

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS – FÍSICA

JOCENEI ANTONIO TEODORO DE OLIVEIRA

**A CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS OBTIDA POR SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL EM IMAGENS TOMOGRÁFICAS**

PONTA GROSSA

2014

JOCENEI ANTONIO TEODORO DE OLIVEIRA

**A CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS OBTIDA POR SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL EM IMAGENS TOMOGRÁFICAS**

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

**Orientador: Prof. Dr. Fabio Augusto
Meira Cássaro**

PONTA GROSSA

2014

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

048 Oliveira, Jocenei Antonio Teodoro de
A curva de distribuição de poros obtida
por simulação computacional em imagens
tomográficas/ Jocenei Antonio Teodoro de
Oliveira. Ponta Grossa, 2014.
87 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências -
Área de Concentração: Física),
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr. Fabio Augusto
Meira Cássaro.

1. Curva de distribuição de poros.
2. Curva de retenção de água. 3. Imagens
tomográficas. I. Cássaro, Fabio Augusto
Meira. II. Universidade Estadual de Ponta
Grossa. Mestrado em Ciências. III. T.

CDD: 530

TERMO DE APROVAÇÃO

Jocenei Antonio Teodoro de Oliveira

“A Curva de Distribuição de Poros Obtida por Simulação Computacional em Imagens Tomográficas”

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. Fábio Augusto Meira Cássaro
Departamento de Física, UEPG/PR



Dr. Carlo Manoel Pedro Vaz
CNPDIA/EMBRAPA/São Carlos/SP



Prof. Dr. Francisco Carlos Serbena
Departamento de Física, UEPG/PR

Ponta Grossa, 10 de junho de 2014

IN MEMORIAM
MARIA URÇULINA ANTUNES DE OLIVEIRA (MINHA MÃE)
28/01/1951-24/09/2010.



AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus Cristo, por carregar-me em seus braços nas horas e momentos mais difíceis da minha vida e por derramar seu precioso e sagrado sangue na cruz do calvário para salvação de toda a humanidade.

À minha família, ao meu pai Joaquim T. de Oliveira e a minha mãe Maria Urçulina A. de Oliveira pelo dom da vida. À minha querida irmã Alessandra Ap. T. de Oliveira, ao meu cunhado e melhor amigo Adenilson L. Biesek e a minha tia Maria Aurora Antunes, pela compreensão, apoio e seu amor infinito para comigo.

À minha tia Rosa de Oliveira e prima Andressa Sommer pelo suporte habitacional durante a realização do mestrado e carinho.

Ao professor Dr. Fabio Augusto Meira Cássaro, primeiramente pela oportunidade de orientação na pesquisa e confiança em mim depositada. Em segundo lugar pela concessão dos programas de sua autoria para análise das imagens tomográficas essenciais nesta pesquisa. Finalmente, pela sua amizade, paciência e pelo seu vasto conhecimento comigo compartilhado.

Ao pesquisador Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz da Embrapa Instrumentação de São Carlos pelas reconstruções e disponibilização das imagens tomográficas e empréstimo das esferas de vidro utilizadas para levantamento das CRs.

Aos colegas e amigos do grupo de pesquisa FASCA, em especial ao Me. Fabiano M. M. Luz, Me. Luis Valério Prandel, Wellington Luis Almeida e a Ma. Jaqueline Aparecida Ribaski Borges, pela amizade, ajuda de todas as horas e companheirismo.

Aos colegas de pós-graduação Me. Moisés Souza Santos, Ma. Mônica Viana, Me. Maurício Ribeiro e ao Me. Rafael Borges, pelas conversas de corredor e outros auxílios durante a realização da pesquisa. E a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente durante esse percurso.

Ao PPG em Ciências-Física na pessoa de Josecler Lepinski (secretária), pela eficiência de seu trabalho e ajuda de todas as horas.

A CAPES pela concessão de bolsa de estudos.

“O impossível não existe; o que existe são pessoas fracas e incapazes de lutar pelos seus ideais.”

(Autor desconhecido)

RESUMO

Propriedades de retenção da água no solo podem ser descritas pela chamada curva característica de água no solo ou curva de retenção (CR). Esta curva exprime a relação entre potencial mátrico e a umidade do solo à base de massa ou volume. Mediante o levantamento da CR e posterior interpolação analítica, pode-se estimar indiretamente a curva de distribuição de poros (CDP) de um sistema poroso qualquer. Algumas vezes, a obtenção da CR pode ser um processo demorado ou envolver a utilização de equipamentos não disponíveis em alguns laboratórios. Desta forma, o desenvolvimento de uma metodologia alternativa para a obtenção da CR e posteriormente da CDP se faz desejável, uma vez que se trata de propriedade de extrema importância para a caracterização de um meio poroso. O objetivo principal deste trabalho é criar e adaptar metodologia para a obtenção de CDPs utilizando simulação computacional em imagens tomográficas com resolução micrométrica. No presente estudo, foram utilizadas amostras de areias e esferas de vidro de diferentes granulometrias para o levantamento das CRs usando um funil de Haines adaptado. Depois de obtidas as CRs, essas foram ajustadas através do modelo de ajuste de van Genuchten e obtidas as CDPs (primeira derivada da CR). Também foram obtidas CDPs mediante a adaptação de um programa computacional que utiliza informações de imagens tomográficas dessas amostras. Os resultados das CDPs levantadas pelos dois métodos mostram alguma concordância. Verificou-se, no entanto, que apenas considerações sobre a morfologia dos poros não são suficientes para descrever a forma com que as amostras são drenadas.

Palavras-Chave: Curva de Distribuição de Poros; Curva de Retenção de Água; Imagens Tomográficas.

ABSTRACT

Soil water retention properties can be described by so-called soil-water characteristic curve (SWCC) or retention curve (WRC). This curve expresses the relationship between matric potential and soil moisture based on weight or volume. Through the attainment and subsequent analytical interpolation of the WRC, it's possible the indirect estimative of the pore-size distribution (PSD) curve of any porous system. Sometimes, obtaining the WRC may be a time-consuming process or involve the use of equipment not available in some laboratories. Thus the development of an alternative method to obtain the WRC and after the PSD becomes desirable, since these are properties of extreme importance to characterize porous media. The main objective of this study is to create and adapt methodology for obtaining PSD using computer simulation in tomographic images with micrometer resolution. In this study, there were used samples of sand and glass beads of different grain sizes for the generation of the PSD curve using a Haines' funnel on balance. After WRC achievement, these were adjusted through an analytical model and then there were built experimental PSD curve. PSD were also determined by adaptation of a computer program using tomographic images of these samples. The results of obtained WRC associated with geometric models to predict the entry point of air have only revealed the idea about how may occur drying of the samples, showing only morphological considerations are not sufficient to describe this situation. The investigated porous systems homogeneity was able to be visualized by comparing the PSD curves in terms of their widths.

Keywords: Pore-Size Distribution Curve; Water Retention Curve; Tomographic Images.

LISTA DE FIGURAS OU ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Arranjos de acomodações de esferas uniformes. (a) cúbico simples, (b) cúbico tetraedral, (c) Tetragonal, (d) piramidal e (e) tetraedral.....	23
Figura 2: Ascensão da Água em um Tubo Capilar.....	24
Figura 3: Esboço do Funil de Haines: (a) completamente saturado e (b) sujeito a uma tensão.	26
Figura 4: Principais estágios da CR.....	29
Figura 5: Função de Capacidade de Água.....	31
Figura 6: Exemplificação do processo de intrusão de mercúrio no interior de um poro com estrangulamento.....	33
Figura 7: Modelo apresentado em Santos (2005) para a modelagem de um poro formado em um sistema poroso composto por três esferas que não se interpenetram.....	35
Figura 8: Visão de topo da célula unitária de um empacotamento do tipo cúbico simples.....	36
Figura 9: Corte em diagonal da célula unitária do empacotamento cúbico simples.....	37
Figura 10: Modelo triangular do espaço poroso e sua sequência de drenagem.....	39
Figura 11: Aparato Experimental-Funil de Haines sobre a balança.....	44
Figura 12: Exemplo de gráfico de calibração para as esferas de vidro.....	46
Figura 13: Processo de escolha do valor de threshold para a binarização das imagens tomográficas.....	50
Figura 14: “Poros Idealizados”.....	52
Figura 15: Esquema do conjunto de imagens tomográficas.....	53
Figura 16: “Poros Idealizados” Geométricos Padrões.....	54
Figura 17: CRs das amostras de Areia.....	56
Figura 18: CRs das amostras compostas pelas esferas de vidro (EVs).....	57
Figura 19: Corte transversal do espaço poroso formado pelas esferas de vidro e pela areia...	59
Figura 20: FCAs das Amostras Analisadas.....	63
Figura 21: Comparação dos fatores de formas das amostras de areia e EV_0,5 mm.....	65
Figura 22: Análise do número mínimo de fatias a serem consideradas para a detecção de um poro usando o programa de Yang et al. (2009).	67
Figura 23: Curvas de Distribuições de Poros mediante utilização do programa de Yang et al. (2009).	69
Figura 24: Comparação entre as FCAs (van Genuchten, 1980) e CDPs (Yang et al., 2009). .	69

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1: Classificação quanto ao tamanho de partículas.....	22
Tabela 2: Acondicionamento de Esferas Uniformes.	23
Tabela 3: Dados de massas secas e densidades das amostras de areias e esferas de vidro investigados.	44
Tabela 4: Valores teóricos dos fatores de formas para duas geometrias simples.....	55
Tabela 5: Valores dos fatores de forma das análises das imagens dos “poros idealizados”....	55
Tabela 6: Valores dos parâmetros do modelo de vG para as amostras investigadas.....	57
Tabela 7: Valores de porosidades das amostras investigadas obtidas pela utilização das expressões 1 e 41.	58
Tabela 8: Valores de diâmetros médios das partículas que compõem o meio poroso e as tensões do ponto de entrada de ar conforme modelo simplificado de Santos (2005) calculados por meio das equações 4 e 18.	60
Tabela 9: Valores de diâmetros médios das partículas que compõem o meio poroso e as tensões do ponto de entrada de ar conforme modelo simplificado Hilpert e Miller (2001) e Davis e Scriven (1977) obtidos por meio das expressões 24 e 25.....	61
Tabela 10: Raio de drenagem e tensão de sucção segundo modelo de Mason e Morrow (1991).	62
Tabela 11: Tensões e raios equivalentes para a posição dos picos das FCAs considerando que a inflexão da CR no ponto médio entre θ_s e θ_r dada pela equação 40.	64
Tabela 12: Largura à meia altura das FCAs dos meios porosos investigados.	64
Tabela 13: Valores de G calculados via análise de imagens para os diferentes formatos de poros.....	65
Tabela 14: Valores de porcentagem para cada área de formato de poro e porcentagem correspondente à mesma.	66

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

CR	Curva de Retenção de Água
CDP	Curva de Distribuição do Tamanho de Poros
FCA	Função Capacidade de Água
E.V.	Esferas de Vidro
vG	van Genutchen
MM	Mason e Morrow
FWHM	Largura Meia Altura
Ψ_m	Potencial Mátrico
h	Tensão de Sucção
r	Raio de Poro
$D_{(g)}$	Diâmetro Médio do Grão
$r_{(d)}$	Raio de Drenagem do Poro
θ_r	Umidade Residual
θ_s	Umidade de Saturação
Gs	Fatores de Forma
\emptyset	Porosidade

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
1 MOTIVAÇÃO	13
CAPÍTULO 2	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 A CURVA DE RETENÇÃO (CR).....	15
2.2 CURVA DE DISTRUBUIÇÃO DE POROS (CDP)	16
2.3 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TC) APLICADA À CIÊNCIA DO SOLO	16
2.4 QUANTIFICAÇÕES DO MOVIMENTO E RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO ATRAVÉS DA TC.....	20
CAPÍTULO 3	22
3 TEORIA	22
3.1 A ESTRUTURA DE UM ESPAÇO POROSO	22
3.2 CAPILARIDADE.....	24
3.3.1 Medidas do potencial mátrico	26
3.3.1.1 Funil de Haines Adaptado	26
3.4 A CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA (CR)	28
3.5 AJUSTE DA CR MEDIANTE A INTERPOLAÇÃO DE MODELOS ANALÍTICOS	29
3.7 MODELO DE YANG PARA A OBTENÇÃO DA CDP.....	32
3.8 MODELOS GEOMÉTRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DO RAIOS DE UM PORO DE GEOMETRIA SIMPLES	34
3.8.1 Modelo de Santos	34
3.8.2 Modelo de Hilpert e Miller em conjunto com o de Davis e Scriven	36
3.8.3 Modelo de Mason e Morrow (MM)	38
CAPÍTULO 4	43
4 MATERIAL E MÉTODOS	43
4.1 AS AMOSTRAS INVESTIGADAS	43
4.2 OBTENÇÃO DAS CRs.....	44

4.3 AJUSTE DA CURVA DE VAN GENUCHTEN AOS PONTOS EXPERIMENTAIS USANDO O SOLVER [®] DO EXCEL [®]	47
4.4 CONSTRUÇÃO DAS FCAs A PARTIR DOS PARÂMETROS DO AJUSTE DE VAN GENUCHTEN	48
4.5 DETERMINAÇÕES DAS POROSIDADES DAS AMOSTRAS ANALISADAS	48
4.6 AQUISIÇÃO E RECONSTRUÇÃO DAS IMAGENS TOMOGRÁFICAS	49
4.7 BINARIZAÇÃO DAS IMAGENS TOMOGRÁFICAS	50
4.8 NÚMERO MÍNIMO DE SEÇÕES TOMOGRÁFICAS PARA A DETERMINAÇÃO DE UM PORO USANDO O PROGRAMA DE YANG.....	51
4.9 FORMATOS DOS POROS ENCONTRADOS E ANALIZADOS	53
CAPÍTULO 5.....	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
5.1 CRs EXPERIMENTAIS COM AJUSTE DE VAN GENUCHTEN	56
5.2 FCAs ORIUNDAS DAS CRs INTERPOLADAS PELA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN	63
5.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO PROGRAMA DE YANG PARA A OBTENÇÃO DA CDP.....	66
5.4 O PROGRAMA DE YANG PARA A DETERMINAÇÃO DAS CDPs DAS AMOSTRAS DE ESFERAS DE VIDRO	68
CAPÍTULO 6.....	71
6 CONCLUSÃO.....	71
6.1. CONCLUSÕES GERAIS	71
6.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS	71
CAPÍTULO 7.....	73
7 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
APÊNDICE A - MODELO DE PORO TRIANGULAR DE MM	
APÊNDICE B – PROGRAMA TULLER.M PARA OBTENÇÃO DOS FATORES DE FORMA “G”	

CAPÍTULO 1

1 MOTIVAÇÃO

Estudos visando a obtenção de informações sobre o comportamento de retenção da água por um meio poroso como o solo são de grande importância em sua caracterização Física. Essa caracterização se faz, invariavelmente, pelo levantamento de curvas de retenção de água pelo solo (ou curvas características) as quais, em condições próximas à saturação, dependem basicamente da estrutura do solo.

A curva de retenção relaciona o potencial da água no solo (expresso em termos de um potencial mátrico) e o seu grau de umidade (expresso a base de massa ou volume de solo) (CHILDS, 1940 apud GIMENES, 2012). Sua construção/levantamento se faz de forma experimental, com o solo em condições de campo ou laboratório, utilizando-se equipamentos tais como: tensiômetros, TDRs, câmaras de Richards, funis de Haines e etc.

O levantamento de uma CR muitas vezes tem custo elevado e pode levar dias, meses ou anos dependendo da finalidade do estudo pretendido, do número de pontos a serem obtidos e das características granulométricas e mineralógicas do material. Após sua obtenção, a CR pode ser utilizada para estimar, de forma indireta, a distribuição do tamanho de poros do solo.

Tal estimativa é feita mediante o cálculo da primeira derivada da curva utilizada na interpolação dos pontos da curva de retenção. Essa primeira derivada é conhecida como Capacidade Específica ou Função Capacidade de Água (LIBARDI, 1995; PREVEDELLO, 1996; CÁSSARO et al., 2008).

Alguns autores tais como, por exemplo, Delerue (1999); Lindquist (2006); Nakashima e Kamiya (2007) e Yang et al. (2009) já apresentaram estudos visando a obtenção da CDP utilizando-se imagens tomográficas. Uma das grandes vantagens de se obter a CDP através da utilização do método de análise de imagens tomográficas reside no fato de que, em princípio, uma CDP pode ser obtida em questão de horas ou poucos dias dependendo das características da amostra investigada.

Outra vantagem desse método é a possibilidade do modelamento do sistema poroso, a fim de se conseguir informações sobre a conectividade e a tortuosidade do espaço poroso do sistema, informações essas que são de fundamental importância para a compreensão e descrição do movimento e secagem de líquidos no interior de uma amostra porosa.

Dessa maneira, numa primeira etapa do presente trabalho buscou-se comparar as CDPs advindas das CRs com as obtidas mediante as análises de imagens tomográficas das amostras investigadas. Contudo, o foco primordial do mesmo, foi de criar e adaptar uma metodologia para a aquisição das CDPs utilizando simulação computacional em imagens tomográficas com resoluções micrométricas.

As imagens microtomográficas de amostras de areias e esferas de vidro de diversas granulometrias foram obtidas em um microtomógrafo de feixe cônico de bancada, da Embrapa Instrumentação Agropecuária, que foram gentilmente cedidas para a realização deste trabalho.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A CURVA DE RETENÇÃO (CR)

O primeiro experimento que utilizou o conhecimento da curva de retenção de água no solo data de 1907 e foi realizado por Edgar Buckingham, o qual analisou a infiltração da água em solos de texturas diferentes, variando de uma mais arenosa a uma mais argilosa. O experimento de Buckingham consistiu em se medir fluxos de água em regime estacionário, utilizando-se colunas de solo de aproximadamente 1,20 m de comprimento (NIMMO; LANDA, 2005; NARASIMHAN, 2005). Nesse estudo formulou-se pela primeira vez uma equação para a descrição de fluxos saturados e não saturados, a qual levava em conta o papel do potencial mátrico ou matricial¹ no movimento de água no solo.

Outros estudos sobre a relação entre o conteúdo de água e o seu potencial mátrico foram realizados nos princípios do século XX. Dentre eles destacam-se os realizados por Gardner, (1920), e Richards, (1928) (NIMMO; LANDA, 2005; NARASIMHAN, 2005). No decorrer desses estudos alguns equipamentos foram desenvolvidos para a determinação do potencial mátrico do solo: em 1930, Haines publicou em “Estudos das propriedades físicas do solo” os resultados que obteve com a utilização de Funis de Placa Porosa e anos mais tarde, Richards fez uso de Câmaras de Pressão com Placa Porosa; ambos os aparelhos têm como princípio de funcionamento a teoria da capilaridade para a determinação do potencial mátrico do solo (LIBARDI, 2005).

No entanto, vários outros métodos surgiram para a determinação da curva de retenção em diferentes faixas de potenciais mátricos de interesse. Isso se deve em parte, ao fato de que mais de um método ou equipamento deva ser empregado para se obter uma curva de retenção que englobe a faixa completa de umidades de uma mostra, a qual vai da saturação até o ponto de murcha permanente - ponto no qual as plantas em condições de murchas não se recuperam ao serem colocadas em espaços saturados (OR; WRAITH, 1997).

Devido ao alto custo dos equipamentos e às vezes do longo período de tempo que é necessário para o levantamento de uma curva de retenção, muitos métodos alternativos foram

¹ O potencial mátrico é devido à combinação de adsorção e capilares que envolvem a água e a matriz do solo. Em outras palavras, é o potencial com que a água é mantida junto às partículas sólidas do solo.

e estão sendo desenvolvidos e utilizados para a obtenção da curva na faixa de potenciais de 1 kPa a 1500 kPa (PMP) (FREITAS JUNIOR; SILVA, 1984; MEDEIROS, 1987; FELICIANO, 2005; TAVARES; FELICIANO; VAZ, 2008).

Um exemplo é o método de Arya e Paris (1981) que se fundamenta na similaridade entre as funções que descrevem a distribuição de tamanho de partículas do solo e a curva de retenção (LUCAS et al., 2011). Nesse método utiliza-se a grosso modo, a análise granulométrica para a determinação de valores de potencial mátrico. Pela utilização do método, a curva de retenção pode ser determinada em um número muito maior de pontos, com mais agilidade e menor custo (MANIERI et al., 2009).

Hoje o conhecimento da curva de retenção de água no solo serve de base para a formulação de novos modelos para se inferir sobre a condutividade hidráulica e as propriedades de retenção de água pelo solo. Por este motivo, muitos esforços têm sido direcionados para correlacionar a retenção de água a algumas propriedades físicas do solo, tais como a sua distribuição de partículas (CHAN; GOVINDARAJU, 2004).

2.2 CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS (CDP)

A CDP é uma curva de frequências, a qual fornece informações a respeito da composição dos poros que constituem um determinado meio poroso, em termos de seus tamanhos característicos, geralmente seus raios ou diâmetros, imaginando os poros como capilares cilíndricos. Uma estimativa da CDP pode ser obtida pela Função Capacidade de Água ou Capacidade Específica, a qual é dada pela primeira derivada da CR (PREVEDELLO, 1996).

O conhecimento sobre a distribuição do tamanho de poros é de suma relevância para compreensão das modificações causadas na estrutura do solo, seja ela proveniente de processos naturais ou de ações antrópicas. Mudanças no sistema poroso relacionadas às dimensões, categorias e arranjos de partículas influenciam de maneira crucial a natureza hidráulica do solo, interferindo na condução e retenção de fluido no mesmo.

2.3 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TC) APLICADA À CIÊNCIA DO SOLO

Ao contrário das técnicas convencionais de análise de imagens, tal como a micromorfológica (BOUMA et al., 1977; CASTRO et al., 2003; COOPER; VIDAL-TORRADO, 2005; PIRES et al., 2007; PIRES et al., 2008a,b), a tomografia computadorizada

(TC), uma técnica baseada no conceito de atenuação de radiação pela matéria, permite a realização de investigações de caráter não destrutivo e não invasivo de sistemas porosos de variadas espécies, dentre eles, o do solo (ELLIOT; HECK, 2007). Isso permite, por exemplo, o seu uso para a verificação de mudanças que ocorrem no interior do sistema poroso, antes e depois da aplicação de um determinado tratamento (CNUUDE et al., 2006).

O primeiro equipamento de TC, desenvolvido para aplicações em medicina, foi baseado em princípios introduzidos por Hounsfield no ano de 1973. Já o início da utilização da TC em ciências do solo data de 1982, com o trabalho pioneiro de Petrovic; Siebert e Rieke. Nesse trabalho, ficou estabelecida uma correlação entre a unidade Hounsfield e a densidade do solo (PETROVIC; SIEBERT; RIEKE, 1982). No Brasil, a aplicação da TC em solos e em estudos ligados à agricultura foi proposta inicialmente por um grupo de pesquisadores liderado pelo professor Sérgio Mascarenhas (CRESTANA; CESAREO; e MASCARENHAS, 1986).

De lá para cá, com o desenvolvimento de tomógrafos de segunda e terceira gerações com preços mais acessíveis (cerca de milhares de dólares, contra milhões de dólares dos sistemas utilizados tradicionalmente em medicina) e do aprimoramento da própria TC, outras potencialidades da técnica vêm sendo exploradas e utilizadas nas ciências do solo e do ambiente (COLES et al., 1998; PIERRET et al., 1999; FRANCIS et al., 2001; JÉGOU et al., 2002; FARBER; TARDOS; MICHAELS, 2003; ROGASIK et al., 2003).

Nos dias de hoje, verifica-se a aplicação da TC na investigação micrométrica e tridimensional da estrutura interna do solo (PIERRET et al., 2002; PIRES et al., 2006; JASSOGNE et al., 2007; KILFEATHERA; VAN DER MEER, 2008; PIRES; BACCHI, 2010; BORGES, 2012; PASSONI, 2013). Dentre muitas outras finalidades, essas investigações verificam o papel da estrutura nos processos de condução de água pelo solo (JASSOGNE et al., 2007; QUINTON et al., 2009; TIPPKÖTTER et al., 2009; ELLIOT; REYNOLDS; HECK, 2010).

Como se sabe, a TC é uma técnica bidimensional de análise. Entretanto, a realização de diversas tomografias em diferentes planos ao longo de uma direção da amostra, permite a reconstrução tridimensional (3D) de seu espaço poroso.

Com os equipamentos usados atualmente (de segunda e terceiras gerações), dependendo do tipo e dimensões de uma amostra, isso é feito em poucos minutos ou até em poucas horas. Resoluções de até 5 μm ou melhores ($< 5\mu\text{m}$) são corriqueiramente atingidas ao se analisarem amostras de pequenos volumes. Em termos comparativos, nos tomógrafos de primeira geração, os inicialmente utilizados na pesquisa envolvendo solos, a aquisição de uma

única seção tomográfica podia levar horas ou até dias, dependendo da resolução pretendida. Os fatos apresentados anteriormente apontam alguns dos motivos da utilização mais intensa e difundida dessa técnica atualmente.

Segundo Dului (1999), a TC possui dois usos potenciais no estudo do solo: a investigação do seu espaço poroso, identificando a distribuição espacial e morfológica de seus poros, e a investigação detalhada da distribuição, no caso de amostras umedecidas, da água em seu interior.

Em relação ao segundo aspecto mencionado anteriormente, usando a subtração de imagens tomográficas, Goldstein; Prasher e Ghoshal (2007); Pires et al. (2007) conseguiram encontrar a distribuição tridimensional da água, e contaminantes nela dissolvidos, no interior da matriz de um solo. A subtração de imagens, como o nome sugere, consiste em subtrair-se a imagem do solo umedecido da imagem do solo seco, representando a diferença entre elas a imagem tridimensional da distribuição da água do solo.

Em Jassogne; Mcneill e Chittleborough (2007) são descritos procedimentos para a determinação em 3D do sistema poroso do solo em nível de macro ($>75\mu\text{m}$) e meso poros ($30-75\mu\text{m}$) usando a microtomografia. Nesse trabalho encontram-se informações detalhadas de como se fazer o tratamento de imagens para a detecção de poros dessas categorias, assim como de se determinar a continuidade e conectividade do sistema poroso formado por eles. Trabalhos sobre a separação, análise e reconstrução tridimensional de poros com determinadas dimensões características podem também ser encontradas em: Mooney (2002); Perret et al. (2003); Raoush e Willson (2005); Taina et al. (2008) e Quinton et al. (2009).

O sistema poroso do solo é formado por pequenos agregados de partículas que o constituem (areia, silte e argila) - exceto para sistemas com elevado teor de areia na sua composição (nos quais a formação de agregados é bastante dificultada) e materiais cimentantes (matéria orgânica), óxidos e carbonatos. A quantidade desses constituintes determina a textura do solo. Entre os agregados do solo (inter) ou ainda dentro deles (intra) encontram-se os poros do solo. O conjunto desses poros determina, respectivamente, o espaço inter e intra-agregado do solo. São neles que a água, ar ou organismos vivos podem se deslocar ou se fixar na matriz do solo (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 1997).

A associação da textura à estrutura determina como o solo irá se comportar fisicamente. Por exemplo, há solos com melhores características de drenagem de água, tais como os solos arenosos (solos com predomínio de areias em sua composição), assim como há os que retêm mais fortemente a água em seu interior, como é o caso dos solos argilosos (com predomínio de partículas de textura mais finas, como a argila, em sua composição).

Modificações na morfologia ou arranjo dos poros de um solo, introduzidas por processos naturais ou artificiais modificam, às vezes de forma bastante drástica, a maneira como eles retêm a água em seu interior. Outras características do sistema poroso ou mais fundamentalmente dos poros que o compõe são ligadas à sua distribuição, tortuosidade, conectividade e continuidade.

Há alguns artigos nos quais a descrição, investigação e ou modelagem de sistemas porosos é feita pela utilização de um sistema constituído primariamente de câmaras esféricas ou em forma de paralelepípedos (poros) interligadas por tubos cilíndricos (gargantas ou estreitamentos) de variados tamanhos, tipos e configurações. Esse enfoque possibilita, por exemplo, investigações relacionadas à tortuosidade e conectividade do sistema poroso (LINDQUIST et al., 2000; TISAKIROGLOU; PAYATAKES, 2000; ROY et al., 2003; LINDQUIST, 2006; ROBB; KOTZER; HAWKES, 2007; NEETHIRAJAN; WHITE; ZHANG, 2008; UDAWATTA et al., 2010).

Em Lindquist et al. (2000), por exemplo, salienta-se que o estudo do sistema poroso de um material é feito pela análise, voxel a voxel, de sua imagem tomográfica. Nessa etapa, a geometria do sistema é quantificada num processo denominado de segmentação, no qual a parte porosa do sistema é “separada” (discriminada) de sua parte sólida. Este processo depende, dentre outros fatores, de uma escolha apropriada dos parâmetros utilizados para o tratamento inicial das imagens (“threshold”). A esse respeito, há artigos que descrevem algoritmos para essa finalidade, tais como: Otsu (1979); Wonho e Lindquist (1999); Lindquist et al. (2000) e Raoush e Willson (2005).

A quantificação de um sistema poroso, permite a obtenção de informações relevantes sobre o mesmo, tais como, por exemplo, a CDP deste sistema (LINDQUIST et al., 2000; VOGEL; ROTH, 2001; RAOUSH; WILLSON, 2005; ROBB et al., 2007; NEETHIRAJAN; WHITE; ZHANG, 2008). Tais informações, geradas a partir de estudos utilizando a análise de imagens, sejam elas obtidas por tomografia ou não, vêm possibilitando a sua comparação com, por exemplo, informações obtidas pela técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, Bartoli et al. (1999); Tisakiroglou e Payatakes (2000) e Yang et al. (2009).

2.4 QUANTIFICAÇÕES DO MOVIMENTO E RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO ATRAVÉS DA TC

Estudos introdutórios sobre a possibilidade da utilização da TC de raios- γ para verificação da distribuição do conteúdo espacial da água no solo e da água no sistema solo-raiz, foram feitos inicialmente por Hainsworth e Aylmore em 1983.

Já em 1985, Crestana e colaboradores usando tomógrafos de raios-X deram início a medições do movimento da água no solo (CRESTANA, 1986).

Usando imagens tomográficas de dois tipos de solos diferentes, Heijs; Ritsema e Dekker (1996) conseguiram visualizar tridimensionalmente o fluxo preferencial da água no solo. Também, nesse trabalho a visualização de um núcleo de argila através das imagens tomográficas apontou que a trajetória do fluxo próximo à condição de saturação está bastante correlacionada com a rede de macroporos existentes no solo.

Hamza; Anderson e Aylmore (2001) conseguiram associar dados de imagens tomográficas a decréscimos dos conteúdos de água no solo devido à transpiração de raízes. Avaliando o raio de influência de tensiômetros e extratores de solução de dois solos diferentes com o uso da TC, Pires et al. (2007) mostrou como a distribuição da umidade do solo e o potencial mátrico são influenciados pela inserção destes instrumentos na matriz do solo. Neste trabalho esses autores verificaram que a água não se distribui de maneira uniforme nos arredores dos instrumentos, tendendo para regiões de maiores densidades ao redor de suas cápsulas porosas.

Schaap et al. (2008) utilizando um tomógrafo de nêutrons rápidos, mediram tridimensionalmente o conteúdo de água em colunas heterogêneas (diferentes tamanhos de partículas) de areias durante dois ciclos de umedecimento-secamento. Em tal trabalho os autores demonstraram que a dinâmica do líquido em questão é dependente do acondicionamento espacial das partículas do sistema e também um efeito duplo da conectividade na estrutura da areia mais grossa.

A quantificação do fluxo preferencial da água em colunas de solo intacto (estruturado) também foi realizada por Luo; Lin e Halleck (2008), verificando a complexibilidade da dinâmica natural do fluxo em solo estruturado devido a sua complexa rede de macroporos. Já Tippkötter et al. (2009) demonstraram em amostras indeformadas a distribuição natural da água em seu espaço poroso no que tange a microporosidade. Desta forma, tanto o movimento quanto a retenção de água pelo solo são conhecimentos de extrema importância em estudos ligados ao comportamento da água no solo.

Muitos estudos utilizando a TC, visando a verificação do papel do sistema poroso do solo nos processos de condução vêm sendo apresentados. No entanto, na bibliografia existente, ainda há poucos relatos da aplicação da técnica de TC para a determinação do papel do espaço poroso nas propriedades de retenção de água pelo solo. Além de constituir pesquisa básica, esse tipo de informação pode se tornar de grande valia para a predição das propriedades de retenção de um solo via análise de imagens.

CAPÍTULO 3

3 TEORIA

3.1 A ESTRUTURA DE UM ESPAÇO POROSO

A estrutura do solo advém da forma com que as partículas de areia, silte e argila (veja Tabela 1) se agregam em seu interior. A disposição dessas partículas influencia de maneira substancial na capacidade de retenção e armazenamento de água no solo (MARSHALL, 1962).

Tabela 1: Classificação quanto ao tamanho de partículas.

	Areia				Cascalho
	Argila	Silte	Fina	Grossa	
Sociedade Internacional de Ciência do Solo	0,002	0,02	0,2	2,0	
Diâmetro de Partícula (mm, escala logarítmica)					

Fonte: Adaptada de Silva (2008).

De maneira geral solos que apresentam texturas grossas, tal como os arenosos, podem ter suas estruturas modeladas por um conjunto de grãos arredondados ou esferoidais, pois tendem a não formar agregados. Assim a estrutura desses tipos de solos se dá principalmente pelo empacotamento desses grãos no volume que compõe uma amostra.

Segundo Hillel (1998) há dois tipos de empacotamentos: os que são formados por partículas de uma mesma classe ou monodispersa e outra formada por partículas de classes diferentes, chamada de polidispersa. Sistemas monodispersos tendem a ser mais homogêneos e com máxima porosidade, enquanto que os polidispersos apresentam maior heterogeneidade (complexibilidade) e porosidades menores.

Nesse sentido as porosidades de solos e outros materiais particulados, quando comparadas a sistema modelos de empacotamento de esferas rígidas não interpenetrantes, ficam nos limiares dos modelos de empacotamentos mono e polidispersos, as quais se situam numa faixa de valores que vai de 25% a 50%.

A porosidade total de um sistema poroso como função da densidade do solo e da densidade de suas partículas pode ser determinada usando-se a seguinte relação (Libardi, 2005):

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

onde: ϕ é a porosidade total; ρ_s é a densidade dos sólidos; ρ_p é a densidade de partículas;

Estes empacotamentos modelo (de esferas) são apresentados na Tabela 2.

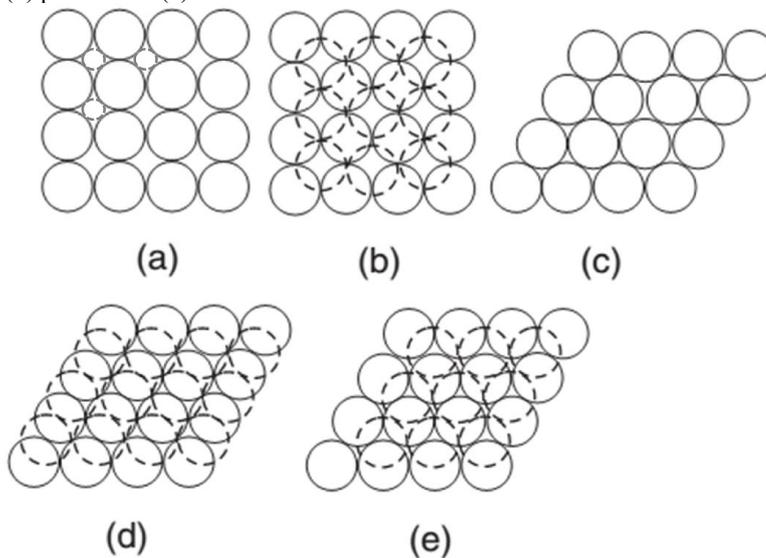
Tabela 2: Acondicionamento de Esferas Uniformes.

Forma de Empacotamento	Volume unitário	Porosidade (%)
Cúbico Simples	$8.R^3$	47,64
Cúbico Tetraédrico	$4.\sqrt{3}R^3$	39,54
Tetragonal	$6.R^3$	30,19
Piramidal	$4.\sqrt{2}R^3$	25,95
Tetraédrico	$4.\sqrt{2}R^3$	25,95

Fonte: Adaptado de Deresiewicz (1958) apud Hillel (1998).

As formas de empacotamento mencionados na Tabela 2 são visualizadas na Figura 1.

Figura 1: Arranjos de acomodações de esferas uniformes. (a) cúbico simples, (b) cúbico tetraedral, (c) Tetragonal, (d) piramidal e (e) tetraedral.



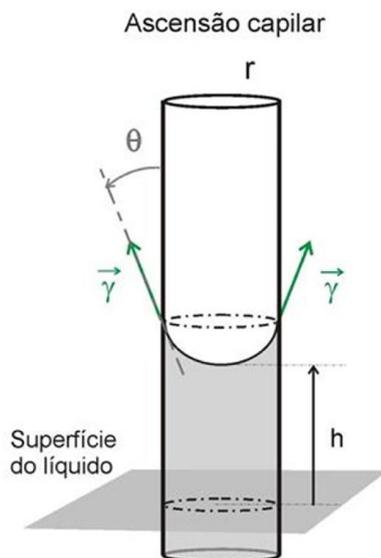
Fonte: Deresiewicz (1958) apud Hillel (1998).

3.2 CAPILARIDADE

Verifica-se diretamente, por inspeção da Figura 2, que o empacotamento dos arranjos dá origem à estrutura do espaço poroso, o qual se localiza entre as partículas que se acomodam. É nesse espaço poroso que a água, no caso do molhamento, se concentra e pode ficar retida. A retenção se dá fundamentalmente pelos fenômenos da capilaridade (associada à formação de meniscos nos poros do espaço poroso) e adsorção (associada à formação de filmes finos, os quais envolvem as partículas que formam o espaço poroso).

A capilaridade é o fenômeno físico responsável pela ascensão de fluidos em tubos de pequenos calibres (diâmetros ou raios). Esses tubos são conhecidos como tubos capilares, e nos solos eles aparecem na forma de canais ou espaços intersticiais entre as partículas ou agregados que compõem a estrutura do solo (LIBARDI, 2005). A capilaridade se deve à combinação de forças de adesão, as quais unem as moléculas do líquido a uma superfície de contato, mediante forças intermoleculares de curto alcance, e da tensão superficial, que é uma força que atua na superfície em direção ao líquido, a qual faz com que a mesma se comporte como uma membrana elástica. A ascensão da água em um tubo capilar é ilustrada na Figura 2.

Figura 2: Ascensão da Água em um Tubo Capilar.



onde: r é o raio do tubo capilar;
 h é a altura de ascensão da água;
 θ é o ângulo de contato;
 γ é a tensão superficial da água.

Fonte: Adaptado de Reichardt; Timm (2004).

A equação que descreve o equilíbrio entre a força capilar e a força gravitacional agindo sobre a água que ascendeu no tubo é dada por:

$$\rho gh = \frac{2\gamma \cos\theta}{r} \quad (2)$$

Isolando-se h da expressão anterior, pode-se calcular a altura de ascensão ou abaixamento da coluna do líquido dentro do tubo capilar em questão:

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho gr} \quad (3)$$

na qual: h é a altura de ascensão da coluna do fluido;

θ é o ângulo de contato entre o líquido e a parede do tubo;

γ é a tensão superficial da água;

r é o raio do tubo capilar;

g é a aceleração da gravidade local;

ρ é a densidade do líquido.

Ao se considerar a ascensão capilar da água em um capilar de vidro ($\sigma = 72,75 \times 10^{-3}$ N/m, $g = 9,8$ m/s², $\alpha = 0^\circ$ e $\rho = 1000$ kg/m³) e a equação anterior pode ser escrita como:

$$h(\text{cmH}_2\text{O}) = \frac{1490}{r(\mu\text{m})} \quad (4)$$

onde: r é o raio de poro equivalente em micrômetros e h é a altura de ascensão da água.

Essa equação também denominada equação da capilaridade mostra que quanto menor o raio do capilar, maior a altura de ascensão da água, e vice versa.

3.3 POTENCIAL MÁTRICO (Ψ_m)

O potencial mátrico (Ψ_m) é uma das componentes do potencial total da água no solo e é devido às forças capilares e de adsorção (responsáveis pela retenção do líquido junto à superfície das partículas do solo) sendo intituladas de forças mátricas.

A modelagem teórica das forças mátricas é praticamente impossível e, desta forma o potencial mátrico, advindo dessas forças, é obtido experimentalmente (LIBARDI, 2005).

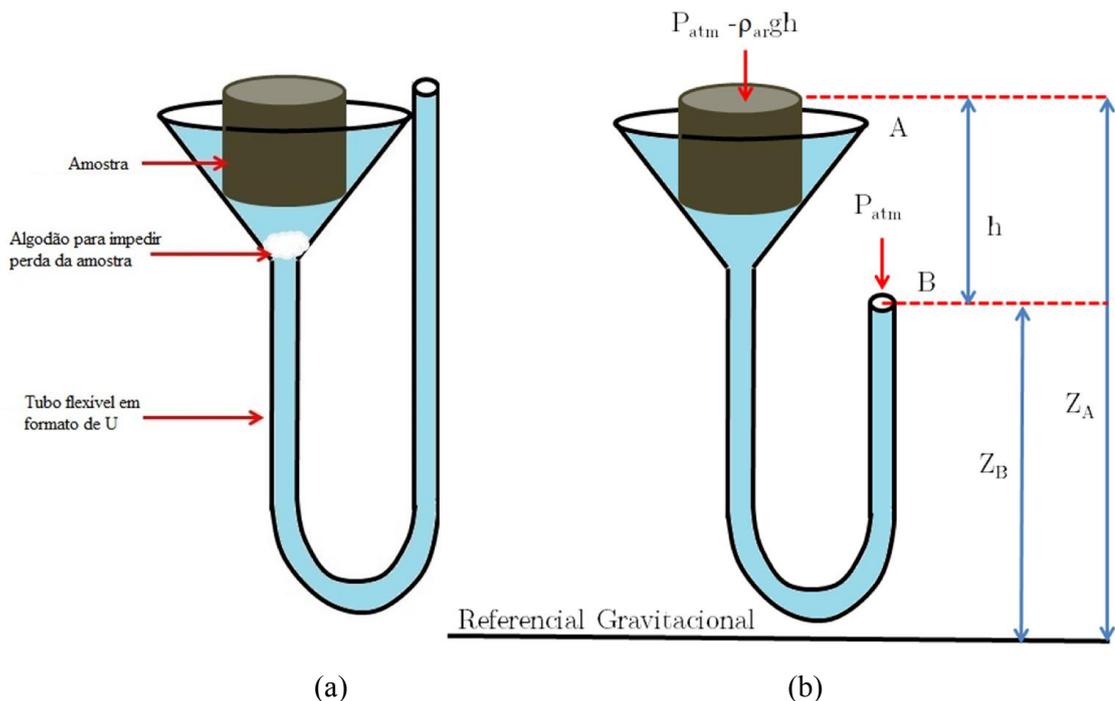
3.3.1 Medidas do potencial mátrico

A determinação de Ψ_m é feita experimentalmente pela utilização de diversos instrumentos destinados a realizar tal tarefa (mencionados anteriormente no item de revisão bibliográfica). Dentre eles, o procedimento para a determinação do Ψ_m utilizando-se o funil de Haines será aqui detalhado. A razão para isso é que foi esse o equipamento utilizado para a determinação experimental de Ψ_m das amostras aqui analisadas.

3.3.1.1 Funil de Haines Adaptado

Conforme Libardi (2005) o aparato é usado para aplicar uma determinada tensão na água presente em uma amostra previamente saturada e posta em contato hidráulico com uma placa ou membrana porosa. A Figura 3 abaixo representa esquematicamente um funil de Haines em duas posições distintas, mostrando o desnível h mencionado anteriormente.

Figura 3: Esboço do Funil de Haines: (a) completamente saturado e (b) sujeito a uma tensão.



Fonte: Adaptado de Cassaro et al. (2008).

À medida que a mangueira flexível sofre um desnível h certa quantidade de água é retirada dos poros da amostra, a qual, inicialmente saturada, é seca parcialmente. O que

impede o movimento livre da água pelo tubo flexível é a retenção da água na amostra por capilaridade. Diz-se que a água ficou retida na amostra por capilaridade ou que a essa posição ou condição de umidade está associado um potencial mátrico à amostra.

Para se equacionar a situação, define-se a diferença de potencial total entre as duas posições em que a água se encontra no sistema. O potencial total é definido como a soma do potencial gravitacional e do potencial mátrico da água, tomados em relação a situações ou pontos de referência preestabelecidos. Informações mais detalhadas sobre essas definições podem ser encontrados em Libardi (2005); Santos (2005) e Cássaro et al. (2008).

O potencial total da água no ponto A é dado pela seguinte equação:

$$\Psi_{t(A)} = P_{atm} + \rho_{sol}gZ_A^2 \quad (5)$$

Já para a água no ponto B, o potencial total é dado pela seguinte expressão:

$$\Psi_{t(B)} = (P_{atm} - \rho_{ar}gh) + \Psi_m + \rho_{sol}gZ_B \quad (6)$$

Na expressão acima, considerando-se o equilíbrio para o sistema, tem-se que:

$$P_{atm} + \rho_{sol}gZ_A = (P_{atm} - \rho_{ar}gh) + \Psi_m + \rho_{sol}gZ_B \quad (7)$$

Através dessa igualdade pode-se reescrever a equação acima como sendo:

$$\frac{\Psi_m}{\rho_{sol}} = -g(Z_B - Z_A) + \frac{\rho_{ar}}{\rho_{sol}}gh \quad (8)$$

Da Figura 3, verifica-se que a diferença entre Z_B e Z_A é igual a h e também que $\rho_{ar} \ll \rho_{sol}$, e assim, com boa aproximação pode-se escrever:

$$\frac{\Psi_m}{\rho_{sol}} = -gh \quad (9)$$

² Obs: O potencial mátrico não aparece na expressão devido ao fato da amostra estar completamente saturada.

A expressão do potencial mátrico obtida anteriormente é dada em termos de unidades de energia por volume (REICHARDT; TIMM, 2004). Quando divide-se essa equação pela aceleração da gravidade e considerando a densidade da solução ρ_{sol} igual a 1 g.cm^{-3} , a mesma fica dada em termos de unidades de carga hidráulica (m) e tem-se que:

$$\Psi_m = -h \quad (10)$$

Em Física dos Solos, diz-se que o desnível produz uma tensão τ na água da amostra. Essa tensão se relaciona ao potencial mátrico pela seguinte expressão (LIBARDI, 2005):

$$\tau = -\Psi_m = h \quad (11)$$

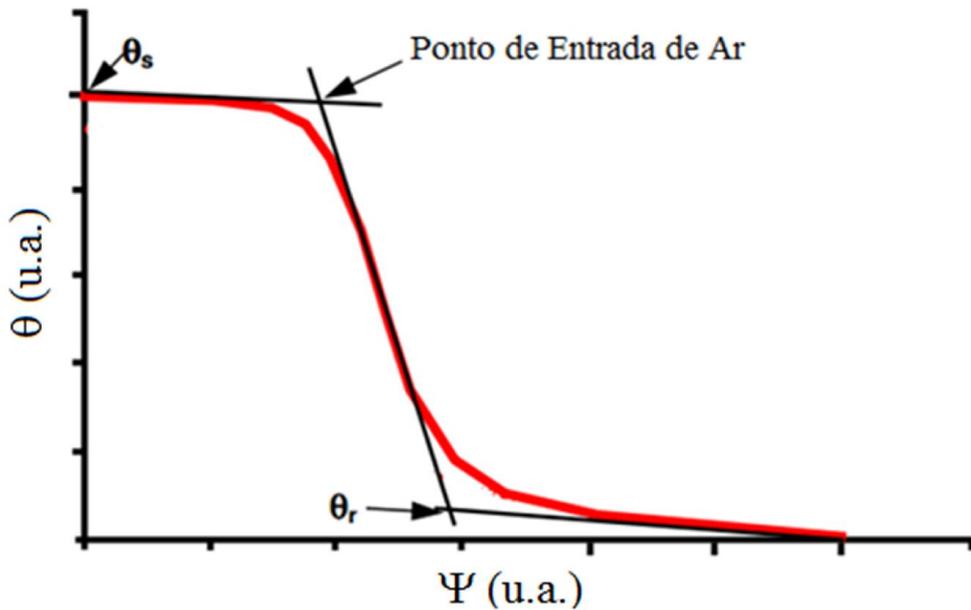
Portanto, em valores absolutos, o potencial mátrico da amostra é igual ao valor do desnível produzido pelo abaixamento da mangueira do funil. Esse abaixamento produz então uma diminuição na umidade da amostra. Aumentos desse desnível modificam concomitantemente o potencial mátrico, ou a tensão aplicada pelo abaixamento da mangueira do sistema, e a umidade da amostra. Pode-se então tentar-se estabelecer uma relação entre essas quantidades. A essa relação dá-se o nome de curva de retenção ou curva característica da água na amostra, a qual será detalhada a seguir.

3.4 A CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA (CR)

A curva de retenção de água (CR) representa a relação entre a tensão e a quantidade de água em uma amostra, geralmente expressa em termos da umidade volumétrica (volume de água por volume de amostra) (COILE, 1953; DANE; OOSTROM; MISSILDINE, 1992; JALBERT; DANE, 2001). Como foi dito, água fica retida no interior de uma amostra porosa devido às forças capilares e de adsorção surgidas entre as partículas que compõem a amostra e esta água. Em condições de umidades próximas à saturação, a estrutura da amostra exerce papel preponderante nessa interação.

Um exemplo de CR típica é apresentado na Figura 4.

Figura 4: Principais estágios da CR.



Fonte: Adaptado de Fredlund; Xing (1994).

Nessa Figura tem-se a identificação de alguns pontos importantes da CR, os quais são: o ponto de entrada de ar, o qual corresponde à tensão ou sucção necessária para iniciar o esvaziamento do conjunto de poros da amostra de solo. Como exemplos, tal ponto ocorre em tensões relativamente baixas (cerca de 0,07 kPa) para amostras de texturas grossas, e valores altos (por volta de 73 kPa) para amostras de texturas finas.

Outro ponto de grande importância refere-se ao valor da umidade de saturação (θ_s), a qual está associada ao preenchimento completo dos espaços vazios (poros) da amostra porosa por algum líquido, e por fim tem-se o valor da umidade residual (θ_r), a qual está associada à quantidade de água que permanece na amostra, mesmo com incrementos grandes na tensão aplicada a ela (VANAPALLI et al., 1990; REICHARDT; TIMM, 2004).

3.5 AJUSTE DA CR MEDIANTE A INTERPOLAÇÃO DE MODELOS ANALÍTICOS

Na literatura há inúmeros modelos para o ajuste dos pontos experimentais de uma curva de retenção. Dentre eles o mais conhecido, difundido e amplamente utilizado é o modelo de van Genuchten (1980). No entanto há, como outros exemplos, o de Brooks e Corey (1964) e o apresentado por Kosugi (1994, 1996), também conhecido como modelo log-normal.

O modelo de van Genuchten (1980) para interpolação dos dados experimentais é dado pela seguinte expressão:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (12)$$

na qual: θ_s é a umidade de saturação da amostra investigada;

θ_r é a umidade residual da amostra investigada;

h é o potencial de sucção aplicado em termos da carga hidráulica;

α , n e m são parâmetros de ajustes da expressão.

Em geral a equação analítica proposta por van Genuchten (1980) se ajusta de maneira satisfatória aos pontos experimentais de uma CR, o que é percebido pelos bons valores do coeficiente de determinação (r^2) proporcionados pelo ajuste através da utilização do modelo. Ele possui como característica principal a reprodução do comportamento típico observado para as CRs. São elas:

para $h \rightarrow 0$ (pontos próximos à saturação); $\theta \approx \theta_r + (\theta_s - \theta_r) = \theta_s$

para $h \rightarrow \infty$ (pontos de tensões muito altas); para α , m e n positivos; $\theta \approx \theta_r$

3.6 CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DE POROS (CDP) VIA FUNÇÃO CAPACIDADE DE ÁGUA (FCA)

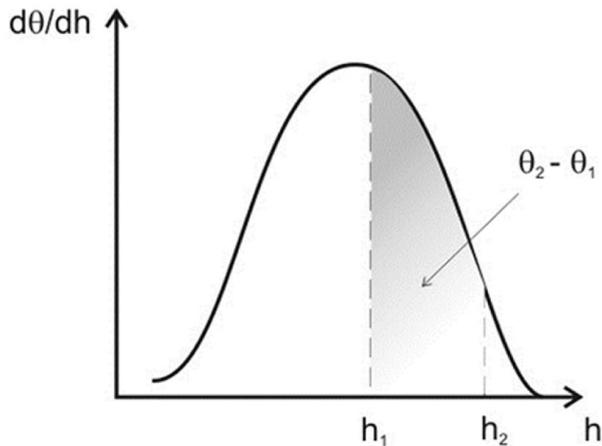
A função capacidade de água ou capacidade específica de água no solo como proposta por Prevedello (1996), obtida pela primeira derivada da expressão da CR em relação a h (carga hidráulica) ($d\theta/dh$), permite uma estimativa indireta da distribuição do tamanho de poros de uma amostra de solo. A expressão da FCA utilizando-se o modelo de van Genuchten para a interpolação dos dados da CR é expressa pela seguinte equação:

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r) \cdot m \cdot n \cdot \alpha \cdot (\alpha \cdot h)^{n-1}}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^{m+1}} \quad (13)$$

A característica principal da FCA advinda do modelo de van Genuchten é a de apresentar apenas um pico de máximo, referente ao ponto onde ocorre a inflexão no comportamento da primeira derivada da CR (JURY; GARDNER; GARDNER, 1991;

PAGLIAI et al., 1998; LIBARDI, 2005). Um exemplo típico de FCA é apresentado na Figura 5 a seguir.

Figura 5: Função de Capacidade de Água.



Fonte: Adaptada de Libardi (2005).

Para solos pouco agregados, faz parte da estrutura porosa o conjunto de poros que se forma devido ao empacotamento das partículas que formam a amostra. A avaliação do tamanho, configuração e distribuição desses poros é essencialmente impossível devido à complexidade natural de um arranjo poroso, principalmente os naturais.

No entanto, fazendo-se certas suposições, a distribuição de certas categorias de poros (em geral os meso e macroporos do solo) pode ser medida com precisão aceitável (KLUTE, 1986).

As hipóteses que são feitas em relação a uma amostra porosa são: 1) considerá-la como um conjunto de capilares de diferentes tamanhos característicos e 2) a água de um poro desse conjunto, cuja dimensão característica é r_p suportará uma tensão h dada por (REICHARDT; TIMM, 2004; LIBARDI, 2005):

$$h = \frac{2\gamma}{\rho_{\text{água}} g r_p} \quad (14)$$

na qual γ é a tensão superficial da água;

g é a aceleração gravitacional;

$\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água;

r_p o raio equivalente do tubo capilar.

Portanto, a medição do potencial mátrico da água na amostra permite o cálculo de r_p , o qual, usando a equação 14 chega-se a expressão 15 dada por:

$$r_p = \frac{2\gamma}{\rho_{\text{água}}gh} \quad (15)$$

A FCA é expressa por $f(h) = \frac{d\theta}{dh}$, e, portanto, sua integração entre os limites h_1 e h_2 fornece a variação $(\theta_2 - \theta_1)$ da umidade da amostra, ao se passar de uma tensão h_1 para h_2 ($h_2 > h_1$).

Ou seja:

$$\int_{h_1}^{h_2} f(h)dh = \int_{h_1}^{h_2} d\theta = \theta(h_2) - \theta(h_1) \quad (16)$$

Para se entender o significado desta operação, imaginemos que para h_1 todos os poros de raios maiores do que r_1 (fornecido pela equação 4) estejam vazios. Ao se passar para a tensão h_2 ocorre um esvaziamento extra, de poros de tamanhos característicos r menores que r_2 ($r_2 < r < r_1$). Portanto, a variação da umidade entre esses dois potenciais $(\theta_2 - \theta_1)$ é proporcional ao volume dos poros de raios característicos entre r_2 e r_1 , que são esvaziados pela alteração da tensão de h_1 para h_2 . De acordo com esse raciocínio, conclui-se que, quanto maior for a diferença $(\theta_2 - \theta_1)$, para uma mesma variação $h_2 - h_1$, maior é a quantidade de poros do solo entre os limites r_2 e r_1 , e vice-versa (LIBARDI, 2005).

Uma das principais desvantagens da FCA obtida através do modelo de vG, seria o fato da mesma apresentar apenas um pico, o qual ocorre no ponto de inflexão da CR, implicando num menor detalhamento da faixa de poros no interior das amostras investigadas.

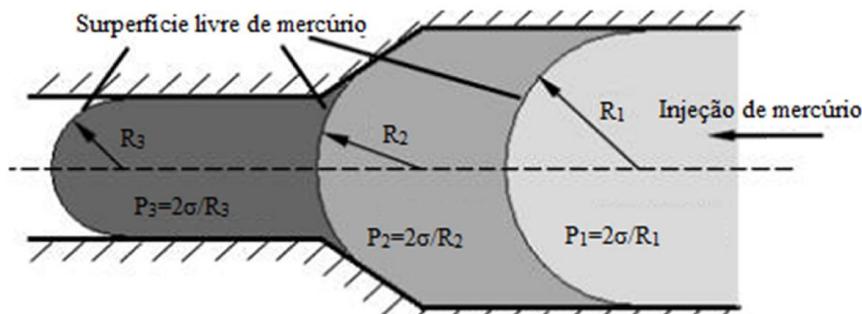
3.7 MODELO DE YANG PARA A OBTENÇÃO DA CDP

Diversos tipos e formas de análise dos espaços porosos são encontrados na literatura. Tais análises visam inferir sobre propriedades físicas de materiais ou amostras analisadas. Ultimamente, com o aprimoramento dos equipamentos tomográficos, a análise, em resoluções de até poucos micrometros, de seções ou do espaço poroso reconstruído tridimensionalmente vem sendo, em algumas poucas aplicações, utilizada para esta finalidade.

Nesse sentido, Yang et al. (2009) desenvolveram um programa computacional para a simulação da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, em espaços porosos reconstruídos tridimensionalmente, a partir de imagens tomográficas com resoluções micrométricas.

A Figura 6 exemplifica como ocorre o processo de intrusão de mercúrio no interior de um poro com determinado estrangulamento.

Figura 6: Exemplificação do processo de intrusão de mercúrio no interior de um poro com estrangulamento.



Fonte: Adaptado de Yang et. al. (2009).

De acordo com a equação de Yang-Laplace (equação 17), quanto maior o raio do poro, menor é a pressão que deve ser aplicada para a invasão do espaço poroso pelo mercúrio e vice versa.

$$R = \frac{2\sigma}{P} \quad (17)$$

na qual: R é o raio do poro; σ é a tensão superficial do mercúrio no vácuo; P é a pressão aplicada.

Desta forma, à medida que se aumenta a pressão usada na intrusão, poros de raios cada vez menores são invadidos e o processo se dá, como no exemplo da Figura 6, com o mercúrio invadindo porções cada vez maiores do estrangulamento, ou seja, ocupando inicialmente a porção com raio R1, depois $R1 < R < R3$ e finalmente a porção do poro com raio R3 ($R1 > R2 > R3$), o menor deles.

Com o programa de Yang et al. (2009), além de se poder simular esse processo, é possível contabilizar o volume, no caso da análise tridimensional, correspondente a cada raio invadido no processo simulado de intrusão.

O programa computacional opera da seguinte maneira:

I- Ao encontrar o poro de raio inicial R_1 , exemplificado na Figura 6, o programa o preenche, seção a seção da imagem tridimensional, com uma semiesfera de raio R_1 , até que o início do estrangulamento ocorra. O programa atribui aos voxels pertencentes a essa porção do poro o valor R_1 ;

II- Ao encontrar o estrangulamento, o raio da semiesfera muda, e o programa identifica a mudança, atribuindo aos pixels dessa nova porção o valor R_2 , o raio da nova semiesfera;

III- Ao longo do estrangulamento, a cada seção ultrapassada, o raio da semiesfera passa a ser algo entre R_3 e R_1 ($R_3 < R < R_1$);

IV- E finalmente o raio da semiesfera passa a ser R_3 ;

Contabilizando-se os voxels (elementos unitários de volume da imagem tomográfica) identificados com valores R_1 obtém-se o volume do poro cujo raio de curvatura é R_1 , os voxels identificados com o valor R_3 compõem o volume do poro com raio de curvatura R_3 e os voxels restantes são correspondentes aos poros com raios de curvaturas entre R_1 e R_3 .

A soma de todos os voxels identificados corresponde ao volume total V_t do poro analisado. Para saber-se a distribuição dos poros faz-se um gráfico dos R_s identificados contra $V(R)/V_t(R)$ ($R_3 < R < R_1$), o que representa finalmente a curva de distribuição de poros.

3.8 MODELOS GEOMÉTRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DO RAIO DE UM PORO DE GEOMETRIA SIMPLES

Uma das vantagens da utilização de imagens tridimensionais para a análise e estudo de meios porosos é a de que em algumas situações simples pode-se criar ou lançar mão de modelos para a representação geométrica de um poro ou sistema poroso.

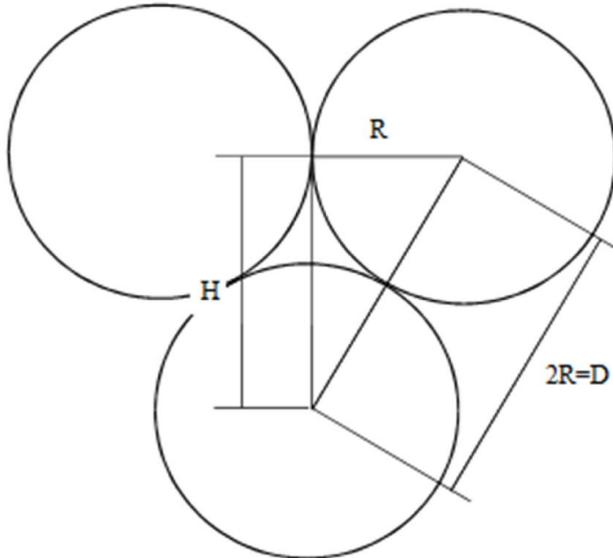
3.8.1 Modelo de Santos

Por exemplo, em um sistema modelo no qual há o empacotamento de esferas rígidas que não se interpenetram, é possível estimar o tamanho dos poros pela adoção de um modelo simples, por exemplo, o que é apresentado em Santos (2005).

Nesse trabalho, foi proposto um modelo geométrico para se estimar de maneira aproximada o diâmetro médio de um poro formado por um empacotamento do tipo tetragonal (ver Tabela 1). Tal modelo considera as dimensões de um poro formado por três

circunferências de mesmo diâmetro encostadas umas nas outras, configuração que é apresentada na Figura 7.

Figura 7: Modelo apresentado em Santos (2005) para a modelagem de um poro formado em um sistema poroso composto por três esferas que não se interpenetram.



Fonte: Santos (2005).

Mediante a geometria da Figura 7, Santos (2005) supõe que o diâmetro médio do poro é dado por $H/3$. Desta suposição, obtém-se a seguinte expressão para o diâmetro médio do poro formado entre as partículas.

$$d \approx \frac{H}{3} = D \frac{\sqrt{3}}{6} \text{ ou } r = D \frac{\sqrt{3}}{12} = 0,144D \quad (18)$$

na qual: D é o diâmetro da partícula que compõem a amostra.

Assim, por exemplo, se o diâmetro das esferas que formam o meio for de 1,5 mm, o diâmetro médio de seus poros será de aproximadamente 0,44 mm.

3.8.2 Modelo de Hilpert e Miller em conjunto com o de Davis e Scriven

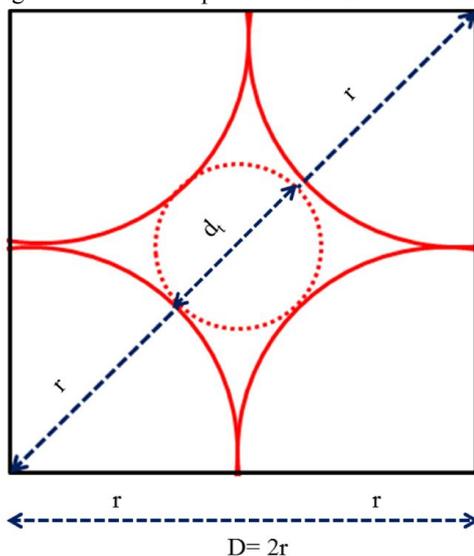
Nesse modelo, bastante simplificado, as esferas rígidas de tamanho único e que não se interpenetram assumem uma disposição do tipo cúbica simples. Desta forma, o sistema poroso que se forma é o que está representado esquematicamente (em termos de cortes da célula unitária) nas Figuras 8 (corte ao longo de um eixo vertical) e 9 (corte na diagonal da célula unitária). Considerando-se esse tipo de empacotamento, é possível determinar raios equivalentes de poros por considerações geométricas que se seguem.

Na figura 9, a que mostra em corte o topo do sistema poroso em questão, o diâmetro equivalente do poro é denominado de d_t . Por inspeção dessa figura, verifica-se facilmente que a diagonal que liga dois vértices opostos da célula unitária é dado por:

$$d = 2r + d_t \quad (19)$$

na qual r é o raio das esferas que compõem o empacotamento.

Figura 8: Visão de topo da célula unitária de um empacotamento do tipo cúbico simples.



Fonte: Ng; Davis; Scriven (1977).

Para uma rede cúbica simples $d = 2r\sqrt{2}$, e assim a expressão 19 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$2r\sqrt{2} = 2r + d_t \quad (20)$$

A distância $2r$ é o diâmetro de qualquer uma das esferas do arranjo, ou seja, $2r = D$ e, portanto, a relação entre d_t o qual no modelo é denominado do diâmetro de uma garganta ou estrangulamento do poro (do inglês “*throat*”), é relacionado com o diâmetro das esferas do empacotamento por:

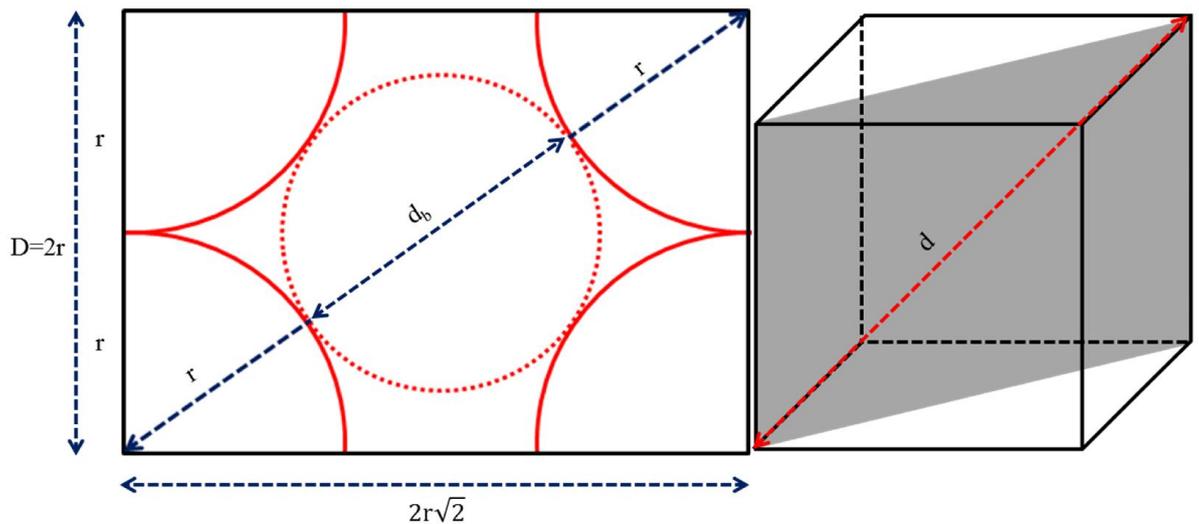
$$d_t = 2r\sqrt{2} - 2r \Rightarrow d_t = 2r(\sqrt{2} - 1) \Rightarrow d_t = 0,41D \quad (21)$$

O raio da garganta ou do estrangulamento desta parte do sistema poroso em função do diâmetro da esfera é, portanto:

$$r_t = 0,205D \quad (22)$$

O modelo também considera o diâmetro equivalente do poro localizado no interior do empacotamento. Este é denominado de d_b , o diâmetro do corpo do poro (do inglês “*bulk*”).

Figura 9: Corte em diagonal da célula unitária do empacotamento cúbico simples.



Fonte: Ng; Davis; Scriven (1977).

Considerações geométricas levam ao valor da diagonal d , a qual liga os vértices inferior e superior traseiro oposto direito (linha tracejada em vermelho) da Figura 9 o valor de $2r\sqrt{3}$.

Da Figura 9 à esquerda temos que:

$$d_b = 2r\sqrt{3} - 2r \Rightarrow d_b = 2r(\sqrt{3} - 1) \Rightarrow d_b = 0,732D \Rightarrow$$

$$\Rightarrow r_b = 0,366D \quad (23)$$

Em Hilpert e Miller (2001), há a menção de que o raio médio dos poros formados em um sistema poroso composto por esferas rígidas de tamanho único e empacotadas randomicamente é dado por: $\langle r \rangle = 0,21D$, concordando com o que o equacionamento de Davis e Scriven (1978) sugere.

Para as dimensões características apresentadas anteriormente, a equação (4), a da capilaridade, prevê que a CR de meios formados por empacotamentos cúbicos, ou randômicos de esferas com diâmetro médio D , poderão, aqui se lança a suposição, ter o ponto de entrada de ar em tensões cujos limites superior e inferior são dados, respectivamente, por:

$$h(\text{cmH}_2\text{O}) = \frac{1490}{0,21 D (\mu\text{m})} \quad (24)$$

ou

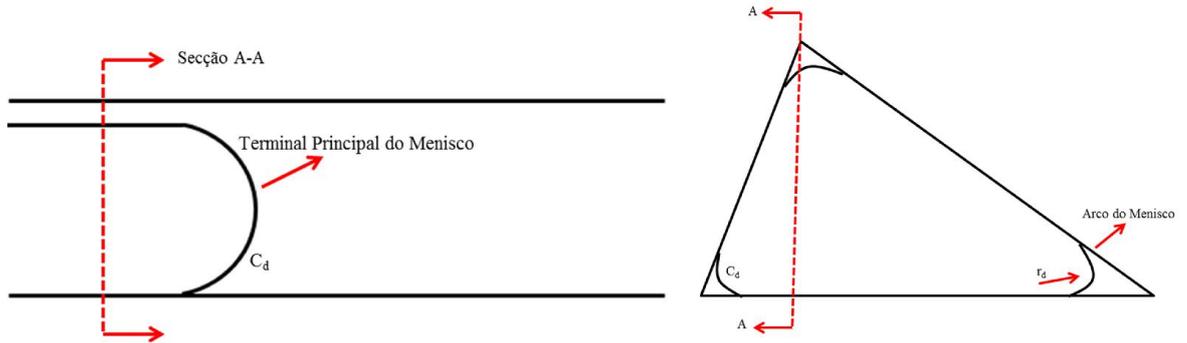
$$h(\text{cmH}_2\text{O}) = \frac{1490}{0,366 D (\mu\text{m})} \quad (25)$$

3.8.3 Modelo de Mason e Morrow (MM)

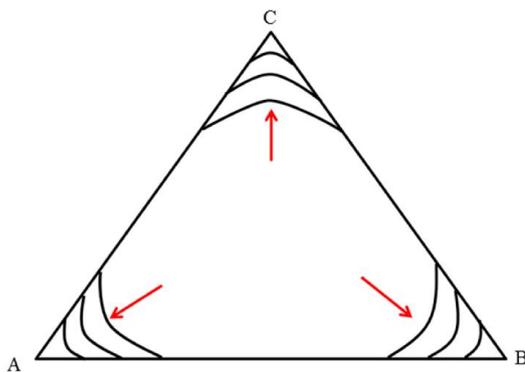
Em Mason e Morrow, (1991) (MM) é apresentado um estudo bastante interessante que descreve a drenagem de um poro triangular. De acordo com esses autores, tal geometria serve bem para a modelagem de poros com geometria simples e consiste em uma alternativa bastante apropriada à que geralmente é admitida em diversos estudos: a do poro com geometria cilíndrica.

Figura 10: Modelo triangular do espaço poroso e sua seqüência de drenagem.

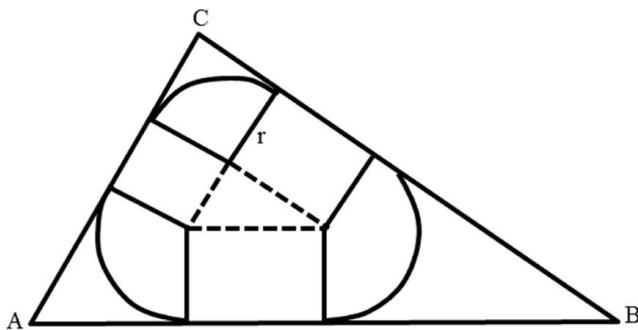
a) Secamento de um tubo triangular com curvatura constante



b) Aumento do arco de curvatura do menisco com a secagem do canto do triângulo.



c) Corte seção transversal do arco de menisco de um poro triangular.



Fonte: Mason; Morrow (1991).

Em MM, apresenta-se a dinâmica de drenagem de um poro triangular, o qual está submetido em uma de suas extremidades a uma tensão. O modelo considera que a outra extremidade está livre e em contato com uma fase não molhante, tal como, por exemplo, o ar.

Supõe-se inicialmente que a interface líquido-gasosa desta extremidade forma menisco de curvatura desprezível ($r \rightarrow \infty$; $1/r \rightarrow 0$) - condição em que o poro está saturado - de tal forma que os fenômenos capilares são inicialmente desprezados. À medida que a tensão para a drenagem do poro é aumentada, a curvatura do menisco aumenta até o momento em

que $r = r_d$, para o qual há a drenagem de uma grande porção central do poro em questão (Figuras 10a e 10b).

Para esta condição, porém, há uma quantidade de água remanescente no interior do tubo, a qual só é retirada com a aplicação de maiores tensões, uma vez que retrocedendo os vértices do triângulo, os meniscos têm suas curvaturas aumentadas, Figura 8b, ($r < r_d$; $1/r > 1/r_d$).

Geometricamente, observa-se que a junção do líquido remanescente, formado pelos três meniscos adjacentes aos vértices A, B e C do triângulo ABC (Figura 8c) forma um triângulo DEF, semelhante a este primeiro (critério ângulo, ângulo, ângulo).

Para os triângulos semelhantes temos que: $L_{DEF} = kL_{ABC}$; ($k < 1$). Desta forma, os perímetros (P) e áreas (A) desses dois triângulos estão relacionados por:

$$P' = \sum L_{DEF} = \sum kL_{ABC} = kP \quad (26)$$

e

$$A' = h_{DEF}L_{DEF} = k^2h_{ABC}L_{ABC} = k^2A \quad (27)$$

A área A' , referente ao triângulo DEF, é formada por seis triângulos retângulos de altura r de tal maneira que:

$$A' = \left(\frac{1}{2}\right) P' r \quad (28)$$

Das equações 26, 27 e 28, tem-se que:

$$r = \frac{2KA}{P} \quad (29)$$

Para se determinar r_d , o modelo de MM utiliza os perímetro e área efetivos, respectivamente, P_{ef} e A_{ef} , de acordo com a seguinte expressão:

$$r_d = \frac{A_{ef}}{P_{ef}} \quad (30)$$

Esta última expressão, em termos de A, A' , P e P' é escrita como segue:

$$r_d = \frac{A - (A' - \pi r_d^2)}{P - (P' - 2\pi r_d)} \quad (31)$$

Para $r = r_d$; a equação (28) fornece: $r_d = (2k_d A)/P$ e a equação (31), em termos desse parâmetro é escrita como:

$$r_d = \frac{A(1 - k_d^2) + \pi r_d^2}{P(1 - k_d) + (2\pi r_d)} \quad (32)$$

A solução dessa equação é dada por:

$$r_d = \frac{1 - \sqrt{\frac{4\pi A}{P^2}}}{\frac{P^2}{2A} - 2\pi} P \quad (33)$$

Detalhes desse equacionamento são encontrados no Apêndice A.

Em termos de um fator de forma $G = A/P^2$ a expressão anterior é finalmente reescrita como:

$$r_d = \frac{P}{\left(\frac{1}{2G} + \sqrt{\frac{\pi}{G}}\right)} \quad (34)$$

A expressão (34) é utilizada para o cálculo do raio de drenagem do poro levando-se em consideração o fator de forma “G” de um poro qualquer. Por exemplo, para um poro modelado por um triângulo equilátero ($P = 3L$ e $A = (\sqrt{3}/2)L^2$; $G = 0,048$) e $r_d = 0,16L$.

A qual, em termos do diâmetro das partículas que compõem o meio poroso é escrita como:

$$r_d \approx 0,053D \quad (35)$$

Pela equação de Yang-Laplace, a tensão equivalente a esse raio de drenagem é dada por:

$$h = \frac{\sigma}{r_d(\mu\text{m})} = \frac{1490}{0,053D(\mu\text{m})} \quad (36),$$

a qual é a mais alta quando comparada a qualquer dos dois modelos apresentados anteriormente.

CAPÍTULO 4

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 AS AMOSTRAS INVESTIGADAS

As amostras investigadas neste trabalho foram constituídas de areias de duas granulometrias, uma delas com diâmetros de partículas entre 0,106 e 0,212 mm (passadas em peneiras de 0,212 mm e coletadas em peneiras de 0,106 mm), a qual será denominada areia 0,212 mm e a outra com grãos entre 0,5 e 1,0 mm (passadas em peneira de 1,0 mm e retidas por peneiras de 0,5 mm). Também foram confeccionadas amostras compostas de esferas de vidro (70% de SiO₂) de diâmetros 0,5, 1,0 e 2,5 mm.

A amostra de areia de 0,212 mm foi acondicionada em um cilindro metálico de 4,8 cm de diâmetro e 5,2 cm de altura. A acomodação foi feita colocando-se a areia pouco a pouco no cilindro. Entre um preenchimento e outro, procurou-se acomodar a areia com leves batidas do cilindro sobre uma superfície plana. Para se obter a saturação por ascensão capilar, a amostra foi colocada em uma bandeja com água até a metade de sua altura, por aproximadamente 2 horas. Logo após, subiu-se o nível da água na bandeja para mais ou menos $\frac{3}{4}$ da altura da amostra por mais duas horas, e finalizou-se por deixá-la por aproximadamente 24 horas na bandeja com água em um nível próximo de sua superfície.

Após esse processo de saturação, a amostra de areia de 0,212 mm foi colocada no topo do funil de Haines, de uma forma semelhante à que é esquematizada na Figura 3, para se efetuar o levantamento das CRs. Para se evitar a secagem da amostra por evaporação vedou-se sua parte superior com pedaços de tela do tipo “silk screen”.

Para a areia de granulometria entre 0,5 a 1,0 mm e também para as esferas de vidro, houve a acomodação das amostras diretamente no funil, em um volume de aproximadamente 78 cm³. A saturação das amostras foi feita no próprio conjunto (funil de Haines) colocando-se lentamente e de maneira uniforme porções de água nas amostras. Optou-se por se acomodar essas amostras no próprio funil uma vez que se tratava de amostras de granulometria bastante grossa e a própria remoção delas da bandeja com água (usada no processo de saturação descrito anteriormente) as drenava quase que completamente.

A Tabela 3 apresenta os valores das massas secas e densidades das amostras investigadas.

Tabela 3: Dados de massas secas e densidades das amostras de areias e esferas de vidro investigados.

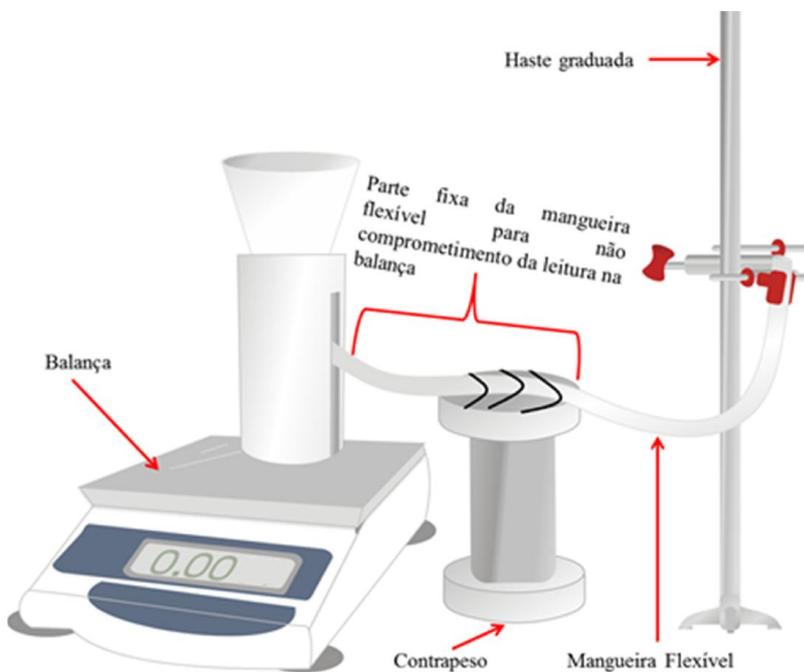
Amostras	Areias		Esferas de vidro		
Granulometria (mm)	0,212	0,5-1,0	0,5	1,0	2,5
M_s (g)	156	123	127	122	115
ρ (g/cm ³)	1,67	1,56	1,62	1,55	1,45

Fonte: O autor.

4.2 OBTENÇÃO DAS CRs

Para a obtenção das CRs experimentais utilizou-se um funil de Haines colocado sobre o prato de uma balança, modelo Kern EG2200 com precisão de duas casas decimais e capacidade máxima de 2200 g, como esquematizado na Figura 11.

Figura 11: Aparato Experimental-Funil de Haines sobre a balança.



Fonte: O autor.

Para o levantamento experimental da CR de uma amostra de esferas de vidro procedeu-se da seguinte maneira:

1) Colocou-se uma quantidade de amostra seca “Ms” para o preenchimento de aproximadamente 78 cm^3 do volume do funil;

2) Ajustou-se a extremidade do tubo flexível de tal forma que ela coincidissem com a superfície da amostra;

3) Saturou-se a amostra e o sistema (funil de Haines) e esperou-se o equilíbrio (fim do gotejamento através da mangueira flexível);

4) Após o equilíbrio ser atingido, tarou-se a balança e iniciou-se a medida abaixando-se o tubo flexível a cada centímetro. Para que não houvesse interferência na medição, a parte do tubo flexível virado para o lado da balança foi rigidamente preso à mesa na qual ela estava apoiada.

Ao se proceder desta maneira, um abaixamento do tubo flexível fazia com que a balança indicasse valores negativos, correspondentes às massas de água retiradas das amostras, em cada posição de medição. A mangueira foi baixada até que se observasse a secagem do sistema. O penúltimo ponto antes da secagem foi admitido como sendo o último ponto da CR.

A faixa de potenciais investigados variou de 0,1 à 2,5 kPa ($\cong 1$ a 25 cmH_2O) para as esferas de vidro e areia com granulometria entre 0,5-1,0 mm. O levantamento dos pontos das CRs foi realizado em intervalos de 0,1 kPa até que a umidade residual fosse atingida. Para a areia de menor granulometria, 0,212 mm, a medição variou entre os potenciais de 1 à 6 kPa ($\cong 1$ a 60 cmH_2O), medição que foi realizada em intervalos de 1 kPa.

Procedendo dessa maneira, a quantidade de água necessária à saturação da amostra não era inicialmente conhecida, porém, foi determinada da seguinte maneira: mediu-se a massa de água necessária à saturação de amostras secas de esferas de vidro com aproximadamente 5 g, 10 g, 15 g, 20 g, 25 g e 50 g;

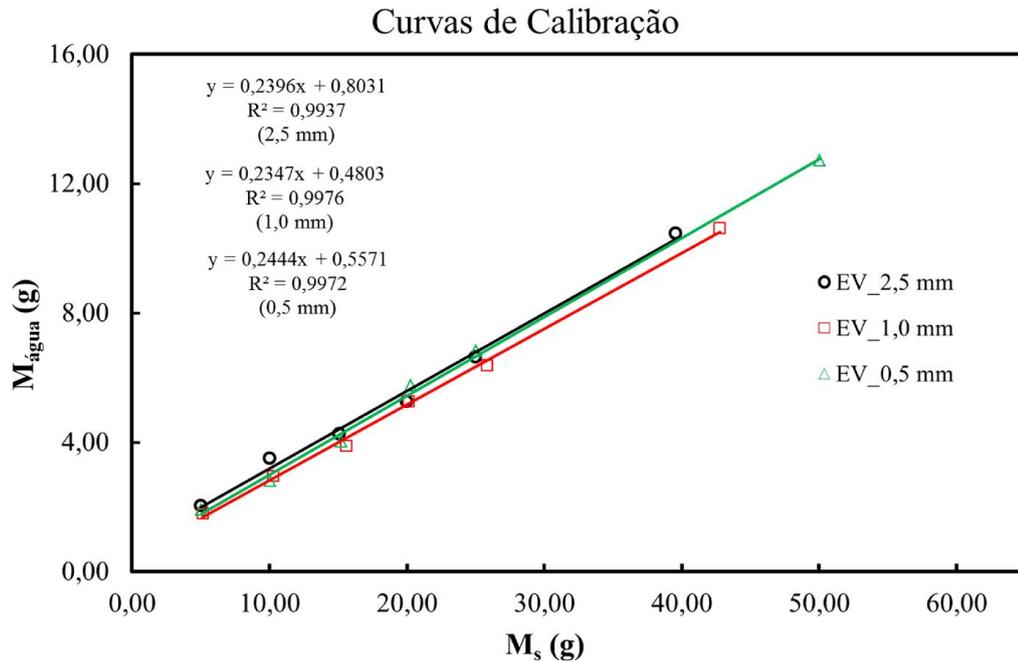
Cada uma dessas amostras foi acondicionada individualmente em um béquer com capacidade de 100 cm^3 . Colocou-se o conjunto sobre o prato de uma balança com precisão centesimal e procedeu-se a tara da mesma.

Adicionou-se água até constatar-se visualmente a saturação de cada amostra, medindo-se a massa adicionada de água neste procedimento, a qual correspondia ao excedente de massa indicado pela balança.

Fez-se um gráfico da massa de água necessária à saturação dessas amostras ($m_{\text{água}}$) contra a massa seca das amostras (m_s), valores que estão mencionados no item anterior.

Para um empacotamento aproximadamente homogêneo há uma relação linear entre essas quantidades (ver Figura 12), ou seja, $m_{\text{água}} = aM_s + b$ (na qual se deve ter $b \approx 0$).

Figura 12: Exemplo de gráfico de calibração para as esferas de vidro.



Fonte: O autor.

Portanto, para uma massa seca qualquer como, por exemplo, a que foi utilizada no funil M_s , determina-se através da equação anterior a massa de água $m_{\text{ágsat}}$ utilizada para sua saturação: $m_{\text{ágsat}} = aM_s + b$

Para o cálculo da umidade volumétrica de saturação da amostra, considerando-se a densidade da água igual a 1 g.cm^{-3} , usa-se a seguinte expressão:

$$\theta_s = \frac{\rho_{\text{água}} m_{\text{água}}}{V_{\text{amostra}}} \equiv \frac{m_{\text{água}}}{V_{\text{amostra}}} = \frac{(aM_s + b)}{V_{\text{amostra}}} \quad (37)$$

na qual: $m_{\text{ágsat}}$ é a massa de água usada na saturação da amostra; e V_{amostra} é o volume da amostra colocada no funil, conhecido previamente (78cm^3).

A cada aumento da tensão aplicada à amostra extraía-se parte da água inicialmente colocada na amostra, valor negativo indicado pela balança do conjunto. Ela será chamada de

$m_{\text{extr}}(h)$. Desta maneira, a quantidade de água que permanecia na amostra para uma determinada tensão aplicada era, portanto, $m_{\text{ag}}(\tau) = m_{\text{agsat}} - m_{\text{extr}}(\tau)$.

Então, a umidade volumétrica da amostra para uma determinada tensão τ aplicada na amostra é dada por:

$$\theta(\tau) \equiv \frac{m_{\text{água}}(h)}{V_{\text{amostra}}} \quad (38)$$

Um par de tensão aplicada h contra umidade volumétrica remanescente nesta tensão $\theta(h)$ constituiu um ponto da CR. Uma CR completa foi constituída por cerca de 10 pontos aproximadamente, para cada amostra.

Diferentemente das esferas de vidro, a obtenção das CR da areia foi realizada de modo tradicional, saturando-se a amostra por capilaridade. A amostra foi acondicionada em um cilindro de dimensões aproximadas de 5cm de altura e 5cm de diâmetro interno, tal como o que é ilustrado na Figura 3. Faz-se aqui um parêntese para mencionar que o mesmo procedimento não foi possível de ser realizado para as esferas de vidro, as quais secavam quase que completamente ao serem retiradas do recipiente utilizado para a saturação no método tradicional.

A mangueira do funil foi baixada de 10 em 10 cm e o equilíbrio para determinada tensão aplicada na amostra foi detectado pelo fim do gotejamento do sistema. A cada tensão aplicada verificava-se a massa de água remanescente na amostra para o cálculo de sua umidade a base de volume.

Para a aplicação de uma nova tensão as amostras eram saturadas novamente de acordo com o que é indicado para a aplicação do método tradicional, Libardi, 1995.

4.3 AJUSTE DA CURVA DE VAN GENUCHTEN AOS PONTOS EXPERIMENTAIS USANDO O SOLVER[®] DO EXCEL[®]

Usou-se a ferramenta solver[®] do Excel[®] para ajustar a curva de van Genuchten aos pontos experimentais obtidos, minimizando-se os resíduos quadráticos χ^2 associados ao ajuste, apresentada a seguir:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (\theta_{\text{exp}} - \theta_{\text{vG}})^2 \quad (39)$$

na qual: θ_{exp} é o valor experimental da umidade;

θ_{vG} são os valores calculados usando o modelo de van Genuchten.

Os valores encontrados pela minimização foram comparados aos que são fornecidos pelo RETC (do *Salinity Laboratory*) e mostraram-se bastante próximos. Testes estatísticos envolvendo o (r^2) mostraram que houve boa concordância do ajuste pelo modelo de van Genuchten aos pontos experimentalmente obtidos.

4.4 CONSTRUÇÃO DAS FCAs A PARTIR DOS PARÂMETROS DO AJUSTE DE VAN GENUCHTEN

Pela obtenção dos parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten, α , m , n , θ_r e θ_s , constroem-se as FCAs correspondentes a cada amostra investigada.

Verifica-se que esta curva possui um ponto de máximo, o qual, quando se considera que a inflexão da CR está localizada no ponto médio entre θ_s e θ_r , ocorre para (van Genuchten, 1980):

$$h \approx \frac{1}{\alpha} (2^{1/m} - 1)^{1-m} \quad (40)$$

Para se analisar a largura das FCAs assim obtidas usou-se o conceito da largura a meia altura.

4.5 DETERMINAÇÕES DAS POROSIDADES DAS AMOSTRAS ANALISADAS

As porosidades foram calculadas com o auxílio da equação 1, considerando-se a densidade das partículas das amostras como sendo o valor de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ (Libardi, 2005). Outra maneira de se obter a porosidade das amostras é pela análise das imagens tridimensionais obtidas via tomografia.

Em relação a esse último procedimento, ao serem binarizadas, uns (1s) são atribuídos a voxels nos quais há a presença de partículas e zeros (0s) aos voxels nos quais há ausência delas (presença de poros).

Em um determinado volume, cujo número de voxels é de N, a porosidade da amostra é dada por:

$$\emptyset = \frac{N_{\text{zeros}}}{N} \quad (41)$$

na qual, N_{zeros} é o número de zeros (ausência de partículas, ou presença de poros) contabilizados no volume correspondente aos N voxels investigados.

4.6 AQUISIÇÃO E RECONSTRUÇÃO DAS IMAGENS TOMOGRÁFICAS

As imagens tomográficas foram adquiridas em um tomógrafo de mesa da Embrapa Instrumentação Agropecuária de São Carlos - SP cujo feixe é de geometria cônica, modelo SkyScan 1172 de alta resolução espacial: cerca de 3 μm para amostras milimétricas (5 mm), e cerca de 30 μm para amostras com aproximadamente 4 cm de diâmetro.

O tubo de raios X do equipamento operou em 100 kV e 100 μA , e uma combinação de filtros de Al/Cu (0,5/0,04 mm de espessura) posicionados entre a fonte e o detector foram utilizados. Tal combinação de filtros visou a redução de artefatos nas imagens produzidas. O passo de rotação utilizado foi de 0,3° e a média de 15 radiografias foi adotada para representar uma projeção.

Um algoritmo de Feldkamp modificado para essa geometria de feixe foi utilizado para a reconstrução das imagens. Este processo é realizado após a coleta das imagens por pacotes fornecidos pelo fabricante, os quais são denominados de NRecon e CTAn (VAZ et al., 2011).

Para a análise das imagens, escolheu-se a resolução de 30 μm , pois é a que foi permitida pela capacidade de armazenamento e manipulação de nossos computadores. O computador utilizado para as simulações possuía o sistema operacional Windows 7 Professional funcionando com processador Intel® Core™ - i7 - 2600 – 3,40 GHz, memória RAM de 12 Gb e capacidade de armazenamento de dados de 1 TB.

4.7 BINARIZAÇÃO DAS IMAGENS TOMOGRÁFICAS

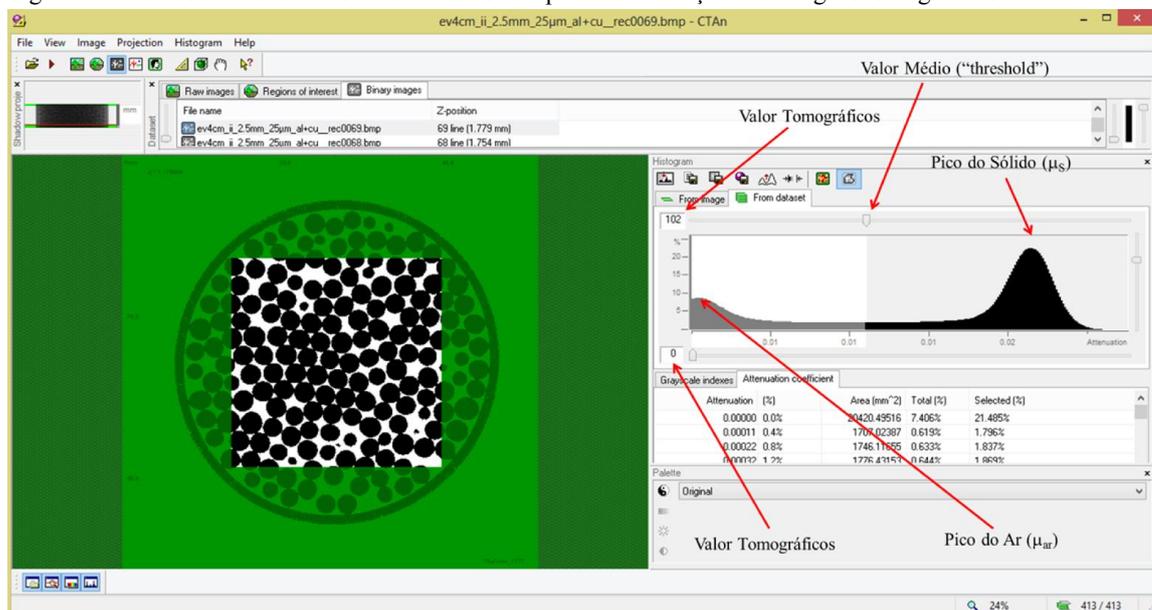
Após serem processadas as imagens reconstruídas foram binarizadas. Nesta binarização o espaço poroso vazio é representado pela cor branca e a parte sólida pela cor preta. Esta configuração foi a escolhida por ser a utilizada pelo programa computacional desenvolvido por Yang et al. (2009).

A binarização das imagens tomográficas, também realizada pelo pacote CTAn da SkyScan, foi realizada de acordo com o que é apresentado em Tarquis et al. (2009). Conforme com o que é apresentado nesse trabalho, o “threshold” das imagens é escolhido na posição média entre os picos dos coeficientes de atenuação lineares (ou tom de cinza) associados ao vazio (ar) μ_{ar} e aos sólidos da estrutura (partículas) μ_s .

$$\mu_{\text{Threshold}} = \frac{\mu_{ar} + \mu_s}{2} \quad (42)$$

Esse processo é esquematizado na Figura 13.

Figura 13: Processo de escolha do valor de threshold para a binarização das imagens tomográficas.



Fonte: O autor.

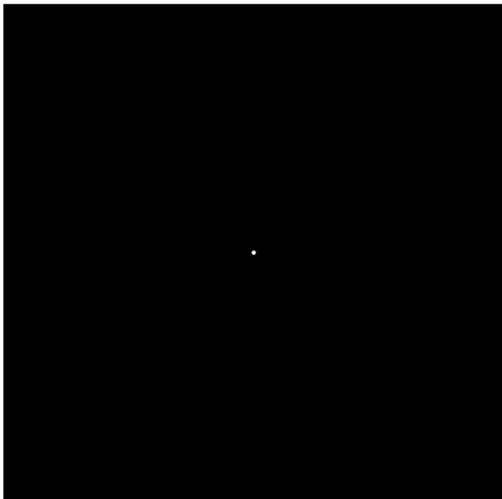
Este processo de binarização foi realizado nas imagens tomográficas constituídas de esferas de vidro e também de uma areia com granulometria de 0,2-1,5 mm, próxima à das areias que foram investigadas no presente estudo.

4.8 NÚMERO MÍNIMO DE SEÇÕES TOMOGRÁFICAS PARA A DETERMINAÇÃO DE UM PORO USANDO O PROGRAMA DE YANG

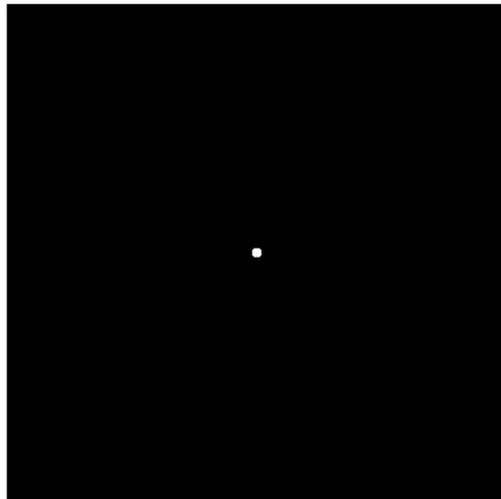
Um estudo preliminar foi necessário para se determinar o número mínimo de fatias a serem analisadas para a detecção de um poro pelo programa desenvolvido por Yang et al. (2009). Esse estudo se faz necessário uma vez que para o programa, tanto a imagem superior quanto a inferior do volume são encaradas pelo programa como limites de um poro.

Para isso foram criadas figuras (denominados de “poro idealizado”) com poros circulares de diferentes diâmetros, como as que são apresentadas nas Figuras 14a, b, c e d.

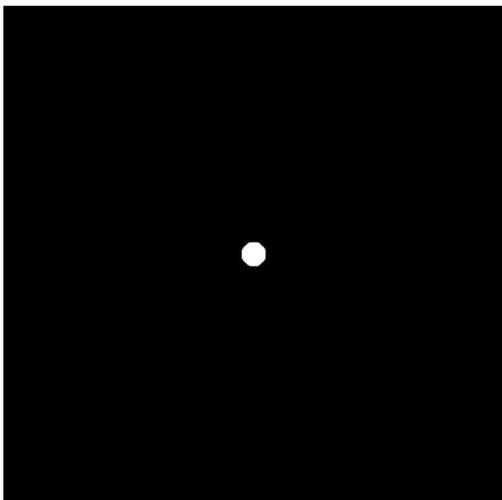
Figura 14: “Poros Idealizados”.

(a) “Poros Idealizado 10”.³

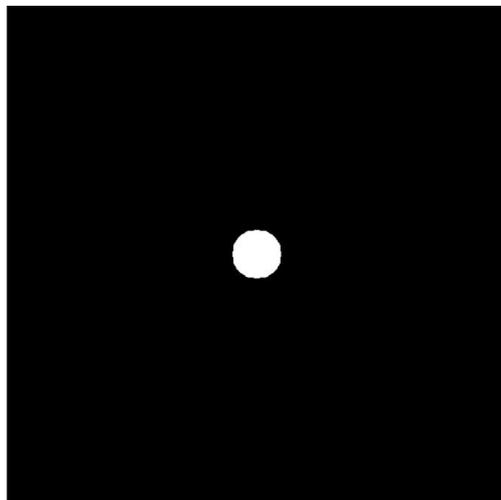
(b) “Poros Idealizado 20”.



(c) “Poros Idealizado 50”.



(c) “Poros Idealizado 100”.



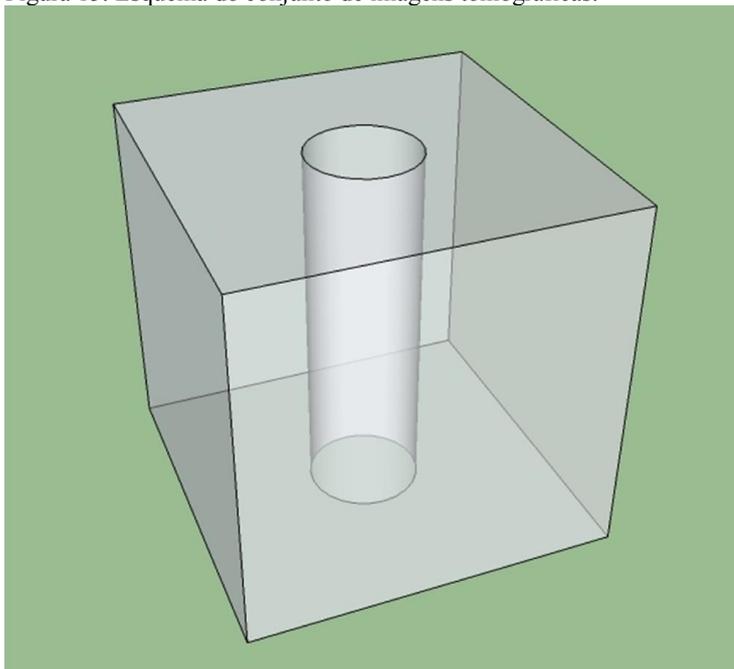
Fonte: O autor.

As figuras apresentadas anteriormente possuíam, respectivamente, diâmetros de 10, 20, 50 e 100 pixels, e o estudo consistiu em “empilhar” essas figuras, de tal forma que os poros formassem tubos cilíndricos a serem analisados pelo programa de Yang.

Um exemplo deste tipo de tubo é apresentado na Figura 15.

³ Obs: O valor numérico que acompanha o título refere-se ao tamanho do diâmetro em pixels do “poro idealizado” gerado.

Figura 15: Esquema do conjunto de imagens tomográficas.



Fonte: O autor.

O resultado do estudo foi representado em termos de uma curva de distribuição de poros e verificou-se que a extensão vertical do volume em pixels (número de fatias) deve ser de pelo menos o dobro do diâmetro do poro a ser detectado.

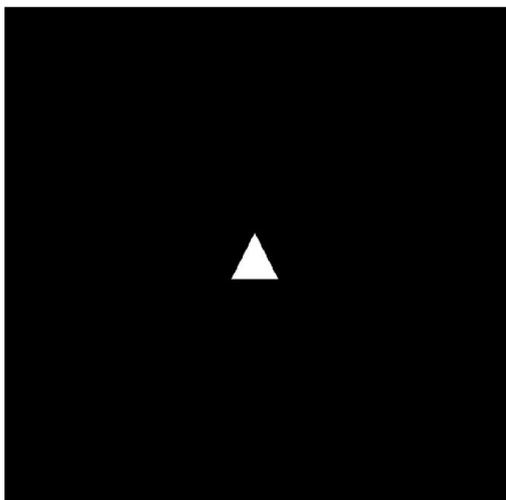
4.9 FORMATOS DOS POROS ENCONTRADOS E ANALIZADOS

Foram criadas figuras geométricas bem definidas como apresentadas na Figura 14, a fim de se determinar o valor de suas áreas e perímetros, para o cálculo do fator de forma G no modelo MM. Tais valores foram calculados através do “empilhamento” individual de cada figura geométrica até que se obtivesse um poro semelhante ao da Figura 15.

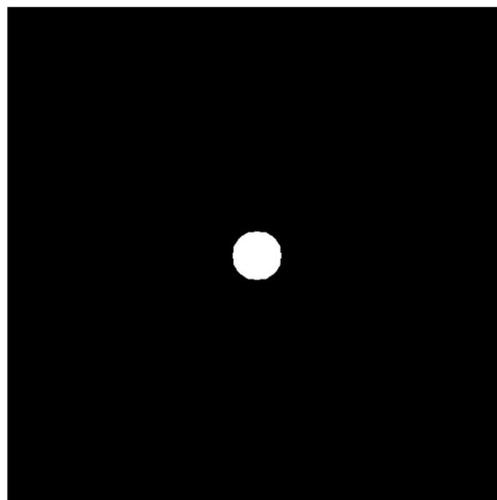
As imagens criadas para a verificação dos formatos dos poros são apresentadas a seguir (Figura 16a, b, c, e d).

Figura 16: “Poros idealizados” geométricos padrões.

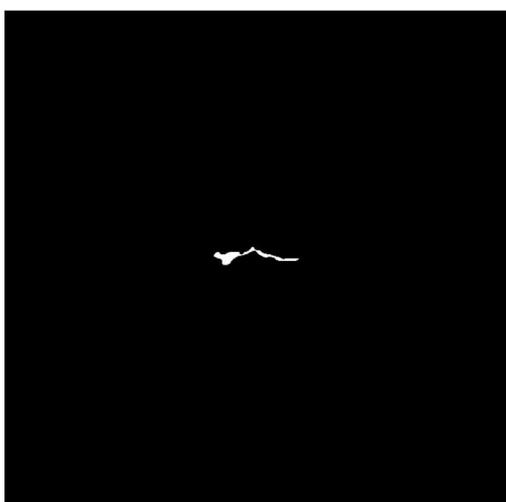
(a) Triangular.



(b) Circular.



(c) Irregular (estreito).



(d) Irregular (alongado).



Fonte: O autor.

Teoricamente e pela análise das imagens os valores desses fatores de forma estão apresentados nas Tabelas 4 e 5 apresentada a seguir:

Tabela 4: Valores teóricos dos fatores de formas para duas geometrias simples.

Poros	A	P	$G = A/P^2$
Seção circular	πR^2	$2\pi R$	$\frac{1}{4\pi} = 0,0796$
Seção triangular	$\frac{\sqrt{3}}{4} h^2$	$3h$	$\frac{\sqrt{3}}{36} = 0,048$

Fonte: O autor.

Tabela 5: Valores dos fatores de forma das análises das imagens dos “poros idealizados”.

Poros	A	P	$G = A/P^2$
Seção circular	7633	324,74	0,0724
Seção triangular	4418	316,11	0,0442
Seção irregular	20534 a 1441	919,34 a 416,43	0,024 a 0,0083

Fonte: O autor.

Assim o fator de forma ($G = A/P^2$) foi determinado através das investigações das imagens criadas e tomográficas das amostras com o auxílio do programa tuller.m redigido no ambiente do MATLAB[®], no qual foram consideradas áreas acima de 50 pixels para eliminar possíveis artefatos provenientes do processo de binarização.

O conjunto de comandos de tuller.m é apresentado no Apêndice B deste trabalho e o mesmo contabiliza todas as áreas e perímetros dos poros presentes em um conjunto de até 200 fatias axiais de um poro.

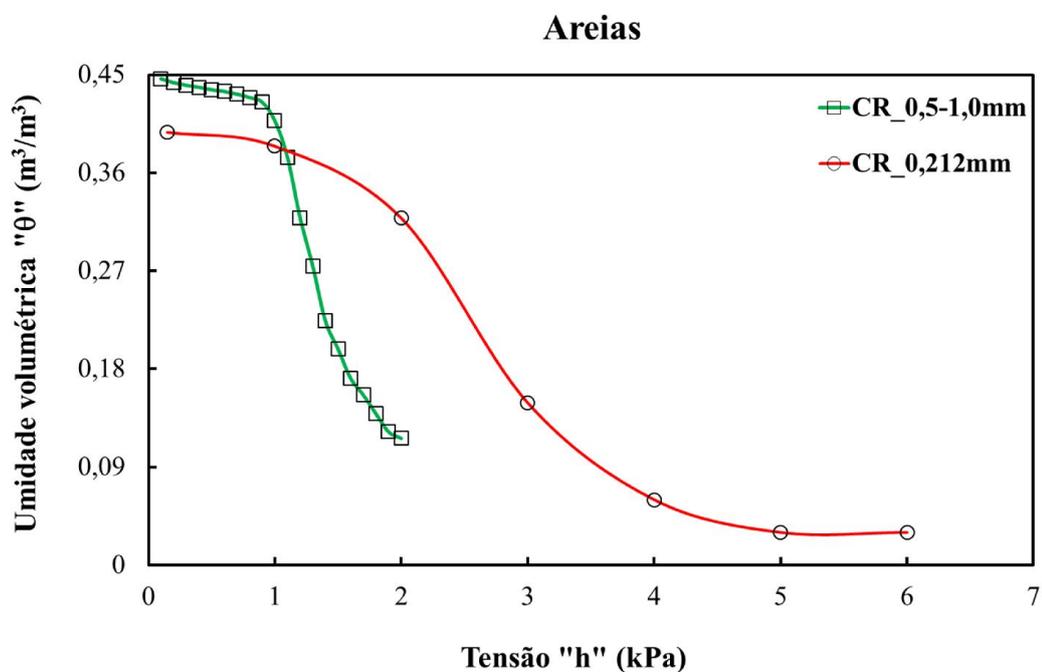
CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CRs EXPERIMENTAIS COM AJUSTE DE VAN GENUCHTEN

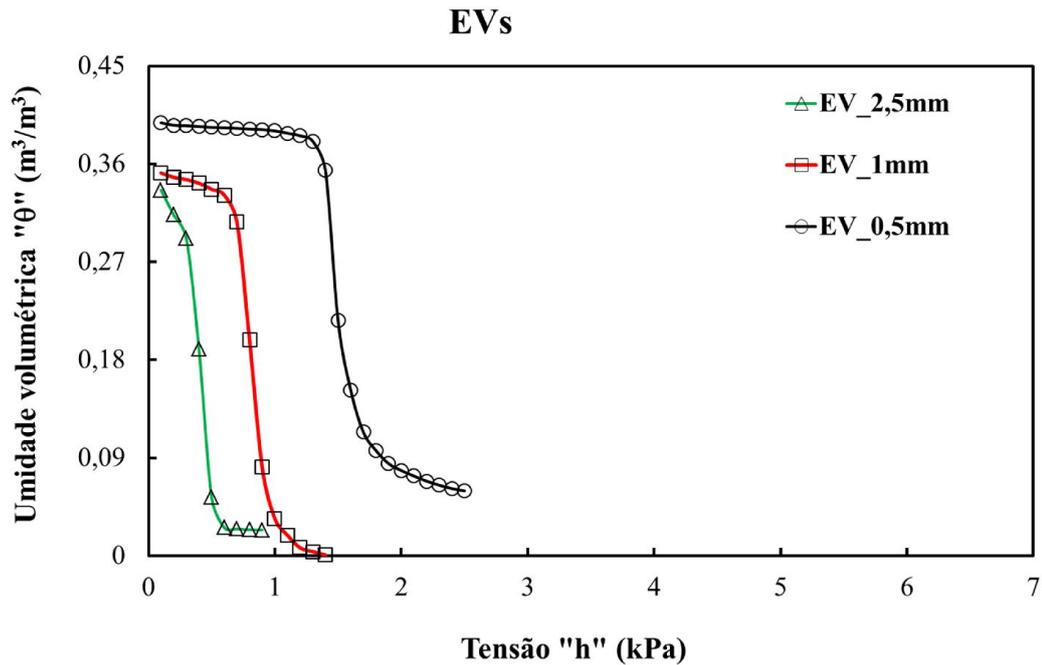
As CRs experimentais, ajustadas mediante ao modelo analítico de van Genuchten (1980), para as amostras das areias e das esferas de vidro, cujas características são apresentadas na Tabela 3 são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 17 e 18.

Figura 17: CRs das amostras de Areia.



Fonte: O autor.

Figura 18: CRs das amostras compostas pelas esferas de vidro (EVs).



Fonte: O autor.

Na Tabela 6 são apresentados os valores dos parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten, expressão 12, para as CRs experimentalmente obtidas.

Tabela 6: Valores dos parâmetros do modelo de vG para as amostras investigadas.

Parâmetros de Ajuste		Valores				
		θ_s	θ_r	α	n	m
Amostras	Areia_0,212 mm	0,393	0,026	0,032	4,438	1,744
	Areia_0,5-1,0 mm	0,438	0,074	0,089	10,497	0,353
	EV_0,5 mm	0,3915	0,062	0,072	376,44	0,023
	EV_1,0 mm	0,351	0,001	0,127	14,461	0,665
	EV_2,5 mm	0,345	0,025	0,084	5,813	346,916

Fonte: O autor.

Adotando a densidade de partículas da areia de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ para todas as amostras e utilizando a expressão 1, obteve-se intervalos de porosidades entre 37 a 45%. As porosidades encontradas através das análises das imagens tomográficas concordam relativamente bem com as obtidas usando-se expressão 1, vide Tabela 7.

Tabela 7: Valores de porosidades das amostras investigadas obtidas pela utilização das expressões 1 e 41.

Porosidades	Amostras				
	EV_0,5 mm	EV_1,0 mm	EV_2,5 mm	Areia_0,212 mm	Areia_0,5-1,0 mm
Calculada	39%	41%	45%	37%	41%
Análise das Imagens Tomográficas	30%	35%	43%	39%	39%

Fonte: O Autor.

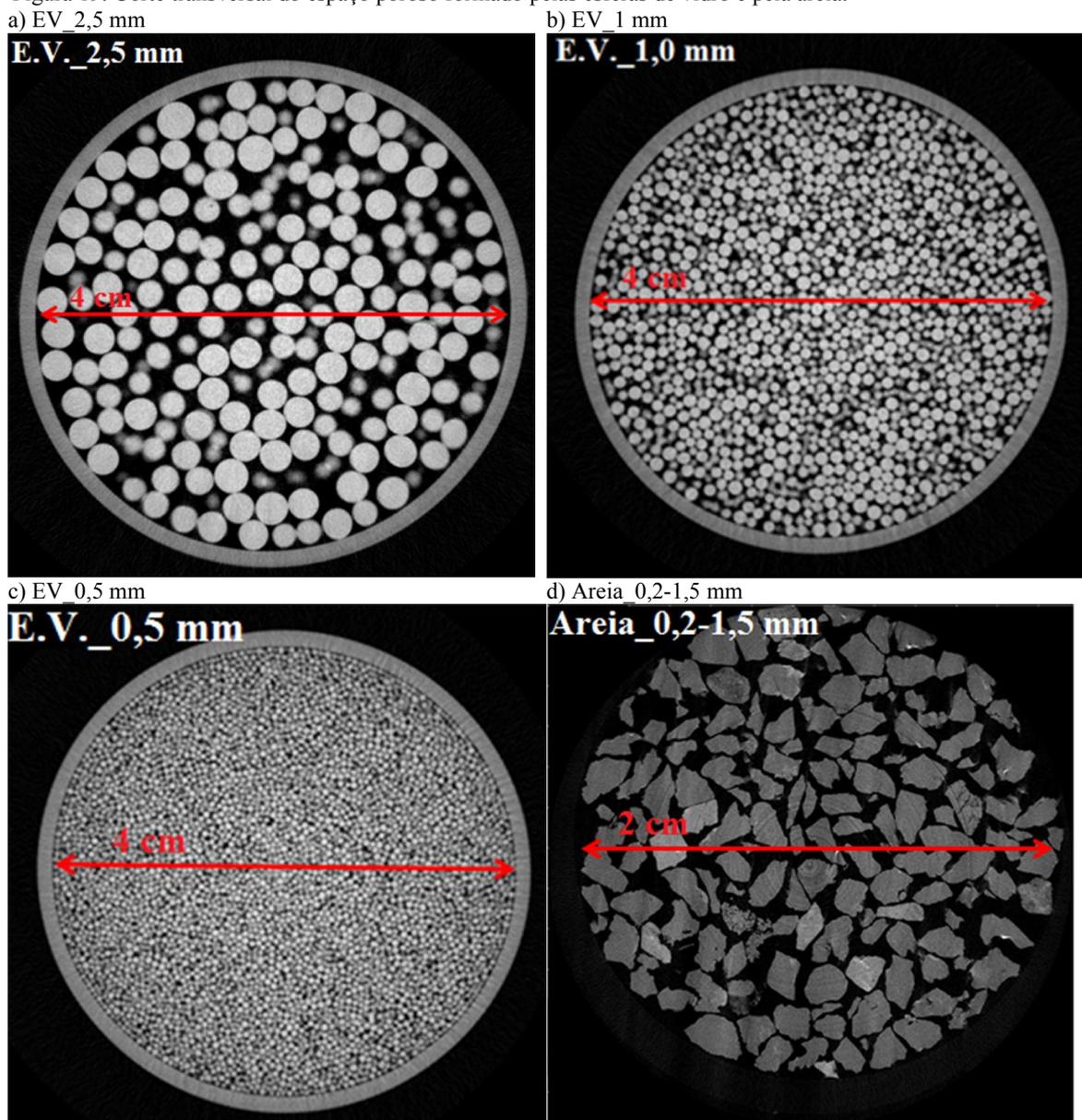
Comparando-se as porosidades obtidas pelos dois métodos, nota-se que os melhores resultados foram obtidos para as amostras de granulometrias mais grossas. Isso se deve ao fato de que nessas amostras a resolução das imagens associada ao processo de “threshold” foi eficaz para que os espaços porosos das amostras fossem bem identificados e, portanto, bem quantificados.

A redução da granulometria das amostras, com conseqüente diminuição dos poros a serem investigados, diminui a capacidade do equipamento em investigá-los e, portanto, sua quantificação fica prejudicada.

No melhor dos casos, houve uma diferença em torno de 2% na quantificação da porosidade das amostras pela utilização da análise de imagens (amostras de EV-2,5 mm e areias de granulometrias 0,212 mm e 0,5-1,0 mm) e algo em torno de 5 a 9% para as amostras de granulometria mais fina.

A forma do empacotamento das partículas que compõem as amostras pode ser visualizada na Figura 19. Tanto para as esferas de vidro quanto para a areia, a seção transversal do arranjo das partículas sugere uma distribuição de grãos semelhante à tetragonal, piramidal ou tetraédrica (Figuras 1c, d, e). No entanto, verifica-se que esse arranjo não é perfeito, pois se trata da acomodação randômica dessas partículas. Segundo Hillel (1998), para amostras naturais, a faixa de valores de porosidades está entre 25 e 50%, a qual está entre os limites teóricos dos empacotamentos poli e mono dispersos de esferas de mesmo tamanho, apresentados na Tabela 2.

Figura 19: Corte transversal do espaço poroso formado pelas esferas de vidro e pela areia.



Fonte: Imagens tomográficas cedidas pela Embrapa Instrumentação Agropecuária.

Pela observação da Figura 19, nota-se que em várias situações a disposição das partículas forma uma figura semelhante à que é apresentada no modelo simplificado sugerido por Santos (2005).

Com o auxílio da expressão 18 pode-se calcular o diâmetro aproximado dos poros surgidos no espaço poroso. Os valores dos seus raios, calculados usando o modelo mencionado anteriormente são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Valores de diâmetros médios das partículas que compõem o meio poroso e as tensões do ponto de entrada de ar conforme modelo simplificado de Santos (2005) calculados por meio das equações 4 e 18.

Amostra	EV_0,5 mm	EV_1,0 mm	EV_2,5 mm	Areia_0,212 mm	Areia_0,5-1.0 mm
\bar{D} (μm)	500	1000	2500	212	500-100
Tensão (kPa)	2,1	1	0,4	4,8	2,1-1
modelo					
Tensão (kPa)	~1,5	~0,8	~0,3	~2,0	~1,0
observada	(29%)	(20%)	(25%)	(58%)	(36%) ⁴

Fonte: O autor.

Os valores calculados e apresentados na Tabela 8 representam as tensões do ponto de entrada de ar das CRs, ponto no qual se inicia a queda abrupta da umidade da amostra com o aumento da tensão aplicada a ela. Pode-se observar que a utilização do modelo produziu valores de tensão de mesma ordem de grandeza que os observados experimentalmente. Porém, sistematicamente os valores observados foram menores que os previstos pela realização dos experimentos. No melhor dos casos, essa diferença ficou em 20% (EV_1,0 mm) e na pior, cerca de 60% (areia_0,212 mm).

Esse resultado mostra que somente considerações sobre a capilaridade não dão conta de prever a tensão em que ocorrerá o ponto de entrada de ar da CR. Aqui lança-se a hipótese de que há também expulsão da água das amostras pela ação da força gravitacional. Desta forma, além da tensão, a água das amostras é extraída pela ação dessa força, o que faz com que haja uma antecipação do ponto nos quais a água das amostras é retirada. Por isso a observação experimental da ocorrência antecipada do ponto de entrada de ar em relação ao valor indicado pelo modelo.

Os potenciais obtidos pelo modelo e experimentalmente evidenciam o fato de que quanto maior o diâmetro das partículas que compõem o arranjo, maior os poros que surgem na estrutura, e menor é a tensão que deve ser aplicada à amostra para a retirada da água de seu interior, e vice versa.

Observa-se, por exemplo, que a amostra mais grossa delas (Figura 19a), a composta pelas esferas de vidro de maior granulometria (2500 μm), está praticamente seca ($\theta = \theta_r$) pela aplicação de uma tensão de apenas 0,5 kPa, o que equivale a uma tensão equivalente a 5 cm de água, desnível do tubo do funil de Haines de 5 cm.

⁴ Diferença de porcentagem entre os valores calculados com o auxílio da equação do modelo e o que se observou experimentalmente.

O mesmo tipo de resultado pode ser obtido utilizando-se o que é proposto em Hilpert e Miller (2001) e Davis e Scriven (1977), representado pelo resultado mostrado na expressão 26. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para esses diâmetros médios usando tal modelo. Porém...

Tabela 9: Valores de diâmetros médios das partículas que compõem o meio poroso e as tensões do ponto de entrada de ar conforme modelo simplificado Hilpert e Miller (2001) e Davis e Scriven (1977) obtidos por meio das expressões 24 e 25.

Amostra	EV_0,5mm	EV_1,0mm	EV_2,5mm	Areia_0,212mm	Areia_0,5-1,0mm
\bar{D} (μm)	500	1000	2500	212-106	500-1000
Tensão (kPa)					
modelo	0,81-1,41	0,4-0,71	0,16-0,28	3,57-6,22	0,94 – 2,82-
Tensão (kPa)					
observada	~1,5	~0,8	~0,3	~2,0	~1,0

Fonte: O autor.

Como se pode ver pelos resultados apresentados na Tabela 9, os potenciais calculados por esse modelo englobam uma faixa de tensões próximas dos valores que são observados experimentalmente, com exceção da amostra composta pela areia de granulometria mais fina, para a qual se observou um desvio bastante grande, entre o que é previsto pelo modelo e o que se obtém experimentalmente. Para este modelo, ao contrário do que foi observado pelo de Santos (2005), houve tanto subestimação quanto superestimação dos valores previstos para a tensão de esvaziamento dos poros do sistema poroso.

A terceira e última aproximação para se calcular o raio de drenagem médio dos poros é a que utiliza o modelo de Mason e Morrow (MM), expressão 35. Como foi visto, o modelo utiliza informação sobre a geometria dos poros e dos meniscos neles formados, através do fator de forma ($G=A/P^2$). Portanto aqui se calculou o raio de drenagem médio ($\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} r_d$) considerando todas as áreas e perímetros encontrados via análises de 200 seções transversais das imagens tomográficas com a utilização do programa tuller.m nas Figura 19a, b, c e d já binarizadas.

Tabela 10: Raio de drenagem e tensão de sucção segundo modelo de Mason e Morrow (1991).

Amostra	EV_0,5mm	EV_1,0mm	EV_2,5mm	Areia_0,2-1,5mm
$\langle r_d(\mu\text{m}) \rangle$	90	142	-	42
Tensão (kPa)	1,6	1,0	-	3,5
modelo				
Tensão (kPa)	~1,5	~0,8	~0,3	~2,0
observada	(6%)	(20%)		(43%)

Fonte: O Autor.

Observa-se que esse modelo, tal como o primeiro, superestimou o valor para o ponto de entrada de ar. Na melhor das hipóteses a que mais se aproximou dos dados das tensões experimentais observados foi a EV_0,5 mm (6%), e isso pode ser associado a maior homogeneidade de tal amostra.

No caso da areia, esse erro se apresentou ainda maior (43%), o que indica que a mesma apresenta em seu interior um sistema mais complexo e tal modelo que considera apenas os fatores de formas não é suficiente para descrever completamente a secagem desse meio poroso. Essa porcentagem de erro elevado deve-se também ao fato de que as areias utilizadas na construção da CR e as investigadas via análise de imagens tomográficas não possuem as mesmas granulometrias.

Para a EV_2,5 mm não foi possível obter dados referentes aos fatores G uma vez que devido à alta conectividade dos poros apresentados por essa amostra, seu espaço poroso foi interpretado como sendo o equivalente a de um único poro pelo programa tuller.m.

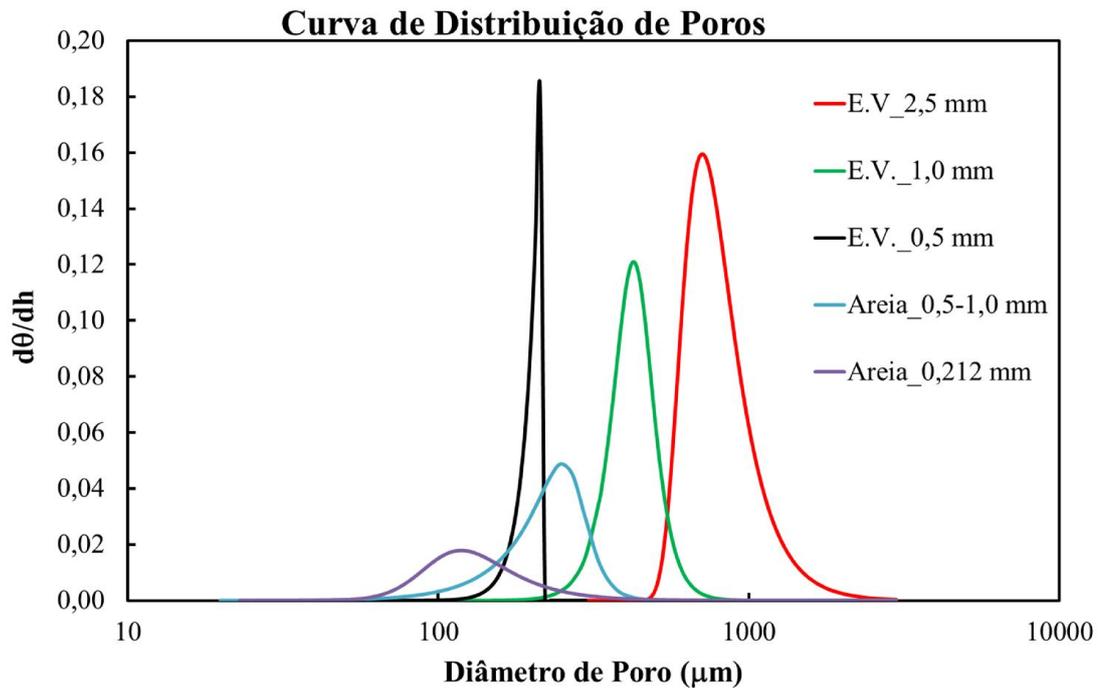
Esses tipos de resultados, a despeito de darem uma ideia do que ocorre na secagem de uma amostra porosa, mostra que só considerações quanto à morfologia do poro não são suficientes para uma completa descrição do que ocorre durante a extração de água das amostras.

A consideração de uma morfologia mais real para o poro, associada à consideração de outras forças que atuam na água do sistema, tais como, por exemplo, a gravitacional são de extrema importância para a descrição correta da secagem de uma amostra porosa, tal como as que foram investigadas neste trabalho.

5.2 FCAs ORIUNDAS DAS CRs INTERPOLADAS PELA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN

Pelo uso dos parâmetros de ajustes da curva de van Genuchten foram obtidas as FCAs, aqui representadas em termos dos raios equivalentes dos poros dos sistemas porosos (encontrados pelo uso da equação 13), do conjunto das amostras analisadas. Elas são apresentadas na Figura 20.

Figura 20: FCAs das Amostras Analisadas.



Fonte: O autor.

A primeira observação a ser feita se refere à disposição das FCAs no gráfico da Figura 20. Mais à direita, encontram-se as curvas referentes às amostras de granulometrias mais grossas EV_2,5 mm e EV_1,0 mm, respectivamente, representadas em vermelho e verde nessa Figura. Mais à esquerda encontram-se as de menores granulometrias Areia_0,212 mm e EV_0,5 mm, respectivamente, representadas pelas curvas em roxo e preto. E finalmente, a curva disposta em uma posição intermediária, a qual corresponde à mistura de areias de granulometrias entre 500 e 1000 micra, Areia_500-1000 μm, curva em azul na Figura 20. Desta forma, como poderia se supor, o conjunto de poros desta última amostra possui características intermediárias entre as amostras com granulometria de 500 e 100 μm.

De acordo com a equação de vG, os picos das FCAs ocorrem em uma tensão intermediária entre as tensões correspondentes às umidades de saturação e residual, respectivamente, θ_s e θ_r . Esse resultado é mostrado na equação 40. De acordo com esse raciocínio, as tensões correspondentes a esses pontos e os raios equivalentes a elas, calculados pela utilização da equação 4, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Tensões e raios equivalentes para a posição dos picos das FCAs considerando que a inflexão da CR no ponto médio entre θ_s e θ_r dada pela equação 40.

Amostra	EV_0,5mm	EV_1,0mm	EV_2,5mm	Areia_0,212mm	Areia_0,5-1,0mm
r_{pico} (μm)	99	165	248	38	115
Tensão (kPa)	1,5	0,9	0,6	3,9	1,3

Fonte: O autor.

Outra observação que se pode fazer, refere-se às diferenças da largura à meia altura exibida pelas FCAs. Uma maior largura, em princípio é um indicativo da presença de uma gama maior de poros no espaço poroso das amostras investigadas (NIMMO, 2004; SANTOS, 2005; CÁSSARO et al., 2008; OLIVEIRA; CÁSSARO, 2013).

As larguras à meia altura das FCAs das amostras investigadas são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Largura à meia altura das FCAs dos meios porosos investigados.

Amostra	EV_0,5 mm	EV_1,0 mm	EV_2,5 mm	Areia_0,212 mm	Areia_0,5-1,0 mm
Posição do pico (μm)	40	150	341	95	124
Largura à meia altura (μm)	94,2	353	803	223,7	292

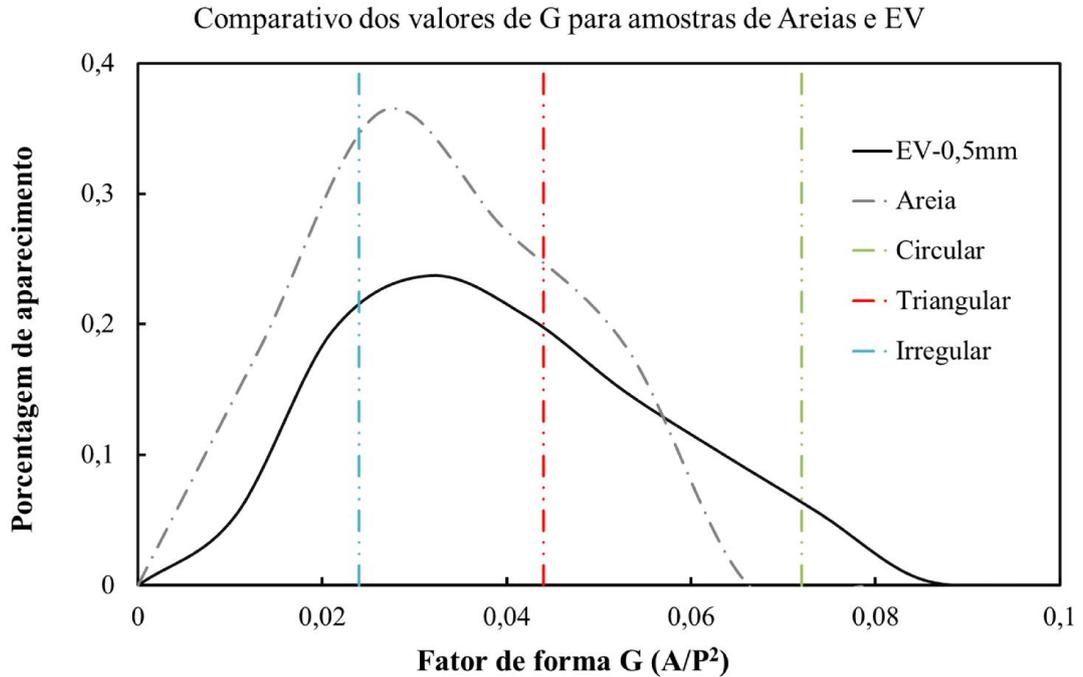
Fonte: O autor.

Como se podem observar pelos valores apresentados na Tabela 12, as larguras a meia altura relativas às esferas de vidro são maiores quando comparadas às das areias. Entre as esferas de vidros, nota-se que a esfera de menor granulometria (EV_0,5 mm) apresenta maior homogeneidade frente às duas outras esferas de vidro de maior granulometria, fato também verificado quando se comparam as duas amostras de areias de granulometrias diferentes.

No entanto, a análise dos fatores de forma G para os poros encontrados na amostra de areia mostra que, em média, a amostra apresenta uma maior porcentagem de poros de geometrias mais irregulares e triangulares em comparação com o que é visto para uma das

amostras de EV_0,5 mm, a de menor largura a meia altura. Essa comparação é apresentada nos gráficos da Figura 21.

Figura 21: Comparação dos fatores de formas das amostras de areia e EV_0,5 mm.



Fonte: O autor.

Pode-se ver que na areia, há uma prevalência de poros irregulares e triangulares em comparação com os poros da amostra de esferas de vidro EV_0,5 mm, a qual apresenta prevalência de poros triangulares e circulares. Isso se deve ao fato de que a distribuição para essa última amostra, a E.V., está deslocada para a direita em comparação com a curva da areia, indicando a presença de fatores G referentes a poros com geometrias triangulares e circulares, respectivamente, os valores de 0,044 e 0,072, apresentados na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13: Valores de G calculados via análise de imagens para os diferentes formatos de poros.

Formas Geométricas	Circunferência	Triangular	Irregular
Valores de Gs	0,072	0,044	0,024

Fonte: O autor.

Outra maneira de se confirmar o que é o exposto anteriormente é pelo cálculo das áreas sob a curva de distribuição de fatores Gs para as amostras investigadas e apresentadas na Figura 21. Isso foi feito considerando-se três intervalos de fatores G: os correspondentes a

poros irregulares ($G < 0,024$; %1), os poros com fatores de forma entre irregulares e triangulares ($0,024 < G < 0,044$; %2) e poros cujos fatores G_s estejam acima dos que caracterizam os poros triangulares ($G > 0,044$; %3).

Na Tabela 14, são apresentadas essas porcentagens.

Tabela 14: Valores de porcentagem para cada área de formato de poro e porcentagem correspondente à mesma.

Amostra	EV (%)	Areia (%)
%1	23	30
%2	46	45
%3	31	25

Fonte: O autor.

Verifica-se que a soma das porcentagens %1 e %2 é cerca de 6% maior para a amostra composta de areia (75%) em comparação com a amostra de esferas de vidro (69%), indicando uma ligeira prevalência, portanto, de poros com características mais irregulares.

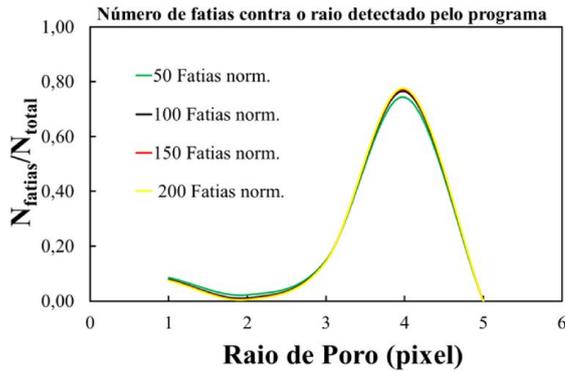
5.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO PROGRAMA DE YANG PARA A OBTENÇÃO DA CDP

Como foi dito, a curva de distribuição de poros foi obtida pela utilização do programa apresentado em Yang et al. (2009). Também foi mencionado que o programa analisa as imagens como um todo e considera as extremidades do volume reconstruído como limites para o processo simulado de intrusão de mercúrio. Portanto, tanto longitudinalmente quanto transversalmente deve-se garantir que o processo se dê sem interrupções.

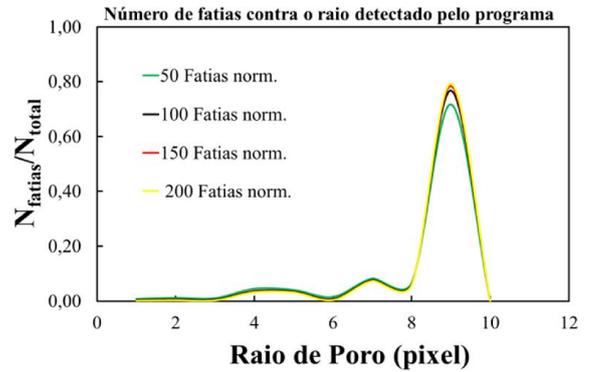
As Figuras 22a, b, c e d mostram como um poro tem seu diâmetro reconhecido pelo programa, dependendo do número de seções longitudinais (no sentido do eixo do cilindro, Figura 15) utilizadas para a sua análise. Lembrando-se que os poro idealizados foram nomeados de acordo com os seus diâmetros, ou seja, no poro idealizado 10 o diâmetro do cilindro analisado era de 10 pixels transversalmente, o poro idealizado 20, 20 pixels e assim por diante.

Figura 22: Análise do número mínimo de fatias a serem consideradas para a detecção de um poro usando o programa de Yang et al. (2009).

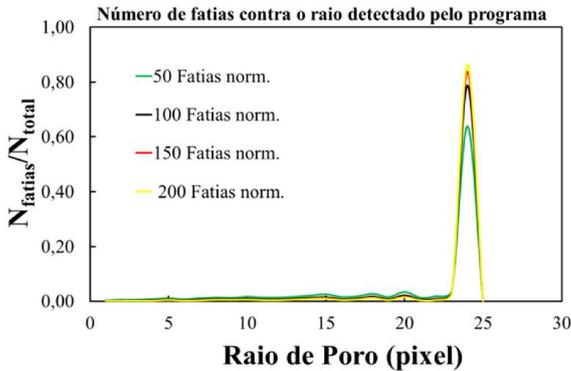
a) Poro idealizado 10



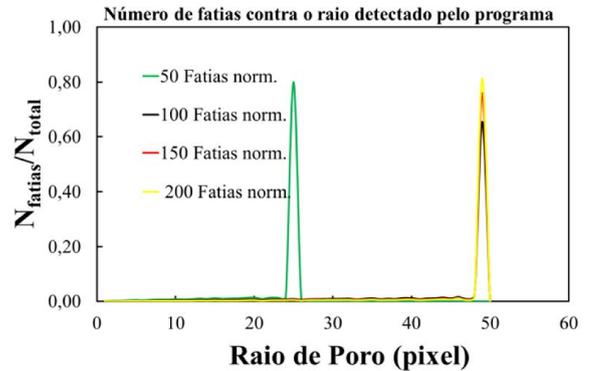
b) Poro idealizado 20



c) Poro idealizado 50



d) Poro idealizado 100



Fonte: O autor.

Pode-se ver que para o poro idealizado de menor diâmetro, 10 e 20 pixels, 50 fatias longitudinais, número que representa, respectivamente, 5 e 2 vezes os diâmetros dos poros a serem detectados, já foram suficientes para a detecção de seus raios de curvatura, os quais devem estar próximos de, respectivamente, 5 e 10.

No entanto, à medida que o poro tem seu diâmetro aumentado, caso dos poro idealizados 50 e 100, verifica-se que o número mínimo de 50 fatias não é suficiente para a detecção correta do raio de curvatura dos poros. No poro idealizado de 50, isso se verifica pelo grande efeito de borda observado na distribuição dos raios detectados pelo programa. Ocorre uma grande oscilação da curva de distribuição ao redor de valores referentes a raios de curvaturas menores, 20, 18, 15 pixels e etc (linha verde da Figura 22c).

Na distribuição referente ao poro idealizado 100 (Figura 22d), a utilização de 50 fatias limitou a distribuição a raios equivalentes a 25 pixels, valor que pode ser entendido como sendo o valor máximo do raio de uma esfera circunscrita dentro das 50 fatias.

Já quando se considera o número de fatias igual ao do diâmetro do poro idealizado 100 (100 pixels de diâmetro de poro), observa-se um aumento da frequência relativa ao raio de 50 pixels (curva em preto na Figura 22d) e para 150 e 200 fatias (respectivamente, as curvas em vermelho e amarelo da Figura 22d) o raio de curvatura próximo de 50 indica que o programa detectou corretamente este poro.

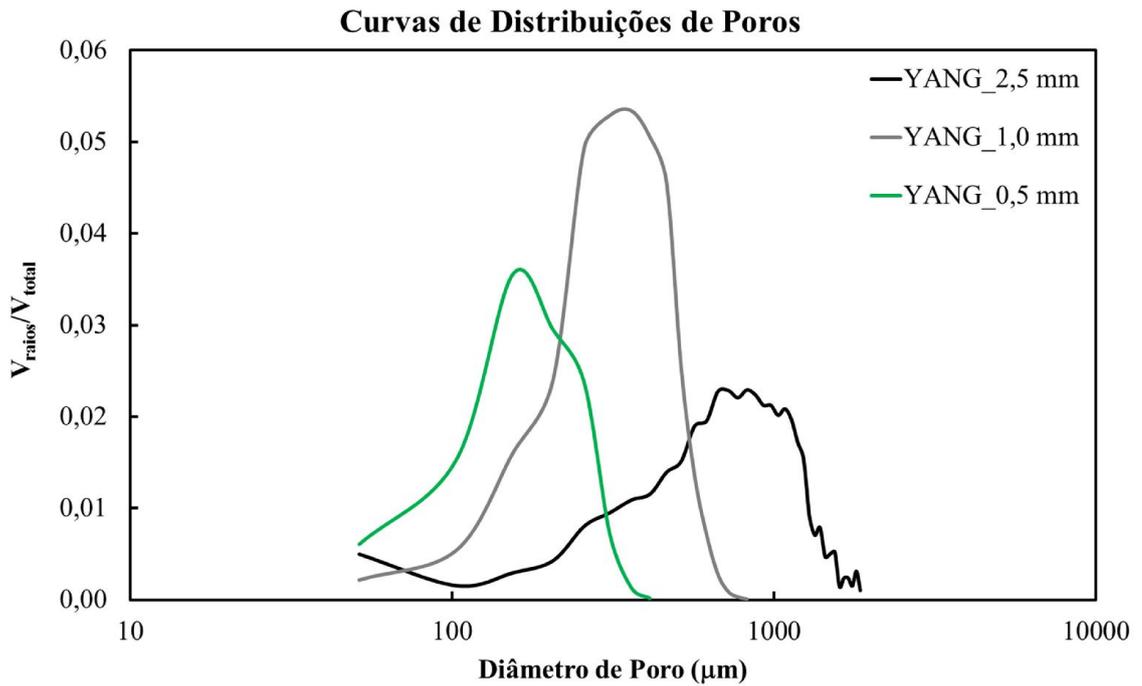
Desta forma, estabelece-se como critério para que o raio de curvatura de um poro seja corretamente calculado, pelo menos o dobro do diâmetro do poro a ser detectado em número de fatias.

5.4 O PROGRAMA DE YANG PARA A DETERMINAÇÃO DAS CDPs DAS AMOSTRAS DE ESFERAS DE VIDRO

As curvas de distribuições de poros extraídas das análises das imagens tomográficas para as amostras de esferas de vidro são apresentadas na Figura 23, e na Figura 24 mostra-se a comparação entre as CDPs obtidas via programa computacional de Yang et al. (2009) e as FCAs obtidas experimentalmente por meio de levantamento das CRs. O critério de número mínimo de fatias (seções) a serem analisadas foi estabelecido com base no tamanho médio dos poros observados nas amostras. Na amostra de granulometria mais grossa (2500 μm), a que exhibe os poros de maior calibre, esse diâmetro médio ficou em torno de 953 μm o que demandou a realização da simulação em um número mínimo de 200 fatias com base nas dimensões dos poros mencionados anteriormente. A distância entre fatias sendo de aproximadamente 30 μm , faz com que o volume analisado tenha uma altura (distância vertical entre os planos que delimitam esse volume) de aproximadamente 6000 μm , ou seja, seis vezes maior do que o maior dos poros investigados.

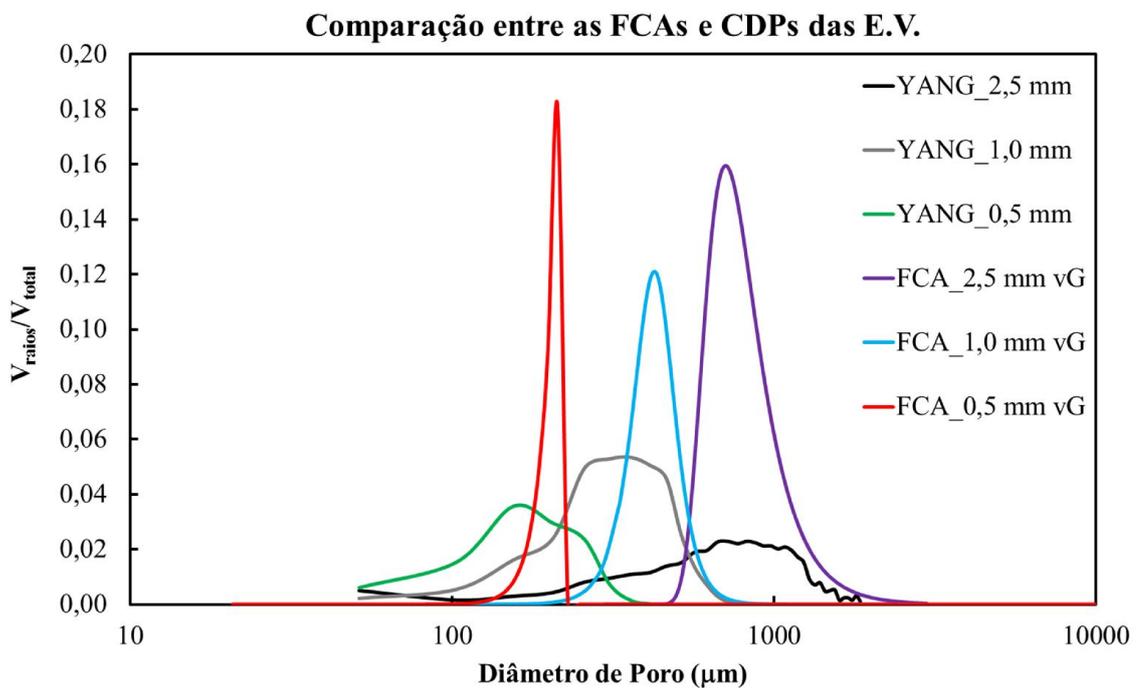
Como em média as outras amostras exibem poros de calibres menores, todas as outras simulações foram realizadas utilizando-se esse mesmo número de seções.

Figura 23: Curvas de Distribuições de Poros mediante utilização do programa de Yang et al. (2009).



Fonte: O autor.

Figura 24: Comparação entre as FCAs (van Genuchten, 1980) e CDPs (Yang et al., 2009).



Fonte: O autor.

Uma diferença a ser notada entre as curvas apresentadas na Figura 24 refere-se à largura das CDPs (obtidas via simulação) em comparação às FCAs (obtidas

experimentalmente via CRs). Verifica-se que as obtidas via simulação são mais largas que as obtidas via CRs. Essa diferença pode ser explicada, em primeira análise, pelo limite de detecção experimental do aparato utilizado para o levantamento das CRs.

Como foi detalhado na teoria do modelo MM, no qual se descreve a secagem de poros de geometria não cilíndrica, a secagem dos poros se dá em etapas, sendo a primeira marcada pela extração de uma grande quantidade de água da parte central dos poros (equivalente a $r = r_d$ no modelo), e as posteriores, nas quais a água deve ser retirada dos vértices do poro com incrementos cada vez maiores na tensão aplicada à água das amostras.

Devido à simplicidade do arranjo experimental, a extração de água está limitada à que se dá pela aplicação de baixas tensões e é suficiente para drenar o centro dos poros, a condição descrita em MM para a condição em que $h(\text{cm de H}_2\text{O}) = 1490/r_d(\mu\text{m})$, ficando ainda parte da água retida nos vértices dos poros que compõem as amostras. Para a extração dessa água, que permanece nos poros, em muito menor quantidade, deveria se ter um aparato com muito mais sensibilidade, ou seja, mais bem elaborado para que pequenas variações na quantidade de água, a ocorrerem na região de tensões mais altas, pudessem ser verificadas e quantificadas.

Para o programa computacional não existe essa limitação, e os poros são investigados em uma gama maior de raios de curvatura, o que equivale a analisá-los em uma maior faixa de diâmetros equivalentes. Para o programa, o pixel representa a menor porção do poro que pode ser analisado, representando esse, no caso das amostras analisadas, algo em torno de 30 micra (resolução das imagens analisadas), tensões de 5,0 kPa.

Em resumo, a natureza rugosa da superfície das amostras influenciou de forma importante as CRs levantadas e conseqüentemente as FCAs delas provindas. Já para as CDPs advindas das análises das imagens tomográficas, tal natureza não influencia o programa o que faz com que seja identificada uma gama maior de poros.

A explicação da diferença em alturas dos picos apresentados pelas curvas deve-se ao fato de que elas estão normalizadas em relação ao volume investigado. Ou seja:

$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{V(r)}{V_t} dr = \frac{1}{V_t} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} V(r) dr = \frac{V_t}{V_t} = 1$$

Desta forma, quanto mais estreita, mais alta a curva, e vice-versa.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÃO

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Propôs-se a modelagem através da utilização de modelos simplificados para a descrição dos poros das amostras investigadas e utilizou-se a imagem obtida via tomografia para a simulação computacional via o programa proposto por Yang et al. (2009).

Observou-se a adequação dos modelos propostos por, Mason e Morrow (1991), Hilpert e Miller (2001) e Davis e Scriven (1977) e Santos (2005) para a obtenção da tensão do ponto de entrada de ar nas amostras porosas. Nesse aspecto o que apresentou melhores resultados foi o de Hilpert e Miller (2001) e Davis e Scriven (1977), produzindo resultados mais aproximados aos que foram observados experimentalmente. Porém, os resultados também mostram que apenas considerações quanto à morfologia dos poros não é suficiente para se ter uma ideia completa da secagem das amostras investigadas.

Em relação às FCAs e CDPs, conseguiu-se verificar semelhanças entre as mesmas. No entanto, pelo uso da simulação computacional analisa-se uma faixa bem mais extensa de raios de curvatura do que a realizada pelo aparato experimental.

6.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

O modelo de Hilpert e Miller (2001) e Davis e Scriven (1977) foi o que melhor previu o ponto de entrada de ar das amostras porosas investigadas. Com exceção à amostra de areia as tensões referentes ao ponto de entrada de ar foram previstas com erros relativamente mais altos. As larguras das FCAs, maiores para as areias, mostram que esses sistemas porosos são os mais complexos entre os investigados.

A sensibilidade do funil de Haines, assim como as tensões por ele produzidas, não foram suficientes para a investigação detalhada da gama de poros existentes nas amostras investigadas, quando comparados ao programa desenvolvido por Yang et al. (2009).

As análises dos “poros idealizados” possibilitaram estabelecer o limite mínimo de fatias a serem investigadas para a investigação de um poro em uma amostra.

Finalmente, apresentou-se metodologia capaz de fornecer informação a respeito da morfologia dos poros existentes no interior de amostras porosas simples.

CAPÍTULO 7

7 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 1) Efetuar o levantamento de curvas de retenção através de aparelhos mais sensíveis e compará-las com as obtidas pelo equipamento aqui utilizado;
- 2) Estender toda análise feita nesta pesquisa para amostras de solos; e
- 3) Propor modelo para a descrição da retenção de água em sistemas porosos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, S. H.; GANTZER, C. J. Determination of soil water content by X-ray computed tomography and magnetic resonance imaging. **Irrigation Science**, v. 10, p. 63-71, 1989.
- BARTOLI, F. et al. The relation between silty soil structures and their mercury porosimetry curve counterparts: fractals and percolation. **European Journal of Soil Science**, v. 50, p. 9-22, 1999.
- BORGES, J. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil & Tillage Research**, v. 123, p. 43-49, 2012.
- BOUMA, J. et al. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, p. 945-950, 1977.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**, n. 3, Fort Collins, Colorado State University, 1964.
- CASSARO, F. A. M. et al. Funil de Haines modificado: curvas de retenção em solos próximos à saturação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2555-2562, 2008.
- CASTRO, S. S. et al. Micromorfologia de solos: bases e aplicações. **Tópicos em ciência do solo**. SBCS, Viçosa, p. 107-164, 2003.
- COLES, M. E. et al. Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 19, p. 55-63, jan. 1998.
- COILE, T. S. Moisture Content of small stone in soil. **Soil Science**, v. 75, p. 203-207, 1953.
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO P. Morphological, micromorphological and hydrophysical characterization of soils with a nitic B horizon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 581-595, 2005.
- CHAN, T. P.; GOVINDARAJU, R. S. Estimating soil water retention curve from particle-size distribution data based on polydisperse sphere systems. **Vadose Zone Journal**, v.3, p.1443-1454, 2004.
- CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. Using a computed-tomography miniscanner in soil science. **Soil Science**, v. 142, p. 56-61, 1986.
- CNUUDE, V. et al. Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool. **Applied Geochemistry**, v. 21, p. 826-832, 2006.

DANE, J. H.; OOSTROM, M.; MISSILDINE, B. C. An improved method for the determination of capillary pressure-saturation curves involving TCE, water and air. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 11, n. 1-2, p. 69-81, 1992.

DELERUE, J. F. et al. New algorithms in 3D image analysis and their application to the measurement of a spatialized pore size distribution in soils. **Physics and Chemistry of the Earth: Part A**, v. 24, p. 639-644, 1999.

DULIU, O. G. Computer axial tomography in geosciences: an overview. **Earth-Science Reviews**, v. 48, p. 265-281, 1999.

ELLIOT, T. R.; HECK, R. J. A comparison of optical and X-ray CT technique for void analysis in soil thin section. **Geoderma**, v. 141, p. 60-70, 2007.

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**, v. 156, p. 133-142, 2010.

FARBER, L.; TARDOS, G.; MICHAELS, J. N. Use of X-ray tomography to study the porosity and morphology of granules. **Powder Technology**, v. 132, p. 57-63, 2003.

FELICIANO, J. J. S. **Métodos alternativos para obtenção da curva de retenção de água no solo**. 2005. 1003f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná: Cascavel, 2005.

FRANCIS, G. S. et al. The burrowing characteristics of three common earthworm species. **Australian Journal of Soil Research**, v. 39, p. 1453-1465, 2001.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 3, p. 521-532, 1994.

FREITAS JUNIOR, E.; SILVA, E. M. Uso da centrífuga para determinação da curva de retenção de água no solo, em uma única operação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, p. 1423-1428, 1984.

GIMENES, F. H. S. **Curva de retenção na avaliação da qualidade física do solo**. 2012. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2012.

GOLDSTEIN L.; PRASHER S. O.; GHOSHAL S. Three-dimensional visualization and quantification of non-aqueous phase liquid volumes in natural porous media using a medical X-ray Computed Tomography scanner. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 93, p. 96-110, 2007.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, S. H.; AYLEMORE, L. A. G. Three-dimensional visualization of preferential flow patterns in two soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 39, p. 1387-1396, 2001.

HEIJS, A. W. J.; RISTENA, C. J.; DEKKER, L. W. Three-dimensional visualization of preferential flow patterns in two soils. **Geoderma**, v. 17, p. 101-116, 1996.

- HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.
- HILPERT, M.; MILLER, C. T. Pore-morphology-based simulation of drainage in totally wetting porous media. **Advances in Water Resources**, v. 24, p. 243-255, 2001.
- JALBERT, M.; DANE, J. H. Correcting Laboratory Retention Curves for Hydrostatic Fluid Distributions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 3, p. 648, 2001.
- JASSOGNE, L.; MCNEILL A.; CHITTLEBOROUGH, D. 3D-visualization and analysis of macro- and meso-porosity of the upper horizons of a sodic, texture-contrast soil. **European Journal of Soil Science**, v. 58, p.589-598, 2007.
- JÉGOU, D. et al. Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. **European Journal of Soil Biology**, v. 38, p. 329-336, 2002.
- JURY, A. W.; GARDNER, W.R.; GARDNER, W.H. **Soil physics**. New York: John Wiley & Sons, 1991. 328 p.
- KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel S. A., 1984. 63 p.
- KILFEATHERA, A. A.; VAN DER MEER, J. J. M. Pore size, shape and connectivity in tills and their relationship to deformation processes. **Quaternary Science Reviews**, v. 27, p. 250-266, 2008.
- KOSUGI, K. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. **Water Resources Research**, v. 30, p. 891-901, 1994.
- _____. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. **Water Resources Research**, v. 32, p. 2697-2703, 1996.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of Soil Analysis. I. Physical and Mineralogical Methods**. Madison, ASA/SSSA, p.635-662, 1986.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Do Autor, 1995. 497 p.
- _____. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335 p.
- LINDQUIST, W. B. et al. Pore and throat size distributions measured from synchrotron X-ray tomographic images of Fontainebleau sandstones. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 105-B9, p. 21509-21527, 2000.
- LINDQUIST, W. B. The geometry of primary drainage. **Journal of Colloid and Interface Science**: n. 296, p. 655-668, 2006.
- LUCAS, J. F. R. et al. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, p. 1957-1973, 2011.

LUO, L.; LIN, H.; HALLECK, P. Quantifying Soil Structure and Preferential Flow in Intact Soil Using X-ray Computed Tomography. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n. 4, v. 72, p. 1058-1069, 2008.

MASON, G.; MORROW, N. R. Capillary behavior of a perfectly wetting liquid in irregular triangular tubes. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 141, n. 1, p. 262-274, 1991.

MANIERI, J. M. et. al. Aplicação do modelo de Arya e Paris para estimativa da qualidade física do solo. **Comunicado Técnico 104**, São Carlos, Jul. 2009.

MARSHALL, T. J. The nature, development, and significance of soil structure. In: NEALE, G.J. (ed.) Trans. of joint meeting of comissions, n. 4-5, **Int. Soil Sci. Soc.** Palmerston North, p. 243-257, 1962.

MEDEIROS, S. D. **Determinação da curva de retenção de água no solo através do fatiamento de amostras centrifugadas**. 1987. 66f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

MOONEY, S. J. Three-dimensional visualization and quantification of soil macroporosity and water flow patterns using computed tomography. **Soil Use and Management**, v. 18, p. 142-151, 2002.

NAKASHIMA, Y.; KAMIYA, S. Mathematica Programs for the Analysis of Three-Dimensional Pore Connectivity and Anisotropic Tortuosity of Porous Rocks using X-ray Computed Tomography Image Data. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 44, n. 9, p. 1233-1247, 2007.

NARASIMHAN, T. N. Buckingham, 1907: An Appreciation. **Vadose Zone Journal**, v. 4, p. 434-441, 2005.

NEETHIRAJAN, D. S.; WHITE, N. D. G.; ZHANG, H. Investigation of 3D geometry of bulk wheat and pea pores using X-ray computed tomography images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 63, p. 104-111, 2008.

NIMMO, J. R. Porosity and Pore Size Distribution. In: **Encyclopedia of Soils in the Environment**, v. 3, London: Elsevier, p. 295-303, 2004.

NIMMO, J. R.; LANDA, E. R. The Soil Physics Contributions of Edgar Buckingham. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 69, p. 328-342, 2005.

NG, K. M., DAVIS, H. T. e SCRIVEN, L. M. Visualization of blob mechanics in flow through porous media. **Chemical Engineering Science**, v. 33, p. 1009-1017, 1977.

OR, D.; WRAITH, J. M. **Agricultural and environmental soil physics**. Logan: Utah State University. 1997. 218p.

OLIVEIRA, J. A. T.; CÁSSARO, F. A. M. Estudo comparativo da função capacidade de água, obtida por diferentes modelos analíticos de ajustes da curva de retenção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

OTSU, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, SMC-9, 1979.

PAGLIAI, M. et al. Tillage impact on soil quality. I. Soil porosity and related physical properties. **Italian Journal Agronomy**, v. 2, p. 11-20, 1998.

PAGLIAI, M. et al. Tillage impact on soil quality. I. Soil porosity and related physical properties. **Italian Journal Agronomy**, v. 2, p. 11-20, 1998..

PASSONI, S. **Microtomografia de raios X na caracterização micromorfológica de solo submetido a diferentes manejos. 2013. 146f.** Dissertação (Mestrado em Ciências/Física) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2013.

PERRET, J. S.; PRASHER, S. O.; KACIMOV, A. R. Mass fractal dimension of soil macropores using computed tomography: from the box-counting to the cube-counting algorithm. **European Journal of Soil Science**, v. 54, p. 569-579, 2003.

PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E.; RIEKE, P. E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 46, n.3, p. 445–450, 1982.

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, 2006.

PIRES, L. F. et al. Application of γ -ray computed tomography to evaluate the radius of influence of soil solution extractors and tensiometers. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 259, p. 969-974, 2007.

_____. Micro-morphological analysis of the effect of sampling by the volumetric ring method on soil structure. **Progress in Agricultural Engineering Science**, v.3, p. 1-19, 2007.

_____. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. **Catena**, v. 72, p. 297-304, 2008a.

_____. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. **Soil and Tillage Research**, v. 100, p. 72-77, 2008b.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S. Mudanças na estrutura do solo avaliada com uso de tomografia computadorizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 391 -400, 2010.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos.** Curitiba: Sallesward-Discovery, 1996. 446 p.

QUINTON, W. L. et al. Measuring physical and hydraulic properties of peat from X-ray tomography. **Geoderma**, v. 153, p. 269-277, 2009.

RAOUSH R. I.; WILLSON C. S. Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron X-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems. **Journal of Hydrology**, v. 300, p. 44-64, 2005.

- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** [S.l.]: Manole, 2004. 478 p.
- ROBB, J. L.; KOTZER, T.G.; HAWKES, C. Investigation of the 3D geometry of low permeability rocks using Synchrotron X-ray computed microtomography. **Earth and Environmental Science**, Canadian Light Source, Activity Report, v. 97, 2007.
- ROGASIK, H. et al. Assessment of soil structure using X-ray computed tomography. In: GEOLOGICAL SOCIETY. Applications of X-ray computed tomography in the geosciences. **Special Publications**, v. 215, London, p. 151-165, 2003.
- ROY, I. M. et al. An improved simulation of void structure, water retention and hydraulic conductivity in soil with the Pore-Cor three-dimensional network. **European Journal of Soil Science**, v. 54, p. 477-489, 2003.
- SANTOS, R. A. **Propriedades de Retenção de Água por Espaços não Homogêneos: Experimentos de Laboratório e Simulação Computacional.** 2005. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Física) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2005.
- SILVA, A. P. **Física do Solo.** Universidade de São Paulo: Piracicaba, 2008.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms.** Madison, Soil Sci. Soc. Am. J., 1997.
- SCHAAP, J. P. et al. Measuring the effect of structural connectivity on the water dynamics in heterogeneous porous media using speedy neutron tomography. **Advances in Water Resources**, v. 31, p. 1233-1241, 2008.
- TARQUIS, A.M. et al. Pore network complexity and thresholding of 3D soil images. **Ecol. Complex**, v. 6, p. 23-239, 2009.
- TAVARES, M. H. F.; FELICIANO, J. J. S.; VAZ, C. M. P. Análise comparativa de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.4, p. 517-524, 2008.
- TIPPKÖTTER, R. et al. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography (mCT). **Soil and Tillage Research**, v. 105, p. 12-20, 2009.
- TSAKIROGLOU, C. D.; PAYATAKES, A. C. Characterization of the pore structure of reservoir rocks with the aid of serial sectioning analysis, mercury porosimetry and network simulation. **Advances in Water Resources**, v. 23, p. 773-789, 2000.
- UDAWATTA et al. 3-D pore geometry as a function of rock weathering: a CT-analysis. **World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World**, 19., Brisbane, Australia, 2010.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, p.892-898, 1980.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFHAL, D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. **Géotechnique**, v. 49, n. 2, p. 143-159, 1999.

VAZ, C. M. P. et al. Evaluation of an Advanced Benchtop Micro-Computed Tomography System for Quantifying Porosities and Pore-Size Distributions of Two Brazilian Oxisols. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 75, n. 3, p. 832-841, 2011.

VOGEL, H. J.; ROTH, K. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure. **Advances in Water Resources**, v. 24, p. 233-242, 2001.

WONHO, O.; LINDQUIST, W. B. Image Thresholding by Indicator Kriging. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 21, p. 590-602, 1999.

YANG, Z. et al. Image-based method for obtaining pore-size distribution of porous biomasses. **Environmental Science & Technology**, p.73-76, 2008.

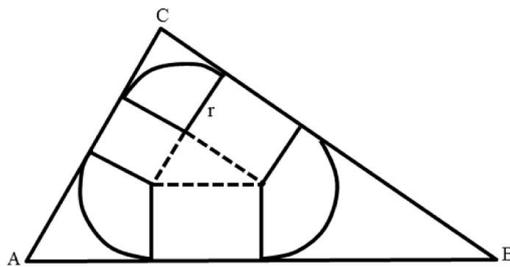
_____. An Image-Based Method for Obtaining Pore-Size Distribution of Porous Media. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 9, p. 3248-3253, 2009.

APÊNDICE A - MODELO DE PORO TRIANGULAR DE MM

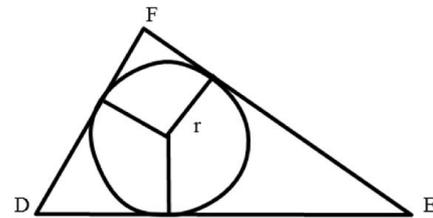
Considerando-se um poro triangular, tal como o representado na Figuras A1a abaixo, tem-se que:

Figura A1: Poro triangular com formação de um menisco de raio r_d .

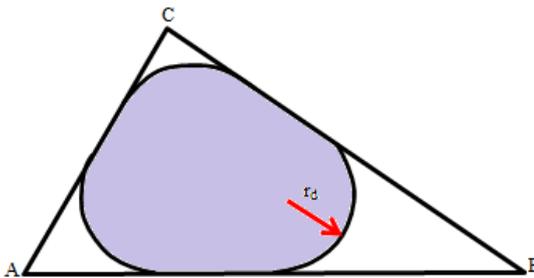
a) Secção transversal de um poro triangular



b) Construção geométrica provinda dos arcos dos meniscos do triângulo ABC



c) Região do raio de drenagem



Fonte: Adaptado de MASON e MORROW, 1991.

No modelo de MM, considera-se a situação em que há a drenagem de uma grande porção da água do interior de um poro triangular. Esta situação ocorre no momento em que a tensão aplicada à água do poro é dada por:

$$\tau = \frac{149}{r_d} \quad (A1)$$

Nessa situação, porções de água ficam retidas em forma de meniscos nos vértices do poro, como indicado na Figura A1c. As extremidades desses meniscos, no caso de um fluido com características de boa molhabilidade, tangenciam as paredes do poro, o que faz com que os ângulos entre r e as paredes do tubo, com muito boa aproximação, possam ser considerados

retos. Ao se juntarem, esses meniscos formam um triângulo DEF, semelhante ao ABC, como mostrado na figura A1b.

Devido à semelhança pode-se escrever:

$$L_{ABC} = \frac{L_{DEF}}{K} \quad (A2)$$

na qual: $k < 1$; L_{ABC} se refere a qualquer dos três lados do triângulo ABC e L_{DEF} qualquer dos lados do triângulo DEF, semelhante ao seu equivalente do triângulo ABC. Isto significa dizer que: $\overline{DE} = k\overline{AB}$, assim como, $\overline{FD} = k\overline{CA}$ e $\overline{EF} = k\overline{BC}$

O perímetro P do triângulo ABC é dado por:

$$P = \sum L_{ABC} = \overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CA} = \frac{1}{k}(\overline{DE} + \overline{EF} + \overline{FD}) = \frac{1}{k}P' \Leftrightarrow$$

$$P' = kP \quad (A3)$$

A relação entre as alturas “hs” dos dois triângulos, também devido à semelhança, é escrita como segue:

$$h_{ABC} = \frac{h_{DEF}}{K} \quad (A4)$$

Pela definição da área de um triângulo tem-se que:

$$A = \frac{L_{ABC}h_{ABC}}{2} \quad (A5)$$

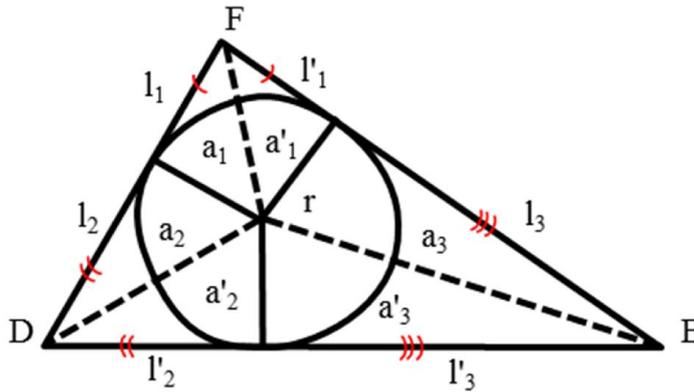
Substituindo as relações de semelhança fica-se com:

$$A = \frac{\frac{L_{DEF}}{k} \frac{h_{DEF}}{k}}{2} = \frac{L_{DEF}h_{DEF}}{2k^2} = \frac{A'}{k^2} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow A' = k^2 A \quad (A6)$$

Ao se analisar o triângulo EDF, nota-se que o mesmo é formado por 6 triângulos, mostrados na Figura A2.

Figura A2: Composição geométrica do triângulo DEF.



Fonte: Adaptado de (MASON e MORROW, 1991).

Na figura A2, os 6 triângulos possuem áreas a_1 , a_2 , a_3 , a'_1 , a'_2 e a'_3 . Desta forma, A' é escrita como:

$$A' = a_1 + a'_1 + a_2 + a'_2 + a_3 + a'_3 \quad (A7)$$

Com base na Figura A2, A7 pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} A' &= \frac{l_1 r}{2} + \frac{l'_1 r}{2} + \frac{l_2 r}{2} + \frac{l'_2 r}{2} + \frac{l_3 r}{2} + \frac{l'_3 r}{2} = \\ &= \frac{r}{2} (l_1 + l'_1 + l_2 + l'_2 + l_3 + l'_3) = \frac{P' r}{2} \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow A' = \frac{P' r}{2} \quad (A8)$$

Assim usando as reações A3, A6 e A8, tem-se que:

$$r = \frac{KA}{2P} \quad (A9)$$

O raio r_d onde ocorre a maior parte da drenagem é dado pela razão entre a área e o perímetro da parte hachurada da figura A1c.

$$r_d = \frac{A_h}{P_h} \quad (A10)$$

Das Figuras A1a, b e c, essas área e perímetro são dadas pelas seguintes relações:

$$A_h = A - (A' - \pi r_d^2) \text{ e } P_h = P - (P' - 2\pi r_d) \quad (A11)$$

Logo a expressão A10 é reescrita da seguinte maneira:

$$r_d = \frac{A - A' + \pi r_d^2}{P - P' + 2\pi r_d} \quad (A12)$$

Substituindo as relações de P' e A' dadas pelas relações A3 e A6.

$$r_d = \frac{A - AK^2 + \pi r_d^2}{P - KP + 2\pi r_d} \quad (A13)$$

Eliminando a dependência em K através da equação A9.

$$r_d = \frac{A - A \left(\frac{r_d P}{2A} \right)^2 + \pi r_d^2}{P - \frac{r_d P^2}{2A} + 2\pi r_d} \rightarrow r_d = \frac{A - \frac{r_d^2 P^2}{4A} + \pi r_d^2}{P - \frac{r_d P^2}{2A} + 2\pi r_d} \quad (A14)$$

Multiplicando a expressão A14 pelo seu denominador em ambos os lados.

$$r_d \left(P - \frac{r_d P^2}{2A} + 2\pi r_d \right) = A - \frac{r_d^2 P^2}{4A} + \pi r_d^2$$

$$\begin{aligned}
r_d P - \frac{r_d^2 P^2}{2A} + 2\pi r_d^2 &= A - \frac{r_d^2 P^2}{4A} + \pi r_d^2 \\
r_d P - \frac{r_d^2 P^2}{4A} + \pi r_d^2 &= A \\
r_d^2 \left(\pi - \frac{P^2}{4A} \right) + r_d P - A &= 0
\end{aligned} \tag{A15}$$

A expressão acima possui duas soluções, apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned}
r_d &= \frac{-P \pm \sqrt{P^2 - 4 \left(\pi - \frac{P^2}{4A} \right) (-A)}}{2 \left(\pi - \frac{P^2}{4A} \right)} \\
r_d &= \frac{-P \pm \sqrt{P^2 + 4\pi A - P^2}}{2\pi - \frac{P^2}{4A}} \\
r_d &= \frac{-P \mp \sqrt{4\pi A}}{-\left(\frac{P^2}{4A} - 2\pi \right)} \\
r_d &= \frac{P \pm \sqrt{4\pi A}}{\frac{P^2}{4A} - 2\pi}
\end{aligned} \tag{A16}$$

A solução que envolve o sinal positivo produz um menisco de raio de curvatura maior, o qual seria esvaziado por tensões menores. Portanto o menisco com menor raio de curvatura é o que resiste a maiores tensões e, portanto, é o que está sendo procurado. Ou seja:

$$r_d = \frac{P - \sqrt{4\pi A}}{\frac{P^2}{4A} - 2\pi} \tag{A17}$$

APÊNDICE B – PROGRAMA TULLER.M PARA OBTENÇÃO DOS FATORES DE FORMA “G”

```

clear all;
clc;
numFatias=200;
cmin=120;
S1='C:\*****'; % file name including storage path
S3='.bmp'; % file suffix
for i=1:numFatias;
    S2=int2str(cmin);
    S=[S1,S2,S3];
    I=imread(S); % read image into Matlab
    %Diminui os indices da matriz C entre 1 e (numFatias)
    C(:, :, i)=double(I); % turn image into matrix
    cmin=cmin+1;
end
[L,num]=bwlabeln(C,6);
stats = regionprops(L,'Area', 'PixelIdxList');
a=[stats.Area];
b=max(a);
[row,col]=max(find(a==b));
c=max([row,col]); %encontra o maior volume 6 conectado
%montagem de uma matriz com os pixels em PixelIdxList anterior
L3=false(size(L)); %cria uma matriz 3d (dimensão de L) com zeros
L3(stats(c).PixelIdxList)=1; % coloca 1 nas posições de PixelIdxList do
%poro maior: c
A=0;Pr=0;
for ii=1/--numFatias;
    E=L3(:, :, ii);
    [F,numObjects] = bwlabel(E,8); %encontra os pixels do maior volume, fatia a fatia,
conectados a 8
    stats_a = regionprops(F,'Area','Perimeter');

```



```
idx_a = find([stats_a.Area]>50);
BW = ismember(F,idx_a);
A = regionprops(BW, 'Area');
Pr=regionprops(BW, 'Perimeter');
areas=cat(1,A.Area);
perimeters=cat(1,Pr.Perimeter);

dlmwrite ('Areas50.txt', areas, 'delimiter','\t', '-append');
dlmwrite ('Perimetros50.txt', perimeters, 'delimiter','\t', '-append');

end
```