot dw \quad (3.24)$$

onde:

$$H(w) = |w|, \quad |w| \leq W$$

$$H(w) = 0, \quad |w| > W$$

$H(w)$  é a função transferência de um filtro que deve ser aplicado sobre as projeções. A Figura 3.6 mostra o gráfico desta função.



**Figura 3.6 - Função transferência do filtro aplicado sobre projeções que são limitadas à frequência  $1/2\tau$ .**

A resposta impulsiva desse filtro é dada pela transformada inversa de Fourier de  $H(w)$ , ou seja:

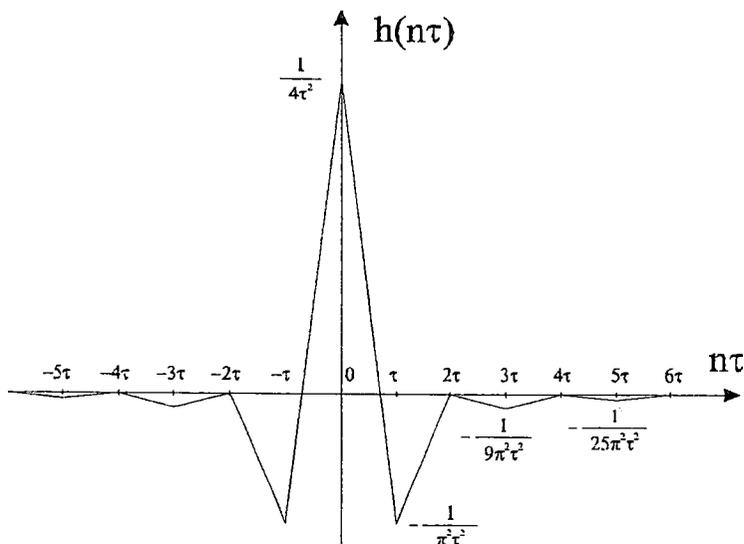
$$\begin{aligned} h(r) &= \int_{-\infty}^{\infty} H(w) \cdot e^{j2\pi w r} \cdot dw \\ &= \frac{1}{2\tau^2} \frac{\text{sen}(2\pi r / 2\tau)}{2\pi r / 2\tau} - \frac{1}{4\tau^2} \left( \frac{\text{sen}(\pi r / 2\tau)}{\pi r / 2\tau} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

A função  $h(r)$  precisa ser conhecida apenas com a mesma amostragem que os dados das projeções. Assim, pode-se reescrever 3.25 da seguinte forma:

$$\begin{aligned} h(n\tau) &= \frac{1}{4\tau^2}, & n = 0 \\ &= 0, & n \text{ par} \end{aligned}$$

$$= -\frac{1}{n^2 \cdot \pi^2 \cdot \tau^2}, \text{ n ímpar} \quad (3.26)$$

A Figura 3.7 mostra a função  $h(n\tau)$ .



**Figura 3.7 - Resposta impulsiva correspondente à função de transferência da Figura 3.6.**

Com a consideração de que  $p_\phi(r)$  e  $h(r)$  são limitados em frequência, pode-se escrevê-los como:

$$p_\phi(r) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_\phi(k\tau) \frac{\text{sen } 2\pi W(t - k\tau)}{2\pi W(t - k\tau)} \quad (3.27)$$

$$h(r) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k\tau) \frac{\text{sen } 2\pi W(t - k\tau)}{2\pi W(t - k\tau)} \quad (3.28)$$

Pelo teorema da convolução, pode-se escrever a equação 3.24 da seguinte forma:

$$Q_{\phi}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{\phi}(r') \cdot h(r - r') \cdot dr' \quad (3.29)$$

Sustituindo as equações 3.27 e 3.28 na equação 3.29, tem-se:

$$Q_{\phi}(n\tau) = \tau \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_{\phi}(k\tau) \cdot h(n\tau - k\tau) \cdot d\tau \quad (3.30)$$

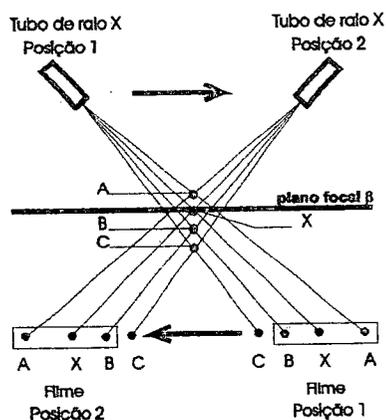
Na prática, cada projeção possui um número finito de amostragens. Supondo que  $p_{\phi}(k\tau)$  é nula fora do intervalo onde  $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ , tem-se:

$$Q_{\phi}(n\tau) = \tau \sum_{k=0}^{N-1} p_{\phi}(k\tau) \cdot h(n\tau - k\tau) \cdot d\tau \quad (3.31)$$

O processo de reconstrução desenvolve-se, então, filtrando-se, em primeiro lugar, todas as projeções, com o uso da equação 3.31. A seguir, para cada linha da imagem, retroprojetam-se as projeções filtradas  $Q_{\phi}(n\tau)$ , com a aplicação da equação 3.22.

### 3.2 Tomógrafos e suas gerações

Os primeiros tomógrafos construídos levavam em conta conceitos semelhantes aos utilizados em fotografia, quando se deseja focalizar um objeto de interesse e desfocalizar o restante. Há 70 anos atrás, a tomografia plano-focal foi introduzida como uma nova técnica de imagem por transmissão de raio X (Brooks & Di Chiro, 1976). A técnica pode ser vista na Figura 3.8.

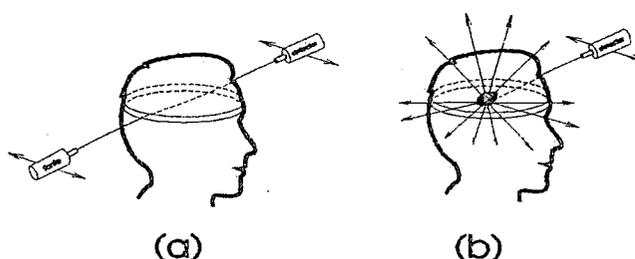


**Figura 3.8 - Tomografia plano focal**

Nesse método, o tubo de raios X e o filme são transladados em direções paralelas e sentidos opostos, de tal forma que a projeção do ponto que se encontra sobre o plano focal (ponto X) incide numa região restrita do filme. Os demais pontos incidem sobre uma região muito maior, o que faz com que a imagem destes seja um borrão.

Esse tipo de tomografia tem a inconveniência da presença de planos indesejáveis na imagem, ainda que borrados. Foi para resolver este problema que foi desenvolvida a tomografia reconstrutiva. Nesta técnica, apenas os planos objetos de estudo são registrados.

No que diz respeito à posição da fonte de radiação, a tomografia pode ser classificada, ainda, como tomografia por emissão ou por transmissão. No primeiro caso, um radioisótopo é injetado na amostra (ou paciente) e um detector externo faz a varredura. No segundo caso, tanto fonte quanto detector são externos. Ver Figura 3.9.



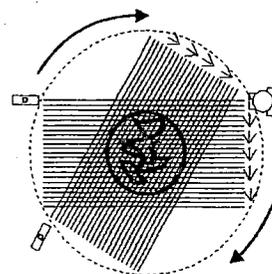
**Figura 3.9 - Tomografia reconstructiva (a) por transmissão e (b) por emissão**

O caso mais utilizado e que mais interessa a este trabalho é a Tomografia Reconstructiva por Transmissão e, devido à importância dos computadores neste método, o nome mais comum e de aceitação geral para a técnica é **Tomografia Computadorizada (TC)**.

A seguir, serão apresentadas as diversas gerações de tomógrafos existentes.

### 3.2.1 Tomógrafo de primeira geração

O primeiro tomógrafo médico foi instalado, em 1972, no Hospital Atkinson Morley, de Wimbledon (Cesareo & Storelli, 1991). Seu esquema é apresentado na Figura 3.10.



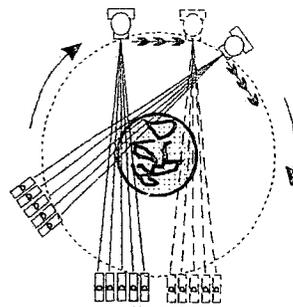
**Figura 3.10 - Esquema de um tomógrafo de primeira geração**

Nesse tipo de tomógrafo, um feixe de raios X é colimado para se obter um feixe fino. Após atravessar a amostra, os fótons incidem sobre um detector e são contabilizados. Um segundo colimador é colocado antes do detector para bloquear a radiação espalhada. Essa é a geração do tomógrafo desenvolvido neste trabalho.

Para o tomógrafo do Hospital Atkinson Morley, o tempo de aquisição era de 270s, que é um tempo relativamente alto para se manter um paciente imobilizado. Eram feitas 240 translações e 180 rotações de um grau.

### 3.2.2 Tomógrafo de segunda geração

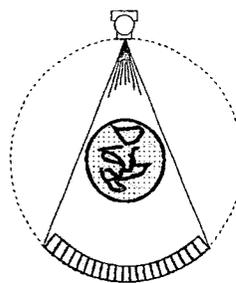
No tomógrafo de segunda geração, esquematizado na Figura 3.11, substitui-se o detector por um arranjo de  $N_d$  detectores (3 a 50) e por um feixe em leque. O número de translações, neste caso, reduz-se a  $N/N_d$ . O tempo, neste tomógrafo reduziu-se a 20s, inicialmente, e 5s a posteriori (Cesareo & Storelli, 1991).



**Figura 3.11 - Esquema de um tomógrafo de segunda geração.**

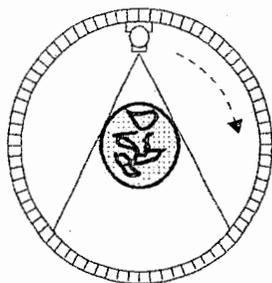
### 3.2.3 Tomógrafo de terceira geração

O tomógrafo de terceira geração possui uma quantidade tal de detectores, alinhados em arco, que não é necessária nenhuma translação, como esquematizado na Figura 3.12. Em 1975, um tomógrafo da General Electric apresentou um tempo de aquisição de 2,5s a 5s.



**Figura 3.12 - Esquema de um tomógrafo de terceira geração.**

### 3.2.4 Tomógrafo de quarta geração



**Figura 3.13 - Esquema de um tomógrafo de quarta geração.**

No tomógrafo de quarta geração, como pode ser visto na Figura 3.13, os detectores, que são em grande número, são alinhados em anel. Na primeira versão, em 1976, um tomógrafo da American Science and Engineering Company (AS&E), de Cambridge/MA, possuía 600 detectores. Numa segunda versão, este número era de 2000. O tempo de aquisição era de 2s (Cesareo & Storelli, 1991).

### 3.2.5 Tomógrafo de quinta geração

Embora a evolução da geometria dos tomógrafos tenha proporcionado otimizações consideráveis, nenhuma das versões em leque permitiu um tempo curto o suficiente (menos de 0,1s), que possibilitasse a aquisição de imagens do coração ou de órgãos com fluxo sanguíneo. O movimento do órgão, ou do sangue, causa uma degradação na imagem. Para se atingir um resultado satisfatório neste campo, torna-se necessário o desenvolvimento de um tomógrafo sem partes móveis. É o caso do tomógrafo de quinta geração, onde um canhão de elétrons gera raios X em várias direções, fazendo uma varredura sobre um alvo côncavo. O tempo de aquisição é de alguns milisegundos (Hendee, 1995).

## 3.3 Aplicações da tomografia computadorizada em ciência do solo

Os primeiros trabalhos em TC aplicados à ciência do 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 e menor complexidade, 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 (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 obter, a partir da radiação Bremmstrahlung, 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.

## 4. ALGUNS CONCEITOS E DEFINIÇÕES BÁSICAS DE FÍSICA DO SOLO

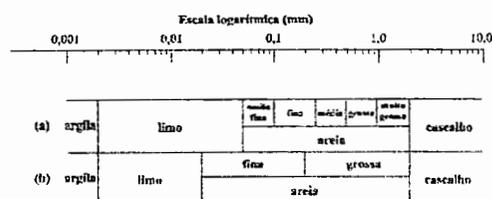
### 4.1 Conceitos básicos

O solo é a camada externa da superfície terrestre, cuja origem é a rocha que, por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, tem se transformado desde as eras geológicas, em material poroso de características peculiares (Hillel, 1982a; Reichardt, 1996). O solo é uma função do material que o originou (rocha), da sua idade, do clima no qual está inserido, da sua topografia e dos organismos vivos que nele habitam.

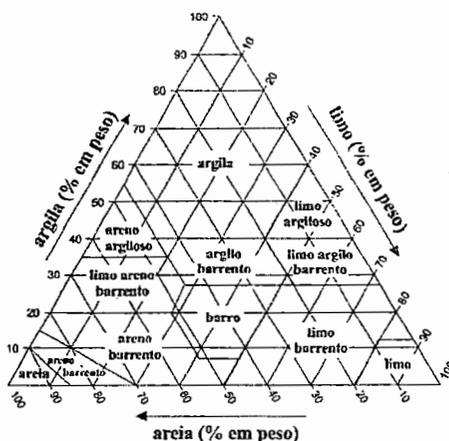
O solo é composto de três fases: a sólida, a líquida e a gasosa. A primeira é constituída da matéria mineral e orgânica, a segunda por uma solução de sais minerais e componentes orgânicos e a terceira é composta de um ar com características, ligeiramente, diferentes do ar sobre o solo, por possuir menos  $O_2$  e mais  $CO_2$ .

#### 4.1.1 Fase sólida do solo

As partículas sólidas do solo variam quanto à composição e ao tamanho. À distribuição das partículas quanto ao tamanho dá-se o nome de textura. Quanto às frações texturais, o solo classifica-se em areia, limo ou silte e argila. Os esquemas de classificação textural mais usados são apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2.

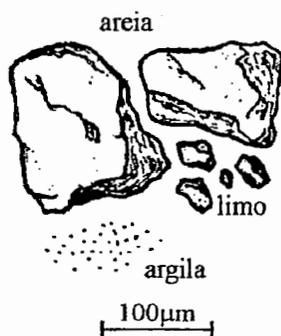


**Figura 4.1 - Classificações texturais do solo, segundo (a) Departamento de Agricultura dos E.U.A e (b) Sociedade Internacional da Ciência do Solo.**

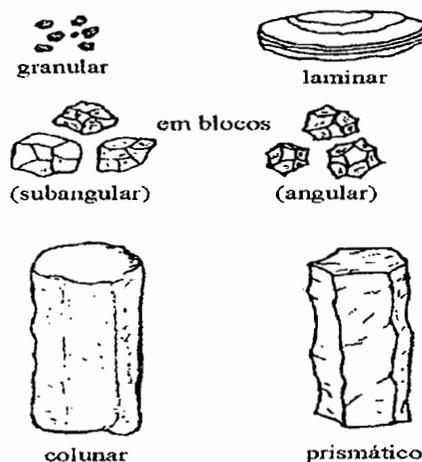


**Figura 4.2 Triângulo de classificação textural.** (Fonte: Hillel, 1982b).

A estrutura de um solo é dada pelo arranjo, pela orientação e pela organização de suas partículas sólidas. Às junções de partículas do solo dá-se o nome de *agregados*, que são classificados quanto à forma (prismáticos, laminares, colunares, granulares e em bloco) e quanto ao tamanho. As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram esses dois aspectos dos agregados (Hillel, 1982b e 1982c). Outro aspecto importante do agregado é a sua estabilidade.



**Figura 4.3 - Representação visual comparativa dos tamanhos dos agregados de areia, argila e limo.** (Fonte: Hillel, 1982b).



**Figura 4.4 - Formas de agregados de solo.** Fonte: Hillel, 1982c).

Diz-se que um solo é bem estruturado quando ele possui poros grandes, facilitando a penetração de raízes, de água e de ar. São solos que apresentam macroporosidade. As equações 4.4 e 4.5 definem a porosidade.

As três fases do solo podem ser descritas através de algumas relações entre massas e volumes, a saber:

$$m_t = m_s + m_l + m_p$$

$$V_t = V_s + V_l + V_p$$

onde : m e V significam massa e volume, respectivamente, e os índices t,s, l, p dizem respeito ao total da amostra, às partículas sólidas, à solução do solo e aos poros ou ao ar do solo.

Definem-se, a seguir, as grandezas:

*massa específica das partículas, ou massa específica real,  $\rho_s$ :*

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \text{ (g.cm}^{-3}\text{)} \quad (4.1)$$

*massa específica global, ou massa específica do solo,  $\rho_g$ :*

$$\rho_g = \frac{m_s}{V_t} \text{ (g.cm}^{-3}\text{)} \quad (4.2)$$

A massa específica real não varia com a compactação do solo, já que o que se mede são a massa das partículas e o seu volume desconsiderando-se os vazios. Com a massa específica global o mesmo não ocorre, pois o volume medido é o total, incluindo-se os vazios. Desta forma, pode-se ter, para uma mesma massa, volumes totais diferentes. Diz-se, por isso, que a massa específica global é um índice do grau de compactação do solo.

*porosidade total  $\alpha$*

$$\alpha = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (4.3)$$

De (4.1) e (4.2) tem-se que:

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} \quad \text{e} \quad V_t = \frac{m_s}{\rho_g}$$

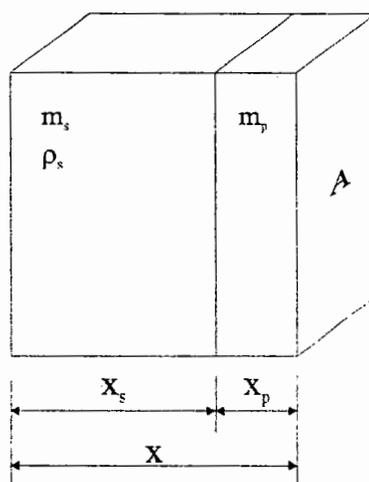
Substituindo-se esses valores em (4.3) tem-se:

$$\alpha = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} = 1 - \frac{m_s/\rho_s}{m_s/\rho_g}$$

ou

$$\alpha = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_s} \quad (4.4)$$

A porosidade total  $\alpha$  pode ser expressa, também, em termos do coeficiente de atenuação linear médio global  $\mu_g$  e do coeficiente de atenuação linear médio da parte sólida  $\mu_s$ . Considere-se uma amostra seca composta de uma parte sólida e uma parte gasosa. Pode-se, para efeito de cálculo envolvendo os coeficientes de atenuação linear, separar as duas partes, conforme ilustrado na Figura 4.5.



**Figura 4.5 - Ilustração de amostra composta de duas fases, sólida e gasosa, separando-se as duas fases para efeito de cálculo.**

Considera-se um feixe normal à secção transversal A da amostra. As espessuras da parte sólida e da parte gasosa são, respectivamente,  $x_s$  e  $x_p$ . As massas específicas global e da parte sólida são dadas por:

$$\rho_s = \frac{m_s}{x_s \cdot A} \quad (4.6)$$

$$\rho_g = \frac{m_g}{x \cdot A} \quad (4.7)$$

Dividindo-se a equação 4.7 pela equação 4.6, tem-se que:

$$\frac{\rho_g}{\rho_s} = \frac{x_s}{x} \quad (4.8)$$

Considerando-se  $I_0$ , o feixe incidente sobre a amostra, e I o feixe emergente, pode-se escrever:

$$I = \left( I_0 \cdot e^{-\mu_s \cdot x_s} \right) \cdot e^{-\mu_p \cdot x_p} = I_0 \cdot e^{-(\mu_s \cdot x_s + \mu_p \cdot x_p)} = I_0 \cdot e^{-\mu_g \cdot x} \quad (4.9)$$

O termo entre o primeiro par de parênteses refere-se à radiação que emerge da parte sólida. Dessa equação, pode-se escrever que:

$$\mu_g \cdot x = \mu_s \cdot x_s + \mu_p \cdot x_p \quad (4.10)$$

Como o coeficiente de atenuação do ar é cerca de  $10^3$  a  $10^4$  vezes menor que o coeficiente de atenuação da parte sólida (Crestana, 1985), pode-se desprezar o último termo da equação 4.10 e escrever que:

$$\frac{x_s}{x} = \frac{\mu_g}{\mu_s} \quad (4.11)$$

Igualando-se as equações 4.8 e 4.11 e substituindo-se em 4.4, tem-se, finalmente, que:

$$\alpha = 1 - \frac{\mu_g}{\mu_s} \quad (4.12)$$

#### 4.1.2 Fase líquida do solo

A fase líquida do solo é uma solução contendo substâncias orgânicas e sais. Existe uma constante interação entre a fase sólida, que é o reservatório de íons do solo, e a fase líquida. Como esta interação é complexa, torna-se difícil descrever a concentração da solução do solo, pois esta varia com o tempo, com o tipo de nutriente e com a condição ambiental.

A medida da quantidade de água no solo pode ser feita de várias formas e definem-se dois tipos de umidade: *umidade a base de peso*  $w$ , ou *gravimétrica*, e *umidade a base de volume*  $\theta$ , ou *volumétrica*.

A umidade gravimétrica é uma relação entre os pesos da fase líquida e da fase sólida. Como a relação entre os pesos, na mesma aceleração de gravidade, é a mesma que a das massas, tem-se:

$$w = \frac{m_l}{m_s} \quad (4.13)$$

Embora  $w$  seja adimensional ( $\text{g.g}^{-1}$ ), costuma-se indicar essas unidades para diferenciá-la da umidade volumétrica, definida por:

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} \text{ (cm.cm}^{-3}\text{)} \quad (4.14)$$

As umidades  $w$  e  $\theta$  podem ser indicadas, também, em termos de porcentagem.

Das relações (4.13) e (4.14), pode-se tirar uma correspondência entre as duas umidades, considerando-se  $\rho_{\text{água}} = 1 \text{ g/cm}^3$ .

$$\theta = w \cdot \rho_g \quad (4.15)$$

Outro parâmetro importante, ligado à umidade do solo, é o seu *índice de saturação*, definido por:

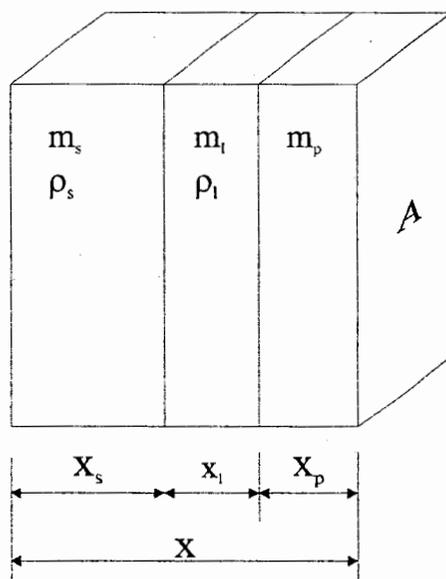
$$S = \frac{V_l}{V_p} \quad (4.16)$$

Introduzindo as equações 4.3 e 4.14 em 4.16, tem-se que:

$$S = \frac{\theta}{\alpha} \quad (4.17)$$

O índice de saturação será 100% quando  $\theta = \alpha$ , ou seja, quando todos os poros estiverem ocupados por água. O valor de S nulo obtém-se com a amostra totalmente seca, o que ocorre quando o peso da mesma permanece constante numa estufa a 105 °C, depois de 24 a 48 horas de secagem.

Os parâmetros  $w$  e  $\theta$ , analogamente ao desenvolvimento feito para a porosidade total, também podem ser expressos em termos de coeficientes de atenuação, como será demonstrado. Na Figura 4.6 esquematiza-se uma representação da amostra, com a separação das partes sólida, líquida e gasosa.



**Figura 4.6 - Ilustração de amostra composta de das fases, sólida, líquida e gasosa, apresentadas separadamente para efeito de cálculo.**

As massas específicas da parte sólida, da parte líquida e da amostra toda são representadas por:

$$\rho_s = \frac{m_s}{x_s \cdot A}, \quad \rho_l = \frac{m_l}{x_l \cdot A} \quad \text{e} \quad \rho = \frac{m_s + m_l + m_p}{x \cdot A} \quad (4.18)$$

Note-se que a massa específica  $\rho$  difere de  $\rho_g$ , conforme definida na equação 4.2, pois aqui consideram-se as massas das três fases.

Analogamente à dedução da equação 4.10, pode-se escrever que o coeficiente de atenuação linear de toda amostra para um feixe que a atravesse, perpendicularmente à secção transversal A, é dado por:

$$\mu_g \cdot x = \mu_s \cdot x_s + \mu_l \cdot x_l + \mu_p \cdot x_p \quad (4.19)$$

sendo  $\mu_g$  o coeficiente de atenuação da amostra, considerando-se as três fases.

