

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

JAQUELINE APARECIDA RIBASKI BORGES

**ÁREA ELEMENTAR REPRESENTATIVA PARA MEDIDAS DA DENSIDADE E
POROSIDADE DO SOLO USANDO TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE
RAIOS GAMA**

**PONTA GROSSA
2011**

JAQUELINE APARECIDA RIBASKI BORGES

**ÁREA ELEMENTAR REPRESENTATIVA PARA MEDIDAS DA DENSIDADE E
POROSIDADE DO SOLO USANDO TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE
RAIOS GAMA**

**Dissertação apresentada para
obtenção do título de mestre na
Universidade Estadual de Ponta
Grossa, no Programa de Pós
Graduação em Ciências/ Física.**

**Orientador Prof. Dr. Luiz Fernando
Pires**

**PONTA GROSSA
2011**

Ficha Catalográfica Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

B732a Borges, Jaqueline Aparecida Ribaski
Área elementar representativa para medidas da densidade e porosidade do solo usando tomografia computadorizada de raios Gama / Jaqueline Aparecida Ribaski Borges. Ponta Grossa, 2011.
86f.
Dissertação (Mestrado em Ciências , área de concentração Física), Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr . Luiz Fernando Pires

1. Medidas representativas. 2. Imagens Tomográficas. 3. Meios Porosos. I. Pires, Luiz Fernando. II. T.

CDD: 631.43

TERMO DE APROVAÇÃO

JAQUELINE RIBASKI BORGES

“ÁREA ELEMENTAR REPRESENTATIVA PARA MEDIDAS DA DENSIDADE E POROSIDADE DO SOLO USANDO TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS GAMA”

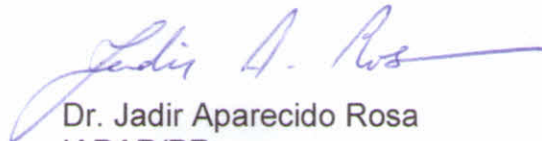
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências - Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.



Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires
DEFIS/UEPG/PR.



Prof. Dr. Sérgio da Costa Saab
DEFIS/UEPG/PR



Dr. Jadir Aparecido Rosa
IAPAR/PR

Ponta Grossa, 11 de março de 2011.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, por estar comigo em todos os momentos;

À minha família, pelo amor que recebo e pelo “colo” nas horas em que mais preciso;

Ao meu amor, Rafael, pelo carinho, atenção e incentivo;

Ao prof. Dr. Luiz Fernando Pires, primeiramente pela oportunidade, e por sua orientação e dedicação na realização deste trabalho;

À todos do grupo FASCA, por seu companheirismo e conhecimento compartilhado;

À CAPES, pelo auxílio financeiro;

Ao Dr. Osny O. S. Bacchi pela infra-estrutura necessária para a realização das tomografias, e

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A Tomografia Computadorizada (TC) trata-se de uma técnica que fornece imagens de seções transversais de amostras de meios porosos. A técnica tem se mostrado eficaz na investigação de diversos fenômenos físicos do solo desde sua primeira aplicação nessa área em 1982. Uma questão amplamente investigada em física aplicada a meios porosos diz respeito à definição de áreas elementares representativas (AER) para medidas de propriedades físicas do solo. A AER está relacionada com a área mínima de uma amostra, necessária para representar suas características de interesse. O objetivo deste trabalho foi definir AERs a serem adotadas para medidas da densidade (ρ_s) e porosidade (ϕ) de amostras de torrão de um solo de textura argilosa. Para isso, utilizou-se um tomógrafo de primeira geração, equipado com fonte de ^{241}Am com resolução da ordem de milímetros ($1,1 \times 1,1 \text{ mm}^2$). A detecção dos fótons foi feita com um detector de cintilação sólida de NaI(Tl) do tipo plano. Os torrões (18 amostras) também foram submetidos ao método do torrão parafinado (TP, método padrão) para determinação da sua ρ_s . Para reconstrução das imagens tomográficas utilizou-se o programa Microvis desenvolvido pela Embrapa/CNPDIA. Nestas imagens foram selecionadas áreas quadrangulares concêntricas com dimensões variando de 1,2 até $1162,8 \text{ mm}^2$. Para definição da AER para ρ_s , foram utilizados os seguintes critérios: 1) desvio relativo do valor médio entre a última e cada uma das demais áreas não superior a 5%, 4%, 3%, 2% e 1% e 2) que pelo menos três áreas consecutivas não devem diferir entre si, utilizando o critério de variação do item 1. As medidas de ρ_s pelo método do TP apresentaram coeficiente de variação da ordem de 3,8%. Assim, considerou-se que a AER foi atingida no critério de 4% de variação. Para ϕ , o critério é semelhante, mas o desvio relativo considerado não deve ser superior a 10%. A AER definida para medidas de ρ_s corresponde a $640,1 \text{ mm}^2$. Para ϕ , a AER encontrada é de $882,1 \text{ mm}^2$. Portanto, para a realização de medidas representativas destas duas propriedades físicas, a AER deve ser de pelo menos $882,1 \text{ mm}^2$.

Palavras-chave: Medidas Representativas. Imagens Tomográficas. Meios Porosos.

ABSTRACT

Computed tomography (CT) is a technique that provides images of sample cross sections of porous media. The technique has shown efficient to investigate different soil physical phenomena since its first use in soil science in 1982. One of the most widely investigated issues in physics applied to porous media regards the definition of representative elementary areas (REA) to measure the soil physical properties. REA is related to the minimum area of a sample needed to represent its characteristics of interest. The objective of this work was to define REAs to be adopted for density (ρ_s) and porosity (ϕ) measurements in clod samples of a clay soil. The equipment used was a first generation tomograph with ^{241}Am source, with millimetric resolution ($1.1 \times 1.1 \text{ mm}^2$). The photon detection was made with a plane NaI(Tl) solid crystal scintillator. Clods (18 samples) were also submitted to the clod method (standard method) in order to determine its ρ_s . In order to reconstruct tomographic images, the program Microvis developed by Embrapa/CNPDI was used. Concentric square areas with sizes ranging from 1.2 to 1162.8 mm^2 were selected. To define REA for ρ_s , the following criteria were adopted: average value relative deviation between the last and each of the remaining areas not superior to 5%, 4%, 3%, 2% and 1%; and 2) that at least three consecutive areas cannot differ among themselves, using the variation criterion in item 1. The ρ_s measurements through the clod method presented variation coefficient of 3.8%. Thus, it was considered that the REA was reached at the 4% variation criterion. For ϕ , the criterion is similar, but the relative deviation considered cannot be superior to 10%. The REA defined for ρ_s measurements corresponds to 640.1 mm^2 . On the other hand, for ϕ the REA found was 882.1 mm^2 . So, in order to carry out representative measurements of these two physical properties the REA must be at least 882.1 mm^2 .

Key-words: Representative Measurements. Tomographic Images. Porous Media.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** – Curva característica de transmissão de raios gama para uma boa colimação em que $x(\text{cm})$ representa a espessura, $\mu(\text{cm}^{-1})$ o coeficiente de atenuação linear e I/I_0 , a atenuação devido à (a) amostra e (b), seu ajuste linear obtido após linearização. Fonte: Adaptado de Pires, 2006.26
- Figura 2** – Influência da energia e número atômico no processo de absorção da radiação pela matéria. Z representa o número atômico de um material absorvedor, h a constante de Planck e ν a frequência da radiação eletromagnética. Fonte: Adaptado de Pires (2006).27
- Figura 3** – Esquema de uma matriz de unidades tomográficas (UT). Os valores em vermelho no centro representam os dados selecionados para a determinação da UT média usada na calibração. Fonte: Adaptado de Pires, 2006.28
- Figura 4** – Medidas de uma amostra cilíndrica usando tomografia computadorizada. (a) Representa uma fatia de um objeto definida como função densidade pontual $f(x,y)$ e tendo uma espessura uniforme Δz . (b) Sistema de coordenada usado para descrever o processo de varredora de uma imagem tomográfica. Fonte: Pires et al., 2005a.30
- Figura 5** – Diagrama de blocos do minitomógrafo de primeira geração. Fonte: Cruvinel et al., 1990.31
- Figura 6** – Representação esquemática da definição do volume elementar representativo (VER) usado na medida da porosidade (ϕ). ΔU_0 e ΔU_i representam o VER e a variação de um volume qualquer. Fonte: Adaptado de Bear (1988).33
- Figura 7** – Representação gráfica do cálculo do volume de poros no interior de um cilindro.35
- Figura 8** – Esquema da construção das áreas quadrangulares concêntricas sobre as imagens tomográficas. Regiões mais escuras representam maiores valores de densidade.45
- Figura 9** – Representação esquemática dos parâmetros usados para o cálculo da largura total à meia altura (FWHM) para uma distribuição normal. Adaptado de Origin (2007).48
- Figura 10** – Relação experimental entre as unidades tomográficas (UT) das imagens obtidas pelo tomógrafo e os coeficientes de atenuação lineares (μ) para substâncias homogêneas usadas na calibração do tomógrafo. As barras de erro verticais representam o desvio padrão dos valores de UT na matriz de dados selecionada. As barras de erro horizontais representam o desvio padrão da média ($n=3$).49
- Figura 11** – Correlação entre os valores de densidade do solo (ρ_s) obtidos via os métodos da tomografia computadorizada (TC) e do torrão parafinado (TP) para as 18 amostras de torrão de solo. Os dados de TC foram obtidos considerando quase toda a área da imagem (AL - área livre) da amostra varrida. r representa o coeficiente de correlação. ...52
- Figura 12** – Correlação entre os valores de densidade do solo (ρ_s) obtidos via método do torrão parafinado (TP) com os valores de ρ_s por área de 9 amostras de torrão de solo, obtidos via tomografia computadorizada (TC). r representa o coeficiente de correlação e AL a área livre.54
- Figura 13** – Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s) para cada área das 18 amostras e respectivas áreas elementares representativas (AER) para os desvios de 5%, 4%, 3%, 2% e 1% (setas), quando estes foram atingidos. As imagens tomográficas estão em escala de cinza de unidades tomográficas (UT). A linha tracejada representa o valor de ρ_s obtido via método do torrão parafinado (TP). As barras de erro representam o erro do equipamento e o desvio padrão dos dados de UT (matrizes de dados das áreas quadráticas) quando maiores que o erro do equipamento. AL representa a área livre.....62

- Figura 14** – Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras que atingiram a área elementar representativa (AER) para os desvios de 5%, 4%, 3%, 2% e 1%.63
- Figura 15** – Frequência normalizada da porosidade pela imagem (%) a partir da 5ª área selecionada na amostra 01 (Am 01). Os parâmetros x_c , r^2 , w , A , s representam o valor médio da porosidade no ajuste, o coeficiente de determinação, parâmetro de ajuste da largura total à meia altura (FWHM), área sob a curva e o desvio padrão.....67
- Figura 16** – Frequência normalizada da porosidade pela imagem (%) a partir da 5ª área selecionada na amostra 10 (Am 10). Os parâmetros x_c , r^2 , w , A , s representam o valor médio da porosidade no ajuste, o coeficiente de determinação, parâmetro de ajuste da largura total à meia altura (FWHM), área sob a curva e o desvio padrão.....69
- Figura 17** – Gráficos dos valores da largura total à meia altura (FWHM) a partir da 5ª área selecionada nas 18 amostras e respectivas áreas elementares representativas (AER) para os desvios de 10% e 15%, quando estas foram atingidas.....73
- Figura 18** – Gráficos de densidade do solo (ρ_s) e largura total à meia altura (FWHM) para diferentes áreas de 18 amostras. Para amostras que comportaram 14 áreas ou mais, as setas indicam a 14ª área, a qual corresponde à área elementar representativa (AER) para realização de medidas de ρ_s e porosidade do solo (ϕ). AL representa a área livre.....77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da reconstrução de imagens tomográficas para as 18 amostras de torrão de solo.	44
Tabela 2 – Relação das áreas adotadas para o cálculo da área elementar representativa (AER) e suas respectivas medidas.....	45
Tabela 3 – Valores de densidade do solo (ρ_s) de 18 amostras de torrão de solo obtidos pelos métodos da tomografia computadorizada (TC) e do torrão parafinado (TP). Os termos s e CV representam o desvio padrão da média e o coeficiente de variação, respectivamente.	51
Tabela 4 – Relação das áreas que cada amostra atingiu a área elementar representativa (AER) para a densidade do solo (ρ_s) (4%) e porosidade do solo (ϕ) (10%). As células não preenchidas para ϕ , indicam que a AER não foi atingida por estas amostras, no parâmetro estabelecido.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A (cm ²)	Área
V (cm ³)	Volume
MER	Medida elementar representativa
AER (cm ²)	Área elementar representativa
CER (cm)	Comprimento elementar representativo
VER (cm ³)	Volume elementar representativo
AL (cm ²)	Área livre
Am	Amostra
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
CNPDIA	Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária
FWHM	“Full width at half maximum” (Largura total à meia altura)
TC	Tomografia computadorizada
UT	Unidade tomográfica
TP	Torrão parafinado
NaI(Tl)	Iodeto de sódio ativado com Tálcio
Am-241(²⁴¹ Am)	Fonte radioativa de Amerício-241
Cs-137(¹³⁷ Cs)	Fonte radioativa de Césio-137
I (ctg)	Intensidade de fótons transmitida através da amostra
I ₀ (ctg)	Intensidade de fótons transmitida sem a presença da amostra
x (cm)	Espessura
μ (cm ⁻¹)	Coefficiente de atenuação linear
μ _m (cm ² .g ⁻¹)	Coefficiente de atenuação de massa
U (g.g ⁻¹)	Umidade gravimétrica
θ (cm ³ .cm ⁻³)	Umidade volumétrica
ρ (g.cm ⁻³)	Densidade
φ (cm ³ .cm ⁻³)	Porosidade
m (g)	Massa
CV	Coefficiente de variação
r	Coefficiente de correlação
r ²	Coefficiente de determinação
s	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	APLICAÇÕES DA TÉCNICA DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TC) EM FÍSICA DO SOLO.....	13
2.2	MEDIDAS ELEMENTARES REPRESENTATIVAS (MER).....	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1	INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA.....	25
3.2	COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO.....	25
3.3	ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA PELA MATÉRIA	27
3.4	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA TOMOGRÁFICO	28
3.5	MINITOMÓGRAFO DESENVOLVIDO NA EMBRAPA/CNPDIA	29
3.6	DEFINIÇÃO DO VER A PARTIR DA POROSIDADE	31
3.7	DEFINIÇÃO DE AER A PARTIR DA POROSIDADE SUPERFICIAL	34
3.8	RELAÇÕES MASSA-VOLUME DO SOLO.....	37
3.8.1	Densidade de Partículas (ρ_p)	37
3.8.2	Densidade do Solo (ρ_s)	38
3.8.3	Porosidade do solo (ϕ)	38
4	MATERIAL E MÉTODOS	40
4.1	COLETA DAS AMOSTRAS	40
4.2	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E POROSIDADE DO SOLO	40
4.2.1	Tomografia Computadorizada.....	40
4.2.2	Coeficiente de Atenuação	41
4.2.3	Cálculo do Erro Atribuído ao Equipamento Tomográfico.....	42
4.2.4	Método do Torrão Parafinado	43
4.2.5	Procedimentos para Avaliação da AER.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA TOMOGRÁFICO E COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO	49
5.2	CORRELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DA TC E DO TP	50
5.3	DETERMINAÇÃO DA AER EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO	56
5.4	DETERMINAÇÃO DA AER A PARTIR DA FWHM DA DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA DA POROSIDADE DO SOLO	65

5.5	DETERMINAÇÃO DA AER PARA POROSIDADE E DENSIDADE DO SOLO.....	73
6	CONCLUSÕES	78
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

O solo é um sistema poroso complexo. É composto pelas fases sólida (matriz do solo), líquida (solução do solo) e gasosa (ar ou atmosfera do solo). A matriz do solo engloba partículas que variam em composição química e mineralógica, tamanho, forma e orientação. Também, contém substâncias amorfas (matéria orgânica) que ligadas aos grãos minerais formam os agregados do solo.

A organização dos componentes sólidos do solo determina as características geométricas dos espaços porosos em que a água e o ar são retidos ou transmitidos. As proporções relativas das três fases do solo variam continuamente, dependendo de variáveis como clima, vegetação e manejo (HILLEL, 1998; REICHARDT; TIMM, 2004). Relações de massa-volume são usadas para descrever as frações do solo e suas inter-relações. No entanto, medidas de propriedades físicas do solo relacionadas à massa e ao volume precisam ser representativas do meio. Tal representatividade pode ser alcançada com o uso de amostras com tamanhos adequados.

A determinação destes tamanhos, que podem ser dados em volumes, áreas ou comprimentos elementares representativos (VER, AER e CER, respectivamente), vem sendo realizada cada vez com maior frequência para medição de diferentes propriedades de meios porosos. Isto é devido à dependência destas com o tamanho da amostra (BAVEYE et al., 2002).

Sua importância se dá principalmente pelo fato de, ao realizar análises em amostras com tamanhos representativos, o resultado encontrado representará o todo. No entanto, é importante observar que estes tamanhos podem variar de acordo com o sistema poroso, a propriedade e a escala de medida (VANDENBYGAART; PROTZ, 1999; BARTOLI et al., 2005; MÜLLER; SIEGESMUND; BLUM, 2010).

A Tomografia Computadorizada (TC) de raios gama se trata de uma técnica não destrutiva, que vem se mostrando bastante eficaz na investigação de diferentes fenômenos do solo (PIRES et al., 2010). Ela oferece vantagens em relação a métodos tradicionais e até mesmo aos demais métodos nucleares, como as sondas nêutron-gama de superfície e profundidade e atenuação de raios gama. Com a

aplicação da TC, se obtém imagens tomográficas bi (2D) ou tridimensionais (3D), com resoluções da ordem de milímetros ou micrometros (CRESTANA et al., 1996).

Assim, a TC trata-se de uma técnica ideal para a determinação de tamanhos representativos em meios porosos. Na matriz de dados obtida é possível selecionar áreas de diferentes tamanhos e ainda analisar a variabilidade espacial de cada amostra tanto qualitativa quanto quantitativamente.

Esta pesquisa tem como objetivo definir valores de áreas elementares representativas (AERs) a serem adotadas para medidas da densidade (ρ_s) e porosidade (ϕ) de amostras de torrão de um solo de textura argilosa, utilizando dados tomográficos. O método do torrão parafinado (TP) foi também aplicado e seus resultados foram considerados padrão no estabelecimento da AER para a ρ_s , devido à sua tradição e viabilidade técnica e econômica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 APLICAÇÕES DA TÉCNICA DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TC) EM FÍSICA DO SOLO

O primeiro tomógrafo foi construído pelo Dr. Godfrey N. Hounsfield, no início da década de 70, sendo inicialmente aplicado somente na área médica. As primeiras aplicações da técnica em Ciência do Solo ocorreram no início da década de 80 (PETROVIC; SIEBERT; RIEKE, 1982), e o Brasil foi um dos países pioneiros em sua aplicação nesta área de conhecimento no mundo (CRESTANA; MASCARENHAS; POZZI-MUCELLI, 1985).

As primeiras pesquisas utilizando tomógrafos na área de física do solo foram realizadas com equipamentos médicos. No entanto, o preço de tais equipamentos e a calibração dos mesmos, tornavam difícil sua aplicação em pesquisas na área agrícola. Atualmente, existem tomógrafos dedicados especialmente para tal fim. No Brasil, foram desenvolvidos tomógrafos de 1ª e 3ª gerações, com resoluções da ordem de milímetros até micrometros (CRUVINEL, 1987; CRUVINEL et al., 1990; NAIME, 1994, 2001; SILVA et al., 1997; MACEDO et al., 1999).

A técnica tomográfica tem se mostrado bastante eficaz na investigação das diferentes propriedades físicas do solo, principalmente por se tratar de um método nuclear não invasivo, ou seja, não danifica a estrutura da amostra analisada. Outra vantagem da técnica é que também fornece imagens 2D e 3D de seções transversais de amostras e possibilita que sejam realizadas análises tanto qualitativas como quantitativas, a partir da matriz de dados gerada.

Alguns exemplos de propriedades do solo já analisadas com a TC são a densidade, porosidade, umidade, condutividade hidráulica, selamento superficial e distribuição de poros. Também é possível destacar a determinação de tamanhos elementares representativos de meios porosos e pesquisas relacionadas aos efeitos de diferentes sistemas de manejo e métodos de amostragem na estrutura do solo (VAZ et al., 1989; MACEDO; CRESTANA; VAZ, 1998; BAVEYE et al., 2002; PIRES et al., 2007; TIPPKÖTTER et al., 2009; ELLIOT; REYNOLDS; HECK, 2010).

Tippkötter et al. (2009) realizaram pesquisas com microtomografia de raios X. Estes autores determinaram a umidade em macroporos de dois solos estruturados. O objetivo da abordagem realizada foi visualizar a distribuição espacial

e o aparecimento de água nos macroporos ($> 10 \mu\text{m}$) do solo com análise da imagem da estrutura interna das amostras. As amostras utilizadas eram de um solo argiloso e foram submetidas a uma tensão de água que representa o estado de capacidade de campo.

Esses autores identificaram nas imagens microtomográficas 2D a matriz do solo com seu espaço poroso e a fase líquida nas amostras. As imagens indicaram muitos macroporos contínuos tubulares atravessando a matriz do solo. Também, demonstraram que a coleta da amostra não provocou quaisquer distúrbios detectáveis em sua estrutura. As três fases puderam ser detectadas devido às suas diferentes densidades; no entanto, os autores encontraram uma maior dificuldade para distinguir a fase líquida da matéria orgânica presente nos solos, já que estas apresentam densidade similar.

Entre as propriedades analisadas por estes autores estão a área, o perímetro total e o diâmetro equivalente de poros. As imagens tomográficas possibilitaram a visualização de filmes de água de diferentes espessuras associados com a superfície dos macroporos maiores (macroporos largos: $> 50 \mu\text{m}$; macroporos estreitos: 10 a $50 \mu\text{m}$; mesoporos: 0,2 a $10 \mu\text{m}$ e microporos: $< 0,2 \mu\text{m}$). Os macroporos menores estavam, na maioria, completamente cheios de água.

As espessuras dos filmes apresentados foram em média de $10,6 \mu\text{m}$ e $3,0 \mu\text{m}$ para as amostras dos dois solos analisados. Os maiores filmes foram encontrados em torno de $35 \mu\text{m}$ de espessura. No entanto, estes resultados eram inesperados nos poros maiores que $50 \mu\text{m}$, uma vez que na capacidade de campo em poros capilares apenas a água retida por forças de adesão deve estar presente, o que criaria filmes na faixa de nanômetros. Aplicando métodos microscópicos de varredura os autores detectaram uma grande quantidade de nano partículas coloidais dispersas que pareceram estar na origem das forças de adesão e coesão, causando o efeito dos filmes de água de até $35 \mu\text{m}$ de espessura nos poros.

Tomioka et al. (2010) analisaram a microestrutura de bentonitas compactadas, secas e saturadas, com microtomografia de raios X. Da bentonita foram obtidas montmorilonitas purificadas que posteriormente foram compactadas a uma densidade seca de $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$. Também foram incluídas em algumas amostras esferas de vidro com diâmetro de 100-200 μm , como referência. Os autores conseguiram identificar nas imagens tomográficas as partículas de montmorilonita e também as esferas de vidro. Estas últimas foram identificadas devido ao formato

circular e também por apresentarem-se como pontos brilhantes distribuídos aleatoriamente na imagem. Os autores obtiveram imagens 3D com resolução da ordem de micrometros. Informações sobre o tamanho e a forma dos grãos de montmorilonita presentes nas amostras foram obtidas antes e depois da saturação. A partir dos resultados da análise das imagens, supôs-se que as camadas externas de grãos de montmorilonita expandiram, enquanto que as internas não se alteraram significativamente no processo de saturação.

A TC de nêutrons é uma técnica que apresenta maior sensibilidade na medida da umidade do solo em relação à TC de raios X ou gama, já que os nêutrons são mais sensíveis à presença do hidrogênio. Também é ideal para outros compostos atenuantes de baixo peso atômico. Um exemplo é relatado no trabalho de Tumlinson et al. (2008).

Estes autores conduziram uma sequência de experimentos para avaliar o potencial da aplicação da TC de nêutrons em solos. Eles desenvolveram novas técnicas que usam a atenuação de nêutrons térmicos para medir a distribuição espacial e temporal da água em solos e próximo às raízes das plantas; valores de umidade obtidos para um solo arenoso e raízes de milho estavam entre 0,08 e 0,32 e entre 0,33 e 1,00 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, respectivamente, com incerteza de aproximadamente 0,01 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Os resultados obtidos demonstraram que a TC de nêutrons térmicos é sensível a pequenas alterações de umidade, permitindo a estimativa da distribuição espacial da umidade do solo e da absorção de água pela raiz (TUMLINSON et al., 2008).

O Brasil, como dito anteriormente, é um dos países pioneiros na aplicação da técnica tomográfica em Ciência do Solo e apresenta contribuição significativa na realização de pesquisas nesta área de conhecimento. Pires et al. (2010) realizaram uma revisão de literatura sobre as pesquisas desenvolvidas por cientistas brasileiros e publicadas em revistas nacionais e internacionais, bem como suas teses e dissertações. Uma grande quantidade de trabalhos foi abordada por estes autores, enfatizando a contribuição brasileira, e atualmente pesquisas são realizadas no Brasil, com tomógrafos desenvolvidos especialmente para estas aplicações.

