UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS

" TOMOGRAFIA DE DUPLA ENERGIA SIMULTÂNEA PARA
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE UM MEIO POROSO DEFORMÁVEL."

Fabio Augusto Meira Cássaro

Dissertação apresentada ao
Instituto de Física de São
Carlos para a obtenção do
título de Mestre em Física
Aplicada.

Orientador:

Dr. Sílvio Crestana

DEPARTAMENTO DE FÍSICA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS

São Carlos, 1994

IFSC Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos

Fone(0162) 72-6222
Fax (0162) 74-9151

MEMBROS DA COMISSAO JULGADORA DA DISSERTACAO DE MESTRADO DE **FABIO AUGUSTO NEIRA**
APRESENTADA AO INSTITUTO DE FISICA DE SAO CARLOS, DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO, EM 24/11/1994

Av. Dr. Carlos Botelho, 1465
Caixa Postal 369
CEP 13560-970 - São Carlos - SP
Brasil

COMISSAO JULGADORA:

Dr. Silvia Crestana

Prof. Dr. Eduardo Ernesto Castellano

Prof. Dr. Klaus Reichardt

Dedico este trabalho, à minha mãe que com carinho, amor e perseverança tem dedicado parte de sua vida ao nosso direcionamento. Ao meu irmão Paulo pela nossa amizade. À Tania minha companheira e amiga de dez anos, por sua amizade, carinho e dedicação. À minha avó querida. Finalmente dedico este trabalho à memória de meu pai que certamente estaria feliz neste momento.

SUMÁRIO

Agradecimentos

Lista de figuras

Resumo

Abstract

1) Introdução	01
2) Aspectos conceituais e teóricos	07
2.1) O solo	07
2.1.1) As frações sólida, líquida e gasosa do solo	10
2.1.2) Densidade de partículas	11
2.1.3) Densidade global seca	11
2.1.4) Umidade à base de volume	12
2.1.5) Umidade à base de peso	13
2.1.6) "O modelo das três retas"	13
2.1.6.1) Volume específico	14
2.2) Produção de radiação	19
2.2.1) Filtros de Raio X	20
2.3) Interação da radiação com a matéria	23
2.3.1) Processos de absorção	24
2.3.1.1) Efeito Fotoelétrico	24
2.3.1.2) Efeito Compton	24
2.3.1.3) Produção de pares	25
2.4) Atenuação de um feixe de Raios X	26
2.5) Espectrometria de Raios X	30
2.5.1) Detecção dos Raios X	30
2.5.1.1) Cristal cintilador	31

2.5.1.2) Válvula fotomultiplicadora	32
2.5.1.3) Pré amplificador e amplificador	33
2.5.1.4) Analisador monocanal	33
2.5.1.5) Contador e temporizador	34
2.6) Tomografia computadorizada	34
2.6.1) Imagem por tomografia computadorizada	34
2.7) Reconstrução de imagens tomográficas	38
2.7.1) Notação	38
2.7.2) Método da Retroprojeção filtrada	39
2.8) Filtragem das imagens tomográficas	42
 3) Materiais e métodos	 46
 Tomógrafo de dupla energia simultânea de Raios X	 46
3.1) Preparação dos filtros de Estanho	49
3.2) Discriminação do espectro de Radiação	52
3.3) Calibração do sistema nas duas energias	54
3.4) Amostras de solo expansivo	58
3.5) Medidas de contração de amostras estruturadas de solo expansivo.....	62
3.6) Solos não-expansivos	62
3.7) Filtragem das imagens tomográficas	63
 4) Resultados e discussão	 65
 5) Conclusões e trabalhos futuros	 92
 Apêndice 1	 98
 Apendicê 2	 100

Apêndice 3	113
Apêndice 4	114
Referências Bibliográficas	116

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Sílvio Crestana pela orientação honesta, criteriosa e também pela amizade.

Ao colega João de M. Naime pela permissão da utilização de vários dos seus desenhos, pela discussão da técnica de tomografia e pela amizade demonstrada.

Ao colega André Torre Neto que sempre se mostrou disposto a resolver os "problemas" na eletrônica do tomógrafo, pelos desenvolvimentos na eletrônica de dupla discriminação e contagem e pela amizade demonstrada.

Ao colega Carlos Vaz pela ajuda, discussão e encaminhamento inicial deste trabalho e pela amizade.

Ao colega Valentim Monzane pela ajuda e confecção de alguns desenhos aqui apresentados e pela amizade demonstrada.

Aos colegas do CNPDIA Marcelo, Ferrazini, Sebastião, Rabelo, Hermann, Alvaro, Clóvis, Lúcio, Brassolati, Dalton, Socorro, Terezinha, Nelson, Rene, Gilmar, Ladislau, Moacyr, Dinis, Donizetti e Rubens pela amizade.

Aos colegas da Universidade Federal de Pelotas, Marcelo e Alceu pela amizade e auxílio no entendimento de alguns aspectos relacionados ao solo.

Ao colega Adolfo Posadas Durand pela discussão, ajudas com a parte computacional e pela amizade.

Ao Victor Bertucci pela ajuda, força e amizade.

Aos colegas Godoy, Wilson e Possato pelos serviços de mecânica e pela amizade demonstrada.

Ao Dr. Luiz Alberto Colnago pela utilização do computador de sua sala e pela amizade demonstrada.

Ao Dr. Paulo Estevão Cruvinel pela permissão do uso dos programas de reconstrução e visualização de imagens, pelo auxílio na realização de alguns experimentos, pela discussão e interpretação de alguns resultados e pela amizade demonstrada.

Às colegas Vera e Janis pelas facilidades oferecidas em relação ao material da biblioteca e pela amizade.

Às colegas Ana Maria e Érita pela amizade e auxílio em diversas situações.

Aos Drs. Paulo L. Libardi e Sergio de O. Moraes da ESALQ-USP pelas discussões em relação à determinação dos parâmetros relacionados ao solo aqui utilizado.

Ao Dr Dennis E. Rolston da Universidade da Califórnia-Davis pela discussão de alguns resultados obtidos com o solo utilizado.

Ao Msc. Rinaldo Calheiros do IAPAR pelas amostras de solo aqui analisadas.

À Vladerez, da seção de alunos do IFSC, pela atenção de sempre.

Às bibliotecárias Sybele, Neuza, Cristina e Mara por estes anos de IFSC.

À EMBRAPA/CNPDIA, pela infra-estrutura oferecida à realização deste trabalho.

À USP/IFSC-Departamento de Física e Ciência dos Materiais, pela formação recebida.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de Mestrado.

À FAPESP através do projeto temático: "Transporte, previsão do destino e balanço de pesticidas no solo": Processo nº 90/3773-7.

Enfim, à todas as pessoas que contribuíram para o sucesso e realização deste trabalho.

Lista de Figuras

Fig.1) Representação esquemática dos Aluminosilicatos onde é mostrado o balanço de cargas (Jury, 1991)	08
Fig.2) Diagrama esquemático do solo como um sistema trifásico	10
Fig.3) Modelo das três retas mostrando o comportamento da expansão do solo	15
Fig.4) Diagrama esquemático dos níveis de energia para um átomo de alguns elétrons. São mostrados os processos de absorção e emissão de Raios X (Klug, 1973)	21
Fig.5) Representação esquemática do processo de produção do feixe de dupla energia a partir da radiação de Bremsstrahlung provinda de uma fonte de Raios X.	22
Fig.6) Representação esquemática do processo de absorção fotoelétrica	24
Fig.7) Representação esquemática do processo de absorção via efeito Compton.	25
Fig.8) Representação esquemática do processo de produção de pares.	26
Fig.9) Esquematização do processo de atenuação de radiação por uma amostra	27
Fig.10) Diagrama em blocos de um sistema de espectrometria de Raios X	30
Fig.11) Espectro de emissão eletromagnética do NaI(Tl) (Hendee, 1984)	31

Fig.12) Modos de discriminação do analisador monocanal a) Integral b)Diferencial	34
Fig.13) Esquematização da aplicação da Lei de Beer em diferentes casos a) Material homogêneo b) Material bi-fásico c) Material multifásico	35
Fig.14) Esquema da coleta dos dados necessários à tomografia nos tomógrafos de A)Primeira geração; B)Segunda geração; C)Terceira geração e D)Tomógrafos mais modernos (Hendee,1984)..	37
Fig.15) Representação do sistema de coordenadas utilizado para descrever o método de reconstrução das imagens tomográficas	38
Fig.16) Esquematização da reconstrução de um objeto retangular pelo método da retroprojeção (são mostradas apenas duas das várias projeções requeridas pelo método)	40
Fig.17) Apresentam-se as contribuições positivas nas projeções A e B a um dos pontos fora da amostra originando o "efeito estrela" (à direita na figura)	41
Fig.18) Método da retroprojeção filtrada. Mostra-se que o método associa tanto contribuições positivas quanto negativas aos pontos fora da amostra, o que faz com que seja minorado o "efeito estrela"	41
Fig.19) Diagrama em blocos do tomógrafo de Raios X de dupla energia	46
Fig.20) Matrizes utilizadas na produção dos filtros de estanho	50

Fig.21)a) Modo utilizado na discriminação dos dois picos de energia. b) Mostra-se a largura de meia altura ΔV de um pico de intensidade máxima I_{max}	52
Fig.22) Pontos do interior da imagem tomográfica da amostra indicando os 25 pontos escolhidos	55
Fig.23) Preparação das amostras de solo expansivo com graus conhecidos de hidratação	59
Fig.24) Método utilizado na verificação da densidade adquirida pela amostra em uma dada condição de umidade	61
Fig.25) Procedimento de filtragem das imagens. a) Imagem original. b) Construção da "máscara" e c) Obtenção da imagem filtrada	63
Fig.26) Calibração do sistema para o pico de fótons de maior energia igual a 57 KeV	66
Fig.27) Calibração do sistema para o pico de fótons de menor energia igual 29 KeV	67
Fig.28) Correlação entre as determinações de umidade para o solo expansivo	76
Fig.29) Variação relativa do volume da amostra com a quantidade de água, mostrando uma dependência quadrática entre os dois parâmetros	77
Fig.30) Correlação entre as umidades obtidas por tomografia e gravimetria para o solo não expansivo	79
Fig.31) Comportamento das determinações de densidade via tomografia para o solo não-expansivo e para o solo expansivo para duas situações diferentes de densidade global iniciais	81

Fig.32) Análise da expansão do solo estruturado através do modelo das três retas	85
Fig.33) Interpolação dos dados de tomografia através do modelo das três retas.	89
Fig.34) Comportamento do volume total da amostra. São mostradas as contribuições ao volume total das três fases que compõem o solo.	90
Fig.A2.1) Arranjo experimental do tomógrafo de dupla energia simultânea, mostrando a disposição das fontes radioativas em relação à amostra 1) Mecanismo de elevação das fontes radioativas. 2) Mecanismo de alinhamento do feixe em relação ao centro da amostra.	100
Fig.A2.2) Calibração do sistema para a energia do Amerício	103
Fig.A2.3) Calibração do sistema para a energia do Césio. ...	103
Fig.A2.4) Histograma para as determinações de umidade para o solo estruturado via tomografia nas duas umidades analisadas 0 e $(0,180 \pm 0,003) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	108
Fig.A2.5) Histograma para as determinações de densidade para uma amostra de solo estruturado via tomografia nas duas umidades analisadas 0 e $(0,180 \pm 0,003) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$	109
Fig. A3.1) Modificação produzida no espectro de Bremsstrahlung através da filtragem por estanho	113

Resumo

Neste trabalho introduz-se a tomografia de dupla energia simultânea, como uma nova metodologia capaz de determinar simultaneamente a densidade global e a umidade, parâmetros relevantes na caracterização física de materiais porosos com características expansivas. Em particular, o método foi aplicado à caracterização de um solo com comportamento expansivo-contrativo quando submetido a diferentes graus de hidratação.

A técnica consiste na realização de tomografias utilizando dois picos de energia distintos.

São apresentadas medidas empregando dois picos distintos de radiação provenientes da filtragem por placas de estanho, da radiação de Bremsthrallung proveniente de uma fonte de Raios X. Também, em caráter preliminar, foram realizadas determinações simultâneas de densidade e umidade utilizando-se picos distintos de radiação Gama, um proveniente de uma fonte de Amerício (241) e o outro de uma fonte de Césio (137).

Foram determinadas, a sensibilidade da técnica para a medida de umidade e densidade global de amostras de solo expansivo e também de solos não-expansivos.

Os dados obtidos pela técnica propiciaram a análise da expansividade do solo e as determinações foram interpoladas através do "modelo das três retas". Em conclusão: o desenvolvimento e o uso do tomógrafo de dupla energia simultânea constitui-se em método apropriado para medir simultaneamente a densidade global e o conteúdo de água de materiais porosos expansivos e não expansivos como no caso dos solos empregados neste trabalho.

ABSTRACT

This work introduces simultaneous double energy tomography, as a new technique able to determine simultaneously bulk density and water content, important parameters in the physical characterization of porous materials with swelling behavior. This method was applied to the characterization of a swelling soil when submitted to different degrees of hydration.

The technique consists in performing simultaneous tomographies using two distinct energy peaks.

The measurements presented employ two distinct radiation peaks obtained from tin plate filters, from the Bremsthalung radiation of an X ray source. Also, preliminary determination of density and water content were performed simultaneously using distinct gamma radiation peaks, coming from Americium (241) and Cesium (137) sources.

The sensitivity of the technique to measure the water content and bulk density of the swelling soil samples as well as non-swelling soils was also determined.

The data obtained by this technique allowed the analysis of the swelling characteristics of the soil and the determinations were interpolated by the "Three straight lines model". In conclusion: the development and the use of the double energy tomograph scanner is a suitable method to determine simultaneously the bulk density and the water content of swelling and non-swelling porous materials as in the case of the soils studied in this work.

Capítulo 1

Introdução

Na caracterização de propriedades do solo, ou ainda no entendimento e descrição de processos onde ocorram transportes de massa ou transferência de energia, freqüentemente são utilizados conhecimentos e ou modelamentos baseados em princípios e metodologias utilizados em física, química, biologia dentre outras áreas do conhecimento.

Sposito e Reginato, 1992, mostram que a importância da introdução deste tipo de enfoque na resolução de problemas tem como principais e fundamentais objetivos a avaliação da sustentabilidade dos processos empregados na agricultura assim como a manutenção e proteção local e global do meio ambiente.

Outro aspecto que estes ressaltam é que a convergência e participação de pesquisadores das diversas áreas das ciências básicas e aplicadas pode dar subsídios e também validação à metodologia científica empregada na resolução ou investigação destes e de outros problemas.

Tendo isto em vista, algumas novas metodologias desenvolvidas inicialmente em áreas da medicina, ciência espacial, e física básica têm sido adaptadas e empregadas em pesquisas de física do solo. Dentre estes, os métodos não invasivos são os que tem despertado maior interesse, pois permitem a investigação de amostras de solo sem que hajam distúrbios da sua constituição natural (Crestana, 1985; Vaz et al, 1992; Aylmore, 1993).

Várias pesquisas vêm sendo conduzidas empregando-se técnicas de reconstrução bi e tri-dimensionais de imagens (até em escalas microscópicas) utilizando-se para isto a tomografia

de Raios X e Raios Gama, tomografia por ultrassom e ressonância magnética (Crestana, 1985; Posadas, 1994).

Um dos problemas mais importantes da pesquisa em solos (Sposito & Reginato, 1992) e ainda não resolvido é o da caracterização físico-hídrica de materiais porosos, que em geral, apresentam modificação em sua estrutura física quando submetidos à diferentes graus de hidratação podendo redundar em variações de sua forma, volume, densidade entre outros parâmetros físicos relevantes.

Solos argilosos de várzea são exemplos reais da ocorrência deste tipo de fenômeno, pois apresentam a característica de expandirem-se quando umedecidos e de contraírem-se quando sob processos de secamento, apresentando rachaduras e aglomerados internos. Ou seja, grande variabilidade local da densidade. Em decorrência disto podem ocorrer consequências importantes no que se refere à irrigação, drenagem, lixiviação de nutrientes, pesticidas e outros poluentes através do perfil do solo.

Podem ser dados outros exemplos como os que ocorrem em áreas da construção civil quando do emprego de argilas expansivas, ou então na área de alimentos liofilizados, de sementes e cerâmicas. Enfim, todo e qualquer material que apresentar comportamento não-linear quando a quantidade de água no seu interior variar. Não satisfazem ao regime elástico, portanto possuem características reológicas muito particulares (Miller, 1975).

Vastas áreas de solos são constituídas de solos argilosos expansivos. Somente no Paraná 600.000 hectares de várzea se compõem deste tipo de solo. Neste Estado e em outros tais como São Paulo e Rio Grande do Sul, a fronteira agrícola se encontra praticamente esgotada, fato que aliado à crescente demanda por

alimentos os obriga a tornarem mais produtivas as áreas já ocupadas, além de procurar a exploração dos solos das várzeas existentes.

Até o presente momento, esta caracterização constitui um verdadeiro desafio científico-metodológico pela ausência de técnicas experimentais adequadas. Este foi o ponto de partida para a realização deste trabalho. Os métodos convencionalmente adotados (Bronswijk, 1991), dentre os quais o de atenuação de feixes de raios gama de duas energias para medidas simultâneas e não-destrutivas da densidade e umidade presentes no solo (Soane, 1967; Ferraz, 1974) é dos melhores, são deficientes, pois se enquadram em pelo menos uma das categorias seguintes:

- 1) Perturbam as amostras a serem investigadas deformando-as ou destruindo-as;
- 2) Pressupõem a validade da hipótese da isotropia espacial das amostras e
- 3) Fornecem o valor médio de cada parâmetro da amostra sendo portanto insensíveis às sua heterogeneidades internas.

Devido às características da técnica tomográfica, teoricamente seria possível verificar regiões do interior da amostra que apresentassem rachaduras, aglomerados e deformações que refletissem as variações no valor da umidade e densidade global, pixel a pixel. Também poder-se-ia estimar razoavelmente bem, considerando-se a resolução espacial das imagens obtidas, valores globais como expansões e contrações que ocorreriam ao

longo de diferentes direções, planos e volumes das amostras a serem estudadas.

Na literatura ainda não existem trabalhos similares, Phogat et al 1991, mostraram recentemente o uso da tomografia de duplo feixe porém não simultânea, na investigação do comportamento físico de solos com características expansivas.

Projetos visando consolidar a utilização da técnica de tomografia em estudos não invasivos já vêm sendo propostos e desenvolvidos ao longo dos últimos nove anos por alguns pesquisadores na EMBRAPA/CNPDIA dando origem à várias publicações científicas, trabalhos e teses. A exemplo disto, a realização deste trabalho foi motivada por uma demanda do Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR), através do pesquisador MSc. Rinaldo Calheiros, que também enviou as amostras utilizadas neste trabalho.

Essencialmente o objetivo deste trabalho foi propor, desenvolver e adaptar um equipamento e encontrar um novo método capaz de fornecer tomografias de dupla energia para medir, simultaneamente a densidade e umidade de amostras de solo expansivo e não-expansivo.

Inicialmente, o tomógrafo desenvolvido (Cruvinel et al, 1990), possibilitava a utilização de apenas uma fonte de radiação. Como consequência, houve a necessidade de desenvolvimentos instrumentais visando a introdução de uma segunda fonte radioativa, exigência básica do método aqui proposto. A idéia da utilização desta segunda fonte radioativa foi inicialmente concretizada e alguns resultados foram obtidos.

Também é oportuno destacar que este trabalho inseriu-se no contexto do projeto temático "Transporte, Previsão do destino e

balanço de pesticidas no solo", financiado pela FAPESP (90/3773-7), envolvendo as seguintes instituições: EMBRAPA, IAC e USP. Através deste projeto foi adquirido um aparelho de produção de Raios X permitindo a sua utilização nas medidas inicialmente propostas neste trabalho. Esta possibilidade foi acompanhada de desenvolvimentos na área de produção de filtros de radiação objetivando-se a produção de modificações no espectro de radiação inicialmente produzido pelo equipamento (Cesareo et al; 1993).

Neste trabalho foi possível estabelecer a sensibilidade da técnica de tomografia de dupla energia às medidas, simultâneas, de densidade e umidade de amostras de solo em função de seus diferentes graus de hidratação.

Foram realizadas calibrações e modificações instrumentais, relacionando as unidades tomográficas aos parâmetros físicos relevantes na caracterização do material expansivo estudado, o que constitui um dos objetivos deste trabalho.

No segundo capítulo faz-se uma breve descrição da teoria que está envolvida na obtenção das medidas pretendidas inicialmente. Dá-se uma pequena introdução ao material estudado (solo) e suas características expansivas, à produção de raios X e sua filtragem, os princípios da atenuação de radiação pela matéria, os métodos de reconstrução de imagens tomográficas e também a determinação simultânea da densidade e umidade do material estudado.