Das equações 4.18, podem-se separar  $x_s$ ,  $x_l$  e  $x$ . Substituindo-se estes valores em 4.19 e lembrando, novamente, de que  $m_p$  e  $\mu_p$  são desprezíveis, quando comparados com os demais valores de massa e de coeficientes de atenuação dessas equações, tem-se que:

$$\mu_{m_g} = \frac{\mu_{m_s} \cdot m_s + \mu_{m_l} \cdot m_l}{m_s + m_l} \quad (4.20)$$

Onde  $\mu_{m_g}$ ,  $\mu_{m_s}$  e  $\mu_{m_l}$  são os coeficientes de atenuação de massa, respectivamente, da amostra toda (três fases), da parte sólida e da parte líquida.

Multiplicando-se o lado direito da equação 4.20 por  $m_s/m_s$ , tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned} \mu_{m_g} &= \frac{\mu_{m_s} + \left(\frac{m_l}{m_s}\right) \cdot \mu_{m_l}}{1 + \left(\frac{m_l}{m_s}\right)} \\ \mu_{m_g} + \mu_{m_g} \cdot \left(\frac{m_l}{m_s}\right) &= \mu_{m_s} + \left(\frac{m_l}{m_s}\right) \cdot \mu_{m_l} \\ \frac{m_l}{m_s} (\mu_{m_g} - \mu_{m_l}) &= \mu_{m_s} - \mu_{m_g} \end{aligned}$$

$$\frac{m_l}{m_s} = \frac{\mu_{ms} - \mu_{mg}}{\mu_{mg} - \mu_{ml}} \quad (4.21)$$

Igualando-se as equações 4.13 e 4.21, tem-se:

$$w = \frac{\mu_{ms} - \mu_{mg}}{\mu_{mg} - \mu_{ml}} \quad (4.22)$$

A partir da equação 4.14, pode-se escrever que:

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} = \frac{\frac{m_l}{\rho_l}}{\left( \frac{m_s + m_l + m_p}{\rho} \right)} \quad (4.23)$$

Considerando-se que  $m_p \ll m_s + m_l$  e multiplicando-se o lado direito da equação 4.23 por  $m_l/m_l$ , pode-se escrever:

$$\theta = \frac{\rho}{\rho_l} \cdot \frac{1}{1 + \frac{m_s}{m_l}} \quad (4.24)$$

Substituindo a inversa da equação 4.21 em 4.24, tem-se:

$$\theta = \frac{\rho}{\rho_l} \cdot \frac{1}{\frac{\mu_{mg} - \mu_{ml}}{\mu_{ms} - \mu_{mg}} + 1} = \frac{\rho}{\rho_l} \cdot \frac{\mu_{ms} - \mu_{mg}}{\mu_{mg} - \mu_{ml} + \mu_{ms} - \mu_{mg}}$$

Logo,

$$\theta = \frac{\rho}{\rho_l} \cdot \frac{\mu_{ms} - \mu_{mg}}{\mu_{ms} - \mu_{ml}} \quad (4.25)$$

Para  $\rho_l = 1 \text{ g.cm}^{-3}$ , a equação 4.25 é escrita como:

$$\theta = \rho \cdot \frac{\mu_{ms} - \mu_{mg}}{\mu_{ms} - \mu_{ml}} \quad (4.26)$$

A relação entre  $w$  e  $\theta$  pode ser escrita em função da densidade  $\rho$ , ao invés de  $\rho_g$ . A partir da equação 4.24 e com  $\rho_l = 1 \text{ g.cm}^{-3}$ , pode-se mostrar que:

$$\theta = \rho \cdot \frac{w}{1 + w} \quad (4.27)$$

#### 4.1.3 Fase gasosa do solo

A fase gasosa do solo constitui-se de uma mistura de gases semelhantes à atmosférica e ocupa os espaços vazios. Em função do consumo de  $O_2$  e da liberação de  $CO_2$  pelo sistema radicular e pelos microorganismos, as principais diferenças residem nas concentrações destes dois componentes, sendo, no interior do solo, mais baixa para o  $O_2$  e mais alta para o  $CO_2$ . O uso de adubos pode aumentar, por exemplo, o teor de  $NH_3$ . Também a atividade biológica é responsável pela alteração das concentrações de gases orgânicos e inorgânicos. Outra diferença é que o ar do solo está sempre próximo da saturação, no que diz respeito ao vapor d'água (Hillel, 1982d; Reichardt, 1996).

Como o ar do solo ocupa apenas o espaço não ocupado pela água, a fase gasosa pode ser expressa como a diferença entre a porosidade e a umidade do solo, sendo definido o parâmetro *porosidade livre*, dado por:

$$\beta = \alpha - \theta \text{ (cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}\text{)} \quad (4.28)$$

#### 4.2 Invariância de escala

Os solos são meios naturais complexos do ponto de vista da descrição física, com uma estrutura hierárquica composta de um conjunto contínuo de níveis de organização que vão da escala nanométrica (argilas e minerais associados) à macroescala (torrões e horizontes). São, ainda, meios porosos multifásicos, contendo tanto líquidos quanto gases.

Diversos autores têm se esforçado na tentativa de modelar a estrutura hierárquica do solo, utilizando os chamados modelos de escala onde se possa definir uma relação que permita transpor informações de uma escala para outra (Van Damme, 1995). Buscam-se modelos onde os comportamentos hidráulico e hidromecânico possam ser inferidos dos dados estruturais e vice-versa. Em outras palavras, procura-se determinar a invariância de escala para o estudo do solo.

Uma estrutura, ou um processo, é invariante em escala, quando as observações espaciais ou temporais em uma dada escala têm o seu equivalente em outras. Quantitativamente, pode-se descrever esta invariância contando-se o número  $\Gamma$  de estruturas locais de um certo tipo (agregados, poros, gargantas) e de um tamanho relativo  $l/L$ , onde  $l$  é o tamanho da estrutura local e  $L$  é o tamanho de todo o sistema. Procura-se verificar, então, se este número se repete para todas as escalas onde se investiga a invariância. Em um sistema com tais características, este número pode ser dado por (Feder, 1988; Posadas & Crestana, 1993):

$$\Gamma(l, L) \sim (L/l)^D \quad (4.12)$$

onde  $D$  é um número real entre 0 e 3, conhecido como dimensão fractal.

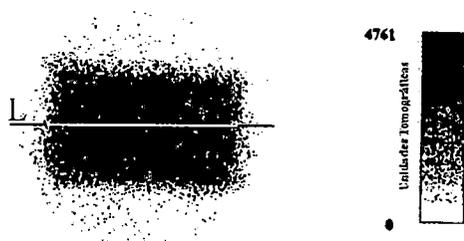
Essa relação significa que, em um sistema invariante, uma estrutura pode ser descrita como um arranjo de estruturas menores e estas por outras estruturas menores ainda, onde cada uma guarda uma relação constante com a sua respectiva estrutura maior.

Os fenômenos de transporte em meios porosos, em geral, bem como o comportamento da água no solo têm sido tratados de forma macroscópica, utilizando-se os valores médios das variáveis locais. Tem-se trabalhado, portanto, numa escala onde a amostra sob investigação é vista com resoluções espaciais que não permitem observar os aspectos ligados à estrutura do solo, levando em consideração a distribuição das suas partículas sólidas, bem como a morfologia e topologia dos poros. Por esse motivo, fazem-se necessárias uma nova metodologia e uma nova ferramenta de custo acessível, para que novas respostas possam ser encontradas nas áreas de ciência do solo e ciências do ambiente, em escala micrométrica, onde falar-se de homogeneidades ou de valores médios já não faz mais sentido, ou pelo menos não possui o mesmo sentido apresentado em escalas iguais ou superiores à milimétrica.

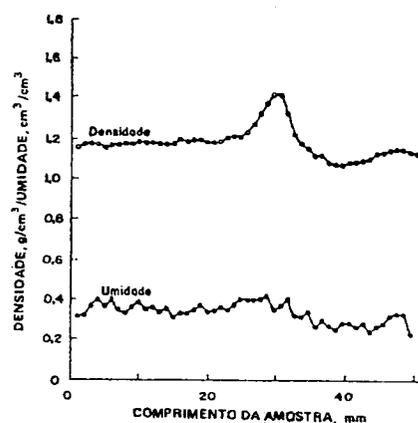
A seguir, são apresentadas algumas considerações sobre duas tomografias nas escalas milimétrica e micrométrica. Entre os exemplos de resultados no estudo das propriedades do solo utilizando-se a TC com resolução de milímetros, podem-se ver as Figuras 4.7 e 4.8, mostrando a imagem tomográfica, a massa específica e a umidade de um latossolo vermelho escuro.

Como pode ser visto, na Figura 4.8, os valores de massa específica e umidade oscilam em torno de valores médios, principalmente se forem avaliados localmente. Portanto, a imagem do interior da amostra do solo apresenta, nesta escala, natureza contínua.

Embora a TC com resolução milimétrica seja um grande avanço experimental, não é possível extrair informação em nível das partículas que compõem o solo, bem como da topologia das interfaces.

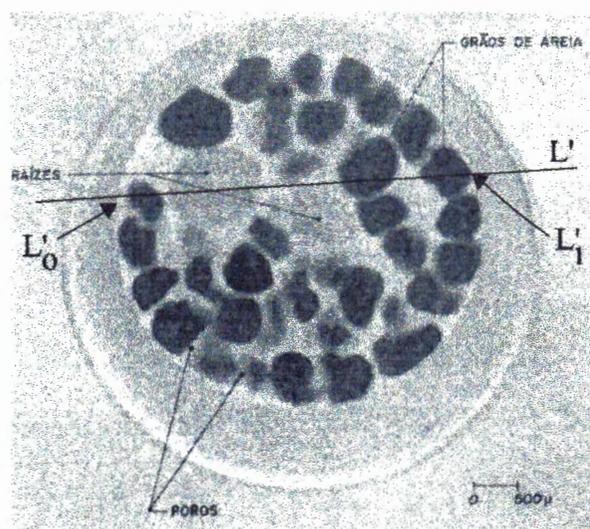


**Figura 4.7 - Imagem tomográfica de uma amostra saturada de latossolo vermelho-escuro (LE) da região de Araras/SP. (Fonte: Crestana et al, 1992).**



**Figura 4.8 - Perfis de massa específica e umidade relativos ao caminho L da Figura 4.7. (Fonte: Crestana et al, 1992).**

A partir de uma investigação em uma escala microscópica, porém, pode-se estimar que novos parâmetros, ou uma nova óptica sobre antigos parâmetros, estarão disponíveis. Na Figura 4.9, onde aparece o caminho de investigação em nível micrométrico  $L'$ , vê-se que, nesta escala, o sistema já apresenta características de natureza discreta. As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam o que se pode esperar, nesse nível, em relação à massa específica e à umidade. Note-se que já não tem mais sentido falar em valores globais ou em natureza contínua.



**Figura 4.9** Imagem tomográfica, mostrando grão de solo, raízes e poros, com resolução espacial de  $20 \mu\text{m}$ , realizada com o tomógrafo da ARACOR, Sunnyvale/CA, e onde pode-se ver, também, o caminho de investigação em escala micrométrica ( $L'$ ). (Fonte: Crestana & Nielsen, 1990).

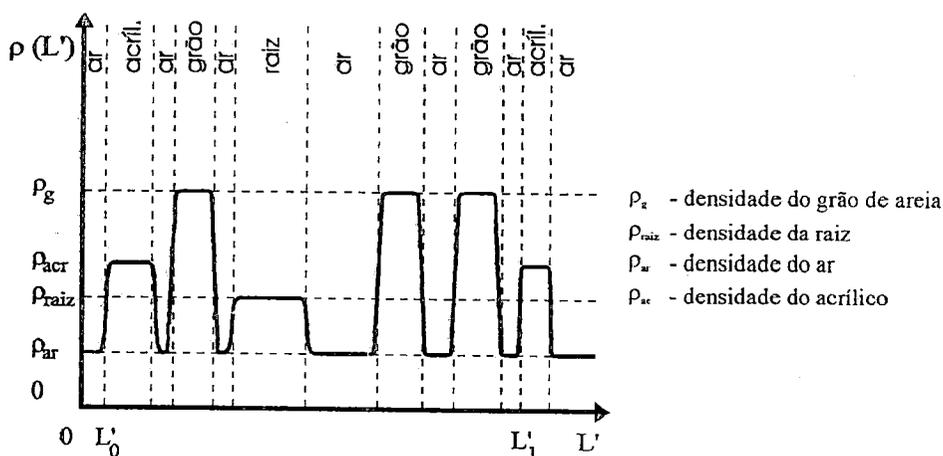


Figura 4.10 - Curva hipotética da variação da massa específica  $\rho(L')$  ao longo do caminho  $L'$  da Figura 4.9, em escala micrométrica.

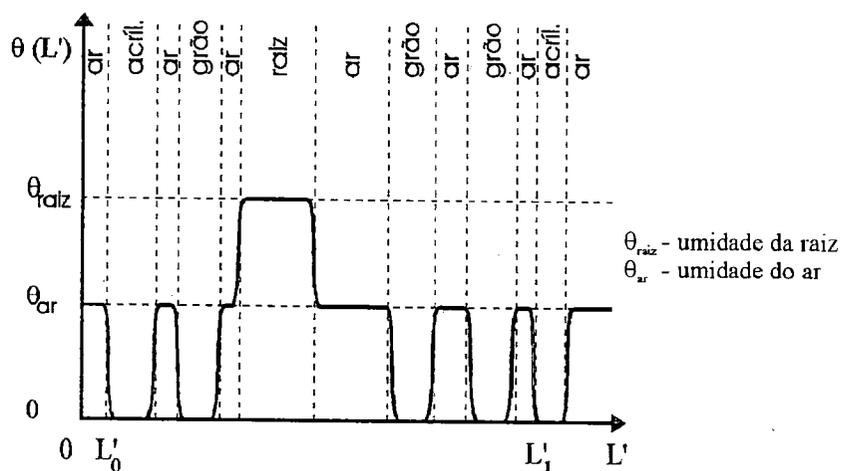


Figura 4.11 - Curva hipotética da distribuição da umidade  $\theta$  ao longo do caminho  $L'$  da Figura 4.9, em escala micrométrica.

A ilustração acima equivale a dizer que o solo estará sendo visto com um microscópio tomográfico, podendo fazer nascer novas metodologias e novos modelos, como ocorreu na óptica, com o advento dos microscópios ópticos, e na análise molecular com os microscópios de tunelamento e de força atômica. Esse avanço talvez possa ser comparável ao que ocorreu no diagnóstico médico com o advento da tomografia, numa época em que o interior do corpo humano só podia ser visto, sem incisões, com o uso da radiografia.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Serão apresentados, a seguir, os elementos constituintes do tomógrafo de resolução micrométrica, a sua montagem, os programas de controle e reconstrução e a metodologia para uso do equipamento construído na Embrapa / Instrumentação Agropecuária e que faz parte dessa tese .

### 5.1 Montagem do sistema

O tomógrafo aqui desenvolvido possui arquitetura de tomógrafo de primeira geração e, na Figura 5.1, pode-se ver o diagrama de blocos representando suas principais partes. Estas partes e outras complementares serão apresentadas a seguir.

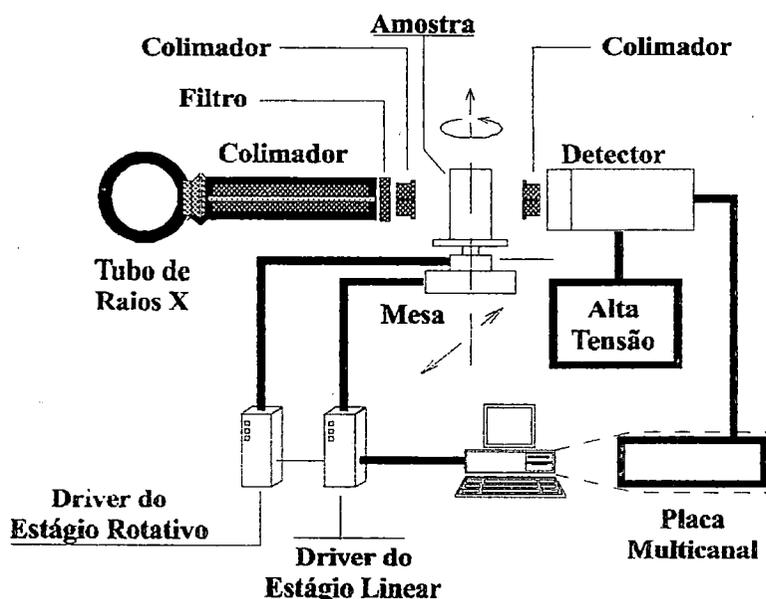


Figura 5.1 - Diagrama de blocos do tomógrafo com resolução micrométrica.

### 5.1.1 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. Durante o desenvolvimento o tubo atingiu sua vida útil de 2000 horas e foi utilizado, temporariamente, um tubo já com meia vida MCN166, de 1,6 kW.

Os três primeiros itens podem ser vistos na Figura 5.2.



**Figura 5.2 - 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 possui uma cápsula de aço inox envolvida por uma blindagem de chumbo. Apesar dessa blindagem, existe uma radiação de fuga de 250 mR/h, para uma energia de 100 keV. Com o objetivo de se permitir que o usuário do sistema tenha a liberdade de fazer ajustes com o tubo de raios X operando, construiu-se uma caixa de chumbo para blindar essa radiação de fuga. Para efetuar o cálculo da espessura da caixa, foram utilizadas as equações do capítulo 2, item 2.3.

Aplicando-se a equação 2.13, tem-se que o fluxo devido a essa fuga, a 1 m de distância, por hora, será de:

$$F_1 \approx 0,25 \times \frac{2,15 \cdot 10^9}{0,100} = 5,375 \cdot 10^9 \text{ fotons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \quad (5.1)$$

Considerando o erro de 13% citado em 2.3.2 e trabalhando a favor da segurança, pode-se escrever:

$$F_1 = 1,13 \times 5,375 \cdot 10^9 = 6,074 \cdot 10^9 \text{ fotons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \quad (5.2)$$

Para o corpo todo, será considerada uma distância de 50cm em relação ao tubo e para as mãos e antebraço 20cm. Os respectivos fluxos  $F_{50}$  e  $F_{20}$ , considerando a relação do quadrado das distâncias e as áreas citadas em 2.3.2, serão:

$$F_{50} = \left(\frac{100}{50}\right)^2 6,074 \cdot 10^9 \times 180 \times 50 = 2,187 \cdot 10^{14} \text{ fotons} \cdot \text{h}^{-1} \quad (5.3)$$

$$F_{20} = \left(\frac{100}{20}\right)^2 6,074 \cdot 10^9 \times 50 \times 10 = 7,593 \cdot 10^{13} \text{ fotons} \cdot \text{h}^{-1} \quad (5.4)$$

Considerando-se que  $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Joule, um fóton de 100 keV, possuirá uma energia de  $1,602 \cdot 10^{-14}$  Joule. Logo, a partir das equações 2.14 e 2.15, podem-se calcular os fluxos máximos admissíveis para o corpo todo ( $F_c$ ) e para mãos e antebraços ( $F_m$ ):

$$F_c = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{1,602 \cdot 10^{-14}} = 9,363 \cdot 10^{10} \text{ fotons} \cdot \text{h}^{-1} \quad (5.5)$$

$$F_m = \frac{3,75 \cdot 10^{-4}}{1,602 \cdot 10^{-14}} = 2,341 \cdot 10^{10} \text{ fotons} \cdot \text{h}^{-1} \quad (5.6)$$

Considerando-se uma blindagem de chumbo cujo coeficiente de atenuação de massa, para 100 keV, é de  $(\mu_{\text{pb}})_m = 5,40 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , pode-se calcular pela equação de Beer, a espessura mínima do chumbo  $x_{\text{pb}}$ . Seu coeficiente de atenuação linear será

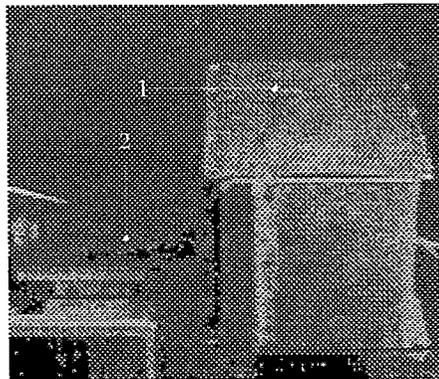
$\mu_{Pb} = (\mu_{Pb})_m \rho_{Pb}$ . Como  $\rho_{Pb} = 11,3 \text{ g.cm}^{-3}$ ,  $\mu_{Pb} = 61,02 \text{ cm}^{-1}$  (Hubbel, 1969). Logo, para o corpo tem-se:

$$(x_{Pb})_c = \frac{\ln \frac{2,187 \cdot 10^{14}}{9,363 \cdot 10^{10}}}{61,02} = 0,127 \text{ cm} \quad (5.7)$$

E para mãos e antebraços:

$$(x_{Pb})_m = \frac{\ln \frac{7,593 \cdot 10^{13}}{2,341 \cdot 10^{10}}}{61,02} = 0,132 \text{ cm} \quad (5.8)$$

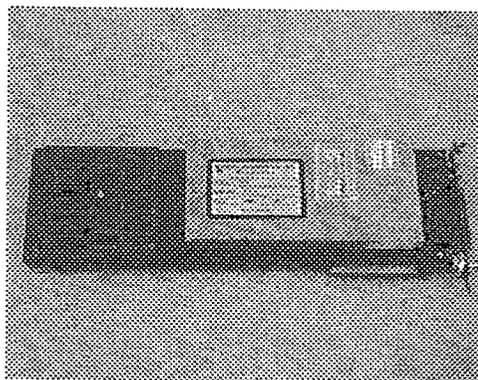
Para atenuar esta radiação foi construída uma caixa de blindagem de chumbo, como pode ser visto na Figura 5.3. Para uma maior segurança, a espessura das paredes da caixa é de 6 mm. Como o ângulo do feixe de raio X é de  $40^\circ$  e como a dimensão da caixa de blindagem não permite a devida aproximação do colimador, foi colocado um condutor de chumbo na saída do tubo.



**Figura 5.3 - (1) Caixa de blindagem com paredes de 6mm de Pb, contendo tubo de raios X e (2) condutor de Pb com diâmetro externo de 40 mm e interno de 8 mm.**

### 5.1.2 Cadeia nuclear

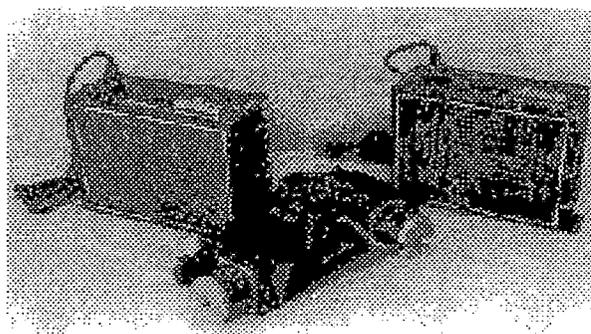
A cadeia nuclear é composta de: detector de NaI(Tl), com fotomultiplicadora modelo 4SHA6M/1.5A, HARSHAW/FILTROL; fonte de alta tensão modelo 556, EG&G ORTEC, tensão de saída de 50 a 3000V; fonte de baixa tensão, modelo 4002D, EG&G ORTEC, 160 W; placa multicanal modelo 5000, VIKING INSTRUMENTS ( ver foto da placa, na Figura 5.4).



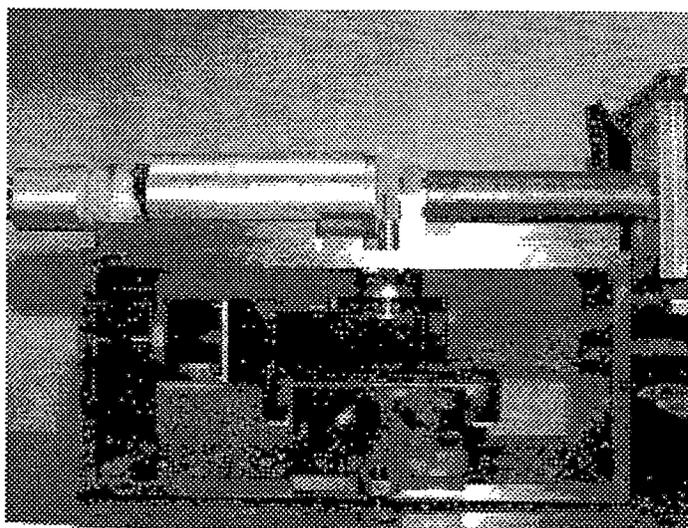
**Figura 5.4 - Placa multicanal modelo 5000, da Viking Instruments.**

### 5.1.3 Mesa posicionadora

A mesa posicionadora, que pode ser vista nas Figuras 5.5 e 5.6, é composta das seguintes partes: estágio linear modelo U4008MP, TIME & PRECISION, resolução de 1,25  $\mu\text{m}$ , precisão linear 0,01/25 mm/mm, repetibilidade 5 $\mu\text{m}$  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. A montagem da mesa pode ser vista na Figura 5.6.



