

LUCAS MARTINS GUIMARÃES

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS
EM SOLOS NÃO SATURADOS UTILIZANDO
UMA CENTRIFUGA DE PEQUENAS DIMENSÕES**

Tese apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção
do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2013**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

G963d
2013

Guimarães, Lucas Martins, 1981-

Determinação das propriedades hidráulicas em solos não saturados utilizando uma centrífuga de pequenas dimensões / Lucas Martins Guimarães. – Viçosa, MG, 2013.
xvi, 116 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 108-116.

1. Condutividade hidráulica não saturada. 2. Solos - Permeabilidade - Equipamento e acessórios. 3. Mecânica do solo. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

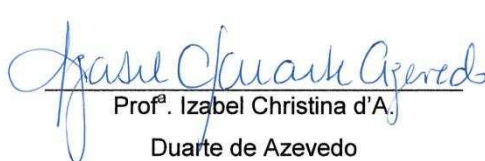
CDD 22. ed. 624.1536

LUCAS MARTINS GUIMARÃES


DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS
EM SOLOS NÃO SATURADOS UTILIZANDO
UMA CENTRIFUGA DE PEQUENAS DIMENSÕES

Tese apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do
título de *Doctor Scientiae*.

Aprovada: 27 de maio de 2013.



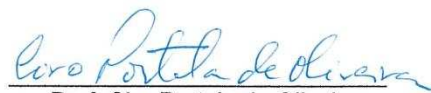
Prof.^a Izabel Christina d'A.
Duarte de Azevedo
(Coorientadora)



Prof.^a Rejane Nascentes
(Coorientadora)



Prof. André Geraldo Cornélio Ribeiro



Prof. Ciro Portela de Oliveira



Prof. Roberto Francisco de Azevedo
Orientador

Aos meus pais, minha esposa e ao meu filho

“Os nossos pais amam-nos porque somos seus filhos, é um fato inalterável. Nos momentos de sucesso, isso pode parecer irrelevante, mas nas ocasiões de fracasso, oferecem um consolo e uma segurança que não se encontram em qualquer outro lugar.”!

Bertrand Russell

Agradecimentos

A CAPES pela bolsa e financiamento da pesquisa.

A Universidade Federal de Viçosa, esta honrada instituição, pela oportunidade de realizar o doutorado.

Ao professor Roberto Azevedo, pela orientação e amizade. Foi muito importante insistir e não desistir de mim nos momentos que mais precisei. É imensa a minha gratidão.

As professoras Rejane Nascentes e Izabel Azevedo, pelo apoio em todos os passos de minha vida acadêmica.

Aos amigos de laboratório, Eduardo (Dudu) e Keila, pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao técnico de laboratório, Paulo Capelão, pela amizade e da ajuda com os experimentos.

Ao técnico Chiquito, pela fabricação das peças utilizadas neste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil.

A minha esposa pelo carinho e compreensão.

Ao meu filho Mateus, por encher minha vida de alegria

A minha família, em especial minha mãe, pelo exemplo de luta e determinação.

E a todos que não foram citados, meu muito obrigado.

BIOGRAFIA

LUCAS MARTINS GUIMARÃES, filho de Jurandir Ferreira Guimarães e Antônia Benicia Guimarães é natural de Araújo, Minas Gerais.

Em abril de 2001, ingressou no Curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, obtendo o título de Bacharel em Engenharia Civil e maio de 2006.

Em maio de 2006, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, área de concentração em Geotecnia, ao nível de mestrado, obtendo o título de *Magister Scientiae* em fevereiro de 2008.

Em março de 2008, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, área de concentração em Geotecnia, ao nível de doutorado. Submeteu a tese à defesa em maio de 2013.

CONTEÚDO

Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xiii
Resumo	xv
Abstract	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Organização da tese	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Características hidráulicas dos solos não saturados: Considerações gerais	5
2.2. Umidade em solos não saturados	5
2.3. Sucção em solos não saturados	7
2.4. Curva de retenção de água do solo (CRA)	10
2.4.1. Características gerais da curva de retenção de água	12
2.4.2. Fenômeno da histerese	15
2.4.3. Relações empíricas para definir a curva de retenção de água no solo	16
2.5. Função de condutividade hidráulica	17
2.5.1. Métodos indiretos de obtenção da função de condutividade hidráulica	19
2.6. Fluxo em meios não saturados	20
2.6.2. Fluxo em meio centrifugado	21
2.7. Determinação em laboratório das propriedades hidráulicas do solo	24
2.7.1. Obtenção da curva de retenção de água no solo	24
2.7.1.1. Técnica do papel filtro	26
2.7.1.2. Placa de Pressão	27
2.8.1.3. Placa de sucção	29
2.7.1.4. Centrifuga	30
2.8. Determinações experimentais da função de condutividade	34
2.8.1. Determinação Experimental Usando Permeômetros	36

2.8.1.1	Permeômetros de Parede Flexível com Uso de Vazão Constante	38
2.8.2.	Determinação experimental usando centrífugas	39
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1.	Considerações Gerais	44
3.2.	Os solos	44
3.3.	Determinações da CRA pelos métodos tradicionais	45
3.3.1.	Técnica do papel filtro	46
3.3.2.	Placa de pressão	48
3.4.	Determinação da condutividade hidráulica não saturada usando o permeômetro de parede flexível de vazão constante	49
3.4.1.	Preparação das Amostras	52
3.4.2.	Montagem do Ensaio	53
3.4.3.	Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada	54
3.4.4.	Aplicação de Sucção na Amostra	55
3.4.5.	Determinação da Condutividade Hidráulica Não Saturada	56
3.5.	Equipamento desenvolvido para obtenção da CRA e medida direta da função de condutividade em centrífuga	56
3.6.	Metodologias para o equipamento desenvolvido	60
3.6.1.	Preparação das amostras	60
3.6.2.	Obtenção da curva característica usando centrífuga	61
3.6.3.	Tempo de centrifugação	62
3.6.4.	Validação do método para obtenção da CRA	63
3.6.5.	Obtenção da função de condutividade usando centrífuga	64
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	64
4.1.	Considerações gerais	65
4.2.	Solos – Caracterização geotécnica	65
4.3.	Determinação da condutividade hidráulica não saturada utilizando o permeômetro com sucção controlada	70

4.4.	Determinação da curva de retenção de água	71
4.4.1.	Determinação da curva de retenção de água no solo pelos métodos tradicionais	71
4.4.1.1.	Solo Vila Secundino	72
4.4.1.2.	Solo campo experimental	75
4.4.2.	Determinação da curva de retenção de água no solo pelo método centrífugo	80
4.4.2.1.	Solo Vila Secundino	81
4.4.2.2.	Solo campo experimental	88
4.4.3.	Avaliação do tempo de centrifugação	89
4.5.	Determinação da função de condutividade hidráulica pelo método centrífugo	98
4.5.1.	Solo Vila Secundino	98
4.5.2.	Solo Campo experimental	100
5.	CONCLUSÕES	104
5.1.	Conclusões sobre o equipamento	104
5.2.	Conclusões sobre a CRA	104
5.3.	Conclusões sobre as FCHs	105
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

Lista de Figuras

Figura 2.1	Diagrama de fases dos solos não saturados	5
Figura 2.2	Representação dos conceitos de sucção matricial, osmótica e total (MARINHO,1997)	8
Figura 2.3	Modelo capilar para a análise da sucção matricial (Soto, 2004)	9
Figura 2.4	Curva de retenção típica e principais componentes (Fredlund & Xing, 1994)	11
Figura 2.5	Curva retenção típica de diferentes tipos de solos (FREDLUND E XING, 1994 adaptado por VILLAR, 2002)	13
Figura 2.6	Curva de retenção para amostras com diferentes teores de umidade moldados com energia Proctor normal (VANAPALLI <i>et al.</i> , 1999 adaptado)	14
Figura 2.7	Efeito da energia de compactação na curva de retenção de água (MILLER <i>et al.</i> , 2002)	15
Figura 2.8	Função de condutividade para diferentes materiais (McCARTNEY, 2007 adaptado)	18
Figura 2.9	Representação esquemática de uma amostra de solo na centrífuga	22
Figura 2.10	Esquema de obtenção de medição da sucção matricial (ASTM D 5298)	26
Figura 2.11	Representação da translação de eixos em termos de pressão (MARINHO, 2005)	28
Figura 2.12	Modelo esquemático de placa de sucção (MARINHO, 2005).	29
Figura 2.13	a) Montagem do ensaio (KHANZODE <i>et al.</i> 2002); b) Esquema da peça adaptada para ensaio (Reis <i>et. al.</i> 2011)	30
Figura 2.14	Relação de r_1 e r_2 adotado por Khanzode <i>et al.</i> (2002) e Reis <i>et. al</i> (2011)	32
Figura 2.15	Comparações entre os métodos da placa de pressão e centrífuga, Khanzode <i>et al.</i> (2002)	32

Figura 2.16	a) Equipamentos com IFC “ <i>internalflowcontrol</i> ”- Nimmo et.al (1987); b) Equipamento modificado por Nimmo and Mello (1992)	39
Figura 2.17	Modelo de centrífuga UFA “ <i>unsaturatedflowapparatus</i> ”(McCARTNEY e ZORNBERG, 2005)	40
Figura 2.18	Detalhes do permeâmetro em centrífuga (McCARTNEY e ZORNBERG, 2005)	41
Figura 2.19	Detalhe do equipamento QSC	43
Figura 3.1	Local de coleta da amostra de solo SC (Vila Secundino - UFV)	44
Figura 3.2	Local de coleta da amostra de solo SC (Laboratório de resíduos - UFV)	45
Figura 3.3	Detalhes da preparação dos corpos de prova em papel filtro	49
Figura 3.4	Placas de pressão usadas para determinação da curva característica (LEC/UFV)	49
Figura 3.5	Vista geral do equipamento (Guimarães, 2008)	50
Figura 3.6	Desenho esquemático dos equipamentos utilizados para determinação das condutividades hidráulicas (GUIMARÃES, 2008)	50
Figura 3.7	Bomba de fluxo e arranjo do conjunto na prensa triaxial (GUIMARÃES, 2008)	51
Figura 3.8	Moldagem das amostras para ensaio no permeâmetro de parede flexível	52
Figura 3.9	Célula de ensaio montada e esquema da base com a peça intercambiável (GUIMARÃES, 2008)	53
Figura 3.10	Centrífuga médica Cientec CT-6000	57
Figura 3.11	Detalhe das peças utilizadas no projeto (peça de 26,5mm)	57
Figura 3.11	Detalhe das peças utilizadas no projeto (peça de	58

	50,6mm)	
Figura 3.13	Detalhes das peças que compõe o conjunto	58
Figura 3.14	Peças de adaptação em centrífuga	59
Figura 3.15	Equipamento para moldagem de corpos de prova	61
Figura 3.16	Obtenção do tempo de centrifugação mínimo para obtenção do equilíbrio de umidade do solo (REIS <i>et al</i> , 2011)	63
Figura 3.17	Comportamento durante a centrifugação	64
Figura 4.1	Curva granulométrica do solo Campo Experimental (CH)	66
Figura 4.2	Curva granulométrica do solo Vila Secundino (SC, areia argilosa)	67
Figura 4.3	Curvas compactação e condutividade hidráulica saturada do solo SC	69
Figura 4.4	Curvas compactação e condutividade hidráulica saturada do solo CH	70
Figura 4.5	Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra SC97d.	73
Figura 4.6	Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra SC100	74
Figura 4.7	Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra SC97m	75
Figura 4.8	Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra CH90d	76
Figura 4.9	Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra CH95d	77
Figura 4.10	Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra CH95m	78
Figura 4.11	Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra CH90m	79
Figura 4.12	Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para amostra SC97d	81
Figura 4.13	Comparação das curvas de retenção no solo para o	82

solo SC97d

Figura 4.14	Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra SC100	83
Figura 4.15	Comparação das curvas de retenção no solo para a amostra SC100	84
Figura 4.16	Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra SC97m	85
Figura 4.17	Comparação das curvas de retenção no solo para a amostra SC97m	86
Figura 4.18	Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para o solo CH90d	89
Figura 4.19	Comparações das CRAs para a amostra CH90d	90
Figura 4.20	Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra CH95d	91
Figura 4.21	Comparações das CRA para a amostra CH95d	91
Figura 4.22	Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra CH95m	92
Figura 4.23	Comparações das CRA para a amostra CH95m	93
Figura 4.24	Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra CH90m	94
Figura 4.25	Comparações das CRA para o solo CH90m	95
Figura 4.26	Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra SC97d	100
Figura 4.27	Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra SC100	100
Figura 4.28	Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra SC97m	101
Figura 4.29	Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a	102

amostra CH90d

Figura 4.30	Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra CH95d	102
Figura 4.31	Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra CH95m	103
Figura 4.32	Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra CH90m	103

Lista de tabelas

Tabela 2.1	Métodos de medida de sucção (VILLAR, 2002)	25
Tabela 2.2	Métodos para determinação da função de condutividade hidráulica (MARINHO, 2005)	35
Tabela 2.3	Vantagens e desvantagens dos dois tipos de permeômetros (DANIEL, 1994)	36
Tabela 3.1	Normas brasileiras para ensaios de caracterização e compactação de solos	44
Tabela 3.2	Sucções impostas para os níveis de rotação	59
Tabela 3.3	Sucção mínima imposta para o nível de rotação	60
Tabela 4.1	Caracterização geotécnica dos solos	67
Tabela 4.2	Índices obtidos após a compactação das amostras	68
Tabela 4.3	Resultados da condutividade hidráulica saturada dos solos	71
Tabela 4.4	Resultados da condutividade hidráulica saturada dos solos do solo SC	72
Tabela 4.5	Parâmetros de ajuste da amostra SC97d	73
Tabela 4.6	Parâmetros de ajuste da amostra SC100	74
Tabela 4.7	Parâmetros de ajuste da amostra SC97m	75
Tabela 4.8	Parâmetros de ajuste da amostra CH90d	77
Tabela 4.9	Parâmetros de ajuste da amostra CH95d	78
Tabela 4.10	Parâmetros de ajuste da amostra CH95m	78
Tabela 4.11	Parâmetros de ajuste da amostra CH95m	80
Tabela 4.12	Parâmetros de ajuste do solo SC97d	82
Tabela 4.13	Parâmetros de ajuste do solo SC100	83
Tabela 4.14	Parâmetros de ajuste da amostra SC97m	85
Tabela 4.15	Resumo do ensaio de centrífuga para as amostras do solo SC	87
Tabela 4.16	Parâmetros de ajuste do solo CH90d	89
Tabela 4.17	Parâmetros de ajuste a amostra CH95d	90
Tabela 4.18	Parâmetros de ajuste da amostra CH95m	92
Tabela 4.19	Parâmetros de ajuste da amostra CH90m	94

Tabela 4.20	Resumo do ensaio de centrifuga para as amostras do solo CH	96
Tabela 4.21	Resumo do ensaio de centrifuga para as amostras do solo SC	97
Tabela 4.22	Resumo do ensaio de centrifuga para as amostras do solo CH	98

RESUMO

GUIMARÃES, Lucas Martins, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Maio de 2013. **Determinação das propriedades hidráulicas em solos não saturados utilizando uma centrífuga de pequenas dimensões.** Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Coorientadores: Izabel Christina d'Almeida Duarte de Azevedo e Rejane Nascentes.

Em problemas geotécnicos de fluxo, as principais variáveis que caracterizam o comportamento hidráulico em um meio não saturado, são a curva de retenção de água (CRA) e a função de condutividade hidráulica (FCH) do solo. A determinação experimental destas propriedades é, geralmente, demorada e onerosa, levando os profissionais a utilizar simplificações que, eventualmente, podem prejudicar os projetos, aumentando os custos e comprometendo a segurança. No sentido de contribuir para diminuir esta dificuldade, desenvolveu-se nesta tese, um procedimento e aparatos que, adaptados em uma centrífuga de pequeno porte comumente usada em aplicações médicas, permitem obter as propriedades hidráulicas (CRA e FCH) de solos em um tempo bem menor. A técnica consiste em expor amostras de solos inicialmente saturadas a um movimento circular, gerando uma aceleração centrípeta e uma força de massa suficiente para vencer as forças capilares e forçar a drenagem do fluido. O equipamento é capaz de obter simultaneamente quatro CRAs e quatro FCH. Para verificar o funcionamento do novo equipamento, foram utilizados dois solos com características distintas, uma areia argilosa (SC) e uma argila de alta plasticidade (CH). As CRAs obtidas por meio da centrífuga foram comparadas com as CRAs obtidas pelos métodos tradicionais do papel filtro e da placa de pressão. As comparações foram adequadas até sucções da ordem de 500 kPa, atual limite do equipamento desenvolvido. Para solos que necessitem de sucções mais altas, foi apresentada uma proposta de acrescentar aos dados obtidos com a centrífuga, um ponto obtido por meio do papel filtro com umidade próxima da residual. A metodologia para obtenção da FCH é a do regime transiente por passos múltiplos, na qual se aplica um acréscimo no valor da sucção matricial e mede-se o volume de água que sai do corpo de prova. As FCHs obtidas pelo método centrífugo foram comparadas com o modelo teórico de van Genuchten-Mualem e com pontos medidos diretamente com um permeâmetro de parede flexível e aplicação de vazão constante desenvolvido por Guimarães et. al. (2008). As comparações ficaram boas, principalmente, para o solo com textura mais grossa (SC). Os tempos máximos para obtenção das CRAs e FCHs foram de dois dias para o solo SC e de três dias para o solo CH. A metodologia desenvolvida se mostrou

eficiente, reduzindo substancialmente o tempo necessário para se obter as propriedades hidráulicas de solos.

ABSTRACT

GUIMARÃES, Lucas Martins, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, may, 2013. **Determination of hydraulic properties of unsaturated soils using a small dimensions centrifuge.** Adviser: Roberto Francisco de Azevedo. Co-Advisers: Izabel Christina d'Almeida Duarte de Azevedo and Rejane Nascentes.

In geotechnical problems of flow, the main variables that characterize the hydraulic behavior in an unsaturated medium, is the water retention curve (WRC) and the hydraulic conductivity function (HCF) of the soil. Experimental determination of these properties is generally time-consuming and costly, leading professionals to use simplifications that may eventually prejudice the projects, increasing costs and compromising safety. In order to help reduce this difficulty, in this thesis, a procedure and equipment adapted into a small centrifuge commonly used in medical applications were developed, allowing to obtain hydraulic properties (WRC and HCF) of soils in a much shorter time. The technique involves exposing soil samples initially saturated to a circular motion, resulting in a centripetal acceleration and a mass force sufficient to overcome capillarity and force fluid drainage. The equipment is able to simultaneously obtain four WRCs and four HCFs. To verify the performance of the new equipment, two soils with different characteristics, one clayey sand (SC) and a high plasticity clay (CH), were tested. The WRCs obtained with the centrifuge were compared with ones obtained by traditional methods of filter paper and pressure plate. Comparisons were appropriate up to suctions of the order of 500 kPa, the current limit of the equipment developed. For soils that require higher suctions, a proposal was made to add to the data obtained with the centrifuge, a point given by the filter paper close to the residual moisture of the soil. The methodology for obtaining the HCF is of the transient type using multiple steps, in which one applies an increase in the matric suction value, and measure the volume of water that flows out of the specimen. The HCFs obtained by centrifugal method were compared with the one given by the theoretical model of van Genuchten-Mualem and points directly measured with a flexible wall permeameter and constant flow application developed by Guimarães et. al. (2008). Comparisons were good, especially for the thicker texture soil (SC). The maximum times to obtain the WRCs and HCFs were two days for soil SC and three days for soil CH. The methodology is efficient and reduces, significantly, the time required to obtain hydraulic properties of soils.

1 INTRODUÇÃO

A teoria clássica da Mecânica dos Solos ocupa-se do comportamento de solos arenosos, siltosos e argilosos em condições saturadas, ou eventualmente de areias secas. Restringe-se, portanto, ao estudo de materiais bifásicos (sólido-líquido ou sólido-gás). Ocorre que na natureza é bastante comum a incidência de solos que apresentam seus vazios preenchidos por água e ar, e que por essa razão apresentam comportamento diverso daquele previsto para solos saturados ou secos. Nestas condições, os solos que se encontram não-saturados formam um sistema trifásico (sólido-líquido-gás) cujo comportamento é governado pela interação entre estas fases.

O estudo dos solos não saturados tem aplicação em vários tipos de projetos de Engenharia, como: taludes naturais e de aterros, fundações (especialmente em solos expansivos e colapsíveis), barreiras argilosas para proteção ambiental (p.ex., depósitos de rejeitos industriais), etc. Dependendo do tipo de solo e do projeto de Engenharia que se analisa, o solo se comportará diferentemente à medida que perde ou ganha umidade.

É prática comum em projetos de Engenharia, supor que o solo não-saturado está saturado. Esta simplificação é razoável quando se está diante de problemas de resistência, visto que a resistência do solo não-saturado é maior do que a do mesmo saturado. Portanto, considerá-lo saturado é a favor da segurança. No entanto, em alguns problemas de fluxo, considerar a não-saturação, aumenta os gradientes, o que, dependendo do problema, pode ser a favor da segurança. Sendo assim, o engenheiro de solos necessita, cada vez mais, conhecer o comportamento do fluxo em meios não saturados para poder desenvolver seus projetos com procedimentos mais racionais e seguros.

Segundo McCartney, J.S. (2007), três variáveis podem ser usadas para caracterizar o comportamento hidráulico dos solos não saturados: O teor de umidade volumétrico, a sucção (diferença entre a pressão de ar e água nos poros do solo) e o coeficiente de permeabilidade. A relação do teor de umidade volumétrico com a sucção, chamada de curva de retenção de água (CRA), reflete a energia necessária para colocar ou remover a água do

solo e é dependente da sua granulometria, compactação, estado de tensões e estrutura. A relação entre o teor de umidade volumétrico, ou a sucção, e o coeficiente de permeabilidade é chamado de função de condutividade hidráulica (FCH). A condutividade hidráulica em um solo não saturado relaciona-se com o volume de água nos poros, uma vez que a presença de ar nos poros diminui a área para a água fluir e, conseqüentemente, reduz a condutividade hidráulica (Pacheco, 2005).

As medidas de sucção, tanto em laboratório como em campo, esbarram numa série de dificuldades experimentais, e comumente deve-se recorrer a diferentes técnicas de ensaio com intuito de se conhecer o potencial matricial dentro de uma faixa ampla, suficiente para utilização prática. Entre as técnicas utilizadas para se obter a CRA de um solo, destacam-se: a dos tensiômetros, a do papel filtro, a das placas de pressão e sucção, a osmótica e a por centrifugação. Exceto a técnica por centrifugação, com a qual a CRA é obtida em horas ou no máximo dias, estes ensaios são demorados, podendo-se levar meses para se obter uma curva completa.

O ensaio de permeabilidade saturada é uma prática comum em laboratórios de mecânica dos solos, simples e relativamente de baixo custo. Em contrapartida, para determinar a FCH, os ensaios demandam um tempo considerável e necessitam de equipamentos especiais que oneram os seus custos. Como resultado, muitas pesquisas têm sido direcionadas no sentido de desenvolver procedimentos semi-empíricos que determinam a FCH usando a CRA. (Gardner 1958, Brooks & Corey 1964, van Genuchten 1980, Fredlund *et. al.*, 1994).

A vantagem do método da centrifuga consiste na utilização da rotação do equipamento para aumentar a força gravitacional e estabelecer uma velocidade de Darcy maior nas amostras não saturadas. Por causa disso, tanto a CRA quanto a FCH são obtidas mais rapidamente que nos procedimentos tradicionais, em algumas horas para os solos com textura mais grossa, e muitas horas ou pouco mais de um dia, para solos finos (McCartney&Zornberg, 2005).

1.1 Objetivos

Esta tese teve como principal objetivo a determinação da CRA e da FCH utilizando uma pequena centrífuga, comumente usada em aplicações médicas.

Para alcançar este objetivo principal, as seguintes etapas foram executadas:

- Desenvolver, construir e colocar em funcionamento peças que foram acrescentadas a uma centrífuga médica para que se pudesse realizar o ensaio CRA e a FCH;
- Desenvolver uma metodologia de execução do ensaio para determinar a CRA e a FCH;
- Comparar as CRAs obtidas pelo método centrífugo com as obtidas por meio dos métodos tradicionais, câmaras de pressão e papel filtro, e pelo modelo semi-empírico de van Genuchten;
- Validar a determinação das FCHs por meio da centrífuga comparando os valores obtidos desta forma, com os resultados obtidos com a utilização de um permeâmetro para solos não-saturados desenvolvido por Guimarães *et. al.* (2008) e com as curvas obtidas pelo modelo teórico de van Genuchten-Mualen.
- Apresentar uma proposta para determinação da CRA completa de solos argilosos, utilizando os dados obtidos pelo método centrífugo mesclando-os com 1 (um) ponto determinado pelo método do papel filtro, obtido com o solo com teor de umidade próximo do residual.

1.2. Organização da tese

A tese foi dividida em seis capítulos, incluído este, de Introdução.

No capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica na qual são apresentadas as características e as formulações gerais relacionadas com as propriedades hidráulicas e de fluxo não saturado em solos, as principais

metodologias para obtenção da CRA e da FCH em laboratório, inclusive usando a técnica da centrifuga.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais com os quais se trabalhou e as metodologias utilizadas nos ensaios para determinação da CRA e da FCH. Os equipamentos desenvolvidos para realização dos ensaios em centrifuga também são detalhados neste capítulo.

No Capítulo 4, apresentam-se e discutem-se os resultados dos ensaios.

No Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões encontradas durante o desenvolvimento do trabalho.

E, por fim, no capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DOS SOLOS NÃO SATURADOS

2.1 Considerações gerais

As propriedades hidráulicas dos solos, curva de retenção de água e função de condutividade hidráulica, são apresentadas neste capítulo, bem como as formulações da teoria do fluxo em solos não saturados. Abordam-se, ainda, as principais metodologias dos ensaios em laboratório para obtenção das propriedades hidráulicas dos solos. Para determinação da curva de retenção de água dos solos, são apresentados os métodos do papel filtro, da placa de sucção, da placa de pressão e da centrífuga. Para a determinação da função de condutividade, são descritos os métodos do permeâmetro de parede flexível com controle de vazão e da centrífuga.

2.2 Umidade em solos não saturados

A quantidade de água que o solo possui em seus poros é de extrema importância na determinação de suas propriedades hidráulicas. Dentro da mecânica dos solos não saturados faz-se uso de várias grandezas para expressar a quantidade de ar e água no solo (Figura 2.1).

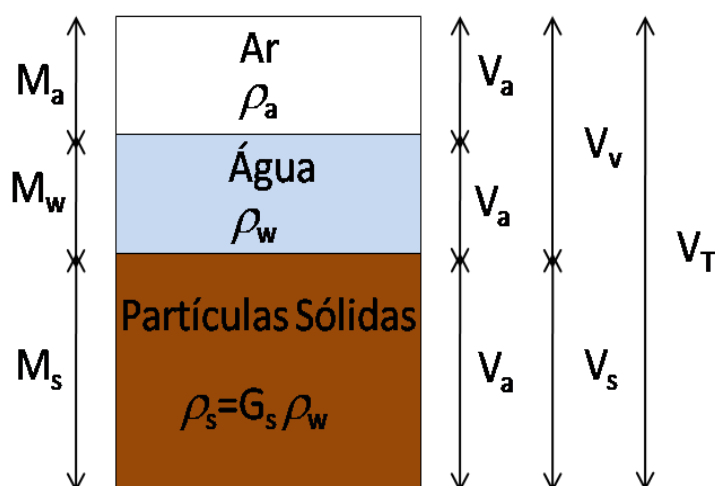


Figura 2.1: Diagrama de fases dos solos não saturados.

Em que ρ_a é a densidade do ar, ρ_w a densidade da água, ρ_s é a densidade dos sólidos e G_s é a densidade relativa dos sólidos.

Estas grandezas são definidas como:

- Teor de umidade:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \text{ Equação 2.1}$$

em que:

M_w é a massa de água

M_s é a massa de sólidos

- Teor de umidade volumétrico:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \text{ Equação 2.2}$$

em que: V_w é o volume de água

V_t é o volume total

- Grau de saturação:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \text{ Equação 2.3}$$

em que V_v é o volume de vazios.

O teor de umidade volumétrico também pode ser relacionado com outros índices físicos como (Equação 2.4):

$$S_r = \frac{\theta \cdot e}{1 + e} = \frac{\theta}{n} \text{ Equação 2.4}$$

e que, o índice de vazios (e) e a porosidade (n) são expressos pelas Equações 2.5 e 2.6, respectivamente.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \text{ Equação 2.5}$$

na qual V_s é o volume de sólidos, e

$$n = \frac{V_v}{V_t} \text{ Equação 2.6}$$

Para se obter o teor de umidade volumétrico através destas expressões seria necessário medir volumes, o que é muito difícil. No entanto, o teor de umidade volumétrico pode ser calculado indiretamente por meio da seguinte equação obtida a partir da Equação 2.4.

$$\theta = \frac{G \cdot w}{1 + e} = \frac{\rho_s \cdot w}{\rho_w \cdot (1 + e)} = \frac{\rho_d}{\rho_w} \times w \text{ Equação 2.7}$$

em que ρ_d é a densidade seca (relação entre a massa dos sólidos e o volume total).

O teor de umidade volumétrico é comumente usado para descrever as curvas de retenção de água quando os solos investigados são pouco deformáveis e o índice de vazios inicial pode ser considerado constante durante a variação da quantidade de água no solo.

No entanto, quando os solos são muito compressíveis à medida que a quantidade de água no solo varia, o índice de vazios varia significativamente e para se calcular o teor de umidade volumétrico faz-se necessário medir a variação do índice de vazios do solo durante o ensaio. Nestes casos, como a massa e o volume de sólidos não variam durante o fluxo, uma alternativa que evita a medição do índice de vazios é definir a curva de retenção de água em função do teor de umidade gravimétrico (McCARTNEY, 2007). Contudo, esta alternativa não é interessante uma vez que na equação de fluxo em meios não-saturados, usa-se a curva de retenção de água em função do teor de umidade volumétrico.

2.3 Sucção em solos não saturados

Marinho (2005) descreve a sucção como a energia com que um elemento poroso absorve água quando esta é livre para se mover. Esta

avidez por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo e da composição da água.

A sucção é uma pressão composta pelos potenciais matricial e osmótico, corresponde ao trabalho total das forças de capilaridade, absorção e osmose, e é expressa da seguinte forma:

$$\psi_t = \psi + \psi_{osm} \text{Equação 2.8}$$

em que:

ψ_t : sucção total [kPa];

ψ : sucção matricial [kPa];

ψ_{osm} : sucção osmótica [kPa]

A Figura 2.2, ilustra os conceitos da sucção matricial, osmótica e total. A sucção matricial (ψ_m) é igual á sucção total quando a água do solo é pura, restando apenas o efeito da matriz do solo (capilaridade e adsorção).

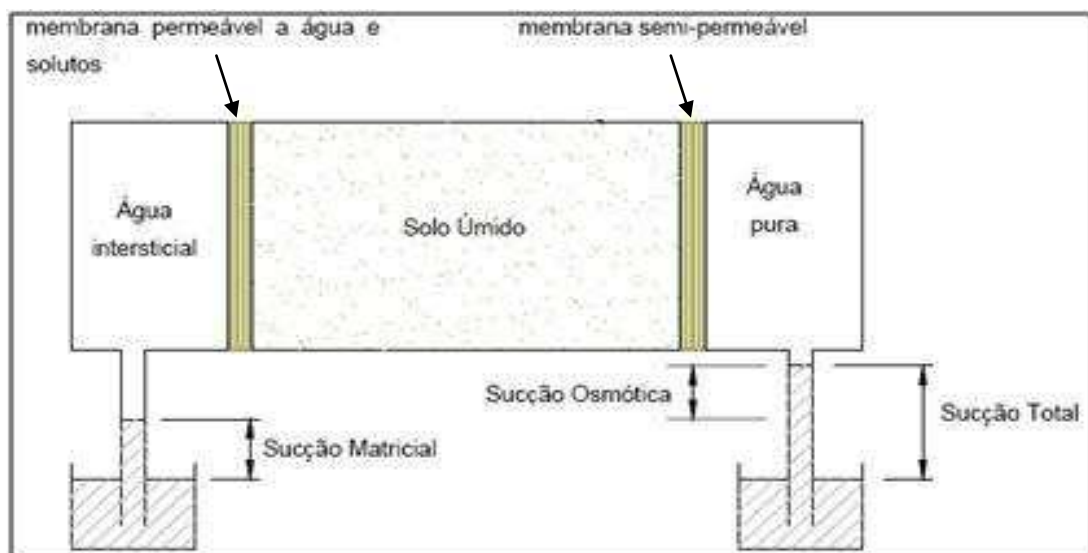


Figura 2.2. Representação dos conceitos de sucção matricial, osmótica e total (MARINHO, 2005).

Os efeitos matriciais são decorrentes das pressões geradas pelo menisco capilar e da adsorção da água por forças exercidas pelas superfícies das partículas. A interface ar-água gerada pelos efeitos capilares

no menisco que se forma entre as partículas de solo adjacentes pode ser representada através do chamado modelo capilar, mostrado na Figura 2.3 (BUCKINGHAN, 1907 apud SOTO,2004).

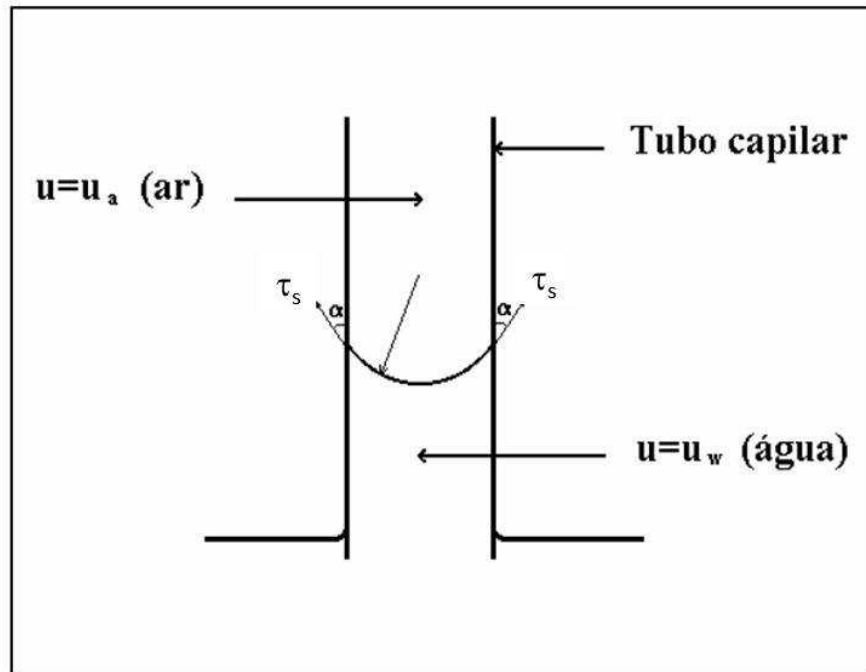


Figura 2.3: Modelo capilar para a análise da sucção matricial (SOTO, 2004).

Através do equilíbrio de forças na interface ar-água, observa-se que a força exercida pelo ar é igual às forças contrárias exercidas pela água e pode ser representado da seguinte forma:

$$u_a \cdot \pi \cdot R^2 - u_w \cdot \pi \cdot R^2 = \tau_s \cdot \cos \alpha \text{ Equação 2.9}$$

em que

$$\tau_s = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma_s \text{ Equação 2.10}$$

e:

u_a : pressão do ar [kPa];

u_w : pressão da água [kPa];

R : raio do menisco [m];

α : ângulo de contato entre a interface ar-água com o tubo capilar[°];

σ_s : tensão superficial da água [kN/m].

Para um menisco perfeitamente esférico ($\alpha = 0^\circ$) a Equação 2.11 fica reduzida a:

$$\psi_m = (u_a - u_w) = \frac{2\sigma_s}{R} \text{ Equação 2.11}$$

em que:

$(u_a - u_w)$ é igual a sucção matricial [kPa].

Vê-se, portanto, que a sucção matricial é proporcional à tensão superficial e ao raio do capilar. A tensão superficial (σ_s) é originada pela interação das forças intermoleculares produzidas nas zonas de contato entre as partículas do solo, água e ar, sendo responsável pela concavidade da interface ar-água e da ascensão da coluna de água no tubo capilar.

Quando a pressão do ar é igual à pressão atmosférica, pressão de referência, u_a é igual a zero e a sucção matricial é igual à pressão negativa, menor que a atmosférica, da água ($-u_w$).

2.4 Curva de retenção de água do solo (CRA)

O conhecimento da curva de retenção de água do solo é fundamental para analisar o comportamento dos solos não saturados (Figura 2.4). A CRA tem sido usada para a previsão e quantificação de diversos parâmetros de grande interesse na solução dos problemas geotécnicos, como a condutividade hidráulica, e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Isto é atrativo à prática dos projetos, já que ensaios que quantificam estas propriedades podem ser muitas vezes onerosos e demorados para serem obtidos em laboratório.