No terceiro capítulo apresenta-se a descrição dos materiais e métodos empregados nas medidas simultâneas da densidade e umidade do solo.

No quarto capítulo estão apresentados os resultados obtidos.

No quinto capítulo apresentam-se as discussões, contribuições e conclusões que o trabalho propiciou e finalmente procura-se dar sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice 1 apresenta-se a demonstração das operações utilizadas no processo de filtragem das imagens tomográficas obtidas.

No apêndice 2 mostram-se as modificações instrumentais que foram inicialmente introduzidas para a realização de medidas de densidade e umidade do solo expansivo, utilizando-se a tomografia simultânea de dupla energia com fontes de Amerício e Césio em linha bem como os resultados obtidos.

No apêndice 3 mostra-se a modificação produzida no espectro de Bremsstrahlung através da filtragem por estanho.

No apêndice 4 são apresentados os valores de ϵ para a amostra estruturada de solo expansivo para cada uma das etapas de contração, de acordo com o modelo das três retas.

Capítulo 2

Aspectos conceituais e teóricos

A seguir serão feitas abordagens referentes aos conhecimentos básicos necessários à elaboração deste trabalho. Procurou-se, de forma bastante sucinta, expor os conceitos envolvidos na análise do comportamento da expansão do solo através da tomografia computadorizada de dupla energia simultânea, a técnica introduzida e empregada neste trabalho.

2.1) O solo

A parte mineral do solo teve como origem a rocha, que por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou ao longo do tempo em material poroso de características peculiares.

As partículas sólidas que constituem o solo variam largamente quanto à espécie e tamanho. O arranjo, orientação e também a forma de organização destas partículas determinam a estrutura do solo.

De acordo com a Sociedade Internacional de Ciência do Solo, denomina-se argila a fração do solo constituída de partículas de diâmetro inferior à 0,02 mm.

Pelo fato de ter maior área específica (área por unidade de massa), a argila forma a fração mais ativa nos processos físico-químicos que ocorrem no solo.

Partículas de argila absorvem água e podem ser responsáveis pelos processos de expansão e contração ocorridos no solo à medida que o solo é umidecido ou secado.

Argila compreende um grande grupo de minerais sendo alguns deles amorfos porém, uma grande parte deles é constituída de micro cristais de tamanho coloidal e estrutura bem definida, dentre eles se encontram os aluminossilicatos.

Basicamente os aluminossilicatos são constituídos de duas unidades estruturais. Uma delas é formada por um tetraedro de átomos de oxigênio que envolve um átomo de Silício (Si^{4+}) e a outra é formada por um octaedro de oxigênios (ou grupo hidroxílico OH^{1-}) envolvendo um átomo de Alumínio (Al^{3+}).

Estes octaedros e tetraedros podem se unir através de seus vértices pelo compartilhamento de átomos de oxigênio. Desta maneira podem se formar camadas de octaedros e tetraedros que podem ser vistos em corte através da figura 1.

Fig.1) Representação esquemática dos Aluminossilicatos onde é mostrado o balanço de cargas (Jury, 1991).

Na figura 1 são apresentados os dois principais tipos de aluminossilicatos, que se classificam de acordo com a relação existente entre o número de octaedros e tetraedros que formam sua estrutura.

Nos minerais denominados 1:1, dá-se como exemplo a caulinita, uma camada de octaedros compartilha oxigênios de uma camada de tetraedros.

Nos minerais do tipo 2:1, dentre eles pode-se destacar a montmorilonita, uma camada de octaedros compartilha oxigênios de duas camadas de tetraedros.

As estruturas descritas anteriormente recebem a denominação de micelas e como se vê através da figura 1 são eletricamente neutras.

Sob condições naturais, na formação destas estruturas costumam ocorrer substituições de átomos (substituições isomórficas ou isomórfas) que produzem um desbalanceamento das cargas dos oxigênios tornando as micelas superfícies eletricamente carregadas.

Outra fonte de aparecimento de cargas nos minerais de argila é a neutralização incompleta dos átomos das extremidades de sua estrutura cristalina.

Íons trocáveis podem penetrar entre as micelas justapostas a fim de neutralizar a carga negativa originada das substituições isomórfas.

Além dos íons trocáveis, camadas de água podem penetrar entre as camadas estruturais (micelas). Pelo fato de estarem mais fracamente ligadas, as camadas de água entre as micelas fazem com que os minerais do tipo 2:1 apresentem a expansão como uma de suas propriedades.

2.1.1) As frações sólida, líquida e gasosa do solo

Algumas relações massa-volume serão utilizadas neste trabalho para descrever as frações sólida, líquida e gasosa do solo. As fases que compõem o solo podem ser esquematizadas através da figura 2 mostrada a seguir:

Fig.2) Diagrama esquemático do solo como um sistema trifásico.

A massa total da amostra m_t aparece como a soma da massa de cada uma das frações em que ela se compõem, fração sólida m_s , líquida m_{ag} e gasosa m_{ar} .

$$m_t = m_s + m_{ag} + m_{ar} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Da mesma forma, o volume total da amostra V_t é o resultado da soma do volume de ar V_{ar} , do volume de sólidos V_s e do volume de líquidos V_{ag} e é representado através da equação 2.2:

$$V_t = V_s + V_{ag} + V_{ar}. \quad \text{Eq. (2.2)}$$

A partir das relações dadas anteriormente, passa-se a algumas definições que aparecem ao longo deste trabalho.

2.1.2) Densidade das partículas ρ_p

$$\rho_p = \frac{m_s}{V_s}. \quad \text{Eq. (2.3)}$$

2.1.3) Densidade global seca ρ_g

$$\rho_g = \frac{m_s}{V_t}. \quad \text{Eq. (2.4)}$$

A densidade das partículas depende fortemente da composição do solo. Contudo, como o quartzo é um componente encontrado em grande quantidade na maior parte dos solos, a densidade das partículas para a maioria dos solos está em torno do valor da densidade de partículas para o quartzo que é de $2,65 \text{ g/cm}^3$, valor adotado para os solos aqui utilizados.

A densidade global é uma medida que se relaciona diretamente com o volume total da amostra e portanto "mostra" o seu estado de compactação.

A partir das quantidades apresentadas anteriormente define-se uma quantidade denominada porosidade ou volume total de poros " α " pela seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{V_{ar}}{V_t} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

A porosidade representa a porcentagem de espaços preenchidos pela fração gasosa em relação ao volume total da amostra analisada.

Através da utilização das definições dadas anteriormente chega-se facilmente a uma segunda expressão para a porosidade, dada por:

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_p}\right) \quad \text{Eq. (2.6)}$$

A Eq.(2.6) é muito utilizada para se obter uma estimativa do valor da porosidade quando se conhece a densidade global do solo analisado.

2.1.4) Umidade à base de volume θ (umidade volumétrica)

A umidade à base de volume é definida pelo quociente entre o volume da fase líquida V_{ag} e o volume total V_t da amostra analisada.

$$\theta = \frac{V_{ag}}{V_t} \quad \text{Eq. (2.7)}$$

Define-se a grandeza "S", denominada grau de saturação da amostra, através da seguinte expressão:

$$S = \frac{\theta}{\alpha} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

Para $S=1$ todo o espaço poroso está preenchido pela fase líquida e diz-se, nesta situação, que a amostra encontra-se saturada.

2.1.5) Umidade à base de peso θ_g (umidade gravimétrica)

$$\theta_g = \frac{m_{ag}}{m_s} = \frac{\theta}{\rho_g} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

A umidade à base de peso é definida pelo quociente entre a massa da fase líquida m_{ag} e a massa da fase sólida m_s . A massa da fase sólida m_s coincide com a massa da amostra seca. Na obtenção da equação 2.9 foi admitido o valor de $1,0 \text{ g/cm}^3$ para a densidade da água.

A relação entre as umidades volumétrica e gravimétrica, respectivamente, θ e θ_g é dada na equação 2.9 onde ρ_g é a densidade global da amostra na condição de umidade volumétrica θ .

2.1.6) "O Modelo das três retas"

A avaliação da expansividade de um solo em relação à quantidade de água presente no seu interior é feita a partir de modelos que descrevem as três etapas nas quais este processo ocorre (Fox, 1963; Sposito, 1972; Giráldez et al, 1983). Dentre estes o mais utilizado e conhecido é o modelo das três retas (McGarry & Malafant, 1987).

Neste modelo, a análise da expansão é feita com base em considerações da variação de volume das três fases do solo compostas da fase sólida, líquida e gasosa.

O inverso da densidade global do solo ρ_g , define o volume específico v , ou seja:

2.1.6.1) Volume específico v

$$v = \frac{1}{\rho_g} = \frac{V_t}{m_s} \quad \text{Eq. (2.10)}$$

De acordo com a equação 2.2, a expressão de v em termos dos volumes de cada fase é dada por:

$$v = \frac{V_{ar}}{m_s} + \frac{V_{ag}}{m_s} + \frac{V_s}{m_s} = V_a + \theta_g + v_s \quad \text{Eq. (2.11)}$$

onde, θ_g é a umidade a base de peso,

m_s é a massa da fase sólida,

$v_s = V_s/m_s$ é o volume específico da fase sólida do solo e representa o inverso da densidade de partículas e

V_a é o quociente entre o volume da fase gasosa e a massa da parte sólida

A equação 2.11 define a relação geral da expansão do solo. A quantidade V_a descreve o processo de trocas gasosas no interior do solo e é uma função da umidade θ_g . Isto é:

$$V_a = f(\theta_g) \quad \text{Eq. (2.12)}$$

O comportamento observado em solos expansivos pode ser descrito pela figura 3 onde podem ser observadas 3 etapas distintas na curva de expansão. As etapas se distinguem por apresentarem diferenças no valor da variação " dv " no volume específico com a variação " $d\theta_g$ " na umidade da amostra.

Fig.3) Modelo das três retas, mostrando o comportamento da expansão do solo.

A reta que descreve a variação do volume específico em relação à variação da umidade na etapa normal é caracterizada por ter coeficiente angular igual à unidade $dv/d\theta = 1$, o que equivale a dizer que estas variações são numericamente iguais.

Nas etapas estrutural e residual, o coeficiente angular das retas assume valores entre 0 e 1, isto é, $0 \leq dv/d\theta_g < 1$ mostrando que nestas etapas o solo se caracteriza por apresentar menores variações na expansão em relação à etapa normal.

As etapas também se caracterizam por ocorrerem em intervalos distintos de umidade. A etapa residual ocorre para $\theta_g \in [0, \theta_A]$. A etapa normal ocorre para valores $\theta_g \in [\theta_A, \theta_B]$ e a etapa estrutural de expansão ocorre para valores de $\theta_g \in [\theta_B, \theta_M]$.

Nas etapas residual e estrutural, o modelo assume que o aumento da fase gasosa V_a é linear com o aumento da umidade.

Para a etapa residual a função que descreve V_a é dada por $V_a = \tau + \beta\theta_g$ fazendo com que a equação 2.11 para esta etapa seja escrita como:

$$v = (v_s + \tau) + (1 + \beta)\theta_g \quad \text{Eq. (2.13)}$$

Para a etapa estrutural admite-se que a função V_a seja dada por $V_a = \gamma + \phi\theta_g$. Portanto a equação 2.11 para a expansão na fase estrutural fica descrita pela equação:

$$v = (v_s + \gamma) + (1 + \phi)\theta_g \quad \text{Eq. (2.14)}$$

O fato de $0 \leq dv/d\theta_g < 1$ para as duas etapas citadas anteriormente faz com que os valores de β e de ϕ fiquem dentro do intervalo $[-1, 0]$.

Na etapa normal $dv/d\theta_g = 1$ e portanto na equação 2.11 $V_a = K$, onde K é uma constante, fazendo com que a equação que descreve a expansão nesta etapa seja dada por:

$$v = (v_s + K) + \theta_g \quad \text{Eq. (2.15)}$$

Na figura 3, $K + v_s$ representa a intersecção da reta de expansão normal com o eixo do volume específico.

Combinando as equações 2.13, 2.14 e 2.15 nos pontos de intersecção entre cada uma delas e impondo a continuidade nestes pontos chega-se finalmente às 3 equações que dão o nome ao modelo:

$$\left\{ \begin{array}{ll} v = (v_s + \tau) + \left(\frac{\theta_A - \tau + K}{\theta_A} \right) \theta_g & \text{residual} \quad \text{Eq. (3.13.1)} \\ v = (v_s + \gamma) + \left(\frac{\theta_B - \phi + K}{\theta_B} \right) & \text{estrutural} \quad \text{Eq. (2.14.1)} \\ v = (v_s + K) + \theta_g & \text{normal} \quad \text{Eq. (2.15.1)} \end{array} \right.$$

onde

θ_A é definido como o ponto de entrada de ar;

θ_B é o ponto de limite de expansão;

$\tau = v(0) - v_s$ e

K é a constante de intersecção da reta de contração normal com o eixo do volume específico, como mostra a figura 3.

Na figura 3, a reta 1:1, cuja equação é dada por $v = v_s + \theta_g$ representa o comportamento do conjunto formado pela parte sólida e líquida do solo analisado.

A expansão do solo que se divide nas etapas residual, normal e estrutural, estão representadas na figura 3, respectivamente, pelas retas $\overline{\tau A}$, $\overline{AB}$ e $\overline{BM}$.

A diferença entre o valor de v determinado pelas retas do modelo, equações 2.13.1, 2.14.1 e 2.15.1, e a reta 1:1, representa a função V_a a qual representa a quantidade de ar presente no interior da amostra. Isto é, a área abaixo da reta 1:1 representa o comportamento das componentes sólida e líquida em que o solo se divide e a área entre as retas pontilhadas e a reta 1:1 representa o comportamento da fase gasosa presente na amostra.

A partir deste conceito podem ser determinadas as variações ocorridas nas fases sólida, líquida e gasosa em que a amostra analisada se divide.

Deve-se observar que a reta $\overline{AB}$ e a reta 1:1 são paralelas, indicando que na etapa de expansão normal a quantidade de ar no interior da amostra permanece constante.

Pela análise da figura 3 vê-se que no intervalo de umidades onde ocorre a contração normal, a quantidade de ar do interior da amostra permanece constante até que o ponto da umidade de entrada de ar seja atingido. Para umidades abaixo deste ponto, como o próprio nome sugere, a quantidade de ar no interior da amostra aumenta e provoca uma diminuição da contração apresentada pela amostra. Esta etapa da expansão ocorre na região de contração residual.

Para $\theta_g \in [\theta_B, \theta_M]$ ocorre um aumento do volume de ar do interior da amostra, aumento que é provocado pela substituição da fase líquida pela gasosa recebendo o nome de região de contração estrutural.

O modelo das três retas possibilita a interpolação dos dados de experimentos com solos expansivos. Analisa a expansão através de considerações a respeito do comportamento das variações volumétricas das fases sólida, líquida e gasosa nas quais o solo pode ser representado.

2.2) Produção de Radiação

Raios X são produzidos quando elétrons com alta velocidade são direcionados aos átomos de um material, que recebe a denominação de alvo. Os Raios X produzidos resultam basicamente de dois tipos de interação destes elétrons com os átomos do alvo.

Estes elétrons podem colidir deslocando elétrons situados nas proximidades dos núcleos que constituem o alvo, fazendo com que estes átomos sejam ionizados. Elétrons de camadas mais externas decaem ao nível ionizado emitindo radiação X característica do átomo envolvido na interação, já que é um processo relacionado à estrutura quântica das bandas de energia dos átomos do alvo.

Ao invés de colidirem com os elétrons do alvo, os elétrons rápidos podem ter sua trajetória modificada (acelerados) pelo campo elétrico das proximidades do núcleo atômico.

No último processo, de acordo com a física quântica, o decréscimo ΔE na energia de movimento dos elétrons é convertida em fótons com frequência ν dada pela relação de Einstein, $\Delta E = h\nu$, onde h é a constante de Planck.

A radiação assim produzida aparece como radiação de espectro contínuo, onde os fótons de máxima energia presentes neste espectro são obtidos quando a energia de movimento dos elétrons é completamente convertida em energia dos fótons. A radiação produzida por esse processo também é conhecida como radiação de " Bremsstrahlung ".

Um tubo de Raios X consiste basicamente de um catodo (filamento) e um anodo (alvo) encapsulados por um envólucro onde se faz vácuo. A passagem de corrente pelo filamento

provoca seu aquecimento fazendo com que elétrons sejam ejetados (Efeito termoiônico). Os elétrons ejetados são fortemente acelerados pela alta diferença de potencial estabelecida entre o catodo e o anodo do tubo.

Na interação entre os elétrons e os átomos do alvo são produzidos Raios X através das duas maneiras descritas anteriormente.

A característica dos Raios X produzidos depende essencialmente da voltagem de aceleração a que os elétrons são submetidos e também do material do qual é constituído o anodo. Quanto maior a voltagem aplicada, mais energética é a radiação produzida, sendo menores os comprimentos de onda da radiação produzida.

A máxima frequência $\nu_{\max}$ dos fótons gerados, está relacionada à voltagem "V" aplicada e à carga "e" do elétron através da seguinte relação:

$$\nu_{\max} = \frac{Ve}{h} \quad \text{Eq. (2.16)}$$

2.2.1) Filtros de Raios X

Um átomo pode ser colocado em um estado excitado através da absorção de Raios X.

Se a energia destes fótons é suficientemente grande o elétron pode até ser ejetado do átomo absorvedor (ionização atômica).

A energia de excitação é dada pela relação de Einstein $\Delta E = h\nu$ onde o valor de ΔE é dado pela diferença de energia entre o estado de energia que o elétron ocupa e a energia do nível para o qual o elétron é promovido.

Como consequência deste fato ocorrem mudanças abruptas na atenuação da radiação pelos absorvedores quando a condição de transição é atingida. Estas descontinuidades se refletem no coeficiente de atenuação e são conhecidas como bordas de absorção do material.

Estes processos podem ser vistos através da esquematização que é feita na figura 4:

Fig.4) Diagrama esquemático dos níveis de energia para um átomo de alguns elétrons. São mostrados os processos de absorção e emissão de Raios X (Klug, 1973).

A utilização destas bordas de absorção na produção de feixes com dois picos distintos em energia está esquematizada na figura 5.

Fig.5) Representação esquemática do processo de produção do feixe de dupla energia a partir da radiação de Bremsstrahlung provinda de uma fonte de Raios X.

A seguir descrevem-se as modificações produzidas na radiação de Bremsstrahlung através da utilização de um filtro com características representadas na Fig.(5b).

A radiação de Bremsstrahlung produzida pelo tubo de Raios X operando numa voltagem de "V" Volts tem características semelhantes às que são apresentadas na fig.(5a).

Para energias muito menores que E' ocorre uma grande atenuação da radiação pelo material que compõe o filtro (parte 1, Fig.5c).

Para valores menores porém próximos ao valor de E' existe um acentuado decréscimo do coeficiente de atenuação do material, fazendo com que os fótons com essa energia sejam fracamente atenuados pelo filtro (parte 2, Fig.5c).

Para a energia E' , na borda de absorção, pode-se verificar um aumento do coeficiente de atenuação e fótons com essa energia são novamente bastante atenuados pelo material (parte 3 Fig.5c).

Após a borda de absorção o coeficiente de atenuação volta a decrescer e o material passa a atenuar cada vez menos os fótons com energias acima do valor E' até que seja atingido o valor eV , que é o valor limite da energia dos fótons produzidos neste caso.

Portanto, a partir da radiação de Bremsstrahlung são criados dois picos de radiação distintos em energia. O primeiro pico tem intensidade máxima logo abaixo de E' , a posição do eixo de absorção para o material e o segundo pico se encontra entre os valores de E' e eV .

2.3) Interação da radiação com a matéria

A interação da radiação com a matéria, ocorre principalmente através de três mecanismos distintos. A interação pode se dar, com o átomo como um todo (Efeito fotoelétrico e Espalhamento Rayleigh) ou com um dos elétrons do átomo (Efeito Compton) ou ainda com o núcleo atômico (Produção de pares).

A seguir são dadas breves descrições dos mecanismos de interação citados anteriormente.

2.3.1) Processos de absorção

2.3.1.1) Efeito fotoelétrico

Fótons de baixa energia podem interagir com o átomo através de colisão direta com um de seus elétrons. O elétron que toma parte desta interação, denominado fotoelétrico, é ejetado do átomo com energia cinética T dada por $h\nu - \Phi$, onde $h\nu$ e Φ são respectivamente a energia do fóton incidente e a energia de ligação do fotoelétrico ao átomo do qual foi ejetado. A figura 6 representa esquematicamente o Efeito fotoelétrico.

Fig.6) Representação esquemática do processo de absorção fotoelétrica

2.3.1.2) Efeito Compton

Ao contrário do Efeito fotoelétrico que só ocorre com elétrons ligados, o Efeito Compton pode ocorrer com elétrons livres ou fracamente ligados.