**Figura 5.5 - 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 5.6 - Montagem dos posicionadores rotativo e linear.**

#### 5.1.4 Microcomputador

O microcomputador do sistema é um 386SX, com monitor colorido de alta resolução, placa de vídeo SVGA, mouse, teclado e 4 MBytes de RAM.

#### 5.2 *Programas de Controle e Reconstrução*

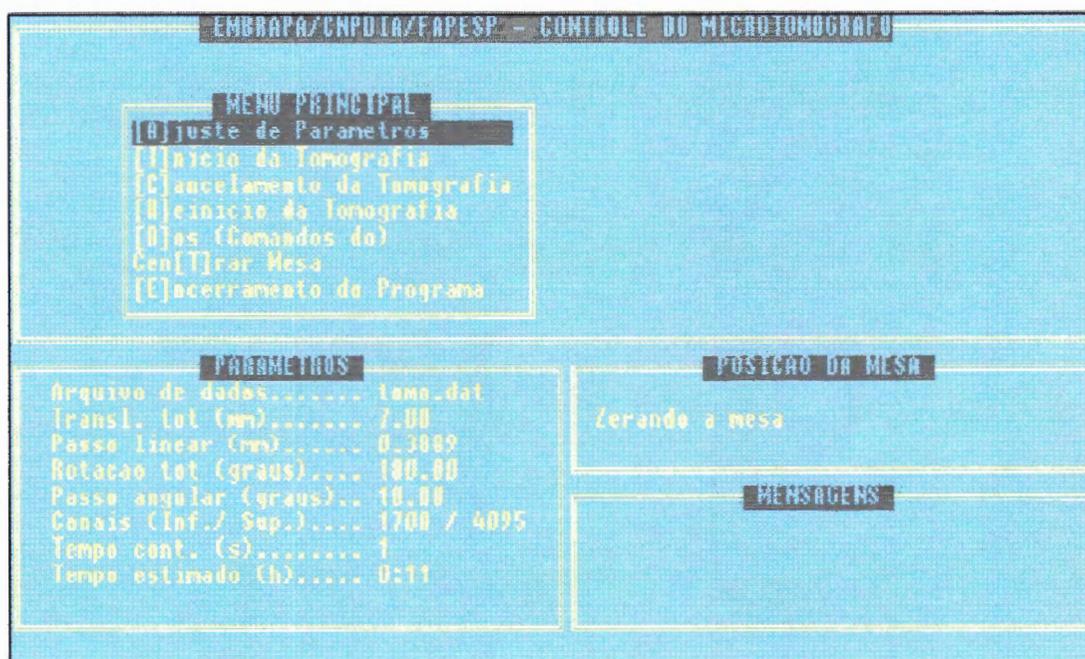
O tomógrafo computadorizado possui dois grupos de programas com atividades distintas: (1) Programa de controle do equipamento; (2) Programas de reconstrução e de apresentação de imagem.

### 5.2.1 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.

Na Figura 5.7 pode-se ver a tela principal do programa de controle.



**Figura 5.7 - Tela principal do programa de controle da mesa, da placa multicanal e do arquivo de dados.**

Esse programa foi desenvolvido em linguagem C, da Borland, versão 3.1. Os arquivos que o compõem são:

*Micmain.c*: O arquivo micmain.c contém, apenas, o programa principal *void main ()* que é responsável pela chamada das principais rotinas de inicialização.

*Micmca.c*: *Micmca.c* contém as rotinas de controle da placa responsáveis pela sua inicialização e leitura.

*Micdriv.c*: Nesse arquivo encontram-se as rotinas responsáveis pelo posicionamento da mesa no ponto de referência (centro), pelo posicionamento da mesa na posição zero da translação, pela definição dos perfis de velocidades de translação e rotação e pela movimentação durante a tomografia.

*Micdiv.c*: Encontram-se nesse arquivo diversas rotinas auxiliares, estando, entre elas, a rotina que calcula o tempo da tomografia dadas a resolução e o tamanho da amostra.

*Micmenu.c*: O arquivo *micmenu.c* contém as rotinas que fazem a interface homem-máquina. Elas possibilitam, através de menus, que o usuário defina parâmetros como tempo de amostragem, passo linear, tamanho da amostra, janela de energia, nome do arquivo de entrada de parâmetros (quando os parâmetros não são definidos via teclado) e nome do arquivo de saída de dados, bem como ações como cancelar, iniciar e reiniciar uma tomografia, entre outras. Essa última ação, graças à precisão e repetibilidade no posicionamento do equipamento, mostrou fundamental para que não se perdessem aquisições devido a interrupções causadas por queda de energia.

*Micser.c*: As rotinas de *micser.c* são responsáveis pela comunicação do computador com os controladores da mesa posicionadora, através da porta serial RS 232C. São rotinas que, permitem às rotinas de outros arquivos, enviar comandos em ASCII aos drivers e ler o seu estado.

*Mictela.c*: As rotinas contidas nesse arquivo são responsáveis pela apresentação e atualização dos dados e parâmetros da tomografia na tela.

*Mictomo.c*: Contém as rotinas responsáveis pela tomografia propriamente dita. Elas inicializam a tela do programa, desenhando molduras e escrevendo os parâmetros iniciais; partem a tomografia, chamando as rotinas de posicionamentos iniciais; gerenciam o teclado; permitem o ajuste de parâmetros e a sua gravação em disco;

controlam a tomografia, através da movimentação da mesa e da leitura e gravação dos dados.

*Micmcs.asm*: As rotinas de controle básico da placa multicanal foram adaptadas das rotinas fornecidas pela Viking Instruments em linguagem montadora, para interferir o mínimo com o tempo de amostragem.

### 5.2.2 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.

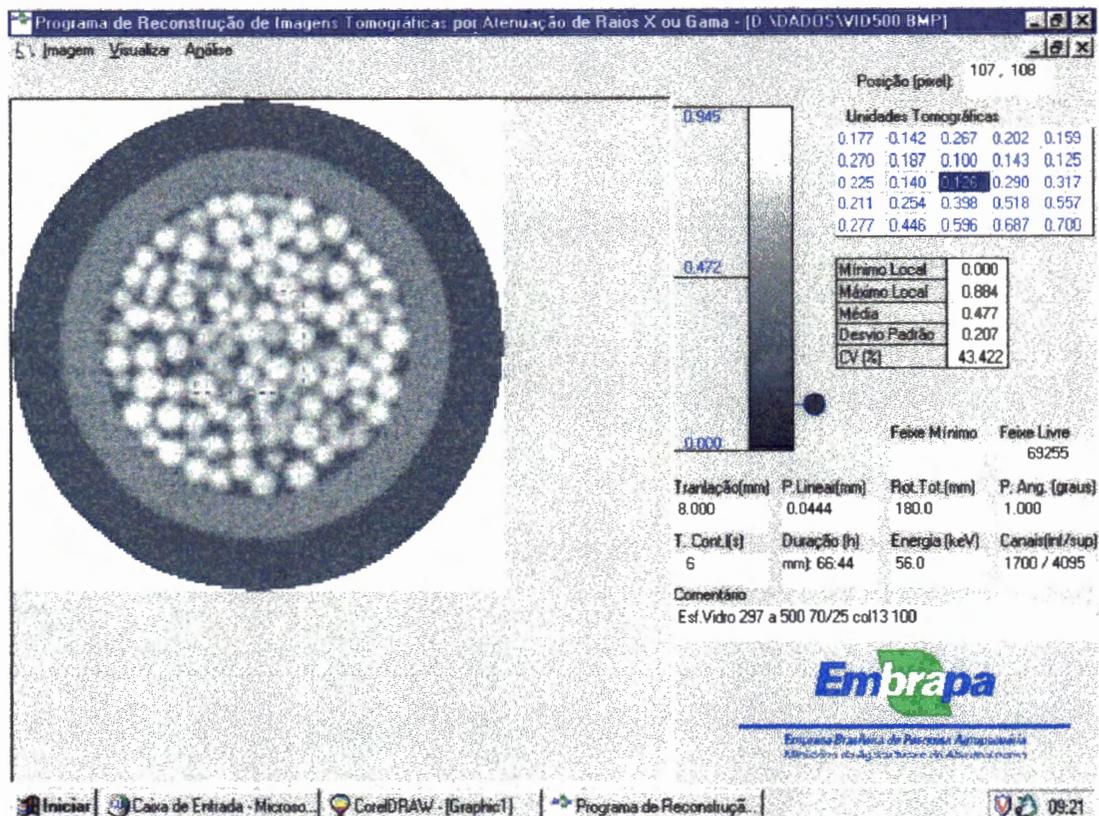
Numa primeira etapa foi utilizado o programa de reconstrução desenvolvido por Cruvinel (1987). Numa segunda etapa, visando trabalhar com matrizes maiores, foi desenvolvido um programa de reconstrução para ambiente Windows. Esse programa é uma implementação direta das equações 3.8 e 3.10, desenvolvida em linguagem C, da Borland, versão 3.1. 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. A tela principal do programa de reconstrução pode ser vista na Figura 5.8.

Os arquivos que compõem a biblioteca em linguagem C são:

*Abertura.c*: Esse arquivo contém as rotinas responsáveis pela leitura do arquivo de dados em ASCII, a separação do cabeçalho dos dados, a conversão dos dados para o formato em ponto flutuante, a normalização das linhas em relação ao número máximo de fótons e o cálculo das projeções.

*Rec.c*: Nesse arquivo estão as rotinas que implementam as equações 3.8 e 3.10.



**Figura 5.8 - Tela principal do programa de reconstrução e visualização de imagem.**

*Bmp.c:* As rotinas de *bmp.c* desempenham as tarefas de criar e gravar em disco o arquivo da imagem, no formato *bmp (bit map file)*, ler arquivos nesse formato, criar a paleta de cores do arquivo da imagem e mostrar a imagem na tela.

*Imgaux.c:* Esse arquivo contém as rotinas de inicialização da paleta e criação da barra de escala em tons de cinza.

A interface em Visual Basic é composta dos seguintes formulários e módulos:

*Frmimag.frm:* Esse formulário contém a imagem e uma barra de menu com as opções de abertura de arquivos de imagens, *zoom* e cálculos estatísticos;

*MDIForm.frm:* Esse formulário contém uma barra de menu com as opções de abertura de arquivos de imagens e de reconstrução de novas imagens. Ele contém,

ainda, a barra de escala em tons de cinzas e caixas onde são apresentadas as medidas de distância e cálculos estatísticos;

*Mdldefs.bas*: Nesse módulo são feitas as definições de tipos de variáveis do programador;

*Mdlgeral.bas*: Esse módulo contém as declarações das funções e subrotinas que foram desenvolvidas na biblioteca em C, citada acima.

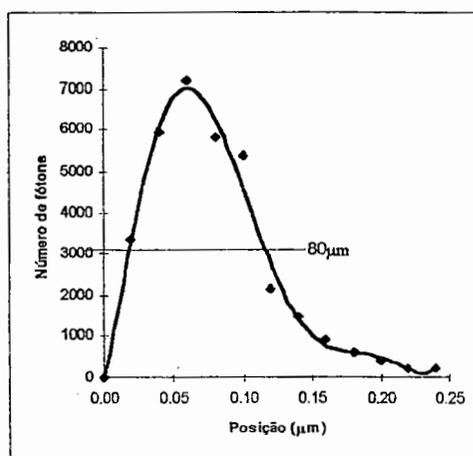
### 5.3 Método

O tomógrafo de resolução micrométrica, do ponto de vista macro, ou seja, de diagrama de blocos, não apresentou diferenças sensíveis em relação ao minitomógrafo. Porém, a escala para a qual ele foi projetado trouxe, indubitavelmente, dificuldades a serem vencidas com o uso de uma nova metodologia, que, aliada ao desenvolvimento de um equipamento com alto potencial de aplicação, compôs a principal motivação deste trabalho.

Os pontos mais críticos, no desenvolvimento do tomógrafo, foram: projeto e confecção dos colimadores; alinhamento do feixe de raios X com os colimadores e o detector; paralelismo entre o feixe de raios X e o plano da mesa posicionadora e mesa com resolução adequada.

#### 5.3.1 Confecção dos colimadores

Um dos pontos mais críticos da construção do tomógrafo de resolução micrométrica foi a confecção de colimadores. Devido à sua reduzida dimensão, não foi possível o emprego de técnicas convencionais como a utilização de brocas pois, para dimensões abaixo de 1mm, torna-se muito difícil o trabalho em



**Figura 5.9 - Largura do feixe de raios X (FWHM), no centro da mesa, para o colimador de 60μm.**

chumbo. O aquecimento do material e a fragilidade de uma ferramenta nestas dimensões não possibilitam obter um orifício regular em forma e em alinhamento. Os colimadores utilizados neste trabalho foram confeccionados com um composto de resina epoxy e  $PbO_2$ . Os diâmetros obtidos foram de  $35\mu m$ ,  $60\mu m$  e  $100\mu m$ . O diâmetro do feixe no centro da mesa, para o colimador de  $60\mu m$  é apresentado na Figura 5.9. A medida desse diâmetro é feita transladando-se uma barreira de chumbo, verticalmente, entre os colimadores da fonte e do detector. A cada parada, contabiliza-se o número de fótons, partindo-se do feixe livre até o bloqueio total. Com esses dados, constrói-se, para cada colimador, um gráfico com o diferencial do número de fótons no eixo das ordenadas e a posição no eixo das abcissas. Mede-se, então, a largura da curva na metade da altura máxima (*FWHM - full width at half maximum*), determinando-se o diâmetro.

O diâmetro do feixe estabelece uma restrição fundamental à resolução espacial do tomógrafo. Dois detalhes quaisquer de uma secção, separados por uma distância menor que a *FWHM* do feixe, não podem ser distinguidos, aparecendo na imagem como um único detalhe ou um borrão, independentemente da frequência de amostragem (Taylor, 1986).

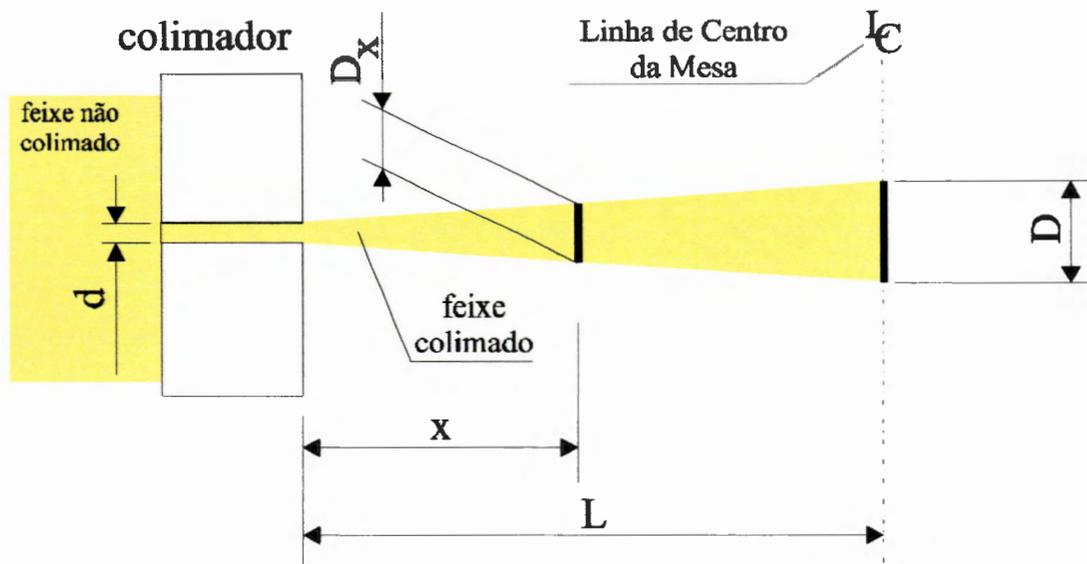
Com o valor obtido na Figura 5.9, pode-se determinar o perfil do feixe ao longo de seu caminho. De acordo com a Figura 5.10, as seguintes relações são determinadas, a partir de semelhança de triângulos:

$$\frac{D-d}{D_x-d} = \frac{L}{x} \quad (5.9)$$

onde  $D$  é o diâmetro do feixe no centro da mesa, determinado pela *FWHM* da curva da Figura 5.9,  $d$  é o diâmetro do colimador,  $L$  é a distância entre o colimador e o centro da mesa e  $D_x$  é o diâmetro do feixe a uma distância genérica  $x$  do colimador.

Separando-se o termo em  $D_x$ , da equação 5.9, tem-se o diâmetro do feixe, ao longo de seu caminho, dado por:

$$D_x = \left( \frac{D-d}{L} \right) \cdot x + d \quad (5.10)$$



**Figura 5.10 - Perfil do feixe ao longo do seu caminho.**

O coeficiente angular da equação 5.10 é a tangente do ângulo de abertura do feixe. Portanto, a divergência  $\Gamma$  do feixe em relação ao eixo central é dada por:

$$\Gamma = \text{arc tg} \left( \frac{D-d}{2L} \right) \quad (5.11)$$

A equação do feixe para o colimador de  $60\mu\text{m}$  e a sua divergência, com  $D$  medido a  $11\text{ mm}$  do colimador, ou seja,  $L = 11000\mu\text{m}$ , são dadas por:

$$D_x = 1,818 x + 60 \quad (5.12)$$

$$\Gamma = 0,0009 \text{ rad}$$

sendo  $x$  e  $D_x$  dados em  $\mu\text{m}$ .

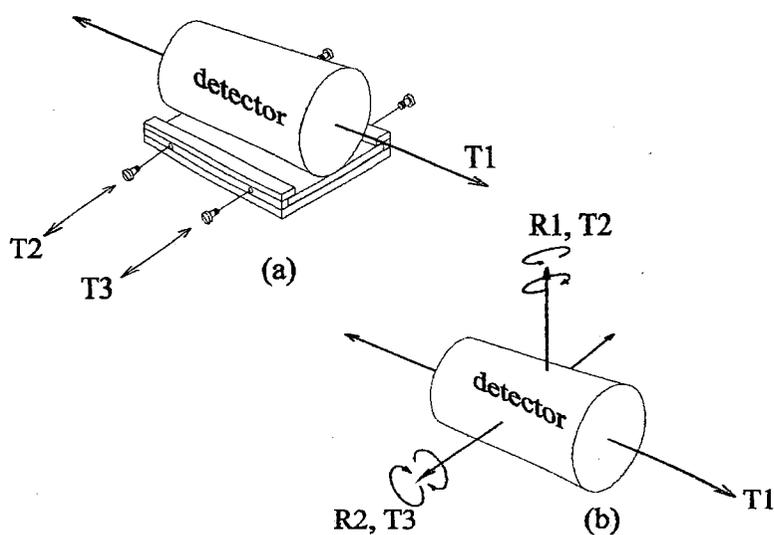
### 5.3.2 Alinhamento do feixe

O alinhamento, 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  $100\ \mu\text{m}$  ou menores, o que torna este alinhamento muito crítico.

Uma primeira forma de alinhamento utilizou o sistema mostrado na Figura 5.11a. Além da dificuldade de se alcançar um resultado satisfatório e com repetibilidade, este mecanismo impossibilita qualquer sucesso para resoluções superiores, pois seus movimentos são grosseiros na escala pretendida.

Para vencer essa limitação, foi desenvolvido um sistema conforme esquematizado na Figura 5.11b. Com este sistema, conseguem-se movimentos com resolução da ordem de  $10\ \mu\text{m}$ .



**Figura 5.11** - Alinhamento do feixe: (a) sistema que permite giro através de translação diferenciada nas direções T2 e T3, com resolução grosseira; (b) sistema que permite translações horizontal (T3) e vertical (T2) e rotações nos planos horizontal (R1) e vertical (R2).

### 5.3.3 Paralelismo entre feixe e mesa posicionadora

O feixe de raios X e a mesa posicionadora devem estar paralelos para se evitar o efeito apresentado na Figura 5.12, onde se vê, ao invés de uma fatia, um sólido de revolução.

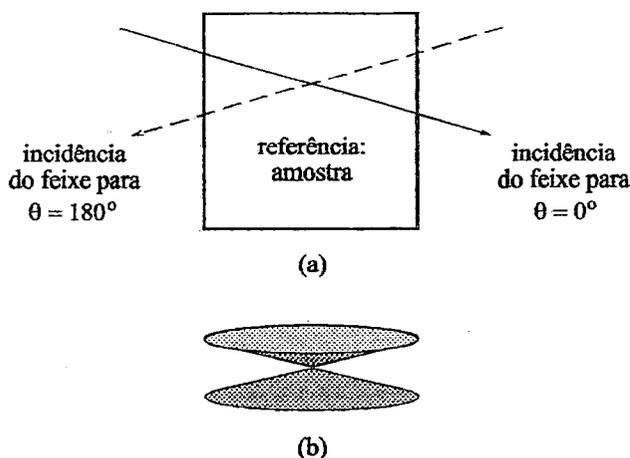


Figura 5.12 - Efeito produzido quando o feixe não está paralelo ao plano de translação. Em (a) mostra-se que o feixe não corta a amostra em um plano e em (b) vê-se que ao invés de uma fatia tem-se um sólido de revolução e, portanto, cada ponto é cruzado por apenas um raio soma.

#### 5.3.4 Escolha da energia e do tamanho da amostra

Para se obter uma energia quase monocromática foi utilizado um filtro composto de resina epoxy com estanho (Cesareo et al, 1993a; Cássaro, 1994). Inicialmente, trabalhou-se com amostras homogêneas de baixa atenuação ( $\mu$  da ordem de  $0,4 \text{ cm}^{-1}$ ), numa energia próxima da descontinuidade do Sn, ou seja, 28 keV. Para as amostras com solo foi utilizada uma energia maior. Para isso, trabalhou-se com uma de tensão de 70kV, fazendo com que o centro da radiação *Bremstrahlung* estivesse acima da descontinuidade do Sn, obtendo-se um segundo pico na cauda do espectro, no valor de 88 keV. Ambos os picos podem ser vistos na Figura 5.13.

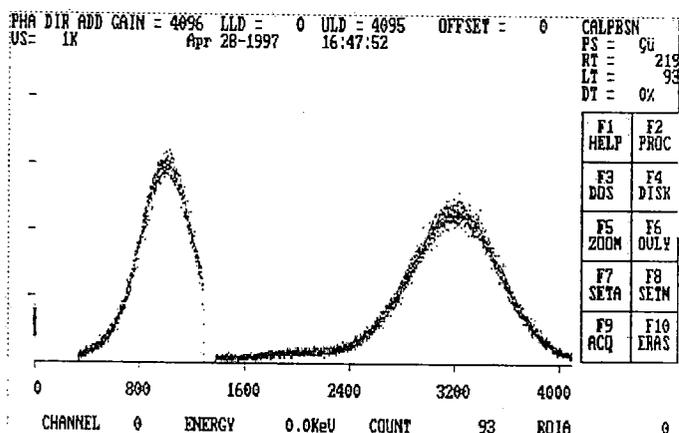


Figura 5.13 - Espectro de energia do feixe de raios X, onde podem ser vistos o pico característico do filtro, de 28 keV, e o pico de cauda, de 88 keV. Esta imagem foi obtida com o programa de aquisição da placa multicanal.

### 5.3.5 Isolamento mecânico

Para evitar que vibrações do ambiente fossem transmitidas à mesa posicionadora, foi construída uma mesa com um tampo de granito de 100 mm de espessura, apoiada em pés construídos conforme o esquema da Figura 5.14.

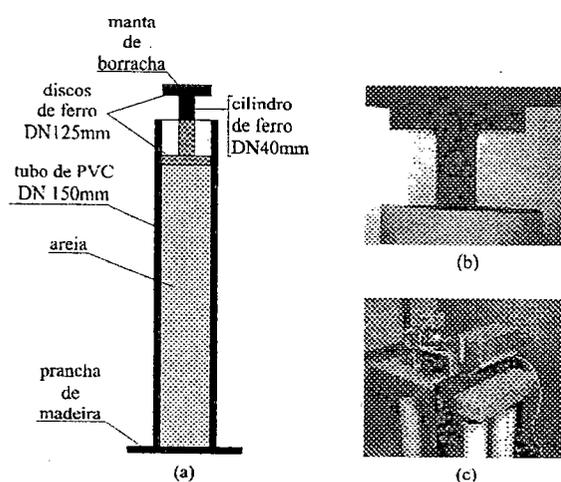


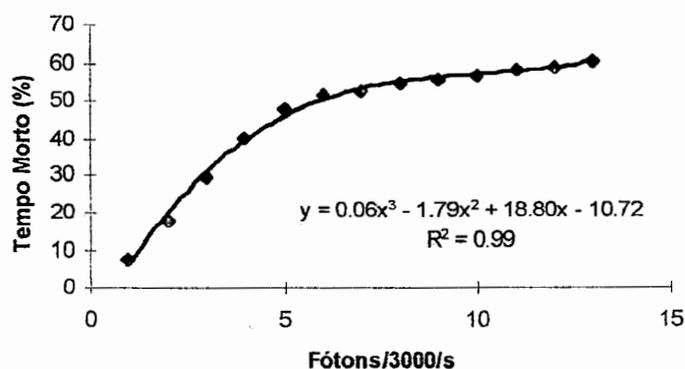
Figura 5.14 - Sistema antivibratório de suporte da mesa. (a) esquema de construção; (b) detalhe do apoio do tampo de granito e (c) foto do conjunto.