A CRA depende das propriedades do solo, como: granulometria, teor de matéria orgânica e composição mineralógica, e de condições como volume e distribuição dos vazios, micro e macro estrutura, micro fissuras, pH, composição da fase líquida e temperatura. Segundo Marinho (2005), muitas críticas podem ser feitas, pois a curva em questão não é somente

uma característica do solo ou do material poroso, mas também depende de fatores como história de tensões e das trajetórias de drenagem (ou secagem) e umedecimento seguidas durante a variação de umidade.

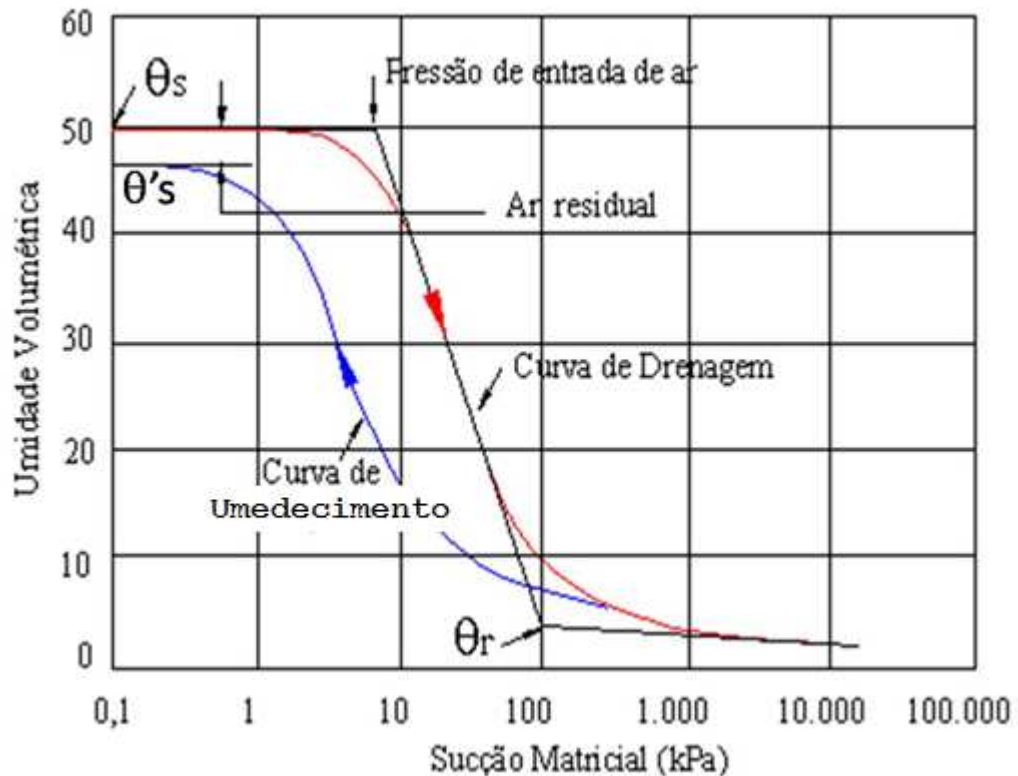


Figura 2.4: Curva de retenção típica e principais componentes (FREDLUND & XING, 1994).

Na Figura 2.4 observam-se, também, algumas características da curva:

- θ_s é o teor de umidade volumétrica de saturação obtida pelo processo de drenagem;
- θ'_s é o teor de umidade volumétrica de saturação obtida pelo processo de umedecimento;
- $(\theta_s - \theta'_s)$ é o conteúdo de ar residual entre os processos de drenagem e umedecimento;
- θ_r é o teor de umidade volumétrica residual;

- A pressão de entrada de ar (ψ_a) representa o diferencial de pressões entre a água e o ar necessário para causar a drenagem do maior poro do solo.

2.4.1 Características gerais da curva de retenção de água

As características que distinguem as curvas de retenção dependem de vários fatores como a estrutura do solo, teor de umidade inicial ou de moldagem, índice de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia, histórico de tensões e método de compactação. Estes fatores podem interferir na forma da curva de retenção de diferentes maneiras, dependendo do tipo de solo. Amostras de um solo em particular, mesmo com a mesma textura e mineralogia, podem exibir diferentes curvas de retenção se forem compactadas com diferentes umidades, índices de vazios e sua distribuição e possuírem diferentes históricos de tensões.

Granulometria - Na Figura 2.5 apresentam-se três curvas de retenção típicas. Pode-se notar que solos arenosos perdem água com muito mais facilidade que solos argilosos. Estes solos, por sua vez, necessitam de amplas variações de sucção para modificar sensivelmente o valor da umidade. Outro ponto importante, é que o decréscimo do tamanho dos grãos leva a um aumento no valor da pressão de entrada de ar e suaviza a inclinação da CRA.

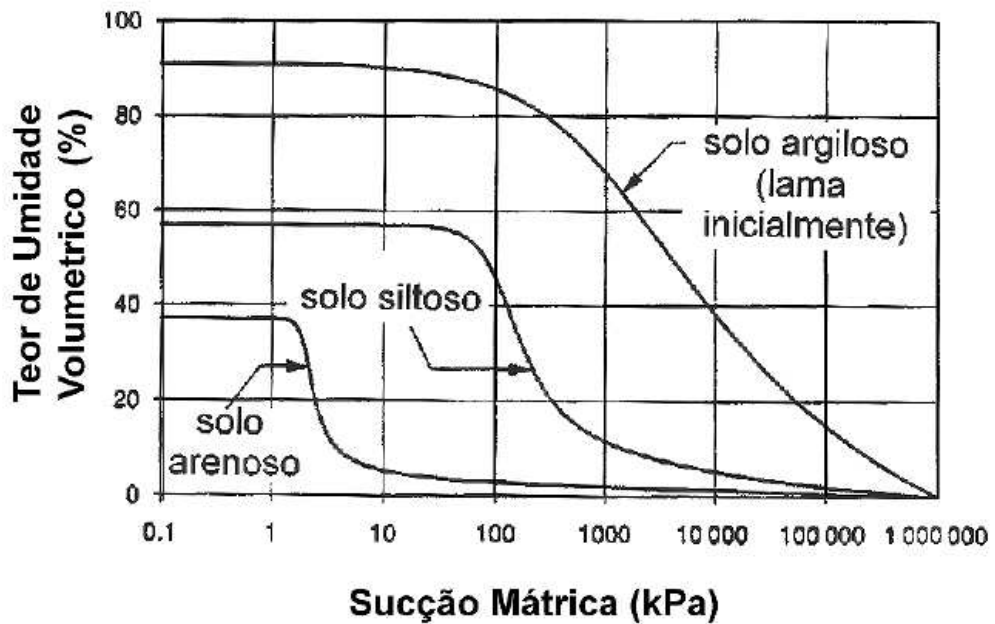


Figura 2.5: Curva característica típica de diferentes tipos de solos (FREDLUND E XING, 1994 adaptado por VILLAR, 2002).

A posição relativa da CRA obedece geralmente plasticidade do solo, ou seja, as curvas para solos com maior plasticidade estão acima das dos solos com menor plasticidade. A curva de retenção pode, então, ser um indicativo da quantidade de argila presente no solo. Um aumento desta fração geralmente leva a um aumento da quantidade de água retida para um mesmo valor de sucção (SILVA, 2005).

Teor de Umidade de Moldagem da Amostra –Vanapalliet al. (1999) apresentaram vários resultados de ensaios para obtenção da curva de retenção para amostras de um mesmo solo moldadas sob diferentes teores de umidade iniciais (Figura 2.6). O solo ensaiado tinha textura argilo-arenosa, e o teor de umidade de moldagem (que também corresponde à umidade inicial do ensaio) foi baseado na umidade ótima de 16,3%, e a variação foi de aproximadamente $\pm 3\%$.

Segundo os autores, os solos mais secos são controlados pela macroestrutura e os solos mais úmidos são controlados pela microestrutura, resistindo à drenagem, exigindo assim sucções mais altas para drenarem. A partir deste comportamento, a curva de retenção das amostras inicialmente

mais úmidas apresentará inclinações relativamente mais suaves em comparação com as amostras moldadas com umidades abaixo da umidade ótima. Ressalta-se que quando a saturação é menor que aproximadamente 50%, este comportamento não mais se verifica.

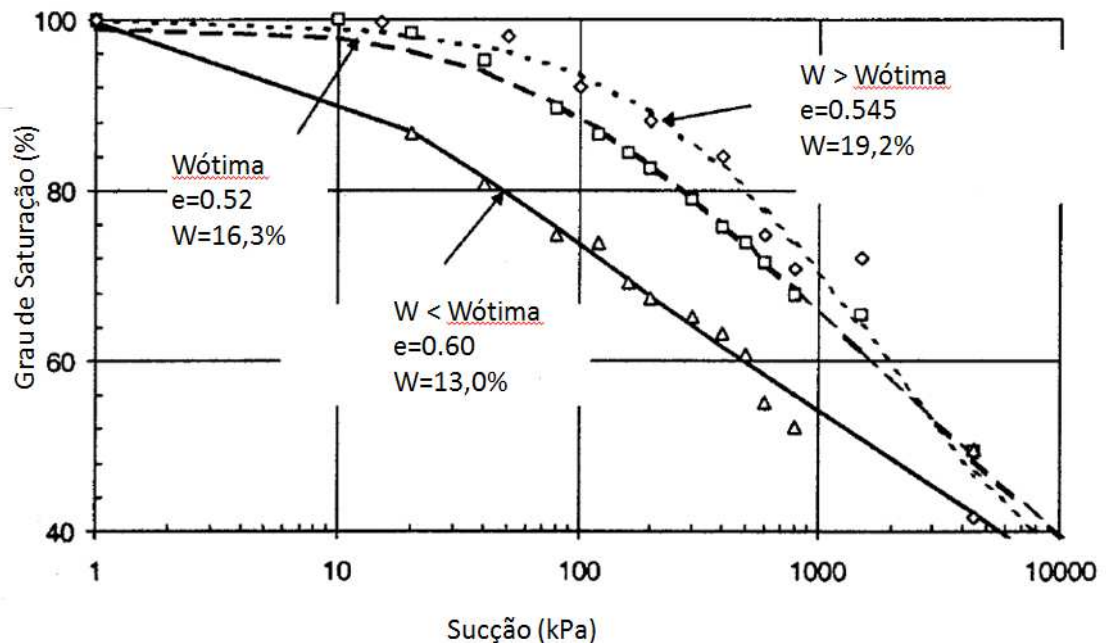


Figura 2.6: Curva de retenção para amostras com diferentes teores de umidade moldados com energia Proctor normal (VANAPALLI *et al.*, 1999 adaptado).

Energia de compactação - A sucção aumenta com a diminuição do tamanho dos poros. Logo, aumentando a energia de compactação, diminui-se o tamanho dos poros levando a curva de retenção às porções superiores do gráfico e ao aumento da pressão de entrada de ar (Figura 2.7). Miller *et al.* (2002) mostraram que este efeito é mais significativo em solos com alta plasticidade, isto porque o aumento do esforço de compactação leva a uma mudança percentual maior na densidade (e então na porosidade) em solos com maior quantidade de argila.

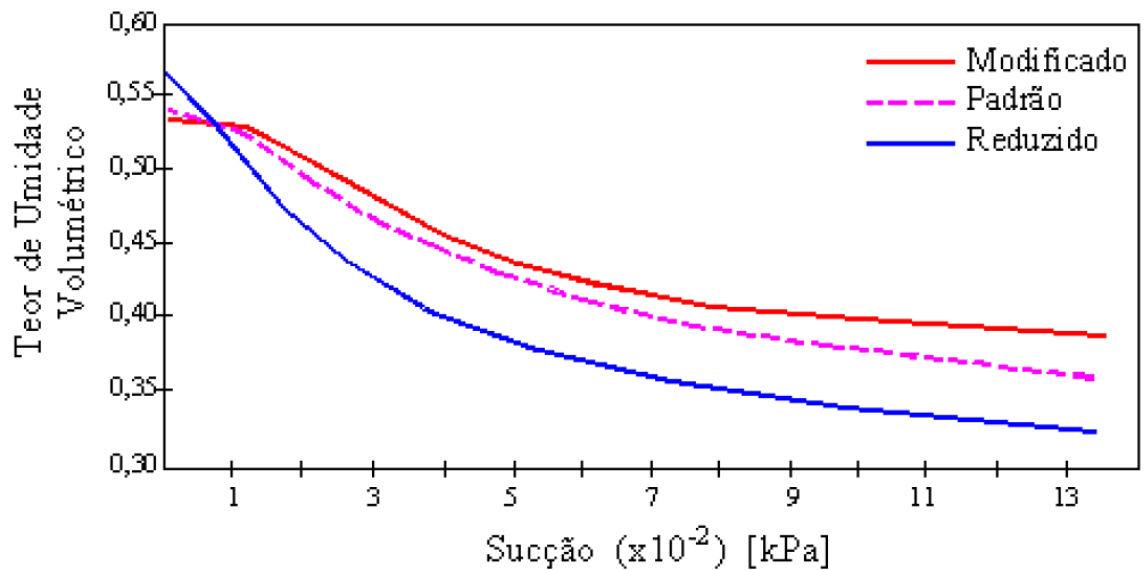


Figura 2.7: Efeito da energia de compactação na curva de retenção de água (MILLER *et al.*, 2002).

2.4.2 Fenômeno da histerese

Para obtenção da CRA, pode-se recorrer a dois métodos distintos: por secagem, em que a amostra de solo inicialmente saturada é drenada até atingir o teor de umidade residual, e por umedecimento, em que a amostra de solo inicialmente seca é umedecida gradualmente até a sua saturação (Figura 2.4). É possível, também, obter a CRA a partir de duas amostras com um mesmo teor de umidade intermediário, secando-se uma delas e umedecendo-se a outra.

O efeito da histerese pode ser atribuído a vários motivos que Hillel (1971) e Reichardt (1985), atribuem a:

Geometria não uniforme dos poros— os poros têm formas irregulares e são interconectados por pequenas passagens que provocam diferenças em relação aos fenômenos capilares que ocorrem no interior do solo;

Efeito do ângulo de contato— podem ser causadas por uma superfície rugosa, presença e distribuição de impurezas adsorvidas na

superfície dos sólidos do solo, e pelo mecanismo pelo qual as moléculas de líquido são absorvidas ou drenadas quando a interface é deslocada;

Ar ocluso– as bolhas de ar permanecem dentro dos macro-poros e causam decréscimos do teor de umidade;

Fenômenos de expansão e ressecamento - resultando em mudanças diferenciais na estrutura do solo, dependendo do histórico de secagem e umedecimento do solo.

Fredlund & Rahardjo (1993) mostram que a histerese na curva de retenção influencia as propriedades dos solos não saturados, tanto no estado de tensões quanto na permeabilidade. A histerese é considerada a maior causa da dependência da trajetória de tensões do solo. Já com relação à permeabilidade, a histerese é significativa quando se avalia a função de condutividade hidráulica em função da sucção matricial.

2.4.3 Relações empíricas para definir a curva de retenção de água no solo

A curva de retenção pode ser definida por meio de relações empíricas entre a sucção e o teor de umidade volumétrico. Diversas relações são comumente usadas para estimar essa curva. Algumas delas são:

- **Brooks e Corey (1964)**

$$\theta(\psi) = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_a}{\psi} \right)^\lambda + \theta_r \text{ Equação 2.12}$$

- **Gardner (1958):**

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{1 + (\alpha\psi)^n} \text{ Equação 2.13}$$

• **Van Genuchten (1980):**

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left(1 + |\alpha_v \psi|^n\right)^m} \text{ Equação 2.14}$$

• **Fredlund e Xing (1994):**

$$\theta(\psi) = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi_a}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right)} \right]^m \text{ Equação 2.15}$$

em que:

ψ : sucção matricial;

ψ_a : sucção matricial que corresponde à entrada de ar;

ψ_r : sucção que corresponde à umidade volumétrica residual;

θ : teor de umidade volumétrica (cm^3/cm^3);

θ_s : teor de umidade volumétrica de saturação (cm^3/cm^3);

θ_r : teor de umidade volumétrica residual (cm^3/cm^3);

α_v : parâmetro de ajuste da curva (cm^{-1});

λ : parâmetro de ajuste que depende do tamanho dos poros do solo;

a : valor aproximado da sucção de entrada de ar (cm);

n, m : parâmetros de ajuste;

10^6 : valor limite de sucção para os solos;

e : base do logaritmo neperiano, aproximadamente igual a 2,718281828.

2.5 Função de condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica é uma medida da capacidade que a água tem de se movimentar dentro do solo. Em solos não saturados, a capacidade da água em se movimentar diminui progressivamente com o decréscimo do grau de saturação. Isto acontece devido à substituição da

água que ocupa os poros por ar, diminuindo a área total disponível para o fluxo de água.

A variação da capacidade da água em se movimentar dentro do solo com a diminuição do teor de umidade (ou aumento da sucção) é chamada de função de condutividade hidráulica. Na Figura 2.8, observa-se algumas FCHs para diferentes materiais.

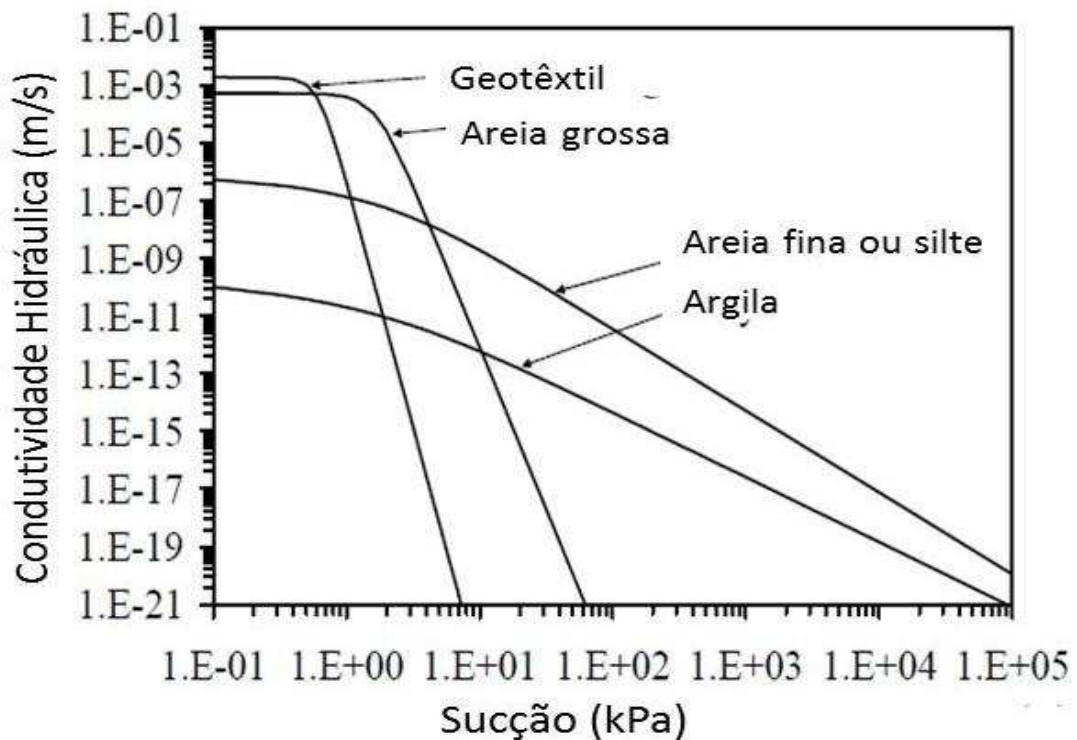


Figura 2.8: Função de condutividade para diferentes materiais (McCARTNEY, 2007 adaptado).

Como pode ser observado na Figura 2.8, os solos com textura mais grossa apresentam funções nas quais a taxa de decréscimo da condutividade hidráulica é bem maior do que a dos solos com textura mais fina. Isto ocorre, porque os poros maiores drenam mais facilmente que os menores, reduzindo a área efetiva de drenagem e diminuindo a condutividade hidráulica mais rapidamente.

Miller & Low (1963) relatam que a retração dos poros, a quantidade de ar ocluído e descontínuo, o aumento da tortuosidade e a alteração da viscosidade da água são também fatores determinantes na variação da condutividade hidráulica do solo não saturado.

2.5.1. Métodos indiretos de obtenção da função de condutividade hidráulica

A determinação da função de condutividade hidráulica dos solos não saturados é realizada através de técnicas diretas ou indiretas. As medidas diretas são geralmente feitas por meio de ensaios de permeabilidade desenvolvidos em laboratório e/ou ensaios de campo. Já as medidas indiretas utilizam o coeficiente de permeabilidade saturada e a CRA do solo (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

Em decorrência das dificuldades encontradas na determinação da função de condutividade por meios diretos, as medidas indiretas são mais comumente utilizadas.

- **Método de Gardner (1958)**

Gardner (1958) propôs a seguinte equação para determinação da função de condutividade hidráulica não saturada, $K(\psi)$, de um solo, em função da sucção mátrica ψ :

$$K(\psi) = K_s \cdot e^{-\alpha \cdot \psi} \text{ Equação 2.16}$$

em que:

K_s : condutividade hidráulica saturada;

α : parâmetro de ajuste CRA.

- **Método de van Genuchten-Mualem**

Estes autores propuseram a seguinte equação analítica para determinação da condutividade hidráulica não saturada de um solo em função da sucção mátrica:

$$K(\psi) = k_s \times \frac{\left[1 - (a\psi^{(n-1)}) \times (1 + (a\psi)^n)^{-m}\right]^2}{\left[(1 + a\psi)^n\right]^{\frac{m}{2}}} \quad \text{Equação 2.17}$$

em que:

k_s : condutividade hidráulica na condição saturada;

a, n e m : parâmetros de ajuste da CRA.

2.6 Fluxo em meios não saturados

O fluxo de água em meios porosos é descrito pela lei de Darcy (Equação 2.18). A lei de Darcy é limitada às condições de fluxo viscoso, fluidos newtonianos, ausência de mudanças físicas e químicas decorrentes do fluxo, bem como a meios isotrópicos e a não ocorrência de *SlipFlow* (duas camadas adjacentes de fluido que se movem com velocidades diferentes) (Delgado, 2000).

$$v = -k(\psi) \cdot i \quad \text{Equação 2.18}$$

Em que v é a velocidade aparente ou de Darcy, $k(\psi)$ é a função de condutividade hidráulica e i é o gradiente hidráulico.

$$i = \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{Equação 2.19}$$

Assumindo que a pressão de ar é nula, desprezando a sucção osmótica, as forças de percolação e a carga cinética, a carga total (h) é igual a:

$$h = h_e + h_p = z + \frac{u_w}{\rho_w \cdot g} = z - \frac{\psi}{\rho_w \cdot g} \quad \text{Equação 2.20}$$

em que h_e e h_p são, respectivamente, as cargas de elevação (ou altimétrica), e de pressão (ou piezométrica). Em função das equações 2.19 e 2.20, a Lei de Darcy, equação 2.18, pode ser expressa como:

$$v = -k(\psi) \cdot \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(z - \frac{\psi}{\rho_w \cdot g} \right) \right] = -k(\psi) \cdot \left[1 - \frac{1}{\rho_w \cdot g} \times \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \text{Equação 2.21}$$

O fluxo de água através de um volume de controle de um meio poroso não-saturado é governado pela seguinte equação de continuidade:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial v}{\partial z} \text{Equação 2.22}$$

o lado esquerdo da equação 2.22 representa a variação de água no volume de controle por unidade de tempo e o lado direito é igual a diferença entre a quantidade de água que entra e sai na unidade de tempo, por unidade de comprimento. Substituindo a Equação (2.21) na Equação (2.22) e usando a regra da cadeia para tornar ψ a variável primária, alcança-se a equação do fluxo unidimensional de água num meio poroso não saturado, normalmente conhecida como equação de Richards, dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\psi) \cdot \left(1 - \frac{1}{\rho_w \cdot g} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right) \text{Equação 2.23}$$

A Equação de Richards é não linear uma vez que as funções $k(\psi)$ e $\theta(\psi)$ geralmente são não lineares. Por causa disso, ela é normalmente resolvida numericamente, pelos métodos das diferenças finitas ou dos elementos finitos.

2.6.2 Fluxo em meio centrifugado

Uma amostra de solo quando submetida a um movimento de rotação fica submetida a uma aceleração centrípeta, semelhante à aceleração da gravidade, que gera um campo de tensões crescente com a distância ao eixo de rotação da centrífuga (Figura 2.9).

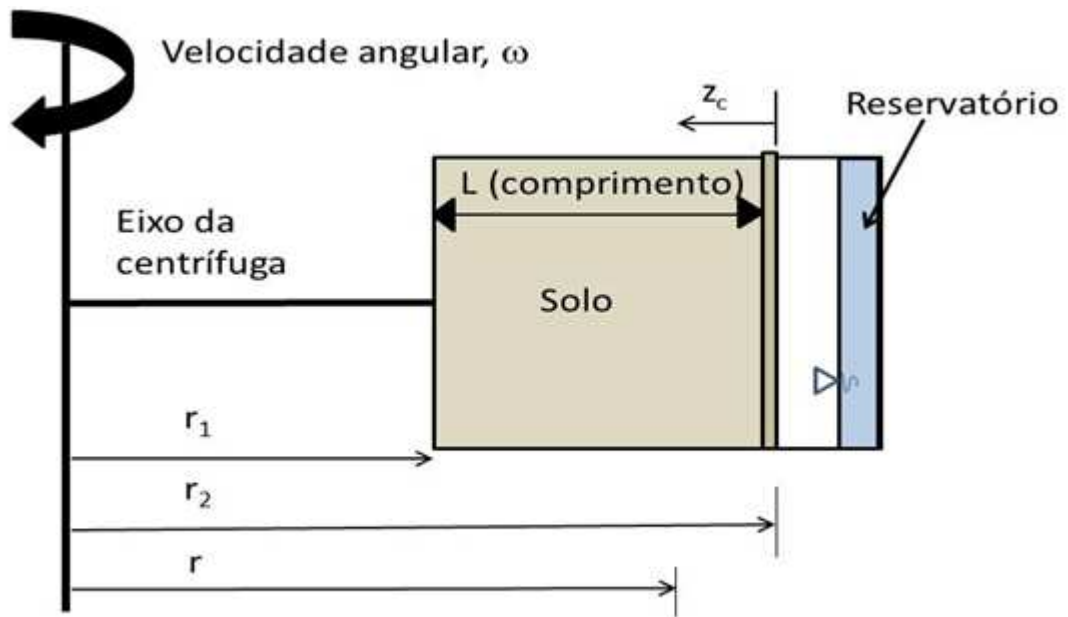


Figura 2.9: Representação esquemática de uma amostra de solo na centrífuga (adaptado de McCARTNEY & ZORNBERG, 2005).

A carga hidráulica, em uma amostra submetida à aceleração centrípeta, desconsiderando a carga cinética e as forças de percolação, é dada pela Equação 2.24:

$$h_c = -\frac{1}{2} \left(\frac{I \cdot \omega^2}{m \cdot g} \right) + \frac{P_w}{\rho_w \cdot g} \text{ Equação 2.24}$$

Em que, m é a massa e I é o momento de inércia rotacional em um campo centrífugo (Equação 2.25).

$$I = m \cdot (r_2 - z_c)^2 \text{ Equação 2.25}$$

h_c corresponde à carga hidráulica em determinado ponto do solo submetido à aceleração maior do que a da gravidade. O subscrito c é usado para

diferenciar as variáveis aplicadas para o fluxo sob aceleração centrípeta; ω é a velocidade angular da centrífuga.

A pressão de ar é nula, logo, a pressão na água pode ser substituída pela sucção ($-\psi = P_w$). Assim, a carga hidráulica, após realizar a substituição da Equação 2.25 na Equação 2.24, é dada por:

$$h_c = -\frac{\omega^2}{2 \cdot g} (r_2 - z_c)^2 - \frac{\psi}{\rho_w \cdot g} \quad \text{Equação 2.26}$$

Em um meio centrifugado, o gradiente hidráulico é:

$$i = \frac{\partial h_c}{\partial z_c} = \frac{\omega^2}{g} (r_2 - z_c) - \frac{1}{\rho_w \cdot g} \frac{\partial \psi}{\partial z_c} \quad \text{Equação 2.26}$$

Assim, para o meiocentrífugado, em condição não saturada, a lei de Darcy toma a seguinte forma:

$$v = -\frac{k(\psi)}{\rho_w \cdot g} \left(\rho_w \cdot \omega^2 \cdot (r_0 - z_c) - \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad \text{Equação 2.27}$$

Nimmoet *al* (1987) mostram que se a velocidade de rotação é suficientemente elevada, o gradiente de sucção pode ser desprezado. Logo, a velocidade de fluxo pode ser calculada como:

$$v = \frac{k(\psi) \cdot \rho_w \cdot \omega^2 \cdot r}{g} \quad \text{Equação 2.28}$$

Em que r é a distância do eixo da centrífuga até um ponto qualquer na amostra (Equação 2.29).

$$r = (r_2 - z_c) \quad \text{Equação 2.29}$$

Logo, para a condutividade hidráulica tem-se:

$$k(\psi) = \frac{g \cdot v}{\rho_w \cdot \omega^2 \cdot r} = \frac{g \cdot q}{A \cdot \rho_w \cdot \omega^2 \cdot r} \quad \text{Equação 2.30}$$

em que q é a vazão de água na amostra de solo e A é a seção transversal da amostra.

Uma vantagem do método é que para cada velocidade de rotação calcula-se a quantidade de água percolada e com ela a vazão e a condutividade hidráulica para a sucção correspondente em um tempo relativamente curto, da ordem de horas para valores elevados e de 24 horas para valores pequenos (McCartney & Zornberg, 2005).

2.7 Determinação em laboratório das propriedades hidráulicas do solo

2.7.1 Obtenção da curva de retenção de água no solo

Os primeiros trabalhos experimentais envolvendo a relação da umidade do solo com a sucção eram relacionados com agricultura e foram realizados no início do século XIX. Livingston, em 1906, apresentou um estudo sobre medições de sucção no deserto com o objetivo de estudar a flora daquela região. Seus métodos compreenderam de conceitos físicos e químicos ao utilizarem tubos capilares com uma membrana semipermeável preenchidos com soluções em diferentes concentrações. Observando-se a perda ou o ganho de umidade por osmose, era avaliada a sucção no solo. Paralelamente, Buckingham (1907) relacionou a altura capilar e drenagem com a distribuição dos poros e a granulometria do solo. Estes foram os primeiros dados que mostraram a relação entre o tipo de solo, a distribuição granulométrica e de poros com a altura capilar e a retenção de água em solos não saturados.

A partir destes trabalhos, os termos potencial capilar e condutividade capilar foram introduzidos, como variáveis que controlavam o fluxo em solos não-saturados. Mais tarde, outros pesquisadores mudaram este termo pelo mais geral, potencial total, para incluir componentes do potencial resultantes da presença de espécies químicas, gravidade, capilaridade e efeitos físico-químicos que ocorrem na interfase sólido-líquido.

Desde então, várias técnicas foram desenvolvidas, com o intuito de obter a relação entre umidade e sucção no solo.

Villar (2002), lista estas técnicas (Tabela 2.1) bem como a faixa de medição da sucção, tipo de sucção medida, vantagens e limitações de cada uma delas.

Tabela 2.1: Métodos de medida de sucção (VILLAR, 2002).

Método de Sucção	Faixa de Medida e tempo aproximado de equilíbrio	Observações	
Funil de pedra porosa (matricial)	0 a 70 kPa (Horas)	- sucção é aplicada diretamente à amostra; - bom para baixas sucções onde a precisão das panelas é limitada.	
Placa de Pressão (matricial)	0 a 1.500 kPa (Horas)	-emprega a técnica de translação de eixos; - depende da capacidade da pedra porosa (pressão de entrada de ar); - continuidade da fase ar.	
Membrana de pressão (matricial/total)	Até 10.000 (dias)	- emprega a técnica de translação de eixos;	
Tensiômetro (matricial)	0 a 70 kPa (minutos)	- tempo de resposta: depende da condutância da pedra porosa; sensibilidade do elemento de medida; - existem tensiômetros baseados em princípios osmóticos; - tensiômetros de alta capacidade (para pressões de -1 atm); tiram partido da elevada resistência à tração da água	
Papel Filtro	Papel-solo em contato (matricial)	30 a 30.000 kPa (7 dias)	- depende do contato entre o solo (pode ser difícil); - necessita calibração do papel filtro;
	Papel-solo Sem contato (total)	400 a 30.000 kPa (7 a 14 dias)	- evitar formação de fungos; - pesagem (precisão 0,0001g)
Blocos Porosos (matricial)	10 a 1.000 kPa (semanas)	- baseia-se na condutividade elétrica de materiais porosos (gesso, fibra de vidro, etc); resistência elétrica (ohms x sucção); - desvantagens: solubilidade do gesso, histerese pronunciada, mais sensível a altas sucções.	
Psicrômetros (total / osmótica)	100 a 8.000 kPa (minutos)	- depende de rigoroso controle da temperatura, principalmente nas baixas sucções; mais recomendado para laboratório; - sucção osmótica; mede sucção de extrato da solução do solo (confiabilidade precária).	
Sensores de Condutividade Térmica (osmótica)	todos os valores (minutos)	- condutividade elétrica do extrato da solução; - concentração de solutos; - extrato + psicrômetros: resultados precários.	
Equilíbrio da fase vapor (total)	Toda a faixa acima de \approx 400 kPa (dias)	- solução com concentração conhecida, umidade relativa, sucção total; - amostra de solo em dessecador sem contato com a solução até equilíbrio de peso; - equilíbrio demorado.	
Princípios Osmóticos (matricial)	200 a 1.600 kPa (horas)	- solo em contato com solução com concentração conhecida (umidade relativa conhecida) através de membrana seletiva; - solução de PoliEtilenoGlicol (PEG), peso molecular 20.000; - útil para instalar e controlar sucção em ensaios	

2.7.1.1 Técnica do papel filtro

O uso do papel filtro foi adotado inicialmente por Gardner (1937). Esta técnica parte do princípio que, quando um solo é colocado em contato com um material poroso que tenha capacidade de absorver água, a mesma irá passar do solo para os poros do material, até que o equilíbrio entre a sucção dos dois materiais seja alcançado. Tendo-se a relação entre sucção e umidade do material poroso (calibração), a sucção do solo pode ser obtida referindo-se à curva de calibração. O estado de equilíbrio fornece a mesma sucção no solo e no material poroso, porém com umidades diferentes.

O papel filtro pode ser usado para determinar a sucção matricial através do fluxo capilar, se for colocado em contato direto com o solo (Figura 2.10). Quando a medição da sucção é feita sem o contato do papel filtro com o solo, o equilíbrio entre as sucções dos dois materiais é atingido através do fluxo de vapor, obtendo-se então, a sucção total.

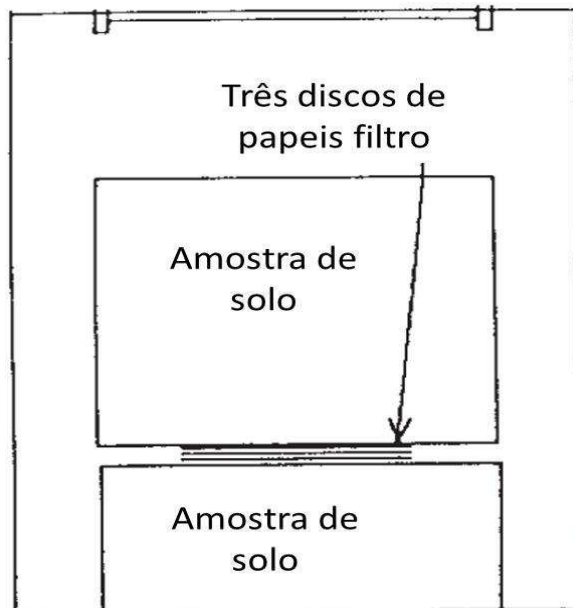


Figura 2.10: Esquema de obtenção de medição da sucção matricial (ASTM D 5298-03).

Soto (2004), em seu trabalho de mestrado, comenta as principais vantagens e desvantagens do método.

Entre as vantagens que oferece esta técnica encontram-se:

- ✓ O tempo de resposta do papel é relativamente curto para cada equilíbrio sendo da ordem de uma semana (tempo mínimo recomendado) quando medida a sucção matricial;
- ✓ Torna possível a medição da sucção osmótica indiretamente pela diferença das medidas da sucção total e matricial;
- ✓ O procedimento do ensaio é simples.

Entre as desvantagens apresentadas por esta técnica tem-se:

- ✓ Requer um manuseio delicado do papel e precisão na sua pesagem numa balança com resolução de 0,0001g;
- ✓ O tempo de resposta do papel é relativamente longo para cada equilíbrio sendo da ordem de 30 dias (tempo mínimo recomendado) para sucções de 0 a 100 kPa quando medida a sucção total;
- ✓ No caso de se estar medindo a sucção matricial, os resultados dependem de um bom contato entre o papel e o solo.

Marinho (2005) relatou alguns questionamentos encontrados na literatura relativo à técnica do papel filtro, em especial ao contato entre o papel filtro e a água do solo:

- ✓ A redução do contato entre o papel e o solo não afeta a medição da sucção matricial;
- ✓ À medida que a sucção aumenta, o significado da sucção matricial deixa de ser o mesmo, tendo-se uma mistura de sucção matricial e total;
- ✓ A partir de um valor de sucção mede-se a sucção total, mesmo que o papel filtro esteja em contato direto com o solo.