Pesquisas referentes ao movimento de água no solo são mais difíceis de serem realizadas devido principalmente ao tempo necessário para a aquisição das imagens tomográficas. No entanto, Crestana; Mascarenhas e Pozzi-Mucelli (1985), ainda utilizando um tomógrafo médico de 3ª geração do Instituto de Radiologia,

Universidade de Trieste, Itália, realizaram um trabalho pioneiro de medidas do fluxo horizontal e vertical de água. Para isso, utilizaram uma coluna cilíndrica de acrílico com seringas de 5 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento (fluxo horizontal) e de 10 cm de diâmetro e 30 cm de altura (fluxo vertical), internamente divididas por uma camada de plástico, o que possibilitou medidas simultâneas do umedecimento e secamento do solo.

Já utilizando um tomógrafo brasileiro de primeira geração, desenvolvido por pesquisadores do CNPDIA/EMBRAPA, especialmente para estudos na área agrícola, Vaz et al. (1989) avaliaram a compactação induzida pela prática do plantio direto por meio de medidas de densidade e umidade do solo. Amostras-testes foram produzidas artificialmente, possuindo uma região central mais densa (A) (espessura de 3 mm) em relação a sua vizinhança (B). O perfil de distribuição da densidade do solo de uma das amostras produzidas foi visualizado e uma maior compactação na região A, com valores de densidade variando entre 1,10 a 1,30 g.cm⁻³ foi observada.

Também foram utilizadas amostras de torrões de solo, coletadas logo depois da aragem, em uma área experimental. Após a análise tomográfica, as distribuições de umidade volumétrica e densidade do solo ao longo da seção arada, puderam ser visualizadas e quantificadas. Uma camada compactada da ordem de 8 mm de espessura apresentou densidade 0,15 g.cm⁻³ maior que a densidade média obtida para toda a amostra, o que indicou que a técnica tomográfica foi eficiente para o estudo de finas camadas de amostras de solo compactadas.

Vaz et al. (1989) também constataram que a compactação causada por implementos agrícolas se deu em finas camadas e depende de parâmetros tais como o conteúdo de água no solo durante o seu manejo, densidade, consistência e dureza, tipo de instrumento usado, velocidade e tipo de rodas do trator.

Esta compactação do solo induzida afeta a estrutura física deste meio poroso e conseqüentemente a capacidade de armazenamento de água, que se trata de um parâmetro físico importante usado em irrigação e drenagem. Com a aplicação da TC, uma investigação prévia de algumas propriedades físicas do solo foi realizada, permitindo monitorar o impacto de cada forma de manejo na estrutura deste meio poroso.

Macedo; Crestana e Vaz (1998) avaliaram a estrutura do solo em nível de microporos. Os autores obtiveram imagens com um microtomógrafo de raios X, também desenvolvido na EMBRAPA/CNPDIA, emitindo fótons de 58,5 keV, de uma

amostra que passou por ciclos de umedecimento (irrigação) durante diferentes períodos de tempo e secamento à sombra, por um período de 24 horas, até que um novo ciclo de umedecimento e secamento fosse reiniciado. Como resultado, os autores detectaram a formação de três camadas com diferentes valores de densidade, sendo a superior com espessura de ~1mm, a inferior, de ~1,7 mm e a intermediária com ~0,5 mm. Os valores médios das unidades tomográficas (UTs) por regiões indicaram que a segunda camada apresentou uma densidade média de 2,1 vezes maior que a superior e a relação entre as densidades médias da terceira e da primeira camadas é em torno de 1,2. Na camada intermediária, os autores notaram pontos de alta densidade. Na terceira camada, surgiram também alguns pontos de alta densidade, porém em menor número, e uma quantidade de macroporos cerca de duas a três vezes maior em relação às camadas superiores.

Com a obtenção de imagens via TC para análises microtomográficas, estudos de modificações da estrutura de uma mesma amostra de solo submetida a diferentes processos puderam ser realizados. Já as técnicas de imagens tradicionalmente usadas para tais análises geralmente envolvem a impregnação da amostra de solo com resina para posterior corte das mesmas, o que impede o estudo de um determinado problema ocorrendo na mesma amostra. Estes estudos são imprescindíveis no entendimento dos fenômenos que envolvem a retenção e o movimento da água através do solo.

Pires et al. (2007) aplicaram a TC para avaliar o raio de influência de tensiômetros e extratores de solução do solo, mostrando como a distribuição de umidade do solo e o potencial mátrico são afetados pela introdução da cápsula porosa destes instrumentos.

Os autores obtiveram imagens tomográficas em 2D para amostras secas e saturadas de dois diferentes solos da região de Piracicaba, São Paulo. Para fins de análise, as imagens com os tensiômetros e extratores foram divididas em sete regiões circulares concêntricas. Com isso, o tamanho do raio de influência dos sensores (cápsulas porosas) dos tensiômetros e extratores pode ser identificado. Visualizou-se que a água não se distribui de forma homogênea ao redor da cápsula porosa, tanto para os tensiômetros quanto para os extratores de solução, e que a mesma tende a se deslocar para as regiões de maior densidade. Também, observou-se que o raio de influência da cápsula porosa para os extratores de

solução é bastante pequeno, o que demonstra a ineficiência destes equipamentos na retirada de água do solo.

Análises quantitativas confirmaram os resultados evidenciados pelas imagens. Nas regiões próximas às bordas das cápsulas porosas foi possível observar maiores valores de UT (tensiômetros), revelando a presença de um maior conteúdo de água nestas regiões e menores valores de UT (extratores de solução) indicando a redução da umidade após a aplicação da sucção.

Naime (2001) desenvolveu um minitomógrafo de campo e laboratório de 3ª geração, equipado com fonte de ^{241}Am (59,54 keV). Com este equipamento, o autor propôs um novo método de estudo da infiltração da água na região não saturada do solo, utilizando a TC. Podendo ser levado ao campo, o minitomógrafo possibilita medidas do movimento da água no solo diretamente no local de estudo.

Em seu trabalho, o autor demonstrou a capacidade do minitomógrafo de campo para realizar análises qualitativas. Ele obteve imagens com contrastes provocados pelo umedecimento de uma das partes de uma amostra de solo acondicionada em um recipiente de acrílico com seção transversal quadrada. No sentido da diagonal do recipiente foi colocada uma placa com a mesma altura e que dividiu o recipiente em duas partes. Também foram obtidas imagens do processo de umedecimento de uma seção transversal do solo situada a 93,5 mm abaixo da superfície da amostra. Os resultados obtidos por Naime (2001) demonstraram a viabilidade do tomógrafo desenvolvido para acompanhar a infiltração da água no solo de forma quantitativa e qualitativa, uma vez que permite medidas de propriedades físicas do solo com tempos de aquisição da ordem de segundos.

2.2 MEDIDAS ELEMENTARES REPRESENTATIVAS (MER)

Medidas representativas podem ser obtidas a partir de volumes, áreas ou comprimentos elementares representativos. Por exemplo, determinar o VER para um parâmetro físico de um meio poroso consiste em encontrar o tamanho do meio que seja representativo em torno de um ponto P localizado no seu centro. Quando determinado em função da porosidade, este volume deve ser suficientemente maior que o tamanho de um único poro e incluir um número suficiente destes, para que a média resultante represente o que acontece em P (BEAR, 1988).

O emprego de MER vem sendo realizado cada vez com maior frequência na determinação de propriedades de diferentes meios porosos, devido à dependência destas com o tamanho da amostra. Sua importância se dá principalmente pelo fato de, ao se realizar estudos em amostras com tamanhos representativos, se garante que o resultado encontrado representará o todo.

VandenBygaart e Protz (1999) estabeleceram a AER para estudos de micromorfologia de solos em análises da área e perímetro total de poros com diferentes diâmetros. Para determinação da AER foram obtidas imagens micromorfológicas de 98 amostras. Nestas, foram selecionados 13 quadrados com tamanhos sequenciais variando de 128 x 171 “pixels” a 2815 x 3760 “pixels” (3,5 x 4,7 cm). As áreas quadradas foram delimitadas em cada fina seção de blocos impregnados com resina e centralizadas no “pixel” localizado no centro da imagem.

Nesse trabalho, considerou-se que a AER foi atingida quando as medidas feitas no parâmetro de interesse em três áreas consecutivas não variaram $\pm 10\%$ em relação à próxima área. A AER foi alcançada para a área total de poros com diâmetro entre 50 e 500 μm em 99% das amostras, enquanto que para o perímetro total, 97% das amostras atingiram a AER. Os valores médios foram de 5,09 e 5,00 cm^2 para a área e perímetro total de poros, respectivamente. Já para poros com diâmetro entre 500 e 2000 μm , 91% e 95% das amostras atingiram a AER, para área e perímetro total de poros, com médias de 6,73 e 4,95 cm^2 , respectivamente.

Uma questão que precisa ser considerada na definição de tamanhos elementares representativos é que diferentes parâmetros medidos podem apresentar diferentes padrões espaciais ou temporais, de modo que o tamanho representativo para um parâmetro ou propriedade, pode ser diferente para outros. Ou seja, cada propriedade pode ter a sua própria escala característica (HILLEL,

1998). Em alguns casos, aumentar o tamanho da amostra pode não gerar um valor coerente da propriedade física medida. Um exemplo é relatado no trabalho realizado por Baveye et al. (2002).

Esses autores realizaram estudos em duas amostras indeformadas de 100 mm de comprimento e 100 mm de diâmetro, obtidas em diferentes horizontes do solo (profundidades de 75-85 cm e 150-160 cm). O principal objetivo era realizar uma investigação preliminar da medida em que dados obtidos por meio de TC de raios X em um solo real poderiam ser usados para simular a medida de vários parâmetros macroscópicos do solo (umidade gravimétrica e volumétrica, conteúdo volumétrico de ar e densidade do solo), aumentando progressivamente o volume da amostra. Também, os autores queriam comparar o efeito do volume da amostra sobre diferentes parâmetros do solo e determinar, para cada variável macroscópica, nas condições específicas em que os dados foram obtidos, se existe uma série de volumes de amostragem em que a variável macroscópica não apresenta dependência com o instrumento de medida.

Em particular, a investigação de ρ_s foi realizada de diferentes formas. Primeiramente, os autores obtiveram fatias verticais e horizontais no volume de referência ($V_{ref} = 70 \times 70 \times 30 \text{ mm}^3$), com uma espessura de 1 mm. A análise de tais fatias forneceu uma ideia geral da variabilidade espacial de ρ_s . Uma segunda série de cálculos foi baseada em cubos de $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$ (V_{cubo}), selecionados dentro de um bloco retangular de $60 \times 60 \times 30 \text{ mm}^3$ ($V_{bloco \text{ retang}}$). Cada "pixel" das imagens tomográficas correspondia a 1 mm^3 .

Para simular a medida de ρ_s sobre o aumento do volume da amostra, dois sistemas de amostragem foram adotados. O primeiro consistiu na seleção de volumes com tamanhos sequenciais em torno do baricentro do bloco retangular; O segundo procedimento foi utilizado para simular medidas de amostras coletadas com caixas de Kubiena e consistiu na seleção de blocos retangulares sequenciais centralizados na face superior do V_{cubo} .

O desvio padrão da densidade média das amostras foi de 4,1% e 3,3%. A variação ficou dentro deste intervalo na avaliação de ρ_s no V_{cubo} , em comparação com o V_{ref} e $V_{bloco \text{ retang}}$. No entanto, dentre todas as propriedades analisadas por estes autores, ρ_s foi a única propriedade que manteve variação dos diferentes volumes dentro desta porcentagem de desvio. Com este fato, Baveye et al. (2002) ressaltaram que a utilização de núcleos adjacentes para avaliação da dependência

instrumental de parâmetros físicos do solo é questionável e, somente através de formas de amostragem planejadas pode-se obter informações confiáveis sobre essa dependência instrumental, devido a heterogeneidades de pequena escala.

Os resultados obtidos por estes autores indicaram que o tamanho (até 60 x 60 x 30 mm³), forma e posicionamento da amostra influenciam significativamente nos valores do parâmetro medido do solo. Em alguns casos a dependência com o instrumento de medida desapareceu dentro de uma média de volumes da amostra. Contudo, os autores não encontraram nenhum indício de estabilização dos valores de ρ_s , indicando que mesmo o V_{ref} (70 x 70 x 30 mm³) ainda é pequeno para estabelecimento do VER para esta propriedade física do solo analisado (BAVEYE et al., 2002). É importante enfatizar que estes autores não utilizaram um valor de desvio relativo entre os valores médios para as propriedades analisadas, e sim, observaram a tendência destes valores a se tornarem estáveis ou não. No caso de ρ_s , um aumento progressivo foi observado.

A questão de diferentes VERs para diferentes propriedades de meios porosos foi também abordada por Al-Raoush e Papadopoulos (2010). Estes autores investigaram se o VER para porosidade pode ser usado também para outros parâmetros. Para isso, aplicaram a técnica de TC de raios X para obter imagens tridimensionais de sistemas arenosos naturais com diferentes distribuições granulométricas. Os autores verificaram que o VER_{min} para a porosidade pode não ser suficiente para ser considerado como um VER para os demais parâmetros utilizados, que apresentaram VER_{min} maior que o da porosidade. Assim, concluíram que a determinação do VER para qualquer parâmetro de interesse deve ser realizada com base na distribuição individual deste sobre diferentes volumes. A heterogeneidade dos sistemas foi apontada como um fator importante para determinar o VER para os parâmetros analisados.

É importante observar também, que cada sistema poroso possui suas próprias características, portanto um tamanho representativo de um determinado parâmetro de um meio, provavelmente será diferente para outro meio poroso. Somente para efeito de comparação entre valores de tamanhos representativos obtidos para diferentes sistemas porosos, Müller; Siegesmund e Blum (2010) concluíram que um VER pode ser alcançado em um domínio com dimensões de 10 m x 10 m em um reservatório geotérmico com rachaduras, enquanto que os valores apresentados até o momento foram da ordem de milímetros ou centímetros. Outros

resultados de estudos realizados em maior escala são encontrados em Bloschl; Grayson e Sivapalan (1995), Kim; Lee, J.-Y. e Lee K.-K. (2004) e Asano e Uchida (2010), que são exemplos da investigação de tamanhos representativos em bacias hidrográficas.

Li et al. (2009) trazem como um dos estudos realizados, o VER para solos rachados em condição de saturação. Os resultados obtidos mostram que um VER pode ser estabelecido para areias homogêneas e em argilas quando a rede de rachaduras é relativamente densa. No entanto, a dificuldade para estabelecimento do VER foi maior no segundo caso. Li e Zhang (2010) realizaram um estudo de campo em um solo compactado e rachado em condição de umidade constante. Um dos objetivos do estudo foi determinar o VER da rede de rachaduras. Os autores concluíram que o tamanho do VER para o solo rachado é aproximadamente cinco vezes o comprimento médio da rachadura. Acima deste, a variação na porosidade da rachadura em relação ao tamanho do domínio do meio poroso foi insignificante.

Com relação à influência da escala de estudo em medidas representativas, Bartoli et al. (2005) realizaram um estudo multiescalar em um solo siltoso e identificaram tamanhos representativos do meio. Os autores aplicaram a teoria dos fractais à estrutura do solo em uma faixa de escala específica e mostraram que esta não pode ser diretamente aplicada para prever propriedades físicas do solo em uma outra faixa de escala. Isso ocorre porque existem diferentes processos interdependentes de estruturação em diferentes escalas. Estes diferentes processos resultam em dimensões fractais consistentes apenas sobre os limites do domínio particular. Outro exemplo do uso de dimensões fractais na avaliação de tamanhos representativos em solos também é encontrado em Martínez et al. (2007).

Casos interessantes são observados nos trabalhos de Pedrotti et al. (2003b) e Razavi; Muhunthan e Hattamleh (2007). Pedrotti et al. (2003b) descreveram os aspectos da adequação do tamanho de amostras de dois horizontes de um Planossolo para medidas de ρ_s realizadas com um minitomógrafo com fonte de ^{241}Am . Para isso, adotaram o coeficiente de variação (CV) como parâmetro estatístico para definir a espessura ótima das amostras deste tipo de solo. Estes autores chegaram à conclusão de que para o horizonte A do solo investigado, amostras com 6,0 cm de espessura forneceram as medidas ideais para obtenção de ρ_s . Para o horizonte B, amostras com 4,0 cm de espessura já forneceram os

resultados mais precisos de ρ_s . Ou seja, mudando-se apenas do horizonte A para o B de um mesmo solo, a espessura ótima apresentou uma variação de 2 cm.

Razavi; Muhunthan e Hattamleh (2007) analisaram as características do VER de areias (meio heterogêneo) e grânulos esféricos de vidro (meio homogêneo) utilizando técnicas avançadas de processamento de imagens 3D obtidas utilizando TC de raios X. Com os resultados obtidos, os autores observaram o comportamento da variação da porosidade para os meios investigados. As areias apresentaram três regiões características: uma região de flutuação inicial devido a variações microscópicas, uma região de estabilidade, e outra com aumento/redução contínuos, devido à heterogeneidade do meio poroso. Já o meio homogêneo não apresentou a última região. Os resultados obtidos por estes autores são um exemplo prático da teoria relacionada a MER.

A determinação de tamanhos representativos ou da análise de propriedades de sistemas porosos sobre estes tamanhos é realizada em diferentes áreas de pesquisa e sistemas porosos. Por exemplo, Bouhlef; Jamei e Geindreau (2010) analisaram os efeitos microestruturais sobre as propriedades poro-elásticas de meios porosos saturados com estrutura periódica sobre um VER, e discutiram a capacidade dos resultados para descrever as propriedades de meios porosos poro-elásticos reais; Gusev (1997) realizou um estudo numérico para estabelecer o tamanho do VER para compósitos elásticos; Teruel e Rizwan-uddin (2010) realizaram um cálculo numérico da quantidade de turbulência macroscópica em VERs do meio poroso, por meio de um grande conjunto de simulações de fluxo microscópico turbulento. Com o estudo, os autores confirmaram que simulações numéricas microscópicas são consistentes com a lei macroscópica, que afirma que a taxa de dissipação macroscópica é determinado pela queda de pressão através do VER; Graham e Yang (2003) determinaram a escala de comprimento sobre o qual quantidades estatísticas microestruturais flutuam por meio de análise de imagem, mostrando que estas quantidades estabilizam sob diferentes escalas de comprimento. Estes resultados têm implicações na escolha de volumes representativos de materiais para ensaios e análises mecânicas.

Os trabalhos encontrados na literatura que tratam da determinação de AERs para amostras de solo indeformadas, que é o foco de grande interesse neste trabalho, são escassos. Por exemplo, no Brasil não existe trabalho abordando medidas de AER para amostras de solo utilizando análise de imagens tomográficas.

No entanto, os trabalhos abordados nessa revisão revelam que as menores dimensões para realização de medidas representativas vêm sendo amplamente investigadas para diferentes sistemas porosos, propriedades e escalas. A definição de tais dimensões ainda é realizada de forma individual por cada autor, de acordo com o que se está investigando.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM A MATÉRIA

A radiação eletromagnética monoenergética quando interage com a matéria pode ser espalhada, absorvida ou transmitida. Os principais processos de interação são o efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. Estas interações irão depender da energia da radiação incidente e do número atômico do material absorvedor.

O efeito fotoelétrico ocorre com maior probabilidade quando a energia dos fótons se aproxima da energia de ligação de elétrons nas camadas mais internas do átomo-alvo. Quando a energia dos fótons é bem maior que as energias de ligação dos elétrons do meio, o espalhamento Compton é mais provável. No domínio das altas energias ($E > 1,02$ MeV), há predominância do efeito de produção de pares. O espalhamento Rayleigh, a exemplo de outros processos também presentes na interação da radiação com a matéria, tem contribuição desprezível na TC (KAPLAN, 1962; CRESTANA et al, 1996).

3.2 COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO

Devido aos processos de interação citados anteriormente, a radiação eletromagnética, ao interagir com um dado material, sofrerá atenuação. A probabilidade de que um fóton seja removido de um feixe de radiação incidente I_0 pelos principais processos de interação é representada pelo coeficiente de atenuação linear $\mu(\text{cm}^{-1})$ do material absorvedor:

$$\mu = \tau + \varepsilon + \kappa \quad (1),$$

onde τ representa a contribuição da atenuação devido ao efeito fotoelétrico, ε ao efeito Compton e κ ao efeito produção de pares.

Para um mesmo absorvedor com diferentes valores de espessura $x(\text{cm})$, a quantidade de fótons transmitida através da matéria (I) cai com o aumento desta. A atenuação é dada por um decaimento exponencial simples (Figura 1).

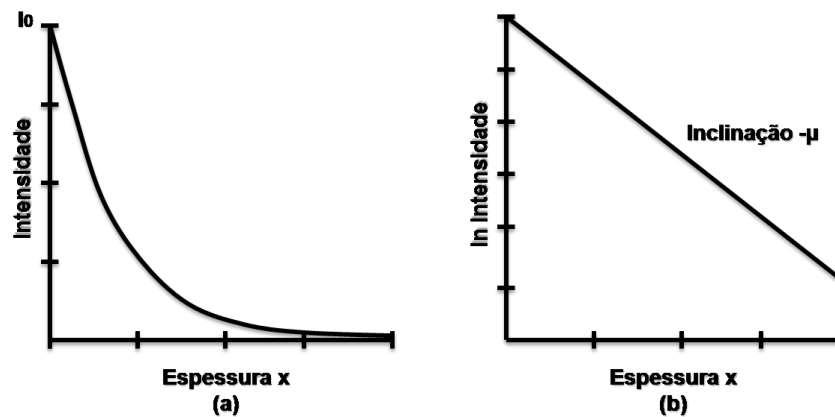


Figura 1 – Curva característica de transmissão de raios gama para uma boa colimação em que $x(\text{cm})$ representa a espessura, $\mu(\text{cm}^{-1})$ o coeficiente de atenuação linear e I/I_0 , a atenuação devido à (a) amostra e (b), seu ajuste linear obtido após linearização. Fonte: Adaptado de Pires, 2006.

O coeficiente de atenuação linear varia com a densidade do material absorvedor. Esta característica o torna limitado. Assim, define-se o coeficiente de atenuação de massa $\mu_m (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$, que é amplamente utilizado, justamente por não variar com o estado físico do material absorvedor (FERRAZ; MANSELL, 1979).

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{ou} \quad \mu = \mu_m \cdot \rho \quad (2)$$

em que $\rho (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ é a densidade física do material absorvedor.

O coeficiente de atenuação de massa depende apenas da energia E e do número atômico Z do material absorvedor (Figura 2). Ele corresponde à soma dos coeficientes de atenuação de todos os elementos químicos que constituem este material:

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (3)$$

onde o termo w_i representa a contribuição percentual de cada elemento químico constituinte do material com o qual o feixe de radiação interage (FERRAZ; MANSELL, 1979).

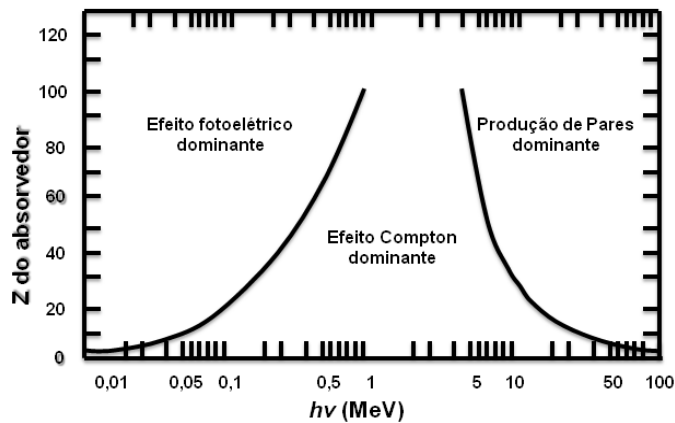


Figura 2 – Influência da energia e número atômico no processo de absorção da radiação pela matéria. Z representa o número atômico de um material absorvedor, h a constante de Planck e ν a frequência da radiação eletromagnética. Fonte: Adaptado de Pires (2006).

3.3 ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA PELA MATÉRIA

A relação entre os fótons transmitidos por um determinado meio homogêneo e sem a presença do mesmo é dada pela lei de Beer-Lambert:

$$I = I_0 e^{(-\mu x)} \quad (4)$$

Para o caso de n regiões de espessura e coeficientes de atenuação linear diferentes, varridos por um feixe de radiação, a lei de Beer-Lambert passa a ser escrita como:

$$I = I_0 e^{-\sum_{j=1}^n \mu_j x_j} \quad (5)$$

Para o solo, considerando-se somente as fases sólida e líquida, tem-se:

$$I = I_0 e^{-x(\mu_{ms}\rho_s + \mu_{mag}\rho_{ag}\theta)} \quad (6)$$

onde μ_{ms} e μ_{mag} ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) são os coeficientes de atenuação de massa do solo e da água, ρ_s ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) a densidade do solo e θ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), a umidade volumétrica. Na

Equação 6, a contribuição devido ao ar foi desconsiderada devido aos valores do μ_{mar} ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) e do ρ_{ar} ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) serem muito menores que os outros dois termos.

3.4 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA TOMOGRÁFICO

As intensidades dos “pixels” das imagens tomográficas são apresentadas em termos de unidades tomográficas (UTs), que são proporcionais aos coeficientes de atenuação linear. O meio de referência para as UTs é o ar, que apresenta a menor atenuação. Para o solo, a UT corresponde à contribuição das partículas minerais, da matéria orgânica, da água e do ar, gerando diferentes valores de μ para cada caminho cruzado pelo feixe de radiação (CRESTANA et al., 1996, PIRES et al., 2005b). A calibração do sistema tomográfico consiste basicamente em relacionar as UTs e os coeficientes de atenuação linear de materiais homogêneos.