### 5.3.6 Correção do tempo morto

A taxa de conversão do conversor ADC em conjunto com o tempo de processamento do sinal pela placa multicanal resultam em um tempo morto que pode ser medido, em termos percentuais, com o próprio programa da placa. Levantou-se, então, uma tabela do tempo morto em função do número de fótons medidos. Esses dados foram colocados em um gráfico, conforme mostrado na Figura 5.15. Construiu-se, assim, uma curva de ajuste, constante da Equação 5.13, que foi inserida no programa de controle do sistema.

$$y = 0,06.x^3 - 1,79.x^2 + 18,80.x - 10,72 \quad (5.13)$$

onde  $x$  é o número de fótons por segundo, dividido por 3000. Essa parametrização foi feita para não se trabalhar com coeficientes apresentando altas potências negativas de 10, onde ter-se-ia, por exemplo, para a ordem 3, um coeficiente de  $2.10^{-12}$ .



**Figura 5.15 - Tempo morto da placa multicanal.**

O programa de controle contempla, ainda, a correção do tempo morto do detector, conforme apresentado na equação 5.14.

$$C = \frac{C_o}{1 - \frac{5.10^{-6}}{t_{cont}} C_o} \quad (5.14)$$

onde  $C_o$  é o número de fótons lidos,  $C$  é o número de fótons corrigidos e  $t_{cont}$  é o tempo de contagem.

### 5.3.7 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 e 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  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$ .

Uma primeira aproximação do caso real, em termos geométricos, foi simulada utilizando-se microesferas de vidro com diâmetros de 212  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ . 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, pois embora o tubo de raios X permitisse um fluxo aceitável de fótons para amostras maiores, a reconstrução das imagens estava limitada a matrizes de 100x100 pontos. O desenvolvimento do programa de reconstrução para matrizes maiores coincidiu com o fim da vida útil do tubo inicialmente utilizado. O tubo que o substituiu, provisoriamente, por ser de menor potência, exigia tempos de contagem mais longos, implicando em tempos de duração total elevados para amostras maiores. Por esse motivo, continuou-se a trabalhar com o recipiente acima.

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 outra<sup>1</sup>.

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

#### 5.3.8 Calibração

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. Antes, porém, algumas considerações sobre o erro inserido pelas oscilações do tubo de raios X, afetando a resolução de contraste, devem ser feitas.

A resolução de contraste, que pode ser medida em uma tomografia de uma amostra homogênea, dividindo-se o desvio padrão das unidades pelo valor médio dessas mesmas unidades, é fortemente dependente das oscilações do tubo de raios X, como será demonstrado a seguir. Para verificar essa dependência, construíram-se matrizes de dados, teoricamente, de forma a se obterem situações com condições controladas, ou seja, oscilação nula ou oscilação conhecida. Os dados foram

---

<sup>1</sup> Amostras preparadas e cedidas por Flávio de Oliveira Silva, aluno do programa de mestrado da UNICAMP, na Faculdade de Engenharia Agrícola.

calculados, utilizando-se os mesmos parâmetros da tomografia do acrílico para 60 keV, utilizada como uma das medidas para a confecção das curvas da Figura 5.X, ou seja, feixe livre de 31036 fótons, translação total de 12 mm, diâmetro da amostra de 10 mm e passo de 0,120  $\mu\text{m}$ . Foram simulados dois casos, separadamente, com coeficientes de atenuação de 0,436 e 0,223  $\text{cm}^{-1}$ .

A equação de Beer, para cada caso, é dada por:

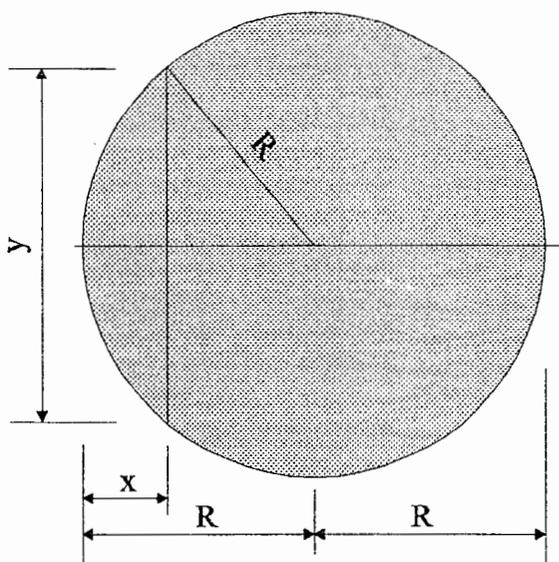
$$I = 31036.e^{-0,436.y} \quad (5.15)$$

$$I = 31036.e^{-0,223.y} \quad (5.16)$$

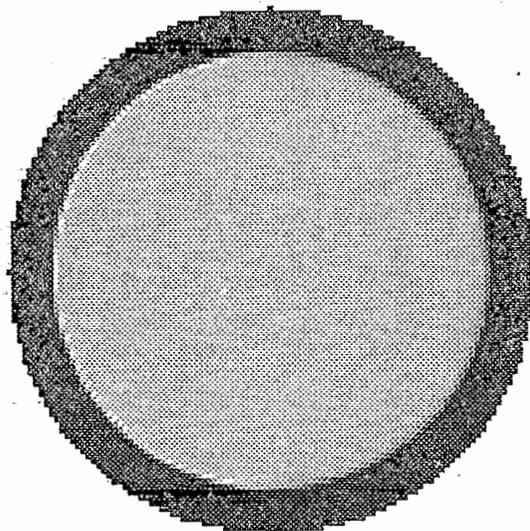
onde  $y$  é a espessura da amostra cilíndrica de raio  $R$ , atravessada pelo feixe, em uma posição genérica  $x$ , conforme mostrado na Figura 5.16. Essa espessura é dada por:

$$y = 2.\sqrt{-x^2 + 2.xR} \quad (5.17)$$

Na Figura 5.17, vê-se a tomografia da amostra, com a matriz de dados construída conforme mencionado acima e para  $\mu = 0,223 \text{ cm}^{-1}$ .



**Figura 5.16 - Secção transversal de uma amostra fictícia homogênea, mostrando o caminho  $y$  a ser atravessado pelo feixe de radiação, numa posição genérica  $x$ .**



**Figura 5.17 - Tomografia de uma amostra homogênea, com simulação de radiação sem oscilações.**

O valor médio das unidades tomográficas, para essa tomografia foi de 0,225 com desvio padrão de 0,00033 e coeficiente de variação de 0,146%.

A seguir, será introduzida uma oscilação na matriz artificial, da mesma ordem de grandeza da oscilação verificada na aquisição real para o acrílico em 60 keV. Dois métodos foram utilizados para determinar o valor da oscilação. No primeiro método, comparou-se a primeira linha da matriz real com a primeira linha da matriz teórica. No segundo método, a comparação da primeira linha da matriz real foi feita em relação a uma linha construída através de um processo de cálculo de médias locais, da seguinte forma:

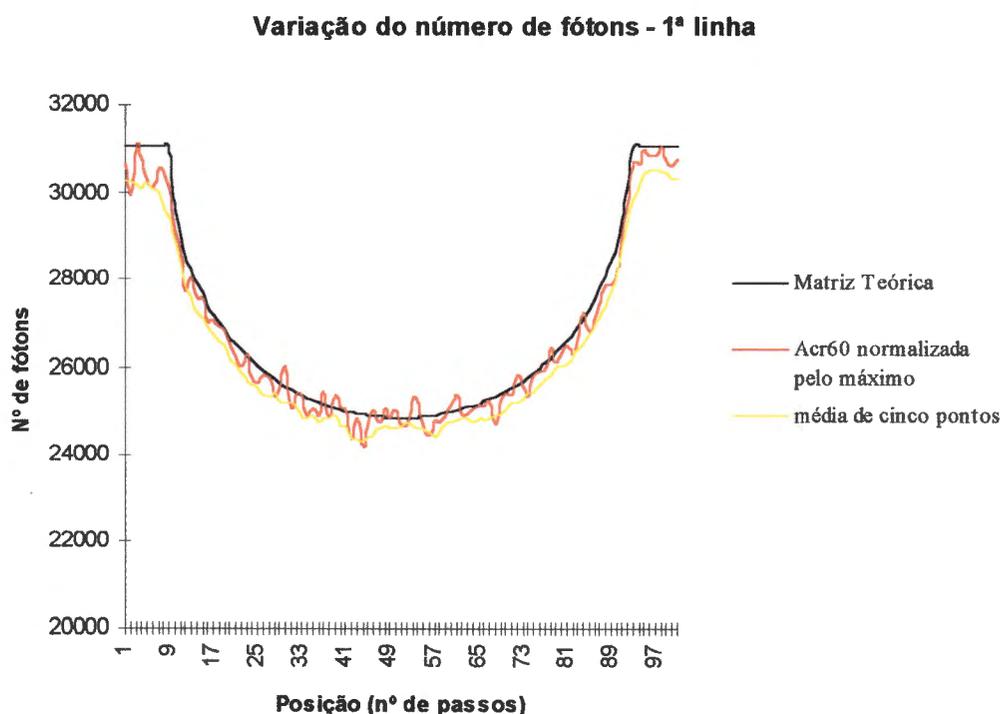
$$ML(i) = \frac{[F(1) + F(2)]}{2}, \text{ para } i = 0 \text{ a } 1 \quad (5.18)$$

$$ML(i) = \frac{1}{5} \sum_{k=i-2}^{i+2} F(k), \text{ para } i = 3, 4, \dots, N-3 \quad (5.19)$$

$$ML(i) = \frac{[F(N-2) + F(N-3)]}{2}, \text{ para } i = N-2 \text{ a } N-3 \quad (5.20)$$

onde  $ML(i)$  é o número de fótons na  $i$ -ésima posição da linha com média local,  $F(i)$  é o número de fótons na  $i$ -ésima posição da primeira linha da matriz real e  $N$  é o número de passos, ou elementos, na linha.

A Figura 5. 18 mostra as curvas dos números de fótons para a primeira linha de cada matriz e da linha média construída conforme as equações 5.19 a 5.20, onde a linha preta refere-se a matriz teórica, a linha amarela à média local e a vermelha (Acr60) à matriz real, normalizada em relação ao valor máximo da matriz.



**Figura 5.18 - Comparação entre o número de fótons da primeira linha da matriz teórica, da matriz real e da linha média local.**

Para determinar a oscilação em relação à matriz teórica, construiu-se, inicialmente, um vetor com a diferença entre as primeiras linhas da matriz real e da matriz teórica, ou seja:

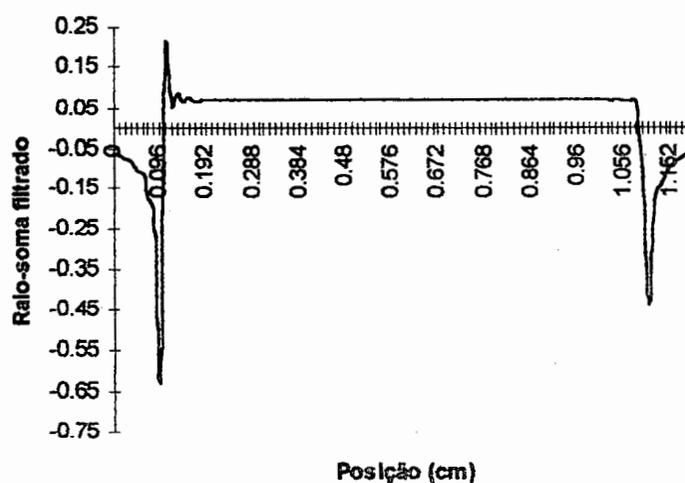
$$V(i) = |MT(i) - F(i)| \quad (5.21)$$

onde  $MT(i)$  é o  $i$ -ésimo elemento da primeira linha da matriz teórica.

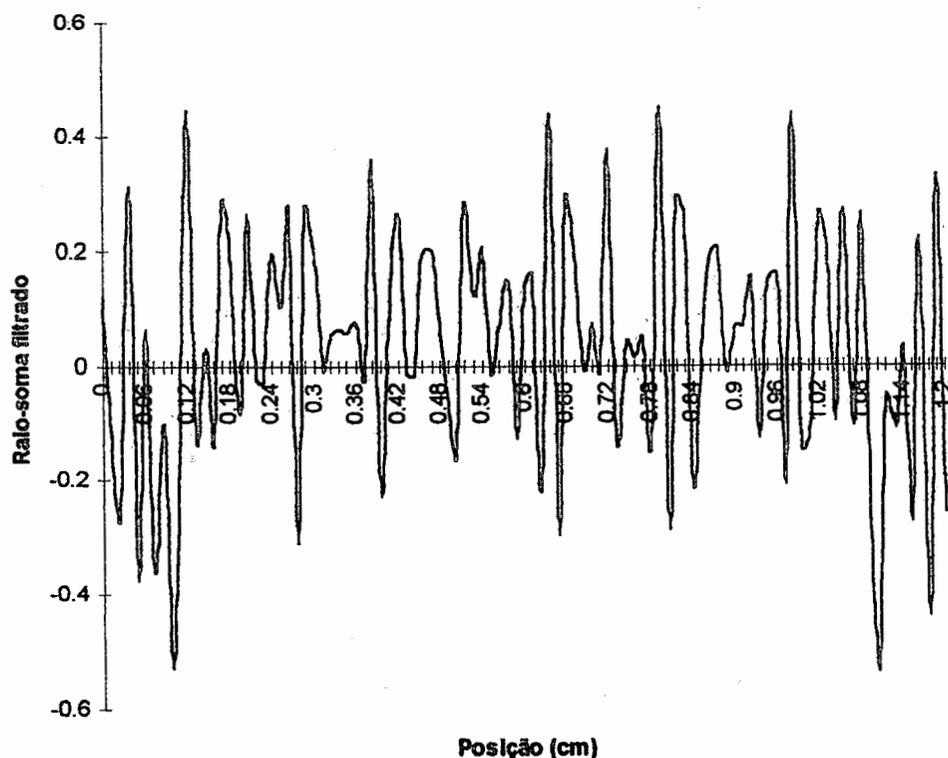
A oscilação considerada foi o desvio padrão da divisão, elemento a elemento, do de  $V(i)$  por  $MT(i)$ . A oscilação, assim determinada, foi de 0,77%.

Para a linha média local, o procedimento foi o mesmo e a oscilação foi de 1,23%. Para a simulação que se segue adotou-se a média entre esses dois valores, ou seja, 1%.

As Figuras 5.19 e 5.20 mostram as projeções filtradas da primeira linha da matriz teórica e da primeira linha da matriz real para 60 keV, respectivamente. Pode-se ver que com apenas 1% de oscilação, o comportamento da curva no interior da amostra (posição 0,12 a 1,08 cm) deixa de ser regular.



**Figura 5.19 - Projeção filtrada da primeira linha da matriz teórica, sem oscilação.**



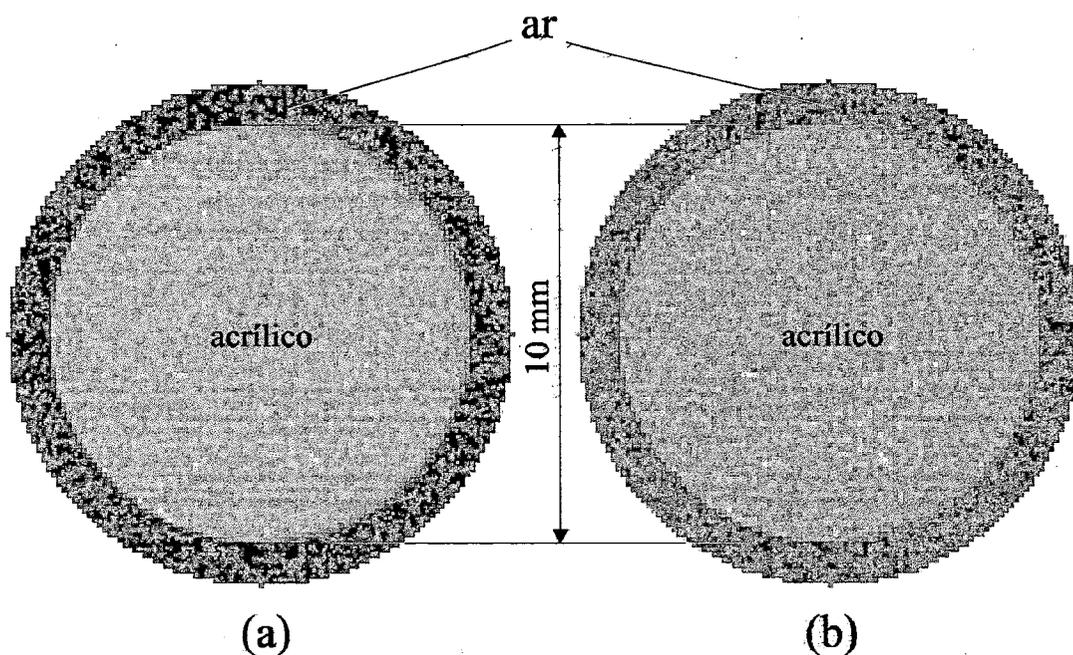
**Figura 5.20 - Projeção filtrada da primeira linha da matriz teórica, com simulação de 1% de oscilação na matriz de dados.**

A Figura 5.21 mostra as imagens construídas a partir das matrizes teóricas, com simulação de 1% de oscilação nos dados. O resumo das unidades tomográficas destas imagens é apresentado na tabela 5.1.

**Tabela 5.1 - Resumo das unidades tomográficas das imagens da Figura 5.21.**

$\mu(\text{cm}^{-1})$	Unidade Tomográfica Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
0,436	0,448	0,047	10,54
0,223	0,232	0,043	18,51

Como pode ser visto, na tabela 5.1, o coeficiente de variação para  $\mu = 0,223 \text{ cm}^{-1}$  foi majorado em aproximadamente 127 vezes.



**Figura 5.21 - Imagens construídas a partir das matrizes teóricas, com simulação de oscilação de 1%. Em (a) tem-se a simulação considerando-se  $\mu = 0,436 \text{ cm}^{-1}$  e em (b)  $\mu = 0,223 \text{ cm}^{-1}$ .**

O procedimento de 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 e aplica-se a equação de Beer. Os valores de unidades tomográficas e coeficientes de atenuação ( $\mu$ ) são colocados em um gráfico, obtendo-se a calibração. As Tabelas 5.2 e 5.3 mostram os valores obtidos para os diversos materiais, nas energias de fotopico de 28 keV e 60 keV. Foram utilizados acrílico, água, álcool etílico, latossolo roxo distrófico (LRd), nylon, podzólico vermelho (PV), PVC,

teflon e microesferas de vidro com diâmetros de 53  $\mu\text{m}$  a 106  $\mu\text{m}$  (para 28 keV) e de 106  $\mu\text{m}$  a 149  $\mu\text{m}$  (para 60 keV).

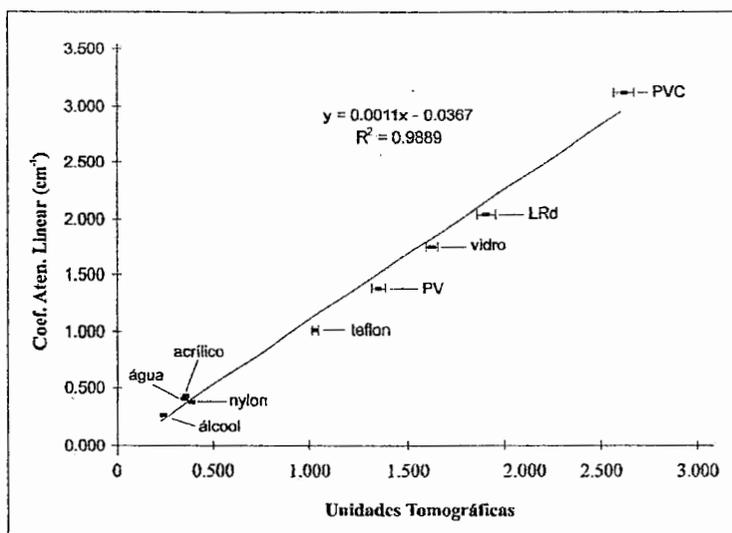
**Tabela 5.2 - Valores de unidades tomográficas e coeficientes de atenuação para calibração do tomógrafo micrométrico, na energia de 28 keV.**

<b>Material</b>	$\mu(\text{cm}^{-1})$	<b>Desvio Padrão de <math>\mu</math> (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Unid. Tom.</b>	<b>Desvio Padrão das Unid. Tom.</b>
<b>álcool</b>	0,281	0,013	0,228	0,021
<b>água</b>	0,408	0,009	0,338	0,027
<b>acrílico</b>	0,436	0,011	0,339	0,033
<b>nylon</b>	0,382	0,011	0,375	0,032
<b>teflon</b>	1,009	0,013	1,016	0,039
<b>PV</b>	1,383	0,009	1,344	0,076
<b>vidro</b>	1,740	0,016	1,612	0,067
<b>LRd</b>	2,041	0,010	1,895	0,101
<b>PVC</b>	3,121	0,022	2,615	0,112

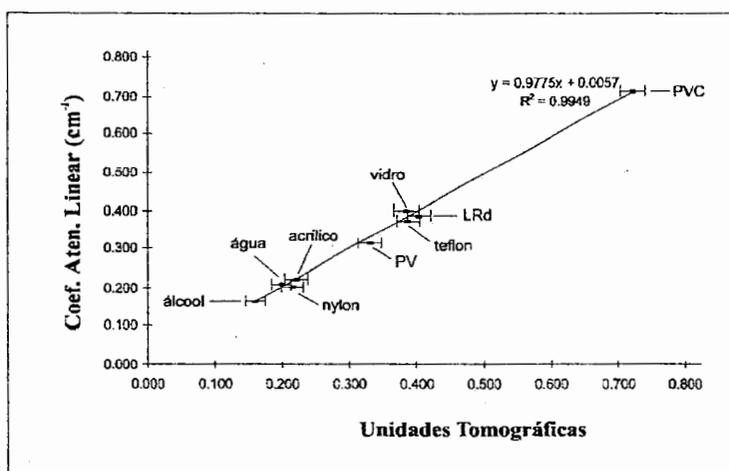
**Tabela 5.3 - Valores de unidades tomográficas e coeficientes de atenuação para calibração do tomógrafo micrométrico, na energia de 60 keV.**

<b>Material</b>	$\mu(\text{cm}^{-1})$	<b>Desvio Padrão de <math>\mu</math> (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Unid. Tom.</b>	<b>Desvio Padrão das Unid. Tom.</b>
<b>álcool</b>	0,163	0,013	0,157	0,038
<b>água</b>	0,210	0,014	0,197	0,038
<b>acrílico</b>	0,223	0,011	0,218	0,044
<b>nylon</b>	0,203	0,010	0,214	0,043
<b>teflon</b>	0,399	0,012	0,381	0,043
<b>PV</b>	0,314	0,008	0,329	0,045
<b>vidro</b>	0,385	0,008	0,400	0,048
<b>LRd</b>	0,372	0,009	0,384	0,045
<b>PVC</b>	0,713	0,011	0,719	0,049

As curvas de calibração podem ser vistas nas Figuras 5.22 e 5.23. Foram inseridos, nestas curvas, 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 5.22 - Curva de calibração do tomógrafo micrométrico para a energia de 28 keV.**



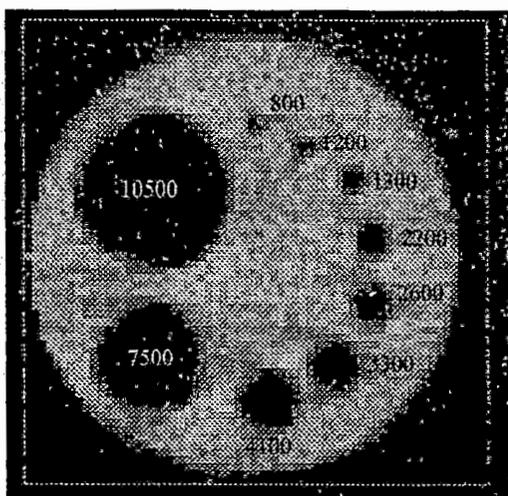
**Figura 5.23 - Curva de calibração do tomógrafo para a energia de 60 keV.**

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

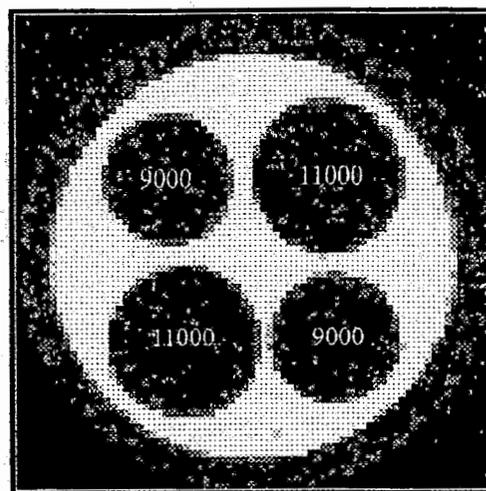
### 6.1 *Primeiros resultados obtidos com amostras homogêneas*

Alguns dos resultados desse ítem, embora não tenham trazido uma contribuição direta para obtenção de imagens tomográficas com resolução espacial micrométrica, merecem ser mostrados pelo seu aspecto histórico, bem como pela discussão que alguns deles puderam despertar, levando a uma reflexão sobre pontos críticos do equipamento e conseqüente melhoria do sistema tomográfico.