2.7.1.2 Placa de Pressão

A placa de pressão faz uso da técnica da translação de eixos. Esta técnica objetiva evitar que ocorra o fenômeno da cavitação. A técnica consiste na mudança do referencial de pressão (pressão atmosférica),

aumentando artificialmente a pressão do ar (u_a) existente nos poros do solo. Admitindo-se que isto produz um igual aumento da pressão de água (u_w), a diferença ($u_a - u_w$), ou seja, a sucção, permanece constante, evitando-se a cavitação da água (Figura 2.11).

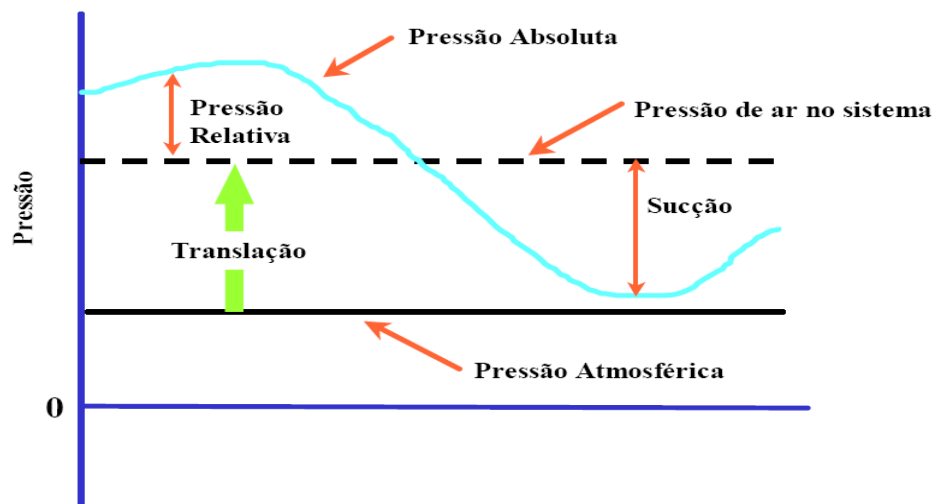


Figura 2.11: Representação da translação de eixos em termos de pressão (MARINHO, 2005).

Esta técnica foi desenvolvida por Hilf em 1956, e pode ser aplicada em vários tipos de equipamentos utilizados em ensaios geotécnicos, como oedômetro, triaxial, cisalhamento direto, permeâmetros para determinação da condutividade hidráulica não saturada ou apenas a um sistema que objetive determinar a CRA. Com esta técnica, tem-se a possibilidade de movimentação de líquido através da placa porosa e portanto, o que se impõe à amostra é a sucção matricial.

Para este método, é necessário contar com placas porosas especiais que permitam o fluxo de água, porém não o de ar. A sucção máxima a ser aplicada depende da pressão de entrada de ar das placas porosas, que podem atingir valores de até 1.500 kPa.

Esta técnica tem como vantagem a medição direta da sucção aplicada, com a possibilidade de medir de 25 a 1500 kPa de pressão, bem como ser usada em equipamentos disponíveis comercialmente. Sua principal desvantagem é a necessidade de haver a continuidade de ar

através da amostra de solo. Ou seja, todos os vazios preenchidos de ar devem estar conectados, o que só ocorre em solos com grau de saturação menores do que cerca de 85%. Em solos com grau de saturação acima deste valor, o ar fica ocluído (disperso em bolhas), e os valores de sucção medidos com as placas de pressão são superestimados (BOCKING & FREDLUND, 1980).

2.7.1.3 Placa de sucção

A placa de sucção tem seu uso mais adequado quando se deseja impor sucções pequenas, pois a água quando submetida a pressões negativas menores que 100 kPa cavitava, ou seja, permite a entrada de ar. Na placa de sucção, impõe-se uma diferença de altura entre o reservatório e a pedra porosa de alta entrada de ar, obtendo uma pressão na pedra menor que a pressão atmosférica. Esta diferença de altura é a carga de pressão imposta à amostra em contato com a pedra porosa (Figura 2.12).

A placa de sucção é o sistema mais adequado quando se deseja definir a entrada de ar em materiais com uma distribuição de poros bastante uniforme ou com um valor de entrada de ar baixo (MARINHO, 2005).

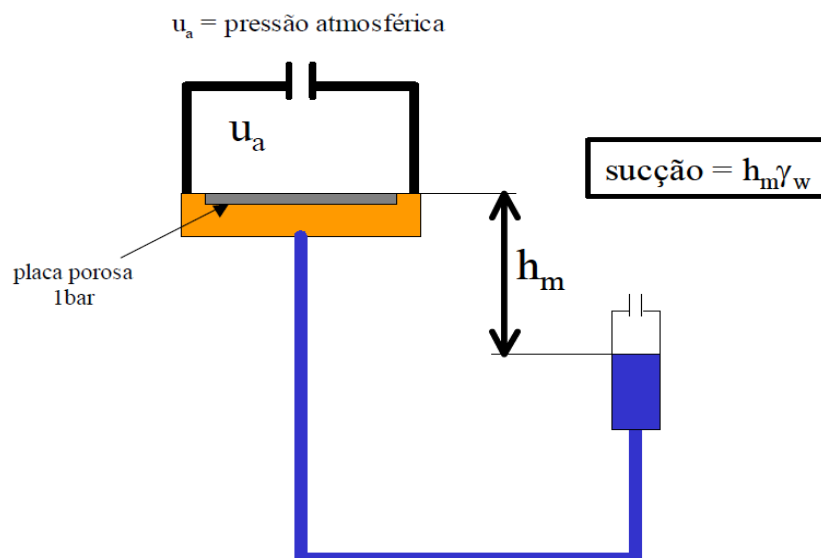


Figura 2.12: Modelo esquemático de placa de sucção (MARINHO, 2005).

2.7.1.4 Centrífuga

Briggs e McLane (1907) foram os primeiros a usar uma centrífuga para medir a relação entre sucção de um solo e o seu teor de umidade. Russell e Richards (1938) melhoraram a técnica introduzida por Briggs e McLane (1907) para medir o teor de umidade retido em um solo para diferentes valores de sucção aplicada. Gardner (1937), que havia trabalhado com sementes para obter a relação de umidade *versus* sucção, adaptou a técnica, calibrando papéis filtro colocados em contato com o solo úmido e medindo a tensão capilar de um solo para uma extensiva gama de teores de umidade, determinando o teor de umidade de equilíbrio. Os papéis filtro foram calibrados determinando seu teor de umidade deles quando em contato com uma superfície de água livre em um campo centrifugado.

Hassler e Brunner (1945) também usaram o método centrifugo para obter a relação entre pressão capilar e saturação, para pequenas amostras de solos consolidados.

Khazodee *et al.* (2002) e Reis *et al.* (2011) adaptaram quatro células para usar em uma centrífuga para obtenção direta da CRA (Figuras 2.13 a e b).

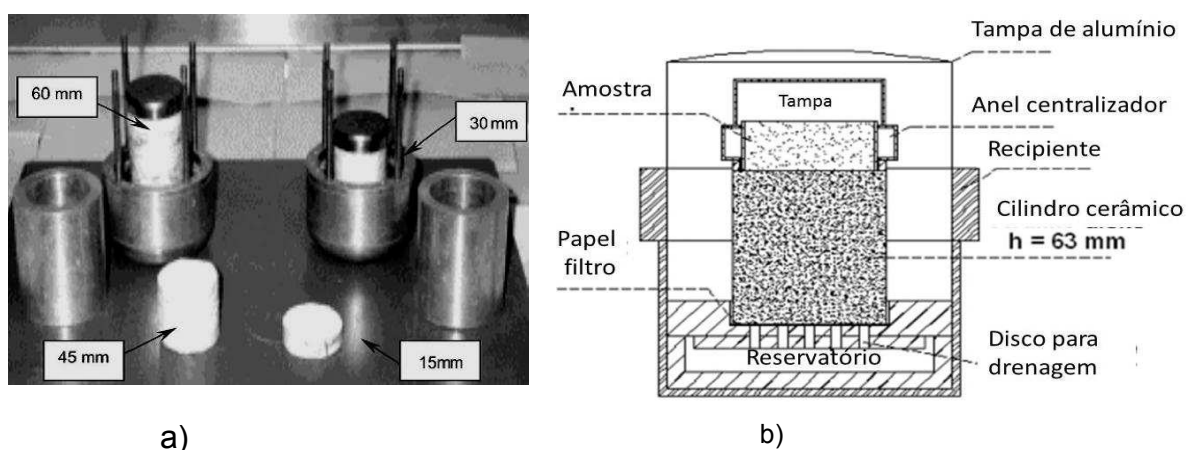


Figura 2.13: a) Montagem do ensaio(KHANZODE *et al.* 2002); b) Esquema da peça adaptada para ensaio (Reis *et al.* 2011).

A centrífuga aumenta o campo gravitacional de um objeto, por meio de um movimento circular que gera uma aceleração centrífuga direcionada para fora do círculo, definido pelo movimento de rotação. O valor da

aceleração centrífuga está relacionado com o raio e a velocidade angular do movimento de rotação.

A pressão (p_c), em centímetros de coluna d'água em qualquer ponto da amostra de solo centrifugada é calculada com base na Equação 2.31, proposta por Corey (1977).

$$P_c = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2 \cdot g} (r_2^2 - r_1^2) \quad \text{Equação 2.31}$$

Em que ρ é a densidade do fluido (g/cm^3), ω é a velocidade angular (rad/s), g é aceleração da gravidade ($g=981\text{cm/s}^2$), r_2 (cm) é a distância onde o fluido encontra a pressão atmosférica e r_1 (cm) o topo da amostra (cm).

A Equação 2.31 define uma relação não linear entre a sucção na amostra de solo e a distância r_2 . Entretanto, se a amostra de solo tiver pequena espessura, de 1,0 a 2,0 cm, a sucção no ponto médio pode ser considerada como representativa dos valores de sucção ao longo da espessura da amostra Khanzodee *et. al.* (2002). A sucção é uma função da diferença entre os quadrados dos raios r_1 e r_2 , para valores constantes de densidade e velocidade angular. Portanto, diferentes valores de sucção podem ser induzidos na amostra de solo variando a distância radial r_2 .

Na interpretação da Equação 2.31, Gardner (1937) definiu r_2 como sendo a superfície externa da amostra, sendo esta considerada sempre saturada durante o processo de centrifugação, ou seja, com tensão matricial nula. Khanzodee *et al.* (2002) e Reis *et. al* (2011) consideraram r_2 também como um ponto de sucção nula, mas estendendo r_2 , utilizando uma pedra porosa entre o solo e o reservatório de água (Figura 2.14), aumentando assim a diferença entre r_1 e r_2 e conseqüentemente obtendo valores de sucções maiores.

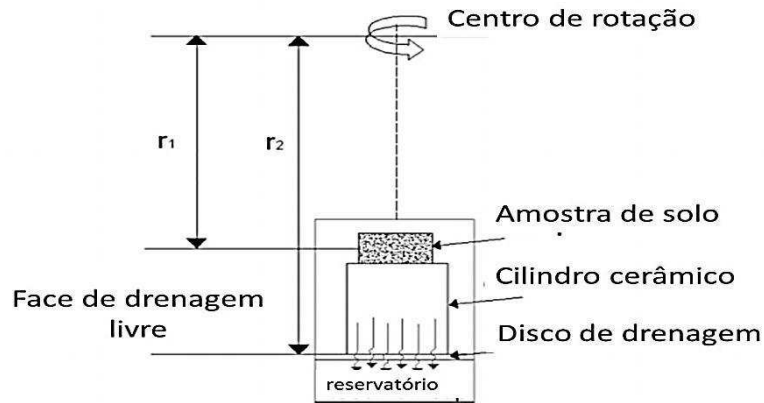


Figura 2.14. Relação de r_1 e r_2 adotado por Khanzodeet. *al.* (2002) e Reis *et. al.* (2011).

Khanzodeet. *al.* (2002) apresentaram os resultados dos testes realizados e comparações com resultados obtidos pelos métodos tradicionais para obtenção das CRA (Figura 2.15). A discrepância entre os resultados foi atribuída, segundo os autores, à variação da massa específica seca das amostras. Os autores recomendam que mais testes e diferentes solos sejam ensaiados para validar o novo procedimento. O tempo necessário para obtenção de uma curva completa variou de 12 horas para um solo siltoso, a 36 horas para um solo argiloso, ao passo que pelo método da placa de pressão o tempo necessário foi de 2 e 16 semanas, respectivamente para os mesmos solos.

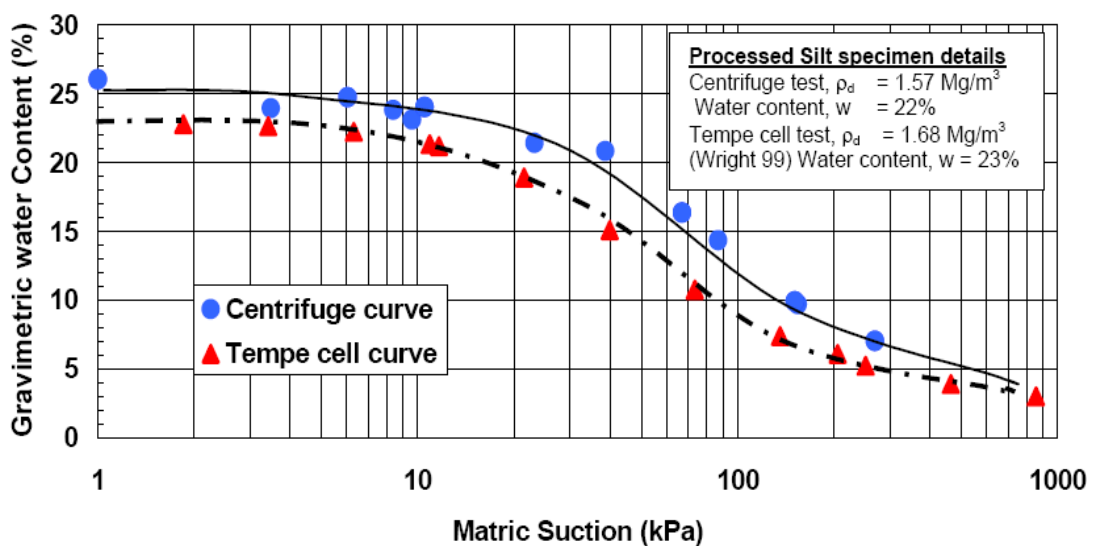


Figura 2.15: Comparações entre os métodos da placa de pressão e centrífuga, Khanzodeet. *al.* (2002).

Reis *et. al* (2011) realizaram testes em amostras indeformadas e amolgadas de solos residuais jovem e maduro. Os solos foram classificados como areia siltosa e argila arenosa. Os autores obtiveram bons resultados, quando comparados com os métodos tradicionais de obtenção da CRA.

Reattoet.*al.* (2008) determinou a CRA para solos tropicais utilizando amostras de 5 cm de altura, com o objetivo de avaliar o tempo mínimo de centrifugação, utilizando a Equação 2.32 que determina um valor médio de sucção na amostra.

$$\psi = \frac{k}{6} \cdot \omega^2 \cdot g^{-1} \cdot L(L - 3 \cdot r_c) \quad \text{Equação 2.32}$$

em que L é a altura da amostra, ω é a velocidade angular ($\text{cm}^{-\text{s}}$), g é a aceleração da gravidade (981 cm s^{-2}), k é uma constante no valor de $0.09807 \text{ kPa cm}^{-1}$ e r_c é o raio contando do centro de rotação até a base da amostra. A equação 2.32 é diferente da Equação 2.31, pois estes autores utilizaram amostras maiores, obtendo assim um valor médio de sucção, diferentemente da Equação 2.31, onde a sucção obtida equivale à sucção no centro da amostra. Os autores concluíram que o tempo mínimo para centrifugação para os solos estudados foi de 120 minutos. Tempos inferiores a estes geravam valores maiores de teor de umidade volumétrico residual (θ_r).

O período de centrifugação, necessário ao equilíbrio da umidade no solo, em dada rotação, é fator determinante da precisão da CRA. (Silva e Azevedo, 2002). Baseado nisso, Odén (1976) recomendou períodos de centrifugação variando de 5 a 60 minutos, dependendo da faixa de tensão desejada, ressaltando, contudo, que esse período depende da composição granulométrica do solo. Freitas Júnior & Silva (1984) analisaram o efeito do período de centrifugação em amostras de um Latossolo Vermelho do Cerrado, e sugeriram que três horas são necessárias para obter o equilíbrio de umidade no solo em uma única operação. Esses estudos evidenciam que a questão do período de centrifugação necessário para o equilíbrio ainda precisa ser investigada, considerando, principalmente, a variação dessa resposta de acordo com o tipo de solo. Silva e Azevedo (2002) que

estudaram a influência do período de centrifugação para obtenção da CRA em solos do cerrado brasileiro mostraram que o período de centrifugação afeta a CRA, afetando principalmente os valores da umidade nas tensões mais elevadas, alterando, portanto, a umidade residual. Silva e Azevedo (2002) concluíram que o período de centrifugação necessário para o equilíbrio da tensão da umidade do solo, na determinação da CRA, pelo método tradicional da centrífuga, deve ser superior a 80 minutos.

2.8 Determinações experimentais da função de condutividade

A função de condutividade hidráulica pode ser determinada a partir de resultados de ensaios experimentais, sejam estes realizados em campo ou em laboratório, ou a partir de modelos matemáticos, fazendo uso das propriedades de volume/massa do solo, de sua curva de retenção de água e da condutividade hidráulica saturada, sendo este último o mais usual tendo em vista as dificuldades na obtenção direta, por meio de experimentos (MARINHO, 2005).

São duas as técnicas para obtenção da função de condutividade por meio de ensaios: as técnicas do regime permanente e do regime transiente. As técnicas baseadas na metodologia de regime permanente para a determinação da função de condutividade hidráulica têm ampla aplicação e maior confiabilidade. Como o equilíbrio capilar prevalece ao longo do ensaio, a saturação é medida de forma direta. As técnicas de regime permanente são invariavelmente demoradas, já que o estabelecimento do equilíbrio pode demandar horas ou mesmo dias, para cada nível de saturação, e dependerá da facilidade que o meio poroso permite a passagem do fluido considerado, e/ou, da técnica utilizada (DELGADO, 2000). Técnicas baseadas no regime transiente são consideradas mais rápidas, embora o equilíbrio de saturação nunca seja atingido. A função de condutividade hidráulica pode ser obtida algumas horas.

Entre as metodologias de regime permanente, encontram-se as de carga constante e vazão constante. Na primeira, gradientes de pressão são aplicados nas extremidades do corpo de prova enquanto são registradas as vazões. Na segunda, uma vazão constante é imposta na amostra através de

uma das suas extremidades da amostra e uma contrapressão de valor constante aplicada na outra extremidade, enquanto é registrada a pressão induzida pelo fluxo imposto.

Para o método de regime transiente, uma amostra com uma umidade inicial normalmente baixa é submetida a uma taxa de infiltração resultando na redistribuição de água e pressões dentro do corpo de prova, naturalmente variável com o tempo. Ou a amostra inicialmente saturada é submetida a drenagem, e os valores de umidade e sucção são obtidos com o tempo. Em cada instante, as medições de umidade e pressão permitem o cálculo da condutividade hidráulica e do teor de umidade, para uma ampla faixa de valores de sucção.

Na Tabela 2.2 apresentam-se alguns métodos encontrados na literatura para obtenção da função de condutividade hidráulica, com a descrição do tipo de medição realizada durante o ensaio e o regime de fluxo.

Tabela 2.2- Métodos para determinação da função de condutividade hidráulica (MARINHO, 2005)

Método	Metodologia		Regime de fluxo
	Teor de Umidade	Sucção	
Tradicional	mede-se	mede-se	Permanente
Centrifuga	mede-se	estima-se	Permanente
Absorção	mede-se	estima-se	Transiente
Sorção	mede-se	estima-se	Transiente
Vazão em passos múltiplos	mede-se / estima-se	mede-se / estima-se	Transiente
Vazão de passo único	mede-se / estima-se	mede-se / estima-se	Transiente
Vazão Constante	mede-se / estima-se	mede-se / estima-se	Permanente
Perfil Instantâneo	mede-se / estima-se	mede-se / estima-se	Transiente
Evaporação	mede-se / estima-se	mede-se / estima-se	Transiente

Nesses métodos é necessário medir o teor de umidade ou a sucção. Em alguns, medem-se as duas grandezas. Medindo-se um dos parâmetros,

o outro deve ser inferido utilizando-se uma curva de retenção obtida independentemente. A função de condutividade hidráulica poderá ser estimada diretamente se ambos os parâmetros forem determinados.

2.8.1 Determinação Experimental Usando Permeômetros

A condutividade hidráulica pode ser medida em laboratório impondo-se um fluxo sobre uma amostra de solo. A célula que comporta a amostra é denominada permeômetro, que pode ter paredes flexíveis ou rígidas.

Os permeômetros de parede flexível consistem de células do tipo triaxial, nas quais a amostra pode ser saturada aplicando-se contrapressão. É possível controlar as tensões verticais e horizontais, de forma a simular as condições de campo. O fluxo no contato é eliminado, já que a membrana que envolve a amostra é mantida em contato com o corpo de prova, através da pressão confinante exercida pelo fluido da célula.

Os permeômetros de parede rígida consistem de um tubo rígido que contém o corpo de prova a ser ensaiado, fixado entre duas placas. Estes permeômetros são, em geral, bem mais simples e menos onerosos do que os de parede flexível, permitindo ensaiar corpos de provas de grandes dimensões. No entanto, não é possível ter controle sobre as tensões que estão agindo na amostra, além de existir a possibilidade de fluxo do fluido no contato com a parede rígida (DELGADO, 2000). O fluxo ao longo do contorno rígido pode ser de particular importância quando se ensaiam amostras com líquidos que possam acarretar contração do corpo de prova. Nesses casos, cria-se um canal de fluxo preferencial entre o corpo de prova e a parede do permeômetro, ocasionando um fluxo não uniforme (DANIEL *et. al.* 1983). Na Tabela 2.3 se apresenta uma comparação indicando as vantagens e desvantagens de cada tipo de permeômetro.

Tabela 2.3: Vantagens e desvantagens dos dois tipos de permeômetros (DANIEL, 1983)

TIPO DE PERMEÔMETRO	PRINCIPAIS VANTAGENS	PRINCIPAIS DESVANTAGENS
Parede rígida	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicidade de construção e operação da célula -Baixo custo da célula - Podem ser construídos permeômetros de grandes dimensões -Ampla faixa de materiais pode ser utilizada (incluindo materiais quimicamente resistentes) -Pode ser permitida a expansão vertical. -Se desejado pode-se realizar o ensaio sem a aplicação de tensão vertical 	<ul style="list-style-type: none"> -É possível a ocorrência de fluxo no contato corpo de prova - parede. -Não há controle sobre as tensões horizontais -Se o corpo de prova contrair existirá fluxo na parede do permeômetro -Não pode ser garantida a saturação do corpo de prova a través do parâmetro B -Não se pode saturar o corpo de prova de forma convencional através da aplicação de contra pressão -O tempo de ensaio é longo no caso de materiais com baixa condutividade hidráulica
Parede flexível	<ul style="list-style-type: none"> -Pode-se saturar o corpo de prova da forma convencional através da aplicação de contra pressão -Pode-se confirmar a saturação do corpo de prova a través do parâmetro B. -Pode-se controlar as tensões principais -Fluxo no contato parede - corpo de prova é improvável, mesmo com corpos de prova com superfícies rugosas -Tempo de ensaio rápido para materiais com baixo coeficiente de permeabilidade em decorrência da capacidade de saturação via contrapressão 	<ul style="list-style-type: none"> -Custo do equipamento alto -Requer aplicação de pressão em três lugares (pressão de câmara, pressão na base e pressão no topo.) -Problemas de compatibilidade química da membrana com alguns líquidos químicos e poluentes -Operação da célula mais complicada. -Dificuldade de se realizar ensaios com tensões efetivas extremamente baixas. É necessário de no mínimo 14 kPa de σ', de forma de pressionar a membrana ao C.P. a fim de não haver fluxo no contato

2.8.1.1 Permeâmetros de Parede Flexível com Uso de Vazão Constante

A vantagem desta metodologia surge da facilidade de se controlar pequenas vazões de forma precisa, ao invés de medi-las com as consequentes dificuldades experimentais, sendo possível a determinação da condutividade hidráulica em gradientes hidráulicos suficientemente pequenos, garantindo, desta forma, deformações volumétricas mínimas do corpo de prova.

O fluido é injetado ou extraído do corpo de prova com vazão constante, fazendo-se uso de uma bomba de fluxo, e o gradiente gerado é monitorado através de um transdutor de pressão diferencial. Inicialmente, é observado um fluxo transiente antes de se atingir o regime permanente (quando a diferença de pressão entre as extremidades do corpo de prova permanece constante).

Segundo Delgado (2000), este método foi inicialmente introduzido por Olsen (1966), com a finalidade de determinar a condutividade hidráulica saturada em solos finos. Este método para determinação da condutividade hidráulica em meios não saturados foi utilizado também por Pane *et al.* (1983), Olsen *et al.* (1985), Araruna (1995), Schackeford e Glade (1994), Olsen *et al.* (1994) e Aiban e Znidarcic (1989).

Guimarães *et.al.* (2008) apresentou um permeâmetro de parede flexível para a determinação da condutividade hidráulica não saturada (K_w). Este permeâmetro foi utilizado neste trabalho, e o detalhe do equipamento e metodologia está detalhado no capítulo 3. Foi utilizada a metodologia do regime permanente em que se controlou as vazões, utilizando uma bomba de fluxo, monitorando as diferenças de pressão entre o topo e a base da amostra. O controle da sucção é obtido através da técnica de translação de eixos. O permeâmetro é capaz de determinar condutividade hidráulica com valores maiores que 10^{-10} cm/seg. Os ensaios foram realizados em trajetórias de secagem.

2.8.2 Determinação experimental usando centrifugas

As técnicas para obtenção da função de condutividade hidráulica usando centrífuga podem ser pelo método permanente ou transiente de fluxo. Em experimentos utilizando-se do regime permanente, as amostras são submetidas a uma aceleração centrífuga constante e então é estabelecida uma condição constante de pressões e de fluxo na base e no topo da amostra com o tempo. Segundo van den Berg *et al.* (2009), a realização de experimentos com regime permanente consiste tipicamente em impor às amostras diferentes velocidades angulares ou taxas de fluxo, chegando a um regime permanente de fluxo em amostras não saturadas para cada velocidade e então determinar o teor de umidade volumétrico após o ensaio. Medindo ou obtendo as pressões no fluido e determinando as taxas de fluxo, a condutividade, $K(\psi)$, pode ser obtida.

Dois métodos de regime permanente têm sido usados para as determinações das propriedades hidráulicas em solos não saturados. Estes métodos são relatados por Nimmo *et al.* (2002) como: controle de fluxo interno (IFC “*internalflowcontrol*”) e aparelhos para fluxo não saturado (UFA “*unsaturatedflowapparatus*”).

O ensaio em regime permanente tem sido amplamente utilizado para obter as propriedades hidráulicas e parâmetros de transporte em condições não saturadas, podendo-se citar os trabalhos de Nimmo *et al.*, 1987 (Figura 2.16 a), 1994, 2002; Nimmo and Mello, 1991 (Figura 2.16 b); Conca and Wright, 1992, 1998; Conca, 1993; Conca *et al.*, 1997, 1998; ASTM, 2000; Seaman *et al.*, 2002; Basha and Mina, 1999; Caputo and Nimmo, 2005; Wright *et al.*, 1994; McCartney, 2007). Ambos os métodos, IFC e UFA, ignoram o gradiente gerado devido a pressão capilar ao longo do comprimento da amostra (Van den Berg *et al.* 2009). Segundo Nimmo *et al.* (1987), isto pode levar a obtenção de valores menores de $K(\psi)$ para condições onde exista uma alta pressão capilar.

Observa-se na Figura 2.16 a), o *design* do equipamento desenvolvido por Nimmo *et al.* (1987) para obtenção da função de condutividade pelo método do regime permanente IFC e na Figura 2.19.b) o equipamento modificado por Nimmo & Mello (2002) com uma inovação adicional em que

somente uma pequena quantidade de água é aplicada ao solo, permitindo velocidades maiores de centrifugação sem deformar o solo.

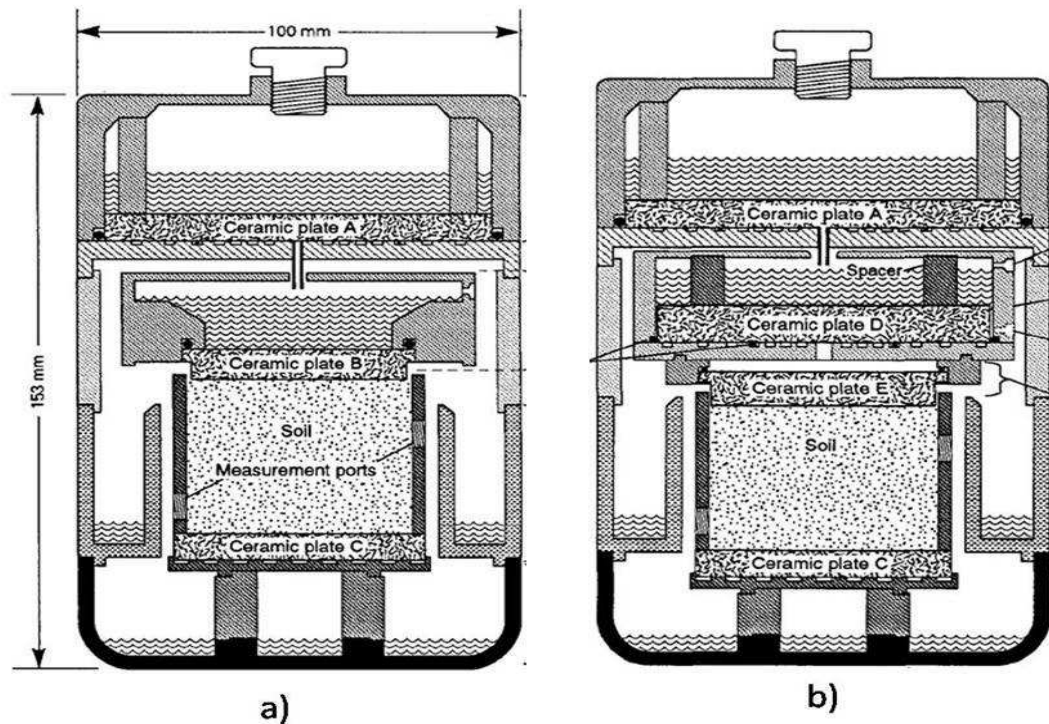


Figura 2.16: a) Equipamentos com IFC “*internalflowcontrol*”- Nimmo *et al* (1987); b) Equipamento modificado por Nimmo & Mello (1992).

McCartney e Zornberg (2005) desenvolveram um permeâmetro em centrifuga (Figura 2.17) para determinar as propriedades hidráulicas de solos não saturados utilizando a metodologia do regime permanente. O permeâmetro de centrifuga é um cilindro montado em um recipiente oscilante. As propriedades hidráulicas de uma amostra de solo são obtidas controlando a taxa de fluxo através da amostra, medindo as mudanças de umidade ao longo da amostra usando um sistema de medição de teor de umidade volumétrico (TDR) (Figuras 18 a, b, c e d). Este sistema obteve com precisão as propriedades hidráulicas para solos com baixa plasticidade.

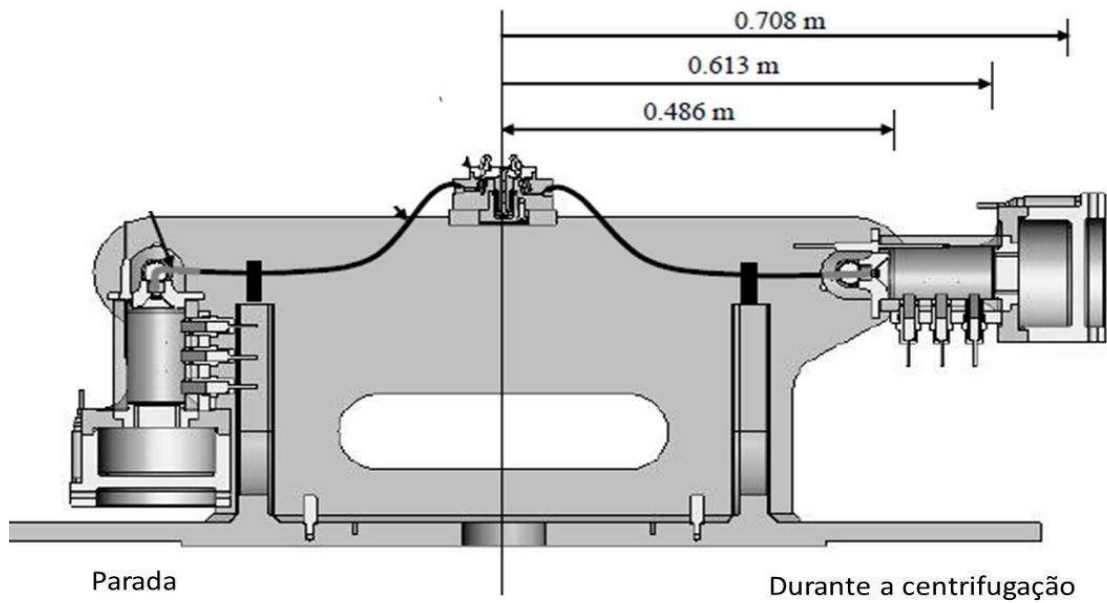


Figura 2.17 – Modelo de centrífuga UFA “unsaturated flow apparatus”(McCARTNEY e ZORNBERG, 2005).

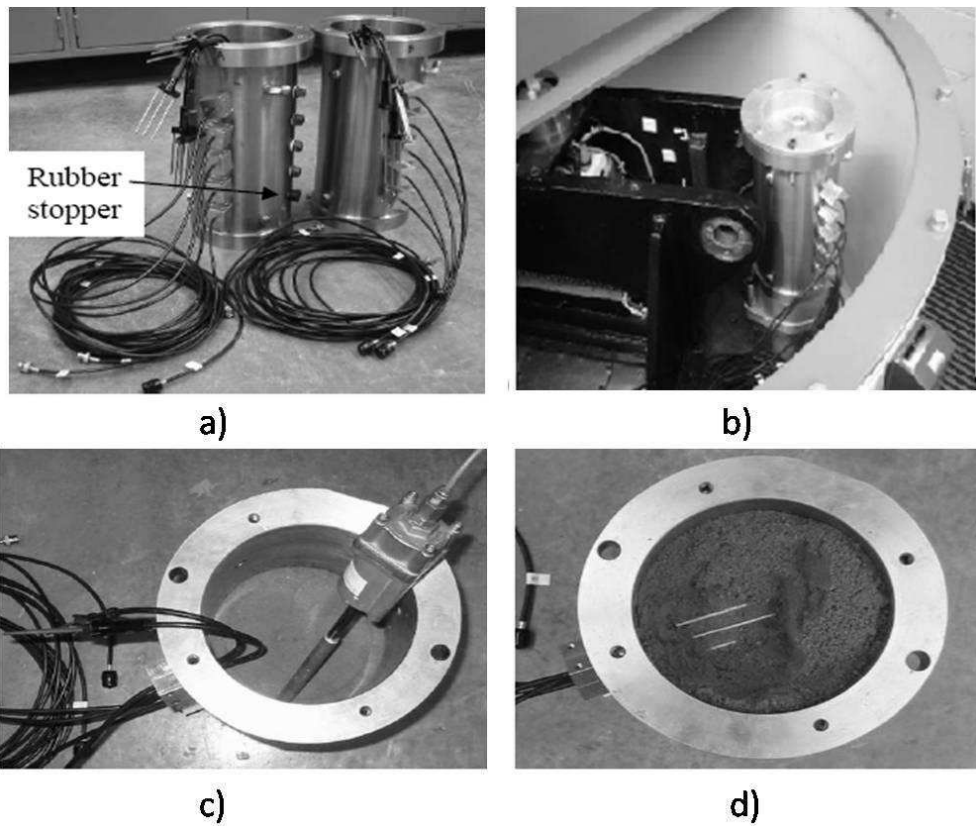


Figura 2.18:a) e b) Montagem do permeâmetro na centrífuga; c) e d) detalhes da montagem do TDR (McCARTNEY e ZORNBERG, 2005).

Segundo Van den Berg *et al.* (2009), os experimentos com o método do regime transiente sempre consistem de um período do tempo em que a centrífuga é acelerada até atingir a velocidade angular constante. A força produzida deverá ser suficiente para vencer as forças capilares, ocorrendo assim a drenagem do fluido dos poros maiores, e cessando a drenagem quando a força aplicada no fluido não exceder a força capilar dos poros menores. As interpretações dos resultados podem ser obtidas por soluções analíticas ou numéricas. O software Hydrus 1-D tem sido usado para obter a distribuição de sucção ao longo da amostra e obter a função de condutividade por meio de uma solução numérica inversa (ŠIMŮNEK & NIMMO, 2005).