Para se obter um valor médio, μ é determinado várias vezes em diferentes posições do material usado na calibração. As UTs são obtidas por meio de matrizes de dados que irão gerar as imagens tomográficas de cada um dos materiais que tiveram os valores de μ determinados. O cálculo da UT consiste na seleção de uma matriz de dados que esteja contida na matriz original (Figura 3) e seu valor médio é adotado como o valor de UT para o material usado na calibração. Após a obtenção de todos os coeficientes de atenuação linear e unidades tomográficas, para cada um dos materiais homogêneos selecionados, um gráfico de UT versus μ é construído.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 80 & 80 & 80 & 80 & 80 & 80 & 80 & 80 & 0 \\ 0 & 80 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 80 & 0 \\ 0 & 80 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 80 & 0 \\ 0 & 80 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 80 & 0 \\ 0 & 80 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 80 & 0 \\ 0 & 80 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 80 & 0 \\ 0 & 80 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 50 & 80 & 0 \\ 0 & 80 & 80 & 80 & 80 & 80 & 80 & 80 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 3 – Esquema de uma matriz de unidades tomográficas (UT). Os valores em vermelho no centro representam os dados selecionados para a determinação da UT média usada na calibração. Fonte: Adaptado de Pires, 2006.

Na calibração é possível encontrar uma relação linear entre a unidade tomográfica e o coeficiente de atenuação linear do solo que está sendo submetido à tomografia. Desta relação se obtém o termo α (coeficiente angular da reta de ajuste) que aparece na equação que relaciona as UTs com diferentes propriedades físicas do solo tais como: ρ_s , densidade da água (ρ_{ag}) e θ :

$$UT = \alpha(\mu_{ms}\rho_s + \mu_{mag}\rho_{ag}\theta) \quad (7)$$

Da Equação (7), obtém-se a densidade do solo:

$$\rho_s = \frac{1}{\mu_{ms}} \left(\frac{UT}{\alpha} - \mu_{mag}\rho_{ag}\theta \right) \quad (8)$$

3.5 MINITOMÓGRAFO DESENVOLVIDO NA EMBRAPA/CNPDIA

Foi desenvolvido na EMBRAPA Instrumentação Agropecuária (CNPDIA, São Carlos-SP) um minitomógrafo, dedicado especialmente à Ciência do Solo (CRUVINEL, 1987; CRUVINEL et al., 1990). O minitomógrafo possui menor complexidade e custo em comparação aos tomógrafos dedicados à área médica. As imagens são adquiridas utilizando fontes radioativas de raios gama como o Césio (^{137}Cs) e o Amerício (^{241}Am), ou ainda raios X com múltiplas energias. O sistema tomográfico usado nesse trabalho de dissertação é semelhante ao equipamento descrito nesse item.

Seu sistema tomográfico se enquadra em um sistema de 1ª geração e oferece resolução da ordem de milímetros. Apresenta arranjo fonte-detector fixo e movimentos de rotação e translação da amostra. Para cada direção de varredura são feitas várias translações em intervalos iguais, conhecidos como passos lineares. Para cada uma dessas translações são contabilizados os fótons que atravessam a amostra durante um tempo de contagem pré-determinado.

Ao final de cada varredura completa (conjunto de passos lineares), o equipamento retorna à sua posição inicial de translação e gira de um ângulo conhecido como passo angular. Inicia-se nova varredura com suas respectivas

contagens de fótons para cada um dos passos lineares já pré-determinados. Esse processo se repete até que se complete uma rotação de 180° da amostra (Figura 4).

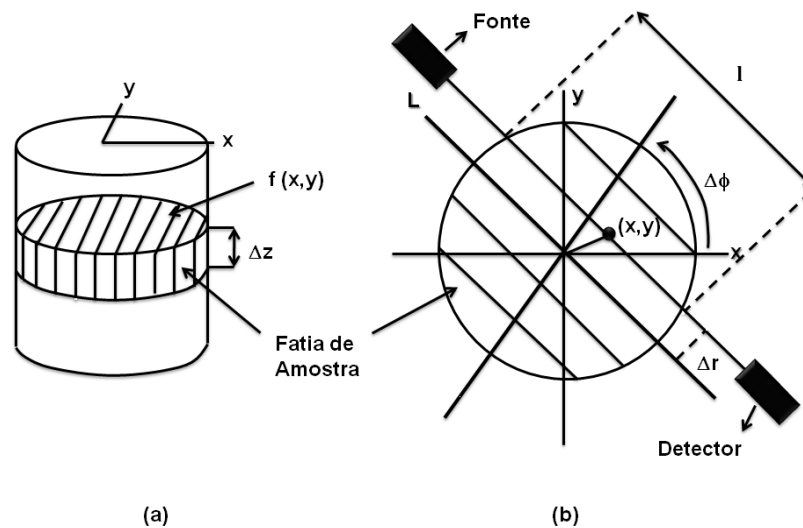


Figura 4 – Medidas de uma amostra cilíndrica usando tomografia computadorizada. (a) Representa uma fatia de um objeto definida como função densidade pontual $f(x,y)$ e tendo uma espessura uniforme Δz . (b) Sistema de coordenada usado para descrever o processo de varredura de uma imagem tomográfica. Fonte: Pires et al., 2005a.

Em sistemas tomográficos de primeira geração os feixes emitidos pela fonte são colimados na saída da fonte e na entrada do detector. As colimações são feitas principalmente com a finalidade de evitar que fótons secundários sejam detectados. O par de colimadores da fonte e do detector é feito de chumbo e a escolha dos seus tamanhos ideais (abertura) é feita conforme as dimensões da amostra analisada.

Um sistema composto de amplificador, fonte de alta tensão, analisador monocanal, contador e temporizador contam os pulsos gerados pelos fótons que chegam ao detector e os armazenam na memória de um computador durante a varredura da amostra. O diagrama de blocos do sistema desenvolvido pelos cientistas da Embrapa está representado na Figura 5.

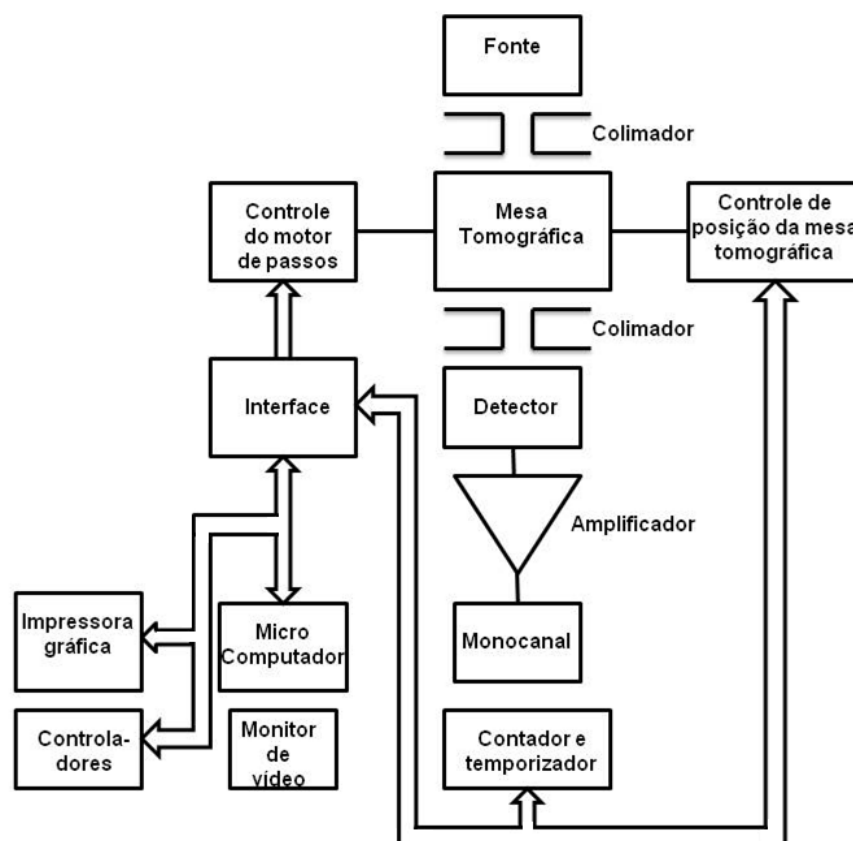


Figura 5 – Diagrama de blocos do minitomógrafo de primeira geração. Fonte: Adaptado de Cruvinel et al., 1990.

3.6 DEFINIÇÃO DO VER A PARTIR DA POROSIDADE

Neste item e no próximo, são definidos o VER e a AER segundo Bear (1988). Aqui, o termo porosidade refere-se à porosidade volumétrica de um meio poroso.

O solo é um meio heterogêneo com porosidade variando no espaço. Assim, o limite superior da dimensão de comprimento do VER deve ser um comprimento característico que indica a taxa na qual as variações da porosidade ocorrem. O limite inferior está relacionado ao tamanho dos poros ou grãos.

Se a amostra é muito pequena, digamos do tamanho de uma única partícula ou poro, a porosidade medida pode variar entre 0% e 100%. Ao medir a porosidade repetidamente em vários pontos adjacentes, os resultados variam amplamente. No entanto, ao aumentar o volume de cada amostra de modo a englobar nele partículas e poros, as flutuações entre medições repetidas em locais adjacentes diminuirá. Ao continuar ampliando a amostra progressivamente, obtém-se uma medida consistente

de porosidade média do solo. O volume mínimo de amostra necessário para obtenção de um valor consistente de um parâmetro de medida é denominado VER. Quanto mais uniforme for o solo, menor será o tamanho do VER.

Para definir o VER de um meio poroso, considera-se primeiramente o domínio ocupado por este meio com volume ΔU_i , de formato esférico e muito maior que um único poro ou partícula, para o qual um ponto P é o centro. Para este volume pode-se determinar a razão:

$$\phi_i \equiv \phi_i(\Delta U_i) = \frac{(\Delta U_{\text{poros}})_i}{\Delta U_i} \quad (9)$$

onde ϕ_i representa a porosidade do meio e $(\Delta U_{\text{poros}})_i$ é o volume de poros dentro de ΔU_i .

Como ΔU_i é suficientemente grande em relação ao volume do poro ou grão que contém P , não faz sentido definir o valor da porosidade nas proximidades deste, a partir da razão $(\Delta U_{\text{poros}})_i / \Delta U_i$. Para determinar o quanto pequeno ΔU_i deve ser para representar a porosidade do meio nas vizinhanças de P , reduzimos gradualmente ΔU_i em torno de P , determinando a razão $(\Delta U_{\text{poros}})_i / \Delta U_i$ para os volumes $\Delta U_1 > \Delta U_2 > \Delta U_3 \dots$, obtendo uma sequência de valores $\phi_i(\Delta U_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots$.

Para grandes valores de ΔU_i , a razão ϕ_i pode sofrer mudanças graduais à medida que ΔU_i é reduzido, especialmente quando o domínio considerado não é homogêneo.

Abaixo de certo valor de ΔU_i , dependendo da distância de P a partir de limites de heterogeneidade, estas flutuações tendem a decair, deixando somente pequenas amplitudes que são devido a distribuições aleatórias de tamanhos de poros na vizinhança de P . Contudo, abaixo de certo valor ΔU_0 , observa-se grandes flutuações na razão ϕ_i . Isto acontece quando as dimensões de ΔU_i aproximam-se das de um único poro ou partícula.

Como $\Delta U_i \rightarrow 0$, convergindo no ponto P , ϕ_i será igual a 1 (100%) ou 0 (0%), dependendo se P está dentro de um poro ou da matriz sólida do meio. A

relação entre ϕ_i e ΔU_i para os domínios do meio poroso e dos efeitos microscópicos para meios homogêneos e não homogêneos, é ilustrada na Figura 6.

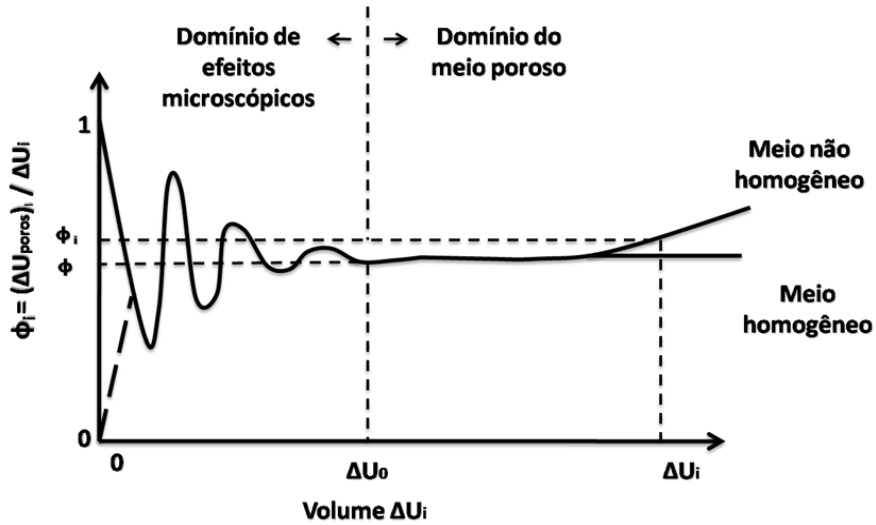


Figura 6 – Representação esquemática da definição do volume elementar representativo (VER) usado na medida da porosidade (ϕ). ΔU_0 e ΔU_i representam o VER e a variação de um volume qualquer. Fonte: Adaptado de Bear (1988).

É possível observar na Figura 6 que quando ϕ_i é medido em um volume próximo de ΔU_i ocorre uma divergência de seu valor em relação ao obtido para ΔU_0 , para a amostra não homogênea. Uma possível explicação para isso seriam os efeitos de bordadura quando o volume representativo selecionado se aproxima do limite da amostra. No caso do presente estudo, isso poderia ser verificado pela maior densidade da amostra próximo às bordas.

A porosidade do meio $\phi(P)$ em um ponto P é definida como o limite da razão ϕ_i conforme $\Delta U_i \rightarrow \Delta U_0$:

$$\phi(P) = \lim_{\Delta U_i \rightarrow \Delta U_0} \phi_i \{ \Delta U_i(P) \} = \lim_{\Delta U_i \rightarrow \Delta U_0} \frac{(\Delta U_{\text{poros}})_i(P)}{\Delta U_i} \quad (10)$$

Para valores de $\Delta U_i < \Delta U_0$, considera-se a presença real de poros e partículas sólidas. Neste intervalo não há um valor único que possa representar a porosidade em P . O volume ΔU_0 é, portanto, o volume elementar representativo ou o ponto físico ou material do meio poroso em P .

O limite $\Delta U_i \rightarrow 0$ é inexpressivo. Sendo assim, a partir da definição do VER, segue-se que suas dimensões são tais que o efeito da adição ou subtração de um ou vários poros não tem influência significativa no valor de ϕ .

Assumindo que ambos ΔU_0 e ΔU_{poros} variam suavemente nas vizinhanças de P , para quaisquer dois pontos próximos P e P' , tem-se:

$$\phi(P) = \lim_{P' \rightarrow P} \phi(P') \quad (11)$$

implicando que ϕ é uma função contínua dentro do meio poroso. Assim, introduzindo o conceito de porosidade e a definição do VER, o meio real é substituído por um meio contínuo fictício no qual se atribui valores de quaisquer propriedades para algum ponto deste. O VER também pode ser definido com base em outro parâmetro diferente da porosidade.

3.7 DEFINIÇÃO DE AER A PARTIR DA POROSIDADE SUPERFICIAL

Para a definição da AER, o procedimento é similar ao descrito anteriormente, para a definição do VER.

Considera-se um ponto P no domínio de um meio poroso, e um plano, cuja normal é na direção do vetor unitário \hat{j} , passando através deste. Tendo que $(\Delta A_j)_i$, $i = 1, 2, 3, \dots$ denota a sequência de áreas com centros em P , de tal forma que $(\Delta A_j)_1 > (\Delta A_j)_2 > (\Delta A_j)_3, \dots$ como o plano em questão passa através de ambos, matriz sólida e espaço poroso, cada área $(\Delta A_j)_i$ conterà uma “área de partículas” $(\Delta A_{pj})_i$ e uma “área de poros” $(\Delta A_{porosj})_i$. Como para a porosidade volumétrica, primeiramente define-se uma sequência de razões:

$$(\phi_{Aj})_i = \frac{(\Delta A_{porosj})_i}{(\Delta A_j)_i} \quad (12)$$

onde $(\phi_{Aj})_i$ representa a porosidade superficial do meio.

Ao se fazer uma representação gráfica de $(\phi_{Aj})_i$ em função das áreas $(\Delta A_j)_i$ se obtém uma curva similar à mostrada na Figura 6. Usando esta curva definimos que a menor área, $(\Delta A_j)_0$, para a qual não ocorrem grandes flutuações, como a área elementar representativa (AER) do meio voltada para a direção \hat{j} em P . Em seguida, a porosidade superficial direcional em P , para a área voltada para a direção \hat{j} , é obtida por um processo limite, como na Equação 10:

$$\phi_{Aj}(P) = \lim_{(\Delta A_j)_i \rightarrow (\Delta A_j)_0} (\phi_{Aj})_i = \lim_{(\Delta A_j)_i \rightarrow (\Delta A_j)_0} \frac{(\Delta A_{\text{porosj}})_i}{(\Delta A_j)_i} \quad (13)$$

Também assumindo que:

$$\phi_{Aj}(P) = \lim_{P' \rightarrow P} \phi_{Aj}(P') \quad (14)$$

Para determinar a relação entre ϕ_{Aj} e ϕ em algum ponto P do meio poroso, considera-se um VER tendo a forma de um cilindro cujo centro é em P . O eixo cilíndrico é na direção \hat{j} . A área de sua seção transversal normal é $(\Delta A_j)_0$ e sua altura é $L_j = \frac{\Delta U_0}{(\Delta A_j)_0}$ na direção \hat{j} (Figura 7).

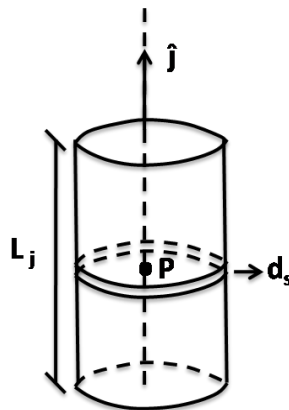


Figura 7 – Representação gráfica do cálculo do volume de poros no interior de um cilindro.

O volume de poros dentro deste cilindro é:

$$\phi(P)\Delta U_0 = \int_{s(P)-L_j/2}^{s(P)+L_j/2} \Delta A_{\text{porosj}} \Big|_{s'} ds' = \int_{s(P)-L_j/2}^{s(P)+L_j/2} \phi_{Aj}(s')(\Delta A_j)_0 ds' \quad (15)$$

$$\phi(P)\Delta U_0 = (\Delta A_j)_0 \int_{s(P)-L_j/2}^{s(P)+L_j/2} \phi_{Aj}(s') ds' = (\Delta A_j)_0 \bar{\phi}_{Aj} L_j = \bar{\phi}_{Aj} \Delta U_0$$

Assim,

$$\bar{\phi}_{Aj} = \frac{1}{L_j} \int_{s(P)-L_j/2}^{s(P)+L_j/2} \phi_{Aj}(s) ds \quad (16)$$

onde $\bar{\phi}_{Aj}$ é o valor médio de ϕ_{Aj} ao longo do eixo cilíndrico e s é o comprimento medido ao longo deste eixo.

Se, ao invés do cilindro, tivermos um VER de uma forma qualquer, deve-se obter:

$$\phi(P)\Delta U_0 = \int_{L_j} \phi_{Aj}(s)(\Delta A_j)_0(s) ds \quad (17)$$

Como $(\Delta A_j)_0(s)$ é sempre positivo e $\phi_{Aj}(s)$ é contínuo e independente de $(\Delta A_j)_0$, pode-se escrever:

$$\int_{L_j} \phi_{Aj}(s)(\Delta A_j)_0(s) ds = \bar{\phi}_{Aj} \int_{L_j} (\Delta A_j)_0(s) ds = \bar{\phi}_{Aj} \Delta U_0 \quad (18)$$

onde L_j é o comprimento do segmento dentro do VER de uma linha passando através de P na direção \hat{j} . Sendo $\overline{(\Delta A_j)_0}$ o valor médio de $(\Delta A_j)_0$, temos:

$$\Delta U_0 = \int_{L_j} (\Delta A_j)_0(s) ds; \quad \overline{(\Delta A_j)_0} = \frac{1}{L_j} \int_{L_j} (\Delta A_j)_0(s) ds \quad (19)$$

Em ambos os casos o resultado final é:

$$\phi(P) = \bar{\phi}_{Aj}(P) \quad (20)$$

Ou seja, a porosidade de um meio poroso em um ponto é igual ao valor médio da porosidade superficial direcional naquele ponto. Contudo, desde que $\phi(P)$ é independente da direção de \hat{j} , segue-se que $\bar{\phi}_{Aj}(P)$ também deve ser independente da direção, e é suficiente para definir uma porosidade superficial média $\bar{\phi}_A$ (ou simplesmente porosidade superficial, ϕ_A).

Aqui, é importante salientar que a expansão de uma AER para um VER, determinada para uma propriedade de um sistema poroso em uma dada escala, somente poderá ser realizada quando se tratar de um meio isotrópico. Para meios não isotrópicos, como é o caso do solo, tamanhos representativos (comprimentos, áreas ou volumes) precisam ser estabelecidos individualmente e não se pode obter, por exemplo, o VER a partir da AER ou do CER, e sim, somente a partir de suas médias.

3.8 RELAÇÕES MASSA-VOLUME DO SOLO

3.8.1 Densidade de Partículas (ρ_p)

A densidade de partículas (ρ_p) é dada pela razão entre a massa das partículas sólidas (m_p) e o volume (V_p) ocupado pelas mesmas:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (21)$$

A densidade de partículas depende da constituição do solo. Na maioria dos solos minerais, oscila em torno de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$, que é a densidade do quartzo. Este mineral é geralmente o que prevalece na fração grosseira do solo. Alguns dos minerais que compõem a fração mais fina do solo têm uma densidade similar. No

entanto, a presença de óxidos de ferro e de vários outros minerais pesados (geralmente definidos como aqueles que têm uma densidade superior a $2,90 \text{ g.cm}^{-3}$) aumenta o valor médio de ρ_p , enquanto a presença de matéria orgânica diminui, em geral, a densidade média da fase sólida (HILLEL, 1998; REICHARDT, TIMM, 2004).

A determinação da densidade das partículas do solo é feita pela pesagem do solo seco e pela medida do volume ocupado por ele. Este volume é obtido pela variação de volume registrada quando o solo é imerso em um líquido, dentro de picnômetros previamente calibrados (EMBRAPA, 1997).

3.8.2 Densidade do Solo (ρ_s)

A densidade do solo (ρ_s) é dada pela razão entre a m_p e o volume total (V_T) da amostra de solo (Equação 22). Como a densidade do solo varia com o volume total da amostra, ela pode ser usada como um índice do seu grau de compactação (REICHARDT; TIMM, 2004).

$$\rho_s = \frac{m_p}{V_T} \quad (22)$$

A densidade do solo é afetada pela sua estrutura. Assim, quanto maior o grau de compactação do solo, maior será ρ_s . Também, é importante notar que ρ_s será sempre inferior à ρ_p . Mesmo em solos muito compactados, ρ_s permanece sensivelmente inferior à ρ_p , uma vez que ambas só poderiam ser iguais caso todo o espaço poroso pudesse ser eliminado de uma determinada amostra de solo (HILLEL, 1998).

3.8.3 Porosidade do solo (ϕ)

A porosidade do solo é um índice do seu espaço poroso. É definida por:

$$\phi = \frac{V_{\text{poros}}}{V_T} = \frac{V_T - V_p}{V_T} \quad (23a)$$

$$\phi = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}\right) \quad (23b)$$

onde V_{poros} (cm^3) representa o volume de poros.

Solos de textura grossa tendem a ser menos porosos em relação a solos de textura fina, embora o tamanho médio de poros individuais é maior no primeiro. Em solos argilosos, a porosidade é muito variável devido a processos de agregação que ocorrem quando estes solos são submetidos a processos naturais tais como ciclos de umedecimento e secamento. Por exemplo, em solos expansivos onde predominam argilas do tipo 2:1, os processos de expansão durante umedecimento e contração no secamento causam grandes modificações na estrutura do solo e, conseqüentemente, em sua porosidade.

Como geralmente definida, a porosidade volumétrica refere-se à fração de volume de poros que deve ser igual, em média, à porosidade superficial (a fração de poros em uma área representativa transversal), bem como a porosidade média linear (o comprimento fracionário de poros ao longo de uma reta que passa através do solo em qualquer direção). No entanto, a porosidade total não traz informações quanto aos tamanhos ou formas dos poros do solo (HILLEL, 1998).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 COLETA DAS AMOSTRAS

Foram coletadas 18 amostras de torrão de solo em um campo experimental, pertencente à ESALQ/ USP, em Piracicaba, Brasil (22°42'S e 47°38'W). O solo possui textura argilosa (43% de argila, 24% de areia e 33% de silte) e foi classificado como um Nitossolo Vermelho Eutroférico (EMBRAPA, 2006).

As amostras foram coletadas em triplicata, sendo selecionados 6 pontos de coleta ao longo de uma transeção de 200 m de comprimento. Os volumes dos torrões coletados variaram de 50 a 100 cm³.

As amostras foram coletadas na camada superficial (0-15 cm), sendo realizada uma pequena trincheira no solo e coletados os torrões dentro da trincheira com a ajuda de um formão. Antes da realização da trincheira, a vegetação acima da camada superficial do solo foi removida.

4.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E POROSIDADE DO SOLO

As amostras de torrão de solo foram submetidas a dois métodos para determinação da sua densidade. Primeiramente, a técnica tomográfica foi aplicada e, após, o método do Torrão Parafinado.

4.2.1 Tomografia Computadorizada

O equipamento tomográfico utilizado foi desenvolvido na EMBRAPA/CNPDIA, como descrito no item 3.5. Ele é equipado com fonte de raios gama de ²⁴¹Am com atividade aproximada de 3,7 GBq e detector de NaI(Tl) de 7,62 cm x 7,62 cm. Os colimadores de chumbo (Pb) usados na saída da fonte e entrada do detector foram de 1 mm e 4,5 mm, respectivamente. As matrizes de dados de UT obtidas foram de 80 x 80 para todas as tomografias. A resolução obtida para as amostras de torrão foi de 1,1 x 1,1 mm². Foi obtida uma imagem 2D para cada torrão com a varredura sendo realizada no centro da amostra. Para fixar os torrões na mesa de medidas durante a tomografia foi usado fita adesiva. O tempo total para obtenção de cada imagem tomográfica foi de aproximadamente 23,2 h. A

temperatura da sala durante as medidas foi mantida constante 20 ± 1 °C. A máxima contagem de radiação para o feixe livre foi de aproximadamente 13.500 ctg para todas as tomografias.

Na calibração do minitomógrafo foram utilizadas amostras dos seguintes materiais homogêneos: acrílico, etanol, água, nylon e glicerina. As amostras líquidas foram acondicionadas em caixas de acrílico. A amostra de álcool (C_2H_5OH) apresentava 99,3% de pureza e a amostra de glicerina ($C_3H_5(OH)_3$) apresentava 87% de pureza. A água usada era destilada. O tempo total gasto por amostra usada na calibração para realização das tomografias foi de 101 h (peça de acrílico), 62 h (água destilada), 44 h (álcool), 71 h (peça de nylon) e 50 h (glicerina). As amostras foram mantidas fixas na mesa de medidas com o auxílio de fita adesiva. Somente uma varredura por amostra foi realizada. Imagens 2D de seções transversais centrais das amostras foram obtidas para a calibração. As áreas nas matrizes de dados de UT selecionadas para a calibração do sistema (item 3.4) foram escolhidas longe das bordas das amostras para evitar artefatos. Uma descrição detalhada do processo de calibração de sistemas tomográficos de primeira geração pode ser encontrada no trabalho de Crestana et al. (1992).

4.2.2 Coeficiente de Atenuação

Para a avaliação do coeficiente de atenuação linear do solo (μ_s), amostras foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2,0 mm. Depois de peneirado o solo foi transferido para uma caixa com dimensões de 4,9 cm x 5,1 cm x 5,5 cm, possuindo paredes finas de acrílico. As intensidades dos fótons monoenergéticos, com energias de 59,54 keV, foram obtidas em três diferentes posições da caixa de acrílico. Cinco repetições foram realizadas para cada posição. O mesmo procedimento foi realizado para avaliação do coeficiente de atenuação linear da água (μ_{ag}).

Os coeficientes de atenuação de massa do solo e da água, μ_{ms} e μ_{mag} , foram obtidos a partir de μ_s utilizando uma ρ_s conhecida (um valor específico para cada amostra obtido via tabela ou medida experimental), e de μ_{ag} considerando $\rho_{ag} = 1$ g.cm⁻³. Os coeficientes de atenuação de massa experimentais foram calculados

dividindo-se o coeficiente de atenuação linear experimental pela densidade das amostras (Equação 2).

4.2.3 Cálculo do Erro Atribuído ao Equipamento Tomográfico

Para determinação do erro atribuído ao equipamento seguiu-se o procedimento descrito em Pedrotti et al. (2003a), onde este é calculado a partir da sensibilidade do equipamento, como segue:

- 1) Sensibilidade do equipamento (ρ_{sens}):
 - a) Estipulou-se a diferença de 1 UT;
 - b) Fixou-se o valor de θ para diferentes amostras do solo (para amostras secas ao ar esse valor de θ será o residual);
 - c) Substituíram-se os valores dos itens (a) e (b) na Equação (8), juntamente com os valores de α , μ_{ms} , μ_{mag} e ρ_{ag} , e determinou-se o valor de ρ_s nestas condições. O valor encontrado corresponde ao menor valor de ρ_s possível de ser medido no equipamento tomográfico, ou seja, sua sensibilidade (ρ_{sens}).

- 2) Erro atribuído ao equipamento:

- a) Determinou-se a média dos valores de UTs (\overline{UT}) encontradas em diferentes amostras¹;
- b) Determinou-se o coeficiente de variação (CV) no mapa tomográfico (matriz de dados de UTs) de uma substância homogênea (água) e utilizou-se este valor para determinação do erro médio (\overline{E}) nas amostras:

$$\overline{E} = \frac{CV \cdot \overline{UT}}{100} \quad (24)$$

- c) O erro atribuído ao equipamento foi obtido pelo produto do erro médio nas amostras pelo valor da sensibilidade do equipamento.

$$E_{\text{equip.}} = \overline{E} \cdot \rho_{\text{sens}} \quad (25)$$

¹ O valor de UT utilizado corresponde à média das UTs das amostras 01, 02 e 12.

4.2.4 Método do Torrão Parafinado

O torrão parafinado (TP) é um método amplamente aplicado na determinação de ρ_s devido à sua tradição e viabilidade técnica e econômica. Ele consiste na impermeabilização de um torrão de solo seco com parafina fundida. Em seguida, ele é mergulhado em água para que se possa determinar o seu volume pelo Princípio de Arquimedes.

O procedimento realizado foi adaptado de EMBRAPA (1997), e consistiu nos seguintes passos:

- a) Mediu-se a massa do torrão seco;
- b) Amarrou-se o torrão com um barbante, deixando uma ponta para poder segurá-lo;
- c) Envolveu-se completamente o torrão com parafina fundida até que se obtivesse uma perfeita impermeabilização;
- d) Mediu-se a massa do torrão depois de impermeabilizado e esfriado com uma balança analítica com precisão de 0,01 g;
- e) Determinou-se a massa do torrão parafinado suspenso na água, utilizando uma balança. O valor do volume do torrão + parafina, V_{TP} , foi calculado considerando o produto da massa medida na balança e a densidade da água ($\rho_{ag} = 1 \text{ g.cm}^{-3}$).
- f) Determinou-se o volume da parafina, $V_{parafina}$, utilizada na impregnação do solo, considerando que a sua densidade, $\rho_{parafina}$, é de $0,9 \text{ g.cm}^{-3}$:

$$V_{parafina} = \frac{m_{parafina}}{\rho_{parafina}} = \frac{m_{TP} - m_{torrão}}{\rho_{parafina}} \quad (26)$$

onde $m_{parafina}$ corresponde à massa de parafina utilizada; m_{TP} , à massa do torrão parafinado e $m_{torrão}$, à massa do torrão.

- g) Determinou-se o volume do torrão ($V_{torrão}$):

$$V_{torrão} = V_{TP} - V_{parafina} \quad (27)$$

- h) Calculou-se a densidade do solo:

$$\rho_s = \frac{m_{torrão}}{V_{TP} - V_{parafina}} = \frac{m_{torrão}}{V_{torrão}} \quad (28)$$

Foi realizada somente uma medida por amostra. O valor médio de densidade obtido pelo método do torrão correspondeu à média das 18 amostras analisadas.

4.2.5 Procedimentos para Avaliação da AER

A matriz de dados obtida via Tomografia Computadorizada (80 x 80) foi primeiramente convertida nas matrizes densidade e porosidade via Equações (8) e (23b). O programa “Microvis” (MICROVIS, 2000) foi usado para reconstrução e análise das imagens tomográficas. Este apresenta escala de cinza onde as regiões mais escuras correspondem a menores valores de densidade e, conseqüentemente, menores valores de UT. No entanto, neste trabalho os menores valores de densidade estão representados por regiões mais claras nas imagens tomográficas.

As 18 amostras de torrão de solo utilizadas apresentaram passos lineares durante a varredura de 1,0 e 1,1 mm. Isto é importante em virtude da seleção de áreas iguais para análise tomográfica para todas as amostras. Na Tabela 1 são apresentados os passos lineares e translações correspondentes a cada uma das amostras (denominadas Am 01, Am 02,... e Am 18). As diferenças nas translações e nos passos lineares são devido às dimensões dos torrões de solo analisados.

Tabela 1 – Dados da reconstrução de imagens tomográficas para as 18 amostras de torrão de solo.

Am	Passo Linear (cm)	Translação (cm)	Am	Passo Linear (cm)	Translação (cm)
01	0,11	9,07	10	0,11	9,07
02	0,10	8,18	11	0,11	9,07
03	0,11	9,07	12	0,10	8,18
04	0,10	8,18	13	0,11	9,07
05	0,11	9,07	14	0,11	9,07
06	0,10	8,18	15	0,11	9,07
07	0,11	9,07	16	0,11	9,07
08	0,11	9,07	17	0,10	8,18
09	0,10	8,18	18	0,10	8,18

Para determinação de ρ_s , delimitou-se a maior área retangular possível no interior da amostra, sem a interferência das bordas, na imagem tomográfica. As bordas são evitadas, pois, geralmente na interface amostra-ar podem existir artefatos nas imagens que podem afetar a análise de propriedades físicas do solo ou qualquer material via tomografia (CRUVINEL et al., 1990; KAK; SLANEY, 1999).

Os pontos referentes a cada vértice da área retangular foram selecionados na imagem tomográfica no Microvis e, posteriormente, identificados e demarcados na matriz de UTs. Em seguida, foram selecionadas áreas quadrangulares concêntricas consecutivas (Figura 8) sem extrapolar a área máxima anteriormente selecionada. A área inicial foi obtida a partir de uma matriz quadrada de ordem 1 x 1 (1,1 mm x 1,1 mm) (Tabela 2).

Feito isso, essas áreas também foram identificadas nas matrizes densidade e porosidade. O número de áreas delimitadas no interior de cada amostra variou de acordo com seu tamanho.

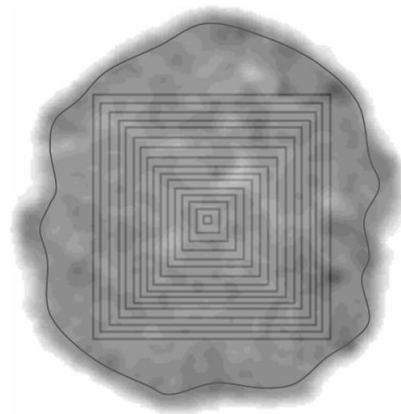


Figura 8 – Esquema da construção das áreas quadrangulares concêntricas sobre as imagens tomográficas. A área próxima à borda representa a área livre (AL). Regiões mais escuras representam maiores valores de densidade.

Tabela 2 – Relação das áreas adotadas para o cálculo da área elementar representativa (AER) e suas respectivas medidas.

Área	Medida (mm ²)	Área	Medida (mm ²)	Área	Medida (mm ²)	Área	Medida (mm ²)
01	1,2	05	98,0	09	349,7	13	756,3
02	10,9	06	146,4	10	436,8	14	882,1
03	30,3	07	204,5	11	533,6	15	1017,6
04	59,3	08	272,3	12	640,1	16	1162,8

A ρ_s foi determinada para cada uma das áreas e também para uma área, usando a ferramenta mão livre (*AL*) do Microvis, englobando quase toda a imagem tomográfica com formato irregular. Aqui, a ρ_s e ϕ obtidas via TC correspondem ao valor médio desta propriedade física, já que a TC possibilita sua análise de forma pontual (“pixel” a “pixel”).

A partir dos resultados obtidos via TC e TP, foram realizadas as seguintes análises:

1) Análise da relação entre os métodos utilizados (TC e TP) para os valores obtidos de ρ_s das amostras de torrão de solo, com a elaboração dos seguintes gráficos:

- a) ρ_s (TP) x ρ_s (TC) das 18 amostras, onde os valores de ρ_s (TC) correspondem aos obtidos para *AL*;
- b) ρ_s (TP) x ρ_s (TC) para as 9 (Am 01, Am 04, Am 07, Am 09, Am 10, Am 12, Am 14, Am 17 e Am 18) das 18 amostras que comportaram até 14 áreas e também para a *AL*.

2) Determinação da AER em função de ρ_s :

A definição da AER foi estabelecida com base no trabalho de VandenBygaart e Protz (1999). No entanto, os critérios de variação adotados para definição da AER em função da variação de ρ_s , nesse trabalho de dissertação, são mais rigorosos em comparação aos adotados por estes autores. Abaixo são listados os critérios para definição da AER em função de ρ_s (itens a e b) e também as análises realizadas (itens c e d):

- a) Desvio relativo do valor médio de ρ_s entre a última e cada uma das demais áreas não superior a 5%, 4%, 3%, 2% e 1%;
- b) Que pelo menos três áreas consecutivas não devem diferir entre si nos valores de ρ_s , utilizando o critério de variação do item a;
- c) Elaboração de gráficos de variação dos valores de ρ_s para as áreas de cada amostra. Nestes, o valor de ρ_s obtido via TP foi inserido como uma linha de

referência. Consta também nesses gráficos a demarcação das áreas para as quais a AER foi atingida para os diferentes critérios listados no item a;

- d) Elaboração de gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras que atingiram a AER para os desvios de 5%, 4%, 3%, 2% e 1%, em função da área selecionada no interior da amostra.

3) Determinação da AER em função de ϕ , segundo os passos:

- a) Determinação da frequência dos valores de porosidade dentro de cada área. Para a AL , a frequência contabilizada corresponde ao intervalo de porosidade contida na AL selecionada para cada amostra;
- b) Elaboração de gráficos da frequência da porosidade pela imagem tomográfica (%). Este procedimento foi realizado para cada uma das áreas;
- c) Determinação da largura total à meia altura (do inglês, “full width at half maximum” - FWHM) de cada distribuição por meio de ajustes gaussianos, que foram obtidos a partir da 5ª área de cada amostra (matriz 9 x 9). Neste trabalho, o parâmetro FWHM foi usado para descrever a distribuição da porosidade das amostras em cada área.

A equação de ajuste é:

$$y_c = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_c)^2}{w^2}} \quad (29)$$

em que y_c corresponde à altura máxima da curva de ajuste, e é dado por

$y_c = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}}$; y_0 corresponde à base da curva; A , à área sob a curva, e w é

um parâmetro dado por $w = \frac{w_1}{\sqrt{\ln(4)}}$, onde w_1 corresponde à FWHM da curva; x

corresponde a uma posição qualquer no eixo das abscissas e x_c à posição central da curva de ajuste neste mesmo eixo (Figura 9).

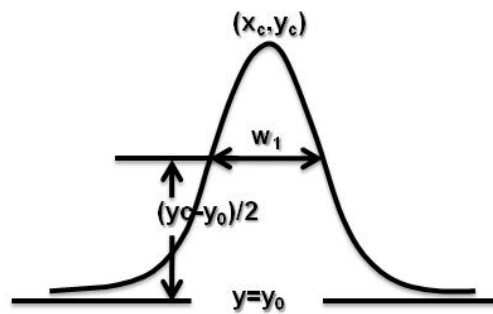


Figura 9 – Representação esquemática dos parâmetros usados para o cálculo da largura total à meia altura (FWHM) para uma distribuição normal. Adaptado de Origin (2007).

- d) Determinação dos desvios relativos entre o valor da FWHM correspondente da distribuição da porosidade da última área quadrangular e cada uma de suas áreas anteriores;
 - e) Estabeleceu-se que a AER para a distribuição da porosidade do solo foi atingida quando 3 áreas consecutivas não apresentaram desvios superiores a 10%;
 - f) Gráficos dos valores da FWHM para cada área das amostras (inclusive para a *AL*) foram construídos. Para as amostras que atingiram a AER, foram demarcadas as áreas correspondentes; também foram indicadas as áreas para as quais a AER seria atingida se o desvio considerado fosse de 15%.
- 4 Determinação da AER em função de ρ_s e ϕ :

A área mínima considerada para que se obtenham medidas elementares representativas foi considerada como sendo a área para a qual as amostras atingiram a AER tanto para a análise da porosidade, quanto para a densidade do solo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA TOMOGRÁFICO E COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO

A curva de calibração obtida para o sistema tomográfico de primeira geração é apresentada na Figura 10. O coeficiente de correlação (r) de 0,995 demonstra um bom ajuste entre os dados. Essa boa correlação entre os dados experimentais na calibração do sistema é de suma importância para a obtenção de medidas representativas das propriedades físicas do solo obtidas via TC.

Os valores obtidos dos coeficientes de atenuação de massa do solo e da água, μ_{ms} e μ_{mag} , foram $0,3385$ e $0,1989 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, respectivamente. Esses valores estão coerentes com os valores experimentais e teóricos obtidos por outros autores para a água e solos de textura semelhante (FERRAZ; MANSELL, 1979; CESAREO; DEASSIS; CRESTANA, 1994; HUBBELL; SELTZER, 1995; VAZ et al., 1999; PEDROTTI et al., 2005).

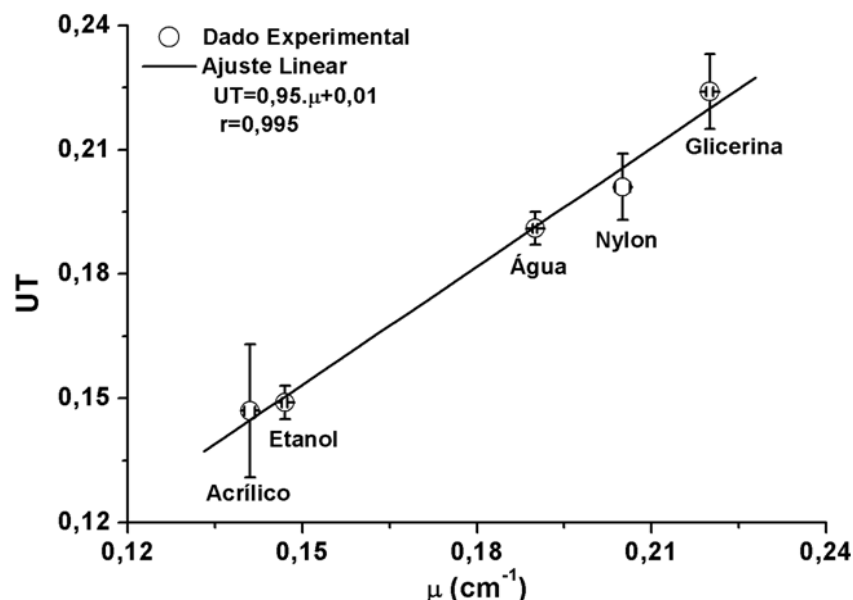


Figura 10 – Relação experimental entre as unidades tomográficas (UT) das imagens obtidas pelo tomógrafo e os coeficientes de atenuação lineares (μ) para substâncias homogêneas usadas na calibração do tomógrafo. As barras de erro verticais representam o desvio padrão dos valores de UT na matriz de dados selecionada. As barras de erro horizontais representam o desvio padrão da média ($n=3$).

5.2 CORRELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DA TC E DO TP

Após serem secas ao ar, as amostras apresentaram umidade gravimétrica residual $U=0,01 \text{ g.g}^{-1}$ e densidade de partículas $\rho_p=2,65 \text{ g.cm}^{-3}$. Os valores de ρ_s obtidos por meio dos métodos da TC e TP, e respectivos desvio padrão (s) e CV (DOWNING; CLARK, 2000) via TC, encontram-se na Tabela 3. Os valores médios de densidade obtidos levando em consideração as 18 amostras foram de $1,69\pm 0,07$ e $1,68\pm 0,08 \text{ g.cm}^{-3}$, para os métodos da TC e do TP, respectivamente. O desvio relativo percentual considerando como referência o método TP foi de aproximadamente 0,6%. Esse resultado mostra a boa concordância entre os métodos de medida.

As discrepâncias entre os métodos podem ser explicadas pelos erros inerentes a cada um:

a) Na aplicação do TP, pode-se citar a possibilidade da entrada de parafina no interior dos poros da amostra, durante o processo de impregnação, se esta estiver a uma temperatura acima do ideal. Quando isso ocorre mais massa de parafina do que a necessária para impregnação penetra na amostra levando a valores super-estimados de ρ_s . Também, se a temperatura for demasiadamente baixa, a parafina pode não envolver completamente o torrão e quando este for imerso em um fluido, para determinação do seu volume, ocorrerá a penetração de água na amostra. Ainda, para amostras demasiadamente pequenas, a possibilidade de erro experimental é maior. Nesse caso, uma possível fonte de erros é a menor diferença de volume entre a amostra e parafina usada para envolvê-la. Nesse caso, como a densidade da parafina é menor do que a da água, dificuldades para imergir o torrão tornam-se um problema real inviabilizando o uso do método.

b) Para a TC, a exatidão na aplicação da técnica é limitada principalmente por erros gerados na determinação de I_0 e I , devido ao processo de desintegração da fonte radioativa ser estatístico (KAPLAN, 1962). Tem-se também o erro atribuído ao equipamento, relacionado à sua sensibilidade (FERRAZ; MANSELL, 1979; PEDROTTI et al., 2003a). Neste trabalho, este erro foi avaliado em $0,06 \text{ g.cm}^{-3}$. Segundo Pedrotti et al. (2003a), recomenda-se utilizar o E_{equip} quando este for maior que o desvio padrão da amostra e vice-versa. Leva-se sempre em consideração o maior erro.

A eficácia da TC em comparação a métodos tradicionais, como o TP, já foi avaliada por outros autores. Assim como neste trabalho, Fante Júnior et al., (2000, 2002) obtiveram resultados razoavelmente concordantes entre estes dois métodos, ao determinar a ρ_s de amostras indeformadas de solo. Em Timm et al. (2005), os resultados obtidos via TC e TP não diferiram significativamente entre si pelo teste estatístico de Tukey para $P < 0,05$.

Tabela 3 – Valores de densidade do solo (ρ_s) de 18 amostras de torrão de solo obtidos pelos métodos da tomografia computadorizada (TC) e do torrão parafinado (TP). O termo CV representa o coeficiente de variação.

Am	TC		TP		Am	TC		TP	
	$\rho_s (g.cm^{-3})$	CV(%)*	$\rho_s (g.cm^{-3})$			$\rho_s (g.cm^{-3})$	CV(%)	$\rho_s (g.cm^{-3})$	
01	1,53	3,9	1,60		10	1,70	3,5	1,79	
02	1,66	3,6	1,65		11	1,70	3,5	1,66	
03	1,57	3,8	1,56		12	1,73	3,5	1,70	
04	1,71	3,5	1,75		13	1,68	3,6	1,67	
05	1,73	3,5	1,72		14	1,81	3,3	1,75	
06	1,75	3,4	1,72		15	1,70	3,5	1,69	
07	1,71	3,5	1,72		16	1,74	3,4	1,65	
08	1,67	3,6	1,71		17	1,62	3,7	1,56	
09	1,65	3,6	1,63		18	1,78	3,4	1,72	

*O CV foi obtido considerando o valor de desvio padrão da média da matriz de ρ_s ou o erro do equipamento ($E_{equip.}$).

Os métodos apresentaram $r=0,76$ (Figura 11). Pode-se dizer que o resultado representa uma correlação positiva relativamente forte entre os dados. Porém, a diferença observada entre os métodos pode ser explicada pelo fato dos mesmos apresentarem metodologias de análise bem diferentes, ou seja, na TC de primeira geração a análise é feita para um plano e no TP para um volume. Outro fator que pode explicar esse resultado de correlação entre os dados é que nas imagens tomográficas algumas amostras apresentavam grandes macroporos e pequenos pedregulhos afetando o valor de ρ_s obtido via esse método. A variação dos valores obtidos sob análise pelo mesmo método (Tabela 3) pode ser explicada, portanto, pela variabilidade espacial das amostras de solo e por grandes macroporos e pequenos pedregulhos presentes em seu interior. Estes últimos só foram possíveis

de serem verificados porque a análise tomográfica permite visualizar de forma não destrutiva o interior das amostras.

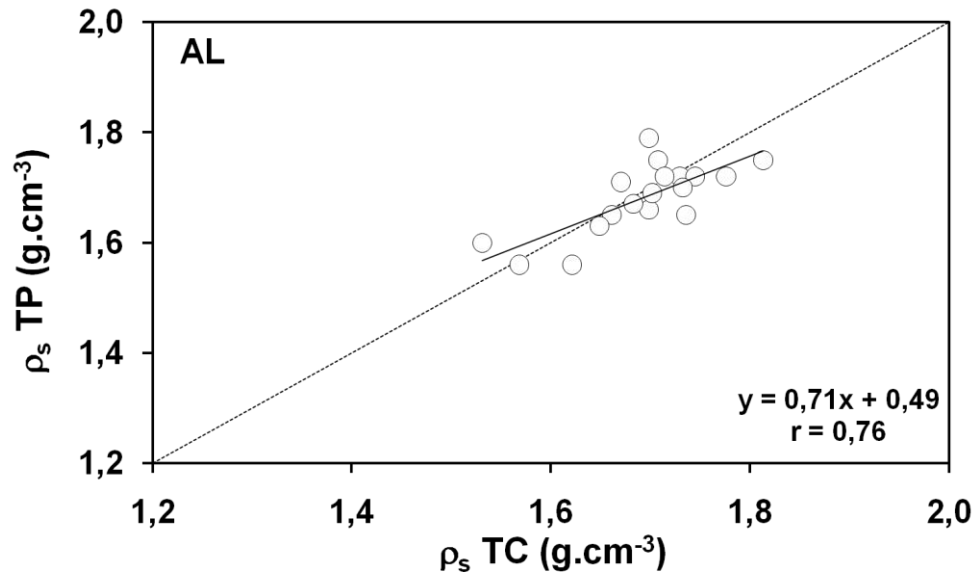
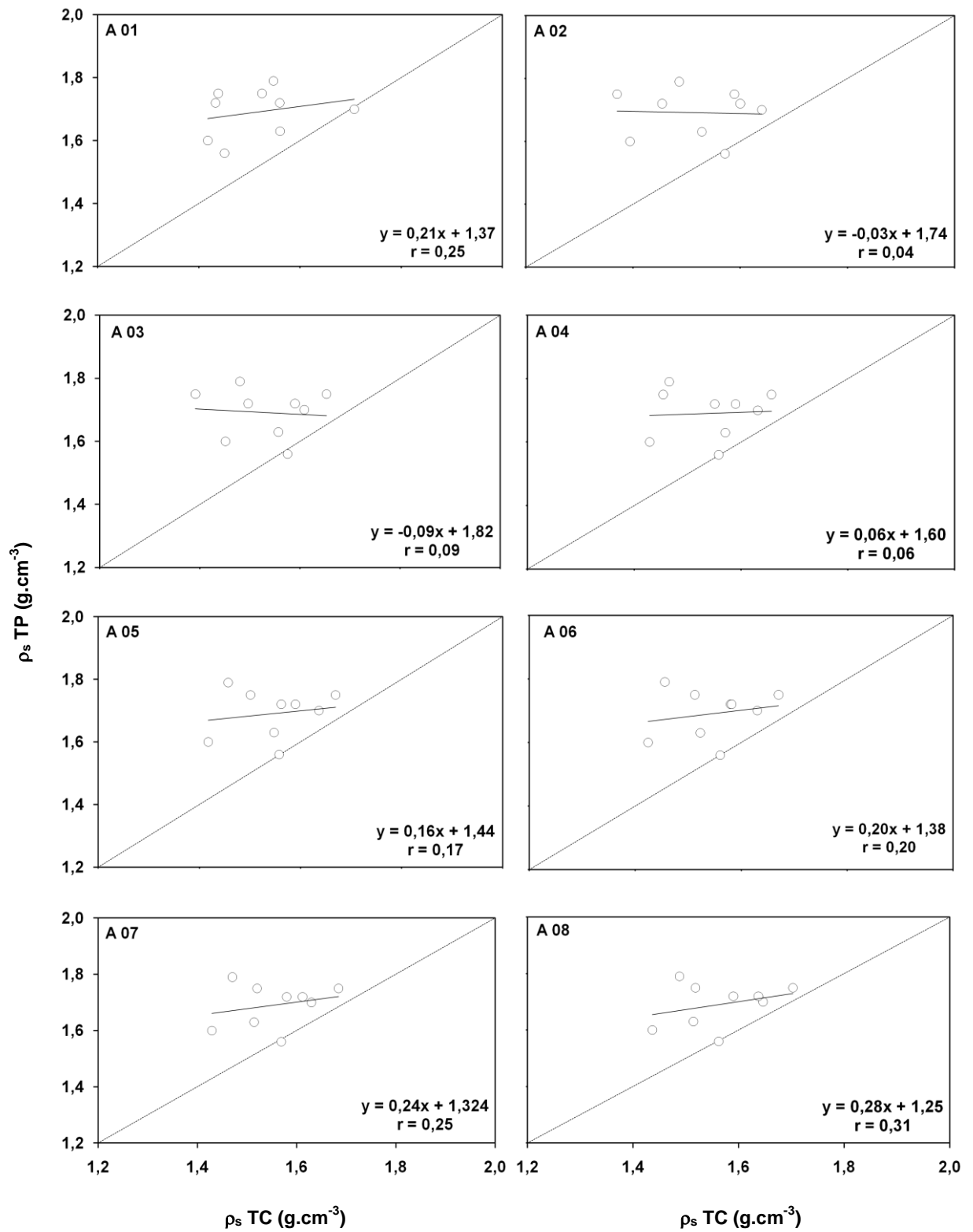


Figura 11 – Correlação entre os valores de densidade do solo (ρ_s) obtidos via os métodos da tomografia computadorizada (TC) e do torrão parafinado (TP) para as 18 amostras de torrão de solo. Os dados de TC foram obtidos considerando quase toda a área varrida da imagem (AL - área livre) da amostra varrida. r representa o coeficiente de correlação.

A existência de grandes vazios (bioporos) e pequenos pedregulhos pode fazer com que os resultados de propriedades avaliadas para um determinado solo, não sejam representativos do mesmo quando amostras pequenas são usadas. Por isso, ρ_s também foi avaliada nas diferentes áreas selecionadas no interior de cada amostra. Na Figura 12 são apresentados os gráficos de correlação dos valores de ρ_s de cada área com o valor obtido via método do TP para 9 amostras que comportaram no mínimo 14 áreas (Tabela 2).



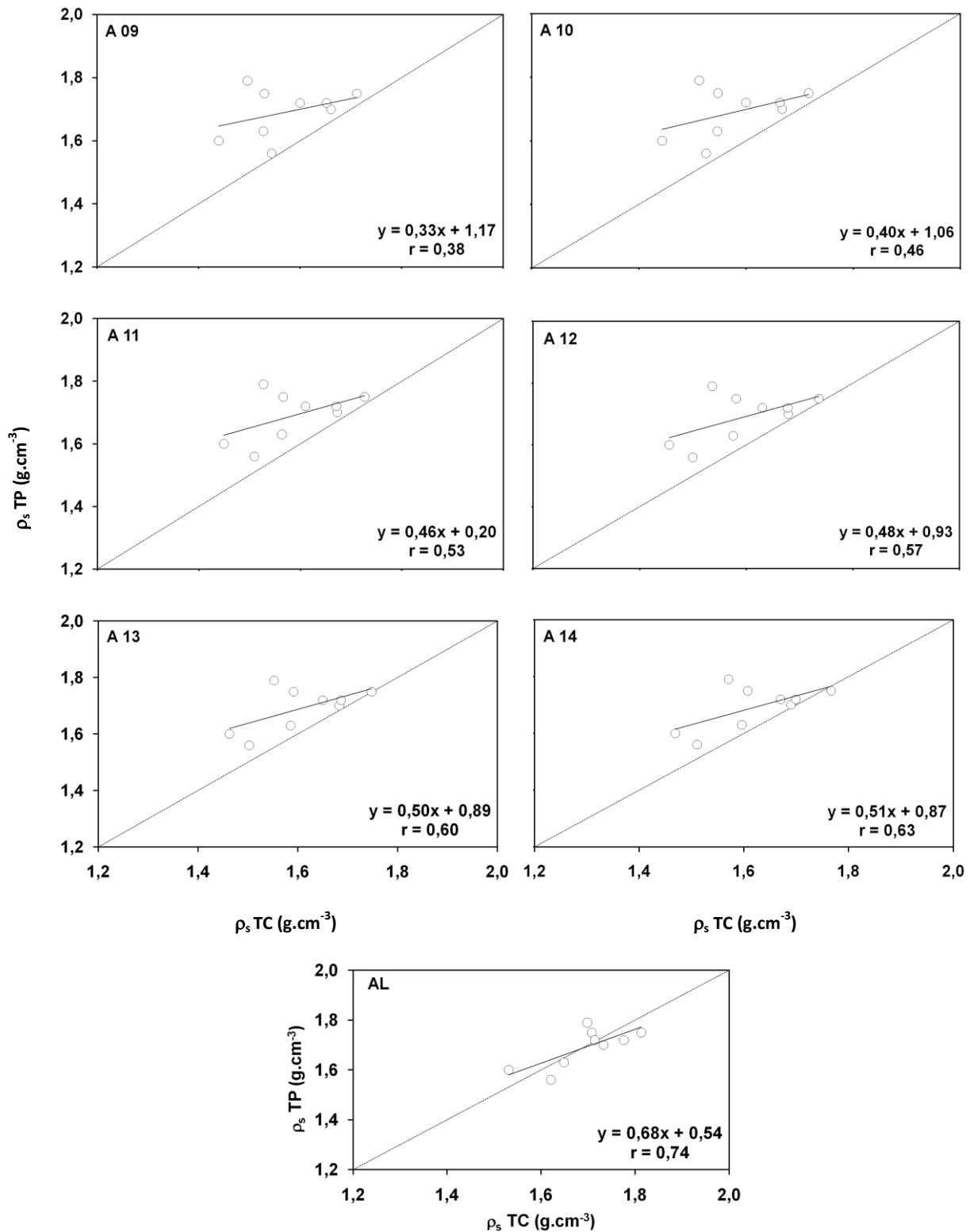


Figura 12 – Correlação entre os valores de densidade do solo (ρ_s) obtidos via método do torrão parafinado (TP) com os valores de ρ_s por área de 9 amostras de torrão de solo, obtidos via tomografia computadorizada (TC). r representa o coeficiente de correlação e AL a área livre.

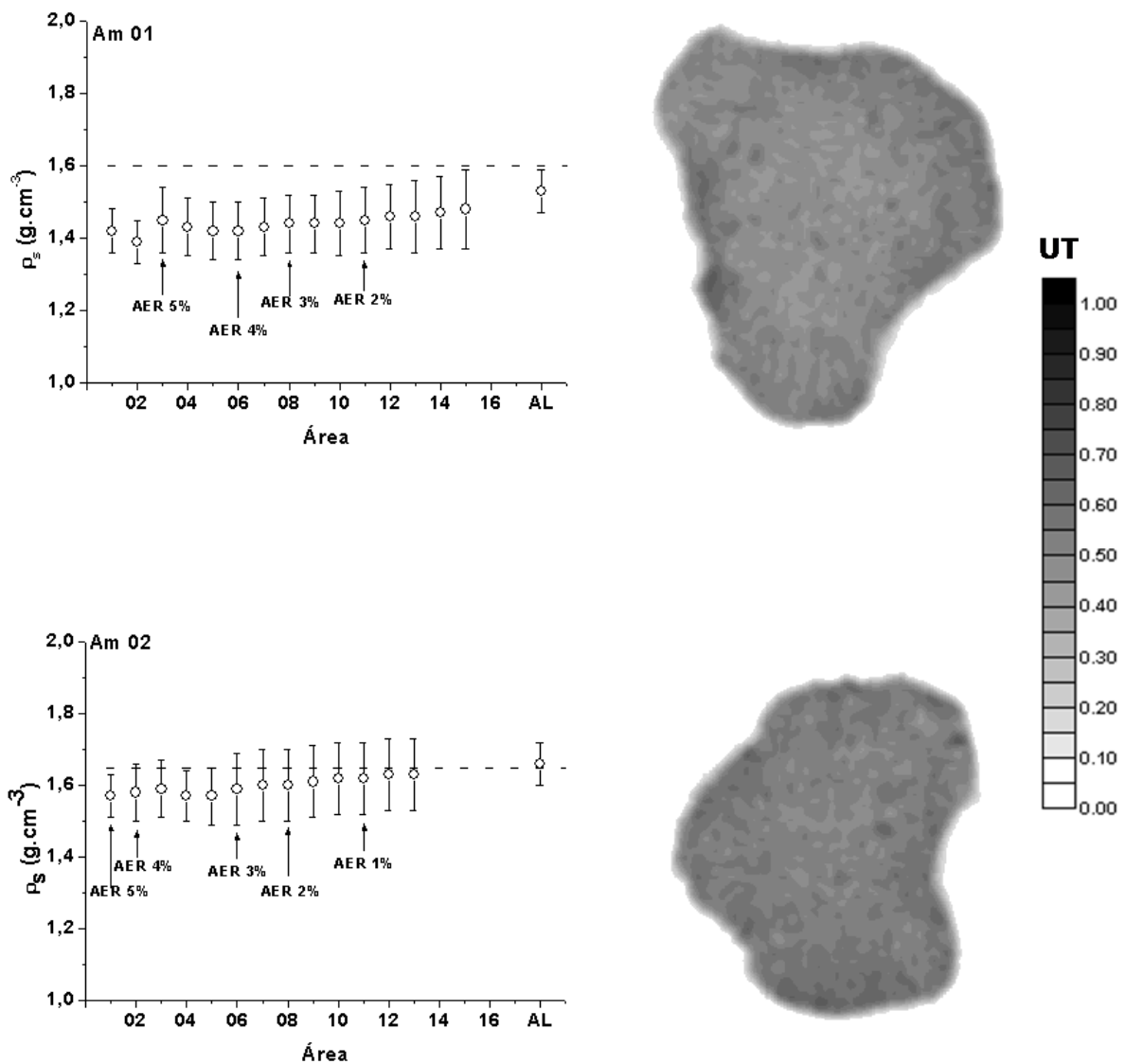
As análises de correlação apresentadas na Figura 12 foram realizadas com o intuito de se tentar criar um primeiro parâmetro para definição da AER. A ideia era que à medida que a AER fosse se aproximando, o valor de correlação entre os métodos fosse o melhor possível e que não variasse mais. Observa-se que o coeficiente de correlação melhora gradativamente, alcança o valor de 0,63 na 14ª área, que é próximo do valor obtido para a AL para estas 9 amostras. Porém, o valor de r ainda indica uma dispersão relativamente alta dos dados experimentais. Por exemplo, a diferença entre os coeficientes de correlação da 14ª área e da 11ª área foi de 0,10. Já a diferença entre essa mesma 14ª área e a 9ª área foi de 0,25. Esse resultado já fornece uma ideia da variabilidade de ρ_s com a área selecionada para analisá-la. Ocorre um aumento de mais de duas vezes para o r para uma diferença de apenas duas áreas (9ª e 10ª áreas). Ao comparar as correlações obtidas para AL de 9 e 18 amostras, a diferença entre elas é de apenas 2%, o que indica que esta análise realizada com 9 amostras pode ser estendida para todas as 18.

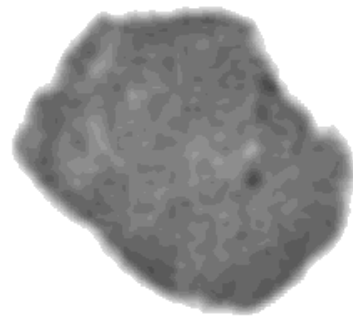
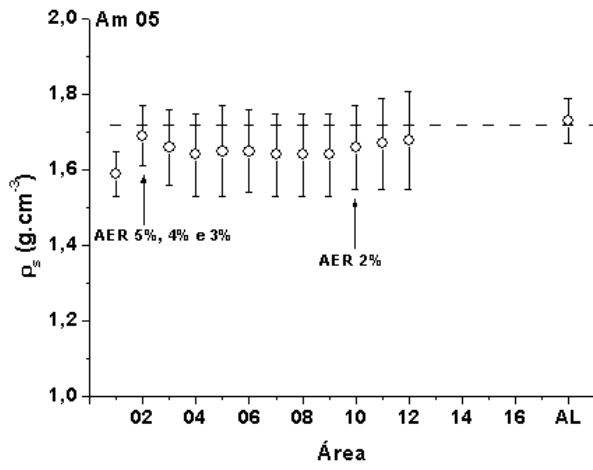
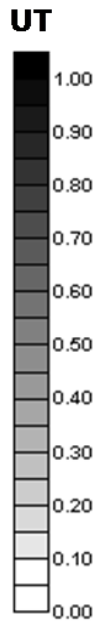
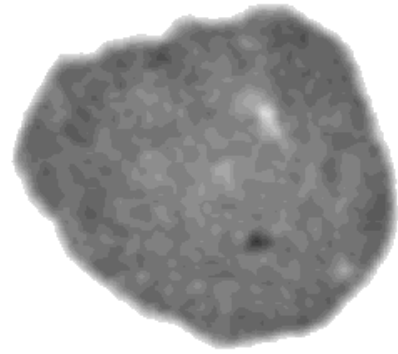
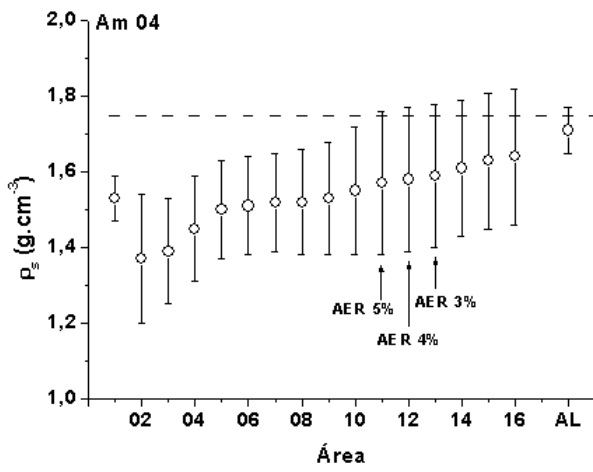
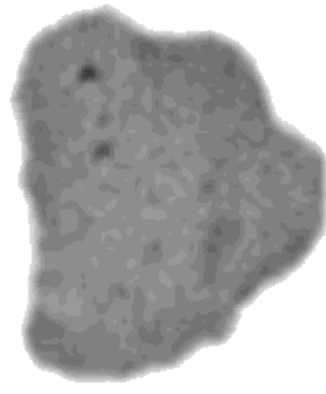
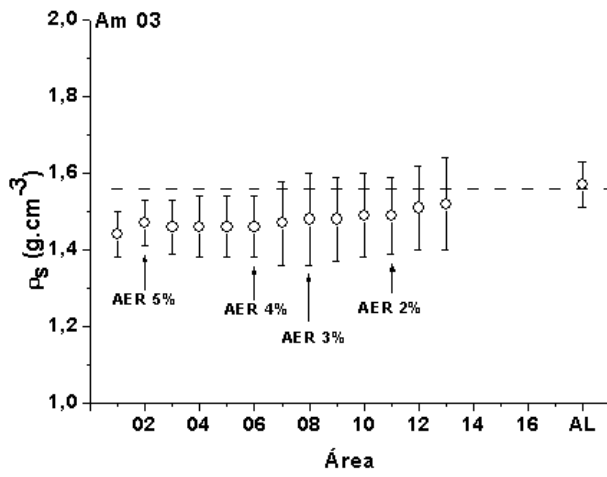
Também é possível observar que para essas 9 amostras, para todas as áreas, os valores de ρ_s pelo TP estão na grande maioria super-estimados em relação a TC. Porém, para a AL, das 9 (Figura 12) e das 18 (Figura 11) amostras, isso não ocorre. Isto pode ser explicado devido às bordas de torrões utilizados para aplicação do método do TP serem naturalmente mais densas em relação ao restante da amostra. Para aplicação deste método há a necessidade de se obter um torrão estável, que resista ao transporte, à manipulação e ao processo de impermeabilização (VIANA, 2008). Tais bordas são contabilizadas quando a área total do torrão é considerada. No entanto, para áreas menores selecionadas no interior dos torrões, a borda não está inclusa. Já a AL inclui valores que fazem parte da borda ou estão muito próximos desta.

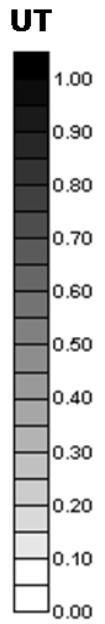
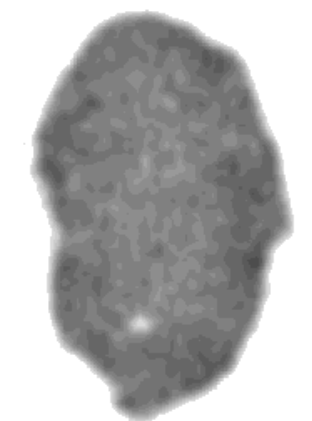
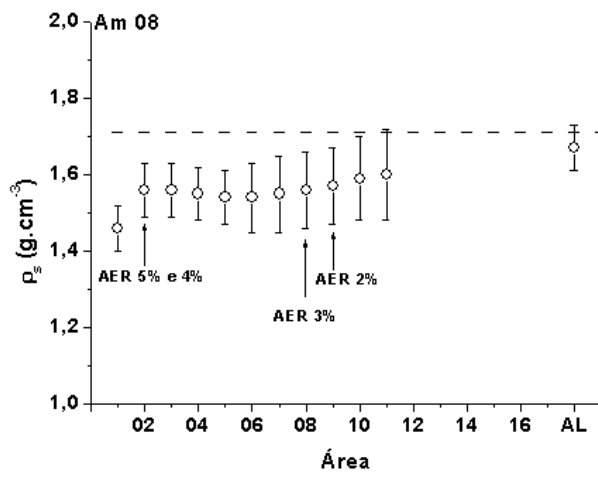
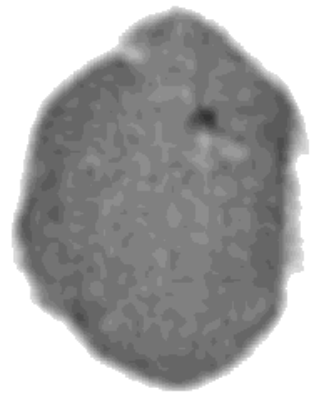
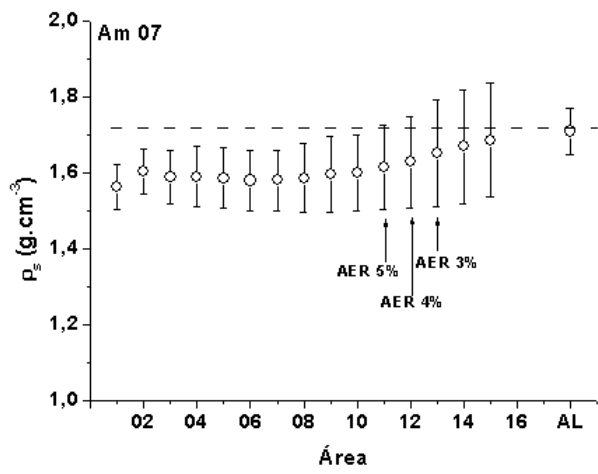
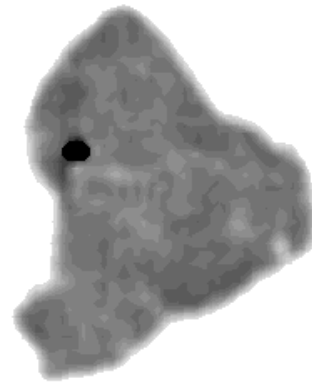
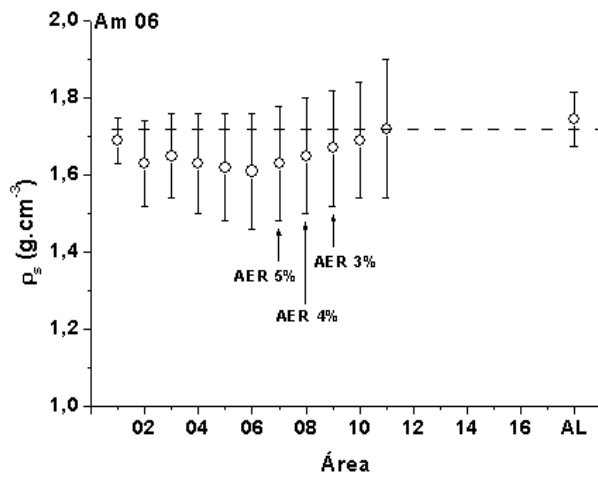
Só para comparar com os resultados obtidos nesse trabalho, Pedrotti et al. (2005) realizaram análise de correlação entre os dados de TC e método do anel volumétrico para medidas de ρ_s e obtiveram correlação positiva forte ($r=0,97$). Já Silva; Reinert e Reichert (2000) compararam os métodos do TP e anel volumétrico e obtiveram correlação significativa entre os dados embora com grande dispersão dos mesmos ($r=0,63$).

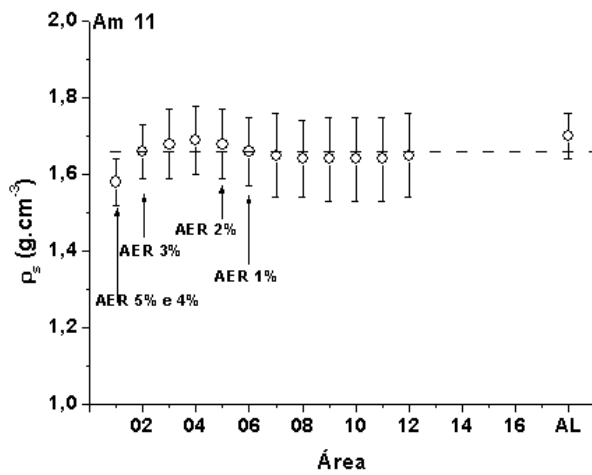
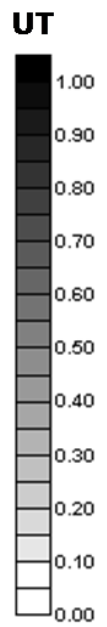
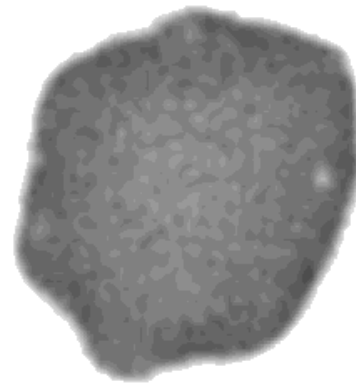
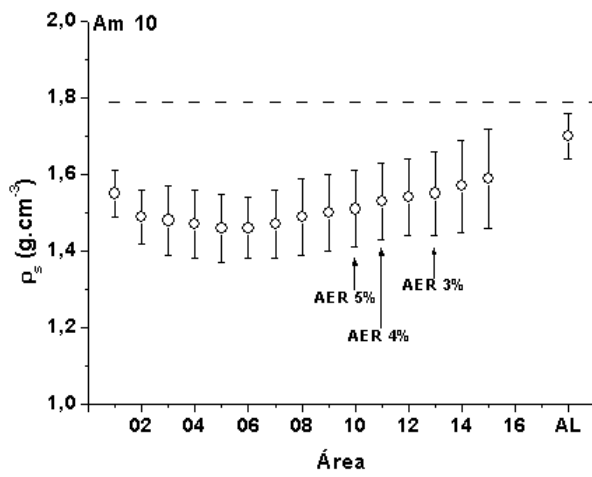
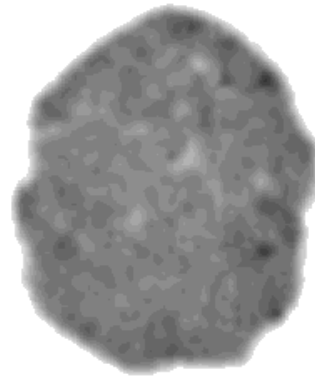
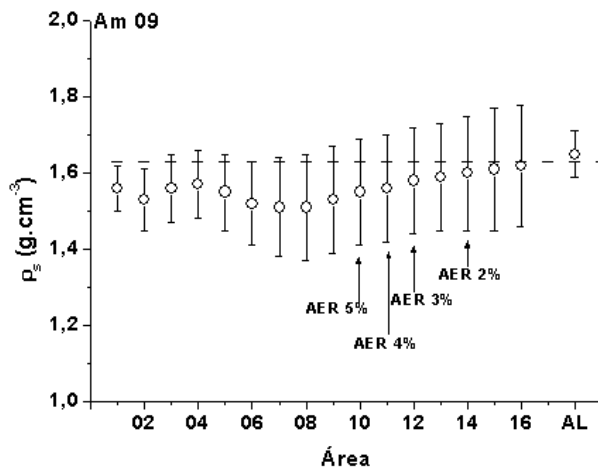
5.3 DETERMINAÇÃO DA AER EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO

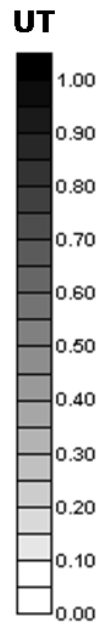
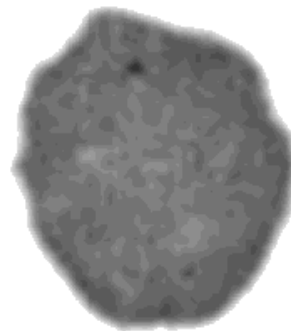
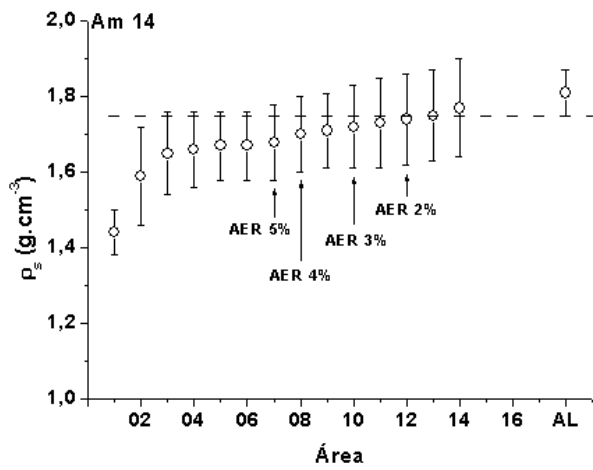
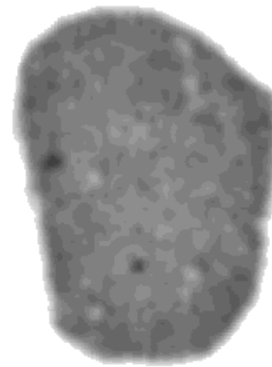
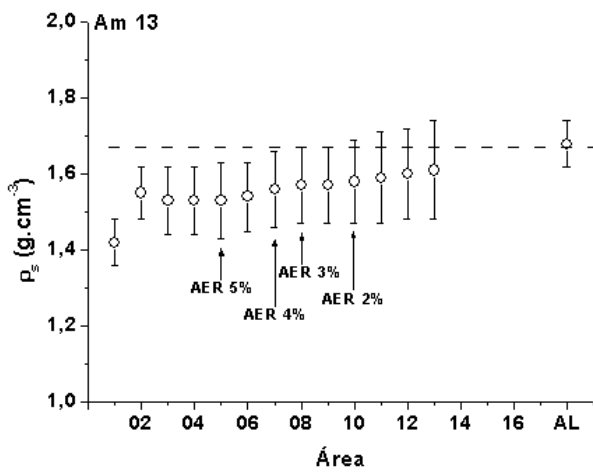
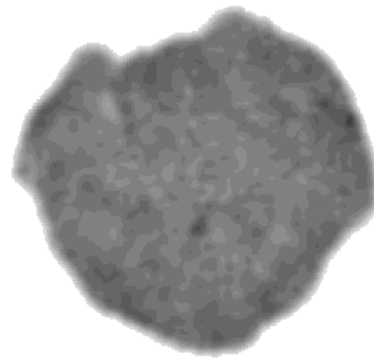
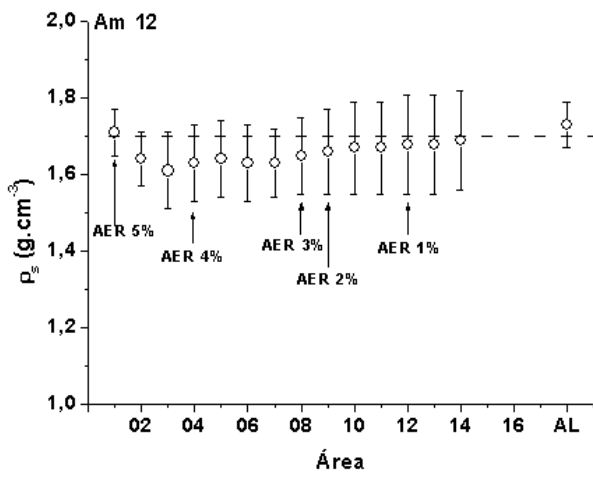
As imagens tomográficas referentes às 18 amostras de torrão de solo e seus respectivos gráficos, obtidos através do estudo da variação de ρ_s em função dos diferentes tamanhos de áreas selecionadas em seu interior, são apresentados na Figura 13. Nas imagens, as regiões mais escuras indicam maiores valores de densidade. Nos gráficos, a numeração das áreas, de 1 a 16 (A 01, A 02,... A 16), corresponde aos valores apresentados na Tabela 2. As barras de erro apresentadas representam o desvio padrão da média, a qual foi obtida considerando todos os valores de ρ_s na matriz de dados de UT referente à sua respectiva área.

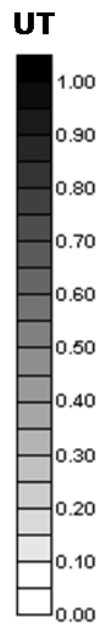
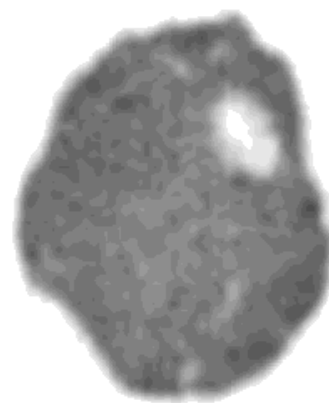
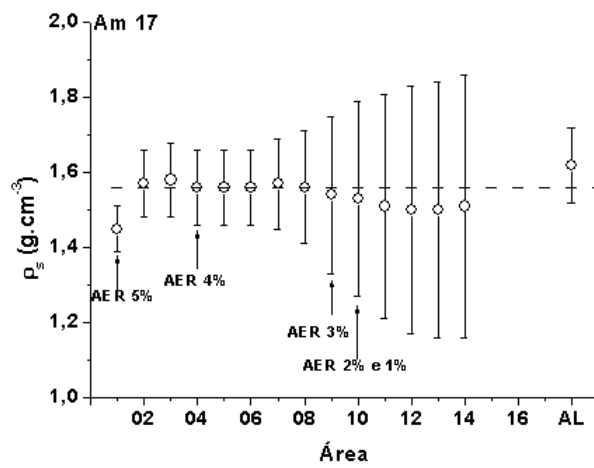
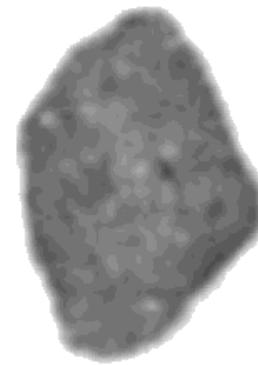
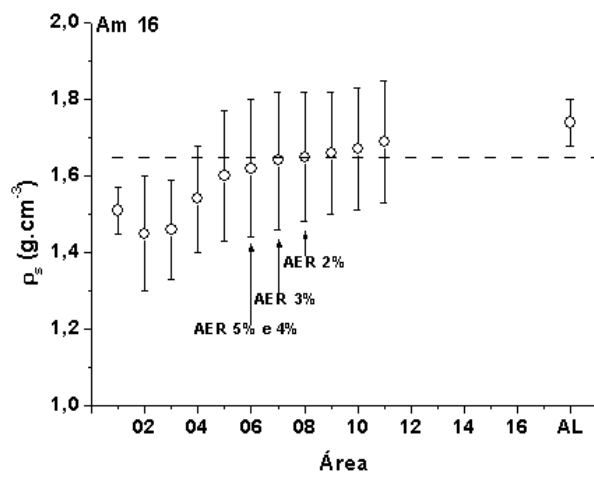
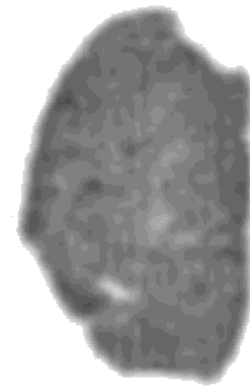
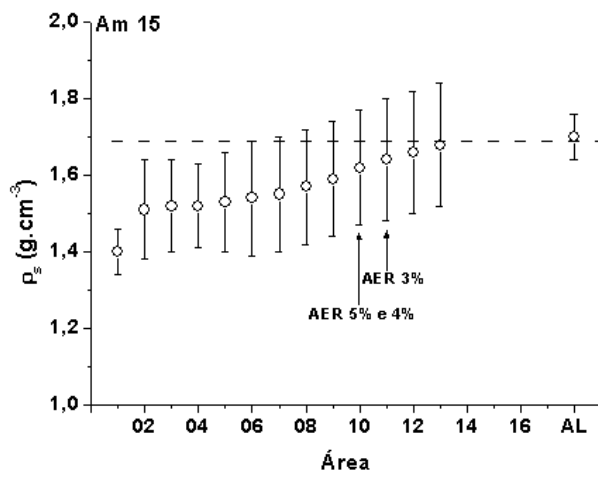












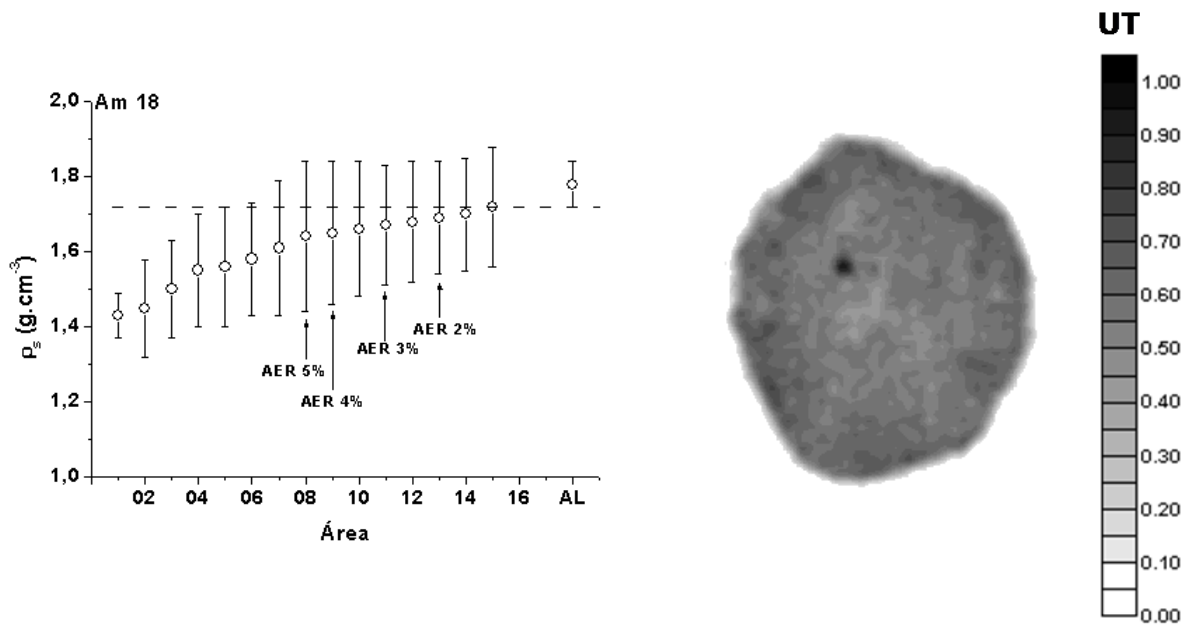


Figura 13 – Gráficos dos valores de densidade do solo (ρ_s) para cada área das 18 amostras e respectivas áreas elementares representativas (AER) para os desvios de 5%, 4%, 3%, 2% e 1% (setas), quando estes foram atingidos. As imagens tomográficas estão em escala de cinza de unidades tomográficas (UT). A linha tracejada representa o valor de ρ_s obtido via método do torrão parafinado (TP). As barras de erro representam o erro do equipamento e o desvio padrão dos dados de UT (matrizes de dados das áreas quadráticas) quando maiores que o erro do equipamento. AL representa a área livre.

É possível analisar qualitativamente as particularidades na seção transversal investigada de cada amostra. Por exemplo, Am 01 e Am 02 não apresentam grandes discrepâncias em seu interior, mostrando-se mais homogêneas em relação a Am 06 e Am 17, por exemplo. A homogeneidade da Am 02 é corroborada no alcance rápido da AER para o critério de variação de 4% (Área 02) e também no alcance da AER para o critério mais rigoroso (variação de 1%) ainda na antepenúltima área selecionada (Área 11).

A Am 06 apresenta uma região com densidade muito superior em relação ao restante da amostra, provavelmente um pequeno pedregulho. Já a Am 17, possui um grande macroporo, provavelmente um bioporo. Esta é a amostra com os maiores valores de desvio padrão para a densidade. E isso é explicado pela análise qualitativa da imagem tomográfica. Na comparação do resultado de ρ_s pela TC e TP para essa amostra a diferença relativa entre os métodos foi de 3,9% (TP como método de referência). Contudo, a Am 17 alcançou a AER até mesmo para os critérios de 2% e 1%.

Observa-se que a AL apresenta valores de desvio padrão próximos aos das áreas menores, o que se deve, provavelmente, a esta englobar praticamente toda a

amostra e, com isso as discrepâncias são contrabalanceadas pelos maiores valores de ρ_s encontrados próximos às bordas das amostras. Geralmente as amostras coletadas para medidas de ρ_s utilizando o método do TP são caracterizadas por apresentarem maiores valores de densidade próximo às bordas (SILVA et al., 2000, PIRES et al., 2005a). É possível visualizar também, a tendência dos valores médios de ρ_s com o aumento da área ao valor do TP, considerado padrão. Na Am 07 e Am 08, por exemplo, este fato fica evidente. Também, pode-se observar a redução na oscilação dos valores de ρ_s conforme se aumenta a área analisada.

A Figura 14 traz os gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras que atingiram a AER para cada um dos desvios e para cada área.

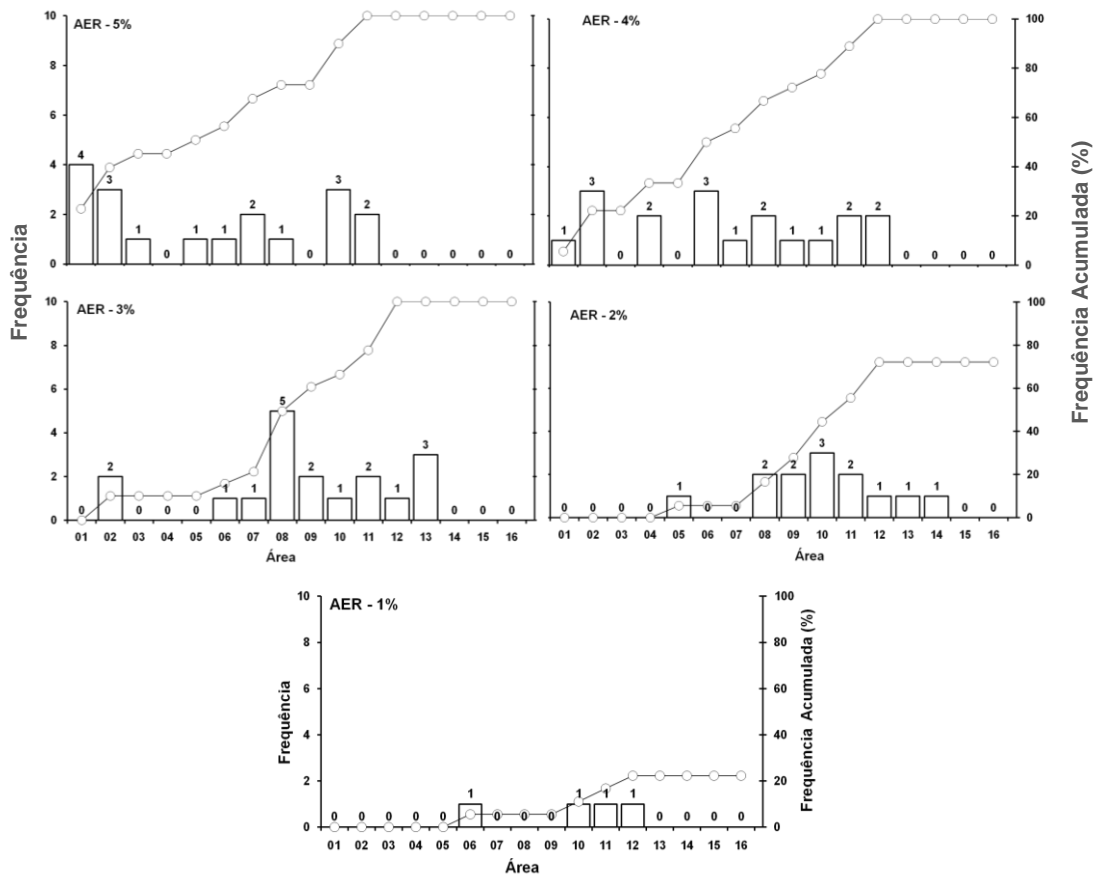


Figura 14 – Gráficos de frequência e frequência acumulada (%) por área representando o número de amostras que atingiram a área elementar representativa (AER) para os desvios de 5%, 4%, 3%, 2% e 1%.

Com a definição de 5% para a máxima variação de ρ_s entre as áreas selecionadas na imagem, as 18 amostras analisadas atingiram a AER até um valor de área de 533,6 mm² (área 11). Para 4%, a AER foi obtida até uma área de 640,1

mm² (área 12) e, para 3%, de 756,3 mm² (área 13). Já para os critérios de 2% e 1%, somente 13 e 4 amostras atingiram a AER, respectivamente.

É possível observar que quanto mais rigoroso o critério de variação de ρ_s , áreas maiores são necessárias para que a AER seja atingida. Para os casos de 2% e 1%, apenas 72% e 22% das amostras atingiram a AER. Isto acontece porque algumas amostras são menores e, portanto, menor é o número de áreas selecionadas no interior destas. O tamanho das áreas selecionadas no interior das amostras é insuficiente para que as variações ocorram dentro dos critérios estabelecidos para definir a AER.

As medidas de ρ_s pelo método do torrão parafinado apresentaram coeficiente de variação de 3,8%. Com isso, foi possível estabelecer que amostras com áreas superiores a 640,1 mm² fornecem valores representativos desta propriedade física do solo. Por exemplo, no trabalho de VandenBygaart e Protz (1999) foi estabelecido o critério de 10% para a AER em medidas de propriedades micromorfológicas do solo. Se tal critério fosse aplicado nesta análise, todas as amostras atingiriam a AER já para uma área de 1,2 mm². No entanto, as propriedades micromorfológicas avaliadas pelos últimos autores apresentam maior variabilidade do que a ρ_s investigada neste trabalho e, por esse motivo, optou-se por critérios mais rigorosos para a definição da AER. No caso do presente trabalho optou-se, portanto, por utilizar o CV obtido para o método do torrão como valor de referência.

Os diferentes valores de AER para amostras avaliadas sob o mesmo critério de variação podem ser explicados pela heterogeneidade das mesmas. Por exemplo, Pires et al. (2005b) analisaram os diferentes valores de UTs obtidos dentro de uma mesma amostra, dividida em 15 áreas adjacentes. Os autores observaram uma variação significativa entre as UTs, refletindo variações na estrutura do solo resultantes de processos naturais ou artificiais. A maior diferença obtida entre as áreas de uma mesma amostra foi de 111 UTs e, a menor, de 40 UTs. No presente trabalho foram observadas pequenos pedregulhos e/ou grandes vazios (bioporos) em algumas amostras enquanto outras são em sua totalidade mais densas em relação às demais (Am 14 e Am 18, por exemplo). Estas características de cada amostra puderam ser visualizadas e quantificadas nas imagens tomográficas de forma não destrutiva, o que não pode ser feito em métodos tradicionais de medida de ρ_s como o TP e anel volumétrico.

5.4 DETERMINAÇÃO DA AER A PARTIR DA FWHM DA DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA DA POROSIDADE DO SOLO

Na elaboração dos gráficos da distribuição da frequência da porosidade em cada área selecionada nas imagens tomográficas, observou-se que estas apresentaram distribuição gaussiana a partir da 5ª área selecionada. Esta, corresponde a uma matriz 9 x 9, ou seja, com 81 dados. Este fato foi explicado segundo o teorema central do limite, o qual nos diz que, para uma variável aleatória com uma distribuição qualquer, esta se aproxima de uma normal na medida em que o tamanho da amostra cresce (DOWNING; CLARK, 2000).

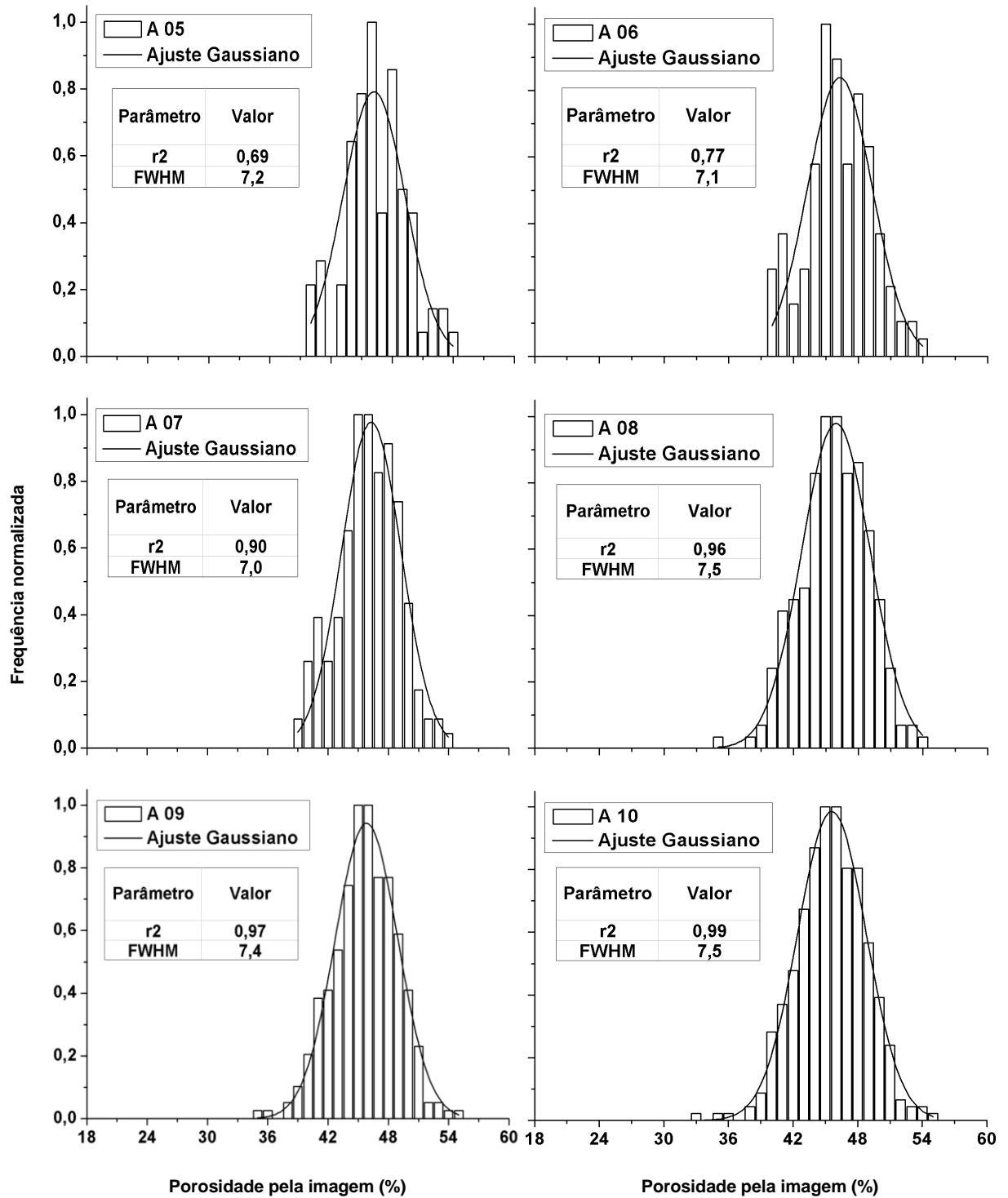
Sendo assim, nas Figuras 15 e 16 são mostradas como exemplo as distribuições obtidas experimentalmente para Am 01 e Am 10, a partir da 5ª área. Pode-se observar em tais distribuições, que elas se mantêm mais próximas ao centro da distribuição nas primeiras áreas. Com o aumento destas, os extremos da distribuição se afastam.

Na Am 01 (Figura 15), observa-se que o limite superior da distribuição da porosidade se mantém aproximadamente o mesmo, enquanto que o limite inferior passa de 40% (5ª área), para 24% (AL) de porosidade. Já para a Am 10 (Figura 16), este passa de 37% para 17% de porosidade. O limite superior da distribuição da porosidade desta última também apresenta variação notável, de 54% para 62% de porosidade. No entanto, estas variações nas extremidades das curvas têm influência desprezível na FWHM da distribuição, já que esta é influenciada diretamente pela distribuição dos valores centrais. Embora a FWHM seja normalmente usada para medidas de resolução em análises espectrais, optou-se por utilizá-la nesse estudo na tentativa da criação de um novo parâmetro para prever a AER para a porosidade do solo.

O coeficiente de determinação (r^2) obtido para cada uma das distribuições é bastante alto. Seu valor é igual ou superior a 0,90 em 16 das 24 distribuições apresentadas, indicando que bons ajustes foram obtidos e que os valores estão mais próximos do mesmo.

A posição central da distribuição no eixo das abscissas (x_c) apresenta pouca variação dentro da mesma amostra para áreas consecutivas, no entanto, a variação é maior na comparação entre a AL para as áreas anteriores. Isto ocorre devido a AL apresentar um intervalo de distância maior das áreas quadrangulares, enquanto

estas foram selecionadas consecutivamente. Também, a AL inclui praticamente toda a amostra, o que faz com que a heterogeneidade da mesma seja maior do que a das áreas menores.



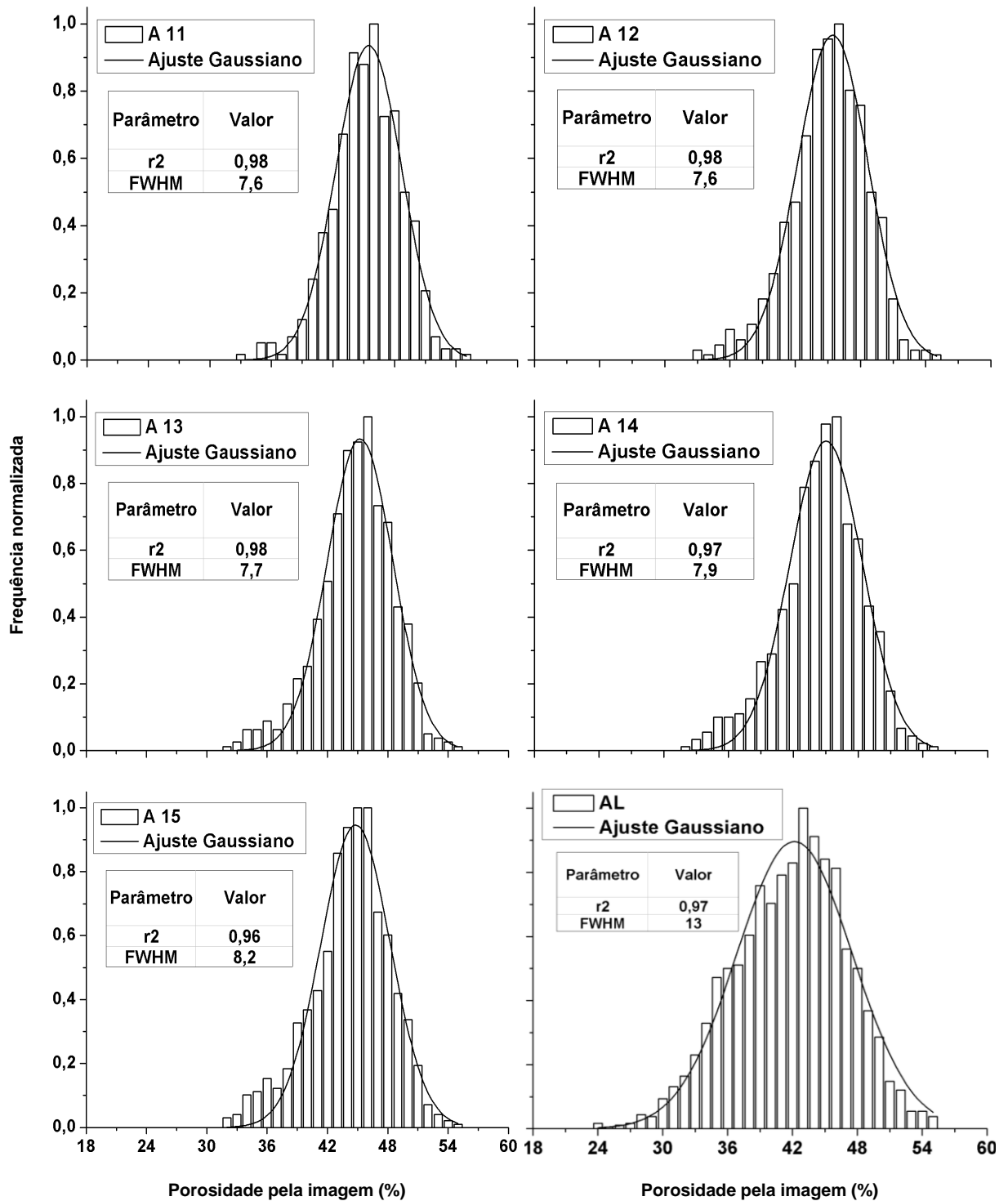
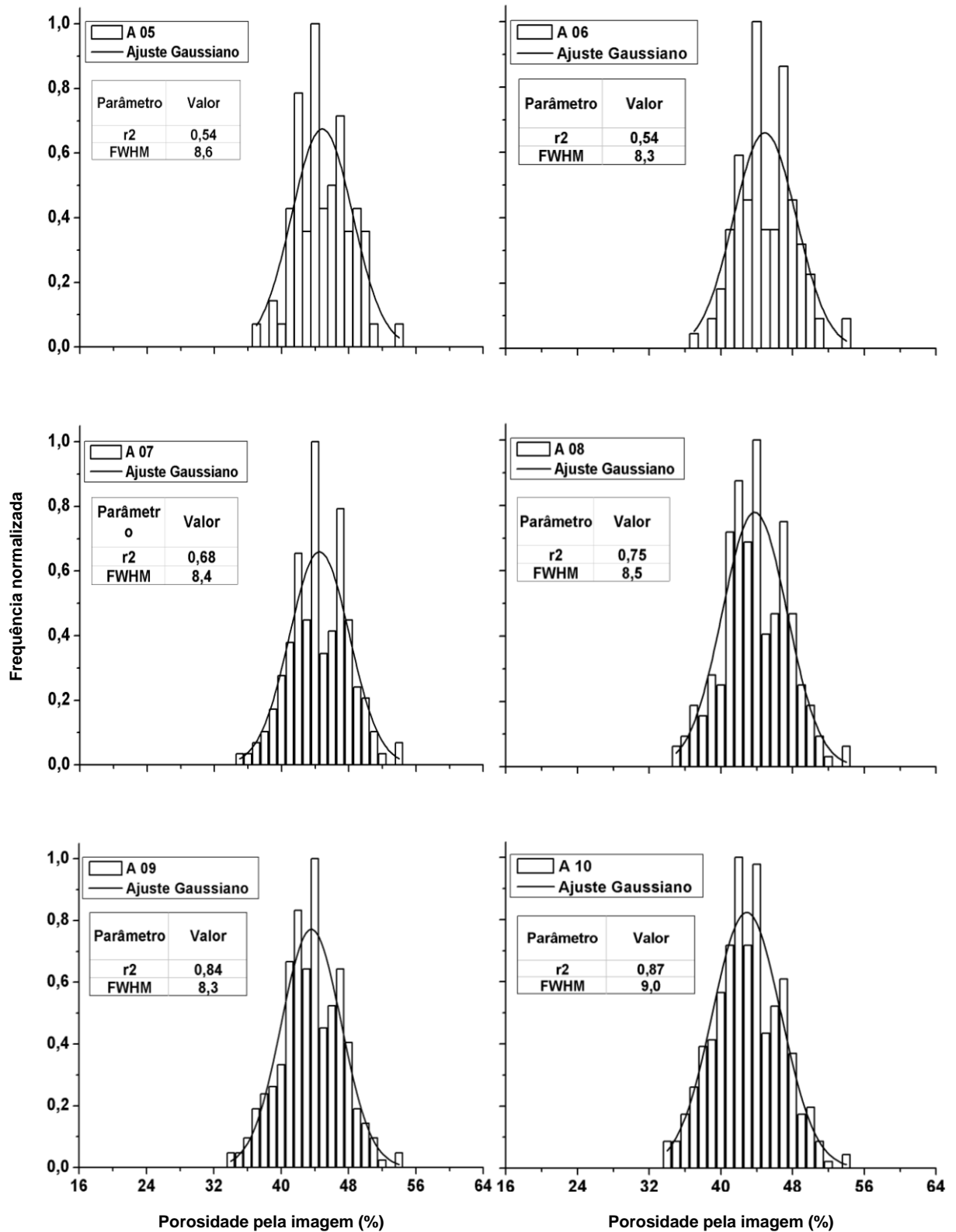


Figura 15 – Frequência normalizada da porosidade pela imagem (%) a partir da 5ª área selecionada na amostra 01 (Am 01). Os parâmetros x_c , r^2 , w , A , s representam o valor médio da porosidade no ajuste, o coeficiente de determinação, parâmetro de ajuste da largura total à meia altura (FWHM), área sob a curva e o desvio padrão.



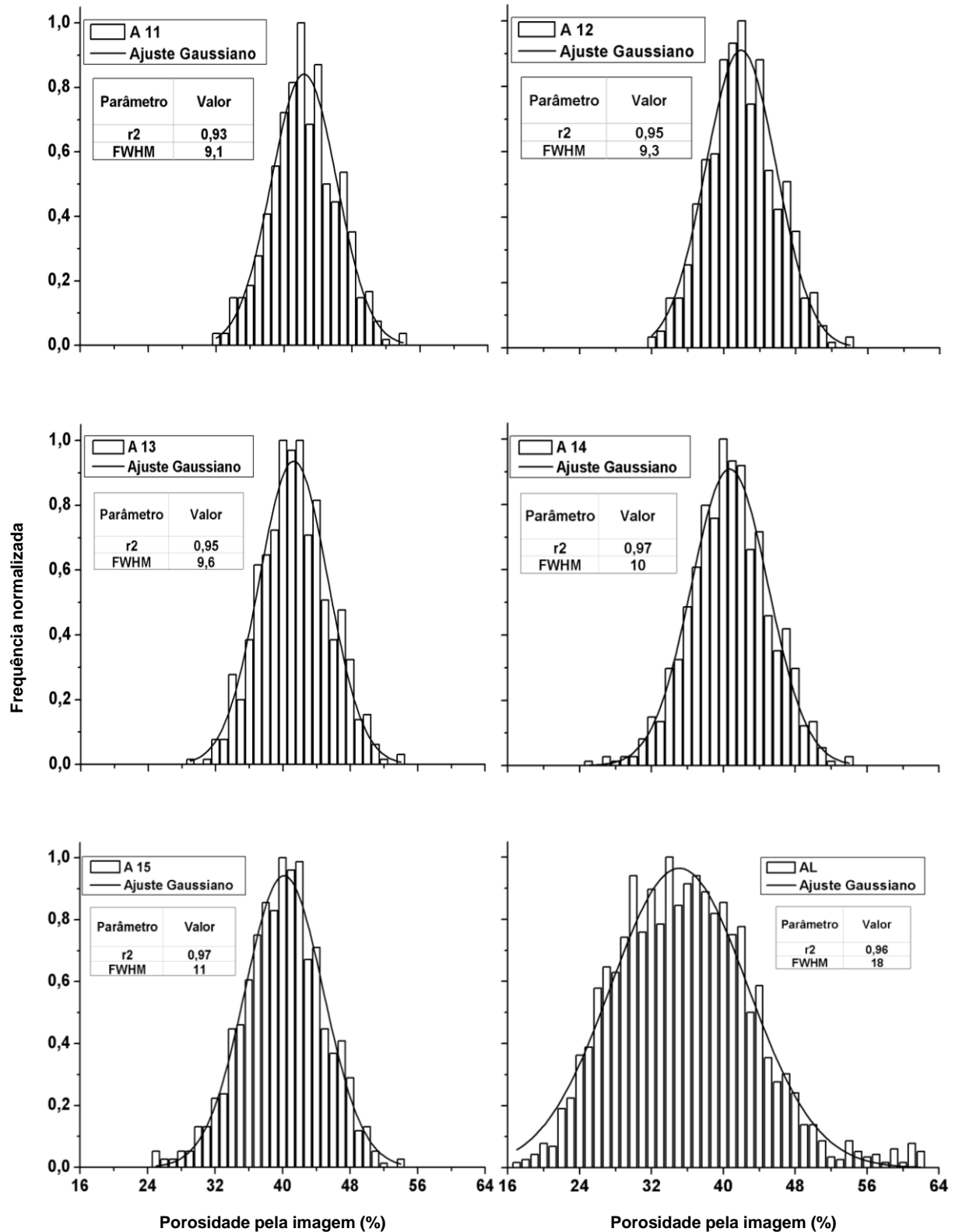
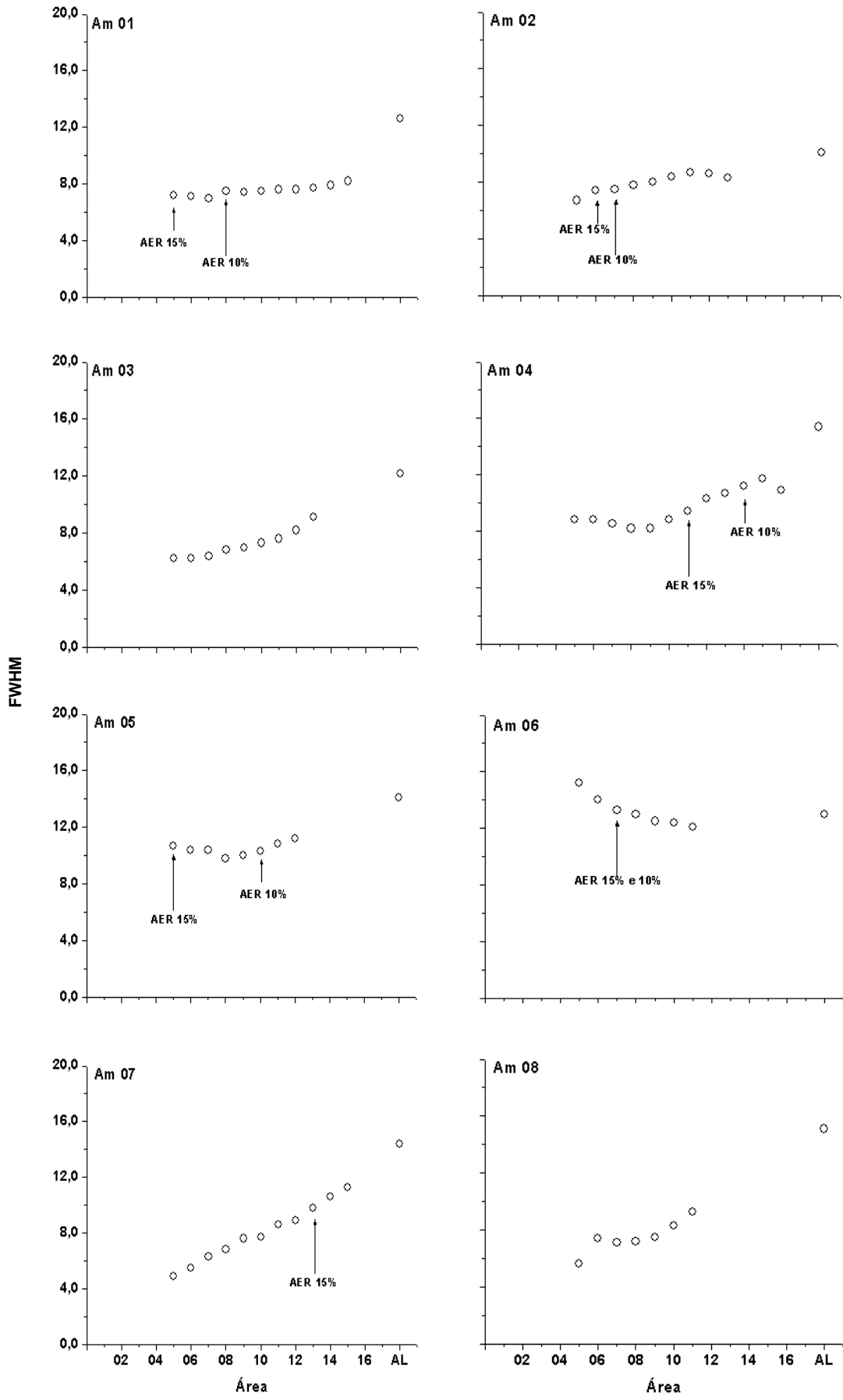


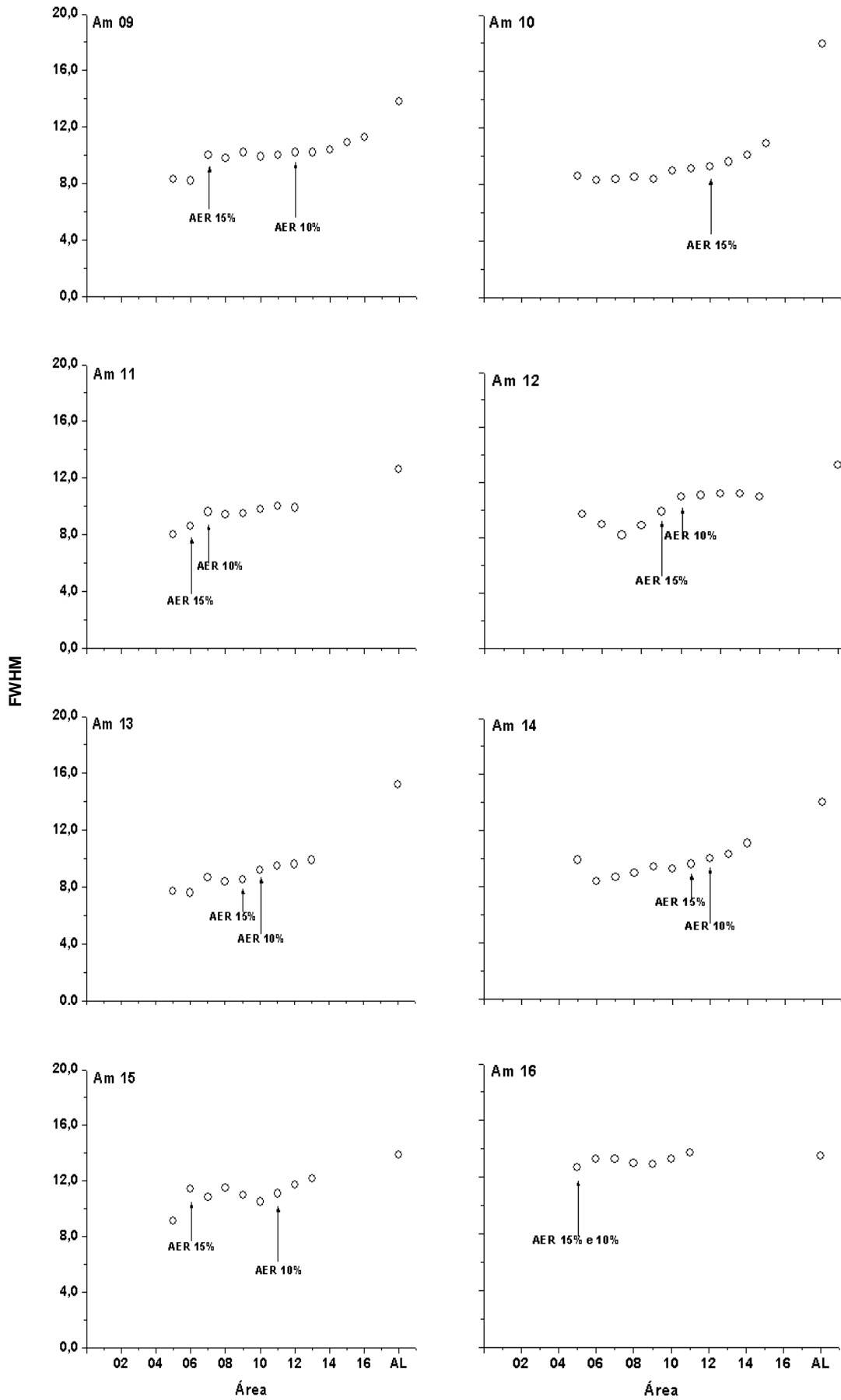
Figura 16 – Frequência normalizada da porosidade pela imagem (%) a partir da 5ª área selecionada na amostra 10 (Am 10). Os parâmetros x_c , r^2 , w , A , s representam o valor médio da porosidade no ajuste, o coeficiente de determinação, parâmetro de ajuste da largura total à meia altura (FWHM), área sob a curva e o desvio padrão.

Na Figura 17 são mostrados os gráficos da FWHM a partir da 5ª área selecionada nas 18 amostras e respectivas AER para os desvios de 10% e 15%, quando estas foram atingidas. Os critérios de 10% e 15% de variação para no mínimo 3 áreas consecutivas, foram estabelecidos com base no trabalho de VandenBygaart e Protz (1999). Maiores critérios de variação em relação aos estabelecidos para ρ_s foram utilizados para este parâmetro. Isto é devido a se observar que a variação apresentada por esta propriedade física é maior que a observada para ρ_s . Em Jury e Horton (2004), são dados os intervalos dos coeficientes de variação de ϕ e ρ_s . Para ϕ , o intervalo é de 7-11%, para ρ_s , é de 3-26%. O intervalo do CV de ρ_s é maior, no entanto seu limite inferior é menor que o limite inferior de ϕ .

Mesmo com critérios de variação maiores, somente 14 das 18 amostras atingiram a AER segundo o parâmetro de 10%. Para 15%, que é o critério menos rigoroso utilizado, 16 amostras alcançaram a AER.

Nos gráficos da Figura 17, o comportamento da curva experimental da maioria das amostras apresenta variação semelhante à dos gráficos da Figura 13 para ρ_s . Mas, neste caso, não se tem uma linha experimental como referência, uma vez que somente a imagem tomográfica pode fornecer uma matriz de dados de porosidade que permita a medida da FWHM. No caso dos métodos tradicionais de medida dessa propriedade, não é possível se obter matrizes de dados. Nos gráficos apenas pode-se observar como se comportam os valores da FWHM das áreas quadrangulares consecutivas, em relação ao valor obtido para a AL. Entre os 18 casos estudados aqui, somente a Am 16 não apresentou FWHM crescente em relação à AL. No entanto, a diferença entre FWHM da distribuição da porosidade da última área analisada e a da AL desta amostra é de apenas 0,2. Este fato provavelmente se deve à amostra apresentar grande valor de porosidade central, como pode ser observado na Figura 13. Sendo assim, a variação da porosidade já está inclusa nas áreas menores, ocasionando apenas aumento na frequência dos valores centrais quando a contagem é feita para AL. Com relação à Am 17, não foi possível inserir o ponto referente à AL. Isso se deve ao fato da distribuição de frequência apresentar comportamento bimodal para essa área, o que impossibilitou a medida da FWHM para AL usando os critérios das demais áreas.





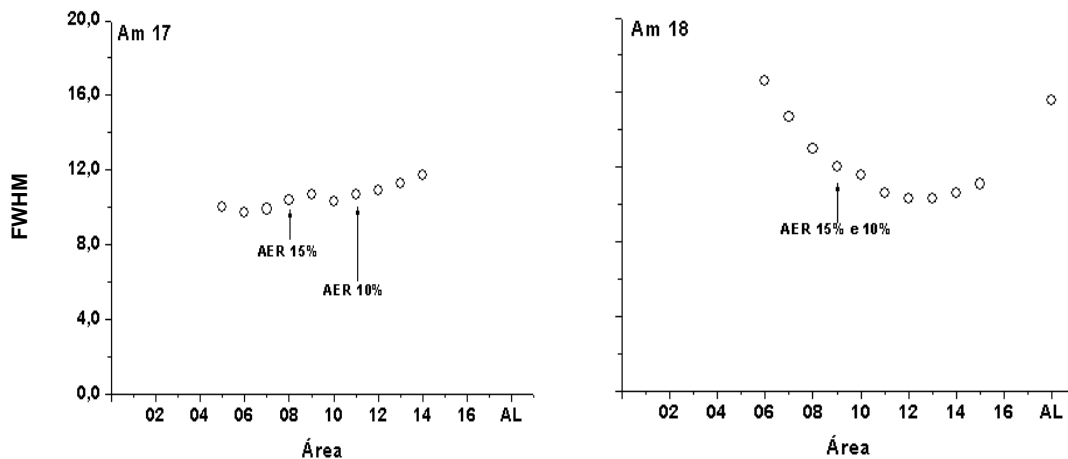


Figura 17 – Gráficos dos valores da largura total à meia altura (FWHM) a partir da 5ª área selecionada nas 18 amostras e respectivas áreas elementares representativas (AER) para os desvios de 10% e 15%, quando estas foram atingidas.

Ao contrário dos resultados obtidos por Baveye et al. (2002), neste trabalho a ρ_s de todas as amostras se estabilizou dentro do desvio permitido (4%). Já na análise de ϕ , o mesmo não ocorreu. Seguindo o critério de 10% de variação, como o adotado por VandenBygaart e Protz (1999), as 14 amostras que atingiram a AER o fizeram até a 14ª área. Neste caso, áreas com tamanho igual ou superior a 882,1 mm² correspondem a valores significativos para medidas da porosidade do solo.

5.5 DETERMINAÇÃO DA AER PARA POROSIDADE E DENSIDADE DO SOLO

Entre as áreas selecionadas nas amostras, a AER para ρ_s (640,1 mm²) corresponde à 12ª área selecionada, enquanto que para ϕ (882,1 mm²), corresponde à 14ª área. O fato de ser necessária uma maior área para realização de medidas representativas da porosidade em comparação à densidade pode ser explicado devido ao fato da primeira apresentar maior variabilidade espacial. Grego e Vieira (2005) mostraram que o alcance da dependência espacial de propriedades físicas do solo depende de cada variável. Segundo Jury e Horton (2004), a porosidade pode variar significativamente em grandes escalas de distância, onde diferentes solos são encontrados. Esta propriedade física também é variável ao longo de distâncias muito pequenas, uma vez que só pode ser 0 ou 1 para uma partícula ou poro, respectivamente.

Ainda, quanto à obtenção de diferentes tamanhos representativos para diferentes propriedades dos meios porosos, VandenBygaart e Protz (1999) encontraram valores distintos de AERs para análises da área e perímetro total de

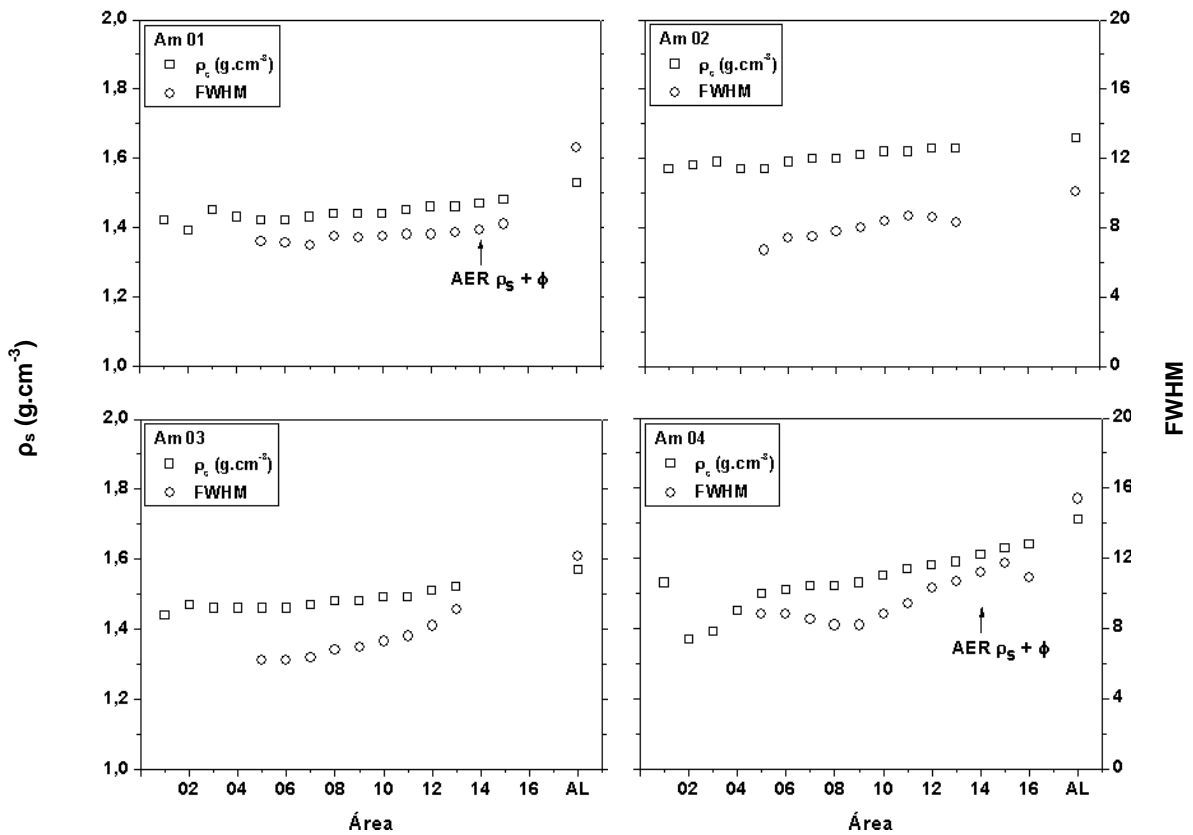
poros, sendo que o valor encontrado variou também com o intervalo de diâmetros dos poros analisados. Pedrotti et al. (2003b) chegaram a dois valores de espessura ótima, diferindo de 2,0 cm entre si, para medidas de ρ_s apenas passando do horizonte A para o horizonte B de um mesmo solo. Em Al-Raoush e Papadopoulos (2010) esta questão também foi abordada e os autores concluíram com seu estudo que um VER para porosidade do meio analisado não poderia ser usado como base para realização de medidas representativas dos demais parâmetros de interesse. Isto porque os outros parâmetros exigiam um tamanho maior para que medidas representativas pudessem ser realizadas. Sendo assim, a utilização de um mesmo tamanho representativo para medidas de diferentes propriedades irá depender se ele inclui o VER, a AER ou o CER de todos os parâmetros analisados.

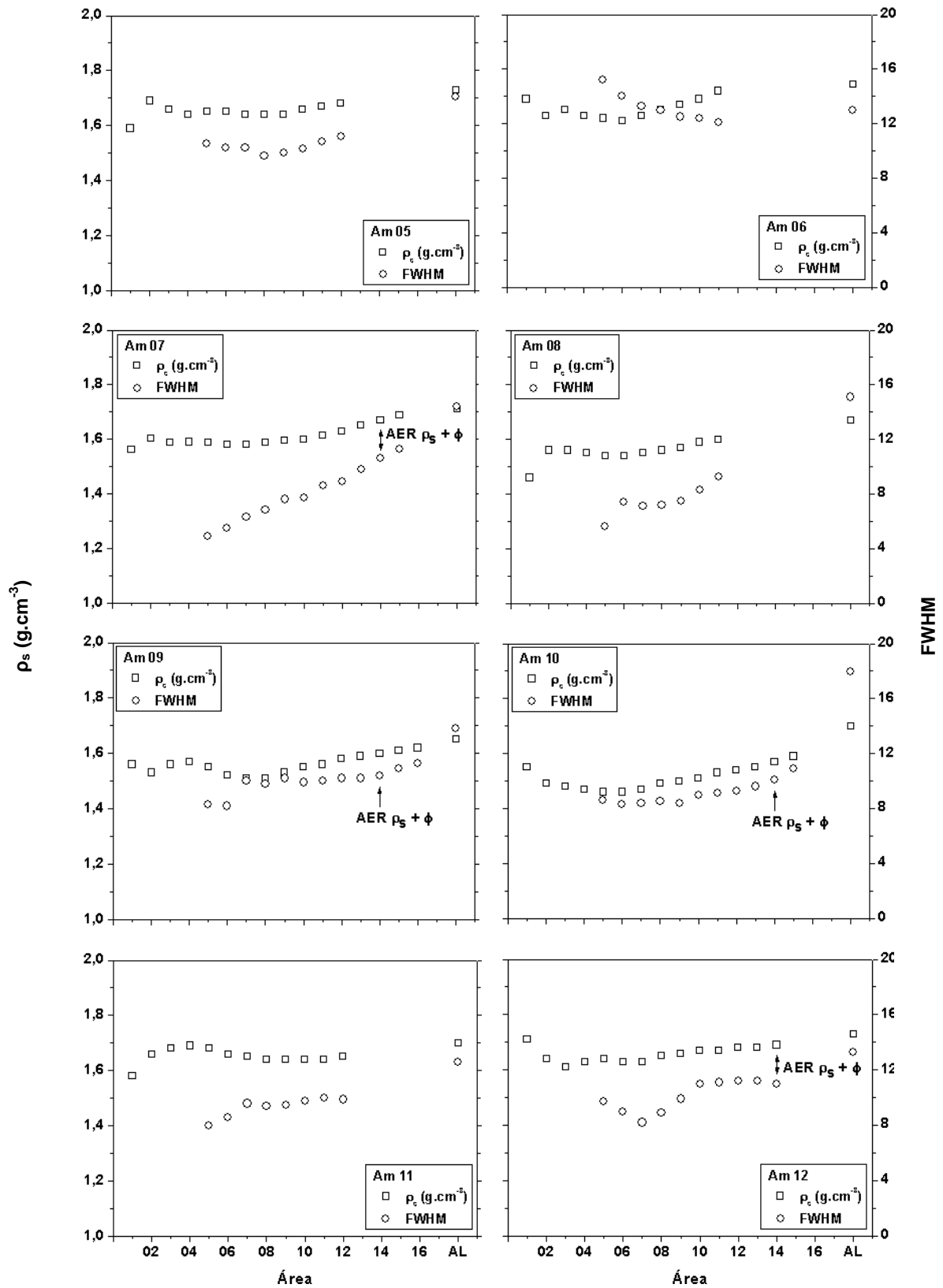
A Tabela 4 apresenta as áreas correspondentes para as quais cada amostra atingiu a AER no critério de variação de 4% para ρ_s e de 10% para ϕ . A grande maioria das amostras atingiu a AER para ρ_s em áreas menores ou iguais à necessária para que a AER fosse atingida para ϕ . Apenas Am 06 e Am 16 fogem a esse padrão.

Considerando os critérios de variação de 4% para a densidade e de 10% para a porosidade das amostras que atingiram a AER, a maior área necessária foi a 14^a. Sendo assim, pode-se definir que áreas com tamanho igual ou superior a 882,1 mm² já fornecem valores representativos de ambas ρ_s e ϕ para o solo analisado. A Figura 18 contém gráficos dos valores de ρ_s e FWHM da distribuição da porosidade do solo para as diferentes áreas das 18 amostras e a indicação da AER.

Tabela 4 – Relação das áreas que cada amostra atingiu a área elementar representativa (AER) para a densidade do solo (ρ_s) (4%) e porosidade do solo (ϕ) (10%). As células não preenchidas para ϕ , indicam que a AER não foi atingida por estas amostras, no parâmetro estabelecido.

Am	Área		Am	Área	
	ρ_s (g.cm ⁻³)	ϕ (cm ³ .cm ⁻³)		ρ_s (g.cm ⁻³)	ϕ (cm ³ .cm ⁻³)
01	06	08	10	11	--
02	02	07	11	01	07
03	06	--	12	04	10
04	12	14	13	07	10
05	02	10	14	08	12
06	08	07	15	10	11
07	12	--	16	06	05
08	02	--	17	04	11
09	11	12	18	09	09





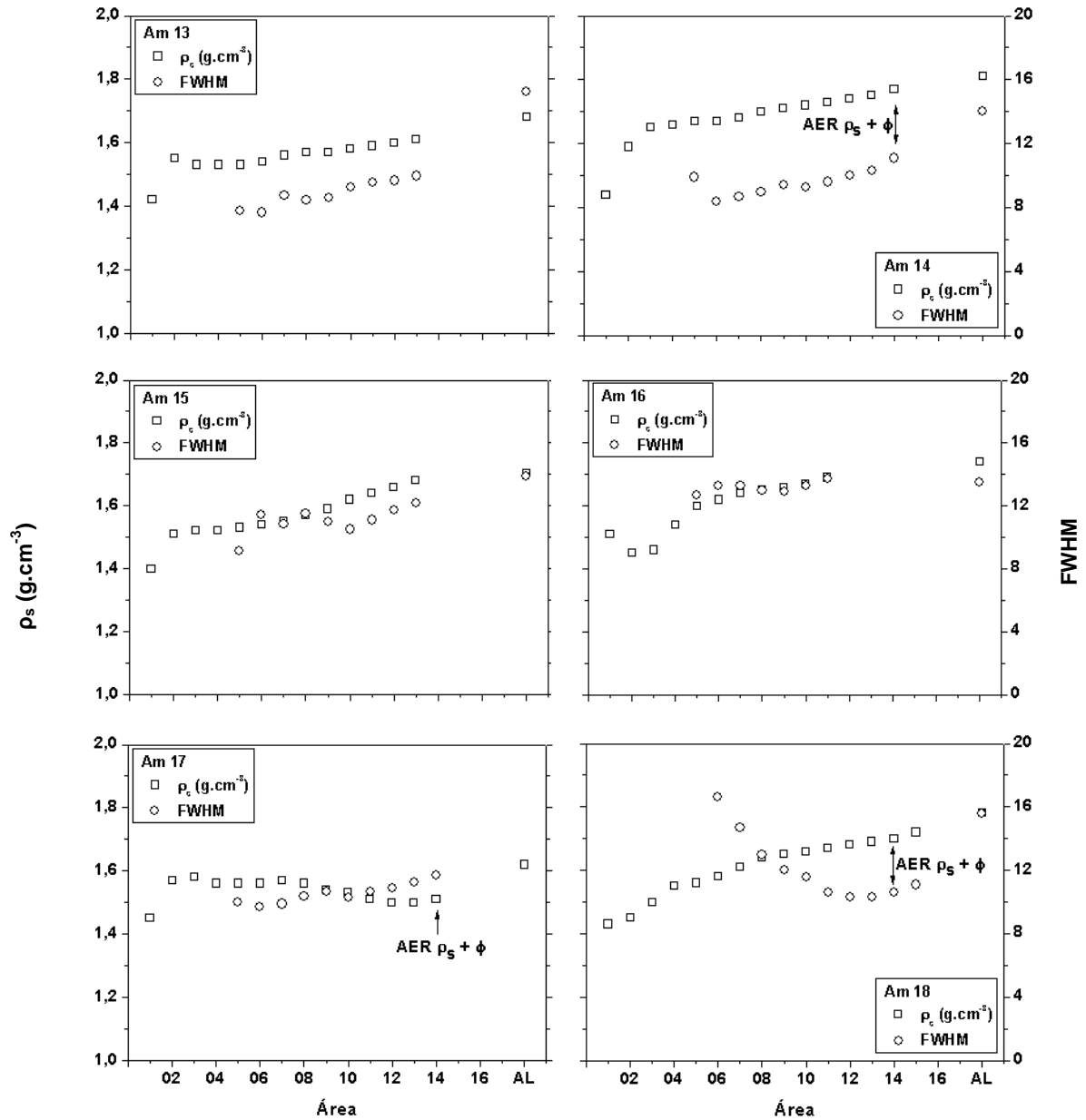


Figura 18 – Gráficos de densidade do solo (ρ_s) e largura total à meia altura (FWHM) para diferentes áreas de 18 amostras. Para amostras que comportaram 14 áreas ou mais, as setas indicam a 14ª área, a qual corresponde à área elementar representativa (AER) para realização de medidas de ρ_s e porosidade do solo (ϕ). AL representa a área livre.

6 CONCLUSÕES

Os critérios estabelecidos para definição da AER foram os de variação para três áreas consecutivas não superior a 4% para ρ_s , e não superior a 10 % para ϕ . Para medidas de ρ_s , a AER sob estas condições corresponde a 640,1 mm² e para ϕ , a 882,1 mm². Já na junção, a área considerada corresponde ao maior valor necessário para que todas as amostras que atingiram a AER para ambas as propriedades físicas o fizessem. Esta é a 14^a área, que é a mesma considerada como AER para a porosidade do solo. Sendo assim, para a realização de medidas representativas destas duas propriedades físicas, a AER deve ser de pelo menos 882,1 mm².

É importante enfatizar a importância da aplicação da técnica tomográfica para tal estudo. Ela possibilitou a obtenção das imagens de forma não destrutiva (o que não é o caso de técnicas tradicionais como a micromorfologia, por exemplo) e análise de diferentes áreas em seu interior. A técnica do torrão parafinado não poderia ser empregada em estudo semelhante, embora análises de tamanhos representativos possam ser realizadas com medidas de densidade e porosidade de torrões de diferentes volumes.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para se ter uma ideia mais realista da estrutura do solo e da dinâmica de solutos nesse meio poroso, faz-se necessário o uso de informações em escala micrométrica. Por esse motivo o próximo passo desse trabalho de pesquisa é a análise de volumes elementares representativos utilizando-se imagens tridimensionais com resolução micrométrica.

REFERÊNCIAS

AL-RAOUSH, R.; PAPADOPOULOS, A. Representative elementary volume analysis of porous media using X-ray computed tomography. **Powder Techn.**, Lausanne, v. 200, n. 1-2, p. 69-77, fev./2010.

ASANO, Y.; UCHIDA, T. Is representative elementary area defined by a simple mixing of variable small streams in headwater catchments? **Hydrol. Process.**, Chichester, v. 24, n. 5, p. 666-671, fev./2010.

BARTOLI, F. et al. A multiscale study of silty soil structure. **Eur. J. Soil Sci.**, Oxford, v. 56, n. 2, p. 207-223, abr./2005.

BAVEYE, P. et al. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: Simulation with x-ray tomography data. **Meas. Sci. Technol.**, Bristol, v. 13, n. 5, p. 775-784, mai./2002.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: Dover Publications, 1988. 779p.

BLOSCHL, G.; GRAYSON, R. B.; SIVAPALAN, M. On the representative elementary area (REA) concept and its utility for distributed rainfall-runoff modelling. **Hydrol. Process.**, Chichester, v. 9, n. 3-4, p. 313-330, mai./1995.

BOUHLEL, M.; JAMEI, M.; GEINDREAU, C. Microstructural effects on the overall poroelastic properties of saturated porous media. **Model. Simul. Mater. Sci. Eng.**, Bristol, v. 18, n. 4, mar./2010, 22p.

CESAREO, R.; DEASSIS, JT; CRESTANA, S. Attenuation coefficients and tomographic measurements for soil in the energy-range 10-300 kev. **Appl. Radiat. Isotopes**, New York, v. 45, n. 5, p. 613-620, mai./1994.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R. S. Static And Dynamic 3 Dimensional Studies Of Water In Soil Using Computed Tomographic Scanning. **Soil Sci.**, Baltimore, v. 140, n. 5, p. 326-332, nov./1985.

CRESTANA, S. et al. Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 16, p. 161-167, 1992.

CRESTANA, S. et al. **Instrumentação Agropecuária: Contribuições no Limiar do Novo Século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1996. 291p.

CRUVINEL, P. E. **Minitomógrafo de Raio-X e Raio-Gama Computadorizado para Aplicações Multidisciplinares**. 1987, 329 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CRUVINEL, P. E. et al. X-ray and gamma-ray computerized minitomograph scanner for soil science. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, New York, v. 39, n. 5, p. 745-750, out./1990.

DOWNING, D.; CLARK, J. **Estatística Aplicada**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2000. 351p.

ELLIOT, T. R.; REYNOLDS, W. D.; HECK, R. J. Use of existing pore models and X-ray computed tomography to predict saturated soil hydraulic conductivity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 156, n. 3-4, p. 133-142, mai./2010.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - CNPS, 1997. 212p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA – CNPS, 2006. 306 p.

FANTE JÚNIOR et al. Evaluation of Soil Compaction as Concerned to land Use. In: CRUVINEL, P.E.; COLNAGO, L.A.. (Org.). **Advances in agricultural tomography**. Campinas: EMBRAPA/CNPDI, 2000. p.125-130.

FANTE JÚNIOR et al. Tomografia Computadorizada na avaliação da densidade do solo do semi-árido brasileiro. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 26, p. 835-842, ago./2002.

FERRAZ, E. S. B.; MANSELL, R. S. Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods. **Boletim Técnico**, Gainesville, University of Florida, n. 807, 1979, 51p.

GRAHAM, S.; YANG, N. Representative volumes of materials based on microstructural statistics, **Scr. Mater.**, Bethesda, v. 48, n. 3, p. 269-274, fev./2003.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Rev. Bras. Cienc. Solo**, Campinas, v. 29 n. 2, p. 169-177, jan./2005.

GUSEV, A. A. Representative volume element size for elastic composites: A numerical study. **J. Mech. Phys. Solids**, Grã-Bretanha, v. 45, n. 9, p. 1449-1459, set./1997.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771p.

HUBBELL, J.H.; SELTZER, S.M. Tables of X-Ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. **NISTIR**, Gaithersburg, US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Physics Laboratory, Ionizing Radiation Division, n. 5632, 1995. 111p.

JURY, W. A.; HORTON, R. **Soil physics**. 6. ed. New Jersey: Wiley, 2004. 370p.

KAK, A. C.; SLANEY, M. **Principles of computerized tomographic imaging**. New York: IEE Press, 1999, 327p.

KAPLAN, I. **Física Nuclear**. Madrid: Aguilar, 1962. 728p.

KIM, G.-B.; LEE, J.-Y.; LEE, K.-K. Application of Representative Elementary Area (REA) to Lineament Density Analysis for Groundwater Implications. **Geosci. J.**, Seoul, v.8, n. 1, p. 27-42, mar./2004.

Li, J. H. et al. Permeability tensor and representative elementary volume of saturated cracked soil. **Can. Geotech. J.**, Ottawa, v. 46, n. 8, p. 928-942, ago./2009.

LI, J.H.; ZHANG, L.M. Geometric parameters and REV of a crack network in soil. **Comput. Geotech.**, Barking, v. 37, n. 4, p. 466-475, jun./2010

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

MACEDO, A. et al. X-ray microtomography to characterize the physical properties of soil and particulate systems. **Powder Techn.**, Lausanne, v. 101, p. 178-182, fev./1999.

MARTÍNEZ, F. S. J. et al. Representative elementary area for multifractal analysis of soil porosity using entropy dimension. **Nonlin. Processes Geophys.**, Göttingen, v. 14, n. 4, p. 503-511, ago./2007.

MICROVIS. **Manual do Programa de Reconstrução e Visualização de Imagens Tomográficas**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000. 18p.

MÜLLER, C.; SIEGSMUND, S.; BLUM, P. Evaluation of the representative elementary volume (REV) of a fractured geothermal sandstone reservoir. **Environ. Earth Sci.**, Melbourne, v. 61, n. 8, p. 1713-1724, mar./ 2010.

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

NAIME, J. de M. **Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo.** 2001, 166 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ORIGIN 8. **Guia do usuário.** 1 ed. Northampton: OriginLab Corporation, 2007. 560p.

PEDROTTI, A. et al. Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um Planossolo. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 819-826, jul./2003a.

PEDROTTI, A. et al. Planosol soil sample size for computerized tomography measurement of physical parameters. **Sci. Agric.**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 735-740, dez./2003b.

PEDROTTI, A. et al. Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computadorized tomography methods. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 80, p. 115-123, jan./2005.

PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. **Proc. / Soil Sci. Soc. Am.**, Madison, v.46, n. 3, p.445- 449, 1982.

PIRES, L.F. et al. Qualitative and Quantitative Analysis of Soil Samples by Computerized Tomography. **Publicatio UEPG . Ciencias Exatas e da Terra, Ciencias Agrárias e Engenharias**, Ponta Grossa, v. 11, n. 2, p. 7-15, ago./2005a.

PIRES L. F. et al. Application of gamma-ray computed tomography to the analysis of soil structure before density evaluations. **Appl. Radiat. Isotopes**, New York, v. 63, p. 505-511, out./2005b.

PIRES L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de água pelo solo.** 2006, 229 f. Tese (Doutorado em Energia nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PIRES L. F. et al. Application of gamma-ray computed tomography to evaluate the radius of influence of soil solution extractors and tensiometers. **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B Beam Interact. Mater. Atoms**, Amsterdam, v. 259, p. 969-974, jun./2007.

PIRES, L. F. et al. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v. 110, n. 2, p. 197-210, nov./2010.

RAZAVI, M.R., MUHUNTHAN, B.; HATTAMLEH, O. Representative elementary volume analysis of sands using X-ray computed tomography. **Geotech. Test. J.**, Philadelphia, n. 3, v. 30, p. 212-219, mai./2007.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 500p.

SILVA, A. M. et al. Tomógrafo de resolução micrométrica para estudo de solos. **Boletim de Pesquisa**, Campinas, EMBRAPA/CNPDI, n. 4, 1997, 44p.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 30, p. 1065-1068, abr./2000.

TERUEL, F.E.; RIZWAN-UDDIN. Numerical computation of macroscopic turbulence quantities in representative elementary volumes of the porous medium, **Int. J. Heat Mass Transfer**, Oxford, v. 53, p. 5190-5198, ago./2010.

TIMM, L. C. et al. Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. **Aust. J. Soil Res.**, Melbourne, v. 43, p. 97-103, fev./2005.

TIPPKÖTTER, T. et al. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography (μ CT). **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.105, p. 12-20, set./2009.

TOMIOKA, S. et al. Analysis of microstructural images of dry and water-saturated compacted bentonite samples observed with X-ray micro CT. **Appl. Clay Sci.**, Amsterdam, v. 47, n. 1-2, p. 65-71, jan./2010.

TUMLINSON, L. G., et al. Thermal neutron computed tomography of soil water and plant roots. **J. / Soil Sci. Soc. Am.**, Madison, v. 72, n. 5, p. 1234-1242, set./2008.

VANDENBYGAART, A. J.; PROTZ, R. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. **Geoderma**, Amsterdam, v.89, p. 333-346, mai./1999.

VAZ, C. M. P. et al. Using a computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. **Soil Tech.**, Amsterdam, v. 2, p. 313-321, set./1989.

VAZ, C. M. P; NAIME, JD; MACEDO, A. Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. **Soil Sci.**, Baltimore, v. 164, n. 6, p. 403-410, jun./1999.

VIANA, J. H. M. Determinação da Densidade de Solos e de Horizontes Cascalhentos. **Comunicado Técnico**, Sete Lagoas, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, n. 154, 2008,11p.