Ainda na fase de planejamento do projeto de tese, foi obtida a primeira imagem em escala submilimétrica (Macedo et al, 1993), apresentada na Figura 6.1, onde se nota a reprodução de vários orifícios em um phantom de acrílico, tendo o menor deles o diâmetro de 800  $\mu\text{m}$ . Para se efetuar esta tomografia, foi utilizado, praticamente, o mesmo sistema com o qual têm-se obtido imagens na escala milimétrica. Como primeiras inovações, a fonte de  $\text{Am}^{241}$  foi substituída por um tubo de raios X industrial e utilizou-se um colimador construído com chumbo fundido em torno de uma agulha odontológica de 250  $\mu\text{m}$  de diâmetro interno. O feixe livre foi de 27300 fótons, a energia do fotopico de 60 keV, o passo linear de 500  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 1 segundo e a matriz de dados com 100 projeções e 100 translações (100x100). Na Figura 6.2 pode-se ver o resultado do segundo teste do projeto, onde já se utilizou o sistema do tomógrafo micrométrico. Seu objetivo era apenas verificar o funcionamento, em conjunto, do sistema: mesa posicionadora, colimação, alinhamento de colimadores e programa de aquisição de dados e controle. Utilizaram-se colimadores de 215  $\mu\text{m}$ , passo linear de 486  $\mu\text{m}$ , energia do fotopico de 65 keV, feixe livre de 7300 fótons, tempo de contagem de 3 segundos e matriz de 72x72.

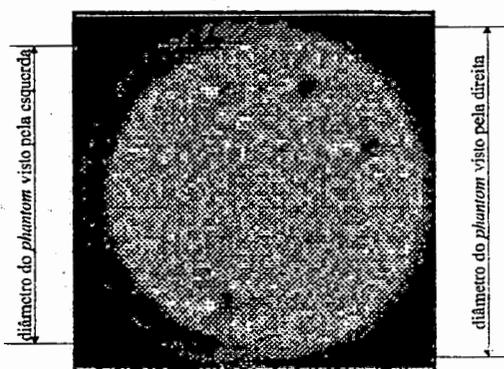


**Figura 6.1 - Imagem tomográfica de um *phantom* de acrílico, com resolução submilimétrica. Dimensões dos orifícios em micrômetros. Diâmetro externo do *phantom* 30mm.**



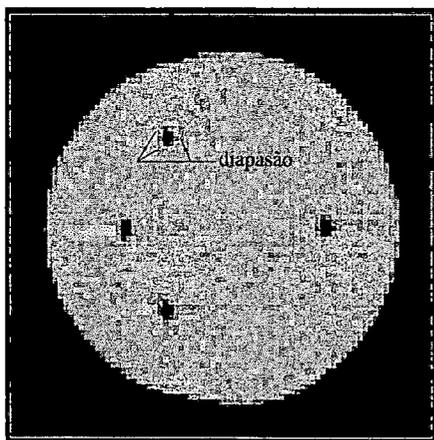
**Figura 6.2 - Primeira tomografia obtida com o sistema completo do tomógrafo micrométrico. Dimensões dos orifícios em micrômetros. Diâmetro externo do *phantom* 30mm.**

O primeiro *phantom* apresentando detalhes com dimensões inferiores ao milimétrico, *tomografado* com o sistema novo, foi um cilindro de acrílico com diâmetro externo de 12,7 mm e orifícios de 700  $\mu\text{m}$ . Foi utilizado um colimador de 215  $\mu\text{m}$ , energia do fotopico de 66,1 keV, passo linear de 175  $\mu\text{m}$ , feixe livre de 13300 fótons, tempo de contagem de 3 segundos, matriz de 80x80 e o dispositivo de alinhamento do feixe foi o esquematizado na Figura 5.11a. Sua imagem pode ser vista na Figura 6.3. Nessa fase, ainda não haviam sido desenvolvidos um dispositivo e uma metodologia de verificação do paralelismo do feixe em relação à mesa. Devido a isso, não há simetria na imagem, notando-se que o diâmetro do *phantom* na esquerda aparece menor que na direita.



**Figura 6.3 - Microtomografia de um *phantom* de acrílico com orifícios iguais a 700  $\mu\text{m}$ .**

A utilização do dispositivo de ajuste do paralelismo mostrou-se muito eficiente, como pode ser visto na Figura 6.4, onde é apresentada uma tomografia de um *phantom* semelhante ao anterior, porém, com orifícios de 500  $\mu\text{m}$ . O colimador foi de 215  $\mu\text{m}$ , o passo linear de 181  $\mu\text{m}$ , a energia do fotopico de 66,1 keV, a matriz de 80x80, tempo de contagem de 3 segundos, duração total de 6:59h e o feixe livre de 12200 fótons. Nesse ponto começou-se a utilizar o mecanismo de alinhamento dos

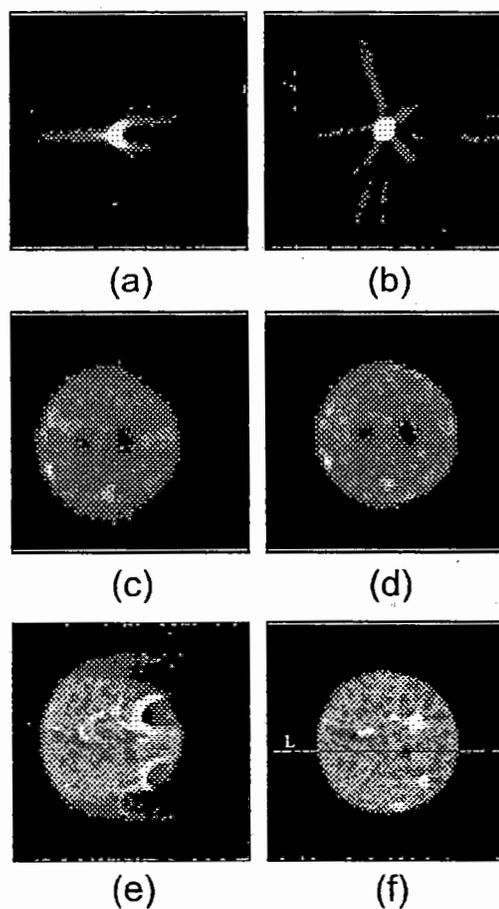


**Figura 6.4 - Microtomografia de um phantom de acrílico com orifícios de 500  $\mu\text{m}$ , utilizando o dispositivo de ajuste do paralelismo do feixe em relação à mesa.**

colimadores esquematizado na Figura 5.11b.

Como pode-se ver, a imagem mostra um círculo com boa simetria e os orifícios apresentam-se arredondados. Persistia, ainda, uma pequena assimetria, bem como a presença de um artefato, conhecido como *diapasão* (*tuning fork*), onde detalhes de uma imagem apresentam, de um lado, faixas com tons positivos do detalhe (brancas, se o detalhe for preto) e, do outro, faixas com tons negativos (pretas, se o detalhe for branco). Esse artefato é causado pela centralização da mesa fora do eixo do feixe de fótons (Taylor & Lupton, 1986).

A Figura 6.5 apresenta um conjunto de três tomografias que foram obtidas com um sério problema de centralização, pelo menos, em nível da resolução esperada. Essa descentralização era de 120  $\mu\text{m}$ . As amostras, de cima para baixo, são: um fio de cobre de 200  $\mu\text{m}$ ; um *phantom* de resina epoxy com  $\text{PbO}_2$ , com dois orifícios de 200  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ ; um *phantom* de mesma composição, porém com orifícios de 100  $\mu\text{m}$ . Os parâmetros dessas tomografias são: para o fio de cobre, energia do fotopico de 28 keV, passo linear de 30  $\mu\text{m}$ , colimador de 100  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 11 segundos, duração total de 34:37h, matriz de 100x100 e feixe livre de 9400 fótons;

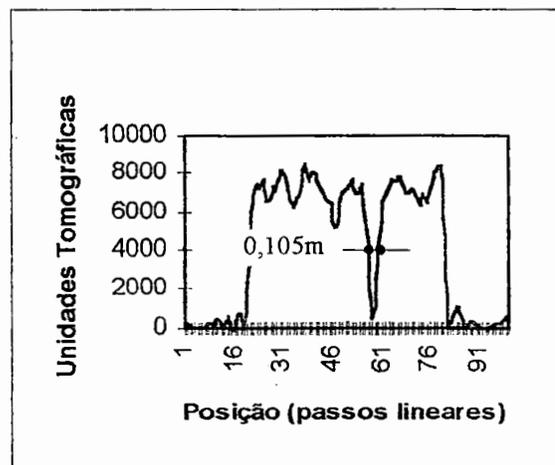


**Figura 6.5 - Tomografias de um fio de cobre de 200  $\mu\text{m}$  de diâmetro (a e b), de um *phantom* de resina epoxy com  $\text{PbO}_2$  com orifícios de 200  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$  (c e d) e de um *phantom* de resina epoxy com  $\text{PbO}_2$ , com orifícios de 100  $\mu\text{m}$  (e e f). Na esquerda são apresentadas as imagens originais e na direita as imagens com a matriz centralizada, via *software*.**

para o *phantom* com orifícios de 200  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ , energia do fotopico de 26 keV, passo linear de 50  $\mu\text{m}$ , colimador de 100  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 8 segundos, matriz de 60x60 e feixe livre de 9400 fótons; para o *phantom* com orifícios de 100  $\mu\text{m}$ , energia do fotopico de 17 keV, passo linear de 30  $\mu\text{m}$ , colimador de 60  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 16 segundos, duração total de 51:37h, matriz de 100x100 e feixe livre de 9600 fótons.

Como as amostras da Figura 6.5 possuíam uma simetria na sua geometria, foi possível, via *software*, corrigir a matriz de dados, de forma a se colocar a amostra, artificialmente, no centro. Apesar do artificialismo, esse procedimento foi válido para uma avaliação do que estava ocorrendo com o sistema que não permitia a obtenção de imagens com detalhes abaixo de 200  $\mu\text{m}$ . Como se vê na Figura 6.5c, nesta dimensão, já estava sendo possível visualizar detalhes, mesmo sem uma correção na centralização, seja de *software* ou de *hardware*. O artefato *diapasão* é fortemente ilustrado na Figura 6.5a. Um outro artefato, causado pela presença de uma forte atenuação em algum elemento da amostra, pode ser visto na Figura 6.5b, onde surgem listras radialmente centradas no ponto de alta atenuação, que nesse caso em particular, é a amostra toda.

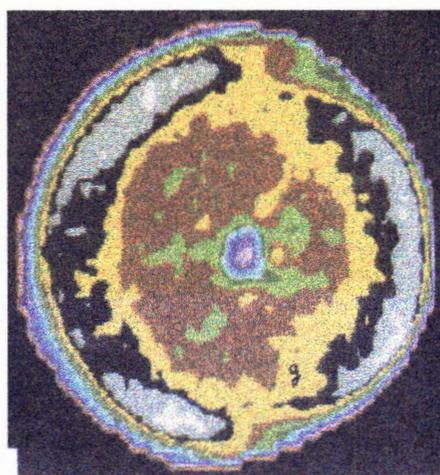
O artefato *diapasão*, na amostra com orifícios de 100  $\mu\text{m}$  produziu um efeito tão marcante que descaracterizou totalmente a imagem, não sendo possível distinguir sequer a sua forma externa e, muito menos, os detalhes. A aplicação da centralização, via *software*, nesse caso, foi de fundamental importância para uma reflexão que levasse à solução dos problemas mecânicos que estavam limitando a resolução do equipamento. Como pode ser visto,



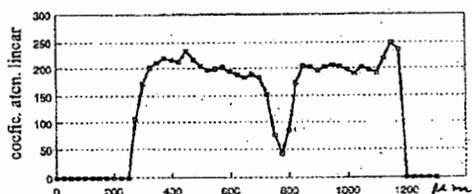
**Figura 6.6 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transcepto L da imagem da Figura 6.5.**

comparando-se as Figuras 6.5e e 6.5f, a falta de uma centralização adequada era o fator que estava faltando corrigir para se obter uma imagem com resolução de 100  $\mu\text{m}$ . Nessa imagem, podem-se notar, ainda, vários pontos com uma alta atenuação. Isso deveu-se a uma alta heterogeneidade no  $\text{PbO}_2$  utilizado para confecção do compósito da amostra. Este óxido apresentava aglomerados com compactações e colorações diferentes.

A Figura 6.6 mostra a variação das unidades tomográficas ao longo do transcepto L da Figura 6.5f. Como se vê, medindo-se a meia largura da curva na posição do orifício, pode-se estimar o seu diâmetro em 105  $\mu\text{m}$ , sendo uma boa aproximação do valor esperado. Nota-se que o valor mínimo da curva não é igual ao que se espera para o ar, que seria zero. Isso por estar a dimensão do orifício próxima da resolução do tomógrafo, o que faz com que o efeito de borda dos dois lados deste orifício se superponham. O mesmo fato pode ser observado em Appoloni & Cesareo (1994), conforme se vê na Figura 6.8, onde é apresentada a variação das unidades tomográficas da imagem da Figura 6.7. Tanto para a Figura 6.6 como para a Figura 6.8, o valor mínimo ficou em torno de 25% da média do material. No caso da Figura 6.6, as unidades tomográficas não apresentam, no ar, o valor nulo esperado devido, provavelmente, à baixa contagem de fótons, que agrava o efeito causado pelas



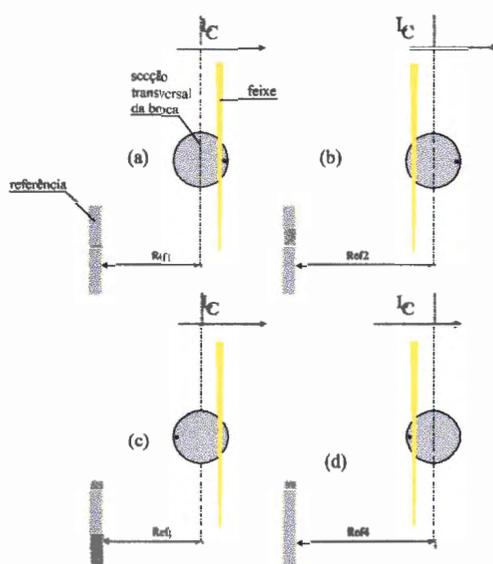
**Figura 6.7 - Tomografia de um cilindro de PVC com 970  $\mu\text{m}$  de diâmetro, contendo um orifício interno de 100  $\mu\text{m}$ . (Fonte: Appoloni & Cesareo, 1994).**



**Figura 6.8 - Variação das unidades tomográficas ao longo de um transecto passando pelo orifício central da imagem da Figura 6.7. (Fonte: Appoloni & Cesareo, 1994).**

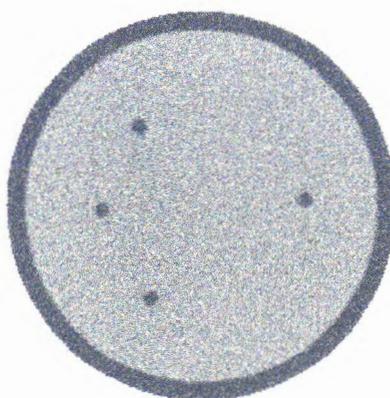
oscilações do tubo de raio X e também, possivelmente, ao processo de reconstrução de imagens que pode acrescentar ruídos, artificialmente. Appoloni & Cesareo (1994) utilizaram um detector secundário colocado em uma segunda abertura do colimador para acompanhar as oscilações do tubo. Normalizaram, então os fótons, como segue:  $NCP(X) = CP(X) \cdot (ACS/CS(X))$ , onde  $NCP(X)$  são os fótons normalizados para o X-ésimo ponto da varredura,  $CP(X)$  são os fótons contabilizados pelo detector primário,  $CS(X)$  são os fótons contabilizados no contador secundário simultaneamente à contagem de  $CP(X)$  e  $ACS$  é a média dos valores de  $CP(X)$  para a varredura em questão. Nas condições do estudo deste trabalho, pode-se notar que a flutuação apresentada não comprometeu a resolução espacial e os resultados. No entanto, o procedimento de Cesareo & Appoloni (1994) é algo que poderá ser adotado quando se procurar atingir resoluções menores.

Após um melhor ajuste da parte mecânica e alteração no procedimento de centralização da mesa, foi possível obter resultados na resolução desejada, sem necessidade de um ajuste *a posteriori*, na matriz de dados. Esse novo procedimento de centralização, 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 6.9a); quando a broca sai do feixe, em 0° (Figura 6.9b); quando a broca entra no feixe em 180° (Figura 6.9c) e quando a broca sai do feixe em 180° (Figura 6.9d). A referência, para centralização é dada, então, por  $Ref = (Ref1 + Ref2 + Ref3 + Ref4) / 4$ .



**Figura 6.9 - 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°.**

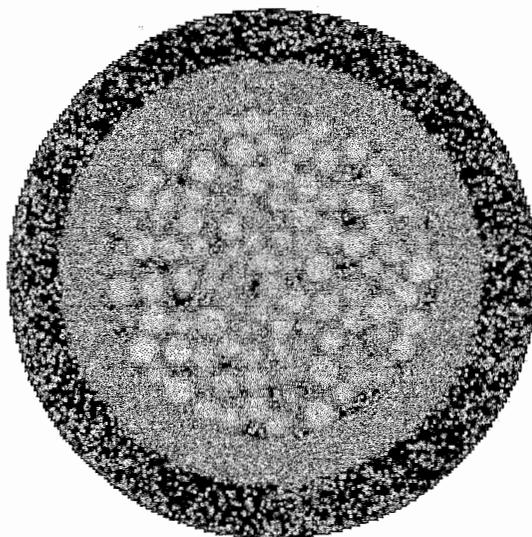
Na Figura 6.10 pode ser vista a primeira tomografia obtida após a implementação dessa nova centralização.



**Figura 6.10 - Tomografia do mesmo *phantom* da Figura 6.4, porém, obtida com o novo procedimento de centralização e reconstruída com o programa desenvolvido nesse trabalho.**

Nessa tomografia trabalhou-se com colimador de 100  $\mu\text{m}$ , energia do fotopico de 60 keV, passo linear de 56  $\mu\text{m}$ , 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.

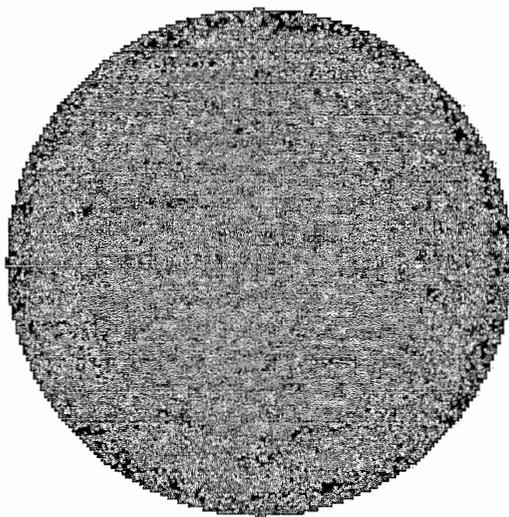
Trabalhando-se, ainda, com amostras com um certo grau de homogeneidade, porém já apresentando heterogeneidade quanto à geometria, foram feitas tomografias de microesferas de vidro acondicionadas em um recipiente com 5 mm de diâmetro interno. Na Figura 6.11, pode-se ver a tomografia de microesferas com diâmetros variando de 297  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ . Os poros apresentam dimensões da ordem de 100  $\mu\text{m}$  ou menores, quando medidos pelo programa de reconstrução e visualização. A energia do fotopico utilizado foi de 56 keV, passo linear de 44 $\mu\text{m}$ , colimador de 100  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 6 segundos, duração total de 66:44h, matriz de 180x180 e feixe livre de 69000 fótons.



**Figura 6.11 - Tomografia de uma amostra composta de microesferas de vidro com diâmetros de 297  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ , acondicionadas em um recipiente de acrílico com diâmetro interno de 5mm. A borda escura mais externa corresponde ao ar em torno do recipiente.**

Outra tomografia de microesferas de vidro, porém com diâmetros variando de 212  $\mu\text{m}$  a 297  $\mu\text{m}$ , pode ser vista na Figura 6.12. A energia do fotopico utilizado foi de 60 keV, passo linear de 49  $\mu\text{m}$ , colimador de 100  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 8 segundos, duração total de 50:58h, matriz de 144x144 e feixe livre de 52700. Os poros visíveis apresentam dimensões da ordem citada na tomografia anterior.

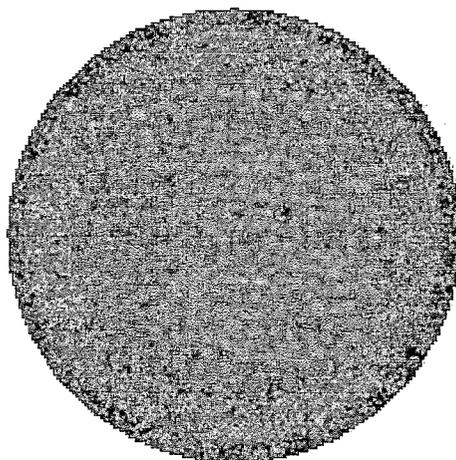
Os riscos apresentados na imagem devem-se a falhas ocorridas no tubo de raios X. O tubo do início do projeto havia atingido sua vida útil e gaseificou-se. Foi substituído por um tubo usado que apresentava problemas em voltagens ou correntes superiores. Várias tomografias foram obtidas nos valores de 70 kV e 10 mA. Esses valores, inicialmente, apresentaram certa instabilidade, produzindo contagens mais baixas, esporadicamente. Essas contagens produziam os efeitos apresentados na Figura 6.12.



**Figura 6.12 - Tomografia de microesferas de vidro, com diâmetros de 212  $\mu\text{m}$  a 297  $\mu\text{m}$ , acondicionadas no mesmo recipiente da tomografia anterior. Também podem-se observar riscos ocasionados por variações quase instantâneas no fluxo de fótons, produzidos pelo tubo de raios X.**

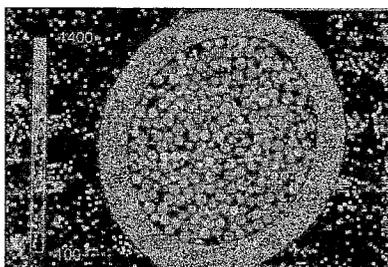
Examinando-se a matriz de dados, foi possível localizar-se um dos pontos em que isso estava ocorrendo. A substituição do valor no ponto pela média dos pontos vizinhos na varredura eliminava o artefato da tomografia. Esse tipo de falha pode ser detectado via programa de reconstrução. Na Figura 6.13 vê-se um teste, onde foi

aplicada tal detecção e correção, apenas a título de ilustração. Como pode-se ver os riscos desapareceram. Nas demais tomografias, não foi aplicado tal recurso para se evitar uma possível adulteração dos resultados.