Reis *et. al* (2011) estimaram a condutividade hidráulica não saturada em solos, utilizando uma pequena centrífuga (Figura 3.13 b) e compararam com o modelo teórico de van Genuchten-Mualem.(1980). Os autores concluíram que o modelo tende a subestimar os valores de condutividade hidráulica, quando comparados com os dados obtidos de forma direta, utilizando a centrífuga.

Em centrífuga, para o regime transiente, os ensaios podem ser caracterizados como vazão em passos múltiplos ou vazão de passo único. Nestes ensaios é aplicado um acréscimo no valor de sucção matricial e registra-se o volume de água que sai do corpo de prova, ou por meio de tensiômetros, registrando a variação da umidade ao longo do corpo de prova. Para o cálculo da condutividade utilizam se diferentes soluções da equação de Richard's. Por estes métodos, a condutividade hidráulica é obtida em uma trajetória de secagem (van den BERG *et al.*, 2009).

Nimmo, 1990; Šimůnek&Nimmo, (2005) e Nakajima &Stadler, (2006) aplicaram o método do regime transiente em problemas envolvendo a zona vadosa do solo, apresentando equações analíticas para avaliar a variação da sucção com o tempo. Os valores observados e os valores obtidos por simulação confirmaram a validação da equação de Richard's (ŠIMŮNEK&NIMMO, 2005).

Usando um modelo numérico, ŠimůnekandNimmo, (2005) introduziram uma versão modificada do software Hydrus-1D para simular o

fluxo transiente em experimentos usando centrífuga, onde a taxa de fluxo foi variável.

Caputo & Nimmo (2005) desenvolveram o método “*quasi-steadycentrifuge*” (QSC), que é uma variação do método do regime permanente, que segundo os autores pode ser implementado para amostras de até 30mm utilizando um equipamento simples, diminuindo consideravelmente os custos. Apesar de não ser um método preciso, os autores afirmam que esta incerteza pode ser tolerada em muitas aplicações, pois oferece valores em uma ordem de grandeza aceitável. O ensaio montado e o esquema do aparelho pode ser visualizado na Figura 2.19.

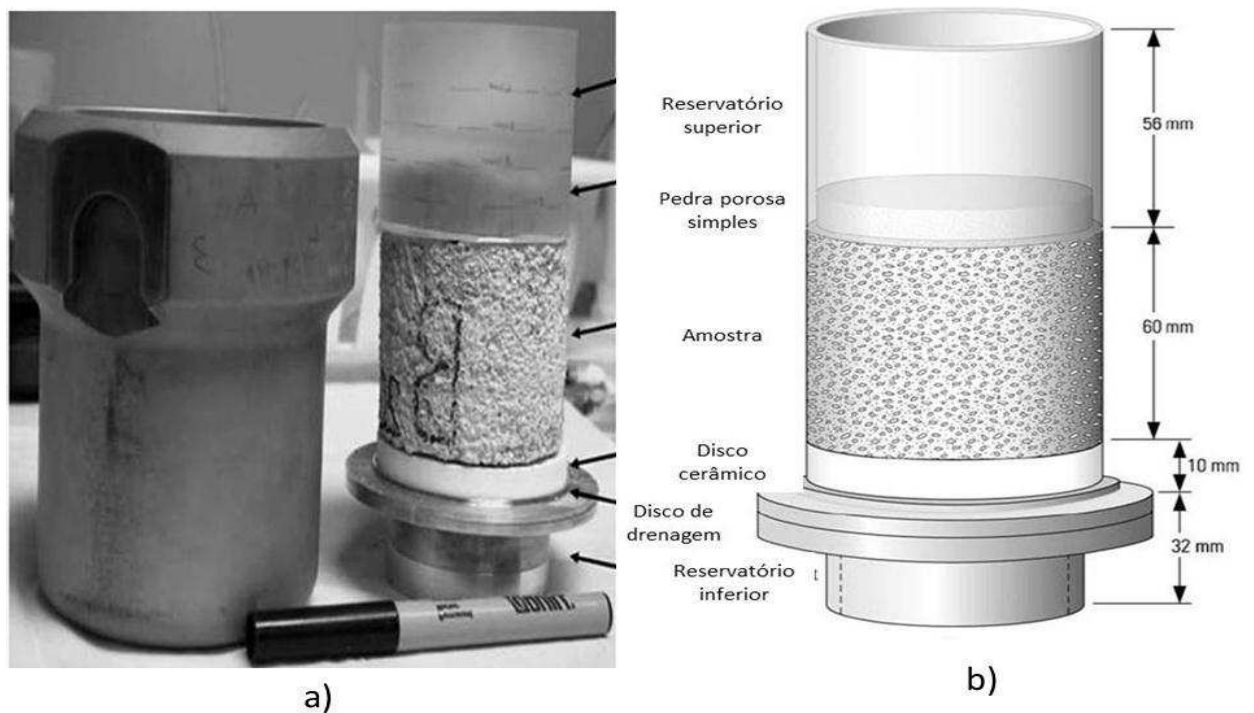


Figura 2.19: a) Montagem do equipamento QSC; b) Diagrama do equipamento QSC.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações Gerais

Neste capítulo apresentam-se os equipamentos desenvolvidos neste trabalho e as metodologias empregadas para determinação da CRA e da função de condutividade hidráulica. Foram realizados ensaios para caracterização dos solos escolhidos, e a obtenção da CRA por meios dos métodos do papel filtro, placa de pressão e centrifuga. Para a determinação da condutividade de solos não saturados, foram utilizados o permeâmetro de parede flexível e a centrifuga.

3.2 Os solos

Foram coletadas amostras indeformadas dos dois solos utilizados. O primeiro é um solo residual jovem de gnaise, de coloração cinza claro, coletado em um talude de corte localizado na Vila Secundino no campus da UFV (Figura 3.1). O segundo é um solo residual maduro, também de gnaise, coletado no campo experimental do laboratório de resíduos também no campus da UFV, de cor avermelhada, classificado como CH (argila inorgânica de alta plasticidade) (Figura 3.2).



Figura 3.1: Local de coleta da amostra de solo SC (Vila Secundino - UFV).

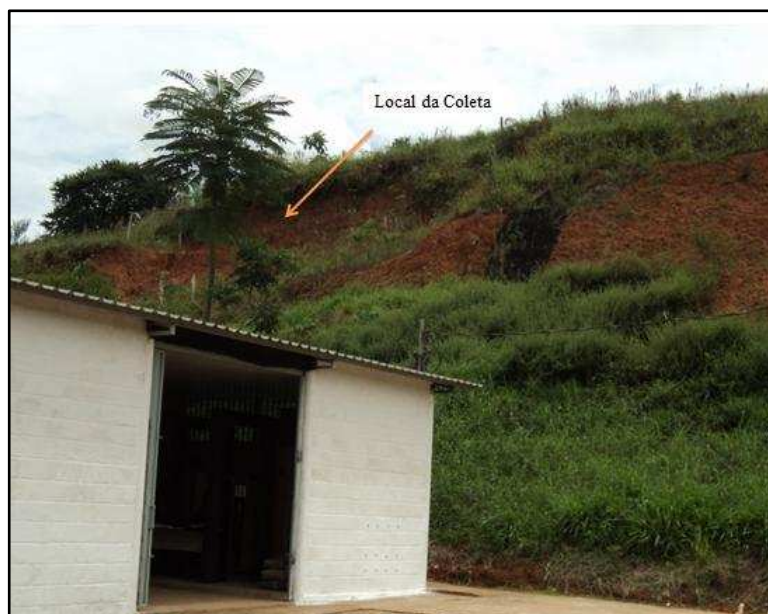


Figura 3.2: Local de coleta da amostra de solo CH (Laboratório de resíduos-UFV).

Em uma primeira etapa, foram realizados os ensaios de caracterização dos solos, granulometria conjunta, limites de consistência, massa específica dos sólidos e ensaio de compactação, seguindo as normas técnicas da ABNT (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Normas brasileiras para ensaios de caracterização e compactação de solos

Ensaio	Normas Brasileiras
Granulometria	ABNT NBR-7181/84
Limites de consistência (LL e LP)	ABNT NBR-6459/84 e ABNT NBR-7180/84
Peso Específico dos Sólidos (γ_s)	ABNT NBR-6508/84
Compactação	ABNT NBR-6457/86

3.3 Determinações da CRA pelos métodos tradicionais

A curva característica foi determinada usando-se a técnica do papel filtro e placa de pressão. Os dois métodos foram necessários, uma vez que a câmara de aplicação de pressão possui um disco poroso de entrada de pressão de ar de 500 kPa, restringindo a obtenção de pontos na curva

característica a valores no máximo igual a este valor. Para valores superiores, optou-se pela técnica do papel filtro.

O modelo de van GENUCHTEN (1980) (Equação 2.15) foi escolhido para ajustar os pontos experimentais. Os parâmetros α , m , n e θ_r foram obtidos por otimização, minimizando-se a diferença entre os resultados experimentais e teóricos, Equação 3.1, usando-se, para isso, a ferramenta Solver do programa Excel.

$$\text{Diferença (\%)} = \frac{\sqrt{(\theta_1 - \theta_c)_1^2 + (\theta_1 - \theta_c)_2^2 + (\theta_1 - \theta_c)_3^2 \dots}}{\sqrt{\theta_{c1}^2 + \theta_{c2}^2 + \theta_{c3}^2 \dots}} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde: θ_1 : teor de umidade volumétrico obtido em laboratório

θ_c : teor de umidade volumétrico calculado pelo modelo de van GENUCHTEN (1980)

3.3.1 Técnica do papel filtro

Este ensaio é padronizado pela ASTM D-5298 (*Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*).

Para obtenção dos pontos utilizando da técnica do papel filtro, foi utilizado o papel filtro Whatman nº 42, seguindo o procedimento:

- Inicialmente, os corpos de prova foram moldados dentro de um anel de PVC de 47,14 mm de diâmetro interno e 20 mm de altura, determinando-se seus teores de umidades.
- Em seguida, umedeceram-se os corpos de prova até próximo à saturação, aspergindo-se água de uma distância de aproximadamente 60 cm.
- Em seguida, os corpos de prova foram deixados secar até atingir o teor de umidade desejado (Figura 3.3a), calculado previamente mediante os índices físicos e controlado por pesagens sucessivas
- Os papéis filtro foram cortados no diâmetro desejado e, então, colocados cuidadosamente, um na superfície superior outra na inferior de cada corpo de prova (Figura 3.3b e 3.3c).

- Imediatamente após o posicionamento dos papéis filtro, envolviam-se os corpos de prova com filme plástico, colocavam-se os discos de PVC para fornecer o máximo de contato do papel com o solo, davam-se várias voltas com o filme plástico e fixava o conjunto com fita adesiva (Figuras 3.3d, 3.3e e 3.3f). Em seguida, os corpos de prova foram identificados e deixados na câmara úmida por 7 dias, dentro de um recipiente com tampa.
- Após esse período, os corpos de prova foram abertos e determinou-se o teor de umidade do papel filtro. Para isso, vários cuidados foram tomados:
 - ✓ Removido o filme plástico que envolvia o corpo de prova, o papel filtro foi retirado com auxílio de uma pinça e colocado na balança analítica com precisão de 0,0001g. Durante o processo de transferência, o papel filtro não ficou exposto ao ar por mais que 5 segundos, para minimizar alguma perda de sua umidade.
 - ✓ Após a pesagem, o papel filtro úmido foi colocado na estufa, por um período de 2 horas, a uma temperatura de 105°C.
 - ✓ Após a secagem em estufa, o papel foi pesado para determinar o seu peso seco. Mais uma vez, o processo de transferência deve ser o mais rápido possível, para evitar algum ganho de umidade pelo papel filtro em função da umidade do ambiente.
- Calculado o teor de umidade do papel filtro (w), a sucção matricial do solo é determinada utilizando as curvas de calibração do papel filtro Whatman N°42 obtidas por CHANDLER *et al.*, (1992). As equações dessas curvas são:

I) Para umidades do papel filtro $> 47\%$ Sucção (kPa) = $10^{(6.05-2.48\log w)}$

II) Para umidades do papel filtro $\leq 47\%$ Sucção (kPa) = $10^{(4.84-0.0622w)}$

Ao se utilizar esta técnica, o ideal é que cada valor de sucção seja determinado pela média de pelo menos dois resultados.

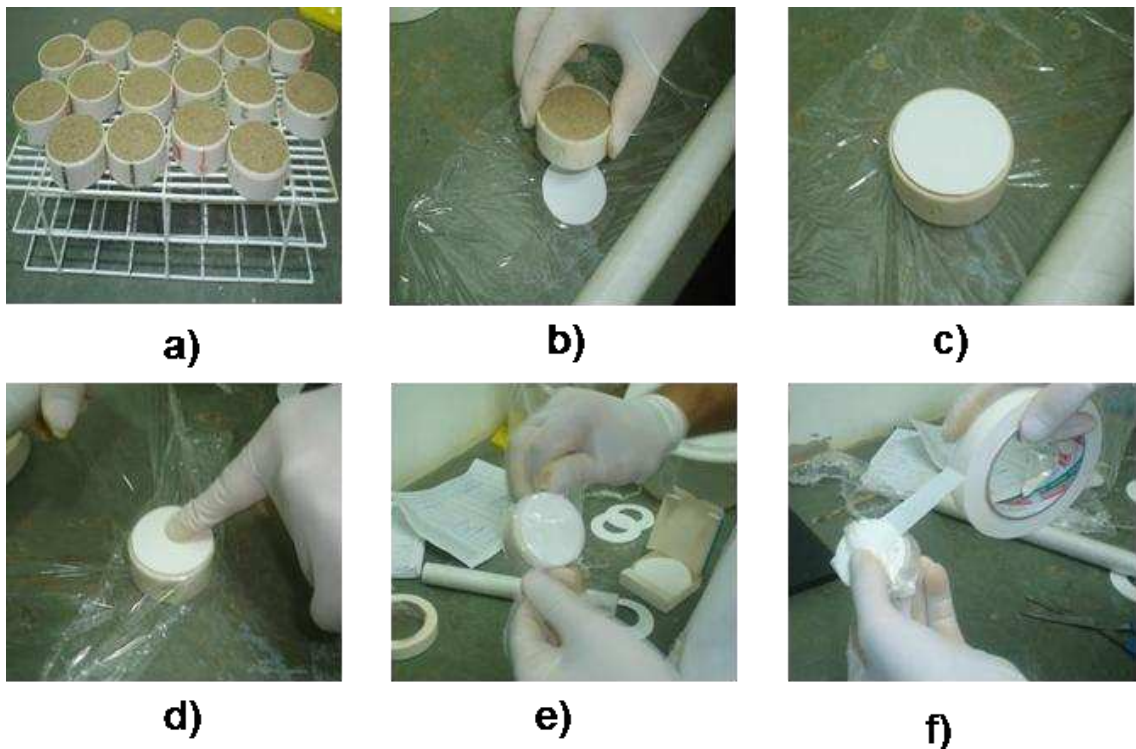


Figura 3.3: Detalhes da preparação dos corpos de prova. (a)Secagem dos corpos de prova após serem umedecidos; (b) Colocação do papel filtro inferior; (c) Colocação do papel filtro superior; (d) Colocação do disco de PVC; (e) Proteção com filme plástico; (f) Fixação com fita adesiva.

3.3.2 Placa de pressão

Para obtenção dos pontos da curva usando a placa de pressão, admite-se que a técnica de translação de eixos (Hilf, 1956) é válida. Para diminuir o tempo de execução do ensaio, foram utilizadas três células, produzidas pelo setor de usinagem da UFV, aplicando-se, em cada uma, pressões de ar (sucções) diferentes. O procedimento adotado foi:

Após a moldagem dos corpos de provas nos anéis de PVC, determinaram-se a massa de cada anel e o teor de umidade.

- Os corpos de provas foram saturados e colocados nas câmaras de pressão (Figura 3.4).
- A cada 24 horas os corpos de prova eram retirados das câmaras, pesados e recolocados nas câmaras até que os pesos das amostras permanecessem constantes. Calculou-se o teor de umidade

volumétrico, ou o grau de saturação da amostra, correspondente à sucção aplicada.

- Aumentou-se gradativamente a sucção, repetindo o processo descrito anteriormente, obtendo-se, assim, vários pontos da curva. O valor máximo aplicado foi de 450 kPa.



Figura 3.4: Placas de pressão usadas para determinação da curva característica (LEC/UFV).

3.4 Determinação da condutividade hidráulica não saturada usando o permeâmetro de parede flexível de vazão constante

Para obter a função de condutividade hidráulica, utilizou-se o permeâmetro desenvolvido por Guimarães (2008) (Figura 3.5). Trata-se de um permeâmetro de parede flexível com controle de sucção para determinação das condutividades hidráulicas em solos saturados e não saturados, usando uma bomba de fluxo para impor uma vazão constante. A metodologia do equipamento é a do regime permanente onde se impõe uma vazão constante e se monitora as diferenças de pressão entre o topo e a base da amostra até que esta atinja um valor constante.



Figura 3.5: Vista geral do equipamento (Guimarães, 2008).

Este permeâmetro é capaz de obter funções de condutividade hidráulica em trajetórias de secagem e umedecimento. Na Figura 3.6 pode ser observado o esquema completo do equipamento.

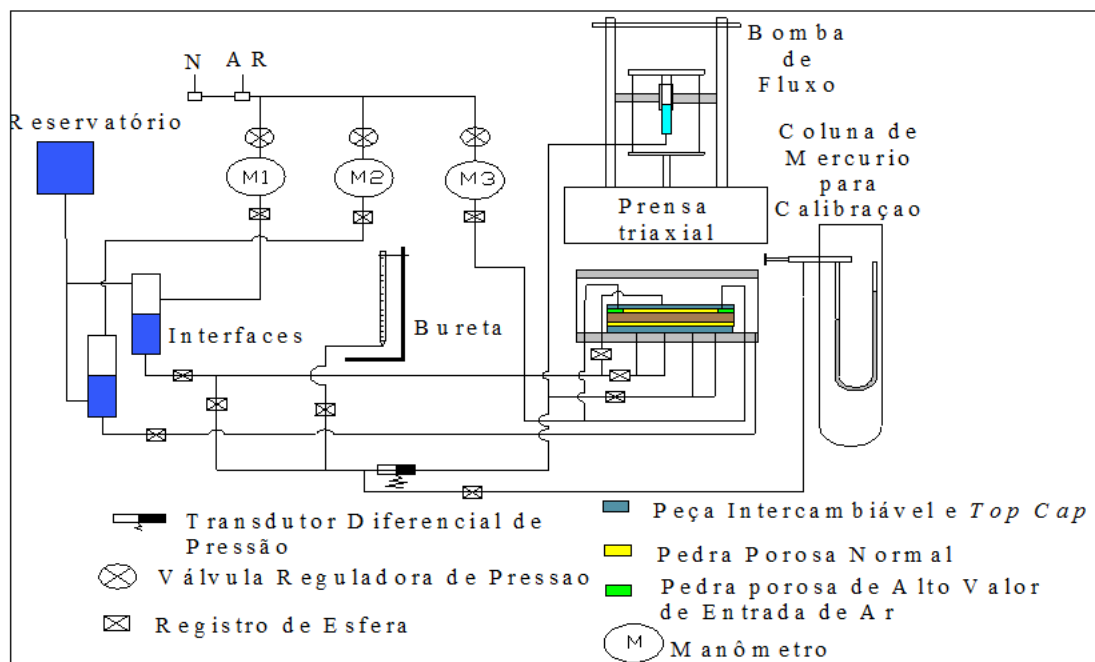


Figura 3.6: Desenho esquemático dos equipamentos utilizados para determinação das condutividades hidráulicas (GUIMARÃES, 2008).

Para aplicação da vazão constante na amostra, foi utilizada uma bomba de fluxo com diâmetro reduzido que é acoplada a uma prensa triaxial com controle analógico de velocidade (Figura 3.7a e 3.7b).

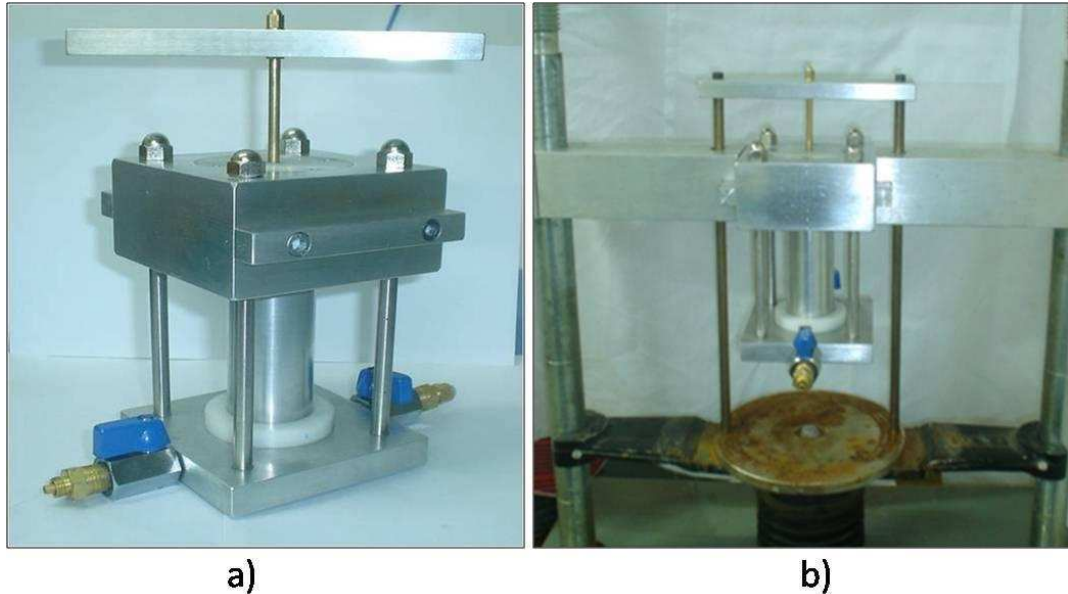


Figura 3.7: a) Bomba de fluxo; b) Arranjo do conjunto na prensa triaxial (GUIMARÃES, 2008).

O sistema de monitoramento consta de um transdutor diferencial de pressão e interfaces ar/água e um sistema de aquisição de dados de 16 bits com quatro canais, fabricado pela WykehamFarrance. O permeâmetro é capaz de determinar a condutividade hidráulica com valores maiores que 10^{-10} cm/seg.

Após realizar a calibração dos transdutores diferenciais de pressão, efetua-se a saturação das pedras porosas de alto valor de entrada de pressão de ar. Esta saturação tem por objetivo garantir a continuidade da água entre o corpo de prova, a pedra-porosa e o resto do sistema de água (DELGADO, 2000). A saturação é realizada mediante um fluxo de água através das pedras porosas especiais. Isto é executado enchendo-se com água de arada a câmara do permeâmetro e aplicando-se uma diferença de pressão entre a água da câmara e as câmaras de água adjacentes à pedra para, desta forma, forçar a passagem da água. Esta operação é mantida até que o volume de água que atravessa as pedras permaneça constante no tempo.

Além da saturação dos discos cerâmicos, é também necessária a saturação das linhas de contrapressão e das câmaras de água adjacentes às pedras porosas de alta entrada de pressão de ar. Isso se faz, aplicando uma pressão de 200 kPa para dissolver as micro-bolhas que poderiam ainda restar na água.

3.4.1 Preparação das Amostras

Para obtenção das amostras do ensaio no permeâmetro de parede flexível, o solo foi compactado estaticamente, usando um cilindro CBR e uma prensa. O solo é umedecido e prensado até a altura pré-determinada para obtenção do grau de compactação desejado. Após extração da amostra compactada do cilindro CBR, moldavam-se os corpos de prova utilizando-se o terço central da amostra (Figura 3.8b). Observa-se na Figura 3.8c, a amostra após ser rasada. O anel utilizado para moldagem, especialmente fabricado para esse fim, possui o mesmo diâmetro da pedra porosa especial. A amostra possui 104,78mm de diâmetro.

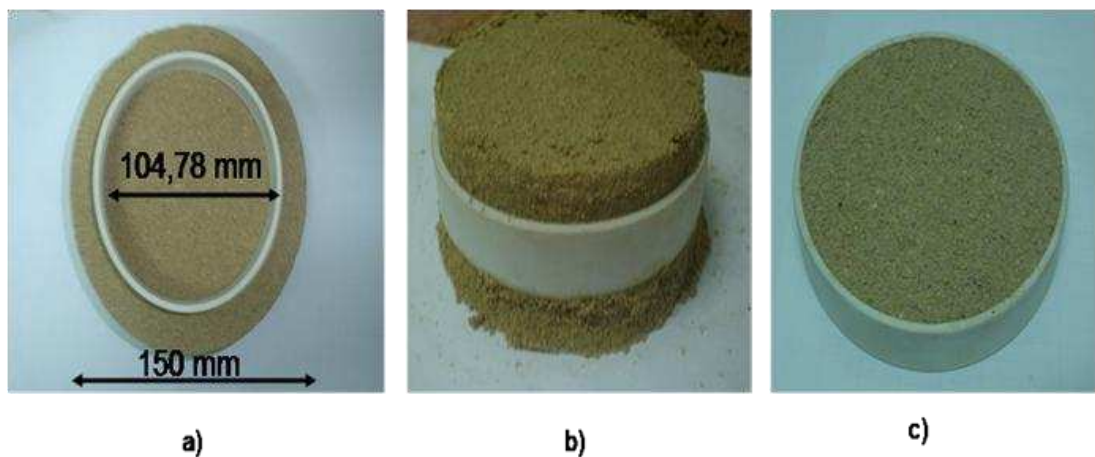


Figura 3.8: (a) Moldagem das amostras para ensaio de condutividade hidráulica; (b) Amostra posicionada no terço médio; (c) Corpo de prova moldado para o ensaio de condutividade hidráulica.

3.4.2 Montagem do Ensaio

Antes de posicionar o solo no permeâmetro, é necessário conhecer o valor da condutividade hidráulica saturadas pedras porosas de alta entrada de pressão de ar, para que se possa conhecer a perda de carga gerada pelo fluxo através delas e assim calcular a perda de carga ocorrida no solo.

A condutividade obtida é apenas da pedra porosa colocada na peça intercambiável, uma vez que a pedra do topo é igual a da base, e, portanto, tem o mesmo valor de entrada de ar e a mesma condutividade hidráulica saturada. A água que percola é a que está na câmara, que estava inicialmente com a mesma pressão em todo o sistema. O fluxo gera um diferencial de pressão, que é monitorado constantemente na tela do computador. Quando a diferença de pressão se torna constante, dá-se por finalizado o ensaio. A condutividade hidráulica da pedra porosa é obtida usando a lei de Darcy.

Após a moldagem do corpo de prova, a amostra é colocada sobre a pedra porosa da base e o anel de moldagem que tem o mesmo diâmetro da pedra porosa especial é cuidadosamente retirado. É necessário um cuidado especial nesta etapa, para que não ocorra a ruptura do solo, amolgamento e perda de material. Foram usados anéis de borracha no *top cap* e na peça intercambiável para vedar o conjunto. Detalhes da montagem do permeâmetro podem ser visualizados nas Figuras 3.9a e b.

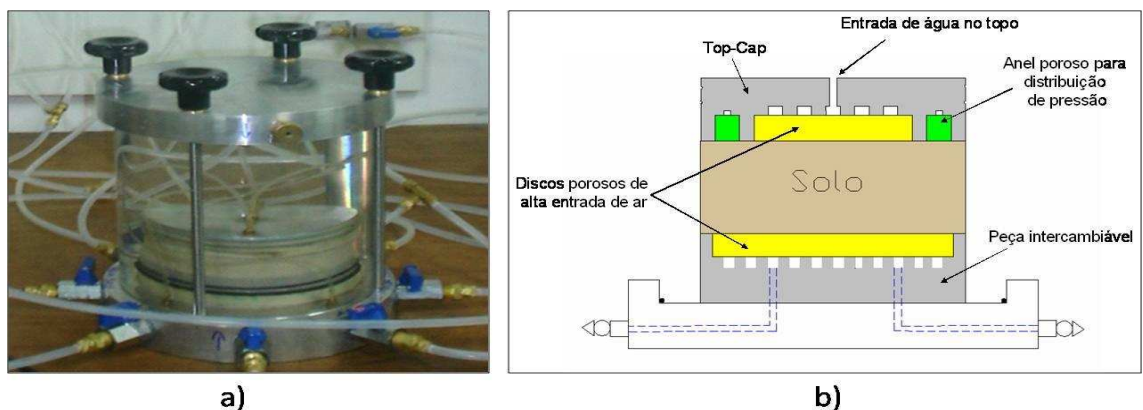


Figura 3.9: a) Célula de ensaio montada; b) Esquema da base com a peça intercambiável e *top cap*(GUIMARÃES, 2008).

3.4.3 Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada

Para a determinação da condutividade hidráulica saturada, primeiramente realiza-se a saturação da amostra aplicando-se um fluxo ascendente até que a vazão se torne constante. Após o processo de saturação, aplica-se o fluxo pela amostra por meio da bomba de fluxo, registrando as diferenças de pressão entre o topo e a base do conjunto (pedra da base -solo- pedra do topo).

O coeficiente de permeabilidade das pedras porosas de alta entrada de ar tem influência no cálculo da condutividade hidráulica do solo, devendo-se, assim, considerar a perda de carga nas pedras porosas.

O coeficiente de permeabilidade do solo, k_{solo} , pode ser calculado considerando o conjunto como três materiais diferentes e que:

$$v = v_{\text{base}} = v_{\text{solo}} = v_{\text{topo}} \text{Equação 3.2}$$

e

$$h = h_{\text{base}} + h_{\text{solo}} + h_{\text{topo}} \text{Equação 3.3}$$

Em que v é velocidade do fluxo através do conjunto pedra-solo-pedra, v_{base} é a velocidade de fluxo na pedra porosa da base, v_{solo} é a velocidade do fluxo através do solo, v_{topo} é a velocidade do fluxo na pedra porosa do topo. E h é a perda de carga total e h_{base} , h_{solo} , h_{topo} são as perdas de carga de cada camada.

Utilizando a lei de Darcy na Equação (3.2), pode-se escrever:

$$k \frac{h}{H} = k_{\text{topo}} \frac{h_{\text{topo}}}{H_{\text{topo}}} = k_{\text{solo}} \frac{h_{\text{solo}}}{H_{\text{solo}}} = k_{\text{base}} \frac{h_{\text{base}}}{H_{\text{base}}} \text{Equação 3.4}$$

Usando os resultados desta última Equação na Equação 3.3, pode-se escrever:

$$k_{\text{solo}} = \frac{H_{\text{solo}}}{\frac{H}{k} - \left(\frac{H_{\text{topo}}}{k_{\text{solo}}} + \frac{H_{\text{base}}}{k_{\text{base}}} \right)} \text{Equação 3.5}$$

Em que H_{solo} é a espessura da amostra de solo, H_{topo} e H_{base} são as alturas das pedras porosas de alta entrada de ar, H é a altura total das três camadas. k_{topo} e k_{base} são os coeficientes de permeabilidade das pedras porosas de alta entrada de ar e k é o coeficiente de permeabilidade do conjunto das três camadas, calculado pela Equação 3.6.

$$k = \frac{Q_w}{i \times A} \text{ Equação 3.6}$$

Onde Q_w é vazão imposta pela bomba de fluxo, i é o gradiente gerado e, A , a área da seção transversal da amostra de solo. O gradiente i é calculado por meio da diferença de pressão medida pelo transdutor diferencial.

Todo o ensaio é realizado com temperatura controlada a 20°C, descartando-se, assim, o efeito da variação da viscosidade da água com a temperatura.

3.4.4 Aplicação de Sucção na Amostra

A aplicação de sucção na amostra dá-se pelo topo, sendo o valor desejado controlado pelo manômetro. No momento em que a diferença de pressão se torna constante, considera-se que a equalização da sucção na amostra foi totalmente atingida.

A diferença entre a pressão de ar na amostra e a pressão confinante deve sempre ser no mínimo igual a 14 kPa (DANIEL, 1983) para evitar que o fluido passe entre a membrana e o solo.

O tempo necessário para atingir o equilíbrio de sucção na amostra depende, principalmente, da altura da amostra (distância de drenagem), número de faces drenantes, tamanho dos poros do material ensaiado, e da trajetória seguida, isto é, trajetória de secagem ou umedecimento (DELGADO, 2000).

3.4.5 Determinação da Condutividade Hidráulica Não Saturada

Para a determinação da condutividade não saturada, a lei de Darcy também é válida (ELZEFTAWY and CARTWRIGHT, 1981). A obtenção da condutividade hidráulica em função da sucção aplicada $K(\psi)$ é obtida também pela Equação 3.5. O procedimento de ensaio é semelhante ao procedimento da condutividade saturada. Após o equilíbrio da sucção, aciona-se a bomba de fluxo, iniciando-se os registros das diferenças de pressão. Este processo de aplicação de pressão, equalização da sucção e determinação da condutividade não saturada poderá ser repetido várias vezes, variando apenas a sucção a ser aplicada. Ao final do ensaio, a tensão confinante e a pressão de ar aplicada no topo da amostra são simultaneamente removidas. A célula é, então, esvaziada, e o corpo de prova removido e levado, imediatamente, para a estufa a fim de se determinar o seu teor de umidade no final do ensaio.

3.5 Equipamento desenvolvido para obtenção da CRA e medida direta da função de condutividade em centrífuga

Para realização dos ensaios em centrífuga, foi necessária a adaptação das peças giratórias. Foi realizado um estudo sobre os métodos para obtenção da CRA e da função de condutividade utilizando do método em centrífuga e só então foi definido um desenho final das peças.

Tradicionalmente, as centrífugas comercialmente disponíveis dispõem de raios entre 18 e 35 cm e velocidades angulares que podem variar de 300 a 6000 rpm, contendo quatro ou seis cestas giratórias. A centrífuga usada neste trabalho tem 18 cm de raio, possui uma rotação máxima de 3500 rpm, chega a um valor máximo de sucção na amostra de 1200 kPa e contém 4 cestas giratórias nas quais são colocadas as amostras de solo durante um teste (Figura 3.10). As cestas giratórias da centrífuga são móveis; ficam na vertical quando a centrífuga está parada e, a medida que a centrífuga começa a rodar, giram para a posição horizontal.

Neste trabalho, a forma das cestas foi modificada para facilitar a retirada da amostra a cada parada, para se obter a variação da umidade

com o tempo, necessária para obter a função de condutividade, utilizando da técnica do regime transiente de passos múltiplos.



Figura 3.10: Centrifuga médica Cientec CT-6000

Foram confeccionados 4 conjuntos de peças, sendo duas contendo 26,5 mm de altura (Figuras 3.11a e b) e duas de 50,6 mm (Figura 3.12 a e b). As peças foram confeccionadas em alturas diferentes de modo a possibilitar diferentes níveis de sucções para uma mesma rotação. O conjunto consta de balde, reservatório e anel amostrador confeccionados em alumínio.

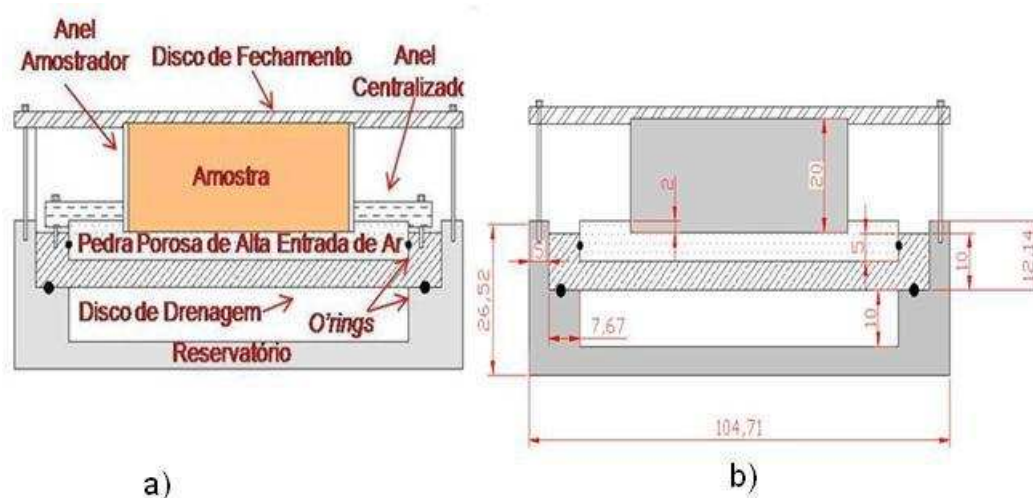


Figura 3.11: a) detalhe das peças utilizadas no projeto; b) dimensões em mm.

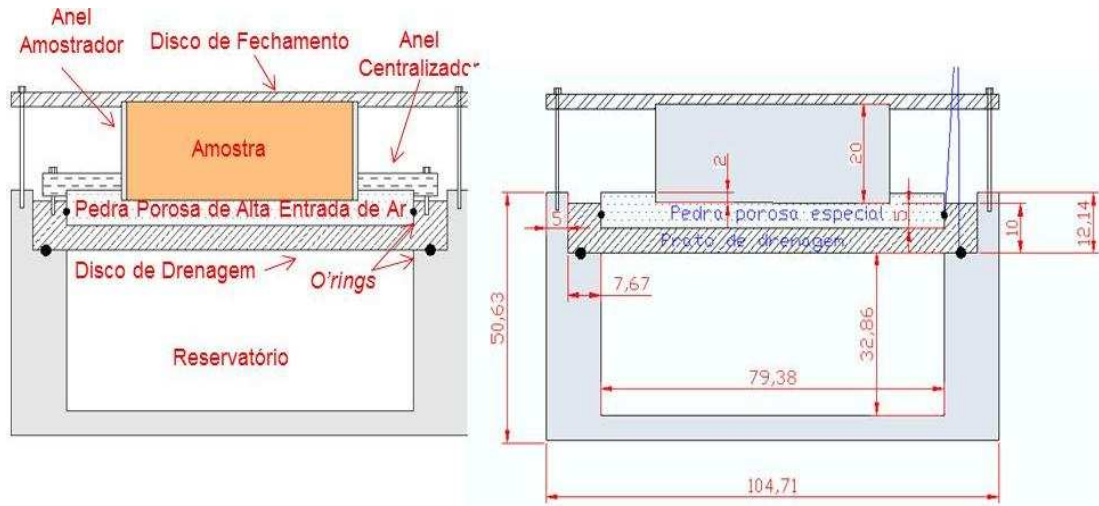


Figura 3.12: a) detalhe das peças utilizadas no projeto; b) dimensões em mm.

O disco de drenagem, disco de fechamento e anel centralizador foram confeccionados em acrílico (Figuras 3.13 e 3.14a e b). O disco de fechamento foi necessário para evitar a evaporação durante a centrifugação.

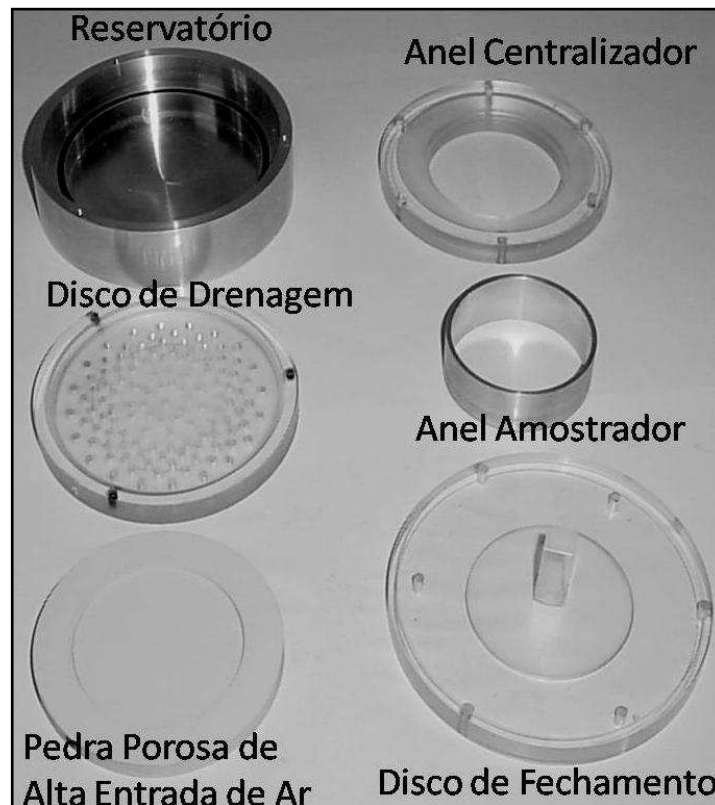


Figura 3.13: Detalhes das peças que compõe o conjunto.

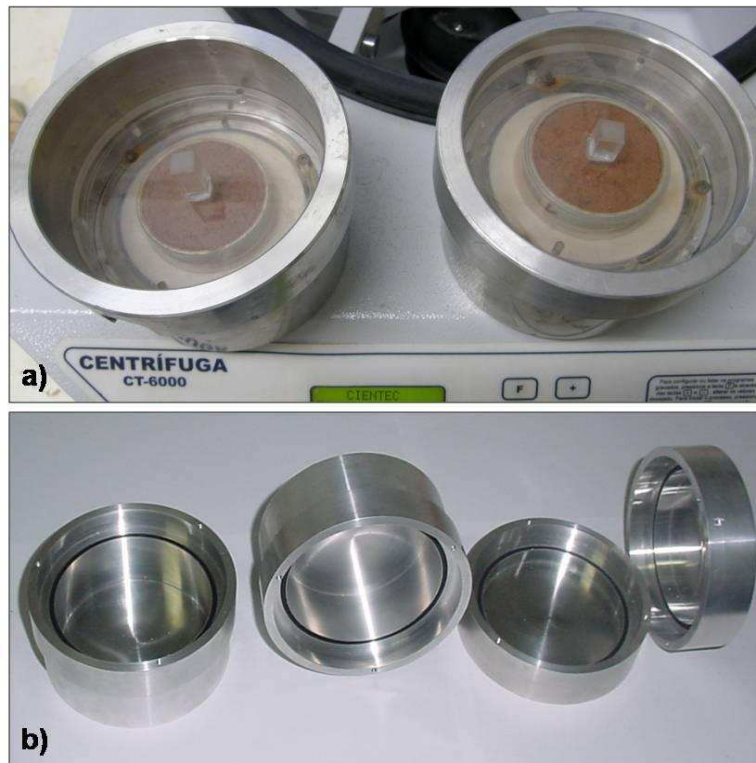


Figura 3.14: a) baldes b) reservatórios

Todas as peças podem ser usadas simultaneamente com amostras de solo posicionadas em diferentes distâncias do centro de rotação para se obter valores de sucção diferentes para cada nível de rotação para ambas as peças (Tabela 3.2). Os raios r_1 e r_2 foram de 15,41 e 17,41 cm para as peças de 26,52 mm e 13,06 e 15,06 cm para as peças de 50,63 mm. Para o cálculo das sucções aplicadas em função da rotação, foi utilizada a Equação 2.32.

Tabela 3.2: Sucções impostas para os níveis de rotação.

Velocidade de rotação (RPM)	Peças de 50,6 mm	Peças de 26,5 mm
	Sucção (kPa)	
300	2,9	3,4
700	15,7	18,3
1000	32,0	37,4
2000	128,1	149,6
3000	288,3	336,5
3500	392,4	458,0

Para se obter sucções menores que as expostas na Tabela 3.2, os raios (r_1) e (r_2) (Equação 2.32) podem ser diminuídos. Isto foi possível adaptando uma peça de 2,00 cm no fundo do balde, diminuindo assim os raios de rotação. A sucção mínima obtida pelo método de centrífuga é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Sucção mínima imposta para o nível de rotação.

Velocidade de rotação (RPM)	Peças de 50,6 mm	Peças de 26,5 mm
	Sucção (kPa)	
300	2,3	2,7

3.6 Metodologias para o equipamento desenvolvido

3.6.1 Preparação das amostras

O processo de moldagem das amostras foi realizado seguindo o seguinte procedimento:

- a) O solo é umedecido aspergindo água até atingir o teor de umidade desejado e deixado em descanso por 24 horas em embalagem plástica.
- b) De posse do volume do anel, teor de umidade e peso específico dos sólidos, determina-se a massa de solo úmido a ser colocado no molde de PVC, confeccionado especificamente para este fim. O diâmetro interno do molde tem o mesmo diâmetro externo do anel amostrador da centrífuga (Figura 3.15 a).
- c) O solo é compactado de forma estática, utilizando um cilindro de PVC, que possui o mesmo diâmetro do anel amostrador (Figura 3.14b). Para realizar a compactação, utilizou-se uma prensa (Figura 3.14 c).
- d) Utiliza-se um extrator para retirar a amostra, em que mantendo-se fixo o molde e empurrando-se a parte interna, composta do anel amostrador e cilindro (Figura 3.15 d).



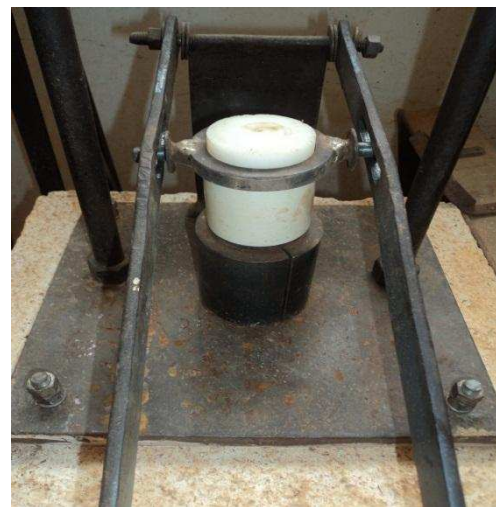
a)



b)



c)



d)

Figura 3.15: a) Molde e anel amostrador; b) Molde e cilindro de PVC; c) Compactação utilizando prensa; d) Extrator.

3.6.2 Obtenção da curva característica usando centrifuga

Antes de iniciar os ensaios, as pedras porosas de alta entrada ar que compõem o conjunto devem estar saturadas. As pedras são colocadas em uma câmara de pressão e submetidas por 24 horas a uma pressão de vácuo de 100 kPa. As pedras selecionadas foram de 1000 kPa de valor de entrada de ar.

As quatro peças podem ser usadas simultaneamente, podendo-se obter quatro curvas completas em algumas horas. A partir das peças posicionadas são obtidos valores de sucções relacionados pela Equação 2.31. As rotações

impostas com as respectivas sucções associadas podem ser visualizadas nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Todo o ensaio é realizado com temperatura controlada a 20°C, descartando-se, assim, o efeito da variação da viscosidade da água com a temperatura.

3.6.2.1 Validação do método para obtenção da CRA

Para validar o método de obtenção das características hidráulicas dos solos, as CRA obtidas pelos métodos tradicionais foram comparadas com as obtidas em centrífuga. Uma equação semelhante à Equação 3.1 foi utilizada para verificar a discrepância entre as curvas teóricas (métodos tradicionais e centrífugo) gerada a partir dos parâmetros otimizados pelo *Solver*.

3.6.3 Obtenção da função de condutividade usando centrífuga

A amostra inicialmente saturada é submetida a drenagem, e os valores de umidade obtidos, com o tempo, para os valores de sucção imposto. Em cada instante, as medições de umidade e pressão permitem o cálculo da condutividade hidráulica, para uma ampla faixa de valores de sucção.

Neste trabalho, os ensaios são caracterizados como vazão em passos múltiplos. Com esta metodologia, é aplicado um acréscimo no valor de sucção matricial e registra-se o volume de água que sai do corpo de prova. Para cada rotação, a centrífuga é parada em intervalos pré-determinados, obtendo assim a variação do teor de umidade com o tempo. Nos primeiros instantes, há uma drenagem maior, porque a água contida nos poros maiores é drenada mais facilmente. A Figura 3.17 apresenta uma curva de drenagem típica.

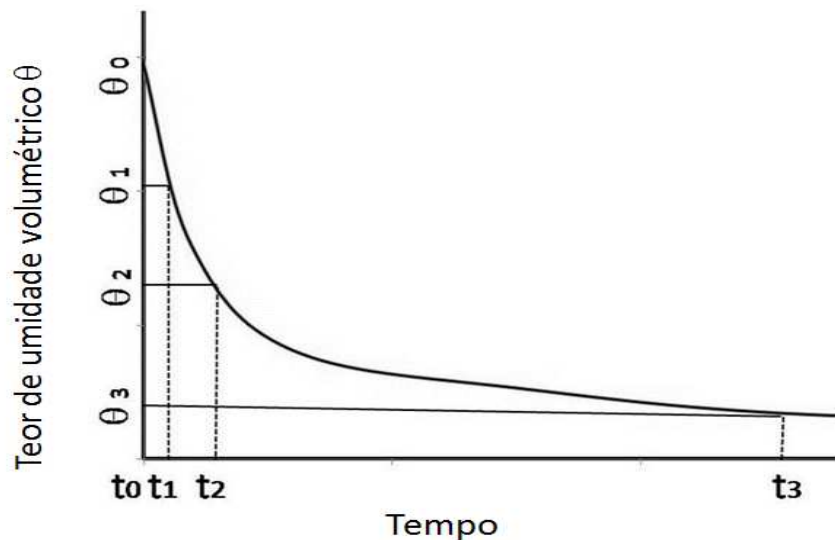


Figura 3.17: Comportamento durante a centrifugação.

Para este procedimento, a pedra porosa de alta entrada de ar deverá estar saturada durante o ensaio e ter a condutividade hidráulica maior que a do solo saturado, para garantir que toda a água drenada do solo, seja encaminhada para o reservatório.

Para cada rotação imposta, obtém-se a vazão e, conseqüentemente, a velocidade de fluxo. Em seguida, calcula-se a condutividade hidráulica, usando-se a Equação 2.30. Usou-se esta Equação no lugar da Equação 2.27 porque o gradiente de sucção gerado entre as faces da amostra é mínimo uma vez que as amostras tem pequena espessura (20mm).

Os dados obtidos pelo ensaio em centrifuga foram comparados pelo modelo empírico proposto por van Genuchten-Mualen, Equação 2.17, em função da saturação efetiva (Equação 3.7).

$$\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \text{ Equação 3.7}$$

3.6.4 Tempo de centrifugação

Para determinação do tempo mínimo de centrifugação, foi utilizada a metodologia desenvolvida por Smith (1967) e utilizada por REIS *et al*, 2011. Esta metodologia consiste em plotar a variação do volume de água versus a raiz do tempo (Figura 3.16). O tempo utilizado para obtenção da

condutividade hidráulica não saturada é obtido pela intersecção da linha tangente da curva com a tangente horizontal assintótica.

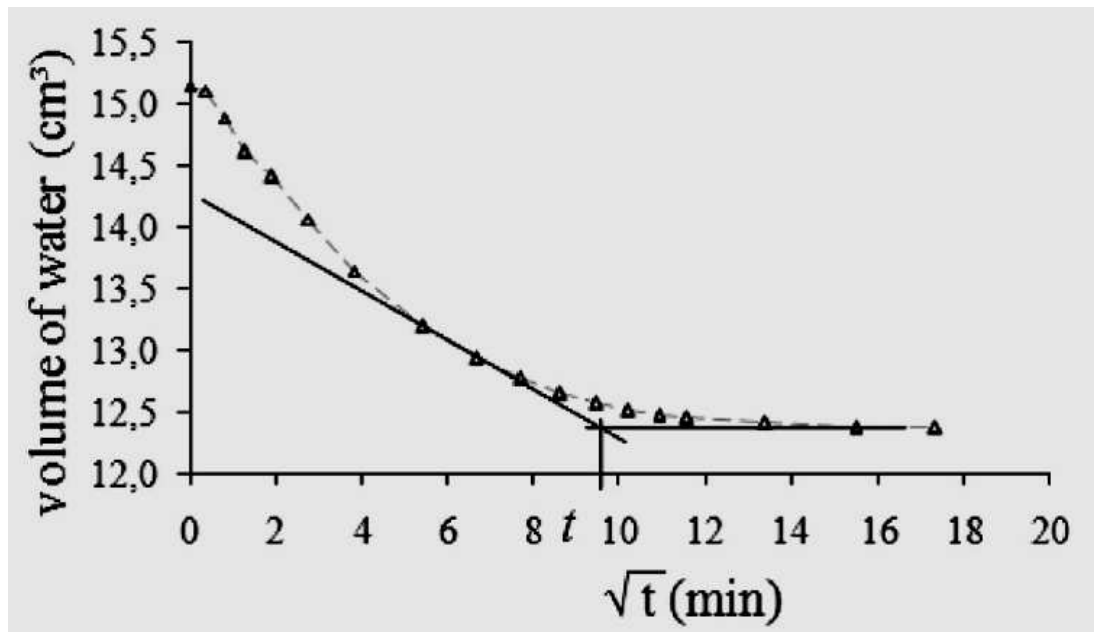


Figura 3.16: Obtenção do tempo de centrifugação mínimo para obtenção do equilíbrio de umidade do solo (REIS *et al*,2011).

Os tempos estipulados para a parada da centrifuga foram de 2, 4, 8, 15, 30 e 60 minutos. Quando necessário, tempos maiores foram acrescentados até que atingisse um valor constante de umidade.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Considerações gerais

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios de caracterização e das curvas de retenção de água dos solos usados, utilizando os métodos tradicionais e a centrifuga. Apresentam-se também as funções de condutividade hidráulica obtidas para os mesmos solos utilizando o permeâmetro desenvolvido por Guimarães (2008) e pelo método de passos múltiplos usando a centrifuga.

4.2 Solos – Caracterização geotécnica

Nas Figuras 4.1 e 4.2, são apresentadas as curvas granulométricas dos solos utilizados classificados, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS), como CH (argila inorgânica de alta compressibilidade) e SC (areia argilosa).

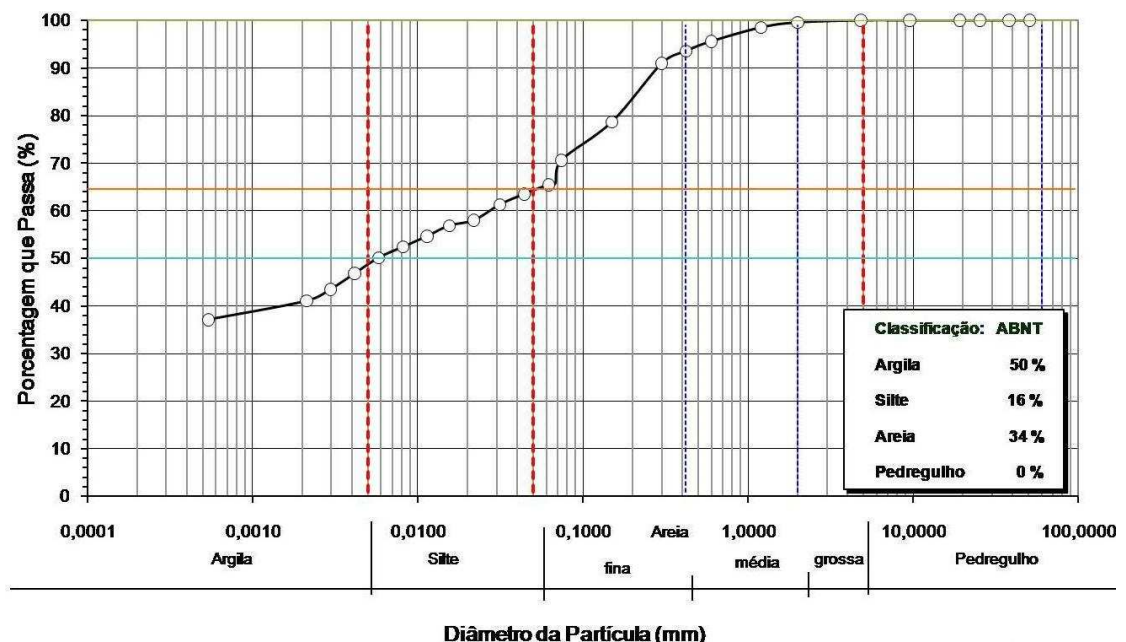


Figura 4.1: Curva granulométrica do solo Campo Experimental (CH).

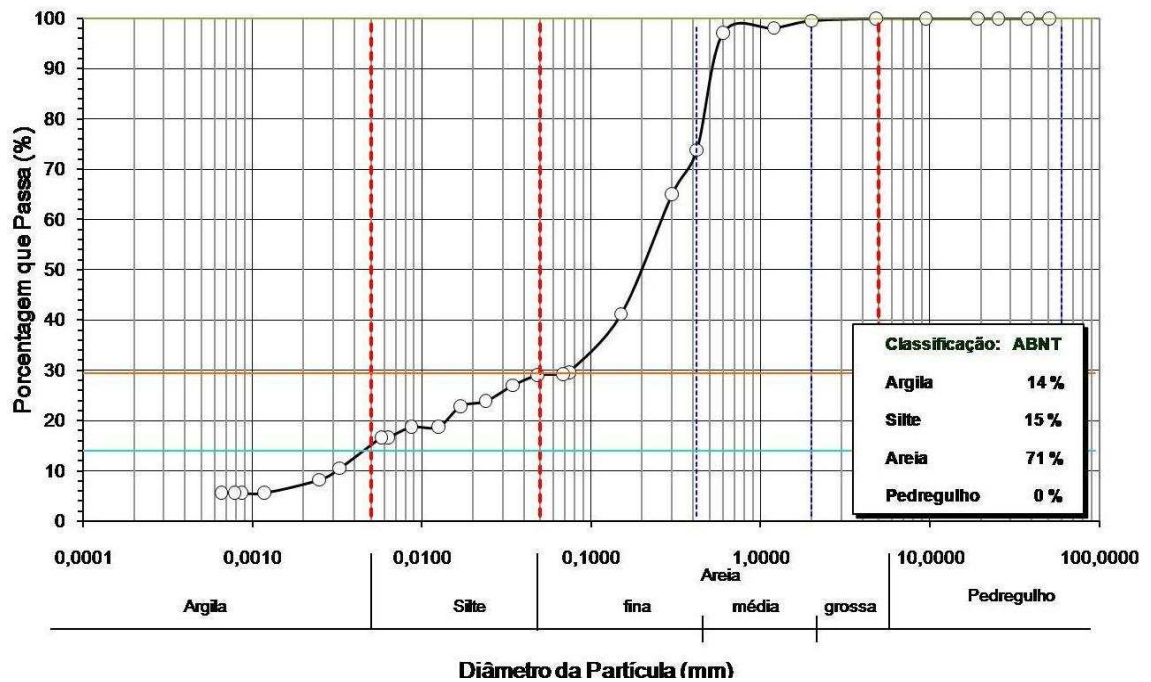


Figura 4.2: Curva granulométrica do solo Vila Secundino (SC, areia argilosa)

Os solos escolhidos possuem estruturas bem diferentes. O solo CH é predominantemente argiloso, possuindo maiores valores de entrada de ar na sua curva de retenção. Para teores de umidades gravimétricos pequenos, é possível se observar a formação de pequenos “torrões” nas amostras.

Na Tabela 4.1 está apresentada uma síntese dos dados da caracterização geotécnica dos solos utilizados.

Tabela 4.1: Caracterização geotécnica dos solos

Solo	Fração granulométrica (%)			Limites de Atterberg (%)			γ_s (kN/m ³)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	Teor de umidade ótima (%)
	Areia	Silte	Argila	LL	LP	IP			
SC	71	15	14	25	16	9	27,77	1,763	14,5
CH	34	16	50	60	30	30	27,17	1,472	28,2

As amostras foram moldadas com diferentes desvios do teor de umidade ótimo, tanto no ramo seco como no ramo úmido da curva de compactação. Três amostras foram moldadas para o solo SC: uma com 97% do grau de compactação (GC) no ramo seco; outra com 97% do GC no ramo

úmido; e, a terceira, com o peso específico máximo (GC=100%). Com o solo CH, foram obtidas quatro amostras: duas no ramo seco e duas no ramo úmido da curva de compactação, com 90% e 95% do GC.

Na Tabela 4.2 estão apresentados os índices obtidos após a compactação das amostras. As amostras foram nomeadas de acordo com o solo utilizado (SC, areia argilosa; CH, argila de alta plasticidade) e sua relação com o grau de compactação. Os sub índices d e m, significam seco (*dry*) e úmido (*moist*).

Tabela 4.2: Índices obtidos após a compactação das amostras.

Solo	Amostra	ρ_{natural} (g/cm ³)	ρ_{seca} (g/cm ³)	Teor de umidade de moldagem (%)	Desvio do teor de umidade ótimo (%)	Grau de compactação (%)
SC	SC97d	1,850	1,710	9,3	-5,2	97
	SC100	2,020	1,760	14,6	0,1	100
	SC97m	2,039	1,710	19,4	4,9	97
CH	CH90d	1,550	1,330	16,9	-11,3	90
	CH95d	1,720	1,400	22,9	-5,3	95
	CH95m	1,860	1,400	32,7	4,5	95
	CH90m	1,819	1,330	36,6	8,4	90

Nas Figuras 4.3 e 4.4 estão apresentadas as curvas de compactação, obtidas com energia do Proctor Normal e as curvas de condutividade hidráulica saturada, obtidas com um permeâmetro de carga constante. Observa-se que, para o solo SC, o comportamento experimental corresponde ao esperado, uma vez que no ramo seco, a condutividade hidráulica diminui à medida que a densidade seca aumenta e, para uma mesma densidade seca, a condutividade hidráulica é maior no ramo seco do que no ramo úmido. No entanto, este comportamento esperado, não se observou nos resultados experimentais obtidos com o solo CH, provavelmente porque o ensaio deveria ter sido feito com um permeâmetro de carga variável.

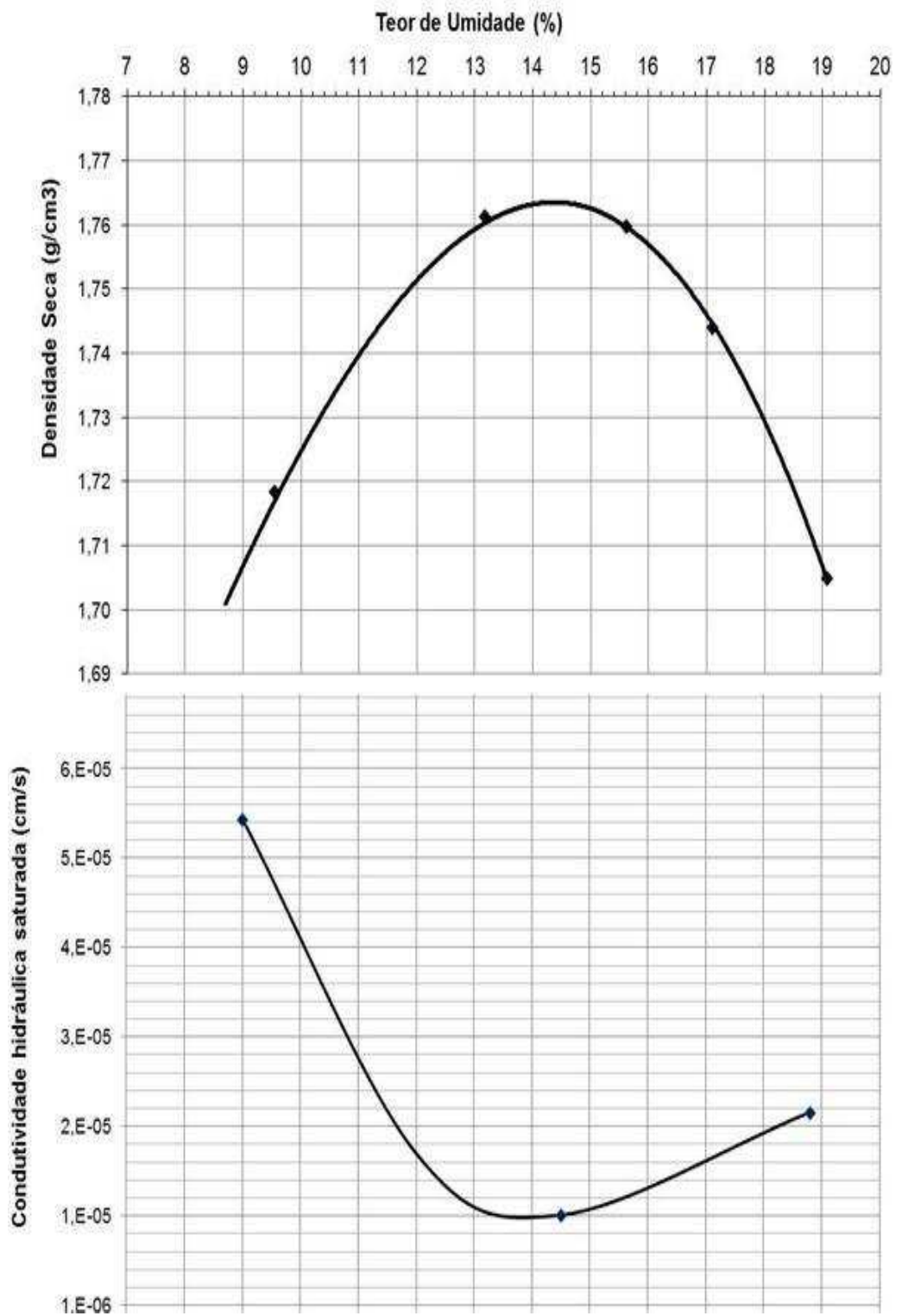


Figura 4.3: Curvas compactação e condutividade hidráulica saturada do solo SC.

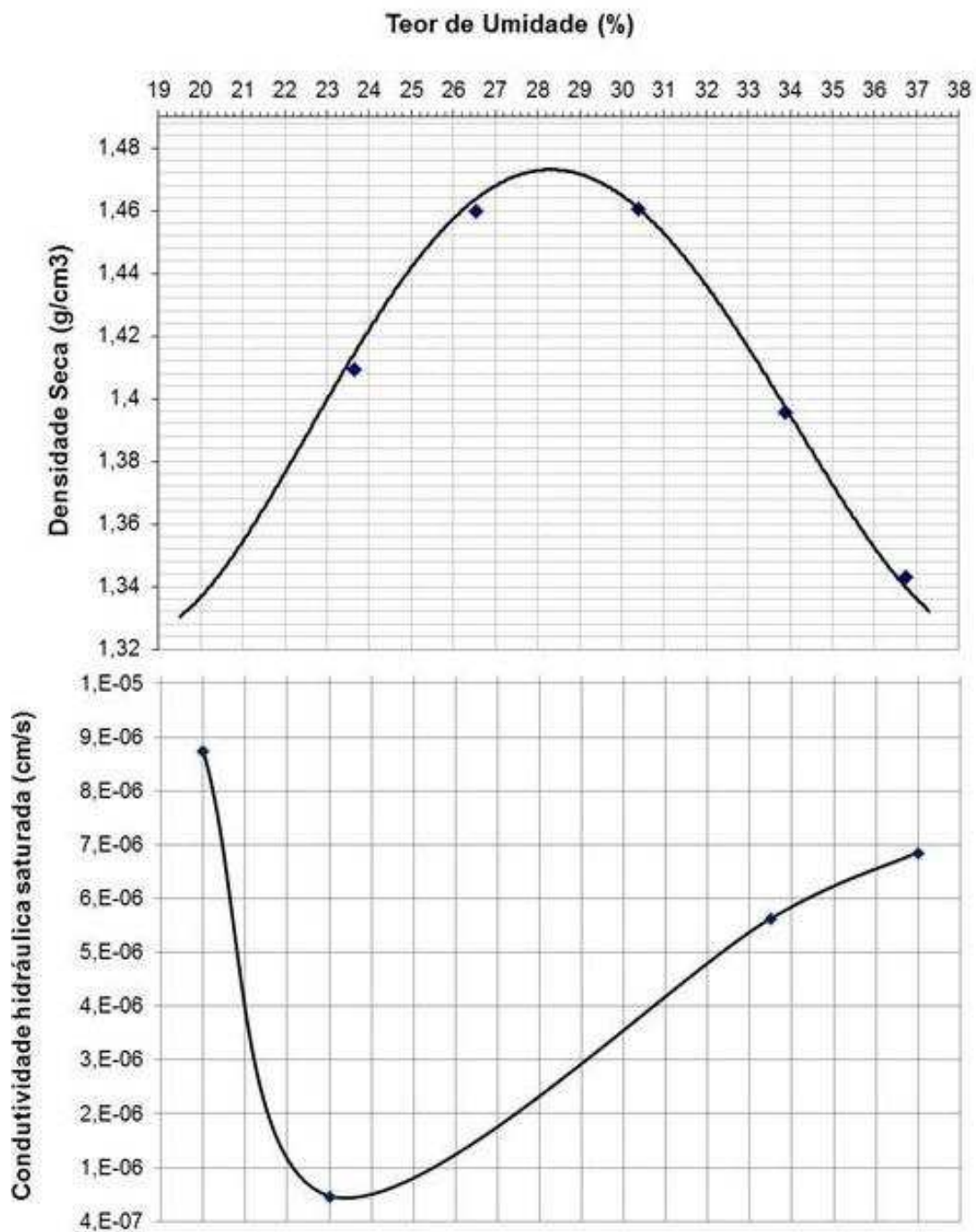


Figura 4.4: Curvas compactação e condutividade hidráulica saturada do solo CH.

Na tabela 4.3 estão apresentados os valores individuais das condutividades hidráulicas saturadas para as amostras do solo SC e CH.

Tabela 4.3: Resultados da condutividade hidráulica saturada dos solos.

Solo	Amostra	Condutividade hidráulica saturada (cm/s)
SC	SC97d	5,54E-05
	SC100	1,11E-05
	SC97m	2,26E-05
CH	CH90d	9,15E-06
	CH95d	8,73E-07
	CH95m	6,03E-06
	CH90m	7,26E-06

4.3 Determinação da condutividade hidráulica não saturada utilizando o permeâmetro com sucção controlada

Foram determinadas a condutividade hidráulica não saturada utilizando o permeâmetro com sucção controlada nas amostras SC97d e SC100, com sucções impostas de 25, 50 e 100 kPa.

Para determinar a condutividade hidráulica não saturada do solo, utilizando o permeâmetro desenvolvido, o tempo para atingir o equilíbrio da sucção no interior da amostra depende principalmente da textura do solo. Na amostra SC97d, o tempo mínimo para estabelecer o equilíbrio de sucção foi de 42 horas, para a sucção de 25 kPa. O tempo médio de cada ensaio para determinar a condutividade hidráulica não saturada neste solo com textura arenosa foi de 21 dias.

O solo CH, com textura mais fina, argilosa, tem baixa condutividade hidráulica e demandaria um tempo médio bem maior (meses) do que o da amostra SC para estabelecer o equilíbrio das sucções. Além disso, as sucções a serem impostas nas amostras teriam que ser maiores que 100 kPa, valor de entrada de ar do solo. Neste caso, a determinação da condutividade hidráulica não-saturada teria que ser feita com baixíssimas vazões impostas na amostra pela bomba de fluxo. O ensaio seria muito demorado, praticamente impossibilitando a utilização do permeâmetro

desenvolvido. Por estes motivos, optou-se por não realizar este ensaio com amostras do solo CH.

Na tabela 4.4 estão expostos os valores das condutividades hidráulicas não saturadas para os solos SC100 e SC97d, com sucções controladas de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa.

Tabela 4.4: Resultados da condutividade hidráulica saturada dos solos do solo SC.

Solo	Amostra	Condutividade hidráulica não saturada (cm/s)		
		Sucção		
		25 kPa	50 kPa	100 kPa
SC	SC97d	5,12E-07	1,04E-08	8,77E-09
	SC100	7,40E-08	7,15E-09	1,02E-09

4.4 Determinação da curva de retenção de água

Na avaliação das CRAs dos solos, foram utilizadas as metodologias descritas no capítulo 3. Os dados obtidos a partir dos experimentos foram ajustados com o modelo de van Genuchten (Equação 2.15).

4.4.1 Determinação da curva de retenção de água no solo pelos métodos tradicionais

Para determinação da CRA pelos métodos tradicionais, foram utilizados os métodos da placa de pressão para sucções menores e o método do papel filtro para sucções maiores. Segundo Moncada (2008), a utilização do método do papel filtro para baixas sucções pode se tornar um impreciso, porque, como o solo está muito úmido, partículas sólidas ficam retidas no papel filtro, superestimando o seu peso e, conseqüentemente, o valor da umidade de equilíbrio do papel.

Os parâmetros de ajuste da CRA do modelo de van Genuchten aos dados experimentais, determinados pelo solver são θ_r , α , m e n . O θ_s é um

valor conhecido, pois representa o teor de umidade volumétrico do solo, quando saturado.

4.4.1.1 Solo Vila Secundino

Na Figura 4.5 apresenta-se a CRAda amostraSC97d obtidaexperimentalmente e pelo modelo teórico de van Genuchten.

Na Tabela 4.5 são apresentados os parâmetros de ajustes da CRApara o modelo de van Genuchtenobtidos pelo *Solver*.

Tabela 4.5: Parâmetros de ajuste da amostraSC97d

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,01	0,395	0,004049	0,68	1,00

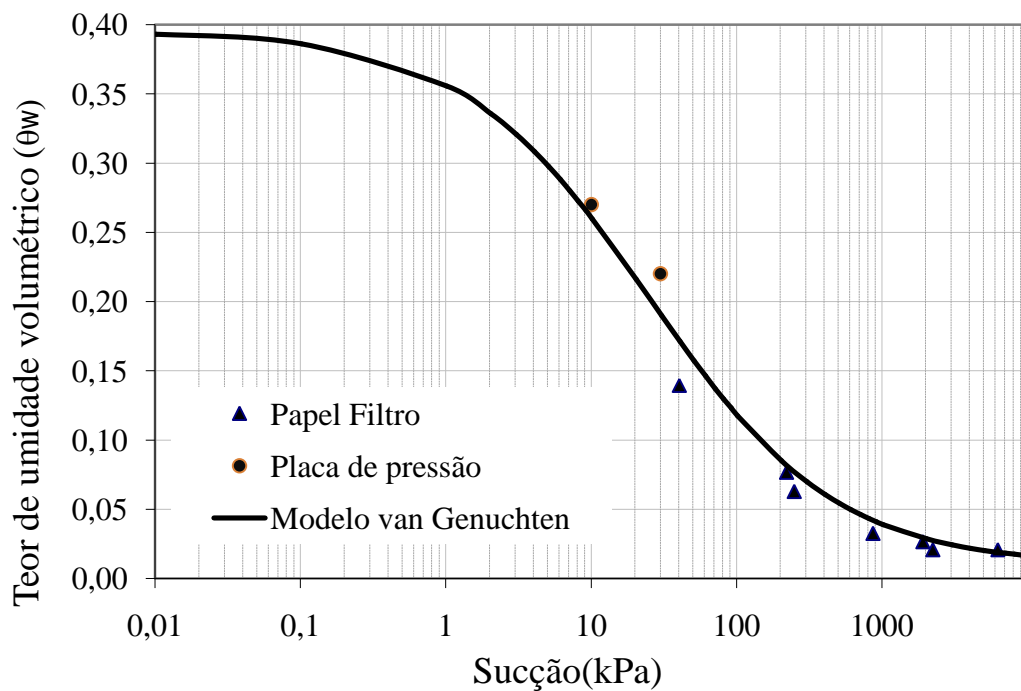


Figura 4.5: Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra SC97d.

O erro mínimo obtido pelo *Solver* entre a curva teórica de van Genuchten e os dados obtidos em laboratório para a amostra SC97d foi de 7,15%.

Na Figura 4.6 apresenta-se a CRA da amostra SC100 obtida experimentalmente e pelo modelo teórico de van Genuchten.

Na Tabela 4.6 são apresentados os parâmetros de ajustes da CRA para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *Solver*.

Tabela 4.6: Parâmetros de ajuste da amostra SC100.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,02	0,38	0,0122128	1,18	0,5

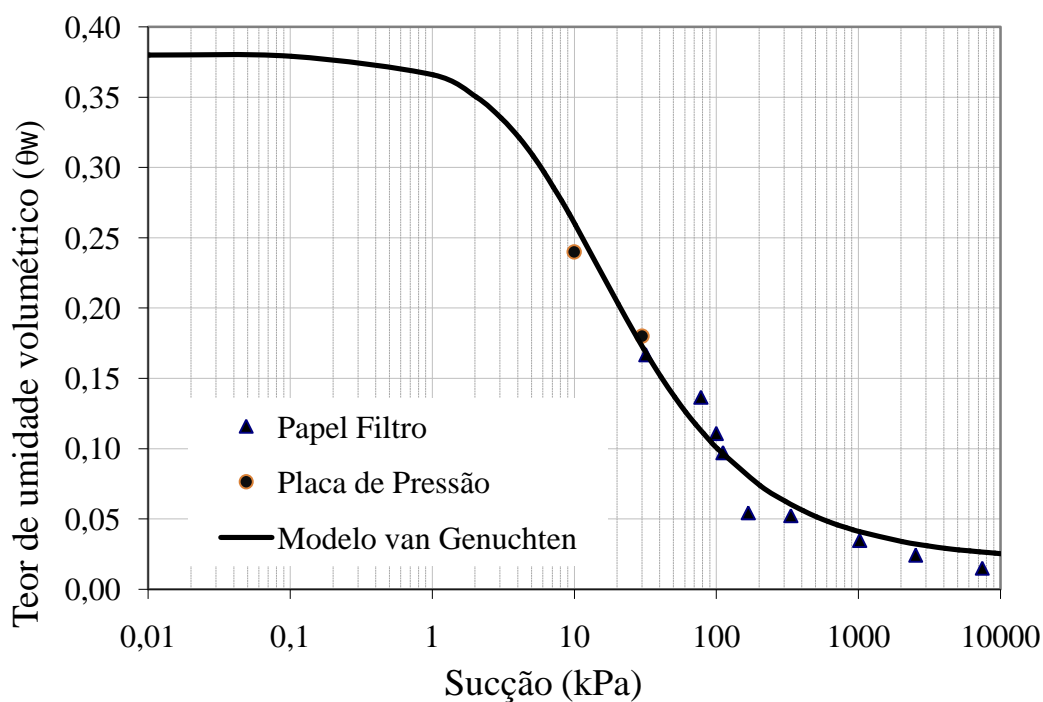


Figura 4.6: Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra SC100.

O erro mínimo obtido pelo *Solver* entre a curva teórica de van Genuchten e os dados obtidos em laboratório para a amostra SC100 foi de 6,23%.

Na Figura 4.7 apresenta-se a CRA da amostra SC97m obtida experimentalmente e pelo modelo teórico de van Genuchten.

Na Tabela 4.7 são apresentados os parâmetros de ajustes da CRA para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *Solver*.

Tabela 4.7: Parâmetros de ajuste da amostra SC97m.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,02	0,395	0,0020754	0,69	1,0468

O erro mínimo obtido pelo *Solver* entre a curva teórica de van Genuchten e os dados obtidos em laboratório para a amostra SC97m foi de 7,90%.

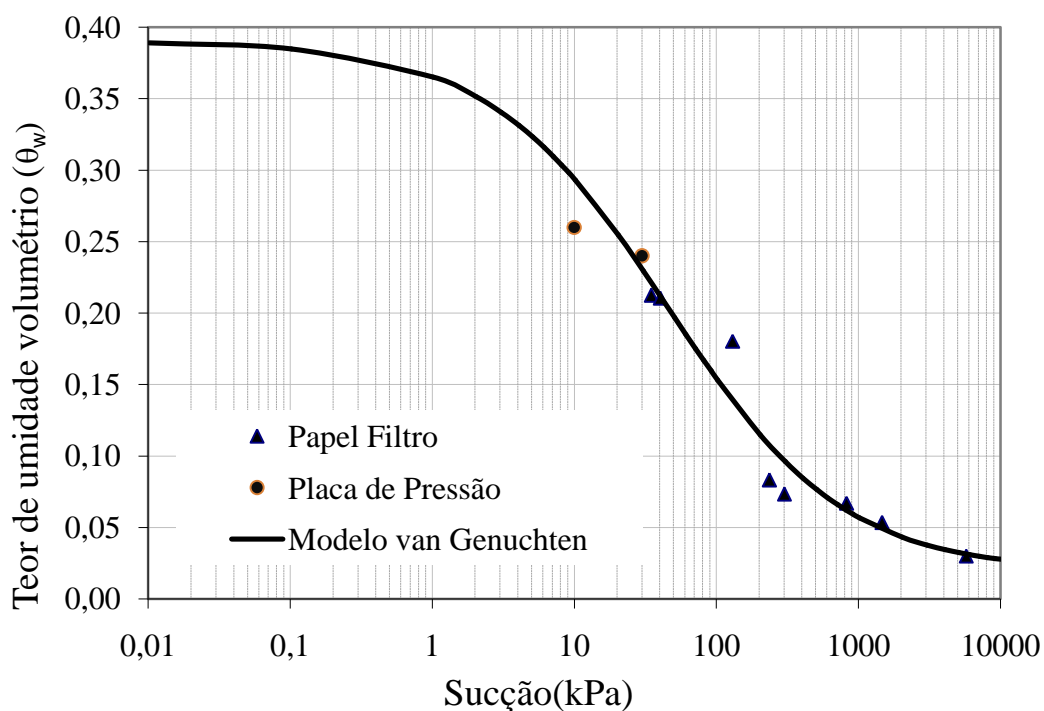


Figura 4.7: Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra SC97m.

O solo predominantemente arenoso possui em sua maioria, macro poros, que facilitaram a drenagem de água, mesmo para sucções muito baixas. Os valores de sucção de entrada de ar das amostras foram de

aproximadamente 0,1kPa, 1,00 kPa e 2,0 kPa para as amostras SC97d, SC97m e SC100 respectivamente. Valores abaixo de 10 kPa são muito difíceis de serem obtidos em laboratório, seja pelo método do papel filtro onde partículas ficam retidas no papel, seja na placa de pressão, onde a precisão do manômetro para pequenas aplicações de pressão é mínima.

O valor de sucção de entrada de ar para este solo foi possível ser determinada indiretamente, observando as curvas geradas pelo modelo de van Genuchten.

As diferenças obtidas entre o modelo teórico e os dados de laboratório foram pequenas, justificando a qualidade dos pontos obtidos nos ensaios.

4.4.1.2 Solo campo experimental

Na Figura 4.8 apresenta-se a CRA da amostra CH90d obtida experimentalmente e pelo modelo teórico de van Genuchten.

Na Tabela 4.8 são apresentados os parâmetros de ajustes da CRA para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *So/ver*.

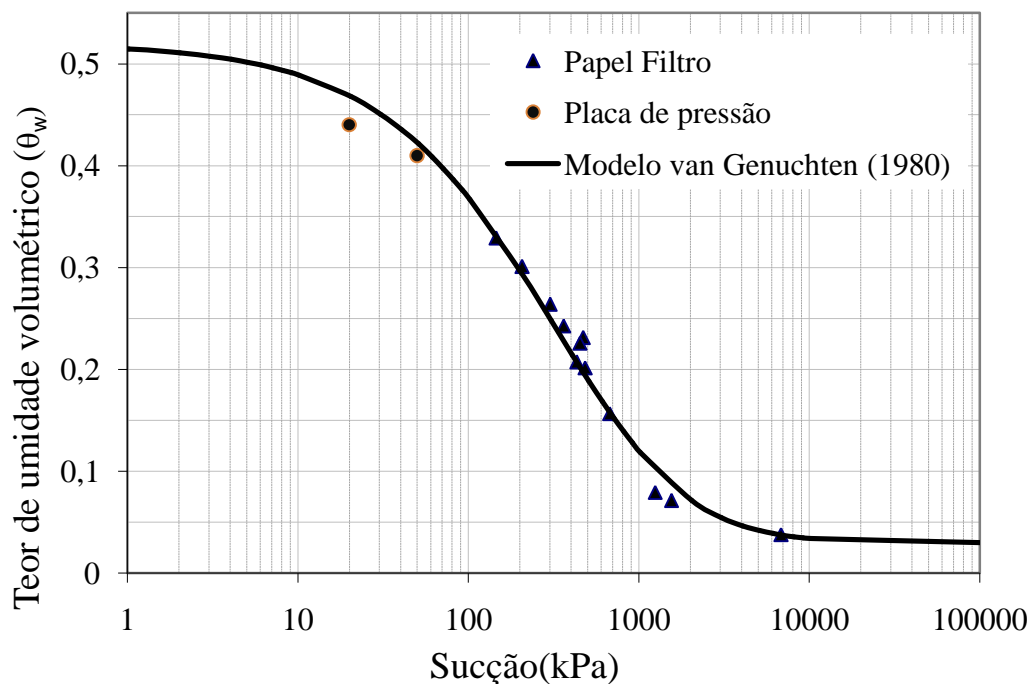


Figura 4.8: Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra CH90d.

O erro mínimo obtido pelo *Solver* entre o modelo teórico de van Genuchten e os dados obtidos em laboratório para a amostra CH90d foi de 5,89%.

Tabela 4.8: Parâmetros de ajuste da amostra CH90d.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,03	0,52	1,0E-04	0,78	2,46

Na Figura 4.9 apresenta-se a CRA da amostra CH95d obtida experimentalmente e pelo modelo teórico de van Genuchten.

Na Tabela 4.9 são apresentados os parâmetros de ajustes da CRA para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *Solver*.

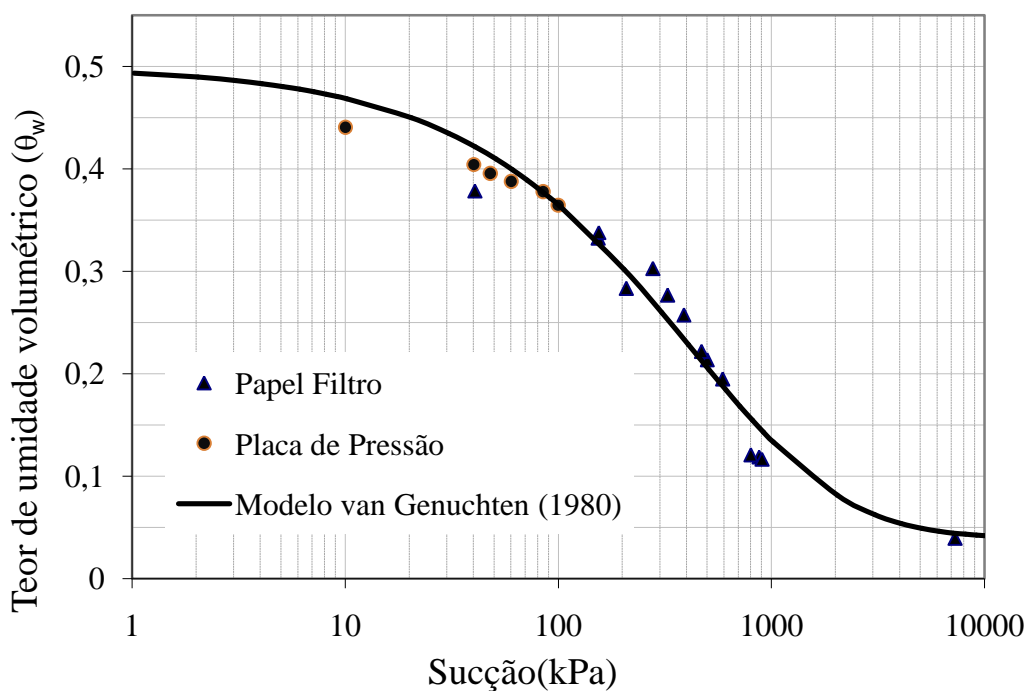


Figura 4.9: Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra CH95d.

O erro mínimo obtido pelo *Solver* entre a curva teórica de van Genuchten e os dados obtidos em laboratório para a amostra CH95d foi de 8,01%.

Tabela 4.9: Parâmetros de ajuste da amostraCH95d.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,04	0,50	2,2E-05	0,71	5,36

Na Figura 4.10 apresenta-se a CRA da amostraCH95m obtida experimentalmente e pelo modelo teórico de van Genuchten.

Na Tabela 4.10 são apresentados os parâmetros de ajustes da CRA para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *Solver*.

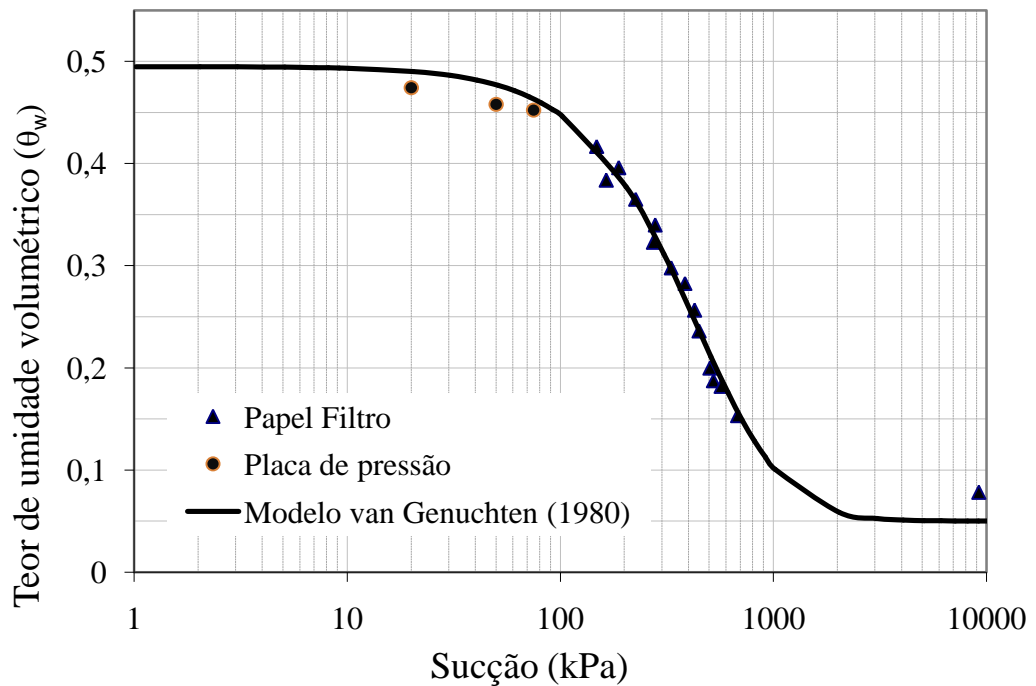


Figura 4.10: Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra CH95m.

O erro mínimo obtido pelo *Solver* entre a curva teórica de van Genuchten e os dados obtidos em laboratório para a amostra CH95m foi de 6,35%.

Tabela 4.10: Parâmetros de ajuste da amostraCH95m.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,04	0,50	1,13E-04	1,47	2,47

Na Figura 4.11 apresenta-se a CRA da amostra CH90m obtida experimentalmente e pelo modelo teórico de van Genuchten.

Na Tabela 4.11 são apresentados os parâmetros de ajustes da CRA para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *Solver*.

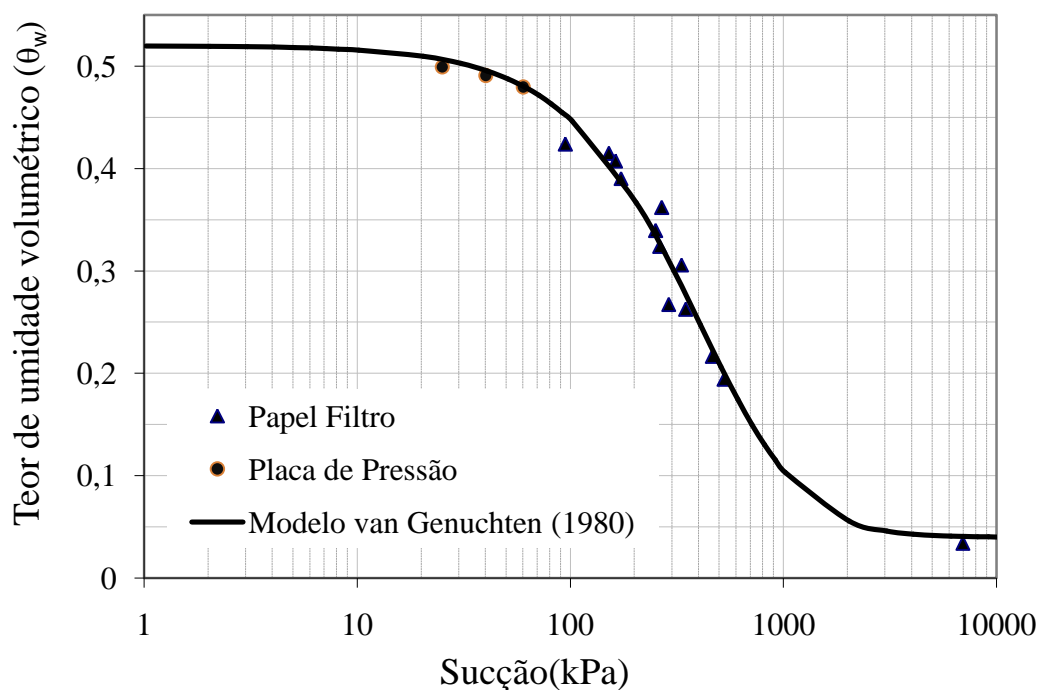


Figura 4.11: Curva de retenção de água obtida pelos métodos tradicionais para a amostra CH90m.

O erro mínimo obtido pelo *Solver* entre a curva teórica de van Genuchten e os dados obtidos em laboratório para a amostra CH90m foi de 5,71%.

Tabela 4.11: Parâmetros de ajuste da amostra CH95m.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,03	0,52	1,35E-04	1,25	2,24

Os valores de sucção de entrada de ar das amostras moldadas no ramo seco, foram da ordem de 10 kPa, e para as amostras moldadas no ramo úmido foram maiores, aproximadamente 60 kPa. Vanapalliet.al (1999) notaram comportamento semelhante para amostras de uma argila de baixa compressibilidade. Como as amostras CH90d e CH95d foram moldadas no ramo seco da curva de compactação, possuindo uma estrutura floculada, o seu comportamento é controlado pela macro estrutura. As amostras moldadas no ramo úmido, foram controladas pela micro estrutura do solo, exigindo assim sucções mais altas para a drenagem. As amostras moldadas no ramo úmido apresentaram inclinações relativamente mais suaves em comparação com as amostras moldadas abaixo da umidade ótima. Para valores do teor de umidade volumétrico abaixo de $0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, as CRAs das quatro amostras ficaram praticamente iguais. A explicação pode estar no fato que, para baixos valores de teores de umidade volumétrico, o comportamento da curva passa a ser governado pela micro estrutura do solo, uma vez que os poros maiores já foram drenados, restando apenas os micro poros que permanecem saturados.

As curvas teóricas de todas as amostras do solo CH ficaram bem ajustadas aos pontos obtidos em laboratório, o que valida os resultados experimentais.

Os pontos obtidos pela placa de pressão foram essenciais para determinar com precisão o valor de sucção de entrada de ar. O inconveniente desta técnica está na duração do ensaio: para a obtenção de cada ponto, o tempo mínimo para que o equilíbrio da sucção se estabelecesse foi de oito dias.

4.4.2 Determinação da curva de retenção de água no solo pelo método centrífugo

Um das propostas deste trabalho é a obtenção completa da CRA pelo método centrífugo. Para isso, a comparação das CRAs obtidas pela centrífuga foram comparadas com as CRAs obtidas pelos métodos tradicionais.

4.4.2.1 Solo Vila Secundino

Na Figura 4.12 estão apresentados os pontos experimentais da CRA da amostra SC97d obtidos pelo método centrífugo e a curva ajustada pelo modelo teórico de van Genuchten a estes pontos.

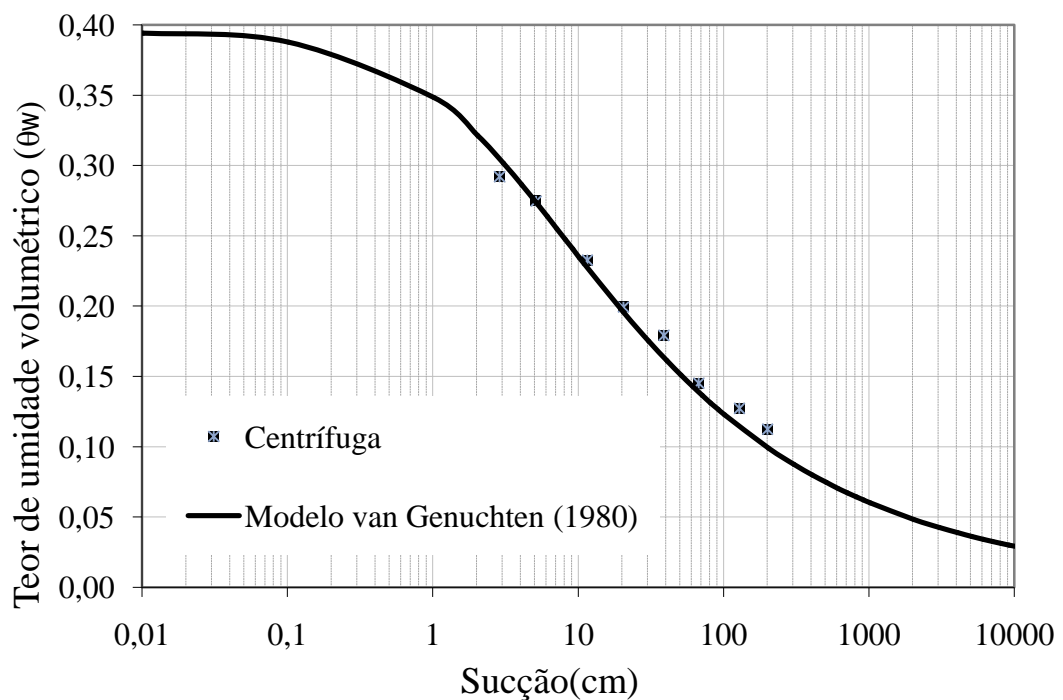


Figura 4.12: Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para amostra SC97d.

O erro mínimo alcançado pelo *Solver* entre a curva teórica de van Genuchten e os dados obtidos em laboratório foi de 4,19%.

Na Tabela 4.12 estão apresentados os parâmetros de ajustes do modelo de van Genuchten para a CRA da amostra SC97d obtidos pelo Solver.

Tabela 4.12: Parâmetros de ajuste da amostra SC97d.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,01	0,40	3,03E-2	0,82	0,38

Na Figura 4.13 estão expostas as CRAs do solo SC97d obtidas pelo modelo de van Genuchten para os métodos tradicionais e centrífugo.

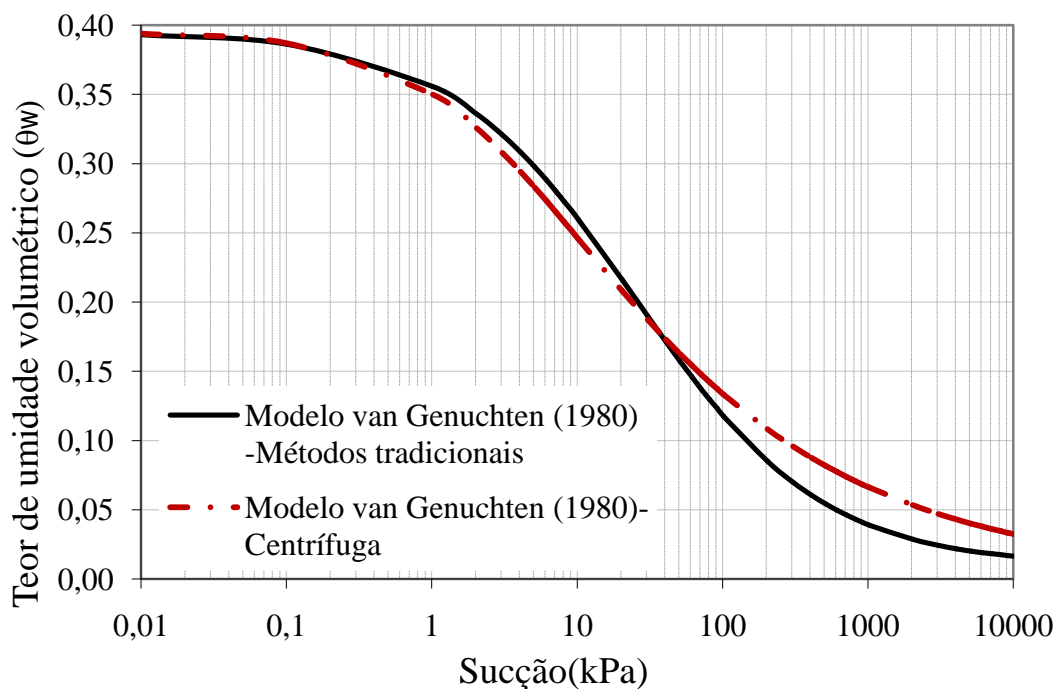


Figura 4.13: Comparação das curvas de retenção no solo para a amostra SC97d.

Observa-se que as CRAs estão bastante próximas até aproximadamente 100 kPa. A partir deste valor, a curva obtida pelo método centrífugo tende a superestimar os valores de sucção, para o mesmo valor de θ_w . Apesar disto, a diferença, definida por uma equação semelhante à

Equação 3.1, entre as curvas teóricas para a amostra SC97d é de 7,30%, o que pode ser considerado como sendo um bom ajuste entre elas.

Na Figura 4.14 estão apresentados os pontos experimentais da CRA da amostra SC100 obtidos pelo método centrífugo e a curva ajustada pelo modelo teórico de van Genuchten a estes pontos.

A diferença entre a curva teórica de van Genuchten e os dados obtidos em laboratório para a amostra SC100 foi de 6,23%.

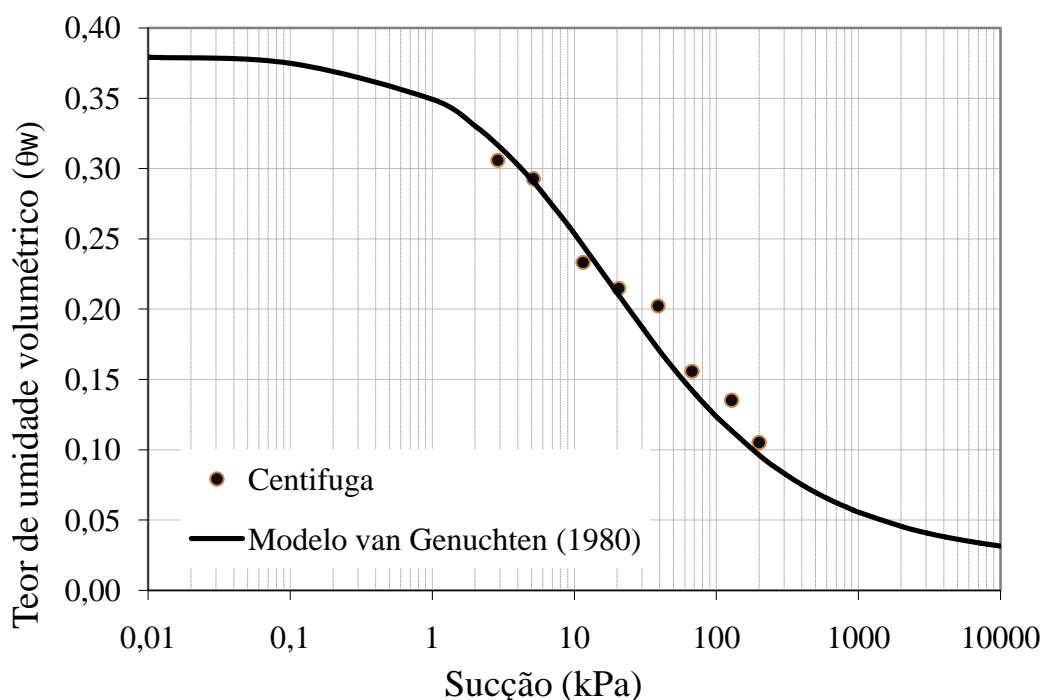


Figura 4.14: Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra SC100.

Na Tabela 4.13 são apresentados os parâmetros de ajustes da curva de retenção para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *solver* para a amostra SC100.

Tabela 4.13: Parâmetros de ajuste da amostra SC100.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,02	0,38	0,01086	0,82	0,62

Na Figura 4.15 estão expostas as CRAs para a amostra SC100, obtidas pelo modelo de van Genuchten para os métodos tradicionais e centrífugo.

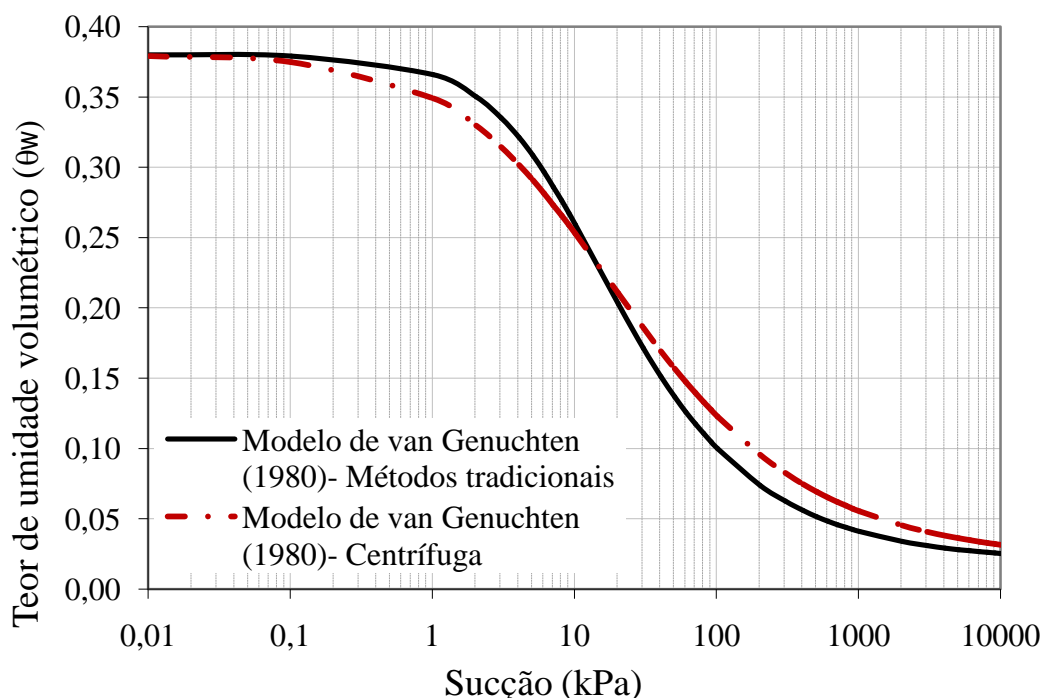


Figura 4.15: Comparação das curvas de retenção no solo para a amostra SC100.

Para a amostra SC100, o método centrífugo fornece valores menores de sucções para o mesmo θ_w , no intervalo abaixo de 10 kPa e maiores acima deste. Como com o método centrífugo obtiveram-se valores de umidade volumétrica para sucções menores, próximos ao valor de sucção de entrada de ar (Figura 4.14), do que os valores de sucção usados nos métodos tradicionais, nos quais o menor valor usado foi de 10 kPa (Figura 4.6), acredita-se que os valores obtidos com a centrífuga sejam mais precisos. Por outro lado, pelo mesmo tipo de raciocínio, acredita-se que para valores mais elevados de sucção, os métodos tradicionais sejam mais adequados, porque o método da centrífuga não consegue alcançar elevados valores de sucção. De qualquer forma, a diferença entre as curvas foi de 8,01%, que pode ser considerada adequada.

Na Figura 4.16 estão apresentados os pontos experimentais da CRA da amostra SC97m obtidos pelo método centrífugo e a curva ajustada pelo modelo teórico de van Genuchten a estes pontos.

A diferença entre a curva teórica de van Genuchten e os dados obtidos em laboratório para a amostra SC97m foi de 6,01%.

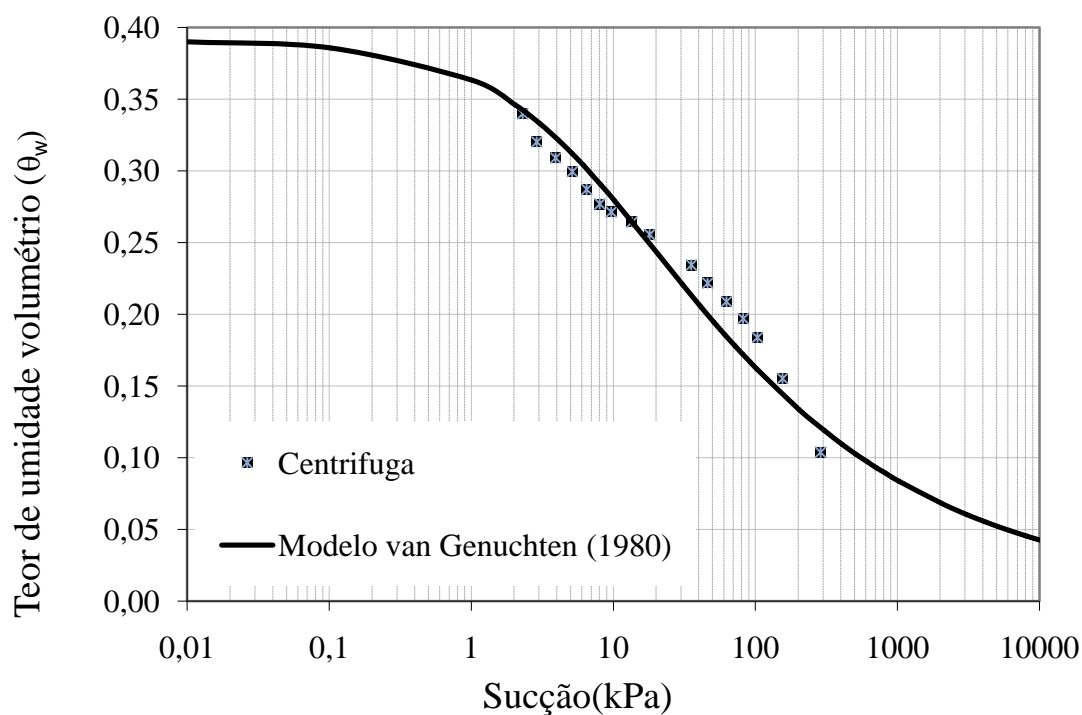


Figura 4.16: Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra SC97m.

Na Tabela 4.14 são apresentados os parâmetros de ajustes da curva de retenção para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *Solver* para a amostra SC97m.

Tabela 4.14: Parâmetros de ajuste da amostra SC97m.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,01	0,396	0,0173	0,85	0,35

Na Figura 4.17 estão expostas as curvas obtidas pelo modelo de van Genuchten para os métodos tradicionais e centrífugo para a amostra SC97m.

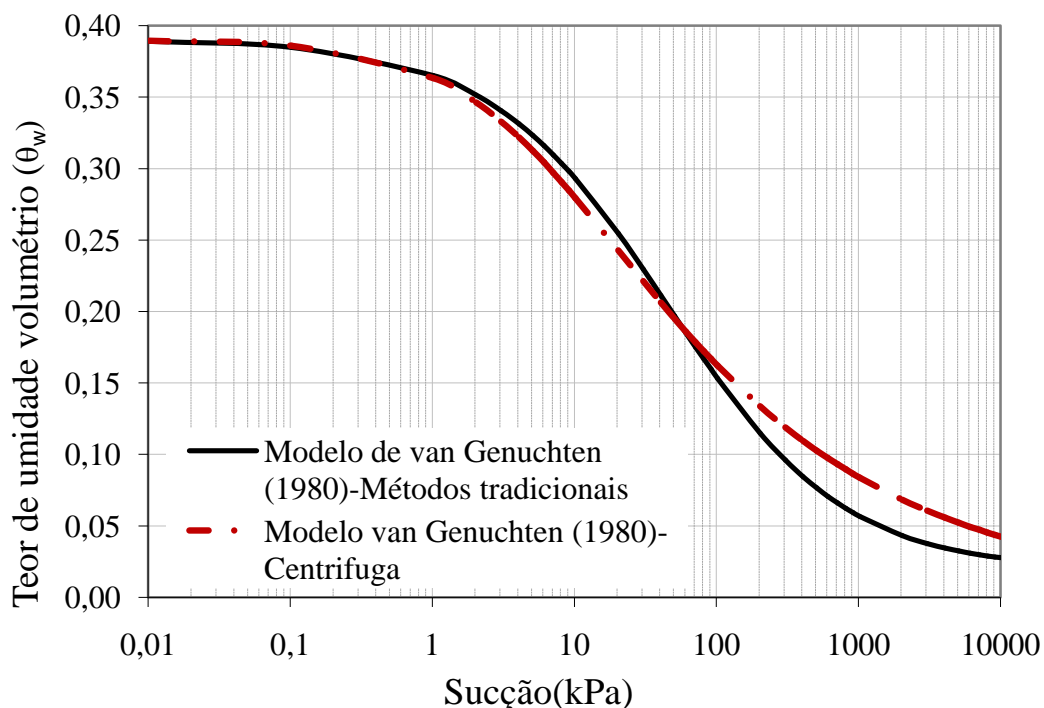


Figura 4.17: Comparação das curvas de retenção no solo para a amostra SC97m.

A amostra SC97m foi a que apresentou a menor diferença entre as CRA obtidas pelos métodos tradicionais e centrífugo, 5,15%.

Os valores de sucções de entrada de ar para todas as amostras do solo SC ficaram próximo a 1,0 kPa, obtido por interpretação da curva teórica. Este valor está próximo do mínimo obtido pela centrífuga, que é de 2,3 kPa. Isso faz do método centrífugo uma opção atraente, quando se deseja baixas sucções e curto prazo para obtenção de equilíbrio de sucção. A sucção máxima imposta pela centrífuga foi de 200 kPa, suficiente para drenar o solo até θ_w igual a $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

As diferenças entre os pontos obtidos em centrífuga e o modelo de van Genuchten foram baixas, para todas as amostras do solo SC, o que sugere uma boa precisão na obtenção dos dados experimentais.

Na Tabela 4.15 estão apresentadas, para todas as amostras do solo SC, as rotações aplicadas com a sucção associada e a variação do teor de umidade volumétrico para cada rotação.

Tabela 4.15: Resumo do ensaio de centrifuga para as amostras do solo SC.

Amostra	Rotação(RPM)	Sucção (kPa)	θ_i	θ_f	$\Delta\theta$
SC97d	300	2,88	0,401	0,292	0,109
	400	5,12	0,292	0,275	0,017
	600	11,53	0,275	0,233	0,042
	800	20,50	0,233	0,199	0,034
	1100	38,76	0,199	0,178	0,021
	1450	67,35	0,178	0,145	0,033
	2000	128,13	0,145	0,127	0,018
	2500	200,21	0,127	0,125	0,007
SC100	300	2,88	0,38	0,306	0,074
	400	5,12	0,306	0,293	0,013
	600	11,53	0,293	0,233	0,060
	800	20,50	0,233	0,215	0,018
	1100	38,76	0,215	0,202	0,013
	1450	67,35	0,202	0,186	0,016
	2000	128,13	0,186	0,165	0,021
	2500	200,21	0,165	0,145	0,020
SC97m	300	2,88	0,396	0,320	0,076
	350	3,92	0,32	0,309	0,011
	400	5,12	0,309	0,300	0,009
	450	6,49	0,300	0,287	0,013
	500	8,00	0,287	0,277	0,010
	550	9,69	0,277	0,272	0,005
	650	13,53	0,272	0,265	0,007
	750	18,02	0,265	0,256	0,009
	900	25,95	0,256	0,243	0,013
	1050	35,32	0,243	0,234	0,009
	1200	46,13	0,234	0,222	0,012
	1400	62,79	0,222	0,209	0,013
	1600	82,00	0,209	0,199	0,010
	1800	103,79	0,199	0,184	0,015
2200	155,04	0,184	0,155	0,029	

4.4.2.2 Solo campo experimental

Como o solo CH tem elevado teor de argila, os seus valores de sucção de entrada de ar são maiores e as suas CRAs são mais suaves, com taxas de variação de umidade menores, que as do solo SC. Por isso, nas primeiras centrifugações das amostras do solo CH, correspondentes a valores de sucção baixos, a variação de umidade é mínima ou nula. Por outro lado, sucções mais elevadas, próximas a 1000 kPa, são necessárias para que o solo CH alcance a umidade residual. Como a sucção máxima na centrifuga desenvolvida é da ordem de 500kPa, não foi possível alcançar os pontos mais secos da CRA do solo CH com este tipo de ensaio.

No entanto, dada a curta duração do ensaio em centrífuga, apesar destas limitações, ele ainda permanece bastante válido para aplicações práticas, nas quais, quando há predominância de solo argiloso, os solos encontram-se *in situ* com grau de saturação acima de 85% (Bicalho, 1999). Logo, a obtenção dos parâmetros hidráulicos, CRA e função de condutividade hidráulica, para as sucções aqui citadas, torna-se uma solução prática e rápida. Para o solo CH, por exemplo, 300 kPa corresponde a grau de saturação de 86% para as amostras CH95m e CH95d e 81% para as amostras CH90d e CH90m.

Para solos muito finos, como o CH, onde o teor de umidade residual corresponde a sucções muito elevadas, a obtenção CRA completa experimentalmente utilizando apenas a centrífuga desenvolvida, não é recomendada.

Para minimizar este inconveniente, foi adotada uma proposta de utilizar 1 (um) ponto, obtido pelo papel filtro, e juntá-lo aos valores obtidos pelo método centrífugo para obter a CRA completa, se houver necessidade. O ponto obtido pelo papel filtro deverá estar próximo ao teor de umidade residual do solo. Justifica-se, desta forma, a utilização dos dois métodos para obtenção da CRA completa para os solos predominantemente argilosos.

Os resultados são apresentados, comparando as curvas sem a utilização do ponto obtido com o papel filtro e com a utilização deste. O

ponto adotado foi sempre o último obtido pelo papel filtro (Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11).

Na Figura 4.18 estão apresentados os pontos experimentais da CRA da amostra CH90d obtidos pelo método centrífugo e a curva ajustada pelo modelo teórico de van Genuchten a estes pontos.

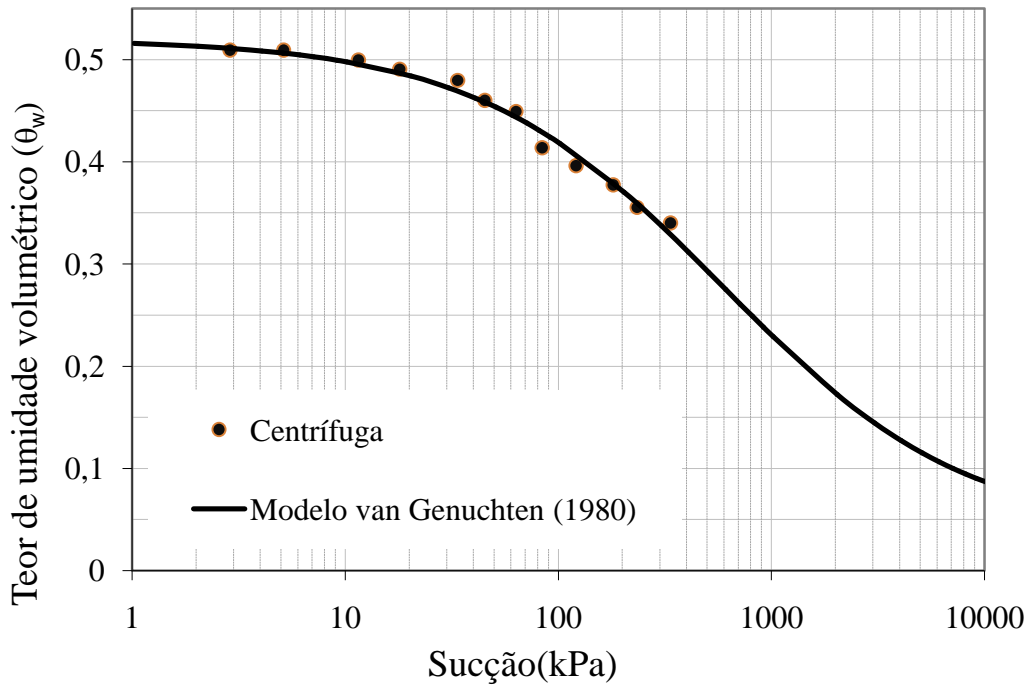


Figura 4.18: Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra CH90d.

Na Tabela 4.16 são apresentados os parâmetros de ajustes da curva de retenção para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *Solver* para a amostra CH90d.

Tabela 4.16: Parâmetros de ajuste da amostra CH90d.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,03	0,515	4,60E-03	0,90	0,23

Na Figura 4.19 estão expostos as CRAs obtidas pelos métodos tradicionais, centrífugo e proposto nesta tese (centrífuga mais um ponto com papel filtro) para o solo CH90d.

A diferença entre a CRA utilizando apenas o método centrífugo e a CRA pelos métodos tradicionais foi de 20,1%. Essa diferença caiu para 7,2% quando adicionado um ponto próximo ao teor de umidade residual.

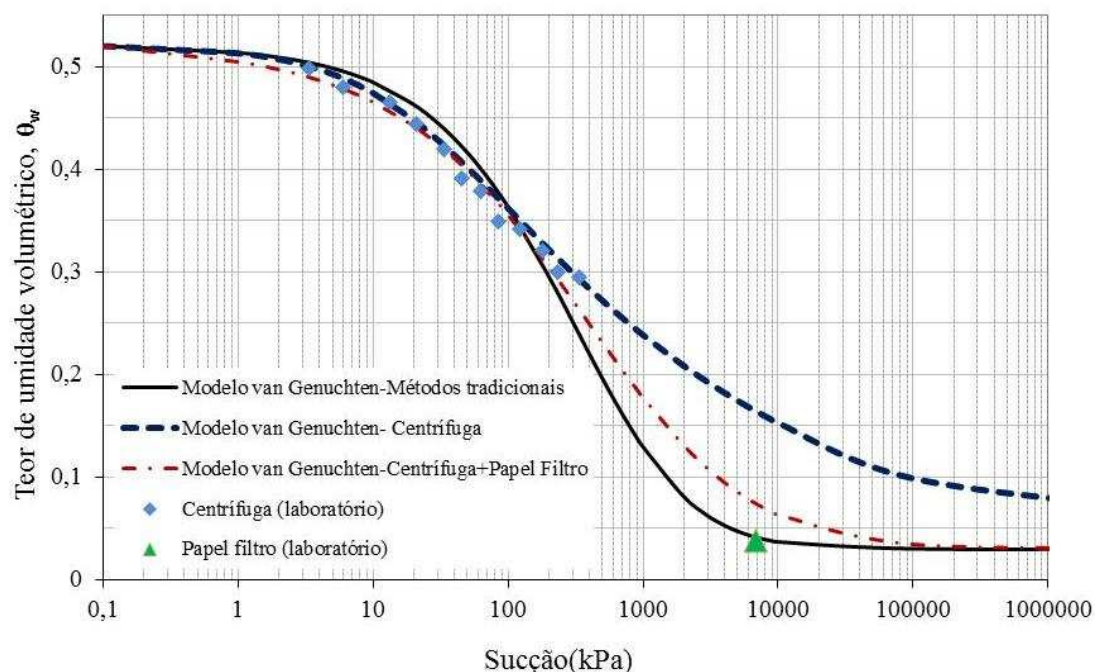


Figura 4.19: Comparações das CRAs para a amostra CH90d.

Na Figura 4.20 estão apresentados os pontos experimentais da CRA da amostra CH95d obtidos pelo método centrífugo e a curva ajustada pelo modelo teórico de van Genuchten a estes pontos .

Na Tabela 4.17 são apresentados os parâmetros de ajustes da curva de retenção para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *Solver* para a amostra CH95d.

Tabela 4.17: Parâmetros de ajuste a amostra CH95d.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,04	0,494	2,76E-3	0,92	0,27

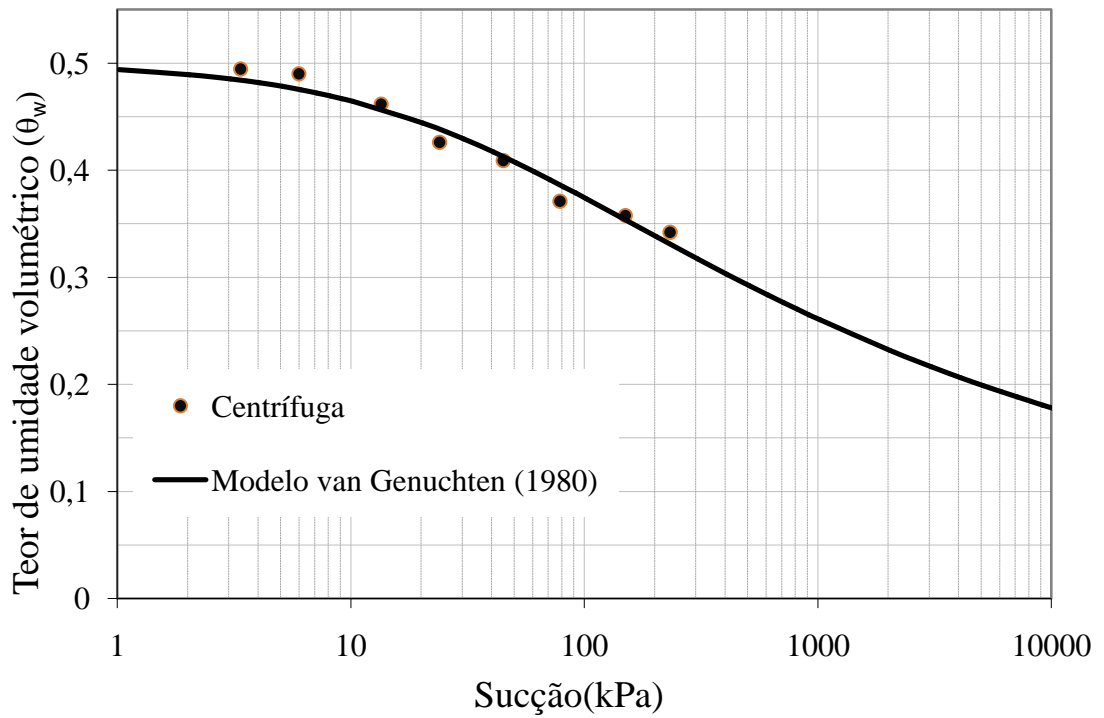


Figura 4.20: Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra CH95d.

Na Figura 4.21 estão expostos as CRA obtidas pelos métodos tradicionais, centrífugo e proposto nesta tese para a amostra CH95d.

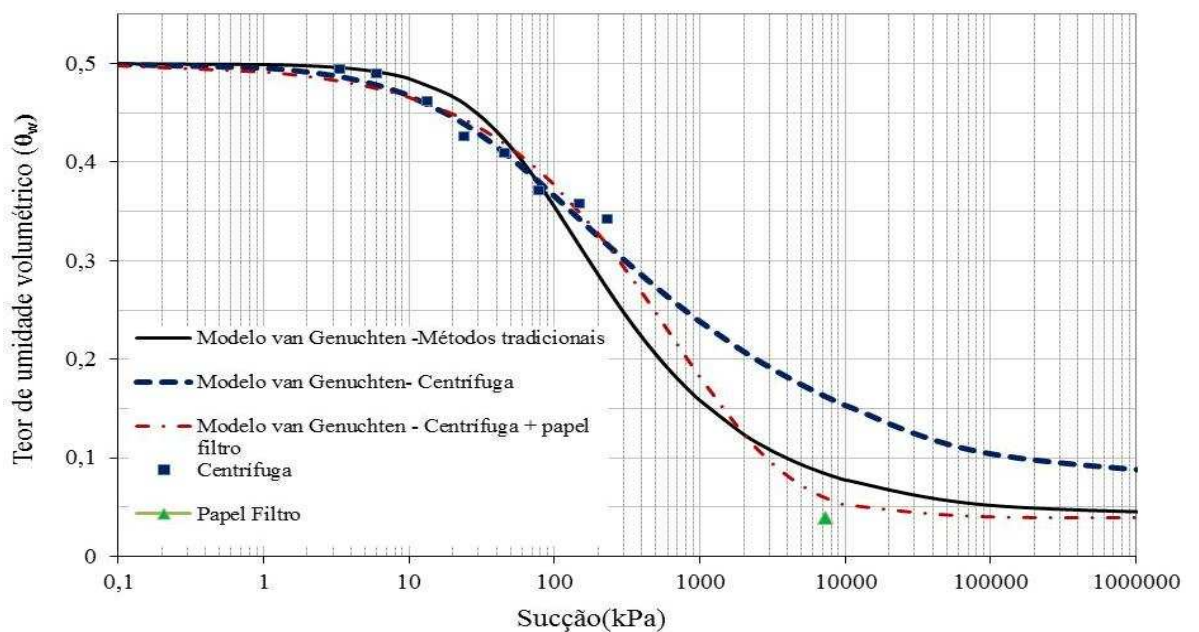


Figura 4.21: Comparações das CRA para a amostra CH95d.

A diferença entre a CRA utilizando apenas o método centrífugo e a CRA pelos métodos tradicionais foi de 15,14%. Essa diferença caiu para 6,2% quando adicionado um ponto próximo ao teor de umidade residual.

Na Figura 4.22 estão apresentados os pontos experimentais da CRA da amostra CH95m obtidos pelo método centrífugo e a curva ajustada pelo modelo teórico de van Genuchten a estes pontos.

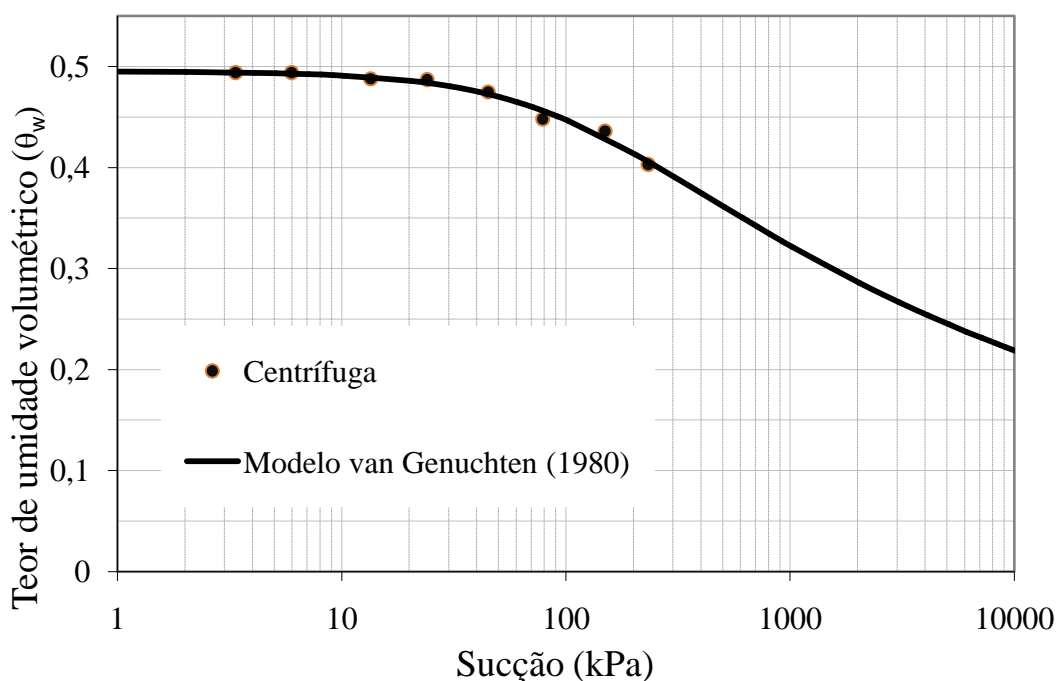


Figura 4.22: Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra CH95m.

Na Tabela 4.18 são apresentados os parâmetros de ajustes da curva de retenção para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *Solver* para a amostra CH95m.

Tabela 4.18: Parâmetros de ajuste da amostra CH95m.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,04	0,494	1,10E-3	2,4	0,12

Na Figura 4.23 estão expostas as CRA obtidas pelos métodos tradicionais, centrífugo e pelo método proposto nesta tese para a amostra CH95m.

A diferença entre a CRA utilizando apenas o método centrífugo e a CRA pelos métodos tradicionais foi de 17,40%. Essa diferença caiu para 7,4% quando adicionado um ponto próximo ao teor de umidade residual.

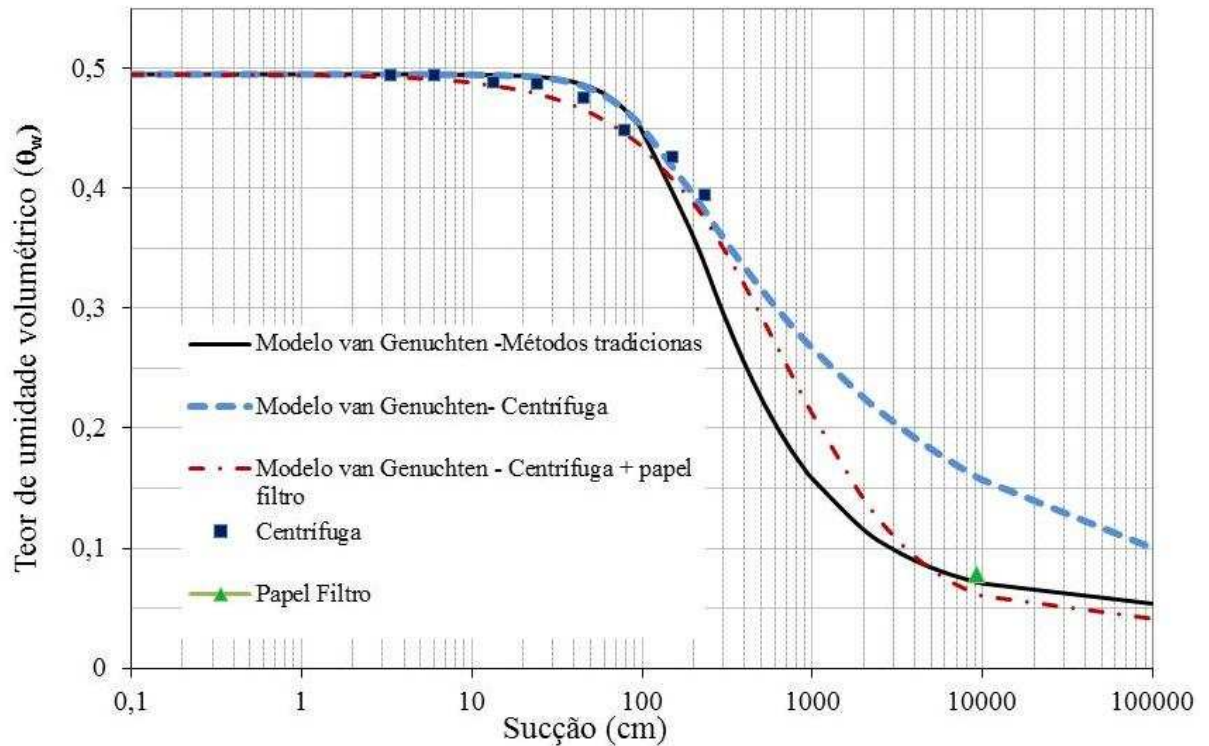


Figura 4.23: Comparações das CRA para a amostra CH95m.

Na Figura 4.24 estão apresentados os pontos experimentais da CRA da amostra CH90m obtidos pelo método centrífugo e a curva ajustada pelo modelo teórico de van Genuchten a estes pontos.

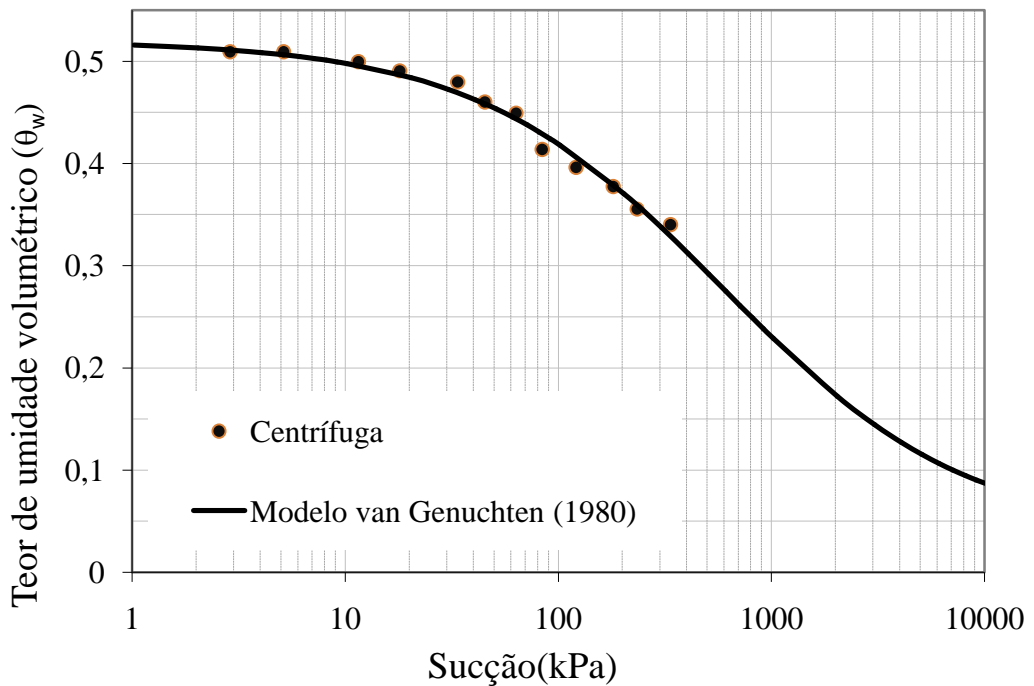


Figura 4.24: Curva de retenção de água obtida pelo método centrífugo para a amostra CH90m.

Na Tabela 4.19 são apresentados os parâmetros de ajustes da curva de retenção para o modelo de van Genuchten obtidos pelo *Solver* para a amostra CH90m.

Tabela 4.19: Parâmetros de ajuste da amostra CH90m.

Parâmetros de ajuste				
θ_r	θ_s	α	n	m
0,04	0,52	1,38E-04	1,61	0,21

Na Figura 4.25 estão expostos as CRA obtidas pelos métodos tradicionais, centrífugo e proposto nesta tese para a amostra CH90m.

A diferença entre a CRA utilizando apenas o método centrífugo e a CRA pelos métodos tradicionais foi de 18,71%. Essa diferença caiu para 4,22% quando adicionado um ponto próximo ao teor de umidade residual.

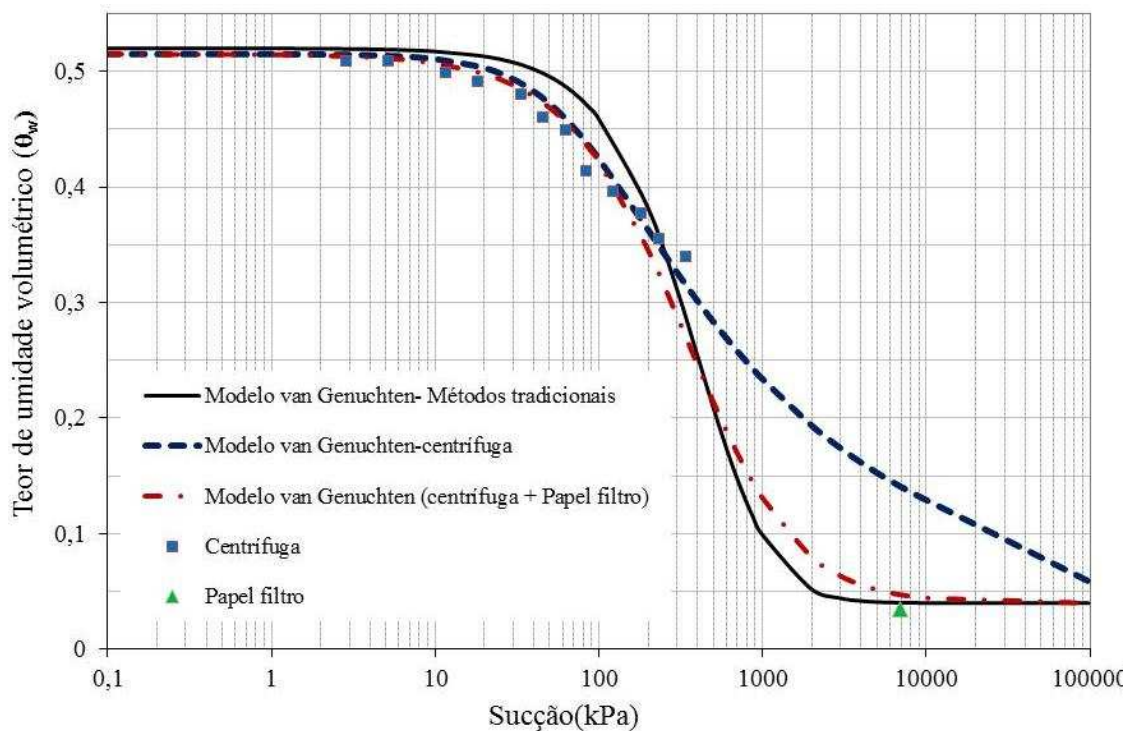


Figura 4.25: Comparações das CRA para o solo CH90m.

Após acrescentar um ponto obtido pelo papel filtro, as CRA obtidas pela combinação dos métodos se aproximaram muito da CRA obtida pelos métodos tradicionais. A combinação dos métodos também é um atrativo para amostras indeformadas do solo residual maduro, pois a sua estrutura tende a apresentar macro e micro poros, gerando CRA bimodais. Logo, os valores de sucções impostos pela centrifuga são suficientes para determinar a primeira curva e o valor de sucção de entrada de ar da segunda, restando apenas o valor do teor de umidade residual da segunda, onde adotaria um ponto do papel filtro.

Na Tabela 4.20 apresenta-se todas as rotações impostas com a sucção associada e a variação de umidade para todas as amostras dos solos SC.

Tabela 4.20: Resumo do ensaio de centrifuga para as amostras do solo CH.

Amostra	Rotação(RPM)	Sucção (kPa)	θ_i	θ_f	$\Delta\theta$
CH90d	300	3,36	0,515	0,498	0,007
	400	5,98	0,498	0,479	0,019
	600	11,53	0,479	0,464	0,015
	750	21,03	0,464	0,444	0,020
	950	33,74	0,444	0,419	0,025
	1100	45,24	0,419	0,391	0,028
	1300	63,19	0,391	0,378	0,013
	1500	84,13	0,378	0,349	0,029
	1800	121,14	0,349	0,341	0,008
	2200	180,97	0,341	0,335	0,006
	2500	233,69	0,335	0,324	0,011
	3000	336,51	0,324	0,312	0,012
CH95d	300	3,36	0,494	0,493	0,0005
	400	5,98	0,4935	0,493	0,0005
	800	23,93	0,493	0,426	0,067
	1100	45,24	0,426	0,418	0,008
	1450	78,61	0,418	0,376	0,042
	2000	149,56	0,376	0,359	0,017
	2500	233,69	0,359	0,348	0,011
CH95m	300	3,36	0,494	0,494	0
	400	5,98	0,494	0,493	0,0005
	800	23,93	0,4935	0,485	0,0085
	1100	45,24	0,485	0,482	0,003
	1450	78,61	0,482	0,450	0,032
	2000	149,56	0,450	0,437	0,013
	2500	233,69	0,437	0,427	0,01
CH90m	300	2,88	0,52	0,509	0,011
	400	5,12	0,509	0,506	0,003
	600	11,53	0,506	0,503	0,003
	750	18,02	0,503	0,491	0,012
	950	33,74	0,491	0,472	0,019
	1100	45,24	0,472	0,460	0,012
	1300	63,19	0,460	0,450	0,01
	1500	84,13	0,450	0,414	0,036
	1800	121,14	0,414	0,396	0,018
	2200	180,97	0,396	0,377	0,019
	2500	233,69	0,377	0,356	0,021
	3000	336,51	0,356	0,340	0,016

4.4.3 Avaliação do tempo de centrifugação

O período de centrifugação, necessário ao equilíbrio da umidade no solo, é fator determinante da determinação da curva de retenção de umidade e da precisão na determinação da condutividade hidráulica. O procedimento de parar a centrífuga em tempos pré-determinados e verificar a variação de umidade até obter o equilíbrio é importante para não exceder o tempo máximo de drenagem. Outro fator está em determinar com precisão, o tempo quando não ocorre mais a drenagem da água, para determinação da função de condutividade hidráulica.

Na Tabela 4.21 e 4.22 estão apresentadas as rotações impostas, o tempo total de centrifugação e o tempo de equilíbrio de umidade nas amostras.

Tabela 4.21: Resumo do ensaio de centrífuga para as amostras do solo SC.

Amostra	Rotação (RPM)	Tempo total (min)	Tempo de equilíbrio (min)	Amostra	Rotação (RPM)	Tempo total (min)	Tempo de equilíbrio (min)
SC97d	300	60	15	SC100	300	60	15
	400	15	15		400	30	15
	600	90	30		600	90	30
	800	120	60		800	120	20
	1100	180	90		1100	90	30
	1450	120	30		1450	120	30
	2000	60	30		2000	60	60
	2500	120	60		2500	120	60
SC97m	300	30	15	SC97m	900	30	30
	350	90	15		1050	60	30
	400	60	30		1200	60	30
	450	60	15		1400	90	30
	500	60	15		1600	60	30
	550	60	15		1800	120	30
	650	30	15		2200	240	120
	750	60	30				

Tabela 4.22: Resumo do ensaio de centrífuga para as amostras do solo CH

Amostra	Rotação(RP M)	Tempo (min)	Tempo de equilíbrio (min)	Amostra	Rotação(R PM)	Tempo (min)	Tempo de equilíbrio (min)
CH90d	300	120	40	CH90m	300	30	30
	400	180	120		400	120	60
	600	180	120		600	120	60
	750	360	240		750	240	120
	950	360	200		950	240	120
	1100	240	120		1100	240	120
	1300	240	120		1300	120	90
	1500	120	40		1500	90	80
	1800	120	30		1800	120	80
	2200	180	60		2200	180	90
	2500	120	60		2500	180	120
	3000	120	30		3000	240	240
CH95d	300	120	60	CH95m	300	60	60
	400	120	80		400	60	60
	800	240	180		800	180	150
	1100	120	40		1100	120	30
	1450	320	240		1450	240	180
	2000	240	180		2000	240	180
	2500	240	120		2500	240	180

Para a amostra SC97m, em particular, foi tomada a decisão de obter 15 pontos pelo método centrífuga, fazendo com que os incrementos de sucção fossem menores. Esta decisão foi importante, pois foi possível comparar com as outras amostras e verificar que mesmo para maiores incrementos de sucção, os pontos em centrífuga foram bem relacionados com a curva de retenção obtida pelos métodos tradicionais.

Para as três amostras do solo SC, a primeira centrifugação foi responsável pela maior variação de umidade (Tabela 4.15) e os menores tempos associados ao equilíbrio de umidade. Isto está relacionado com o fato de o solo possuir poros maiores devido a grande presença de areia fina,

fazendo com que, mesmo baixas sucções sejam suficientes para expulsar uma grande quantidade de água de seus poros em um tempo relativamente menor.

Para as sucções maiores, o tempo de centrifugação aumentou. Este comportamento também foi observado por Silva e Azevedo (2002), em uma areia argilosa, no estudo do período adequado para o levantamento da curva de retenção de água dos solos do bioma cerrado.

As amostras do solo CH demandaram um tempo de equilíbrio até 6 vezes maior que as amostras do solo SC, porque, naturalmente, o solo fino possui uma condutividade hidráulica bem menor, que dificulta a drenagem.

4.5 Determinação da função de condutividade hidráulica pelo método centrífugo

Os dados da condutividade hidráulica não saturada obtidos em laboratório utilizando a centrífuga foram plotados em função da saturação efetiva. Foi exposta, também, a curva teórica de van Genuchten-Mualem com base nas condutividades hidráulicas saturadas e nos parâmetros de ajuste das curvas de retenção obtidos pelo método centrífugo.

4.5.1 Solo Vila Secundino

Nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28 estão plotados os valores da condutividade hidráulica não saturada obtidas em centrífuga e o ajuste do modelo de van Genuchten-Mualem para o solo SC. Os dados da condutividade hidráulica não saturada obtidos por meio do permeâmetro de parede flexível para as amostras SC97d e SC100 estão também apresentados nas Figuras 4.26 e 4.27.

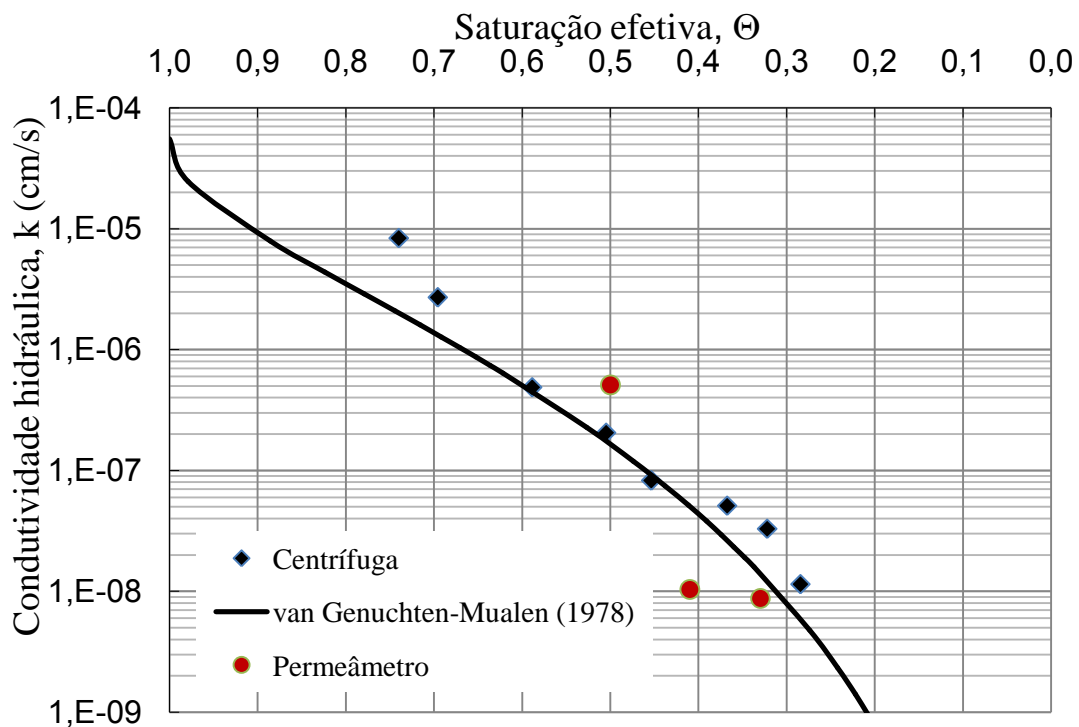


Figura 4.26: Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualem para a amostra SC97d.

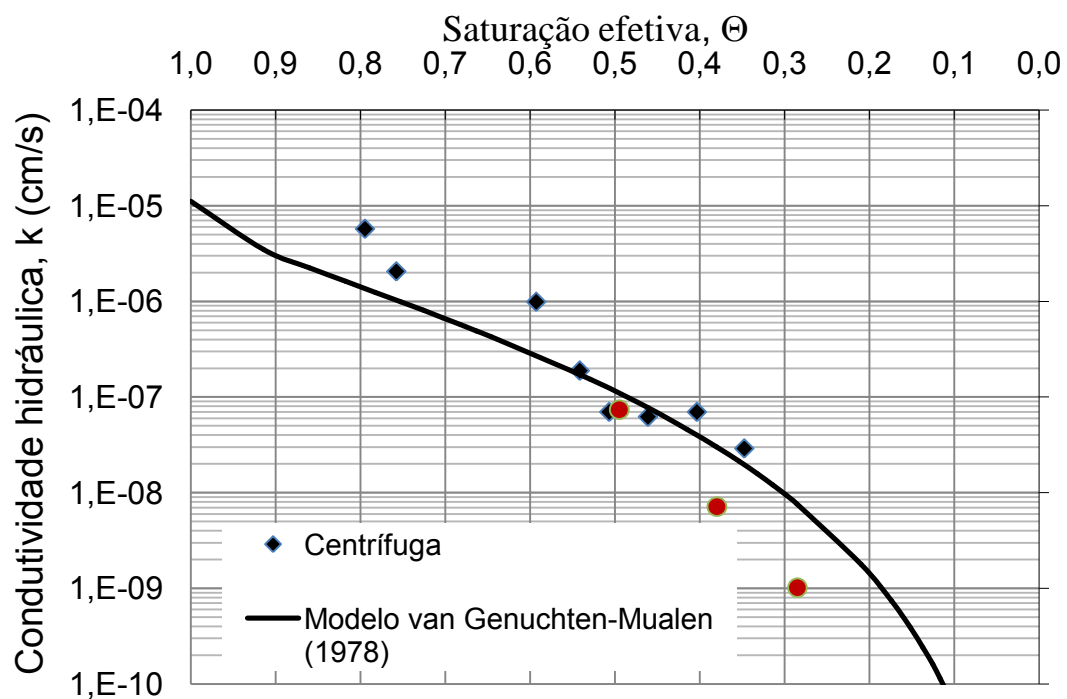


Figura 4.27: Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualem para a amostra SC100.

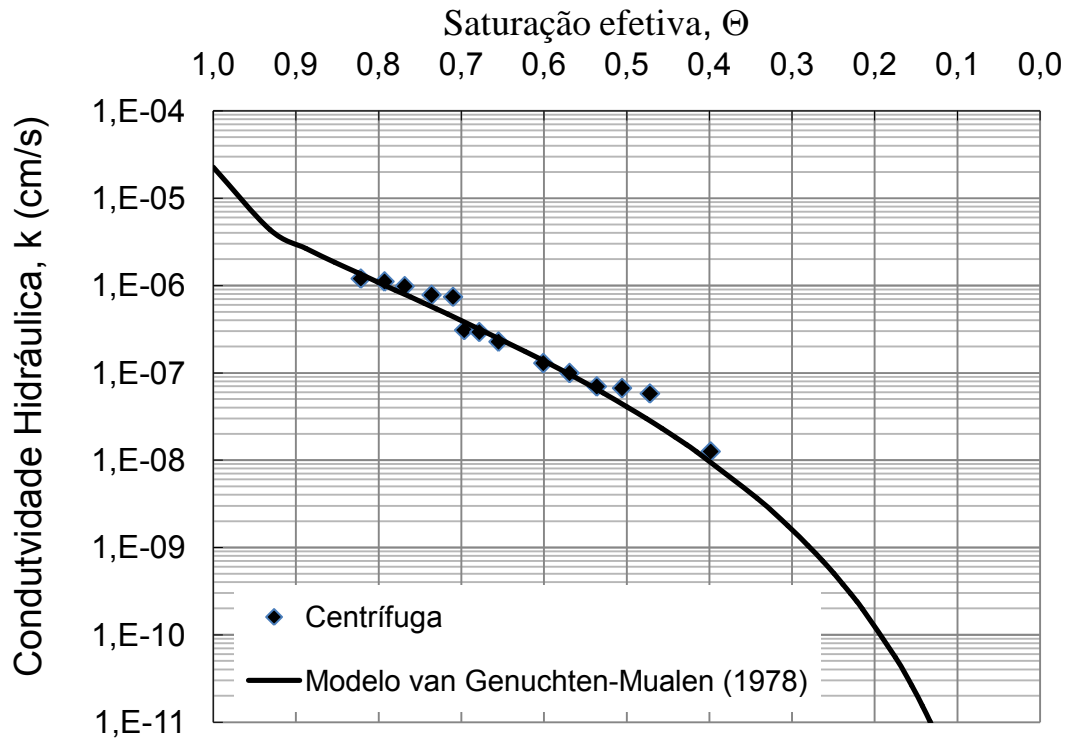


Figura 4.28: Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra SC97m.

As funções de condutividade obtida pelo modelo de van Genuchten-Mualen ficaram próximos aos dados obtidos pela centrífuga. Os valores obtidos pelo permeâmetro para a amostra SC100 seguiu a mesma tendência dos dados obtidos em centrífuga. No entanto, dadas as dificuldades e incertezas na obtenção da função de condutividade hidráulica por todos os métodos, as comparações alcançadas podem ser consideradas como muito boas.

4.5.2 Solo Campo experimental

Nas Figuras 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32 estão plotados os valores da condutividade hidráulica não saturada obtidas em centrífuga e o ajuste do modelo de van Genuchten-Mualen para o solo CH.

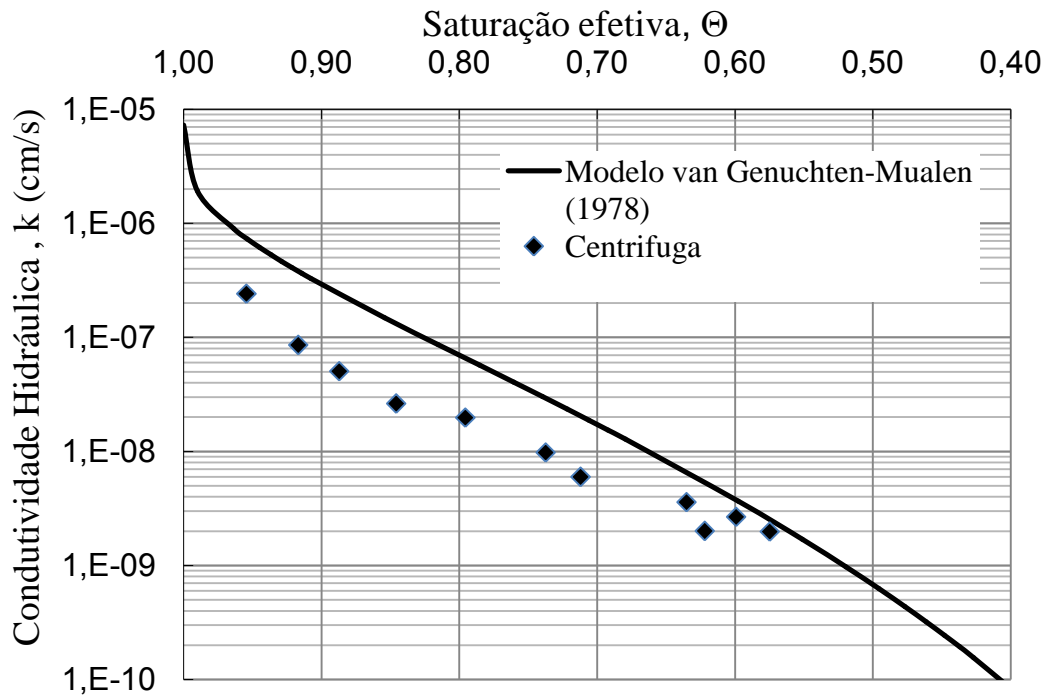


Figura 4.29: Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra CH90d.

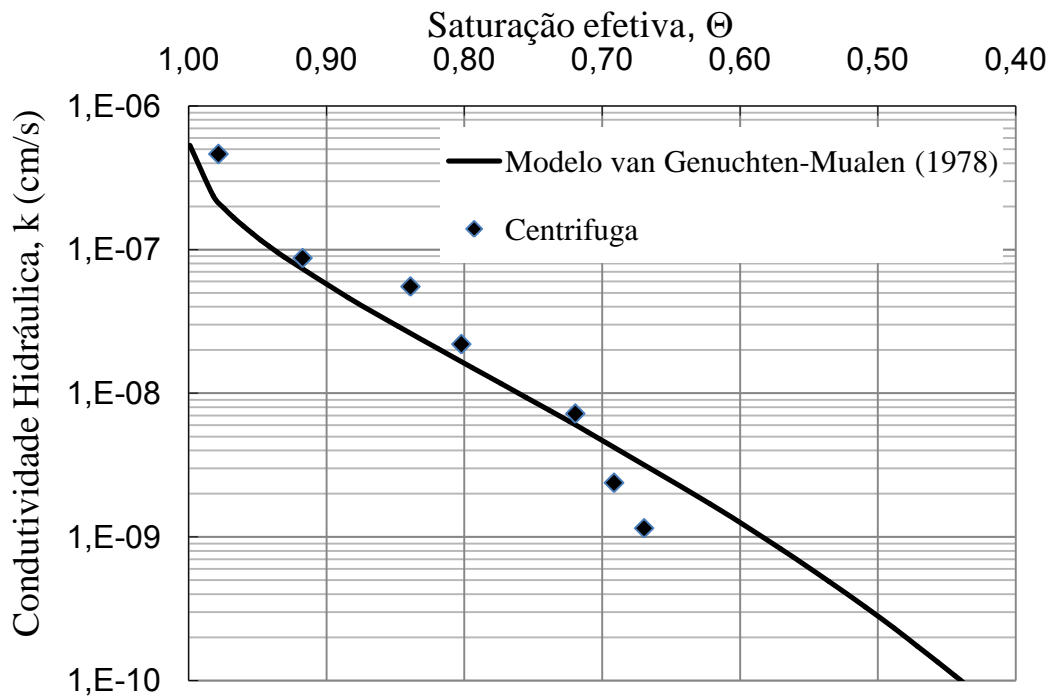


Figura 4.30: Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra CH95d.

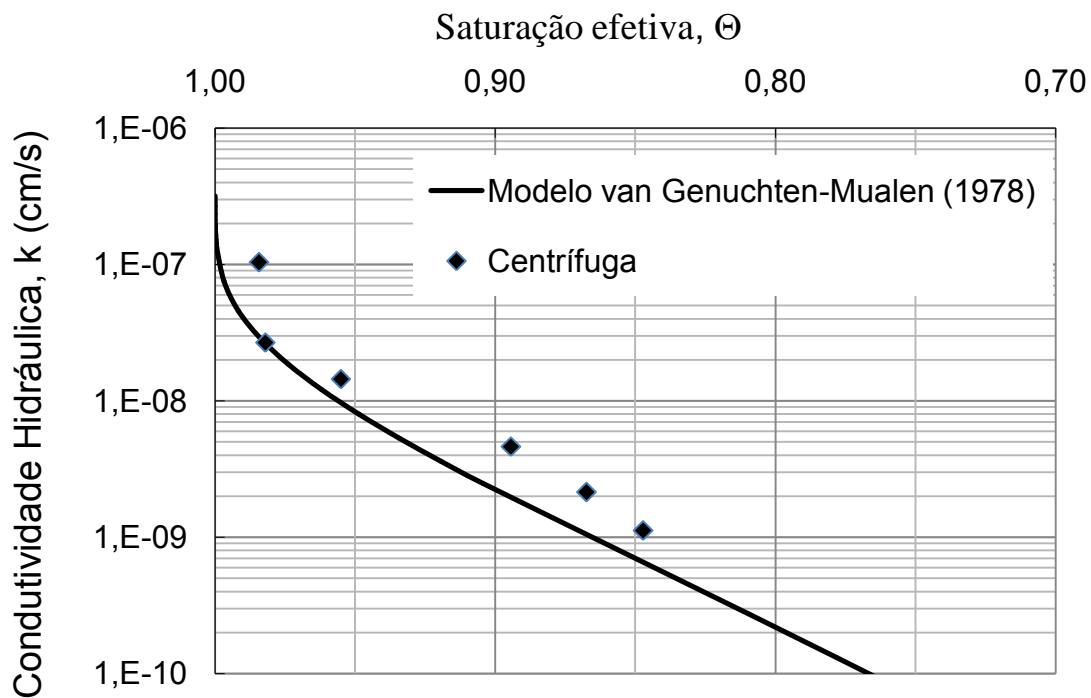


Figura 4.31: Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra CH95m.

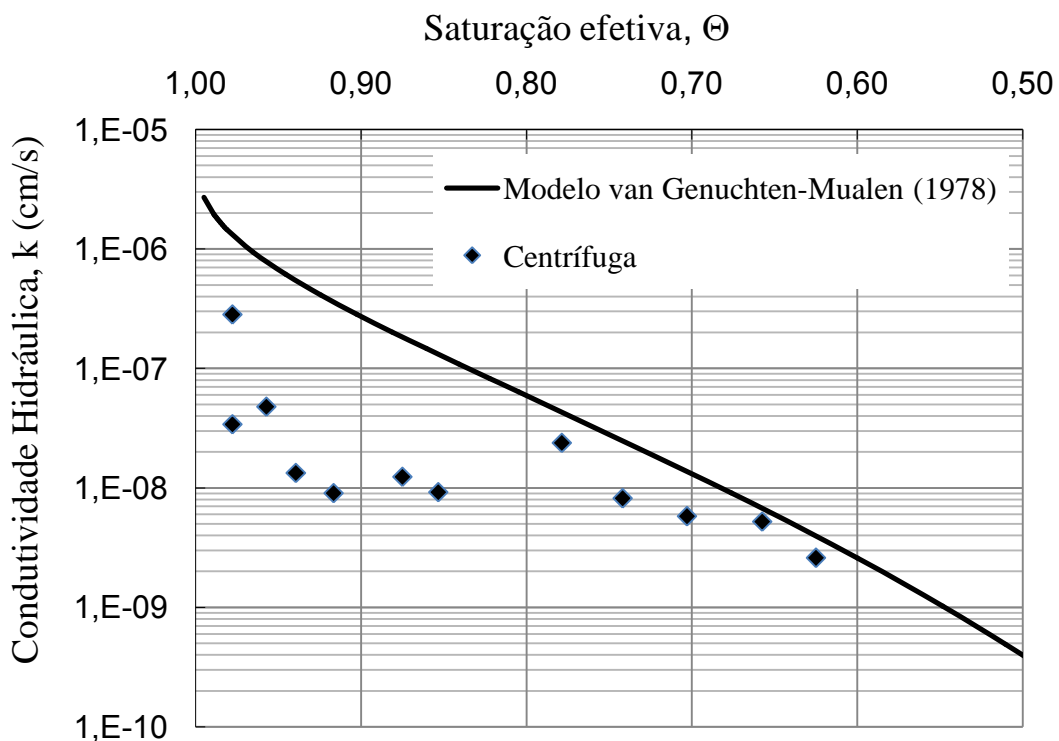


Figura 4.32 Função de condutividade pelo método centrífugo e curva teórica de van Genuchten-Mualen para a amostra CH90m.

Para o solo CH, as funções de condutividade obtidas pelo modelo de van Genuchten-Mualem ficaram menos próximos dos dados obtidos pela centrifuga do que para o solo SC, principalmente para as amostras CH90d e CH90m, para as quais o modelo de van Genuchten-Mualem superestimou os dados obtidos pela centrifuga. Uma provável explicação para esta diferença está nos valores das condutividades hidráulicas saturadas, Figura 4, que não seguiram o comportamento esperado, como já se comentou anteriormente. Apesar disso, mais uma vez se considera que dadas as dificuldades e incertezas na obtenção da função de condutividade hidráulica por todos os métodos, as comparações alcançadas podem ser consideradas boas e comprovam a eficiência do método da centrifuga.

5 CONCLUSÕES

Nesta tese foi projetado, construído e colocado em funcionamento um equipamento que utiliza uma pequena centrífuga, para determinação das propriedades hidráulicas dos solos.

Com o equipamento desenvolvido foi possível a determinar CRAs e FCHs para dois solos, um arenoso e o outro mais argiloso. Os resultados encontrados foram comparados com os obtidos por outras técnicas, mais comumente usadas para determinação destas propriedades hidráulicas.

As principais conclusões encontradas ao longo do trabalho são as seguintes.

5.1 Conclusões sobre o equipamento

A centrífuga com as adaptações desenvolvidas funcionou muito bem.

As peças que foram elaboradas para facilitar o manuseio e diminuir o tempo de leitura das umidades, reduzindo a obtenção dos resultados, não apresentaram avarias quando submetidas a altas rotações.

Na sua versão atual, o equipamento desenvolvido não permite aplicar valores de sucção maiores que cerca de 500 kPa. Portanto, não possibilita determinar pontos com teores de umidade volumétrica menores, mais próximos da umidade residual, a não ser para solos com textura grossa.

O equipamento permitiu determinar simultaneamente 4 CRAs e FCHs.

5.2 Conclusões sobre a CRA

As CRAs foram obtidas com sucesso para as amostras dos solos SC e CH, para valores de sucção entre 2 e 350 kPa.

No entanto, apesar da limitação mencionada acima, o equipamento ainda é adequado em para aplicações práticas, nas quais, quando há predominância de solo argiloso, estes se encontram *in situ* com frequência com grau de saturação acima de 85%, portanto com umidades volumétricas bem acima dos valores residuais.

Os resultados obtidos pelo método centrífugo ficaram bem próximos dos valores alcançados com os métodos tradicionais (placa de pressão e papel filtro), dentro da faixa de valores que o equipamento desenvolvido consegue trabalhar.

Para atender situações nas quais se necessita da CRA completa, ou seja, até a umidade residual, propôs-se incluir um ponto aos obtidos com a centrífuga, que seria calculado usando-se a técnica do papel filtro. A curva alcançada após a adição deste ponto com umidade próxima da residual aproximou-se melhor da obtida pelos métodos tradicionais.

Comparando as CRAs em relação as características de moldagem (grau de compactação e desvio de umidade), as curvas apresentaram o mesmo comportamento observado por Vanapalliet *al.* (1999) em ambas as amostras, ou seja, as curvas moldadas no ramo úmido apresentam maiores valores de sucção de entrada de ar.

Para obtenção apenas da CRA, o tempo mínimo de centrifugação deverá ser de 30 minutos para solos grossos e 180 minutos para os solos

finos. O tempo máximo para obtenção da CRAs foi de dois e três dias para os solos SC e CH, respectivamente.

5.3 Conclusões sobre as FCHs

Os resultados da FCHs obtidas por meio centrífugo para o solo SC ficaram próximos aos obtidos utilizando o permeâmetro e a curva do modelo teórico de van Genuchten-Mualen.

As FCHs obtidas com a centrífuga ficaram próximas das fornecidas pelo modelo de van Genuchten-Mualen e dos pontos obtidos com o permeâmetro de carga variável, para as amostras SC 97d e SC 100. Dadas as dificuldades e incertezas na obtenção da FCH por todos os métodos, as comparações podem ser consideradas boas.

Para o solo CH, as FCHs obtidas com a centrífuga e alcançadas pelo modelo de van Genuchten-Mualen ficaram menos próximas do que para o solo SC, principalmente para as amostras CH90d e CH90m, para as quais o modelo de van Genuchten-Mualen superestimou os dados obtidos pela centrífuga. Uma provável explicação para esta diferença está nos valores das condutividades hidráulicas saturadas que não seguiram o comportamento esperado, como já se comentou anteriormente. Apesar disso, mais uma vez se considera que dadas as dificuldades e incertezas na obtenção da FCH por todos os métodos, as comparações alcançadas podem ser consideradas boas.

A conclusão final é que do método da centrífuga desenvolvido e apresentado neste trabalho se mostrou muito eficiente e prático porque

reduz substancialmente o tempo necessário para se obter as propriedades hidráulicas de solos.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181/84, **Solo – Análise Granulométrica – Procedimento**, Rio de Janeiro, 13p, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: **Solo: ensaio de compactação: Procedimento**. Rio de Janeiro, RJ, 10 p, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459/84, **Solo - Determinação do limite de liquidez**, Rio de Janeiro, 6p, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180/84, **Solo – Determinação do limite de plasticidade**, Rio de Janeiro, 3p, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508/84, **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**, Rio de Janeiro, 8p, 1984.

ASTM D-6527-01. **Test method for determining unsaturated and saturated hydraulic conductivity in porous media by steady-state centrifugation**. Int., West Conshohocken, PA, 2000.

ASTM D-5298-03. **Standard test method for measurement of soil potential(suction) using filter Paper**, 2003.

AIBAN, S.A. & ZNIDARCIC, D., **Evaluation of The Flow Pump and Constant Head Techniques for Permeability Measurements**, Geotechnique Vol 36 N°4, pp. 655-666, 1989.

ARARUNA JR, J.T., **Measurement of Permeability of Soil Using a Flow Pump-Development and Evaluation of Equipment and Test**

Procedure Ph. D. Dissertation, University of New Castle, Civil Engineering Department, 1995.

BASHA, H.A., AND N.I. MINA. 1999. **Estimation of the unsaturated hydraulic conductivity from the pressure distribution in a centrifugal field.** Water Resource. Res. 35:469–477.

BENSON, C. AND GRIBB, M. 1997.**Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the laboratory and field.**Unsaturated Soil Engineering Practice. Houston, S. and Wray, W. eds. 113-168.

BICALHO, K. V., “**Modeling Water Flow in an Unsaturated Compacted Soil**”.Ph.D. Dissertation, University of Colorado, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, 235p, 1999.

BOOKING e FREDLUND, D. G. (1980).**Limitation of the axis translation technique.**In: International Conference on expansive Soils, 4, Denver, 1980. Proceedings, p. 117 – 135.

BRIGGS, L.J., AND MCLANE, J.W. 1907.**The moisture equivalents of soils.,U.S.** Department of Agriculture, Bureau Of Soils Bulletin No. 45.

BROOKS, R.H., AND COREY, A.T. 1964.**Hydraulic properties of porous medium.**Colorado State University Fort Collins. Hydrology Paper No. 3. March.

BUCKINGHAM, E. 1907.**Studies of the movement of soil moisture.**USDA Bureau of Soils Bull.38. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

CHANDLER, R.J.; CRILLY, M.S. AND MONTGOMERY-SMITH, G. (1992) - **A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings.**Proc.Of the Institute of Civil Engineering, 92 - n.2 - pp.82-89.

- CAPUTO, M.C., AND J.R. NIMMO. 2005. **Quasi-steady centrifuge method for unsaturated hydraulic properties.** Water Resour. Res. 41:W11504,
- CONCA, J.L., AND J. WRIGHT. 1992. **Diffusion and flow in gravel, soil, and whole rock.** Appl. Hydrogeol. 1:5–24.
- CONCA, J.L., AND J. WRIGHT. 1998. **The UFA method for rapid, direct measurements of unsaturated transport properties in soil, sediment, and rock.** Aust. J. Soil Res. 36:291–315.
- CONCA, J.L. 1993. **Measurement of unsaturated hydraulic conductivity and chemical transport in Yucca Mountain tuff.** Milestone Rep. 3044- WBS1.2.4.1.4.1, LA-12596-MS/UC-814. Los Alamos Natl. Lab., Los Alamos, NM.
- CONCA, J.L., M.J. APTED, W. ZHOU, R.C. ARTHUR, AND J.H. KESSLER. 1998. **Flow barrier system for long-term high-level waste isolation: Experimental results.** Nucl. Technol. 124:88–100.
- CONCA, J.L., D.G. LEVITT, P.R. HELLER, T.J. MOCKLER, AND M.J. SULLY. 1997. **Direct UFA measurements of the unsaturated hydraulic conductivity: Comparisons to van Genuchten / Mualem estimations, and applications to recharge mapping in arid regions.** p. 1173–1196. In Proc. Int. Worksh. on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, Riverside, CA. 22–24 Oct. 1997. Part 2.
- COREY, A.T. 1977. **Mechanics of heterogeneous fluids in porous media.** Water Resources Publication, Littleton, Colo.
- DANIEL, D.E., **Permeability Test for Unsaturated Soil.** Geotechnical Testing Journal, (ASTM), Vol. 6, N° 2 pp. 81-86, 1983.

- DELGADO, C. W.C., **Desenvolvimento de um Equipamento para o Estudo da Permeabilidade Efetiva em Meios Multifásicos**. Tese de doutorado, PUC-RIO, Rio de Janeiro, 373p, 2000.
- ELZEFTAWY, A.; CARTWRIGHT, K., **“Evaluation the Saturated and Unsaturated Hydraulic Conductivity of Soils”**. Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM STP, T.F. Zimmie and C.D. Riggs Editors, pp168-181, 1981.
- FREDLUND, D.G. AND XING, A. 1994.**Equations for the soil-water characteristic curve**. Can. Geotech. Jour. 31, 521-532.
- FREDLUND, D.G. & HOUSTON, S.L. (1997).**Unsaturated Soil Engineering Practice**, Geotechnical Special Publication no. 68, Geo Institute, American Society of Civil Engineers
- FREDLUND, D. G. AND RAHARDJO, H., **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1993. p. 1 – 6, 1993
- FREDLUND, D. G.; XING, A. & HUANG, S., **Predicting the Permeability Functions for Unsaturated Soil Using the Soil-Water Characteristic Curve**. Canadian Geotechnical Journal, v. 31, n° 4, pp. 533 - 546, 1994.
- FREITAS JÚNIOR, E.; SILVA, E. M. **Uso da centrífuga para determinação da curva de retenção de água do solo, em uma única operação**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 19, n. 11, p. 1423-1428, nov. 1984.
- GARDNER, R.A. 1937. **A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range**. Soil Science, 43: 277–283.
- GARDNER W. 1958.**Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table**. Soil Science. 85, 228-232.

- GUIMARAES, L.M., (2008) **Desenvolvimento de um Equipamento para Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada e Não Saturada em Solos**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, UFV, 64p.
- GUIMARÃES, L.M., AZEVEDO, R.F., REIS, R.M., AZEVEDO., I.C.A.D., NASCENTES, R. **Desenvolvimento de um Permeômetro para Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada e Não Saturada de Solos**. Combramseg, Búzios, 2008. 8p.
- KHANZODE, R.M., VANAPALI, S.K., AND FREDLUND, D.G. 2002. **Measurement of soil-water characteristic curves for fine-grained soils using a small-scale centrifuge**. Can. Geotech. Jour. 39, 1209-1217.
- IWATA, S., **Soil-water interactions**. USA, Marcel Dekker, Inc., 380 p, 1988.
- JIMENES S.J., **Hacia una Mecánica de Suelos no Saturada**. Revista Ingeniería Civil Vol.88 -1ª parte. pp.145-164, 1993.
- HAMILTON, J.M., DANIEL D.E AND OLSON R.E., **Measurement of Hydraulic Conductivity of Partially Saturated Soils**. Permeability and Groundwater Contaminant Transport. ASTM STP 746. Zimmie T.F. and Riggs C.º Eds., American Society for Testing and Materials, 1981.
- HASSLER, G.L., AND BRUNNER, E. 1945. **Measurement of capillary pressures in small core samples**. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 160: 114–123.
- HILF, J.W. (1956). **An investigation of pore-water pressures in compacted cohesive soils**. PhD thesis, Denver - Colorado.
- HILLEL, D., **Soil Water - Physical Principles and Processes**. New York, Academic Press, 1971. cap. 1 – 5, 1971.

- LIVINGSTON, B. E. (1906). **The relation of desert plants to soil moisture and to evaporation.** Carnegic Inst. Publ. n.50.
- LU, N. & LIKUS, W.J., **Unsaturated Soil Mechanics.** John Wiley @ Sons, Inc., p. 556, 2004.
- MARINHO, F.A.M., **Os solos não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados.** Texto apresentado a USP/SP para o concurso de livre docência. USP, São Paulo/SP, 2005.
- McCARTNEY, J.S, **Determination of the Hydraulic Characteristics of Unsaturated Soils using a Centrifuge Permeameter.** Ph.D. Dissertation, University Texas, 388p, 2007.
- McCARTNEY, J.S., & ZORNBERG, J.G. (2005).**The Centrifuge Permeameter for Unsaturated Soils (CPUS).** Proceedings of the International Symposium on Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Experus 2005, Trento, Italy, June 27-29, A.A. Balkema, pp. 299-304
- MITCHELL, J. K., **Fundamentals of Soil Behavior.**2nd ed., Ed. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 435 p, 1993.
- MILLER, D. YESILLER, N., YALDO, K., AND MERAYYAN, S. (2002). **Impact of soil type and compaction conditions of soil water characteristic.** Jour. Geotech. Geoenv. Eng., ASCE. 128(9),733-742.
- MILLER, R.J. & LOW, P.F. (1963).**Thee hold Gradient for water flow in clay System.** Proc. Of Soil Science Society of America, Vol. 27, p.605-609.
- MONCADA, M.P.H., **Avaliação de propriedades hidráulicas de solos tropicais não saturados.** Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 324p, 2008.

- MUALEM, Y., 1976, **A New Model for Predicting Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media**. Water Resour. Res., Vol. 12, pp. 593–622.
- NAKAJIMA, H., AND A.T. STADLER. 2006. **Centrifuge modeling of one-step outflow tests for unsaturated parameter estimations**. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 3:731–768.
- NIMMO, J., RUBIN, J., AND HAMMERMEISTER, D. 1987. **Unsaturated flow in a centrifugal field: Measurement of hydraulic conductivity and testing of Darcy's law**. Water Resour. Res. 23(1), 124-134.
- NIMMO, J.R., K.S. PERKINS, AND A.M. LEWIS. 2002. **Steady-state centrifuge**. p. 903–916. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- NIMMO, J.R., D.A. STONESTROM, AND K.C. AKSTIN. 1994. **The feasibility of recharge rate determinations using the steady-state centrifuge method**. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:49–56.
- NIMMO, J.R. 1990. **Experimental testing of transient unsaturated flow theory at low water content in a centrifugal field**. Water Resour. Res. 26:1951–1960.
- NIMMO, J.R., AND K.A. MELLO. 1991. **Centrifugal techniques for measuring saturated hydraulic conductivity**. Water Resour. Res. 27:1263–1269.
- OLSEN, H.W., **Darcy's Law in Saturated Kaolinite**. Water Resource Research 2, N°2, 1966.
- OLSEN, H.W., NICHOLS R.W. AND RICE T.L., **Low Gradient Permeability Measurements in a Triaxial System**, Geotechnique, 35 N°2, 1985.

- OLSEN, H.W., WILLDEN, A.T., KIUSALAAS, N.J., NELSON, K.R. AND POESTER, E.P., **“Volume Controlled Hydrologic Property Measurements in Triaxial Systems”**. In Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soils, ASTM STP 1142, David E, Daniel and Stephan J. Tratwein, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.1994.
- ODÉN, S.**An integral method for determination of moisture retention curves by centrifugation**. Grundforbattering.Uppsala, v.27, p. 137-143, 1976.
- OLSON, T.C. AND SCHWARTZENDRUBER, D., **Soil Science Society of America Proceedings**.Vol.32 N°4, 1968.
- PANE, V., CROCE, P. ZNIDARCIC, D. KO, H.-Y., OLSEN, H.W. AND SCHIFFMAN, R.L., **Effects of Consolidation on Permeability Measurements for Soft Clay**, Geotechnique, 1983.
- PACHECO, P. G. M., **Análise Numérica do Fluxo e da Estabilidade de uma Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre**. Dissertação de Mestrado. PUC-RIO, Rio de Janeiro/RJ,129p, 2005.
- REATTO, A., SILVA, E. M., BRUAND, A., MARTINS, E. S., LIMA, J. E. F. W., (2008), **Validity of the centrifuge method for determining the water retention properties of tropical soils**.Soil Science SocietyofAmericaJournal 72, 6 (2008) 1547-1553.
- REICHARDT, K. (1985). **Processos de Transferência no sistema solo – planta - atmosfera**. Fund.,Cargill, Campinas, 466p.
- REIS, R. M.; STERCK, W. N.; RIBEIRO, A. B.; DELL’AVANZI,, E.; SABOYA, F.;TIBANA, S.; MARCIANO, C. R.; SOBRINHO, R. R. **Determination of the Soil-Water Retention Curve and the Hydraulic Conductivity Function Using a Small Centrifuge**. Geotechnical Testing Journal, Vol. 34, No. 5, 2011.

- RICHARDS, L.A. 1952. **Water conducting and retaining properties of soils in relation to irrigation.** Proc. Int. Symp. On Desert Research.523-546.
- RUSSELL, M.B., AND RICHARDS L.A. 1938.**The determination of soil moisture energy relations by centrifugation.** Soil Science Society of America Proceedings, 3: 65–69.
- SCHACKELFORD, C.D. AND GLADE, M.J., **Constant-Flow and Constant Gradient Permeability Tests on Sand-Bentonite-Fly Ash Mixtures, In Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soils.** ASTM STP 1142, 1994.
- SEAMAN, J.C., S.A. ABURIME, J.M. HUTCHISON, AND J.H. SINGER. 2002. **Evaluating vadose transport processes using centrifugation methods.** p. 233–242. In G.A. Uzochukwu et al. (ed.) Proc. Natl. Conf. on Environ. Sci. and Technol., Greensboro, NC. 8–10 Sept. 2002. Battelle Press, Columbus, OH.
- SILVA, A.M., **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros. Dissertação de mestrado.** Escola de Engenharia de São Carlos- USP, 136p, 2005.
- SILVA, E. M., AZEVEDO, J. A. **Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado.** Pesq. agropec. bras., Brasília, v. 37, n. 10, p. 1487-1494, out. 2002.
- ŠIMŮNEK, J., AND J.R. NIMMO. 2005. **Estimating soil hydraulic parameters from transient flow experiments in a centrifuge using parameter optimization technique.** Water Resour. Res. 41.
- SINGH, D.N., AND S.J. KURIYAN. 2002. **Estimation of hydraulic conductivity of unsaturated soils using a geotechnical centrifuge.** Can. Geotech. J. 39:684–694.

- SOTO, M. A. A., **Comparação entre Métodos de Imposição e de Controle de Sucção em Ensaios com Solos Não Saturados**, Tese de Doutorado. USP, São Carlos / SP, 233p, 2004.
- VAN DEN BERG, PERFECT, E., TU, E., KNAPPE, P.S.K., LEÃO, T. P., DONAT, R.W., (2009), **Unsaturated Hydraulic Conductivity Measurements with Centrifuges: A Review**. Vadose Zone J. Vol. 8, No. 3, 531–547, August 2009.
- VAN GENUCHTEN, M. 1980. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. Soil Sci. Soc. Am. J.. 44, 892-898.
- VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G. AND PUFAHL, D.E. (1999). **The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till**. Géotechnique, 49(2), 143-159.
- VILAR, O.M (2002). **Resistência ao Cisalhamento (Apostila)**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- WRIGHT, J., J.L. CONCA, AND X. CHEN. 1994. **Hydrostratigraphy and recharge distributions from direct measurements of hydraulic conductivity using the UFA method**. Publ. PNL-9424/UC-906. Pac. Northw. Natl. Lab., Richland, WA.