Considere um fóton de energia $h\nu$ colidindo com um elétron inicialmente em repouso, como mostra a figura 7.

Fig.7) Representação esquemática do processo de absorção via Efeito Compton.

Na colisão o fóton perde parte de sua energia inicial, a qual se transforma em energia cinética de recuo do elétron. Através de considerações de conservação de energia e momentum a energia $h\nu'$ do fóton espalhado e a energia de recuo do elétron são dadas por:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2} (1 - \cos \phi)} \quad \text{Eq. (2.17)}$$

e

$$T = h\nu - h\nu' \quad \text{Eq. (2.18)}$$

onde m_0 e ϕ são respectivamente a massa de repouso e o ângulo de recuo do fóton.

2.3.1.3) Produção de pares

A produção de pares é um processo que pode ocorrer nas proximidades do núcleo atômico, neste caso, o fóton é totalmente absorvido ocorrendo a produção de um par elétron-pósitron. A energia de repouso do elétron assim como a do pósitron é dada por m_0c^2 (0,51 MeV). Portanto a energia mínima

necessária para a criação do par é $2m_0c^2$ (1,02 MeV), ou seja, somente fótons com energia igual ou superior a 1,02 MeV interagem com a matéria promovendo a produção de pares. A energia que excede os 1,02 MeV é transformada em energia cinética do par " $T_+ + T_-$ " e também em energia de recuo do núcleo. Por ser bastante pequena, a energia de recuo do núcleo pode ser desprezada frente à energia cinética do par. Então, o balanço energético do processo fornece a seguinte expressão:

$$h\nu - 2m_0c^2 = T_+ + T_- \quad \text{Eq. (2.19)}$$

Após as partículas serem colocadas em movimento, o pósitron é aniquilado por um elétron e como resultado são ejetados dois fótons em direções opostas, cada qual com energia $h\nu = m_0c^2$ (0,51 MeV). Através da figura 8 representa-se o processo de produção de pares.

Fig.8) Representação esquemática do processo de produção de pares

2.4) Atenuação de um feixe de Raios X

Considere-se a situação esquematizada através da figura 9:

Fig.9) Esquematização do processo de atenuação de radiação por uma amostra

Seja N_0 o número de fótons por unidade de tempo que atravessa a abertura T (de área A) em direção ao ponto P, como mostra a figura 9. No caminho do feixe se colocada uma placa de material atenuador cuja espessura é dx .

Na interação da radiação com este absorvedor haverá uma certa quantidade dN de fótons, que devido a processos de absorção e espalhamento, não irão chegar ao ponto P.

O número dN de fótons que não chegam a P é proporcional à quantidade inicial N_0 de fótons e também à espessura dx do absorvedor. Matematicamente, isto pode ser descrito através da seguinte expressão:

$$dN = -\mu N_0 dx \quad \text{Eq. (2.20)}$$

onde a constante de proporcionalidade μ é o coeficiente de atenuação linear.

Usualmente costuma-se encontrar a equação (2.20) escrita em termos da mudança "dI" na intensidade inicial "I₀" do feixe de radiação que chega ao absorvedor.

Por definição intensidade é a quantidade de energia que atravessa a unidade de área por unidade de tempo.

$$I = \frac{\text{Número de fótons} \times \text{Energia de cada fóton}}{\text{Área} \times \text{tempo}} \quad \text{Eq. (2.21)}$$

Para um feixe composto de fótons monoenergéticos, tal como a situação esquematizada anteriormente na figura 9 a variação de intensidade é dada por:

$$dI = -\mu I_0 dx \quad \text{Eq. (2.22)}$$

O sinal negativo aparece devido ao fato de que um aumento na espessura do absorvedor provoca uma diminuição na intensidade do feixe transmitido.

A equação (2.22) integrada na espessura do absorvedor nos fornece a conhecida Lei de Beer dada pela equação 2.23:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \text{Eq. (2.23)}$$

A partir da definição do coeficiente linear de atenuação pode-se definir o coeficiente de atenuação em massa dado por:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho_g} \quad \text{Eq. (2.24)}$$

onde ρ_g é a densidade global seca do absorvedor.

O coeficiente de atenuação aparece como o resultado dos mecanismos de interação da radiação com a matéria, os quais já foram brevemente discutidos anteriormente.

O coeficiente de atenuação linear depende do grau de compactação do material analisado. Esta dependência é eliminada ao definir-se o coeficiente de atenuação em massa, uma constante para o material.

Para um sistema onde existem dois ou mais tipos de material absorvedor, por exemplo: água e solo, vale a seguinte relação para o feixe transmitido:

$$I = I_0 e^{-(\mu_{ag} x_{ag} + \mu_{sl} x_{sl})} = I_0 e^{-(\mu_{mag} \rho_{ag} \theta + \mu_{msl} \rho_{sl}) x} \quad \text{Eq. (2.25)}$$

onde:

μ_{sl} , μ_{ag} e μ_{msl} , μ_{mag} são respectivamente os coeficientes de atenuação linear e de atenuação em massa do solo e da água (Crestana, 1985).

$$\mu = \mu_{msl} \rho_{sl} + \mu_{mag} \theta \rho_a \quad \text{Eq. (2.26)}$$

Portanto, nas medidas do coeficiente de atenuação linear do solo estão embutidas informações a respeito de sua densidade e umidade.

Estes conceitos vão ser úteis quando do emprego da técnica da tomografia computadorizada assim como da dupla energia para a realização de medidas simultâneas da densidade e umidade das amostras de solo.

2.5) Espectrometria de Raios X

2.5.1) Detecção dos Raios X

Na figura 10 representa-se simplificada, em blocos, os componentes utilizados na detecção dos Raios X, sistema que é frequentemente denominado de espectrometria monocal.

Fig.10) Diagrama em blocos de um sistema de espectrometria de Raios X

Segue uma breve descrição das principais partes que compõem o sistema mostrado na figura 10.

2.5.1.1) Cristal cintilador

Determinados materiais quando expostos à radiação ionizante apresentam cintilação ou fluorescência. Um exemplo deste tipo de material é dado pelo NaI(Tl) (Iodeto de Sódio dopado com Tálcio).

Através dos mecanismos de interação da radiação com a matéria elétrons do interior do cristal cintilador são elevados a estados de maior energia decaindo aos estados de menor energia muito rapidamente (tempos da ordem de 10^{-6} s). No processo de transição aos níveis de menor energia são emitidos fótons com frequência situadas na faixa de luz visível do espectro eletromagnético.

O espectro típico de emissão do NaI(Tl) está representado na figura 11.

Fig.11) Espectro de emissão eletromagnética do NaI(Tl) (Hendee, 1984)

As diferentes características das interações da radiação com a matéria fazem com que na interação via Efeito Fotoelétrico toda a energia do fóton incidente seja transferida ao cristal.

Nos processos de produção de pares e Efeito Compton pode não haver absorção completa da energia dos fótons incidentes, visto que nestes dois processos existe a produção de fótons secundários que podem não ser detetados, dependendo da energia destes fótons e das dimensões do cristal.

Um dos fatores que produzem aumento da eficiência na detecção da radiação é o aumento das dimensões do cristal.

2.5.1.2) Válvula Fotomultiplicadora

A luz provinda do cristal cintilador atinge o fotocatodo da fotomultiplicadora fazendo com que elétrons sejam ejetados (Efeito Fotoelétrico). Do fotocatodo, os elétrons produzidos são acelerados em direção ao primeiro dinodo do qual pelo mesmo processo há ejeção elétrons.

Entre dinodos consecutivos se estabelece uma diferença de potencial positiva fazendo com que elétrons produzidos no primeiro dinodo sejam acelerados em direção ao dinodo consecutivo e assim por diante até que os elétrons ejetados do último dinodo sejam colhidos pelo anodo.

O resultado de todo este processo é a multiplicação do sinal provindo do cristal cintilador pois, em geral as ligas das quais são feitos os dinodos multiplicam de 3 a 5 vezes o número de elétrons incidentes quando estes possuem energia entre 50 eV e 150 eV, ou seja, elétrons acelerados por tensões da ordem das que são estabelecidas entre dois dinodos consecutivos.

2.5.1.3) Pré Amplificador e Amplificador

Por meio de cabos coaxiais, o sinal produzido na fotomultiplicadora é enviado ao sistema de amplificação e discriminação.

Devido às características resistivas destes cabos o sinal é pré amplificado para que dessa maneira não seja totalmente dissipado na transmissão.

Após esta pré amplificação o sinal é amplificado pelo amplificador podendo então ser utilizado pelo resto do sistema eletrônico.

2.5.1.4) Analisador monocanal

Através dos mecanismos de interação da radiação com a matéria, fótons monoenergéticos podem transferir total ou parcialmente sua energia ao cristal cintilador.

Os pulsos luminosos gerados possuem intensidades proporcionais à energia absorvida pelo cristal cintilador.

O amplificador faz com que estes pulsos adquiram um certo valor de tensão e desta forma possam ser discriminados através da utilização de um analisador monocanal.

A discriminação destes pulsos através do analisador monocanal é feita basicamente de dois modos denominados de modo de discriminação diferencial e modo de discriminação integral.

No modo de discriminação integral, excluem-se os pulsos que não possuam determinada amplitude. No modo diferencial são contados os pulsos cujas amplitudes estão entre determinados valores distintos, escolhidos de acordo com a energia a ser

2.5.1.3) Pré Amplificador e Amplificador

Por meio de cabos coaxiais, o sinal produzido na fotomultiplicadora é enviado ao sistema de amplificação e discriminação.

Devido às características resistivas destes cabos o sinal é pré amplificado para que dessa maneira não seja totalmente dissipado na transmissão.

Após esta pré amplificação o sinal é amplificado pelo amplificador podendo então ser utilizado pelo resto do sistema eletrônico.

2.5.1.4) Analisador monocanal

Através dos mecanismos de interação da radiação com a matéria, fótons monoenergéticos podem transferir total ou parcialmente sua energia ao cristal cintilador.

Os pulsos luminosos gerados possuem intensidades proporcionais à energia absorvida pelo cristal cintilador.

O amplificador faz com que estes pulsos adquiram um certo valor de tensão e desta forma possam ser discriminados através da utilização de um analisador monocanal.

A discriminação destes pulsos através do analisador monocanal é feita basicamente de dois modos denominados de modo de discriminação diferencial e modo de discriminação integral.

No modo de discriminação integral, excluem-se os pulsos que não possuam determinada amplitude. No modo diferencial são contados os pulsos cujas amplitudes estão entre determinados valores distintos, escolhidos de acordo com a energia a ser

discriminada. Na figura 12 estão representados os modos de discriminação citados anteriormente.

Fig.12) Modos de discriminação do analisador monocanal: a) Integral
b) Diferencial

2.5.1.5) Contador e Temporizador

O contador identifica os pulsos discriminados no analisador e os conta num intervalo de tempo determinado pelo temporizador.

2.6) Tomografia Computadorizada

2.6.1) Imagem por tomografia computadorizada

A tomografia por atenuação de Raios X baseia-se no conceito da atenuação da radiação em materiais não homogêneos.

Se n regiões de diferentes espessuras e coeficientes de atenuação linear aparecerem ao longo do caminho percorrido, a lei de Beer fica:

$$I = I_0 \cdot e^{\sum_{j=1}^n \mu_j x_j}$$

Eq. (2.27)

Fig.13) Esquematização da aplicação da Lei de Beer em diferentes casos a) Material homogêneo b) Material bi-fásico c) Material multifásico

Quando se tem uma coleção de simples transmissões em diferentes orientações do objeto em relação ao feixe pode-se fazer a diferenciação dos coeficientes de atenuação num plano do objeto investigado. Isto é feito através da utilização de métodos de reconstrução de imagens.

Os métodos de reconstrução cruzam informações dos vários feixes colhidos e por meio de manipulações matemáticas relacionam a cada uma das posições do objeto uma unidade arbitrária denominada unidade tomográfica (Crestana, 1985).

A atribuição de diferentes tonalidades de cinza, cores ou quantidade de pontos a cada uma destas unidades arbitrárias faz com que a imagem do plano do objeto possa ser visualizada.

Basicamente existem quatro maneiras para que o conjunto de feixes seja colhido.

Na primeira, que caracterizam os tomógrafos denominados de primeira geração, que é o caso do tomógrafo utilizado neste trabalho, as imagens são obtidas através de movimentos combinados de translação e rotação do objeto ou do conjunto fonte detetor. Nestas medidas emprega-se apenas um detetor e faz-se uma prévia colimação do feixe de radiação usado nas medidas (fig 14A).

Nos tomógrafos de segunda geração, as transmissões necessárias à reconstrução da imagem tomografica são obtidos por um feixe divergente e um conjunto de detetores que possuem movimentos combinados de rotação e translação (fig.14B).

Os tomógrafos de terceira geração usam um feixe divergente e um conjunto maior de detetores. A imagem é obtida apenas com o movimento de rotação do conjunto em torno do objeto (fig.14C).

Em tomógrafos mais modernos, um feixe divergente é detetado por uma cadeia de detetores fixos ao redor da amostra e a imagem do plano tomográfico é obtida apenas com o movimento de rotação da fonte (fig.14D).

Fig.14) Esquema da coleta dos dados necessários à tomografia nos tomógrafos de A) Primeira geração; B) Segunda geração; C) Terceira geração e D) Tomógrafos mais modernos (Hendee, 1984).

Os diferentes modos utilizados na obtenção das tomografias fazem parte de um desenvolvimento que teve como um dos principais objetivos a diminuição do tempo de coleta dos dados necessários à realização de uma imagem tomográfica. Em tomografias médicas, por exemplo, não se pode fazer com que o paciente fique exposto à radiação por períodos prolongados de tempo. Num tomógrafo de primeira geração, o tempo de aquisição dos dados para a realização de uma tomografia varia de alguns minutos a algumas horas. Para os de segunda geração esse tempo

pode variar de 20 a 60 segundos e nos de terceira geração o tempo de coleta é de alguns segundos.

2.7) Reconstrução de imagens tomográficas

A seguir são apresentados de forma bastante sucinta os princípios utilizados na reconstrução de imagens tomográficas. Em particular, será apresentado o método de retroprojeção filtrada, o método utilizado neste trabalho.

2.7.1) Notação

Começa-se por definir um sistema de coordenadas (x,y) utilizado para localizar espacialmente os pontos de um plano de interesse tal como mostra a figura 15.

Fig.15) Representação do sistema de coordenadas utilizado para descrever o método de reconstrução das imagens tomográficas.

Denota-se por $f(x,y)$ a função densidade puntual, que nesta situação, representa a distribuição dos coeficientes de atenuação linear do plano investigado. A integral de linha de $f(x,y)$ ao longo do caminho (r,ϕ) é denominado raio soma ou raio projeção $P(r,\phi)$, ou seja:

$$P(r,\phi) = \int_{r,\phi} f(x,y) ds \quad \text{Eq. (2.28)}$$

Da aplicação da lei de Beer, chega-se à seguinte relação:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \int_{r,\phi} \mu(x,y) ds \quad \text{Eq. (2.29)}$$

Para $f(x,y) = \mu(x,y)$ as equações 2.28 e 2.29 fornecem:

$$P(r,\phi) = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad \text{Eq. (2.30)}$$

O conjunto completo de raios soma num determinado ângulo ϕ recebe a denominação de projeção. Como a função $f(x,y)$ é contínua, um número infinito de projeções seriam necessárias para sua reconstrução. Na prática, de um número finito de projeções obtém-se $\hat{f}(x,y)$ uma aproximação de $f(x,y)$.

2.7.2) Método da Retroprojeção filtrada

Para ilustração do método, imagine o objeto retangular apresentado na figura 16. Das várias projeções necessárias para a reconstrução da imagem apenas duas são mostradas:

Fig.16) Esquematização da reconstrução de um objeto retangular pelo método da retroprojeção (são mostradas apenas duas das várias projeções requeridas pelo método)

O processo de obtenção da imagem é descrito por meio da seguinte equação:

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{j=1}^n P(x \cos \phi_j + y \sin \phi_j, \phi_j) \Delta \phi \quad \text{Eq. (2.31)}$$

onde ϕ_j é o ângulo da j -ésima projeção e $\Delta \phi = \pi/n$ é a passo angular entre as sucessivas projeções, sendo a soma feita sobre as n projeções.

Através do método são selecionados todos os raios que passam pelo ponto de coordenada (x, y) e a função densidade calculada $\hat{f}(x, y)$ aparece como a soma de todas as contribuições dos raios soma que passam pelo ponto em questão.

A simples retroprojeção não produz boas imagens pelo fato de algumas projeções fornecerem contribuições positivas a pontos fora da amostra, é o caso das projeções A e B a um ponto do exterior da amostra, o de coordenadas (x, y) , figura 17. Os

pontos assim gerados produzem o que costuma-se denominar de "efeito estrela".

Fig 17) Apresentam-se as contribuições positivas nas projeções A e B a um dos pontos fora da amostra originando o "efeito estrela" (à direita na figura)

As projeções do objeto podem ser modificadas (tratadas) após terem sido colhidas e é o que se faz no método da retroprojeção filtrada. A figura 18 mostra as projeções iniciais modificadas pelo tratamento.

Fig.18) Método da retroprojeção filtrada. Mostra-se que o método associa tanto contribuições positivas quanto negativas aos pontos fora da amostra, o que faz com que seja minorado o "efeito estrela"

Nota-se que as projeções filtradas contém tanto contribuições positivas quanto negativas do ponto considerado. Estas contribuições ao se somarem se cancelam ou são minimizadas fazendo-se com que o "efeito estrela" produzido na reconstrução de imagens por simples retroprojeção seja minimizado.

Existem três variações do método de retroprojeção filtrada que são determinadas pelo tipo de filtro que se utiliza (Brooks, 1976).

2.8) Filtragem das imagens "tomográficas"

Uma imagem pode ser construída a partir da atribuição de diferentes tonalidades de cinza a um arranjo de pontos localizados espacialmente.

Numa imagem tomográfica por exemplo, este arranjo é obtido por meio de projeções feitas em diferentes orientações do objeto.

As diferenças de tonalidade refletem as diferentes composições do interior do objeto analisado. Entretanto, estas imagens estão sujeitas a ruídos, flutuações, que são gerados principalmente de três formas.

A primeira, denominada "Quantun Mottle", provoca flutuação nas unidades tomográficas UT e se deve à baixa quantidade de fótons colhida em uma medida de transmissão. A segunda advém do sistema de amplificação e detecção da radiação (ruídos na eletrônica) e finalmente na terceira, os ruídos podem ser gerados no próprio programa de reconstrução utilizado.

A extração de médias é reconhecidamente um procedimento usado em processos de minimização de ruídos em imagens

digitais. Este procedimento é conhecido como "smoothing" palavra inglesa que significa "alisamento" ou "suavização".

O procedimento de filtragem utilizado neste trabalho se baseia em dois processos largamente utilizados em manipulação de imagens.

O primeiro, mostrado em Rosenfeld & Kak, 1991, é o do cálculo da média entre imagens que possuem a mesma origem e diferem umas das outras pela intensidade do ruído a elas associado.

O segundo é a conservação do valor médio e diminuição da variância associada a uma distribuição quanto à operação representada através da equação 2.32:

$$X_{ij}' = (\bar{X} + X_{ij})/2 \quad \text{Eq. (2.32)}$$

onde $\{X_{ij}\}$ é um subconjunto de pontos da imagem original; $\bar{X}$ é o valor médio associado a este conjunto e $\{X_{ij}'\}$ é o novo conjunto de pontos.

O processo de filtragem é realizado através da média da imagem original e outra que difere da original apenas em alguns pontos os quais foram substituídos por $\bar{X}$.

As posições onde foram trocados os valores constituem o que se costuma denominar de "máscara" e representa a região onde os valores vão sofrer o procedimento de atenuação dos ruídos ("smoothing"). O procedimento é esquematizado a seguir:

Sejam "O" a matriz que representa a imagem original e "M" a matriz onde os elementos das posições definidas pela "máscara" foram trocados por $\bar{X}$, Ou seja:

Dada a matriz O, de elementos X_{ij} , que representa a imagem original, gera-se a matriz M de elementos m_{ij} ; $1 \leq i, j \leq n$ apresentados a seguir:

$$m_{ij} = \begin{cases} \bar{X} & ; \text{ para } \begin{cases} a \leq i \leq b \\ c \leq j \leq d \end{cases} \\ e & \\ X_{ij} & ; \text{ para } \begin{cases} i < a \text{ e } i > b \\ j < c \text{ e } j > d \end{cases} \end{cases}$$

Os elementos da "máscara" ficam delimitados entre as linhas "a" e "b" e as colunas "c" e "d".

A partir destas definições as matrizes O e M ficam descritas como:

$$O = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2n} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & \dots & X_{3n} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & \dots & X_{4n} \\ X_{a1} & \dots & X_{ac} & \dots & X_{ad} & \dots & X_{an} \\ X_{b1} & \dots & X_{bc} & \dots & X_{bd} & \dots & X_{bn} \\ X_{n1} & X_{n2} & X_{n3} & \dots & X_{nn} \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2n} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & \dots & X_{3n} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & \dots & X_{4n} \\ X_{a1} & \dots & X_{a \ c-1} & \bar{X} & \dots & \bar{X} & X_{a \ d+1} & \dots & X_{an} \\ X_{b1} & \dots & X_{b \ c-1} & \bar{X} & \dots & \bar{X} & X_{b \ d+1} & \dots & X_{bn} \\ X_{n1} & X_{n2} & X_{n3} & \dots & X_{nn} \end{pmatrix}$$

Se forem observados os princípios nos quais a filtragem das imagens foi baseada, observa-se que a operação de média entre as matrizes O e M, definida através da equação 2.32, produz a imagem filtrada F de interesse:

$$F = (O + M)/2$$

Eq. (2.33)

Os elementos do interior da máscara na imagem filtrada F ficam definidos agora pela equação 2.32. Portanto, o valor médio associado a estes pontos fica inalterado assim como diminui-se a variância a eles associada. Está demonstrado no apêndice 1 que a variância associada a estes ponto cai à quarta parte.

Portanto, a operação descrita faz com que haja uma atenuação do ruído da imagem original sem que com isto sejam modificadas suas características iniciais tais como o valor médio de uma região de interesse.

Capítulo 3

Materiais e métodos

Tomógrafo de dupla energia simultânea de Raios X

Na realização dos experimentos utilizou-se um tomógrafo de Raios X de primeira geração pertencente ao CNPDIA-EMBRAPA-São Carlos-SP, composto por uma fonte de raios X, detector, eletrônica de amplificação e dupla eletrônica de discriminação e contagem.

O controle de deslocamento da mesa do tomógrafo, assim como o armazenamento dos dados relativos às tomografias é feito por hardware e software desenvolvidos com essa finalidade (Cruvinel et al, 1989).

Uma esquematização do sistema modificado para o fim deste trabalho é apresentado na figura 19.

Fig.19) Diagrama em blocos do tomógrafo de Raios X de dupla energia.

No tomógrafo de primeira geração utilizado, os raios soma necessários à reconstrução das imagens do plano tomográfico foram tomados à intervalos igualmente espaçados passos lineares de 0,3cm. Uma projeção completa foi obtida a partir de um conjunto completo de raios soma numa determinada direção o que perfazia uma translação total de 3cm. O tempo de coleta de cada raio soma foi de 50s e o conjunto de projeções foi tomado a intervalos angulares igualmente espaçados de 6 graus num intervalo de 0 até 180 graus.

Foi utilizada uma fonte de Raios X Philips modelo MCN 165, alvo de tungstênio, com 160 KV e 18,5 mA de valores máximos de saída e para a detecção da radiação foi empregado um cristal plano de Iodeto de Sódio dopado com Tálcio NaI(Tl) com 3cm de diâmetro e 3mm de espessura, acoplado a um pré-amplificador e a uma fotomultiplicadora.

O sistema de discriminação, era composto por dois analisadores monocanal, onde um operava no modo diferencial e o outro no modo integral.

A fonte de alta tensão que alimentou a fotomultiplicadora na realização do experimento operou numa tensão de 1000 V. Na saída da fonte de raios X foi instalado um suporte para movimentação de colimadores de chumbo de modo a facilitar a colimação e alinhamento do feixe de radiação em relação à mesa tomográfica. Este suporte também pode acomodar colimadores de diferentes diâmetros de abertura, permitindo assim a realização de tomografias de diferentes resoluções espaciais. Neste trabalho foram selecionados e utilizados colimadores com 3mm de diâmetro de abertura.

De acordo com o que foi visto no capítulo 2, seção 2.2.1, foram utilizados filtros confeccionados com estanho (Sn), para

que o espectro de Bremsstrahlung proveniente da fonte de Raios X fosse modificado de modo a que se tivesse, simultaneamente, no feixe transmitido pelo filtro a presença de dois picos de radiação com energias distintas e iguais a 27 KeV e 59 KeV, respectivamente.

Em cada um dos analisadores monocanal os fótons transmitidos foram registrados e discriminados de acordo com sua energia. Os que estavam dentro da faixa de discriminação destes analisadores eram contabilizados e armazenados na memória do computador, para posteriormente serem reconstruídas as imagens do plano tomográfico do objeto em estudo, conforme descrito no capítulo 2, seções 2.6 e 2.7.

A duração total de uma tomografia depende, entre outros fatores, do intervalo de tempo escolhido para fazer cada uma das medidas de transmissão.

A escolha é feita em função da precisão desejada e também para que se obtenha uma razoável estatística de contagem.

Uma das limitações básicas para a precisão ou exatidão das tomografias é a natureza estatística do processo de produção de fótons, sejam eles oriundos de uma fonte de Raios X ou de Raios Gama.

Em primeira aproximação pode-se considerar o desvio no valor de uma contagem como sendo a raiz do valor que é obtido. Tome-se como exemplo uma medida onde se obtém uma contagem de N fótons. Na repetição desta medida, espera-se que o valor das contagens subsequentes estejam contidas dentro do intervalo dado por $(N \pm \sqrt{N})$, um intervalo no qual a amplitude do desvio relativo das medidas é dado por $\sqrt{N}/N$.

Costuma-se utilizar na realização das medidas contagens acima de 10.000 fótons, o que fornece um intervalo de flutuação

das contagens dado por (10.000 ± 100) e um valor de 1% para o desvio relativo nesta medida.

A quantidade de fótons que chega ao detector depende da densidade e tamanho das amostras analisadas. Para que se aumente a contagem de fótons transmitidos através da amostra, considerando-se a mesma geometria de colimação e mantendo-se todos os parâmetros do sistema eletrônico, basta que se aumente o intervalo de tempo de coleta das contagens.

Para o tubo de Raios X operando numa tensão de 60KV e 10mA, distância entre fonte-detector de 70 mm e utilizando-se colimadores de 3 mm de abertura, as taxas de contagem obtidas após a filtragem da radiação de Bremsstrahlung foram de aproximadamente 22.000 e 12.500 fótons por segundo, respectivamente, para as energias de 27 e 59 KeV.

Devido às características de composição e tamanho das amostras analisadas e das energias dos picos empregados, o tempo de coleta dos dados necessários à realização simultânea das tomografias nas duas energias girou em torno de 7 horas.

O método utilizado na reconstrução das imagens foi o da retroprojeção filtrada por filtro de convolução.

O sistema tomográfico além de possibilitar a visualização das imagens reconstruídas, permitia o acesso à matriz de dados ou de unidades tomográficas para posterior tratamento e análise (Vaz et al, 1992).

3.1) Preparação dos filtros de Estanho

Os filtros de estanho foram confeccionados e selecionados conforme princípios e procedimentos relatados em Cesareo et al,

1993. Estes filtros foram construídos a partir de estanho em forma de pó (P.A.) e cola tipo epoxi.

Foram confeccionados filtros em quatro espessuras com concentrações distintas de estanho. A confecção dos filtros obedeceu as seguintes etapas:

1) Inicialmente foram adicionadas massas conhecidas de uma das resinas e de estanho. Por aproximadamente 1 minuto promoveu-se a mistura entre estes dois compostos procurando-se a homogeneização entre eles. Após o processo de homogeneização adicionou-se a segunda resina para que fosse provocada a secagem e endurecimento da cola (aproximadamente 8 horas); 2) A mistura obtida foi moldada na forma de placas em matrizes conforme está esquematizado na figura 20 e 3) Esperou-se a secagem e conseqüente endurecimento da cola para que as placas pudessem ser extraídas das matrizes. Estas placas constituem propriamente os filtros de radiação utilizados no experimento.

As matrizes (moldes) utilizadas na confecção dos filtros estão esquematizados na figura 20:

Fig.20) Matrizes utilizadas na produção dos filtros de estanho.

Foram feitas matrizes com profundidades de rebaixo de 1mm, 2mm, 4mm e 6mm. Na tabela 1 são mostrados alguns dos filtros que foram preparados:

Tabela 1: Filtros de estanho preparados									
z (mm)	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	4,0
$\rho(\text{g/cm}^3)$	5,0	6,0	1,7	2,0	2,5	3,5	4,5	6,0	5,0

onde z é a espessura do filtro confeccionado e ρ é a densidade de estanho presente na cola epoxi.

Foram confeccionados alguns filtros com espessuras de 1 e 2mm com concentrações de estanho menores do que aquelas apresentadas na tabela 1. Entretanto, a baixa concentração de estanho nestes filtros fez com que não fossem obtidos os dois picos de interesse.

De modo semelhante, foram feitos filtros de 3 e 4mm de espessura com concentrações de estanho mais elevadas do que aquelas apresentadas na tabela 1. No entanto, não foram utilizadas no experimento pois atenuaram quase que totalmente a radiação produzida no tubo de Raios X. Para as condições de emissão do tubo de Raios X utilizado, o filtro que apresentou melhores resultados foi o de 2mm de espessura com 4,5 g/cm³ de concentração de estanho. A escolha dos filtros empregados no experimento foi feita de forma empírica, por tentativas, verificando o que produzia maior separação entre picos e máxima intensidade de radiação, tarefa que foi bastante facilitada através da utilização de um analisador multicanal. No apêndice 4 mostra-se a modificação produzida pela filtragem com estanho.

A seguir apresenta-se o procedimento utilizado na determinação, simultânea, da densidade e umidade das amostras

porosas através da técnica da tomografia computadorizada simultânea de dupla energia.

3.2) Discriminação do espectro de radiação

Considerando-se o que foi descrito no capítulo 2, seção 2.5.1.4, das interações entre os fótons e o cristal cintilador são produzidos pulsos de amplitudes proporcionais à energia transferida ao cristal.

No caso do espectro de dois picos a discriminação e subsequente detecção está esquematizada na figura 21:

Fig.21) a) Modo utilizado na discriminação dos dois picos de energia. b)Mostra-se o largura de meia altura ΔV de um pico com intensidade máxima I_{max} .

Considerando que o espectro de radiação se compunha de fótons de diferentes energias, na interação com o cristal cintilador foram produzidos sinais de diferentes amplitudes. Quando amplificados, estes sinais adquiriram um valor de tensão

proporcional à amplitude inicial e portanto proporcional à energia transferida ao cristal.

O pico de fótons menos energéticos é discriminado através do analisador monocanal operando no modo diferencial entre as tensões V_1 e V_2 (figura 21a), escolhidas na meia altura deste pico. Ou seja, a tensão V_m para a qual $I = I_{\max}/2$ onde $I_{\max}$ é a intensidade máxima do pico como mostra a figura 21b. Desta maneira, limitava-se a energia de discriminação deste analisador para apenas os fótons compreendidos entre uma determinada energia.

O pico de maior energia foi discriminado através de um analisador monocanal que operou no modo integral a partir da tensão V_3 , também correspondente à voltagem de meia altura para este pico. Ao limitar-se o valor da tensão de discriminação em V_3 , somente fótons de energia que produziram tensões de amplitudes maiores ou iguais a V_3 foram contabilizados. Portanto somente alguns dos fótons do pico de energia mais alta puderam atingir este valor de tensão, fazendo com que os fótons de energias abaixo de um determinado valor não fossem contabilizados. Em particular todos os fótons do pico de menor energia e parte dos fótons do pico de maior energia não o foram.

Portanto, esta situação permitiu a discriminação de fótons de energias diferentes em cada um dos analisadores. A variação do número de fótons contabilizados em cada analisador permitiu o cálculo da atenuação e a realização das tomografias dos diferentes materiais utilizados na realização dos experimentos.

3.3) Calibração do sistema nas duas energias

Para que se possa determinar a densidade global e a umidade das amostras analisadas deve-se fazer a calibração do sistema, que consiste em encontrar a relação entre as unidades tomográficas UT e o coeficiente de atenuação linear μ para alguns materiais.

A calibração foi feita da seguinte maneira:

1) Inicialmente encontrou-se o valor do coeficiente de atenuação linear de cada um dos materiais que fez parte da calibração.

Para cada um destes materiais o valor do coeficiente de atenuação linear foi obtido pela média de 10 repetições da medida de transmissão direta. As taxas de contagem de fótons I e I_0 utilizados na lei de Beer, equação 2.23, foram valores médios calculados a partir de 15 contagens efetuadas num intervalo de tempo de 50 segundos cada uma;

2) O valor de UT para os materiais da calibração foi encontrado através do procedimento descrito a seguir:

As amostras foram colocadas em recipientes cilíndricos de PVC com 2cm de diâmetro interno e foram realizadas 3 tomografias num mesmo plano de cada uma destas amostras.

Na realização das tomografias, para uma colimação de 3mm foram escolhidos 25 pontos no interior de cada amostra e portanto 3 repetições forneceram 75 pontos para cada amostra. A média destes pontos foi adotada como valor representativo da UT para o material da calibração.

Mostra-se na figura 22 uma esquematização do método utilizado para a obtenção da UT de cada material.

- 1) Coleta dos dados para a reconstrução
- 2) Reconstrução das imagens via computador
- 3) Escolha dos 25 pontos do interior da amostra

Fig 22) Pontos do interior da imagem tomográfica da amostra indicando os 25 pontos escolhidos.

A escolha dos 25 pontos mostrados na figura 22 foi feita levando-se em conta que a distância mínima destes à borda do

recipiente fez com que um pixel centrado em qualquer um destes pontos não tenha recebido contribuição do coeficiente de atenuação da parede do recipiente utilizado no acondicionamento da amostra.

Para a realização da calibração do sistema, as condições de operação do tomógrafo foram: passo linear igual a 0,3cm, passo angular igual a 6 graus, tempo de contagem de fótons igual a 50 segundos para cada posição da amostra e translação total de 3cm.

Os materiais utilizados na calibração do sistema tomográfico foram dois solos distintos, água e benzina. Com estes quatro materiais foi obtida uma região relativamente extensa de coeficientes de atenuação lineares variando entre $0,137\text{cm}^{-1}$ e $1,26\text{cm}^{-1}$.

Para as duas energias utilizadas na calibração foram encontradas relações lineares entre as unidades tomográficas e o coeficiente de atenuação linear dos materiais. Ou seja, as calibrações são descritas por equações do tipo das que são apresentadas a seguir:

$$\begin{cases} UT(E_1) = \alpha_1 \times \mu(E_1) \\ UT(E_2) = \alpha_2 \times \mu(E_2) \end{cases} \quad \text{Sistema (3.1)}$$

onde $UT(E_1)$ e $UT(E_2)$ são, respectivamente, os valores representativos da unidade tomográfica dos materiais com coeficientes de atenuação μ_1 e μ_2 e α_1 e α_2 são encontrados através da calibração.

Considerando-se o solo como material absorvedor e utilizando-se a equação 2.26 as equações de calibração do

sistema (3.1) passam a ser dadas pelo sistema de equações (3.2), apresentado a seguir:

$$\begin{cases} UT(E_1) = \alpha_1 \times [\mu_{msl}(E_1)\rho_{g_{s1}} + \mu_{mag}(E_1)\theta] \\ UT(E_2) = \alpha_2 \times [\mu_{msl}(E_2)\rho_{g_{s1}} + \mu_{mag}(E_2)\theta] \end{cases} \quad \text{Sistema (3.2)}$$

As duas últimas equações constituem um sistema de equações lineares cuja solução fornece, pixel a pixel, o valor da densidade global $\rho_{g_{s1}}$ e da umidade θ a partir das duas imagens tomográficas advindas das duas energias, representadas por E_1 e E_2 .

Os valores para a umidade e densidade global dados pela solução do sistema (3.2) são apresentados a seguir:

$$\theta = \left\{ \frac{[UT(E_1)\mu_{msl}(E_2)/\alpha_1] - [UT(E_2)\mu_{msl}(E_1)/\alpha_2]}{\mu_{mag}(E_1)\mu_{ms}(E_2) - \mu_{mag}(E_2)\mu_{ms}(E_1)} \right\} \quad \text{Eq. (3.3)}$$

$$\rho_{g_{s1}} = \left\{ \frac{[UT(E_2)\mu_{mag}(E_1)/\alpha_2] - [UT(E_1)\mu_{mag}(E_2)/\alpha_1]}{\mu_{mag}(E_1)\mu_{ms}(E_2) - \mu_{mag}(E_2)\mu_{ms}(E_1)} \right\} \quad \text{Eq. (3.4)}$$

Os coeficientes de atenuação em massa que aparecem nas relações anteriores são calculados através da equação 2.24 onde a densidade global do solo seco " ρ_{s1} " foi calculada pelo método gravimétrico.

O método gravimétrico consiste na determinação da massa de um determinado volume de amostra, isto é, $\rho_{g_{s1}} = m_t/V_t$, onde

m_t é a massa total da amostra de solo e V_t é o volume que esta massa ocupa.

A densidade global média para cada amostra de solo foi calculada a partir da média de 10 medidas da densidade de 50 ml de solo.

O coeficiente de atenuação em massa do solo não depende das condições de compactação, o que faz com que as equações de calibração possam ser utilizadas mesmo para materiais com características expansivo-contrativas tais como os que motivaram a realização deste trabalho.

3.4) Amostras de solo expansivo

Foram coletadas amostras indeformadas de solo tipo glei pouco húmico, que possuem argilas expansivas, de regiões de várzea do Paraná. Posteriormente, para que as tomografias fossem realizadas, as amostras coletadas passaram por processos de secagem, trituração e peneiramento a 1 mm. Em seguida foram acondicionadas em recipientes cilíndricos de PVC com 2 cm de diâmetro interno e 0,5 mm de espessura.

O acondicionamento do solo nos recipientes foi feito de modo a que todas as amostras, num total de 4, possuissem inicialmente densidade média global seca igual a $1,15 \text{ g/cm}^3$. Para isto foi preenchido um volume de 15 cm^3 com uma massa de solo igual a 17,3g.

Utilizando-se a equação 2.7 foram preparadas amostras com umidades volumétricas conhecidas.

Após a adição de água as amostras ficaram em repouso durante um período de 7 dias para que houvesse uma boa distribuição de água em seu interior.

A adição de água nas amostras foi feita do modo esquematizado na figura 23.

Fig 23) Preparação das amostras de solo expansivo com graus conhecidos de hidratação.

Os recipientes contendo as amostras de solo seco foram umedecidos com quantidades conhecidas de água conforme apresentado na figura 23.

Como o volume inicial da amostra de solo seco era de 15cm^3 , para se obter uma amostra com $0,4\text{cm}^3/\text{cm}^3$ de umidade, o volume de água adicionado à amostra, de acordo com a Eq. (2.7), foi de 6cm^3 .

A saturação da amostra é atingida quando há máxima quantidade de água absorvida pela amostra. Pode-se ter uma

idéia da umidade de saturação da amostra através das equações 2.6 e 2.8, para $S=1$, já que a densidade global do solo foi determinada e a densidade de partícula para o solo pode ser assumida igual a $2,65 \text{ g/cm}^3$.

Na preparação da amostra saturada, colocou-se no becker um volume inicial de 50 cm^3 de água e o volume absorvido pela amostra foi obtido através da diferença entre o volume inicial e o volume restante no becker após a retirada da amostra.

Após 7 dias de repouso das amostras nas diferentes condições de umidade, foram obtidas as imagens de um determinado plano tomográfico de cada uma delas. Para a realização destes umidecimentos vedou-se o becker no qual as amostras foram acondicionadas para que não houvesse evaporação da água introduzida nas amostras.

Cada tomografia produziu duas imagens que foram dadas em termos das unidades tomográficas. Através da utilização das equações 3.3 e 3.4 foram encontradas as matrizes de umidades e densidades relativas ao plano tomográfico investigado.

Para a verificação da expansividade deste solo, outro tipo de experimento foi conduzido.

Em um cilindro de vidro graduado foram preparadas amostras com densidade de $1,15 \text{ g/cm}^3$ e volume inicial de 15 cm^3 .

Estas amostras podiam ser umidecidas da mesma maneira que as amostras que foram utilizadas nas tomografias. Pelo fato do cilindro ser transparente e graduado, pôde-se verificar o volume atingido pelo solo numa determinada condição de umidade da amostra.

Este procedimento é esquematizado na figura 24.

Fig.24) Método utilizado na verificação da densidade adquirida pela amostra em uma dada condição de umidade.

A diferença entre duas graduações consecutivas correspondeu a uma variação volumétrica de $0,31 \text{ cm}^3$ e portanto as variações obtidas nos experimentos de tomografia (variações de volume em torno de $2,0 \text{ cm}^3$ entre as condições em que a amostra se encontra seca e saturada) puderam ser quantificadas por este método.

Neste experimento foram realizadas 3 repetições de medidas com a amostra saturada e 2 repetições em amostras com 6 cm^3 de água.

3.5) Medidas de contração de amostras estruturadas de solo expansivo

A título de comparação com o estudo feito através das tomografias foram realizadas medidas de contração de amostras estruturadas (em condições naturais) de solo glei por meio de medidas diretas de seu volume em certas condições de umidade.

A amostra de solo estudada estava acondicionada em um cilindro de 50cm de diâmetro interno e 50cm de altura, dimensões que foram totalmente ocupadas pela amostra na condição de saturação.

A amostra seca foi pesada obtendo-se assim o valor de m_s a massa seca desta amostra. Após isto, a amostra foi saturada e pesada o que fez portanto com que fosse conhecida a máxima quantidade de água absorvida pela amostra e conseqüentemente a umidade de saturação. A amostra foi deixada ao tempo fazendo com que desta forma seu teor de umidade diminuísse. Em algumas condições intermediárias de umidade, a amostra foi pesada e teve seu volume determinado por meio de medidas diretas de suas dimensões utilizando-se um paquímetro.

Foram realizadas medidas do volume da amostra em 9 condições distintas de umidade.

3.6) Solos não-expansivos

Neste trabalho também foram realizadas medidas com solos não-expansivos com o intuito de verificar o comportamento das medidas de densidade global destas amostras em relação aos diferentes graus de hidratação.

3.7) Filtragem das imagens tomográficas

O procedimento de filtragem das imagens foi efetuado através da utilização de um software no qual operações matriciais foram feitas de forma bastante simples. A filtragem das imagens pode ser descrita através da figura 25:

Fig.25) Procedimento de filtragem das imagens. a) Imagem original. b) Construção da "máscara" e c) Obtenção da imagem filtrada.

Inicialmente encontrou-se o valor da média dos 25 pontos do interior da amostra: figura 25a. Este valor foi utilizado na criação da matriz M de acordo com o procedimento descrito na figura 25b. A imagem filtrada foi obtida a partir da média das matrizes O e M, respectivamente, as matrizes que representam a imagem original e a imagem "máscara" mostrada na figura 25c.

Com esta operação, objetivou-se reduzir o ruído das imagens e conseqüentemente das determinações da densidade e umidade das amostras analisadas.

Capítulo 4

Resultados e discussão

Como foi descrito no capítulo 3, seção 3.3, o método de determinação da densidade global e da umidade das amostras analisadas depende da calibração do sistema tomográfico.

O ponto de partida para esta calibração consiste na determinação da relação entre as unidades tomográficas UT e o coeficiente de atenuação linear μ das amostras.

Para esta determinação foram utilizados quatro materiais distintos e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2:Relação entre unidades tomográficas (UT) e coeficiente de atenuação linear (μ) para as duas energias utilizadas no experimento				
material	μ_1 (cm ⁻¹): 57KeV	μ_2 (cm ⁻¹): 29KeV	UT ₁	UT ₂
Solo e	(0,52±0,02)	(1,26±0,02)	(520±10)	(1300±25)
Solo ne	(0,323±0,009)	(0,86±0,02)	(340±5)	(910±13)
Água	(0,221±0,001)	(0,337±0,002)	(240±8)	(430±10)
Benzina	(0,1370±0,0008)	(0,167±0,002)	(160±5)	(250±8)

onde, solo "e" e solo "ne" foram as denominações adotadas para identificar, respectivamente, as amostras desestruturadas (peneiradas) de solo expansivo e de solo não-expansivo.

Os índices 1 e 2 estão representando as medidas nas quais se utilizou, respectivamente, o pico de fótons de maior energia 57 KeV e o pico de fótons de menor energia 29 KeV.

Com os dados da tabela 2 passou-se à determinação da correlação entre as unidades tomográficas e o coeficiente de atenuação linear para os materiais investigados.

Os gráficos que relacionam os dados apresentados na tabela 2 são mostrados nas figuras 26 e 27.

Na figura 26 mostra-se a relação entre o coeficiente de atenuação linear e as unidades tomográficas para o pico de fótons de maior energia (57 KeV) e na figura 27 a mesma relação para o pico de fótons de menor energia (29 KeV).

Fig. 26) Calibração do sistema para o pico de fótons de maior energia igual a 57 KeV

Para o gráfico da figura 26 a regressão linear e o coeficiente de determinação r^2 para os materiais analisados tem os seguintes valores:

$$UT_1 = (940 \pm 6)\mu_1 + (34 \pm 2) \text{ e } r^2 = 0,999$$

Eq. (4.1)

Fig. 27) Calibração do sistema para o pico de fótons de menor energia igual a 29 KeV

Para o gráfico mostrado na figura 27 os valores obtidos para o coeficiente de determinação r^2 e a regressão linear entre os pontos obtidos estão apresentados a seguir:

$$UT_2 = (950 \pm 40)\mu_2 + (100 \pm 30) \text{ e } r^2 = 0,997$$

Eq. (4.2)

Através da análise dos valores encontrados para os coeficientes de determinação " r^2 " pode-se ver que as retas de

regressão linear estão bem ajustadas aos pontos obtidos no experimento.

Pôde-se ver também que houve uma maior flutuação das unidades tomográficas nas imagens relativas ao pico de fótons de menor energia. Este fato pôde ser observado tanto nas determinações apresentadas na tabela 2 quanto nas correlações obtidas entre os coeficientes de atenuação linear e as unidades tomográficas para os materiais analisados.

A maior flutuação ocorrida nos dados referentes ao pico de menor energia foi devida à maior atenuação dos fótons de menor energia por parte dos materiais. Devido à esta maior atenuação, diminuiu-se mais acentuadamente a relação sinal ruído para esse pico em comparação ao pico de fótons de maior energia o que se refletiu nas imagens e determinações obtidas.

O coeficiente de atenuação em massa para as amostras de solo expansivo e para a água, obtiveram os valores apresentados na tabela 3:

Tabela 3: Coeficientes de atenuação em massa para o solo expansivo e para a água		
Material	$\mu_{m1}(\text{cm}^2/\text{g}): 57\text{KeV}$	$\mu_{m2}(\text{cm}^2/\text{g}): 29\text{KeV}$
Solo expansivo	$(0,45 \pm 0,03)$	$(1,10 \pm 0,04)$
Água	$(0,221 \pm 0,001)$	$(0,337 \pm 0,002)$
Água valor tabelado	$(0,215 \pm 0,001)$	$(0,350 \pm 0,001)$

onde: $\mu_{m1}(\text{cm}^2/\text{g})$ e $\mu_{m2}(\text{cm}^2/\text{g})$ são os coeficientes de atenuação em massa para os materiais apresentados, respectivamente, nas energias de 57 KeV e 29 KeV.

Para os dados apresentados na tabela 3 utilizou-se no cálculo dos coeficientes de atenuação em massa os valores de $\rho_{g_{s1}} = (1,15 \pm 0,02) \text{ g/cm}^3$ e $\rho_{ag} = 1,00 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, para a densidade global do solo seco e da água.

Na tabela 3 a diferença entre os valores do coeficiente de atenuação em massa para a água, determinados pelo sistema e os tabelados (Hide & Brownell, 1982) estão em cerca de 3% para a energia de 57 KeV e em torno de 4% para a energia de 29 KeV. A razão destas diferenças pode estar no fato de que os valores tabelados são obtidos para feixes monocromáticos de radiação ao passo que em nossas medidas estamos utilizando feixes de radiação com energias em torno dos valores de pico obtidos através da filtragem dos Raios X.

A partir dos valores dos coeficientes de atenuação em massa para a água e para o solo analisado passa-se à determinação das equações de calibração do sistema tomográfico de acordo com o que foi visto na seção 3.3 e na equação 2.26.

Substituindo os valores da tabela 3 nas calibrações do sistema tomográfico foram obtidas as seguintes equações:

$$\begin{cases} UT_1 - 34 = 940 \times (0,45 \rho_{s1} + 0,221 \theta) \\ UT_2 - 100 = 950 \times (1,10 \rho_{s1} + 0,337 \theta) \end{cases} \quad (S.4.3)$$

O sistema de equações lineares S.4.3 fornece como solução, pixel a pixel, o valor da umidade θ e da densidade global ρ_{s1} do solo, medidos simultaneamente.

Para que fossem testadas as calibrações encontradas, foram feitas determinações de valores de densidade global e também de umidade, para os planos tomográficos das amostras de solo seco e

também das amostras de água utilizadas para a calibração do sistema.

Para um plano onde foi realizada a tomografia na amostra de água, os valores a serem obtidos seriam $\theta = 1,0 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$ e $\rho_{s1} = 0(\text{g/cm}^3)$ a partir das definições destes parâmetros para uma amostra composta exclusivamente de água.

As matrizes das determinações da densidade global de solo e da umidade da amostra estão apresentadas nas tabelas 4 e 5:

Tabela 4: Determinações do valor de ρ_{s1} no plano "tomográfico" de uma das amostras de água utilizada na calibração do sistema										
-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.10	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12
-0.12	-0.12	-0.12	0.10	0.23	0.17	-0.01	-0.15	-0.16	-0.12	-0.12
-0.12	-0.02	0.19	0.40	0.35	0.35	0.46	0.33	-0.11	-0.14	-0.12
-0.12	-0.02	0.32	0.05	0.02	0.01	0.01	0.07	0.45	-0.14	-0.12
-0.12	0.01	0.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.75	-0.03	-0.12
-0.13	0.05	0.59	0.00	0.01	0.00	0.01	-0.01	0.84	0.07	-0.13
-0.12	-0.04	0.74	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.07	-0.07	-0.12
-0.12	-0.12	0.55	0.10	0.02	-0.00	0.01	0.11	0.67	-0.12	-0.12
-0.12	-0.12	-0.11	0.61	0.95	0.87	0.96	0.68	-0.16	-0.15	-0.12
-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.05	0.13	0.02	-0.13	-0.14	-0.12	-0.12
-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.13	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12

Tabela 5: Determinações do valor de θ para o plano tomográfico da mesma amostra de água.										
0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.22	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
0.08	0.08	0.14	0.19	0.22	0.28	0.32	0.30	0.22	0.08	0.08
0.08	0.08	0.22	0.32	0.53	0.54	0.39	0.25	0.22	0.17	0.08
0.08	0.23	0.34	0.93	0.97	0.99	0.98	0.91	0.06	0.17	0.08
0.08	0.25	0.31	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98	0.02	0.11	0.08
0.20	0.18	0.25	0.99	0.98	1.00	0.98	1.00	0.09	0.05	0.12
0.08	0.14	0.01	0.98	0.98	0.98	0.99	0.98	0.49	0.13	0.08
0.08	0.08	0.13	0.87	0.97	1.00	0.97	0.84	0.34	0.08	0.08
0.08	0.13	0.10	-0.21	-0.30	-0.17	-0.36	-0.32	0.24	0.19	0.08
0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	-0.06	0.03	0.10	0.16	0.08	0.08
0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.19	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

IFSC

SERVIÇO DE BIBLIOTECA E
INFORMAÇÃO

A média dos 25 pontos em negrito na matriz de densidade global ρ_{s1} para a amostra de água produziram o valor de $\bar{\rho}_{s1} = (0,02 \pm 0,03) \text{ g/cm}^3$.

Na matriz de umidade, a média para os 25 pontos tomados nas mesmas posições tiveram o valor $\bar{\theta} = (0,97 \pm 0,04) (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$.

Foram realizadas as mesmas determinações para as três tomografias utilizadas para a calibração do sistema, capítulo 3 seção 3.3, e os resultados obtidos foram:

Tabela 6: Determinações dos valores de $\bar{\rho}_{s1}$ e $\bar{\theta}$ para os planos "tomográficos" das 3 tomografias de água utilizadas na calibração do sistema	
$\theta(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\rho_{s1}(\text{g/cm}^3)$
(0,96 ± 0,05)	(0,01 ± 0,03)
(0,97 ± 0,04)	(0,02 ± 0,03)
(0,98 ± 0,05)	(0,02 ± 0,02)

O valor da média e o desvio associado a estas três repetições forneceu o intervalo $(0,02 \pm 0,03)(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ para $\bar{\rho}_{s1}$ e o intervalo de $(0,97 \pm 0,05) (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ para $\bar{\theta}$.

Novamente a partir das definições de ρ_{s1} e θ , para a amostra de solo expansivo seco os resultados a serem obtidos nesta verificação seriam valores de densidade global próximos do valor $\rho_{s1} = (1,15 \pm 0,02)(\text{g/cm}^3)$, que é a densidade global média para este tipo de solo medida gravimetricamente. Para a umidade valores próximos de $\theta = 0 (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$, pois trata-se de uma amostra de solo seco.

Os resultados obtidos através desta verificação estão apresentados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7: Determinações da densidade global ρ_{sl} de um plano "tomográfico" de uma das 3 amostras de solo seco utilizado na calibração do sistema.										
-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	0.06	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12
-0.12	-0.12	-0.06	0.65	0.90	0.72	0.27	-0.09	-0.10	-0.12	-0.12
-0.12	0.13	1.06	1.47	1.49	1.55	1.62	0.99	-0.14	-0.12	-0.12
-0.12	0.55	1.34	1.18	1.15	1.14	1.16	1.21	0.94	-0.12	-0.12
-0.12	0.65	1.52	1.14	1.12	1.12	1.14	1.18	1.46	-0.12	-0.12
0.03	0.55	1.65	1.14	1.12	1.11	1.13	1.20	1.25	-0.00	-0.12
-0.12	0.24	1.71	1.16	1.14	1.14	1.17	1.21	0.71	-0.09	-0.12
-0.12	-0.04	1.14	1.23	1.18	1.20	1.21	1.10	0.12	-0.12	-0.12
-0.12	-0.06	-0.07	0.98	1.43	1.11	0.54	0.19	0.09	-0.01	-0.12
-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	0.02	0.05	0.02	-0.00	-0.12	-0.12
-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12

Tabela 8: Determinações do valor de umidade θ de um plano "tomográfico" da mesma amostra de solo seco.										
0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	-0.05	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
0.08	0.08	0.14	-0.42	-0.48	-0.28	0.04	0.23	0.14	0.08	0.08
0.08	-0.08	-0.66	-0.93	-0.78	-0.77	-0.92	-0.57	0.19	0.08	0.08
0.08	-0.18	-0.76	-0.04	0.02	0.05	0.00	-0.10	-0.68	0.08	0.08
0.08	-0.06	-0.83	0.03	0.08	0.09	0.06	-0.05	-1.02	0.16	0.08
0.02	0.04	-0.96	0.03	0.08	0.09	0.09	-0.04	-0.69	0.04	0.08
0.08	0.15	-1.09	0.01	0.05	0.04	0.01	-0.09	-0.13	0.11	0.08
0.08	0.19	-0.75	-0.11	-0.05	0.07	-0.10	0.02	0.28	0.08	0.08
0.08	0.07	0.10	-0.73	-1.03	-0.53	0.08	0.21	-0.11	-0.04	0.08
0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.03	-0.03	-0.09	-0.03	0.08	0.08
0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

O cálculo da média dos 25 pontos em negrito na matriz de densidade global para o solo seco, tabela 7, produziram o valor

de $\bar{\rho}_{sl} = (1,16 \pm 0,04) \text{ g/cm}^3$. Na matriz de unidade, tabela 8, o cálculo da média para os 25 pontos tomados nas mesmas posições que os da tabela anterior forneceu o valor médio para a unidade $\bar{\theta} = (0,00 \pm 0,06) (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$.

Tabela 9 : Determinações de $\bar{\rho}_{sl}$ e $\bar{\theta}$ para os planos "tomográficos" das 3 tomografias de solo utilizadas na calibração do sistema	
$\rho_{sl}(\text{g/cm}^3)$	$\theta(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$
$(1,16 \pm 0,04)$	$(0,00 \pm 0,06)$
$(1,18 \pm 0,04)$	$(-0,03 \pm 0,04)$
$(1,14 \pm 0,05)$	$(0,04 \pm 0,03)$

O cálculo da média para estas três repetições forneceu o intervalo $(1,16 \pm 0,04)(\text{g/cm}^3)$ para $\bar{\rho}_{sl}$ e o intervalo $(0,00 \pm 0,04) (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ para $\bar{\theta}$.

Pôde-se verificar que apesar da variabilidade das determinações da densidade e da umidade pixel a pixel, em média, os valores determinados pela calibração estão de acordo com os erros experimentais dados pelo método gravimétrico.

Vê-se também que houve uma maior flutuação nas determinações obtidas para o solo. Em Phogat et al, 1991, onde as determinações de densidade e umidade foram obtidas por tomografias de dupla energia não simultâneas, este fato é apontado como reflexo da maior diminuição da quantidade de fótons transmitidos. Ou seja, aumento da atenuação, por parte do solo em comparação com a água e também devido ao fato da água ser um meio mais homogêneo que o solo. Portanto, as determinações da densidade global e umidade das amostras de solo refletiram este fato.

Como resultados da calibração do sistema, os pixels nos quais em ambas as tomografias as unidades tomográficas tem o valor zero (pontos relativos ao ar que circunda a amostra) são obtidos os valores $0,08\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ e $-0,12\text{ g}/\text{cm}^3$, respectivamente, nas matrizes de umidades e densidades.

O comportamento físico do solo expansivo em função do grau de hidratação foi obtido através da análise das imagens "tomográficas" obtidas de amostras em 4 condições distintas de umidade. Os resultados destas determinações estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10: Resultados experimentais para o solo expansivo					
$\theta_{det} \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_{tomo} \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$	$\rho_i \text{ (g/cm}^3)$	$V_i \text{ (cm}^3)$	V_i/V_o	número de repetições
0	$(0,00 \pm 0,04)$	$(1,16 \pm 0,02)$	14,91	0,99	3
$(0,29 \pm 0,01)$	$(0,33 \pm 0,05)$	$(1,09 \pm 0,03)$	15,90	1,06	1
$(0,38 \pm 0,02)$	$(0,39 \pm 0,06)$	$(1,06 \pm 0,03)$	16,32	1,09	1
$(0,52 \pm 0,04)$	$(0,54 \pm 0,04)$	$(1,04 \pm 0,01)$	16,64	1,12	4

onde;

θ_{det} é a umidade determinada através da adição de uma certa quantidade de água na amostra de solo, dada pela equação 2.7 da seção 2.1.4

θ_{tomo} e ρ_i são, respectivamente, a média dos valores da umidade e da densidade global num plano da amostra, obtidas através das tomografias tomadas nos 25 pontos do interior de cada uma delas. No caso das amostras com 0 e $(0,52 \pm 0,04)\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de umidade, o valor tabelado foi encontrado a partir do cálculo da média dos valores encontrados nas repetições das medidas;

ρ_i é a densidade adquirida pelo solo na condição de umidade θ_{tomo} e

V_i é o volume adquirido pelo solo após o umidecimento e é calculado a partir do valor de ρ_i obtido das tomografias. Isto é, utilizando-se a definição de ρ_i , equação 2.4, calcula-se $V_i = 17,3/\rho_i$, onde 17,3g é a massa de solo seco que foi acondicionada em cada recipiente.

Por exemplo, comparando-se os volumes da amostra seca e da amostra com umidade igual a $(0,52 \pm 0,04) \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$ verificou-se uma expansão de 12% no volume da amostra.

As determinações da umidade para este solo tiveram como pior resultado a condição de umidade determinada θ_{det} igual a $(0,29 \pm 0,01) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Este fato foi devido a grande dificuldade que houve na homogenização da distribuição de água neste tipo de amostra.

Outro fato que deve ser salientado foi que não conseguiu-se a preparação de amostras em condições de umidade abaixo de $(0,29 \pm 0,01) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ exatamente pela dificuldade apontada anteriormente.

Portanto, aponta-se a heterogeneidade da distribuição da água como causa provável do pior resultado para amostra com umidade igual a $(0,29 \pm 0,01) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Ou seja, ocorreu uma perda de sensibilidade nas determinações de umidade para amostras em condições de baixa umidade devido à falta de homogeneidade na distribuição da água do interior destas amostras.

No gráfico, apresentado na figura 28, são mostrados os valores médios de umidade θ_{tomo} , obtidos através das tomografias, em função dos valores de umidade θ_{det} ,

determinadas gravimetricamente através da utilização da equação 2.7.

Fig.28) Correlação entre as determinações de umidade para o solo expansivo

Os valores do coeficiente de determinação r^2 e também da regressão linear para os valores de umidade na amostra são apresentados a seguir:

$$\theta_{\text{tomo}} = (1,03 \pm 0,05) \theta_{\text{det}} + (0,01 \pm 0,02) \text{ e } r^2 = 0,996 \quad \text{Eq. (4.4)}$$

O valor do coeficiente de determinação " r^2 " próximo de 1 demonstra que a reta está bem ajustada aos pontos experimentalmente obtidos.

O coeficiente angular da reta se aproximou bastante da unidade mostrando que sistema permitiu medir adequadamente a umidade da amostra.

Fig.29) Variação relativa do volume da amostra com a quantidade de água, mostrando uma dependência quadrática entre os dois parâmetros

Na figura 29 mostra-se a variação relativa do volume da amostra, representado por V_i/V_o , como função da umidade determinada pelas tomografias θ_{tomo} . Este resultado permitiu observar um comportamento não linear entre estes parâmetros,

característica esperada para solos expansivos, tais como o utilizado neste trabalho (Fox, 1963; Ferraz, 1974).

Os pontos experimentais foram interpolados por um polinômio de segundo grau em θ através do método dos mínimos quadrados (Ferraz, 1974).

O polinômio de interpolação obtido mostra que a dependência entre a umidade θ e a variação relativa do volume da amostra V_i/V_o é dada por.

$$\frac{V_i}{V_o} = 0,989 + 0,234 \theta + 0,0173 \theta^2 \text{ e } r^2 = 0,980$$

Eq. (4.5)

Para um solo de características não expansivas foi feito o mesmo tipo de determinação, ou seja, foi obtido o comportamento da densidade global da amostra em relação ao seu grau de umidade. Os dados referentes à esta determinação estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11: Determinações de densidade e umidade para o solo não expansivo			
$\theta_{det} (cm^3/cm^3)$	$\theta_{tomo} (cm^3/cm^3)$	$\rho_{stomo} (g/cm^3)$	número de repetições
0	(0,01±0,02)	(1,28±0,02)	3
(0,09±0,01)	(0,10±0,02)	(1,30±0,06)	1
(0,150±0,008)	(0,14±0,02)	(1,24±0,05)	1
(0,28±0,04)	(0,30±0,03)	(1,30±0,04)	3

onde θ_{det} é a umidade volumétrica determinada por gravimetria, θ_{tomo} é a umidade volumétrica calculada a partir das

tomografias e $\rho_{s_{\text{tomo}}}$ é a densidade global calculada a partir das tomografias.

Os dados de correlação entre as determinações para as medidas de umidade da amostra apresentadas na tabela 11 estão apresentados na figura 30.

Fig.30) Correlação entre as umidades obtidas por tomografia e gravimetria para o solo não expansivo

O coeficiente de determinação e a regressão linear são mostrados a seguir:

$$\theta_{\text{tomo}} = (1,04 \pm 0,07)\theta_{\text{det}} + (0,00 \pm 0,01) \text{ e } r^2 = 0,989 \quad \text{Eq. (4.6)}$$

Pode-se ver que as determinações de umidade através das tomografias para este solo também estão em boa concordância com os dados obtidos gravimetricamente.

O valor encontrado para a densidade global deste solo teve o valor $\rho_{\text{det}} = (1,28 \pm 0,03) \text{ g/cm}^3$ e a média das determinações obtidas via tomografia, realizadas nos 4 diferentes graus de hidratação, forneceu o valor $\bar{\rho}_{\text{tomo}} = (1,28 \pm 0,03) \text{ g/cm}^3$, o mesmo que o valor determinado gravimetricamente.

A tomografia, em estudos de solos não expansivos (Aylmore, 1993), mostrou que em determinações da densidade média de solos não expansivos, cujas densidades estavam na faixa de 1,2 até 1,6 g/cm^3 , normalmente foram obtidos desvios da ordem de 0,02 até 0,07 g/cm^3 em relação aos valores determinados por análises de gravimetria.

Os resultados aqui obtidos mostraram que os desvios na determinação da densidade média do tipo de solo utilizado, cuja densidade determinada por gravimetria foi de $(1,28 \pm 0,03) \text{ g/cm}^3$, ficaram em torno de 0,02 g/cm^3 para as determinações médias obtidas.

Comparativamente, os desvios nas determinações médias da umidade para o solo não-expansivo foram maiores que os obtidos para o solo expansivo. Ferraz, 1974, obteve nas determinações simultâneas da densidade e umidade por medidas de transmissão direta de duplo feixe, imprecisões da ordem de 10% na determinação de umidade. Desvios maiores foram observados, no caso dos solos que possuíam coeficiente de atenuação mais próximos do da água e também para amostras em condições de umidades mais baixas (Ferraz, 1974).

Para os dois picos de energia utilizados no experimento, os coeficientes de atenuação do solo não-expansivo ficaram menos diferenciados em relação aos coeficientes de atenuação para a água quando em comparação com o solo expansivo. Este fato pode ter determinado os maiores desvios obtidos na investigação da umidade para os solos não-expansivos.

O comportamento das medidas apresentadas na figura 31 demonstram que os valores da densidade global do solo não expansivo oscilam em torno de $\rho_s = (1,28 \pm 0,03) \text{ g/cm}^3$, o valor médio da densidade global para o solo analisado.

Correlação entre as determinações obtidas por tomografia para a densidade dos solos expansivo e não expansivo

Fig.31) Comportamento das determinações de densidade via tomografia para o solo não-expansivo e para o solo expansivo para duas situações diferentes de densidade global iniciais.

A figura 31 mostra o comportamento das medidas da densidade global para os dois solos analisados em torno do valor médio das determinações apresentadas. Para o solo não-expansivo o valor para a média destas determinações foi de $(1,28 \pm 0,03) \text{ g/cm}^3$ e para o solo expansivo foi de $(1,09 \pm 0,05) \text{ g/cm}^3$.

Pôde-se observar que as variações ocorridas nas determinações da densidade global das amostras de solo não-expansivo tiveram menor amplitude em relação ao valor médio e não reproduziram o comportamento verificado para o solo expansivo. Ao contrário, observou-se que para o solo não-expansivo as determinações oscilaram em torno do valor médio encontrado para as determinações realizadas.

Na tabela 12 são mostrados os resultados de expansividade obtidos pelo método da proveta graduada descrito na seção 3.4, do capítulo 3 e através das tomografias, visando-se realizar uma comparação entre eles.

Tabela 12: Comparação entre as medidas de umidade à base de volume e densidade pelo método da proveta graduada e pela tomografia			
$\theta(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ (proveta)	$\theta(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ (tomografia)	$\rho(\text{g/cm}^3)$ (proveta)	$\rho(\text{g/cm}^3)$ (tomografia)
$(0,56 \pm 0,02)$	$(0,55 \pm 0,04)$	$(1,03 \pm 0,02)$	$(1,03 \pm 0,03)$
$(0,51 \pm 0,02)$	$(0,50 \pm 0,04)$	$(1,02 \pm 0,02)$	$(1,05 \pm 0,03)$
$(0,52 \pm 0,03)$	$(0,54 \pm 0,04)$	$(1,02 \pm 0,01)$	$(1,04 \pm 0,02)$
-	$(0,57 \pm 0,04)$	-	$(1,05 \pm 0,03)$
$(0,38 \pm 0,01)$	$(0,39 \pm 0,06)$	$(1,065 \pm 0,008)$	$(1,06 \pm 0,03)$

A média obtida para as 3 medidas de umidade e densidade para a amostra saturada no experimento da proveta graduada foram, respectivamente:

$$\bar{\theta} = (0,53 \pm 0,03) \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \text{ e } \bar{\rho} = (1,023 \pm 0,006) \text{ g/cm}^3 \quad \text{Eq. (4.7)}$$

O valor da média das 4 medidas de umidade e densidade referentes às tomografias para a amostra saturada foram;

$$\bar{\theta} = (0,54 \pm 0,03) \text{ cm}^3/\text{cm}^3 \text{ e } \bar{\rho} = (1,04 \pm 0,01) \text{ g/cm}^3 \quad \text{Eq. (4.8)}$$

Na comparação entre os dois métodos vemos que para a amostra saturada a diferença percentual entre as médias das determinações para a densidade global seca e umidade volumétrica ficaram em torno de 2%.

Na amostra com $\bar{\theta} = (0,38 \pm 0,01) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ a diferença entre os valores determinados nas duas formas tiveram um desvio percentual de aproximadamente 3%. No caso das determinações da densidade este desvio ficou em torno de 1%.

Portanto, a partir desta análise, vê-se que as determinações de densidade e umidade pelo método tomográfico conduzem a resultados médios que diferem em torno de 2% dos resultados obtidos através do método da proveta graduada.

O modelo das três retas, enunciado no capítulo 2, seção 2.1.6 foi empregado para analisar a expansão de amostras estruturadas do mesmo solo utilizado nas tomografias.

O procedimento de determinação da densidade da amostra estruturada de solo foi descrito na seção 3.5, do capítulo 3.

Os resultados obtidos, mostrados na tabela 13, permitiram a identificação das três etapas descritas pelo modelo.

Tabela 13: Resultados da expansão de amostras estruturadas do solo utilizado nos experimentos de tomografia		
θ_g (g/g)	ρ_g (g/cm ³)	v (cm ³ /g)
(0,386 ± 0,002)	(1,28 ± 0,04)	(0,78 ± 0,02)
(0,271 ± 0,003)	(1,30 ± 0,04)	(0,77 ± 0,02)
(0,205 ± 0,002)	(1,41 ± 0,04)	(0,71 ± 0,02)
(0,166 ± 0,002)	(1,49 ± 0,04)	(0,67 ± 0,02)
(0,134 ± 0,002)	(1,51 ± 0,05)	(0,66 ± 0,02)
(0,108 ± 0,002)	(1,64 ± 0,05)	(0,61 ± 0,02)
(0,037 ± 0,002)	(1,68 ± 0,04)	(0,59 ± 0,01)
(0,019 ± 0,002)	(1,65 ± 0,05)	(0,60 ± 0,02)
(0,002 ± 0,002)	(1,68 ± 0,04)	(0,59 ± 0,01)

onde:

θ_g é a umidade à base de peso, ρ_g é a densidade global da amostra e v é o volume específico da amostra, calculado a partir de ρ_g através da equação 2.10.

Os resultados obtidos foram interpolados pelas equações 2.13.1, 2.14.1 e 2.15.1 apresentadas na seção 2.1.6 que descreve o modelo e são mostrados na figura 32.

Interpolação dos dados de expansão do solo estruturado através do modelo das três retas

Fig. 32) Análise da expansão do solo estruturado através do modelo das três retas

As equações 2.13.1 e 2.15.1 foram utilizadas para que se determinasse o valor de θ_A , o ponto de entrada de ar na amostra analisada.

Obteve-se para o ponto de entrada de ar, θ_{gA} , o seguinte valor: $\theta_{gA} = 0,103$ (g/g) que corresponde a uma umidade volumétrica θ igual a $(0,18 \pm 0,05) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Calheiros et al, 1991 encontrou para a análise deste tipo de solo um valor de 0,18 cm^3/cm^3 , que concorda com o dados aqui obtidos.

Para o intervalo de umidades entre $(0,108 \pm 0,002)$ e $(0,271 \pm 0,003)(g/g)$ obteve-se o valor $(0,95 \pm 0,08)(cm^3/g)$ para $dv/d\theta_g$. De acordo com o modelo, esta etapa da expansão do solo foi caracterizada como normal.

A expansividade do solo utilizado no experimento de tomografia também foi analisada pelo modelo das três retas e é apresentada em seguida.

O valor da densidade global determinado gravimetricamente para a amostra produziu o valor de ρ_{gs1} igual a $(1,15 \pm 0,02) g/cm^3$.

O modelo assume que para as etapas residual e estrutural a quantidade de ar presente na amostra é uma função da umidade presente na amostra, isto é, $V_{ar} = V_{ar}(\theta_g)$.

Utilizando-se as equações 2.3 e 2.2 para o solo seco ($V_{ag} = 0cm^3$), obteve-se a equação 4.9 que foi utilizada para encontrar o volume inicial de ar do interior da amostra:

$$V_{ar}(0) = V_t(0) - V_s = V_o - \left(\frac{m_s}{\rho_p}\right) \quad \text{Eq. (4.9)}$$

onde:

V_o é o volume total inicial da amostra seca. No caso do experimento $V_o = 15cm^3$;

$m_s = 17,3g$ é a massa da amostra seca, que coincide com o valor da massa de sólidos e

ρ_p é a densidade de partículas, cujo valor foi admitido como sendo $2,65g/cm^3$ de acordo com o que foi visto na seção 2.1.2.

A substituição destes valores na equação 4.9, forneceu como resultado para o volume inicial de ar na amostra seca o valor $V_{ar}(0) = 8,5\text{cm}^3$ que aqui denominou-se de resultado R.1.

Com base nos resultados experimentais apresentados na tabela 10 pôde-se construir a tabela 14, apresentada a seguir:

Tabela 14: Valores experimentais de θ_g e v_i obtidos a partir dos dados da tabela 10 para o solo expansivo utilizado no experimento			
ρ_i (g/cm ³)	θ (cm ³ /cm ³)	θ_g (g/g)	v_i (cm ³ /g)
(1,16±0,02)	(0,00 ± 0,04)	(0,00±0,04)	(0,86 ± 0,02)
(1,09±0,03)	(0,33 ± 0,05)	(0,30±0,05)	(0,92 ± 0,03)
(1,06±0,03)	(0,39 ± 0,06)	(0,37±0,07)	(0,94 ± 0,03)
(1,04±0,01)	(0,54 ± 0,04)	(0,52±0,04)	(0,962 ± 0,009)

onde:

ρ_i e θ são, respectivamente, a densidade global do solo e a umidade volumétrica, determinadas através das tomografias;

θ_g é a umidade à base de peso calculada a partir da equação 2.9 utilizando-se os valores de ρ_i e θ e

v_i é o volume específico da amostra calculado a partir do valor de ρ_i através da utilização da equação 2.10.

Através da análise dos valores de v_i apresentados na tabela 14 pôde-se ver que em todo o intervalo de umidades investigado $0 < dv/d\theta_g < 1$. Portanto o modelo das três retas indicou que nesta situação a amostra apenas sofreu expansões estruturais ou residuais.

De acordo com o modelo, para estas condições de expansão a fase gasosa da amostra decresce linearmente com a entrada de água em seu interior, fato que matematicamente pode ser descrito através da equação 4.10:

$$V_{ar}(V_{ag}) = V_{ar}(0) - (\varepsilon \times V_{ag}) \quad \text{Eq. (4.10)}$$

onde: ε é a constante que determina a taxa de troca entre as fases gasosa e líquida. Para $\varepsilon = 1$ a entrada de um volume V de água é acompanhada pela saída do mesmo volume V de ar da amostra.

Com a substituição do resultado R.1 e da equação 2.9 (supondo a densidade da água com valor de 1g/cm^3) na equação 4.10 obteve-se a equação 4.11, que descreve a variação da etapa gasosa do interior da amostra de acordo com a umidade da amostra:

$$V_{ar}(\theta_g) = 8,5 - (\varepsilon \times m_s \times \theta_g) \quad \text{Eq. (4.11)}$$

A substituição da equação 4.11 na equação 2.11 gerou a equação 4.12 que foi utilizada para descrever a expansão do solo utilizado no experimento. Isto é, a equação 4.12 reuniu todas as informações a respeito do solo e da situação na qual o experimento foi realizado e portanto descreve a expansão em termos destes parâmetros:

$$v(\theta_g) = \frac{8,5}{17,3} - (\varepsilon \times \theta_g) + \frac{1}{2,65} + \theta_g \quad \text{Eq. (4.12)}$$

onde: $(8,5/17,3) - (\varepsilon \times \theta_g)$ é a quantidade V_a da equação 2.11 e representa o quociente entre o volume de ar da amostra V_{ar} e a massa de sólidos m_s desta amostra;

θ_g é a umidade à base de peso definida pela equação 2.9;

$(1/2,65)$ é o inverso da densidade de partículas para este solo ou o volume específico da parte sólida, representado por v_s e ε é o parâmetro a ser ajustado.

O parâmetro ε mostra como ocorreu o processo de trocas entre a fase gasosa e a fase líquida na amostra. A figura 33 mostra os resultados produzidos pela equação 4.12 para alguns valores de ε em relação aos pontos experimentais obtidos através das tomografias.

Fig.33) Interpolação dos dados de tomografia através do modelo das três retas.

O valor de $\varepsilon = 0,82$ é o que melhor ajusta o modelo aos pontos experimentais obtidos.

Este valor de ε mostrou que nas amostras desestruturadas existe uma boa troca das fases gasosa e líquida em todo o intervalo de umidades analisado.

Para $\varepsilon = 0,82$ a equação de interpolação, que descreve a expansão do solo utilizado, e o coeficiente de determinação r^2 para esta interpolação são apresentados a seguir:

$$v = 0,8687 + 0,18\theta_g \text{ e } r^2 = 0,877 \quad \text{Eq. (4.13)}$$

A partir da equação 4.12 determinou-se o volume total da amostra $V_t(\theta_g)$.

Fig.34) Comportamento do volume total da amostra. São mostradas as contribuições ao volume total das três fases que compõem o solo.

Como mostra a figura 34, o volume total da amostra $V_t(\theta_g)$ foi dividido no volume das fases gasosa, líquida e sólida, representadas respectivamente, por V_{ar} , V_{ag} e V_s conforme descrito no modelo das três retas, capítulo 2, seção 2.1.6.

O volume de água na amostra foi calculado através da equação 2.9 que define θ_g .

O volume de ar na amostra foi obtido através da diferença entre $V_t(\theta_g)$ e a reta 1:1 para o comportamento dos volumes das fases líquida e sólida, isto é, $V_{ag}(\theta_g) + V_s(\theta_g)$.

Na análise dos dados obtidos no experimento com as amostras desestruturadas de solo expansivo, verificou-se que a etapa normal de expansão prevista pelo modelo das três retas não foi observada.

Entretanto como resultado da aplicação do modelo, observou-se que a desestruturação imposta à amostra provocou uma maior capacidade no processo de troca das fases gasosa e líquida no umidecimento. Esta conclusão foi tirada com base no valor encontrado para ε , um valor próximo de 1.

Foram calculadas os valores do parâmetro " ε " para a amostra estruturada de solo expansivo, para as três etapas de contração apresentadas pela amostra. Os resultados obtidos estão apresentados no apêndice 5.

Já a expansão da amostra estruturada de solo foi reproduzida através do modelo das três retas e para este experimento puderam ser observadas as três fases em que se divide a expansão, em particular ficou bem caracterizada a etapa normal de expansão da amostra e foi determinado o parâmetro θ_A , o ponto de entrada de ar na amostra. O valor aqui determinado foi o mesmo que o encontrado por Calheiros et al, um valor igual a $(0,18 \pm 0,05) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos futuros

As principais contribuições e conclusões obtidas assim como as sugestões de trabalhos futuros surgidas da realização deste trabalho estão descritas a seguir.

Como principais contribuições que a realização deste trabalho propiciou podem ser citadas.

_ Projeto, desenvolvimento e adaptações de um tomógrafo previamente existente (Cruvinel et al, 1990), tornando-o capaz de realizar tomografias simultâneas de dupla energia de amostras porosas expansivas e não expansivas;

_ Apresentação de um novo método capaz de utilizar a tomografia de dupla energia para medir simultaneamente a densidade global e o conteúdo de água em amostras porosas e expansivas. Também ficou caracterizada a sensibilidade do método para a medida simultânea destes parâmetros físicos e

_ Caracterização da expansividade de um material poroso, no caso um solo com argila expansiva, em função dos seus diferentes graus de hidratação, inclusive utilizando o modelo das "três retas" e comparação com um solo não-expansivo.

Mais detalhadamente pode-se destacar que:

- 1) A confecção de filtros de estanho possibilitou a modificação do espectro de Bremsstrahlung da fonte de Raios X utilizada de modo a produzir dois picos distintos em energia, requisito básico ao método aqui proposto (P.51, tabela 1 e apêndice 3);
- 2) Foram obtidas calibrações relacionando as unidades tomográficas com os coeficientes de atenuação para os materiais investigados nas duas energias obtidas pela filtragem através dos filtros de estanho. Estas calibrações permitiram a realização de determinações simultâneas da densidade e da umidade, pixel a pixel, para os solos investigados (p.66 e 67, figs.26 e 27 e Eq.4.1 e 4.2);
- 3) As medidas realizadas mostraram que através da utilização do sistema determinou-se o coeficiente de atenuação em massa da água com desvios da ordem de 4% em relação aos valores tabelados (p.68 e tabela 3);
- 4) A filtragem das imagens tomográficas fez com que as flutuações associadas às imagens fossem minimizadas. Isto fez com que os desvios associados às determinações médias obtidas ficassem comparáveis aos do método gravimétrico. Vale salientar que a filtragem foi utilizada somente para que as flutuações fossem minimizadas, não alterando os valores médios obtidos para as determinações sem a utilização da filtragem (p.71 e 73, tabelas 6 e 9);
- 5) Nas determinações realizadas observou-se uma maior diminuição da relação sinal ruído para o pico de fótons de menor energia. Isto ocorreu devido ao aumento do coeficiente de

atenuação linear dos materiais para estes fótons, provocando uma diminuição da quantidade de fótons transmitidos através da amostra. Esta diminuição associada à natureza estatística da produção de radiação fizeram com que se aumentasse o ruído na imagem obtida(tabela 2 da p.65);

6) Observou-se que as determinações de ρ_{s1} e θ , pixel a pixel, ficaram mais próximas do valor esperado para as amostras de água em relação às amostras de solo. Este fato foi apontado como sendo causado pela maior homogeneidade da amostra composta exclusivamente por água e também porque entre estes a água tem menor coeficiente de atenuação (tabelas 4, 5 da p.70 e tabelas 7 e 8 da p.72);

7) A análise das regressões obtidas mostrou que o método de tomografia de dupla energia simultânea mediu adequadamente a umidade média das amostras de solo expansivo (Fig.28 e Eq.4.4, p.76);

8) Para o solo não-expansivo o método também foi eficaz na determinação da umidade e densidade. Em comparação com o solo expansivo, os resultados das determinações de umidade para o solo não-expansivo foram as que produziram maior desvio em relação aos valores determinados por gravimetria. Isto foi atribuído ao fato do solo não-expansivo ter o coeficiente de atenuação mais próximo ao da água (p.79, Fig.30 e p.80, Eq. 4.6);

9) As determinações de densidade e umidade para o solo expansivo mostram-se em concordância com os resultados obtidos

gravimetricamente e através do "método da proveta graduada" (p.82, tabela 12);

10) A expansão da amostra estruturada de solo expansivo foi descrita através do modelo das três retas. Para este estudo as três etapas da expansão previstas pelo modelo puderam ser caracterizadas e equacionadas. Em particular, a etapa normal de expansão ficou muito bem definida assim como o ponto de entrada de ar, que determina a transição entre as etapas normal e residual, foi encontrado (p.84, tabela 13; p.85 Fig. 32);

11) A análise da expansão das amostras desestruturadas de solo através do modelo das três retas, mostrou que a etapa normal não ficou caracterizada. Através da interpolação dos dados pelo modelo ficou caracterizado que em todo o intervalo de umidades investigado a amostra apresentou a denominada fase estrutural de expansão. Pôde-se observar uma boa capacidade de troca entre as fases líquida e gasosa da amostra através da análise do valor e significado da constante ε (p.89, Fig.33 e p.90 Fig. 34);

12) Foram realizadas modificações instrumentais para investigar a possibilidade de realização de tomografias de dupla energia simultânea utilizando as fontes radioativas do Césio e Amerício. Foram obtidas calibrações do sistema e foram determinados simultaneamente, pixel a pixel, valores de densidade global e umidade para uma amostra estruturada de solo expansivo (Apêndice 2, Figs.A.2 e A2.3 e Eqs. A2.3 e A2.4);

13) O fato das fontes radioativas produzirem picos com maior energia quando comparados aos obtidos nos experimentos com o aparelho de Raios X, permitiu a realização de tomografias em amostras de maiores diâmetros. Também viabilizou a utilização de colimadores de menor diâmetro de abertura fazendo com que as imagens obtidas fornecessem maior resolução espacial (Apêndice 2, Tabelas A2.2, A2.3, A2.4 e A2.5);

14) As determinações de densidade global e umidade através da tomografia simultânea de dupla energia, utilizando-se as fontes radioativas, produziram intervalos de medida nos quais estavam contidos os valores determinados gravimetricamente (Apêndice 2, Tabela A2.6, p.107).

15) Através dos histogramas de frequência da densidade global e umidade foi possível mostrar a grande heterogeneidade do solo investigado. Além disto, os histogramas mostraram que as várias regiões da amostra sofreram conjuntamente variações nestes parâmetros (Apêndice 2, Fig. A2.4, p.108 e Fig. A2.5, p.109).

A realização deste trabalho motivou-nos a sugerir alguns trabalhos a serem realizados no futuro.

a) Estudar a produção dos filtros de radiação com outros materiais e mesmo misturas de materiais que apresentem características de descontinuidades no coeficiente de atenuação de forma a se obter e quantificar a produção de picos, distintos em energia, a partir dos Raios X. Isto possibilitará, por exemplo, a escolha das energias mais adequadas para o tipo de amostra utilizada;

b) Utilização do tomógrafo de dupla energia simultânea que emprega as fontes radioativas de Césio e Amerício para que se determine a curva de expansividade das amostras estruturadas de solo para que seja comparada àquela obtida através do modelo das três retas.

Apêndice 1

A filtragem das imagens se baseou na proposição de que a partir da imagem original, representada pelo conjunto de pontos $\{X_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) pode-se construir um novo conjunto, de elementos $\{X'_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) gerados a partir da operação de média aritmética entre os pontos do conjunto antigo $\{X_i\}$ e o valor da média $\bar{X}$ associada a este conjunto. Isto é, os elementos do novo conjunto podem ser obtidos a partir da operação $X'_i = (X_i + \bar{X})/2$, onde:

- 1) O valor da média para os pontos $\{X'_i\}$ do novo conjunto não é modificado em relação ao valor médio de $\{X_i\}$ e
- 2) A variância associada a este novo conjunto é quatro vezes menor que a do conjunto original.

O valor da média e da variância para o conjunto $\{X_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) são, respectivamente obtidos por:

Valor da Média

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

Variância

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$$

Para o novo conjunto $\{X'_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) o valor da média e da variância são obtidos por:

Valor da Média

$$\bar{X}' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X'_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i + \bar{X})/2 = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N X_i + \frac{\bar{X}}{2N} \sum_{i=1}^N 1 = \frac{\bar{X}}{2} + \frac{\bar{X}}{2} = \bar{X}$$

Variância

$$\begin{aligned} \sigma_{X'}^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X'_i - \bar{X})^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i}{2} + \frac{\bar{X}}{2} - \bar{X} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i}{2} - \frac{\bar{X}}{2} \right)^2 = \frac{1}{4N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 = \frac{1}{4} \sigma_X^2 \end{aligned}$$

Portanto, vê-se que operação de filtragem, representada pela definição $X'_i = (X_i + \bar{X})/2$, gera um novo conjunto $\{X'_i\}$ no qual se mantém o valor da média assim como a variância é reduzida à quarta parte, ou seja, diminui-se a flutuação associada à imagem filtrada.

Apêndice 2

Tomógrafo de dupla energia simultânea utilizando fontes de Raios Gama provenientes de fontes de ^{137}Cs e ^{241}Am .

No início dos trabalhos desta dissertação foram realizados testes utilizando fontes de raios gama visando obter medidas simultâneas de densidade e umidade de amostras estruturadas de solo expansivo.

Foram obtidas várias medidas alentadoras, no entanto a um nível ainda preliminar, motivo que determinou a introdução destas em forma de apêndice.

A esquematização da disposição das fontes radioativas utilizadas para realizar as medidas está mostrada na figura A2.1.

Fig.A2.1) Arranjo experimental do tomógrafo de dupla energia simultânea, mostrando a disposição das fontes radioativas em relação à amostra 1) Mecanismo de elevação das fontes radioativas e 2) Mecanismo de alinhamento do feixe em relação ao centro da amostra.

As duas fontes empregadas no experimento foram as de ^{137}Cs e ^{241}Am com, respectivamente, 661 KeV, 100 mCi e 60 Kev, 300 mCi.

Os castelos de acomodação das fontes foram acoplados rigidamente, sendo que a radiação emitida pelo Césio atravessou a fonte de Amerício disposta à sua frente, permitindo que as radiações das duas fontes fossem emitidas simultaneamente através de um único colimador. Ou seja, este arranjo permitiu que se fizessem medidas de atenuação, uma em cada energia, no mesmo ponto da amostra e de maneira simultânea.

O castelo de acondicionamento do Césio foi apoiado em uma base sendo o alinhamento do feixe obtido através de dois mecanismos:

- 1) Um que permitiu o posicionamento dos feixes em relação à altura do detector, (número 1, figura A2.1) e
- 2) Outro, com três parafusos ligados à base circular do castelo de Césio, cada qual separado de uma distância angular de 120° (número 2, figura A2.1) que permitiu o alinhamento do feixe em relação ao centro da amostra.

Os suportes da fonte assim como o do detector foram colocados sobre trilhos possibilitando a aproximação destes em relação à amostra.

O cristal cintilador utilizado foi o mesmo descrito no capítulo 3 e o sistema de discriminação e contagem foi ajustado para as energias das fontes radioativas empregadas. A calibração do sistema foi realizada utilizando-se amostras de

água, de solo expansivo e de benzina. Os resultados obtidos estão mostrados na tabela A2.1:

Tabela A2.1: Determinações utilizadas para a calibração do sistema				
Amostra	$\mu_1(\text{cm}^{-1}) \cdot 10^{-2}$	$\mu_2(\text{cm}^{-1}) \cdot 10^{-1}$	UT_1	UT_2
Água	$(8,68 \pm 0,03)$	$(2,14 \pm 0,03)$	(76 ± 5)	(180 ± 5)
Solo expansivo	$(7,90 \pm 0,06)$	$(5,15 \pm 0,05)$	(75 ± 4)	(416 ± 10)
Benzina	$(6,45 \pm 0,05)$	$(1,37 \pm 0,03)$	(57 ± 4)	(125 ± 5)
Água (tabelado)	$(8,62 \pm 0,04)$	$(2,10 \pm 0,03)$	-	-

Onde: $\mu_1(\text{cm}^{-1})$ é o coeficiente de atenuação linear para a energia do Césio calculado sobre 5 repetições de medida;
 $\mu_2(\text{cm}^{-1})$ é o coeficiente de atenuação linear para a energia do Amerício calculado a partir de 5 repetições de medida;
 UT_1 é o valor representativo da unidade tomográfica do material utilizado na calibração para duas repetições de medida, correspondente à energia do Césio;
 UT_2 é o valor representativo da unidade tomográfica do material utilizado na calibração para duas repetições de medida, correspondente à energia do Amerício. O valor tabelado para o coeficiente de atenuação da água para a energia do Césio foi encontrado em Reginato, 1974 e para a energia do Amerício em Ferraz, 1974.

A calibração encontrada para o sistema na energia do Césio está apresentada na equação A2.1 e para a energia do Amerício está apresentada na equação A2.2.

$UT_1 = (1 \pm 5) + (911 \pm 150)\mu_1 \text{ e } r^2 = 0,900$

Eq. (A2.1)

$UT_2 = (-17 \pm 4) + (770 \pm 10)\mu_2 \text{ e } r^2 = 0,999$

Eq. (A2.2)

Nas figuras A2.2 e A2.3 estão apresentadas as calibrações obtidas para as energias do Amerício e do Césio.

Fig.A2.2) Calibração do sistema para a energia do Amerício.

Fig.A2.3) Calibração do sistema para a energia do Césio.

O coeficiente de atenuação linear da amostra de solo foi obtido em termos dos coeficientes de atenuação do solo e da

água através da equação 2.26. O valor da densidade global do solo (utilizou-se o mesmo solo expansivo dos experimentos com o Raio X) foi de $\rho_{gs1} = (1,15 \pm 0,02) \text{g/cm}^3$ e os coeficientes de atenuação linear da água e do solo estão apresentados na tabela A2.1.

Portanto, a partir destas substituições e da resolução do sistema formado pelas equações A2.1 e A2.2, as equações que fornecem, simultaneamente, o valor da densidade global ρ_{s1} e da umidade θ , pixel a pixel, para as tomografias são dadas por A2.3 e A2.4:

$$\rho_{gs1} = [(UT_2 - 17)/216 - (UT_1 + 1)/104] \quad \text{Eq. (A2.3)}$$

e

$$\theta = [(UT_1 + 1)/49 - (UT_2 - 17)/271] \quad \text{Eq. (A2.4)}$$

A dimensão dos colimadores bem como o passo linear utilizados neste experimento foram de 2mm. As amostras empregadas na calibração foram acondicionadas em cilindros de PVC de 1,8 cm de diâmetro interno.

Os pontos do interior da amostra utilizados para a calibração do sistema foram escolhidos por visualização das tomografias obtidas sendo que os pontos imediatamente adjacentes à parede do recipiente não foram considerados nestas determinações.

Para as amostras da calibração, puderam ser escolhidos 81 pontos no interior de cada tomografia. Estes 81 pontos passaram pelo mesmo processo de filtragem que foi descrito no trabalho de tomografia com o Raio X, capítulo 3 e apêndice 1.

Foram realizadas determinações simultâneas de densidade e umidade, pixel a pixel, para uma amostra estruturada do solo

com duas repetições da tomografia para o solo seco, e uma tomografia desta amostra na condição de umidade igual a $(0,180 \pm 0,003) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

As amostras estruturadas estavam acondicionadas em um recipiente cilíndrico de PVC com 4,5cm de diâmetro interno e puderam ser escolhidos (novamente por visualização das tomografias obtidas) 361 pontos no interior da amostra.

A determinação gravimétrica da densidade global para a amostra seca forneceu o valor de $(1,60 \pm 0,04) \text{ g/cm}^3$ e pelo fato do solo ser higroscópico e de ter sido seco ao ar, a umidade volumétrica para a amostra seca foi medida e obteve-se o valor de $(0,004 \pm 0,003) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

As determinações de ρ_{s1} obtidas para a amostra de solo estruturado seco estão mostradas na tabela A2.2. A média destas determinações forneceu o valor de $(1,58 \pm 0,08) \text{ g/cm}^3$ para o valor da densidade global média no plano em que a tomografia foi realizada. A repetição desta medida forneceu para o valor médio das determinações da densidade global $\bar{\rho}_{s1}$ o valor de $(1,64 \pm 0,09) \text{ g/cm}^3$.

A média encontrada para as determinações de umidade da amostra, apresentadas na tabela A2.3, teve o valor de $(0,05 \pm 0,05) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Para a repetição desta tomografia, o valor médio obtido para a umidade da amostra no plano investigado foi igual a $(0,02 \pm 0,06) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Ferraz & Mansell, 1979, apontam que em condições ótimas na realização das determinações de densidade e umidade de amostras de solo por atenuação de feixes de Raios Gama provenientes de fontes de Amerício e Césio, podem ser atingidos desvios da ordem de $0,005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ nas determinações

[illegible]

IFSC — **SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO**

0.03	0.08	-0.03	-0.01	0.05	0.05	0.07	0.09	0.07	0.03	0.09	0.06	0.11	0.01	-0.02	0.03	-0.01	0.08
-0.06	0.08	0.09	0.03	0.08	0.07	0.00	0.01	0.08	0.03	0.06	0.05	0.05	0.03	0.11	0.02	-0.05	0.06
0.04	0.08	0.04	0.07	-0.06	0.06	0.12	0.05	0.14	0.14	0.09	0.03	0.02	0.02	0.04	0.01	0.12	0.03
0.02	0.12	0.09	0.09	0.01	0.02	0.11	0.08	0.12	-0.06	0.04	0.01	0.00	0.03	0.10	0.11	0.08	0.03
0.04	0.03	0.05	0.07	0.12	0.13	0.01	0.06	0.13	0.00	0.03	-0.03	0.02	0.06	0.10	0.12	0.04	0.08
0.06	0.03	0.09	0.09	0.07	0.12	0.03	0.02	0.12	0.08	0.01	0.06	0.00	0.04	0.12	0.12	0.07	-0.01
0.11	0.07	0.11	0.14	0.04	0.05	0.03	0.04	0.00	-0.01	-0.00	0.05	0.01	0.16	0.11	-0.01	-0.01	0.05
0.07	0.06	0.12	0.05	0.06	0.01	0.01	0.01	-0.06	-0.04	0.07	0.09	0.01	0.03	0.04	0.07	0.09	0.07
0.02	0.01	0.10	0.04	0.12	0.11	-0.02	0.04	-0.03	0.07	0.12	0.09	-0.10	0.11	0.09	0.05	0.06	0.03
0.10	0.09	0.04	0.03	0.04	0.08	-0.02	0.03	0.10	0.03	-0.09	0.01	0.01	0.07	0.09	0.05	0.11	0.07
0.05	0.06	0.13	0.05	-0.03	0.06	-0.00	0.03	0.01	-0.09	-0.01	0.05	-0.00	0.04	0.10	0.02	0.07	0.05
0.05	0.07	-0.00	-0.02	0.08	0.03	-0.11	-0.11	-0.09	-0.09	-0.01	0.01	-0.14	0.04	0.09	0.02	0.03	-0.03
0.03	0.05	-0.00	0.01	0.09	0.05	-0.06	0.02	0.02	0.03	0.13	0.02	-0.01	0.03	0.09	0.10	0.12	0.11
-0.00	-0.00	-0.03	-0.00	-0.00	0.11	0.07	0.01	0.09	0.02	0.15	0.06	0.05	0.01	-0.04	0.03	-0.01	0.01
0.11	-0.03	-0.05	0.04	0.06	0.13	-0.01	-0.03	0.10	0.02	0.07	0.07	0.06	0.08	0.03	0.03	0.11	0.11
-0.02	0.03	0.07	0.06	-0.05	0.05	0.04	-0.02	0.05	0.06	0.10	-0.00	0.03	0.00	0.04	0.02	0.02	0.06
0.09	0.10	0.07	0.11	0.01	-0.01	0.05	0.03	0.07	-0.02	0.08	0.06	0.05	0.00	0.08	0.10	0.10	0.03

Tabela A2.3: Determinações da umidade θ para o solo Glei estruturado seco

de umidade das amostras. Entretanto, ainda em condições ótimas de operação do sistema de medida, na literatura já foram relatados desvios dez vezes maiores que estes, ou seja, desvios em torno de $0,05\text{cm}^3/\text{cm}^3$ (Ferraz & Mansell, 1979).

Outros fatores que determinam a obtenção destes desvios são apontados a seguir: a heterogeneidade das amostras de solo e a imprecisão na medida do coeficiente de atenuação em massa para a água e para o solo utilizado no experimento (Ferraz & Mansell, 1979).

Neste experimento, a relativamente baixa correlação obtida para a calibração na energia do Césio se deve à pequena espessura do detector utilizado no experimento tornando-o não adequado para a detecção de fótons de altas energias tais como a do Césio.

Para a amostra na condição de umidade de $(0,180 \pm 0,003)\text{cm}^3/\text{cm}^3$ o valor médio das determinações da matriz de umidade, mostradas na tabela A2.4, forneceu o valor de $(0,20 \pm 0,05)\text{cm}^3/\text{cm}^3$.

Como resultado interessante, mostra-se na tabela A2.5 os valores da densidade, pixel a pixel, determinados para o solo na condição de $(0,180 \pm 0,003)\text{cm}^3/\text{cm}^3$. O valor médio encontrado para as determinações apresentadas na tabela A2.5 foi de $(1,49 \pm 0,07)\text{g}/\text{cm}^3$ mostrando a expansão do solo com seu umidecimento.

0.20	0.19	0.21	0.26	0.16	0.24	0.21	0.24	0.17	0.24	0.27	0.21	0.20	0.15	0.23	0.21	0.12	0.21
0.18	0.21	0.13	0.23	0.21	0.21	0.17	0.20	0.18	0.19	0.25	0.17	0.19	0.16	0.26	0.18	0.17	0.15
0.23	0.27	0.22	0.23	0.24	0.26	0.16	0.25	0.27	0.16	0.17	0.20	0.24	0.28	0.26	0.25	0.14	0.10
0.26	0.22	0.20	0.26	0.20	0.25	0.18	0.25	0.22	0.22	0.16	0.24	0.30	0.24	0.16	0.21	0.18	0.24
0.16	0.16	0.19	0.26	0.21	0.22	0.16	0.14	0.10	0.21	0.10	0.20	0.17	0.15	0.17	0.15	0.20	0.21
0.22	0.20	0.31	0.18	0.17	0.23	0.18	0.22	0.21	0.23	0.19	0.23	0.14	0.17	0.17	0.19	0.22	0.15
0.22	0.23	0.27	0.26	0.21	0.12	0.18	0.23	0.18	0.20	0.20	0.12	0.14	0.18	0.22	0.24	0.20	0.17
0.13	0.20	0.20	0.25	0.27	0.16	0.17	0.14	0.11	0.09	0.04	0.04	0.14	0.18	0.16	0.20	0.20	0.16
0.17	0.26	0.23	0.13	0.21	0.18	0.16	0.11	0.11	0.08	0.08	0.09	0.19	0.21	0.14	0.22	0.16	0.24
0.19	0.27	0.23	0.24	0.16	0.10	0.16	0.05	0.13	0.14	0.17	0.12	0.21	0.18	0.14	0.22	0.17	0.22
0.23	0.18	0.20	0.20	0.13	0.12	0.21	0.15	0.20	0.16	0.12	0.10	0.14	0.18	0.24	0.29	0.21	0.21
0.24	0.22	0.18	0.09	0.18	0.15	0.13	0.15	-0.03	-0.01	0.14	0.19	0.23	0.22	0.19	0.23	0.23	0.24
0.21	0.26	0.17	0.11	0.24	0.13	0.12	0.07	0.10	0.13	0.20	0.21	0.12	0.25	0.18	0.17	0.20	0.21
0.21	0.14	0.10	0.18	0.22	0.19	0.11	0.13	0.15	0.25	0.15	0.16	0.17	0.20	0.18	0.25	0.17	0.23
0.20	0.21	0.21	0.18	0.21	0.23	0.09	0.21	0.16	0.23	0.15	0.24	0.29	0.20	0.20	0.27	0.20	0.18
0.15	0.15	0.21	0.12	0.20	0.14	0.15	0.25	0.15	0.19	0.18	0.20	0.18	0.20	0.25	0.18	0.18	0.15
0.20	0.14	0.14	0.14	0.15	0.16	0.14	0.25	0.18	0.19	0.15	0.19	0.22	0.21	0.24	0.22	0.23	0.24
0.16	0.17	0.22	0.15	0.12	0.25	0.17	0.17	0.18	0.24	0.25	0.26	0.19	0.21	0.11	0.21	0.24	0.17
0.16	0.20	0.17	0.20	0.21	0.18	0.19	0.19	0.22	0.07	0.21	0.27	0.11	0.24	0.18	0.17	0.16	0.15

Tabela A2.4: Determinações da umidade para o solo Glei estruturado com $(0,180 \pm 0,003) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ de umidade

1.42	1.45	1.46	1.40	1.52	1.43	1.48	1.45	1.52	1.45	1.41	1.47	1.48	1.55	1.45	1.46	1.55	1.37
1.46	1.46	1.55	1.43	1.46	1.49	1.53	1.48	1.49	1.51	1.44	1.52	1.52	1.54	1.40	1.49	1.51	1.52
1.41	1.38	1.46	1.43	1.43	1.41	1.54	1.44	1.40	1.53	1.53	1.48	1.43	1.38	1.41	1.41	1.53	1.58
1.38	1.43	1.47	1.41	1.48	1.42	1.53	1.43	1.48	1.46	1.53	1.44	1.38	1.44	1.52	1.45	1.49	1.40
1.50	1.52	1.48	1.42	1.49	1.47	1.54	1.58	1.60	1.46	1.63	1.50	1.56	1.55	1.51	1.54	1.48	1.45
1.45	1.50	1.36	1.53	1.52	1.44	1.51	1.47	1.46	1.45	1.47	1.46	1.58	1.52	1.52	1.50	1.44	1.52
1.46	1.44	1.39	1.41	1.46	1.60	1.51	1.44	1.49	1.44	1.45	1.57	1.56	1.49	1.45	1.43	1.48	1.48
1.58	1.47	1.47	1.41	1.39	1.56	1.53	1.55	1.60	1.59	1.69	1.67	1.54	1.49	1.53	1.48	1.48	1.55
1.51	1.38	1.43	1.57	1.48	1.54	1.55	1.60	1.57	1.60	1.63	1.62	1.50	1.47	1.56	1.46	1.54	1.43
1.48	1.35	1.41	1.43	1.54	1.60	1.52	1.65	1.57	1.54	1.50	1.56	1.46	1.49	1.55	1.44	1.51	1.43
1.44	1.49	1.49	1.48	1.59	1.60	1.48	1.54	1.49	1.55	1.60	1.60	1.55	1.51	1.43	1.37	1.47	1.46
1.43	1.46	1.51	1.62	1.53	1.57	1.58	1.55	1.79	1.76	1.57	1.49	1.45	1.46	1.47	1.43	1.45	1.42
1.47	1.40	1.52	1.61	1.46	1.60	1.60	1.65	1.61	1.59	1.50	1.46	1.60	1.42	1.49	1.51	1.47	1.44
1.46	1.54	1.61	1.52	1.47	1.51	1.59	1.59	1.54	1.42	1.54	1.54	1.54	1.48	1.51	1.41	1.49	1.41
1.49	1.47	1.47	1.51	1.46	1.45	1.64	1.49	1.53	1.46	1.56	1.43	1.38	1.50	1.48	1.40	1.47	1.46
1.51	1.53	1.47	1.62	1.49	1.56	1.56	1.44	1.54	1.51	1.53	1.50	1.53	1.48	1.42	1.50	1.49	1.47
1.40	1.53	1.55	1.58	1.56	1.54	1.58	1.45	1.53	1.50	1.56	1.52	1.47	1.47	1.42	1.46	1.40	1.35
1.44	1.48	1.44	1.55	1.60	1.43	1.53	1.54	1.53	1.44	1.43	1.40	1.49	1.46	1.59	1.42	1.32	1.45
1.42	1.39	1.48	1.47	1.47	1.51	1.50	1.49	1.48	1.64	1.46	1.39	1.58	1.42	1.43	1.43	1.46	1.40

Tabela A2.5: Determinações da densidade para o solo estruturado com umidade igual a $(0,180 \pm 0,003) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

Na tabela A2.6 apresenta-se uma comparação entre as determinações médias da densidade e umidade para as amostras estruturadas determinadas pelas tomografias e por gravimetria.

Tabela A2.6: Comparação entre as determinações da densidade global média e da umidade para as amostras estruturadas de solo obtidas via tomografia e via gravimetria.

$\rho_{sl} (g/cm^3)$ gravimetria	$\rho_{sl} (g/cm^3)$ tomografias	$\theta (cm^3/cm^3)$ gravimetria	$\theta (cm^3/cm^3)$ tomografias
$(1,60 \pm 0,04)$	$(1,58 \pm 0,08)$	$(0,004 \pm 0,003)$	$(0,05 \pm 0,05)$
$(1,60 \pm 0,04)$	$(1,64 \pm 0,09)$	$(0,004 \pm 0,003)$	$(0,02 \pm 0,06)$
-	$(1,49 \pm 0,07)$	$(0,180 \pm 0,003)$	$(0,20 \pm 0,05)$

Para a amostra com umidade igual a $(0,180 \pm 0,003) (cm^3/cm^3)$ a densidade não foi medida gravimetricamente. Porém para a amostra seca, na média dos valores obtidos nas duas repetições, obteve-se o valor de $(1,61 \pm 0,09) g/cm^3$ para o valor da densidade global do solo analisado. O valor obtido através das tomografias está cerca de 0,6% maior que o valor da densidade global obtido gravimetricamente que foi de $(1,60 \pm 0,04) g/cm^3$. Ferraz & Mansell,1979, apontam erros desta ordem na medida da densidade global através da utilização das medidas de transmissão com as fontes de Césio e Amerício.

Na determinação da umidade média via tomografia, para a amostra com umidade de $(0,180 \pm 0,003)(cm^3/cm^3)$ medida por gravimetria, obteve-se o valor de $(0,20 \pm 0,05) (cm^3/cm^3)$.

Na figura A2.4 mostra-se o histograma referente às determinações da umidade para a amostra seca e para a amostra

com $(0,180 \pm 0,003) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ apresentadas respectivamente nas tabelas A2.3 e A2.4.

Os histogramas correspondentes à distribuição das determinações da umidade para a amostra seca foram interpolados por uma distribuição normal cuja média $\bar{\theta}$ e variância σ^2 associadas à esta distribuição foram $\bar{\theta} = 0,05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ e $\sigma^2 = 0,003$.

Para a amostra com umidade de $(0,180 \pm 0,003) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ a interpolação do histograma das determinações de umidade pela distribuição normal gerou para o valor médio $\bar{\theta}$ e para a variância σ^2 os valores $\bar{\theta} = 0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ e $\sigma^2 = 0,003$.

Fig.A2.4) Histograma para as determinações de umidade para o solo estruturado via tomografia nas duas umidades analisadas 0 e $(0,180 \pm 0,003) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

As distribuições para as determinações de densidade global da amostra seca e úmida apresentadas respectivamente nas tabelas A2.2 e A2.5, são apresentadas na figura A2.5.

Fig.A2.5) Histograma para as determinações de densidade para uma amostra de solo estruturado via tomografia nas duas umidades analisadas 0 e $(0,180 \pm 0,003) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Para as determinações de densidade do solo seco os parâmetros obtidos para a curva normal de interpolação foram de $\bar{\rho}_{s1} = 1,58 \text{ g/cm}^3$ para o valor médio e de variância $\sigma^2 = 0,006$.

Para as determinações de densidade do solo úmido os parâmetros obtidos para a curva normal de ajuste do histograma foram $\bar{\rho}_{s1} = 1,49 \text{ g/cm}^3$ e $\sigma^2 = 0,004$.

Estas determinações mostraram que, em média, as determinações da densidade e umidade estão de acordo com as medidas obtidas pelo método gravimétrico. Através da análise dos histogramas pôde-se observar a variabilidade das determinações simultâneas da densidade e umidade da amostra estruturada mostrando o caráter heterogêneo das amostras estruturadas de solo.

É interessante notar o deslocamento tanto do histograma para as determinações de densidade quanto para as determinações de umidade, o que mostrou que as diversas regiões da amostra sofreram conjuntamente variações nestes parâmetros.

Verificou-se que as medidas de tomografia simultânea de dupla energia, quando fontes de Raios Gama foram utilizadas produziram para as amostras estruturadas de solo, valores de umidade maiores que os determinados gravimetricamente.

Isto pode ser explicado com base nas calibrações obtidas. O valor do coeficiente de atenuação linear dado pela calibração do sistema para a energia do Césio forneceu para o solo um valor abaixo do obtido pelas medidas de transmissão direta. Ao mesmo tempo a calibração do Amerício forneceu um valor acima do obtido através das medidas de transmissão direta.

Para esclarecer melhor as consequências que as diferenças acima causam no resultado das medidas de umidade pela tomografia vamos definir uma quantidade ΔUT . Esta quantidade que é a diferença entre a unidade tomográfica obtida das tomografias e a unidade tomográfica fornecida pela calibração para uma amostra em estudo, ou seja:

$$\Delta UT_i = UT_{\text{tomo}} - UT_{\text{cal}}$$

Definição (D.1)

onde

UT_{tomo} é o valor da unidade tomográfica obtido para a amostra em estudo, retirado das tomografias;

UT_{cal} é o valor fornecido para a unidade tomográfica da amostra em estudo a partir da calibração e

o índice "i" pode assumir o valor 1 ou 2 indicando que se trata, respectivamente, da utilização da calibração para a energia do Césio e do Amerício.

A definição D1 aplicada às equações A1 e A2 leva às equações A4 e A5 mostradas a seguir:

$$\Delta UT_1 = 911 \times \Delta \mu_1 \quad \text{Eq. (A2.5)}$$

$$\Delta UT_2 = 774 \times \Delta \mu_2 \quad \text{Eq. (A2.6)}$$

Através da equação 2.25 que define o coeficiente de atenuação do solo em função dos coeficientes de atenuação em massa da água e da fase sólida do solo, obtem-se a equação A2.7 que mostra a diferença entre o valor da umidade obtido pela tomografia e a umidade fornecida pela calibração:

$$\Delta \theta = \frac{\Delta UT_1}{82} - \frac{\Delta UT_2}{450} \quad \text{Eq. (A2.7)}$$

Através da definição de ΔUT_1 e dos dados que foram obtidos para o solo as calibrações fornecem para o solo $\Delta UT_2 < 0$ e $\Delta UT_1 > 0$. Neste caso a equação A6 assume valores positivos para a análise do solo utilizado, determinando valores mais elevados para as determinações de umidade.

A utilização das energias do Césio e do Amerício, maiores que as obtidas através da filtragem do feixe de Raios X, possibilitou o emprego de colimadores com diâmetro de abertura menor. Isto produziu imagens com maior número de pixels, maior resolução espacial, e portanto um maior número de determinações. Além disto, puderam ser realizadas determinações de amostras de maior diâmetro, como no caso das amostras estruturadas de solo.

Deve-se dizer que houveram correções nas contagens relativas ao pico de fótons do Amerício. Esta correção foi feita para subtrair os fótons advindos do efeito Compton produzido na radiação emitida pela fonte de Césio.

Os resultados aqui apresentados, apesar de preliminares, mostraram que a técnica foi capaz de medir simultaneamente os valores da densidade global e da umidade das amostras utilizadas no experimento. Mostraram também que ela foi sensível à variação destas grandezas refletindo o conteúdo das amostras. No entanto, determinações mais sistemáticas e em maior número com medidas mais precisas ainda se fazem necessárias para uma avaliação mais completa do potencial da técnica para medir simultaneamente a densidade global do solo através da tomografia de dupla energia empregando duas fontes radioativas.

Apêndice 3

Apresenta-se a modificação produzida no espectro de Bremsstrahlung a partir da utilização da filtragem por estanho.

PHA DIR ADD GAIN = 4096 LLD = 690 ULD = 4095 OFFSET = 0
 VS= 2K Nov 21-1994 15:59:48

Pico de menor energia E=29 KeV

$$\frac{\Delta E}{E} = 0,33$$

Pico de maior energia E=57 KeV

$$\frac{\Delta E}{E} = 0,25$$

Apêndice 4

Na interpolação dos resultados para o solo expansivo desestruturado, capítulo 4, páginas 88 e 89, foi definido o parâmetro " ϵ ".

Através do valor obtido para " ϵ " ($\epsilon=0,82$) concluiu-se que a desestruturação imposta à amostra facilitou o processo de troca entre a fase gasosa e a fase líquida em todo o intervalo de umidades investigado.

De acordo com o modelo das três retas encontrou-se que:

$$V_a = \gamma + \phi\theta_g \text{ para a etapa estrutural} \quad \text{Eq. (A4.1):}$$

$$V_a = K \text{ para a etapa normal.} \quad \text{Eq. (A4.2):}$$

$$V_a = \tau + \beta\theta_g \text{ para a etapa residual} \quad \text{Eq. (A4.3):}$$

Também, de acordo com o modelo das três retas, foi encontrada a quantidade de ar no interior das amostras desestruturadas de solo expansivo:

$$V_a = \frac{V_{ar}(0)}{m_s} - \epsilon\theta_g \quad \text{Eq. (A4.4):}$$

Comparando-se a equação A4.4 com as equações A4.1 A4.2 e A4.4 obtem-se para os valores de " ϵ ":

$$\epsilon = -\phi \text{ para a etapa estrutural;}$$

$$\epsilon = 0 \text{ para a etapa normal e}$$

$$\epsilon = -\beta \text{ para a etapa residual}$$

Os valores de β e ϕ podem ser encontrados através da análise do experimento com o solo expansivo estruturado e também através das equações 2.13 e 2.14. Os valores obtidos são apresentados a seguir:

$$\text{Etapa estrutural: } 1 + \phi = 0,08 \therefore \phi = -0,92$$

$$\text{Etapa residual: } 1 + \beta = 0,13 \therefore \beta = -0,87$$

E portanto para as etapas estrutural, normal e residual os valores de ε são dados por:

$$\text{Etapa estrutural: } \varepsilon = 0,92$$

$$\text{Etapa normal: } \varepsilon = 0$$

$$\text{Etapa residual: } \varepsilon = 0,87$$

De acordo com estes valores de ε vê-se que a amostra estruturada de solo expansivo possui boa troca entre as fases gasosa e líquida para as etapas residual e estrutural, sendo que dentre estas duas etapas a estrutural é a que apresenta maior taxa de troca entre as fases líquida e gasosa.

Para a etapa normal, por não haver variação da quantidade de ar no interior da amostra, encontrou-se o valor 0 para ε .

Referências Bibliográficas:

AYLMORE, L.A.G. Use of Computer Assisted Tomography in studying water movement around plant roots. **Advances in agronomy**, v.49, P.1-53, 1993.

BROOKS, A.R.; DI CHIRO, G. Principles of Computer Assisted Tomography (CAT) in Radiographic Imaging. **Phys. Med. Biol.**, v.21, p.689-732, April, 1976.

CALHEIROS R.O., ROSSETO R., MACHADO P.; Características físico-hídricas de um glei pouco húmico argiloso no estado do Paraná. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.15, p.129-134, 1991.

CESAREO, R.; ALMEIDA, A.; RAO, D.V. Quasi Monochromatic X-Rays produced with tubes through transmission and diffusion filters. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA-CENTRO INTERDIPARTIMENTALE DI RICERCA PER L'ANALISI DEI MODELLI E DELL'INFORMAZIONE NEI SISTEMI BIOMEDICI. Roma, 1993. 16 p.

CRESTANA, S.; PESSOA, J.D.C.; TORRE, A.; CALHEIROS, R. Uso da Tomografia de Dupla Energia para medir, simultaneamente, densidade e umidade de um meio poroso expansivo. In: XIX ENCONTRO NACIONAL DE ESCOAMENTO DE MEIOS POROSOS. UNICAMP, Campinas/SP, 15-17 de outubro de 1991. Anais v.1, p. 152-162.

CRESTANA, S. Non-invasive measurements. In: Sposito G.; Reginato R. J., ed. In basic soil science research. Madison: SSSA, 1992. p. 83-85.

CRESTANA, S.; A Tomografia Computadorizada como um novo método para estudos da água no solo. São Carlos, USP-IFQSC, 1985. 140p. (Tese).

CRUVINEL, P.E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. X-ray and gamma ray computerized minitomograph scanner for soil science. **IEEE transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v.39, n.5, p. 745-750, Oct. 1990.

FERRAZ, E.S.B.; Determinação Simultânea de Densidade e Umidade de Solos por Atenuação de Raios Gama do ^{137}Cs e ^{241}Am . Piracicaba, 1974, USP-ESALQ, 120p. (Tese de Livre Docência).

FERRAZ, E.S.B.; MANSELL R.S. Determining water content and bulk density of soil by Gamma Ray attenuation methods. Agricultural Experiment Stations Institute of Food and Agricultural Sciences University of Florida. 51 p. Bulletin 807. Gainesville, 1979.

FOX, W.E.; A study of bulk density and water in a swelling soil. **Soil Science**, v.98, 307-316, 1963.

GIRÁLDEZ, J.V.; SPOSITO G.; DELGADO C. A general soil volume change equation: I. The two-parameter model. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.47, p.419-422, 1983.

GUERRINI, I.A.; Difusividade da água do solo em função da umidade e do tempo: Piracicaba, 1976, USP-ESALQ, 50p. (Dissertação)

HAINSWORTH, J.M.; AYLMOORE, L.A.G. The use of Computer Assisted Tomography to determine spatial distribution of soil water content. **Aust. J. Soil Res.**, v.21, 435-443, 1993.

HENDEE, W.R.; Medical Radiation Physics. Chicago, Year Book Medical Publishers, inc, 1984. 517 p.

HILLEL, D.; Introduction to Soil Physics. New York, Academic Press, 1982. 364 p.

HINE, G.J.; BROWNELL G.L. Radiation Dosimetry. New York, Academic Press, 1982. 932 p.

JURY, A. W.; GARDNER, W. R., GARDNER, W. H. Soil Physics. Fifth Edition. New York, John Wiley & Sons, 1991. 328 p.

McBRIDE, J.F.; MILLER, C.T.; Measurements of phase fractions in porous media by using x rays. 1. Theoretical considerations and optimization (Submitted to Water Resources Research)

McBRIDE, J.F.; MILLER, C.T.; Measurements of phase fractions in porous media by using x rays. 2. Applications (Submitted to Water Resources Research)

McGARRY, D.; MALAFANT, K.W.J. The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.51, 1987.

MIYASAKI, T.; KASUBUCHI, T; HASAGAWA, S. A statistical approach for predicting accuracies of soil properties measured by single, double and dual gamma beams. *Journal of Soil Science*, v.42, p. 127-137, 1991.

PHOGAT, V.K; AYLMOORE, L.A.G.; SCHULLER, R.D. Simultaneous measurement of the spacial distribution of soil water content and Bulk Density. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.55, p.908-915, 1991.

POSADAS, A.N.D; Estudo do fenômeno "Fingering" em um meio poroso através de imagens e teoria da percolação por invasão. São Carlos, 1994, USP-IFSC. 189 p. (Tese).

PRATT, W.K.; Digital Image Processing. California, John Wiley & Sons, 1978. 750.p.

REICHARDT, K.; Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4.ed. Campinas, Fundação Cargill, 1985. 445p.

ROSENFELD, A.; KAK, A.C.; Digital Picture Processing. 2nd ed. California, Academic Press, 1991. v.1. 435 p.

SPOSITO, G.; REGINATO R.J. Opportunities in basic soil science research. 1ed. Wisconsin, Soil Science Society of America, Inc, 1992. 109 p.

SPOSITO, G. Volume changes in swelling clays. **Soil Science**, v.115, p.315-320, 1972.

VAZ, C.M.P.; Tomografia computadorizada aplicada a estudos de compactação de solos: Piracicaba, 1989, USP-ESALQ, 110p. (Dissertação).

VAZ C.M.P.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K.; Tomografia Computadorizada na Avaliação da Compactação de Solos. **R. Bras. Ci. Solo** ,v.16, p.153-159,1992.