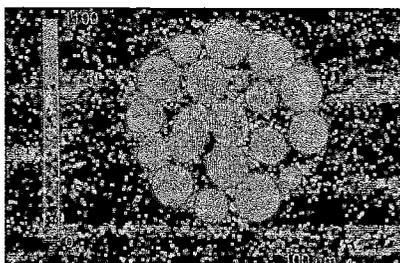
**Figura 6.13 - Tomografia da mesma aquisição relativa à Figura 6.12, porém corrigindo-se, via programa de reconstrução, as baixas contagens causadas por falhas do tubo.**

Spanne et al (1994), obtiveram resultados muito interessantes, também com esferas de vidro, conforme mostrado nas Figuras 6.14, 6.15 e 6.16. Os recipientes utilizados eram pontas de micropipetas de 1 ml, com 2,5 mm de diâmetro. Na primeira imagem, são vistas esferas com diâmetro de 100  $\mu\text{m}$ . As duas figuras seguintes são da mesma tomografia e mostram as esferas com diâmetros de 425  $\mu\text{m}$  a 600  $\mu\text{m}$  imersas numa solução de 1% de iodo. Para as duas tomografias, utilizou-se

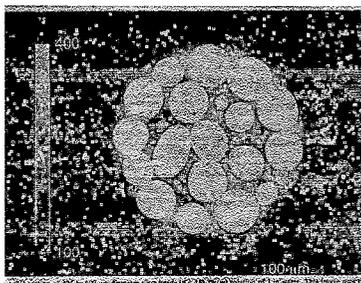


**Figura 6.14 - Tomografia de esferas de vidro de 100  $\mu\text{m}$ , utilizando-se radiação sincrotron . (Fonte: Spanne et al, 1994).**

radiação síncrotron transmitida através de um filtro de Mo, cuja descontinuidade de energia está em torno de 20 keV. A baixa energia simplifica a construção de colimadores, uma vez que estes não necessitam possuir uma espessura muito elevada. A alta fluência do acelerador síncrotron, por sua vez, possibilita o uso de colimadores com reduzida abertura, o que não é possível com o tubo de raios X utilizado neste trabalho. Para o caso das esferas de 100  $\mu\text{m}$ , por exemplo, o *voxel* (elemento de volume - termo equivalente a *pixel*, porém aplicado a volume) foi de  $5 \times 5 \times 5 \mu\text{m}^3$ .



**Figura 6.15 - Tomografia de microesferas de vidro de 425  $\mu\text{m}$  a 600  $\mu\text{m}$  imersas em solução de 1% de iodo, em escala total, utilizando-se radiação síncrotron. (Fonte: Spanne et al, 1994).**



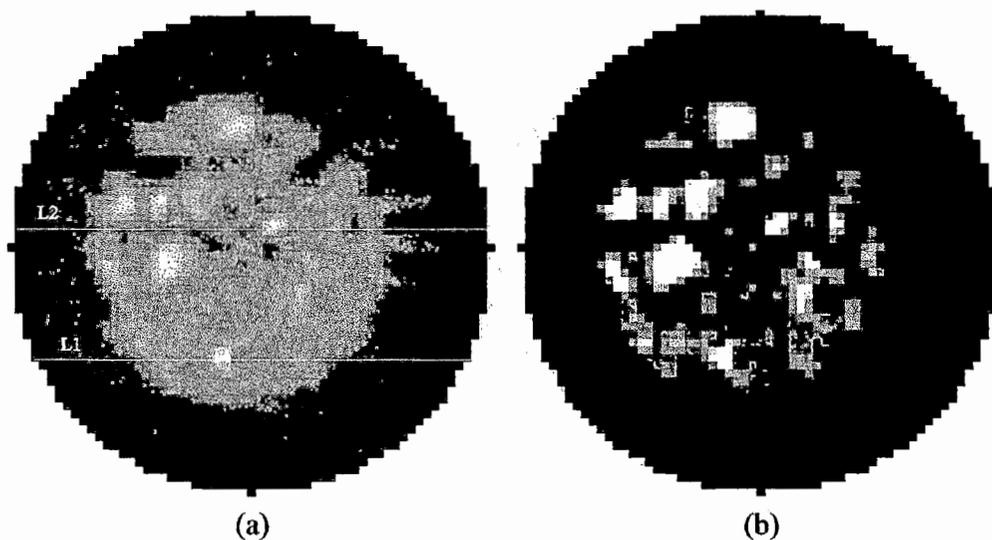
**Figura 6.16 - Idem Figura 6.15, porém com a faixa completa de tons de cinza correspondendo à faixa de escala de 100 a 400, realçando o líquido. (Fonte: Spanne et al, 1994).**

No segundo caso, foram utilizadas escalas diferentes de observação, sendo para a Figura 6.15 escala total de 0 a 1100 unidades tomográficas e para a Figura 6.16 foi feita uma extensão da escala, visualizando-se os valores entre 100 e 400, permitindo um realce do líquido.

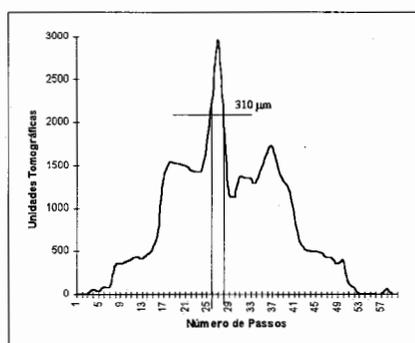
## 6.2 Resultados obtidos com amostras perturbadas de solos

Visando-se uma primeira aproximação de casos reais, foram desenvolvidas aquisições com amostras perturbadas de solo. Entende-se, aqui, por amostra perturbada uma amostra obtida a partir da desestruturação de um solo.

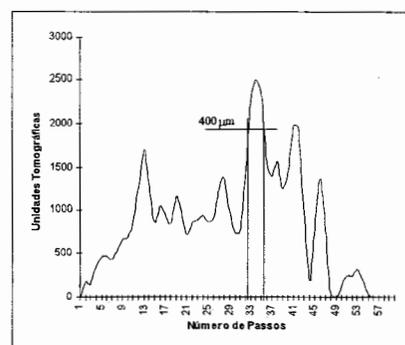
Na Figura 6.17a pode-se ver uma tomografia de um solo podzólico vermelho amarelo, peneirado, acondicionado em um recipiente de 5 mm de diâmetro interno. Não é possível visualizar poros, pois foi utilizado colimador de 215  $\mu\text{m}$ , implicando em uma resolução espacial baixa. Notam-se, porém, devido 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 6.17b. 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 6.17 - Tomografia de um podzólico 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.**



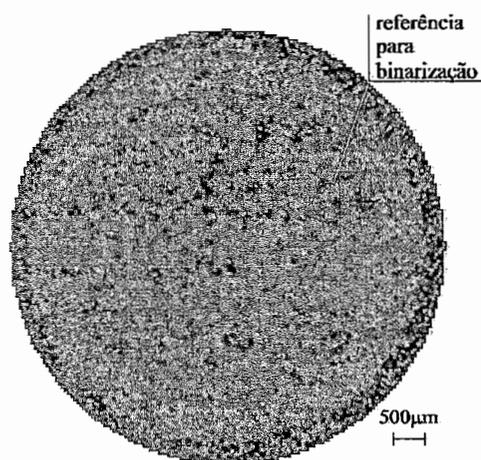
**Figura 6.18 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L1 da tomografia da Figura 6.17.**



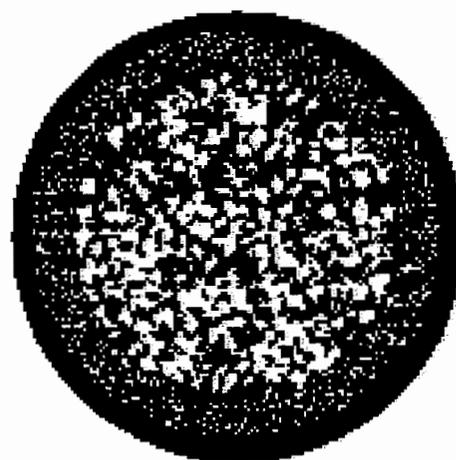
**Figura 6.19 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L2 da tomografia da Figura 6.17.**

Figura 6.17b, o critério de escolha da escala utilizou, como auxiliar, o gráfico da Figura 6.18, onde é vista a variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L1 dessa imagem. Procurou-se realçar os aglomerados representados pelos dois picos. Na Figura 6.19 mostra-se a variação das unidades tomográficas ao longo de L2. Avaliando essas variações podem-se estimar as dimensões dos dois aglomerados em 310  $\mu\text{m}$  e 400  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Os dois gráficos das Figuras 6.18 e 6.19 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, neste capítulo, esse fato pode se acentuar, perdendo sentido, devido à heterogeneidade, a descrição de determinado parâmetro através de sua média. A energia do fopico utilizado foi de 28 keV, passo linear de 133  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 5 segundos, duração total de 5:58 h, matriz de 60x60 e feixe livre de 135000 fótons.

Outro resultado obtido com solo perturbado pode ser visto na tomografia da Figura 6.20. Trata-se de um solo podzólico vermelho, peneirado, contendo agregados de 212  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$ . Os poros são visíveis e foram medidos no programa de reconstrução e visualização, apresentando valores da ordem de 100  $\mu\text{m}$ . Na Figura



**Figura 6.20 - Tomografia de um solo podzólico vermelho peneirado, apresentando agregados de 212  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$ .**

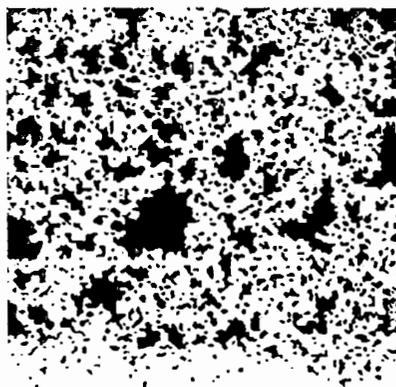


**Figura 6.21 -Binarização da tomografia da Figura 6.20, utilizando-se o tom de cinza dos aglomerados da área indicada, como limiar. O tom preto representa poros.**

6.21 mostra-se a uma binarização da imagem, tomando-se como limiar o tom de cinza dos agregados da região circundada em tracejado da Figura 6.20. Essa binarização foi obtida utilizando-se o sistema de processamento de imagens SIARCS - Sistema de Avaliação de Raízes e Cobertura de Solos, de propriedade da Embrapa (Jorge & Crestana, 1996). Os parâmetros da tomografia foram: energia do fotopico de 60 keV, passo linear de 49  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 10 segundos, duração total de 62:39h, colimador de 60  $\mu\text{m}$ , matriz de 144x144 e feixe livre de 42000 fótons.

A binarização dessa imagem permite uma melhor visualização desse sistema poroso, com seus agregados, poros e canais de interligação entre poros. A sua aplicação será, com certeza, uma ferramenta valiosa no estudo de fenômenos de transferência de massa em meios porosos, aliando-se a resultados obtidos em estudos recentes como em Posadas (1994), Fernandes (1994), Xuefeng (1995), Onody et al (1995), Posadas et al (1996) e Laurindo (1996). Nesses trabalhos foram feitas simulações ou desenvolvidos modelos analisando percolação por invasão, fenômeno "fingering", processos de invasão de fluidos não molhantes, transferência de massa e evaporação em meios porosos capilares. O uso do tomógrafo micrométrico poderá trazer comprovações ou complementações experimentais desses modelos ou dessas

simulações, principalmente a quantificação não-destrutiva da distribuição de poros, pelo menos macroporos de acordo com a resolução de imagem apresentada neste trabalho, que é essencial na invasão de fluidos em meios porosos. Compare-se, por exemplo, a imagem da Figura 6.21 com a da Figura 6.22 (Laurindo, 1996), onde é apresentado um exemplo de distribuição de fases líquida e gasosa em um micromodelo.



**Figura 6.22 - Exemplo de distribuição de fases líquida e gasosa em um micromodelo, construído em resina. As áreas escuras representam a fase líquida e as claras a fase gasosa. (Fonte: Laurindo, 1996).**

Na Figura 6.23 pode-se ver a tomografia de uma coluna constituída de uma camada superior de areia com granulometria indo de 106  $\mu\text{m}$  a 149  $\mu\text{m}$  e uma camada inferior com granulometria de 297  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ , acondicionadas em um recipiente de acrílico com diâmetro interno de 8mm e altura interna de 8 mm. Seus parâmetros são: energia de fotopico de 60 keV, passo linear de 62  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 6s, duração de 95:19h, colimador de 60  $\mu\text{m}$ , matriz de 225x225 e feixe livre de 28000 fótons.

Como pode ser visto na imagem, pode-se notar que a distribuição dos espaços vazios não é homogênea e isotrópica. 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*, sendo um exemplo a imagem da Figura 6.24, onde se vê a infiltração em uma coluna com uma camada de 10 cm de areia fina sobre uma camada com 80 cm de areia grossa. A

Figura 6.23 mostra detalhes em nível de macroporo que podem ser associados a esse fenômeno.

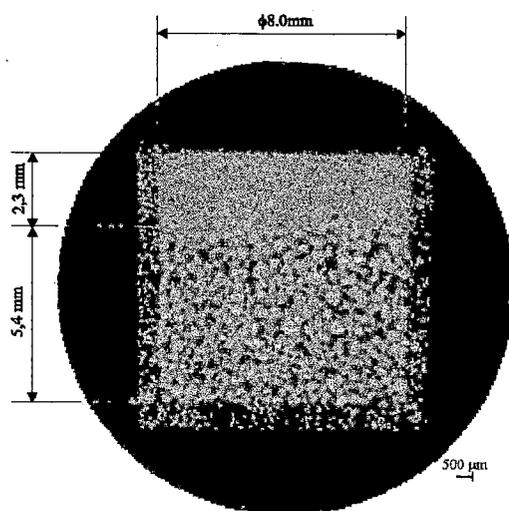


Figura 6.23 - Tomografia de uma coluna de areia com granulometria de 106 a 149  $\mu\text{m}$ , na camada superior, e 297 a 500  $\mu\text{m}$ , na camada inferior. Nota-se a presença de heterogeneidades na distribuição do espaço poroso.

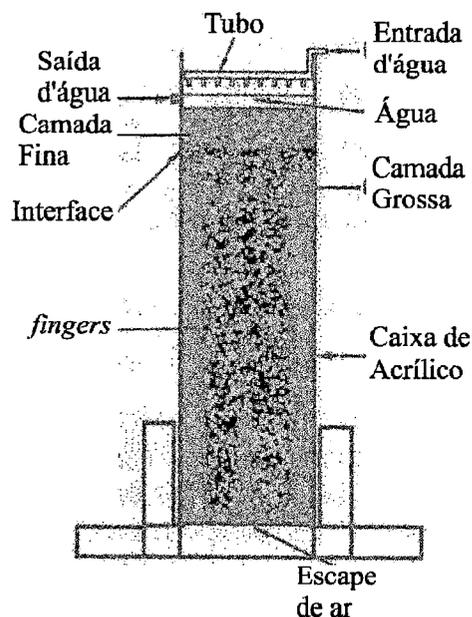
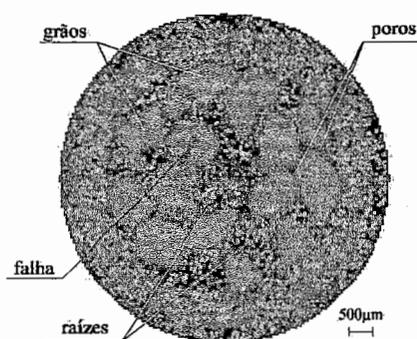


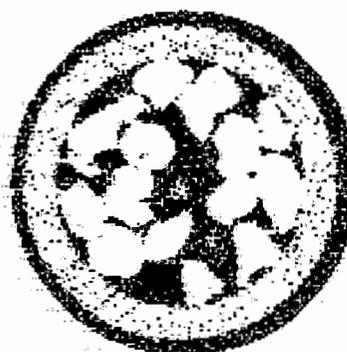
Figura 6.24 - Coluna com duas camadas de areia, apresentando o fenômeno *fingering*. As camadas superior e inferior possuem 10 cm e 80 cm, respectivamente. (Fonte: Onody et al, 1995).

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 6.25. 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  $\mu\text{m}$ . Num dos grãos pode-se notar, também, uma falha. As dimensões dessa falha são de 110  $\mu\text{m}$  de largura por 460  $\mu\text{m}$  de comprimento. Os parâmetros da tomografia são:

energia do fotopico de 60 keV, colimador de 60  $\mu\text{m}$ , passo linear de 49  $\mu\text{m}$ , 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 6.26. Os valores para a escala total é de 0 a 1,329. Essas imagens são semelhantes à obtida por Crestana & Nielsen (1990), mostrada na Figura 4.9. Naquela imagem, as raízes são vistas mais claramente, devido à alta fluência do tubo, permitindo uma melhor estatística e um tempo de aquisição mais curto, o que minimiza a perda da água das raízes.



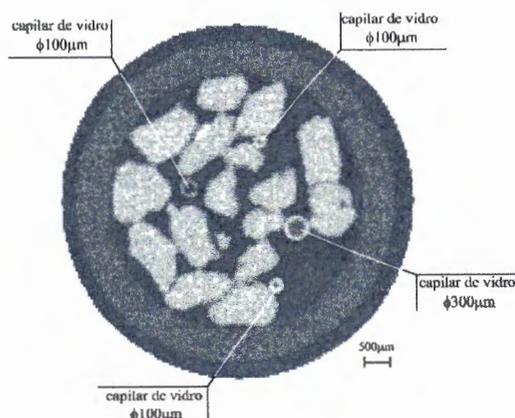
**Figura 6.25 - Tomografia de uma amostra de grãos de areia de 1 mm e raízes, apresentando poros da ordem de 100  $\mu\text{m}$ .**



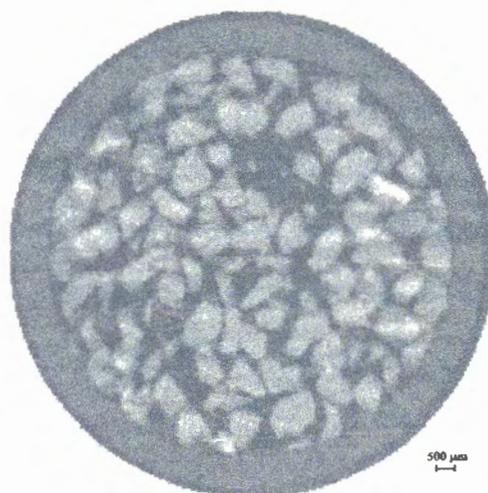
**Figura 6.26 - Idem à Figura 6.25, porém com realce das raízes, utilizando escala de 0,080 a 0,120 unidades tomográficas.**

Duas imagens semelhantes à obtida acima podem ser vistas nas Figuras 6.27 e 6.28. Na primeira, as raízes foram substituídas por capilares de vidro com diâmetros internos de 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$  e contendo água. Os parâmetros da tomografia são os mesmos da Figura 6.25, com exceção do feixe livre que foi de 39000 fótons. Na Figura 6.28, vê-se uma amostra maior, tendo o diâmetro interno do cilindro o valor de 10 mm e o externo de 12,65 mm. Além de um maior tamanho da amostra, os grãos de areia estão na faixa de 0,5 mm a 1 mm. Os contornos dos grãos podem ser claramente vistos, bem como poros na dimensão do pixel, de 59  $\mu\text{m}$ . A energia do fotopico foi de 60 keV, o colimador de 60  $\mu\text{m}$ , o passo linear de 59  $\mu\text{m}$ , 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. Foi para processar matrizes com ordem deste valor que o programa desenvolvido neste trabalho foi necessário.



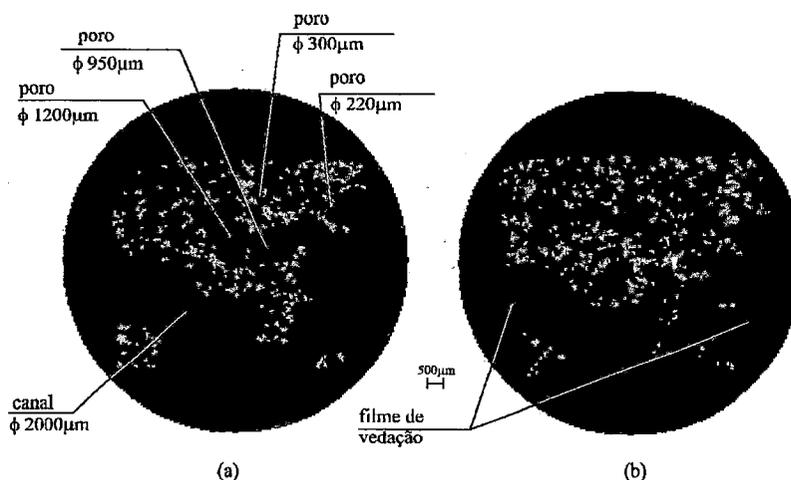
**Figura 6.27 - Tomografia de uma amostra contendo grãos de areia de 1mm e capilares de vidro com diâmetros de 100 μm, 200 μm e 300 μm.**



**Figura 6.28 - 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 constituída 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  $100 \mu\text{m}$  podem ser notados, como o septo que separa os dois poros de  $1200 \mu\text{m}$  e  $950 \mu\text{m}$ . Na Figura 6.29a, trabalhou-se com amostra seca, enquanto que na tomografia da Figura 6.29b foi acrescentada

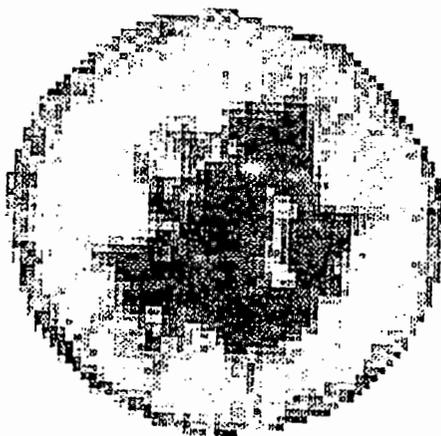
água, obtendo-se o valor de 42,8% para a umidade gravimétrica. Nota-se que não houve um contraste sensível entre a água e a argila expandida, diminuindo o número de detalhes da imagem. Para manter a umidade durante a aquisição, a amostra foi envolvida em um filme plástico, que aparece nas bordas da imagem. 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 60 keV, passo linear de 61 $\mu$ m, tempo de contagem de 7 segundos, duração total de 70:16h, matriz de 180x180 e feixe livre de 28000 fótons.



**Figura 6.29- Tomografia de um fragmento de argila expandida: (a) amostra seca, onde podem ser vistos poros da ordem de 200  $\mu$ m e detalhes como o septo de 60  $\mu$ m, separando os dois poros de 1200  $\mu$ m e 950  $\mu$ m; (b) mesma amostra com umidade gravimétrica de 42,8%.**

Pode-se comparar os resultados das Figuras 6.20, 6.25, 6.27, 6.28 e 6.29 com as tomografias de outros autores, também na escala micrométrica. Aqui, foi possível delinear com clareza os contornos dos grãos de solo com tamanhos variando entre 212  $\mu$ m e 250  $\mu$ m (Figura 6.20), de grãos de areia e capilares de vidro (Figuras 6.25, 6.27 e 6.28) e os poros entre eles, que apresentavam dimensões iguais ou inferiores a 100  $\mu$ m, e os poros da amostra de argila expandida (Figura 6.29), acima de 200  $\mu$ m. Esses resultados foram possíveis com amostras com tamanhos iguais ou superiores a

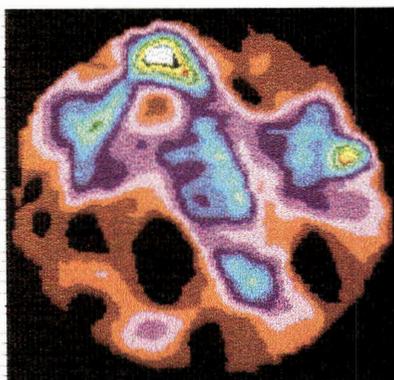
5mm. As tomografias com solo, desenvolvidas por Assis (1992), das quais pode-se ver um exemplo na Figura 6.30, foram feitas com grãos de solo colocados em um recipiente de plástico com 1,4 mm de diâmetro interno.



**Figura 6.30 - Tomografia de amostra contendo grãos de solo, tendo cada um a medida de 500  $\mu\text{m}$ . (Fonte: Assis, 1992)**

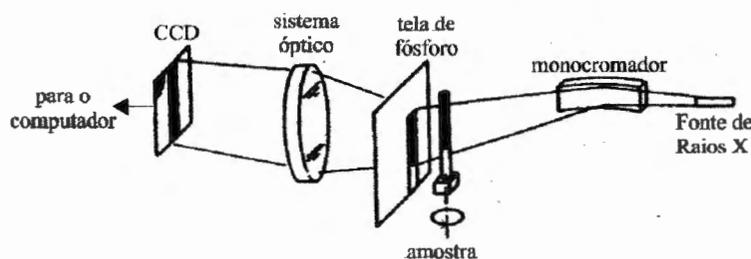
Talvez o fator limitante, para Assis (1992), quanto ao tamanho da amostra, tenham sido os colimadores, pois, conforme citado naquele trabalho, para diâmetros iguais ou menores que 100  $\mu\text{m}$ , eles não blindavam a radiação de maneira satisfatória na área fora do orifício. Portanto, isso não permitia que se trabalhasse com energias superiores à citada, limitando, assim, o tipo e o tamanho da amostra. Os colimadores construídos no trabalho aqui apresentado permitiram o uso de energias de até 60 keV, tendo blindado completamente a radiação, fora do orifício.

Em Appoloni & Cesareo (1994), por utilizarem o mesmo equipamento que Assis (1992), a limitação foi a mesma, para imagens com solo. Na Figura 6.31 vê-se uma imagem de um latossolo roxo distrófico, obtida por esses autores. O diâmetro da amostra é de 2 mm e são vistos cinco grãos de solo, imersos num particulado fino de argila.



**Figura 6.31 - Tomografia de uma amostra contendo cinco grãos de solo, imersos em argila. (Fonte: Appoloni & Cesareo, 1994).**

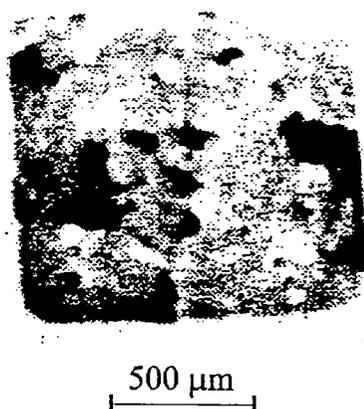
Flanery et al (1987), utilizando um equipamento, conforme esquematizado na Figura 6.32, obtiveram tomografias em vários planos de amostras pequenas, possibilitando a sua reconstrução em três dimensões. Nesse sistema, a radiação Bremstrahlung incide sobre um monocromador que emite uma radiação com um espectro de energia estreito. Esta radiação, após interagir com a amostra, sensibiliza uma tela de fósforo que a converte em radiação visível, formando uma imagem projetada, que é convertida em pulsos elétricos pelo CCD plano. Esses pulsos são digitalizados e, após isso, lidos e processados por um microcomputador.



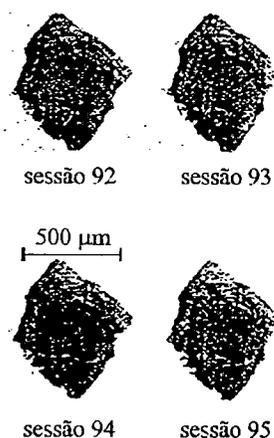
**Figura 6.32 - Sistema tomográfico utilizando um monocromador, uma tela fosforescente, um sistema de focalização óptico, um CCD plano e um microcomputador. (Fonte: Flannery et al, 1987).**

No artigo não foram apresentadas imagens tridimensionais, mas pode-se, ver na Figura 6.33, uma imagem de uma secção transversal de uma amostra de arenito

impregnada com epoxy e, na Figura 6.34, quatro secções consecutivas de uma amostra de carvão. A amostra de arenito possui, aproximadamente, 1200  $\mu\text{m}$  de largura e o fragmento de carvão 500  $\mu\text{m}$ . No primeiro caso utilizou-se um equipamento de raios X de laboratório, com energia de 8 keV. Para o carvão, trabalhou-se com radiação sincrotron de 6,8 keV. Como pode-se notar, novamente, as amostras são de pequena dimensão e a energia é baixa. Nessas condições, torna-se viável obter resoluções bem baixas, pois pode-se usar o recurso do monocromador e da difração dos raios X, como foi o caso das amostras citadas. Para a tomografia com o equipamento de raios X, a resolução obtida foi de 10  $\mu\text{m}$  e para a radiação sincrotron 2,8  $\mu\text{m}$ . Porém, esses sistemas seriam inviáveis para amostras reais de solo com dimensões da ordem de 10 a 20 mm, devido à forte atenuação que ocorreria, mesmo utilizando-se radiação sincrotron.

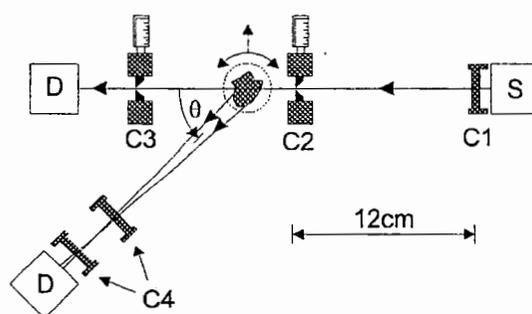


**Figura 6.33 - Tomografia de uma amostra de arenito impregnada com resina epoxy, onde são vistos poros de 20  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ . (Fonte: Flannery et al, 1987).**



**Figura 6.34 - Quatro tomografias em planos consecutivos, de uma amostra de carvão. (Fonte: Flannery et al, 1987).**

No trabalho de Grant et al (1993), foi desenvolvido um sistema tomográfico, utilizando as propriedades da difração do raio X. O seu diagrama esquemático pode ser visto na Figura 6.35. Nesse tipo de tomografia, ao invés da radiação transmitida, o que se mede é a radiação espalhada. A vantagem do método é a capacidade de se enfatizar detalhes da amostra contendo elementos de interesse, através da escolha do ângulo de espalhamento.



**Figura 6.35 - Diagrama de bloco do tomógrafo por difração de raio X.**

(Fonte: Grant et al, 1993).

Nas Figuras 6.36 e 6.37, são vistas, respectivamente, o *phantom* construído por Grant et al (1993) e quatro tomografias, sendo uma em transmissão direta e as demais por difração de raios X em ângulos diferentes, conforme indicado na figura. O *phantom* é composto de um cilindro externo e dois cilindros internos. Os cilindros internos contêm glicerol e óleo, respectivamente, e no terceiro cilindro colocou-se água.

A limitação nessa tomografia reside na baixa intensidade e energia dos fótons medidos em determinada direção. Na tomografia em questão, o número máximo foi de 1800 fótons. Para a amostra citada, esse número, apesar de comprometer a estatística, possibilitou a obtenção da imagem e com resultados interessantes. Para solos, entretanto, com amostras reais, esse número inviabilizaria completamente a obtenção de uma microtomografia.

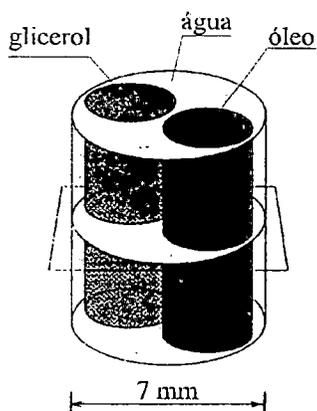


Figura 6.36 - *Phantom* para a tomografia da Figura 6.37, composto de água, glicerol e óleo. (Fonte: Grant et al, 1993).

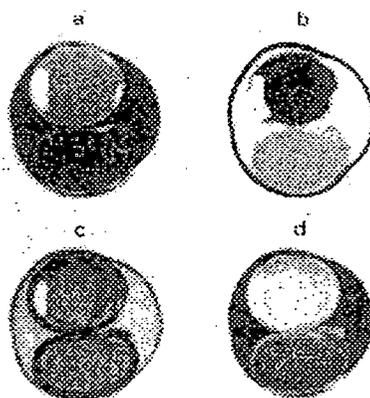
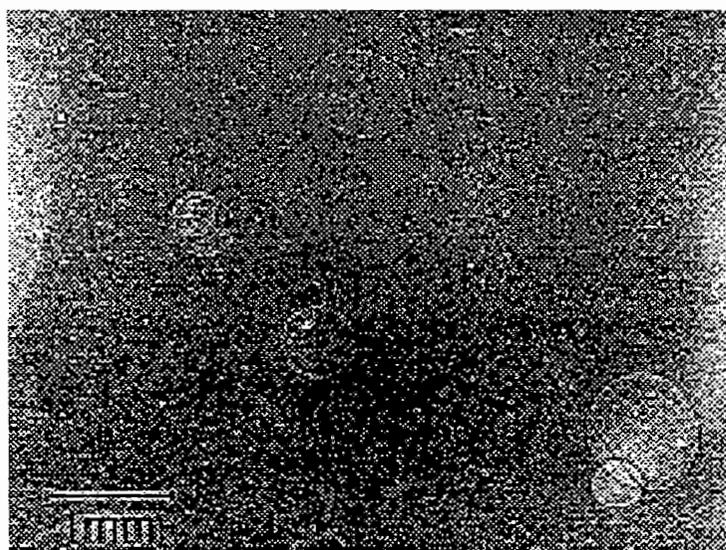


Figura 6.37 - Tomografias do *phantom* da Figura 6.36: (a) em transmissão direta; (b) por difração em  $6,2^\circ$ ; (c) por difração em  $8,6^\circ$  e (d) por difração em  $11,3^\circ$ . (Fonte: Grant et al, 1993).

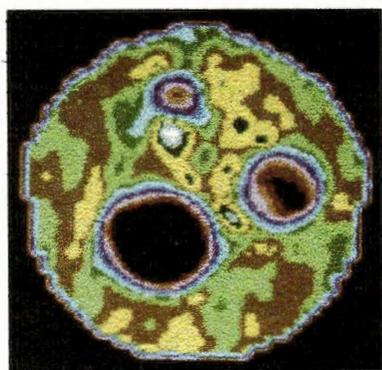
Wilkins et al (1996), utilizando raio X policromático (espectro largo de energia), obtiveram radiografias por um processo de imagem por contraste de fase. Esse processo utiliza-se da variação de fase da radiação ao atravessar a amostra e é aplicável para se obter imagens de objetos com baixa atenuação da radiação. Na Figura 6.38 pode-se ver uma radiografia de bolhas de ar imersas em uma cola de polímero. A voltagem do tubo foi de 60 kV. Ainda é um processo radiográfico, porém, com potencial para aplicações futuras em tomografia, desde que utilizada com material de baixa absorção.



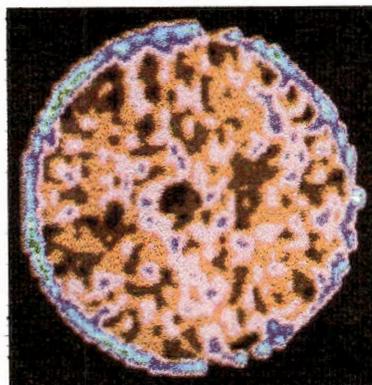
**Figura 6.38 - Imagem de bolhas de ar imersas em cola, obtida por radiografia de contraste de fase.**

(Fonte: Wilkins et al, 1996).

Em Cesareo et al (1994b), podem ser vistas, entre outras, tomografias de uma amostra cilíndrica de PVC, com diâmetro de 2,0 mm e orifícios de 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  e 400  $\mu\text{m}$ , e de um cilindro de madeira com diâmetro externo de 3,5 mm, contendo um orifício de 200  $\mu\text{m}$ . Também aqui, as amostras são pequenas devido, provavelmente, às mesmas causas já apresentadas. A energia do fotopico utilizado foi de, aproximadamente, 20 keV, não permitindo o desenvolvimento com amostras maiores de solos. As tomografias são vistas nas Figuras 6.39 e 6.40.

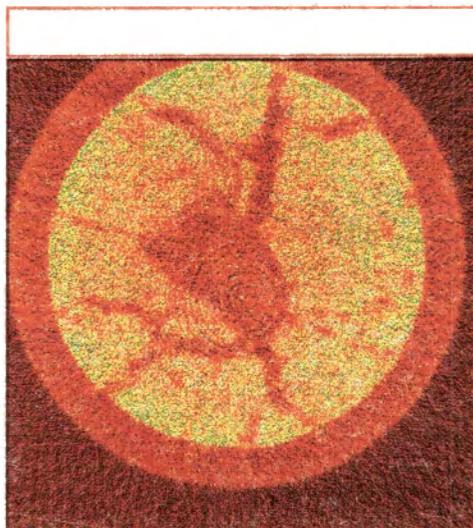


**Figura 6.39 - Tomografia de uma amostra de PVC, com 2,0 mm de diâmetro externo e com orifícios de 100, 200 e 400  $\mu\text{m}$ . (Fonte: Cesareo et al, 1994b).**

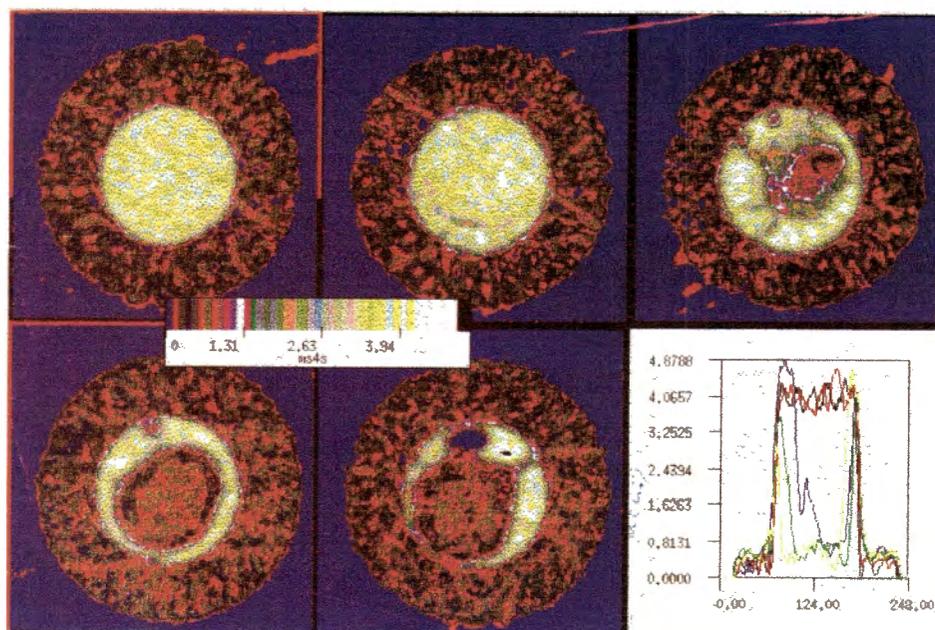


**Figura 6.40 - Tomografia de uma amostra de madeira com diâmetro externo de 3,5 mm e com um orifício de 200  $\mu\text{m}$ . (Fonte: Cesareo et al, 1994b).**

Em Crestana & Nielsen (1990) vários resultados foram obtidos na escala micrométrica, entre os quais podem-se ver as imagens das Figuras 6.41 e 6.42. No primeiro caso, tem-se uma coluna cilíndrica com 25,4 mm de diâmetro, contendo um solo argiloso em processo de secagem. Podem ser vistas fissuras, com resolução espacial de 100  $\mu\text{m}$ . No segundo caso, vêem-se as imagens sequenciais, de 2 em 2 mm na vertical, de outra coluna cilíndrica com diâmetro de 25,4 mm, contendo solo argiloso úmido e uma semente de algodão, com resolução espacial menor que 100  $\mu\text{m}$ . As energias empregadas foram da ordem de 20 keV. Esses resultados foram obtidos utilizando-se fontes de alta fluência, o que compensou a baixa energia empregada.



**Figura 6.41 - Tomografia de uma coluna cilíndrica, contendo solo argiloso em processo de secagem, podendo ser vistas fissuras. Resolução espacial de 100  $\mu\text{m}$ . (Fonte: Crestana & Nielsen, 1990).**

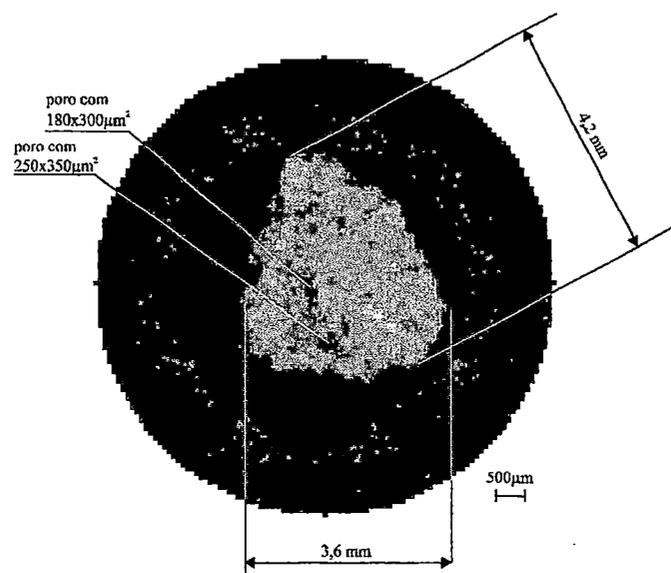


**Figura 6.42 - Tomografias de uma coluna cilíndrica com 25,4 mm de diâmetro, contendo solo argiloso úmido e uma semente de algodão. Da parte esquerda superior para a direita inferior, são vistas cinco imagens seqüenciais do topo da amostra para baixo, eqüidistantes em 2 mm. (Fonte: Crestana & Nielsen, 1990).**

### 6.3 Resultados obtidos com amostras não perturbadas de solos

Nas tomografias seguintes foram utilizadas amostras naturais de solos, não perturbadas.

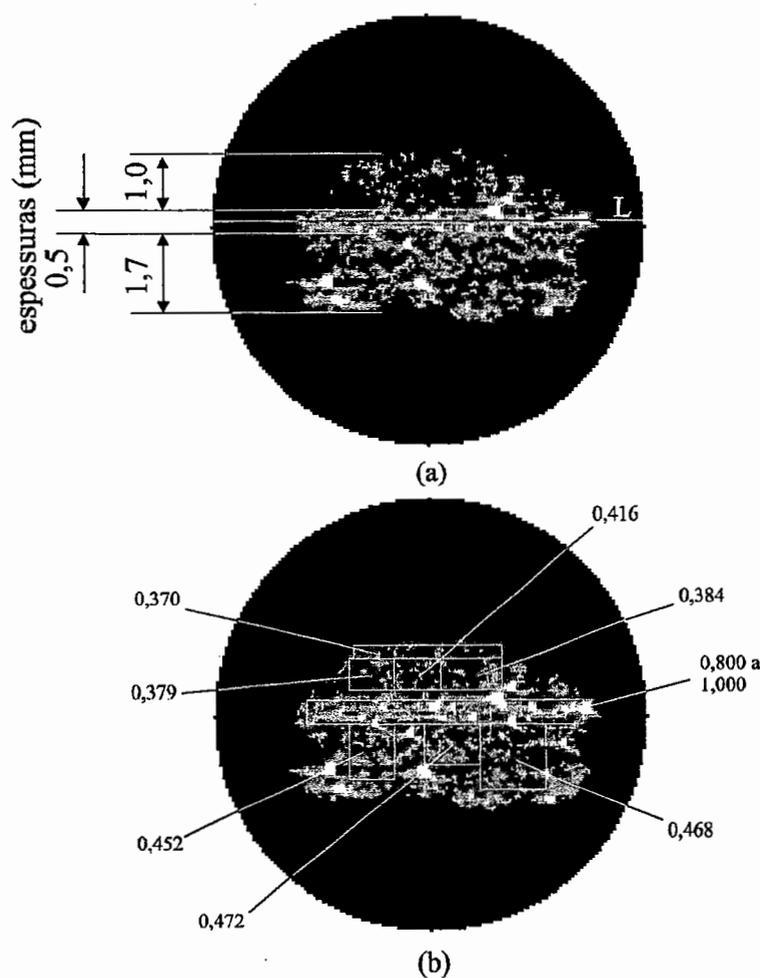
Na imagem da Figura 6.43, tem-se um pequeno torrão de um latossolo vermelho escuro, colocado no interior de um recipiente de acrílico com 5 mm de diâmetro interno. Podem ser notados, nessa imagem, dois macroporos com dimensões da ordem de 300  $\mu\text{m}$  e alguns pontos com densidade mais elevada. 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  $\mu\text{m}$ , colimador de 100  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 5 segundos, duração total de 20:35h, matriz de 100x100 e feixe livre de 38000 fótons.



**Figura 6.43 - Tomografia de um torrão de latossolo vermelho escuro, onde podem ser vistos dois macroporos.**

Na Figura 6.44, tem-se uma imagem de uma amostra de solo apresentando selamento superficial. 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. 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).



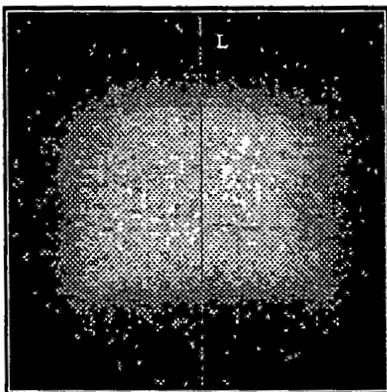
**Figura 6.44 - Tomografia de uma amostra de solo com selamento superficial, sendo visto em (a) as dimensões das camadas que se formaram no processo e em (b) os valores médios das unidades tomográficas por regiões.**

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 6.44b mostra valores médios das unidades tomográficas por regiões. Para a faixa de energia que foi utilizada, de 60 keV, pode-se calcular o coeficiente de atenuação médio de cada área demarcada na Figura 6.44b,

através da equação do gráfico da Figura 5.23. 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.

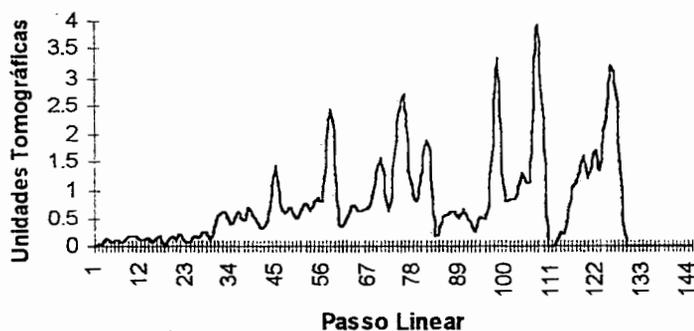
Os parâmetros dessa tomografia foram: energia do fotopico de 60 keV, passo linear de 63  $\mu\text{m}$ , tempo de contagem de 8 segundos, duração total de 50:58h, matriz de 144x144, colimador de 60  $\mu\text{m}$  e feixe livre de 32000 fótons.

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 6.44, 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 6.45, onde se vê uma imagem da secção de uma amostra do mesmo lote de solos de onde foi retirado o fragmento da Figura 6.44. 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.



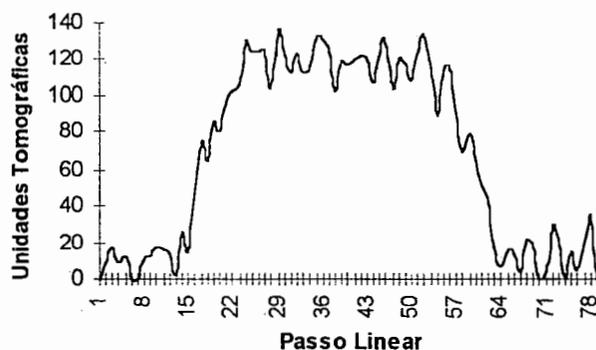
**Figura 6.45 - Tomografia milimétrica de uma amostra do mesmo solo com selamento superficial, da Figura 6.44. (Cedida pelo Dr. Carlos M. P. Vaz, da Embrapa/Instrumentação Agropecuária).**

Outra característica que merece menção é a variação das unidades tomográficas que, na microtomografia perde a característica de médias locais, conforme discutido no capítulo 4, sobre a tomografia de Crestana & Nielsen (1990), Figuras 4.9, 4.10 e 4.11. A Figura 6.46 mostra a variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L, da Figura 6.44a, onde esse fato pode ser observado, quando em comparação com a Figura 6.47, na qual se mostra a variação das unidades tomográficas da Figura 6.45.



**Figura 6.46 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L da tomografia da Figura 6. 44a.**

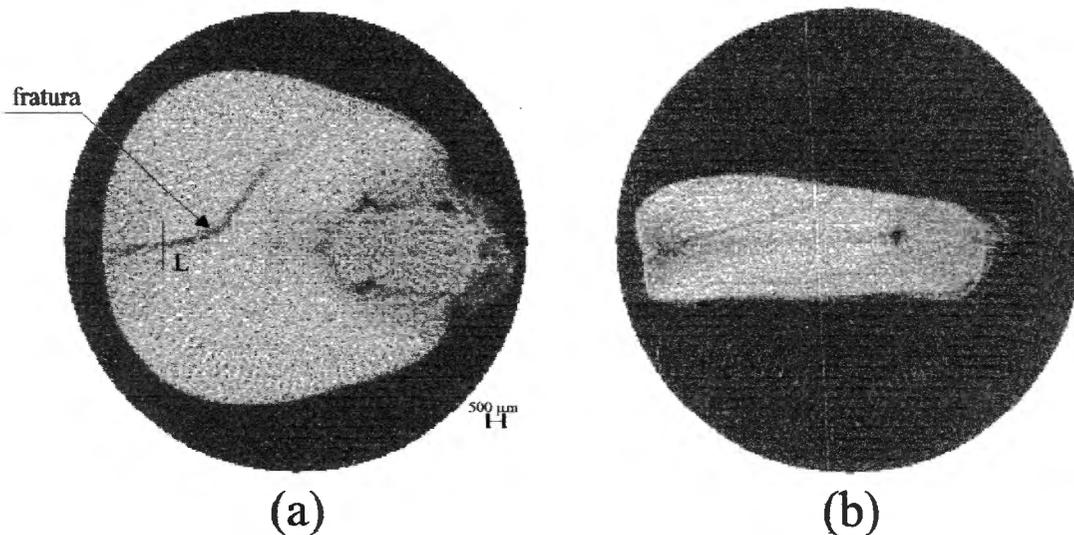
Na Figura 6.47 nota-se apenas a curva oscilando em torno de um valor médio local, enquanto que na Figura 6.46 tem-se uma informação muito mais detalhada sobre a amostra, ao mesmo tempo em que traz a necessidade de um novo enfoque na interpretação da imagem.



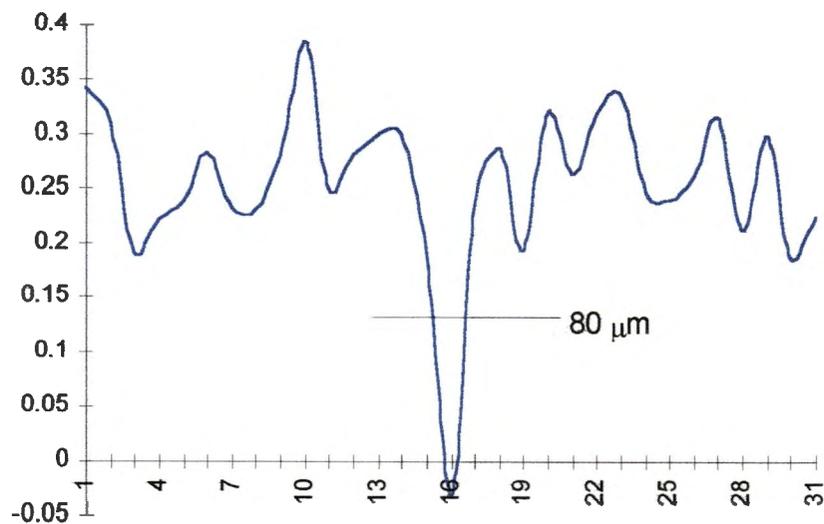
**Figura 6.47 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L da tomografia da Figura 6.45.**

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 6.48, mostra-se a microtomografia de um grão de milho, onde se vê claramente uma fratura, com uma largura de 80  $\mu\text{m}$  na região onde ela cruza com o transecto L. O estudo de danos mecânicos tem importância tanto na seleção genética de grãos, pois se a fratura atinge o embrião, a germinação pode estar comprometida, como no uso da semente pela indústria, pois a fratura pode ser um ponto de entrada de microorganismos (Strazzi & Setti, 1995).

A Figura 6.49 mostra o gráfico da variação das unidades tomográficas ao longo do transecto L.



**Figura 6.48 - Microtomografia de um grão de milho, apresentando fratura; (a) plano do milho; (b) normal ao plano do milho. Obteve-se resolução de 80 μm.**



**Figura 6.49 - Variação das unidades tomográficas ao longo do transepto L, mostrando a largura da fratura naquela região.**

## 7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 Conclusões

Os resultados apresentados nesse trabalho mostraram que foi possível construir um tomógrafo a um custo relativamente baixo, 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 custo baixo refere-se a uma comparação com os tomógrafos médicos, por exemplo, que estão na ordem de grandeza de meio milhão de dólares. Cabe, também, uma comparação com o tomógrafo da Aracor, citado no capítulo 1, com valor da ordem de um milhão de dólares. Obviamente, o nível de recursos técnicos deste último é maior, inclusive com fonte de raios X mais potente e de energia mais penetrante. Mas, reside exatamente nisso a vantagem da construção de um equipamento dedicado: restringir 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  $\mu\text{m}$ , abaixo dos 100  $\mu\text{m}$  propostos, inicialmente. 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 nos capítulos 1 e 6. 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.

## 7.2 Trabalhos futuros

A binarização de algumas imagens, ressaltando o contraste entre poros e agregados e apresentando os canais de interligação, sugere a possibilidade da integração dessa ferramenta com outras metodologias, viabilizando um estudo não invasivo do interior de amostras opacas, para a determinação, entre outros parâmetros, da porosidade, da evaporação e da drenagem em meios porosos.

As tomografias mostraram um melhor contraste para o caso de amostras secas. Em amostras homogêneas foi possível fazer-se a tomografia da água, acondicionada em recipiente cilíndrico, com valores conforme apresentados nos gráficos de calibração mostrados no capítulo 6. Porém, a detecção da fase líquida dentro de um meio poroso não trouxe um contraste tão visível. Cabe, portanto, para estudos futuros, o desenvolvimento de uma metodologia que permita visualizar as fases sólida, líquida e gasosa, quando investigando meios porosos. O equipamento será o mesmo, havendo necessidade, apenas, de um estudo com várias energias ou o uso de contrastantes, por exemplo.

Um fator marcante nas tomografias com resoluções de pelo menos 100  $\mu\text{m}$  foi o tempo de duração total da aquisição, de várias dezenas de horas. Esse seria mais um ponto que caberia em um desenvolvimento futuro: a transformação do tomógrafo de primeira geração, aqui construído, em um tomógrafo de terceira geração. Ao início desse trabalho, não existiam, com disponibilidade comercial e a custo acessível, *diode arrays* com a resolução que se tem atualmente, de 12,5  $\mu\text{m}$ , por exemplo. Em alguns casos, esses diodos chegam a possuir uma grade de Pb, impedindo a contagem, em uma determinada direção, de fótons espalhados de outras direções. Esse era um dos fatores limitantes, para a resolução, dos tomógrafos de terceira geração. Para se ter uma idéia da variação do tempo de aquisição entre as duas gerações, para a imagem do selamento superficial, esse tempo foi de 50:58h. Em um tomógrafo de terceira geração, esse tempo cairia para, aproximadamente, 25 minutos. Em valores de tempo dessa ordem de grandeza, já começam a se viabilizar estudos de processos com dinâmica relativamente rápida.

Uma outra alternativa para não só reduzir o tempo de contagem, como também obter tomografias com feixes com maior fluência, portanto melhor estatística, seria a utilização de radiação síncrotron, ou de fontes de raios X mais potentes, a exemplo do equipamento da ARACOR/CA. No caso dos sincrotrons, o fluxo fotônico é da ordem de  $10^{16}$  fótons. $s^{-1}$ . $cm^{-2}$ , para uma corrente de 100 mA. A limitação com essas fontes, a ser levada em conta quando da determinação do tipo e do tamanho das amostras, é a energia do feixe, da ordem de 15 keV a 25 keV. O custo, sem dúvida, é um outro fator limitante, porém, uma avaliação de custo/benefício pode determinar o uso dessas fontes, para casos específicos que se encontrem na fronteira do conhecimento ou aplicações que o justifiquem.

Propõe-se, também, que vários processos e estudos, contando atualmente apenas com a ajuda de técnicas de superfície ou técnicas invasivas, sejam avaliados, em estudos futuros, com o auxílio da microtomografia de raios X. A microtomografia de RMN poderia ser utilizada, porém, conforme já citado no capítulo 1, essa técnica apresenta severas limitações para estudo de sistemas porosos naturais, especificamente, devido à presença de componentes paramagnéticos conforme avaliado por Crestana & Nielsen (1990). A título de exemplo de estudos e processos citamos: (1) o próprio selamento superficial, que aqui foi apresentado apenas como uma ilustração do potencial e merecendo, portanto, uma avaliação com um maior número de casos; (2) a cimentação natural e encrostamento do solo, que é um processo relacionado com a percolação de água em maciços arenosos, onde a transferência da água associada aos fenômenos de evaporação e sucção resultam na deposição do material solúvel transportado, criando uma camada de alta resistência (Paraguassú, 1992); (3) danos mecânicos em sementes; (4) medida da porosidade.

Um tema que merece especial atenção para trabalhos futuros e que é decorrente deste trabalho é a invariância de escala. Como foi visto em algumas imagens, certos parâmetros da física dos solos precisam ser revistos. Qual passa a ser, por exemplo, o conceito de densidade em termos de massa por volume? Ou de umidade? Como relacionar informações em macroescala com suas correspondentes na microescala e vice-versa? Com a microtomografia e a tomografia milimétrica será possível obter imagens de sistemas particulados em diferentes escalas e condições

experimentais. Portanto, será possível verificar e quantificar conceitos como o de auto-similaridade, por exemplo. Estudos como esses necessitam de estatística com um levantamento exaustivo de dados nas várias escalas, que permitam criar novos equacionamentos e, talvez, até novas teorias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHLUWALIA, B.D. (1989). **Tomographic methods in nuclear medicine: physical principles, instruments, and clinical applications**. Boca Raton: CRC Press, 239p.
- ANDERSON, S.H.; HOPMANS, J.W., ed. (1994). **Tomography of soil-water-root processes**. Madison: Soil Science Society of Agronomy. p.43-57.
- APPOLONI, C.R.; CESAREO, R. (1994). **Microscanning and microtomography with X-ray tubes**. Roma: Università Degli Studi di Roma "La Sapienza". Centro Interdipartimentale de Ricerca per Lánalisi dei Modelli e Dell'Informazione nei Sistemi Biomedici. 83p.
- ASSIS, J.T. (1992). **Microtomografia utilizando tubo de raios X**. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPE
- ASSIS, J.T.; LOPES, R.T.; RODRIGUES, J.L. (1994). Microfocus radiography producing microtomography. **Nuclear Instruments & Methods in Physics Research**. Amsterdam, A353, p.338-339.
- AYLMORE, L.A.G. (1993). Use of computer-assisted tomography in studying water movement around plant roots. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.49, p.1-53.
- BEISER, A. (1969). As propriedades corpusculares das ondas. In: BEISER, A. **Conceitos de física moderna**. São Paulo: Polígono. p.47-71.
- BIASSUSI, M. (1996). **Estudo da deformação de um vertissolo através da tomografia computadorizada de dupla energia**. Pelotas. 80p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas
- BOAVENTURA, J.R. (1991). Performance do espectrômetro de emissão de plasma (ICP), espectroflame FVM03, para determinação de 20 elementos químicos nas amostras de referência geoquímica DNC-1, W-2, UNB B-1 e UNB g-1. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 3, P.423-426.
- BRACEWELL, R.N.; (1956). Strip integration in radioastronomy. **Australian Journal of Physics**, v.9, p.198-217.
- BROOKS, R.A.; DI CHIRO, G. (1976). Principles of Computer Assisted Tomography (CAT) in radiographic and radioisotopic imaging. **Physics in Medicine and Biology**, Bristol, v.21, n.5, p.689-732.
- CÁSSARO, F.A.M. (1994). **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.

- CESAREO, R.; ALMEIDA, A.; RAO, D.V. (1993a). **Quasi monochromatic X-rays produced with tubes through transmission and diffusion filters**. Roma: Università Degli Studi di Roma "La Sapienza". Centro Interdipartimentale de Ricerca per L'análisi dei Modelli e Dell'Informazione nei Sistemi Biomedici. 28p.
- CESAREO, R.; APPOLONI, C.R.; BRUNETTI, A.; CASTELLANO, A.; CRUVINEL, P.E.; MASCARENHAS, S.; ASSIS, J.T.; GIGANTE, G.E. (1994b). Industrial applications of tomography and microtomography. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTERIZED TOMOGRAPHY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS, 1994**, Berlin. [S.l. : s.n.], p.295-302.
- CESAREO, R.; ASSIS, J.T.; CRESTANA, S. (1994a). Attenuation coefficients and tomographic measurements for soil in the energy range 10 - 300 keV. *Applied Radiation Isot.* Great Britain, v.45, n.5, p.613-620.
- CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. (1993b). Nuclear techniques in soil science. **Trends in Agricultural Sciences: Soil Science**, Amsterdam, v.1, p.27-46.
- CESAREO, R.; GIANNINI, M. (1980). Elemental analysis by means of X-ray attenuation measurements. **Nuclear Instrum. Methods**, v.168, p.551-555.
- CESAREO, R.; STORELLI, L. (1991). **Appunti di tomografia a raggi X: principi fisici, ricostituzione di immagine, applicazioni**. Roma: Università Degli Studi di Roma "La Sapienza". 83p.
- COLNAGO, L.A. et al. (1986). Aplicações da ressonância magnética nuclear (RMN) e ressonância paramagnética eletrônica (EPR). In: CRESTANA, S. et al, ed. **Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, Cap.1, p.15-50.
- CORMACK, A.M. (1980). Early two-dimensional reconstruction and recent topics stemming from it. **Medical Physics**, New York, v.7, n.4, p.277-282.
- CORMACK, A.M. (1963). Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. **Journal of Applied Physics**, New York, v.34, n.9, p.2722-2727.
- CRESTANA, S. (1985). **A tomografia computadorizada como um novo método para estudos da física da água no solo**. São Carlos. 140p. Tese (Doutorado)-Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CRESTANA, S. (1994). 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).
- CRESTANA, S. et al, ed. (1996a). **Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 291p.
- CRESTANA, S. et al. (1996b). Tomografia reconstrutiva. In: CRESTANA, S. et al., ed. **Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, Cap.4, p.152-200.

- CRESTANA, S., coord. (1995). **Relatório final de atividades do projeto temático "Transporte, previsão do destino e balanço de pesticidas no solo":** terceiro período: agosto de 1993 a maio de 1995. São Carlos: EMBRAPA-CNPDIA. não-paginado. Projeto temático FAPESP nº 90/3773-7.
- CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. (1986). Using a computed tomograph miniscanner in soil science. **Soil Science**, Baltimore, v.142, n.1, p.56-61.
- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; VAZ, C.M.P.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, R.; REICHARDT, K. (1992). 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.
- CRESTANA, S.; KAUTEN, R.; NIELSEN, D.R. (1990). 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.689-698.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CESAREO, R.; CRUVINEL, P.E. (1988). 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. **Abstracts...** Ruidoso: College of Agriculture and Home Economics. p.14.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CESAREO, R.; CRUVINEL, P.E. (1988). 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).
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R.S. (1985). Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computerized tomographic scanning. **Soil Science**, Baltimore, v.140, n.5, p.326-332.
- CRESTANA, S.; NIELSEN, D.R. (1990). 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.
- CRESTANA, S.; VAZ, C.M.P. (1997). A instrumentação como uma ferramenta na pesquisa em conservação e manejo dos solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. **CD-ROM...** (Artigo convidado).
- CRUVINEL, P.E. (1987). **Minitomógrafo de raios X e raios-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares.** Campinas. 329p. Tese (Doutorado)- UNICAMP.

- CRUVINEL, P.E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. (1990). 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.
- CRUVINEL, P.E.; FLOCCHINI, R.G.; CRESTANA, S.; MORALES, J.R.; MIRANDA, J.; KUSKO, B.H.; NIELSEN, D.R. (1993). Studying the influence of the aggregate sizes on some elements of an oxisol with PIXE. **Soil Science**, Baltimore, v.155, n.2, p.100-105.
- EISBERG, R.M. X-rays. In: EISBERG, R.M. (1966). **Fundamentals of modern physics**. 6.ed. N. York: J. Wiley. Cap.14, p.475-517.
- FEDER, J. (1988). The fractal dimension. In: FEDER, J. **Fractals**. New York: Plenum Press, 283p.
- FERNANDES, C.P. (1994). Caracterização morfotopológica de espaços porosos: reconstituição multiescala e simulação de processos de invasão de fluidos não-molhantes. Florianópolis. 182p. Tese (Doutorado). Universidade de Santa Catarina.
- FLANNERY, B.P.; DECKMAN, H.W.; ROBERGE, W.G.; D'AMICO, K.L. (1987). Three-dimensional x-ray microtomography. **Science**, Washington, v.237, p.1439-1444.
- FLORES, M.X.; SILVA, J.S. (1992). **Projeto EMBRAPA II: do projeto de pesquisa ao desenvolvimento sócio-econômico no contexto do mercado**. Brasília: EMBRAPA-SEA. 55p. (EMBRAPA-SEA. Documentos, 8).
- GORDON, R.; BENDER, R.; HERMAN, G.T. (1970). Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography. **Journal of Theoretical Biology**, v.29, p.471-481.
- GRANT, J.A.; MORGAN, M.J.; DAVIS, J.R.; DAVIES, D.R.; WELLS, P. (1993). X-ray diffraction microtomography. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v.4, p.83-84.
- HAINSWORTH, J.M.; AYLMOORE, L.A.G. (1983). The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. **Australian Journal of Soil Resesearch**, Melbourne, v.21, p.1435.
- HENDEE, W.R. (1983). **The physical principles of computed tomography**. Boston: Little and Brown. 192p.
- HENDEE, W.R. (1984). **Medical radiation physics**. 2.ed. Chicago: Year Book Medical Publishers. 517p.
- HENDEE, W.R. (1995). X-rays in medicine. **Physics Today**, New York, v.48, n.11, p.51-56.
- HERRMANN, P.S.P (1993). Construção de equipamento para medida de umidade do solo através da técnica de reflectometria no domínio do tempo. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- HILLEL, D. (1982a). General physical characteristics of soil. In: HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. Orlando: Academic Press. Cap.2, p.5-17.
- HILLEL, D. (1982b). Texture, particle size distribution, and specific surface. In: HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. Orlando: Academic Press. Cap.3, p.21-39.
- HILLEL, D. (1982c). Soil structure and aggregation In: HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. Orlando: Academic Press, , Cap. 4, p.40-53
- HILLEL, D. (1982d). Soil air and aeration. In: HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. Orlando: Academic Press. Cap. 8, p.151.
- HOUNSFIELD, G.N. (1973). Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. **British Journal of Radiology**, London, v.46, p.1016-1022.
- HUBBEL, J.H. (1969). **NSRDS - NBS29: Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV**. Washington: National Bureau of Standards. 85p.
- JONES, A.A. (1982). X-ray fluorescence spectrometry. In: PAGE, A.L., ed. **Methods of soil analysis**. Part 2, 2ed., Madison: ASA/SSSA, Cap. 5, p.85-118.
- JORGE, L.A.C; CRESTANA, S. (1996). SIARCS 3.0: novo aplicativo para análise de imagens digitais aplicado a ciência do solo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, Águas de Lindóia-SP, ago. 1996. **Solo suelo 96. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 5p. CD-ROM.**
- LAURINDO, J. B. (1996). Evaporation en milieu poreux. Etude expérimentale sur milieux-modèles et modélisation de type percolation. Toulouse. 212p. Tese (Doutorado) - Institut National Polytechnique de Toulouse.
- MACEDO, A.; CÁSSARO, F.A.M.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C.M.P.; TORRE NETO, A.; CRESTANA, S. (1993). Desenvolvimento de um microtomógrafo computadorizado, para aplicação em ciência do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO-CERRADOS: FRONTEIRA AGRÍCOLA NO SÉCULO XXI, 24., 1993, Goiânia. **Resumos...** Goiânia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.1, p.101-102. ref. 45.
- MARTIN-NETO, L. et al. (1996). Espectroscopia de infravermelho, ultravioleta visível e PIXE: alguns resultados disponíveis. In: CRESTANA, S. et al, ed. **Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, Cap.2, p.51-90.
- MORGAN, K.Z.; TURNER, J.E. (1982). Health Physics. In: AMERICAN Institute of Physics Handbook. Nova York, McGraw-Hill.
- NAIME, J.M. (1994). **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.
- NAIME, J.M.; CONCIANI, W.; SOARES, M.M.; CRESTANA, S. (1996). Estudo

- de solos colapsáveis 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.
- NIELSEN, D.; VAN GENUCHTEN, R.; BIGGAR, J.W. (1986). Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone. **Water Resources Research**, Washington, v.22, n.9, p.89S-108S.
- NOLET, G., ed. (1987). Seismic tomography. Dordrecht, D. Reidel Publishing Company.
- ONODY, R.N.; POSADAS, A.D.; CRESTANA, S. (1995). 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.
- OPPENHEIM, A.V.; SCHAFFER, R.W. (1975). Discrete-time signal and systems. In: OPPENHEIM, A.V.; SCHAFFER, R.W. **Digital signal processing**. London: Prentice-Hall International, Cap. 1, p.6-35.
- PARAGUASSÚ, A. B.; RÖHM, S. A. (1992). Evolução da resistência da superfície de taludes em sedimentos cenozóicos provocada pela cimentação natural. **Geociências**, São Paulo, v.11, n.2, p.181-190.
- PEDROTTI, A. (1996). **Avaliação da compactação de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo**. Pelotas. 83p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas
- PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. (1982). Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, p.445-449.
- POSADAS, A.D.; CRESTANA, S. (1991). Teoria fractal e técnicas de imagem na caracterização da infiltração instável em um meio poroso não saturado. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 19, Campinas-SP, out. 1991. **Anais...** Campinas: UNICAMP. v.1, p.117-129.
- POSADAS, A.D.; CRESTANA, S. (1993). Aplicação da teoria fractal na caracterização do fenômeno "fingering" em solos não-saturados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.1, p.1-8.
- POSADAS, A.D. (1994). **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.
- POSADAS, D.A.N.; TANNÚS, A.; PANEPUCCI, H.; CRESTANA. (1996). 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.
- RADON, J.H. (1917). In the determination of functions from their integrals along certain manifolds. **Berichte über die Verhandlungen**, v.69, p.262-277.

- REICHARDT, K. (1996). O solo. In: REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2.ed. Piracicaba: USP-ESALQ-Departamento de Física e Meteorologia. Cap.3. p.21-71.
- RIBEIRO JÚNIOR, E. (1995). Análise de atributos visuais em imagens texturais, utilizando técnicas espectrais. São Carlos. não paginado. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de São Carlos.
- RIBEIRO, C.G. (1994). Desenvolvimento de um algoritmo para a reconstrução tridimensional para imagens de um minitomógrafo, baseado no método de reconstrução algébrica modificado e interpolação spline. São Carlos. não paginado. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de São Carlos.
- ROSENFELD, A.; KAK, A.C. (1982). 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).
- SLATTERY, M. C.; BRYAN, R. B. (1994). Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding surface. **Catena Supplement 22**, Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, p.17-34.
- SPANNE, P.; JONES, K.W.; PRUNTY, L.; ANDERSON, S.H. (1994). Potential applications of synchrotron computed microtomography to soil science. In: ANDERSON, S.H.; HOPMANS, J.W., ed. **Tomography of soil-water-root processes**. Madison: Soil Science Society of Agronomy. p.43-57.
- SPOSITO, G.; REGINATO, R.J., ed. (1992). The science of soil. In: SPOSITO, G.; REGINATO, R.J., ed. **Opportunities in basic soil science research**. Madison: Soil Science Society of America. Cap.1, p.1-8.
- STRAZZI, S.A.; SETTI, T. (1995). 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.
- TAYLOR, T.; LUPTON, R. (1986). Resolution, artifacts and the design of computed tomography systems. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, Amsterdam, p.603-609.
- TORRE-NETO, A. et al (1996). Medição, transmissão e processamento de dados. In: CRESTANA, S. et al, ed. **Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, Cap.5, p.201-227.
- VAN DAMME, H. (1995). Scale invariance and hydric behaviour of soils and clays. **Centre de Recherche / Académie de Sciences**, Paris, t.320, série IIa, p.665-681.
- VAZ, C.M.P. (1994). Metodologia eletroanalítica para medida de atrazina em águas e solução de solo. Piracicaba. Tese (Doutorado). CENA - Universidade de São Paulo.
- 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.

- VAZ, C.M.P.; BARANAUSKAS, V.; CRESTANA, S.; RODRIGUES, C.R.; FUKUI, M.; HERMES, L.C. (1993). Observação da morfologia de solos por microscopia de força atômica. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS-ENEMP, 20, São Carlos - SP, 20-22 de out. 1992. **Anais...** São Carlos: UFSCar, v.1, p.181-187.
- WANG, C.H.; WILLIS, D.L.; LOVELAND, W.D. (1975). Characteristics of ionizing radiation. In: WANG, C.H.; WILLIS, D.L.; LOVELAND, W.D. **Radiotracer methodology in the biological, environmental, and physical sciences**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. Cap.3, p.39-74.
- WARNER, G.S.; NIEBER, J.L.; MOORE, I.D.; GEISE, R.A. (1989). Characterizing macropores in soil by computed tomography. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, n.3, p.653-660.
- WILKINS, S. W.; GUREYEV, T. E.; GAO, D.; POGANY, A.; STEVENSON, A. W. (1996). Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays. **Nature**, v.384, p.335-338.
- XUEFENG, Y. (1995). A network approach to the analysis of mass transfer from a capillary porous medium. Florianópolis. 117p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina.