

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Estudo de Infiltração na Camada de Cobertura do Aterro
do Morro do Céu, Niterói - RJ

Paulo Vitor Cunha da Silva

2011



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

Estudo de Infiltração na Camada de Cobertura do Aterro do Morro do Céu, Niterói- RJ

Paulo Vitor Cunha da Silva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora Maria Cristina Moreira Alves

Rio de Janeiro

Setembro de 2011

Estudo de Infiltração na Camada de Cobertura do Aterro do Morro do Céu, Niterói- RJ

Paulo Vitor Cunha da Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

Prof^a. Elizabeth Ritter DSc. – UERJ

Prof. Marcos Barreto de Mendonça DSc. - UFRJ

Prof^a Maria Cristina Moreira Alves DSc. (orientadora) - UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO de 2011

S586 Silva, Paulo Vitor Cunha da.

Estudo de infiltração na camada de
cobertura do aterro do Morro do Céu / Paulo
Vitor Cunha da Silva. - 2011.

71 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Maria Cristina Moreira ALves

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação
em Engenharia Civil)-Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Bibliografia: f. 68-71.

1. Engenharia Civil. 2. Camada de
cobertura. 3. Aterro sanitário. 4. Morro do
Céu. I. Título. II. Alves, Maria Cristina
Moreira.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora Prof^a Maria Cristina Moreira Alves pelas sugestões e correções na elaboração do Projeto de Graduação.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro neste projeto.

Agradeço também aos professores de Geotecnia que me ensinaram muito sobre esta área da Engenharia Civil e mostraram que fiz a escolha certa: Prof. Leonardo Becker, Prof. Ian Shumann, Prof. Marcos Barreto e Prof. Fernando Danziger.

Pelos conselhos e apoio durante o período de iniciação científica, os quais me foram muito úteis na realização deste trabalho, sou grato ao Prof. Licínio da Silva Portugal professor do Programa de Engenharia dos Transportes da Coppe/UFRJ.

Agradeço a minha família, especialmente aos meus pais, Paulo Roberto e Isabel, e às minhas irmãs, Marília e Jéssica, pelo apoio e orientação durante toda minha vida.

Agradeço aos meus amigos da Politécnica que estiveram ao meu lado durante estes períodos, Frederico Marques, Jaider Xavier, Fernando Oliveira, Carol Falcão, Cláudia Dominoni, Larissa Macabu, Leandro Cortázio, Édipo Ázaro, Raissa Louvise, Bruno Souza, William Koeller, Bianca Molinari, Luiza França, Leonardo Louback, Luiz Otávio da Silva, Gregório Pina, Meggie Oliveira, Camila Braga, Renato Goldbach, Dayane de Almeida, Pedro Freu, Raquel Linhares, Felipe Ladeira entre outros. Também agradeço aos meus amigos do CEFET/RJ, com os quais mantenho contato até hoje.

Por fim agradeço aos funcionários da Escola, aos da Xerox do Bloco D, Djavan e outros, pela ajuda durante todo o curso, e em especial ao Sr. Paulo Alves pelos serviços prestados ao Laboratório Fernando Emmanuel Barata durante muitos anos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Estudo de Infiltração na Camada de Cobertura do Aterro do Morro do Céu, Niterói- RJ

Paulo Vitor Cunha da Silva

Setembro/2011

Orientadora: Maria Cristina Moreira Alves

Curso: Engenharia Civil

A disposição dos resíduos sólidos é uma questão importante na sociedade contemporânea. A necessidade de proteção do meio ambiente bem como a evidente diminuição de áreas disponíveis para este fim, apontam para a urgência de avanços nessa área de conhecimento. Um projeto adequado de disposição de resíduos sólidos urbanos, pressupõe a construção de camadas de cobertura eficientes, que minimizem a infiltração de água para a massa de lixo e evitem a erosão do material de cobertura. O presente trabalho pretende analisar a infiltração de água pela camada de cobertura durante o intervalo de um ano no Aterro do Morro do Céu em Niterói, Rio de Janeiro. Para tanto, foram retiradas amostras deformadas e indeformadas na cobertura do aterro para caracterização geotécnica, determinação da curva de retenção, realização de ensaios de permeabilidade e compactação. Os parâmetros da curva de retenção foram ajustados através do programa RETC, que juntamente com os resultados provenientes dos ensaios realizados e os dados pluviométricos, serviram como base de entrada para a utilização do programa Hydrus 1D, permitindo a avaliação da infiltração.

Palavras-chave: Aterro sanitário, Camada de cobertura, Solos não saturados, Sucção, Curva Característica, RETC, Aterro do Morro do Céu, Infiltração, Hydrus 1D.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Infiltration Studies in layers of coverage at Morro do Céu's Sanitary Landfill

Paulo Vitor Cunha da Silva

September/2011

Advisor: Maria Cristina Moreira Alves

Course: Civil Engineering

Solid Waste management has become an important issue in contemporary society including a growing preoccupation with the environment and the shortage of storage areas. An appropriate project of solid waste, as sanitary landfills, includes the construction of effective cover layers in order to prevent infiltration of water into the waste and the erosion of the cover material. This work analyses the water's infiltration within a one year period at Morro do Céu's Landfill, at the city of Niterói, Rio de Janeiro, utilizing the Hydrus 1D Program. To get to the aim, undisturbed and disturbed sampling were taken out from its to cover layer in order to make geotechnical characterization, retention curve as well as permeability and compaction tests. The parameters for retention curve were adjusted based on RETC program, which together with tests results and pluviometric were used as input data to run Hydrus1D program to evaluate infiltration.

Keywords: Infiltration, Cover layer, Sanitary Landfill, Unsaturated soils, Suction, Retention Curve.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
2.1. Solos não saturados.....	03
2.2. Sucção.....	04
2.2.1. Métodos para medir sucção.....	06
2.2.1.1. Papel Filtro.....	06
2.2.1.2. Placa de Sucção.....	07
2.2.1.3. Câmara de Pressão.....	08
2.3. Curva de retenção de água.....	09
2.4. Compactação.....	14
2.5. Camada de cobertura.....	17
2.5.1. Tipos de sistema de camada de cobertura.....	20
2.5.1.1. Sistema convencional.....	20
2.5.1.2. Barreiras Capilares.....	20
2.5.1.3. Coberturas evapotranspirativas.....	21
2.6. Infiltração.....	21
2.6.1. Condutividade Hidráulica de Solos saturados.....	22
2.6.2. Condutividade Hidráulica de Solos não saturados.....	23
3. METODOLOGIA.....	25
3.1. Local estudado.....	25
3.2. Ensaios.....	29
3.2.1. Coleta das amostras.....	29
3.2.2. Ensaios Realizados.....	31
3.3. Dados Metereológicos.....	37

3.4. Modelagem.....	37
3.4.1. Programa RETC.....	37
3.4.2. Programa HYDRUS 1D.....	38
4. RESULTADOS	40
4.1. Ensaios realizados na Argila Amarela.....	40
4.1.1. Caracterização.....	40
4.1.2. Compactação.....	41
4.1.3. Ensaio de permeabilidade saturada.....	42
4.1.4. Retenção.....	42
4.2. Ensaios realizados na Argila Vermelha.....	46
4.2.1. Caracterização.....	46
4.2.2. Compactação.....	47
4.2.3. Ensaio de permeabilidade saturada.....	48
4.2.4. Retenção.....	48
4.3. Modelagem.....	49
4.3.1. Programa RETC.....	49
4.3.1.1. Argila Amarela.....	49
4.3.1.2. Argila Vermelha.....	55
4.3.2. Programa HYDRUS 1D.....	57
4.3.2.1. Argila Amarela.....	58
4.3.2.2. Argila Vermelha.....	61
5. DISCUSSÕES.....	64
6. CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

1. Introdução

O aumento da população mundial e da produção de bens de consumo gerou como uma das consequências o aumento na produção de resíduos sólidos urbanos (RSU), tornando sua disposição uma das grandes questões a ser tratada do ponto de vista técnico e ambiental. A situação dos RSU é agravada pela escassez de áreas para disposição, o que traz a necessidade de aumentar a vida útil das destinadas a este fim.

A disposição de resíduos no solo apresenta-se como uma alternativa bastante eficiente seguindo a premissa de aterro sanitário, onde os resíduos são seguramente confinados, possuindo um sistema de drenagem de gases e chorume com monitoramento contínuo. Caso contrário poderá apresentar graves problemas à sociedade, através da contaminação das águas subterrâneas e do solo, como nos lixões, locais os quais os resíduos são depositados a céu aberto.

Com o término da vida útil do aterro sanitário é necessário isolar os resíduos do meio ambiente de forma apropriada, através da construção da camada de cobertura. A camada de cobertura é o elo entre os resíduos aterrados e a atmosfera, cuja finalidade é minimizar a infiltração de água para a massa de lixo, a emissão de gases e a erosão do material de cobertura. Desta forma, a estimativa da infiltração é importante, pois garante informações necessárias para os projetos técnicos que necessitam de quantitativo do líquido infiltrado, como sistemas de drenagem e tratamento de lixiviados, a fim de preservar a integridade do lençol freático e as águas subterrâneas.

O presente trabalho pretende analisar a infiltração na camada de cobertura do aterro do Morro do Céu a partir de dados obtidos de vários ensaios geotécnicos realizados em laboratório a partir de amostras retiradas no campo.

O Aterro de Morro do Céu, localizado no bairro do Caramujo em Niterói começou a funcionar como depósito de lixo à céu aberto nos anos 80, sendo que na década de 90 os resíduos começaram a ser aterrados de forma controlada. No início, a cobertura do aterro era realizada com material de escavação oriundo das obras da prefeitura. No entanto, desde 2010 o material utilizado para a cobertura do aterro é proveniente de duas jazidas localizadas próximas ao município.

Para a análise da infiltração dos novos materiais (argila vermelha e argila amarela), foi realizada a caracterização destes. Para isso, foram feitos ensaios, segundo as normas pertinentes, de caracterização do solo (granulometria por peneiramento e sedimentação, e limites de Atterberg), de compactação e de permeabilidade saturada e de retenção de água.

Com os dados obtidos no ensaio de retenção, realizado no laboratório de Mecânica dos Solos da UFRJ, pelo método do papel filtro, foram elaboradas as curvas de retenção da argila amarela. Para a realização da retenção de água da argila vermelha, os dados dos ensaios pelo método da placa de sucção e câmara de pressão realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da USP foram utilizados. O ajuste destas curvas foi feito com o auxílio do programa RETC, o qual fornece os parâmetros da curva segundo o modelo de Van Genuchten (1980).

A infiltração na camada de cobertura do aterro do Morro do Céu foi avaliada com a utilização do programa Hydrus 1D, tendo como entrada os parâmetros da curva característica dos dois tipos de solo e os dados meteorológicos de precipitação de uma estação meteorológica próxima ao aterro durante todo o ano de 2010.

O material do aterro é um solo compactado. E a compactação altera as condições iniciais do solo de forma a melhorar seu comportamento mecânico. Os processos de escavação, de remolde e de recompactação podem resultar num material não saturado. Por isso, para realização do trabalho realizou-se uma revisão bibliográfica inicial em solos não saturados e curva de retenção de água.

Para complementação fez-se uma revisão nos demais assuntos que englobam infiltração em camada de cobertura: compactação, camada de cobertura e infiltração.

Enfim, com este trabalho pôde-se ter uma primeira estimativa sobre a quantidade de infiltração na camada de cobertura do aterro sanitário do Morro do Céu, em Niterói, Rio de Janeiro, com a utilização dos dois tipos de argila.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Solos não saturados

Numa situação prática de engenharia, os solos podem não se encontrar no estado saturado, não se comportando, com isso, segundo os princípios e conceitos clássicos da mecânica dos solos saturados (FREDLUND & RAHARDJO, 1993). Os principais tipos de solos que são abrangidos pela teoria dos solos não saturados são os *solos residuais*, os *solos expansivos*, os *solos compactados*, alguns *solos sedimentares* e os *solos colapsíveis* (VIVIAN 2008). Tais solos são formados principalmente através da influência do clima, já que a água presente no solo é extraída por evaporação ou evapotranspiração da cobertura vegetal. A distribuição de tensões durante o processo de secagem do solo é apresentada na figura 1.

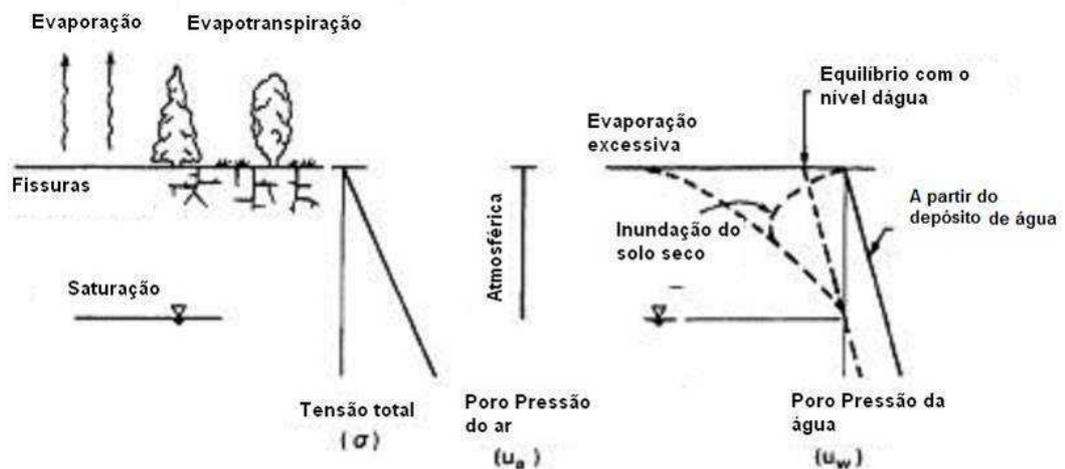


Figura 1 – Distribuição de tensões durante o processo de secagem do solo (Fonte: FREDLUND & RAHARDJO, 1993)

Os solos não saturados possuem três fases: ar, água e sólidos. No entanto, de acordo com Fredlund e Morgenstern (1977) existiria uma quarta fase que seria a interface solo/água. Tal interface seria resultado da diferença de orientação das moléculas da água no contato com ar em relação às moléculas no interior da água. Assim, ocorre uma contração da superfície da água (na superfície do líquido as forças em direção à fase líquida são maiores do que as em direção à fase gasosa) e esta se comporta como se estivesse coberto por uma membrana elástica em um estado de tensão constante (Figura 2). A tensão superficial está ligada

diretamente a *sucção* (capilaridade), e tem importância no entendimento do comportamento mecânico e de deformabilidade dos solos não saturados.

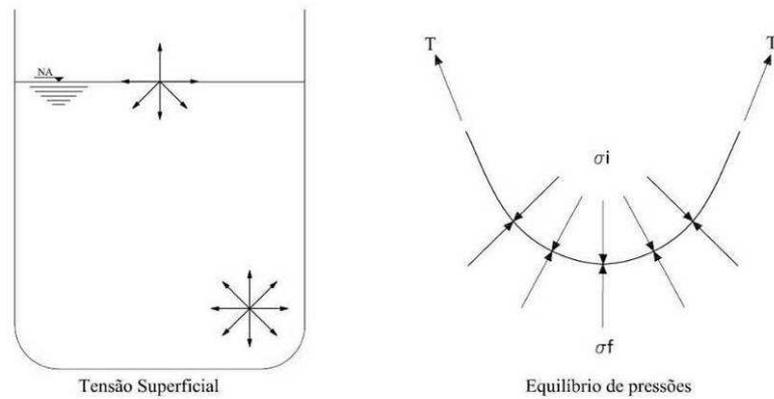


Figura 2 – Fenômenos relacionados à capilaridade (Fonte: PINTO, 2000)

2.2. Sucção

A *sucção* é a quantidade energética que avalia a capacidade do solo de reter água (LEE & WRAY, 1995). Quando a água livre migra para dentro de um solo não saturado, será adsorvida ou retida por ele. Para desprender esta água seria necessário aplicar uma força externa. O valor da energia aplicada por unidade de volume de água caracteriza a sucção. Já para Marinho (2000), sucção seria a pressão isotrópica imposta pelo poro-água para absorver mais água.

A sucção do solo pode ser quantificada em função da umidade relativa e é chamada de *sucção total* (ψ). Esta pode ser dividida em duas componentes, *sucção matricial* ($u_a - u_w$), onde u_a é poropressão de ar e u_w é a poropressão do água, e *osmótica* (π). A sucção matricial está relacionada à matriz do solo através de fenômenos de capilaridade (macroestrutura) e adsorção (microestrutura), conforme figura 3, ou segundo Houston (1994), seria a afinidade que o solo tem com a água na ausência de qualquer teor de sal na mesma. Já a osmótica seria causada por efeitos osmóticos devido à presença de solutos, ou, de acordo Yong e Warkentin (1965), seria a tensão adicional necessária para remover uma molécula de água, devido à presença de sais dissolvidos na água. O comportamento mecânico e hidráulico dos solos não saturados é mais influenciado pelas variações da sucção matricial do que osmótica

(FREDLUND & RAHARDJO, 1993). À medida que os solos ficam mais secos aumenta a sucção.

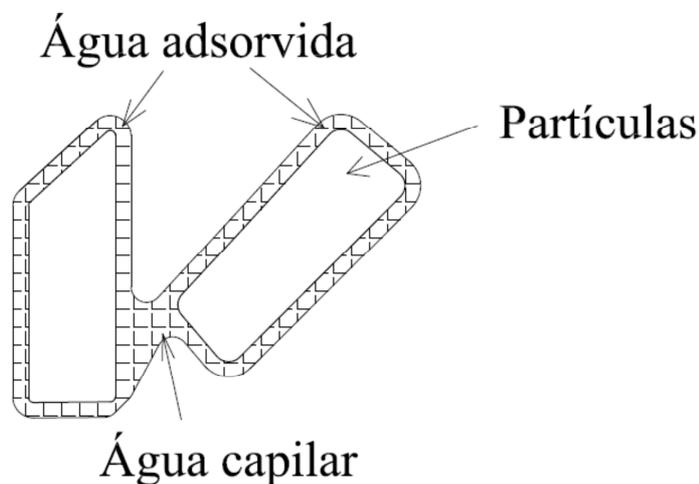


Figura 3 – Água capilar e adsorvida relacionados à sucção matricial (Fonte: HILLEL apud SANTOS,2009)

Existem alguns métodos para medir a sucção nos solos, como os exemplificados na Tabela 1.

Tabela 1 – Métodos de medição da sucção dos solos (adaptado de GERSCOVICH, 2010)

Método	Componente da Sucção	Tipo de Medição	Tipo de Ensaio	Faixa de Medida (kPa)
Psicrômetro	Total	Direto	Laboratório	100 - 8000
Papel filtro	Total ou matricial	Indireto	Laboratório	0 - 29000
Tensiômetro	Total ou matricial	Direto	Lab/Campo	0 - 90
Aparelho extrator de Richards	Matricial	Direto	Laboratório	0 -1500
Condutividade Térmica	Matricial	Indireto	Lab/Campo	0 - 400
Pore fluid squeezer	Osmótica	Indireto	Laboratório	Toda
Placa de Sucção	Matricial	Direto	Laboratório	0-30

Neste trabalho detalharemos apenas os métodos para medir a sucção dos solos usados na presente investigação, que foram o papel filtro, a placa de sucção e a placa de pressão.

2.2.1. Métodos para medir sucção

2.2.1.1. Papel Filtro

O método do *papel filtro* é um método simples e que abrange uma faixa de medida de sucção grande, o que o torna um método útil, mesmo que algumas de suas características de realização sejam suscetíveis ao erro. Segundo Marinho (1995) o método do papel filtro é baseado no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso com deficiência de umidade é posto em contato com um papel filtro com umidade menor. O papel passa, com isso, a absorver certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção.

A sucção do solo é obtida de forma indireta através de uma curva de calibração adequada (CHANDLER & GUTIERREZ *apud* MARINHO 1995), obtendo a relação entre sucção e a umidade do material poroso. O método pode medir a sucção total ou matricial dependendo do fluxo da água na interação entre o sistema de medição e o solo, o qual pode ser fluxo de vapor ou fluxo capilar (figura 4).

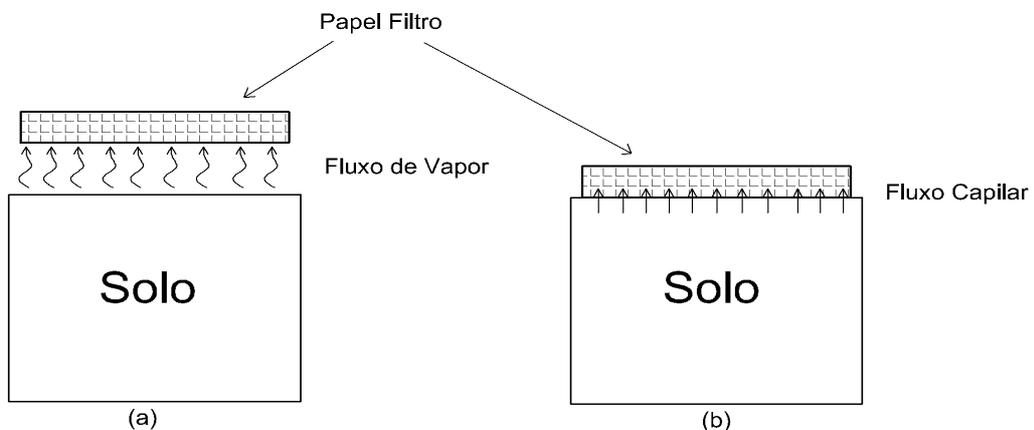


Figura 4 – Tipos de fluxo do solo para o papel filtro (Fonte: MARINHO, 1995)

Caso o papel esteja acima da amostra de solo, sem nenhum contato direto, ocorre o *fluxo de vapor*, ou seja, as moléculas de água devem vencer as forças capilares no solo e as forças osmóticas que agem graças à presença de sais. Sendo assim, a sucção medida será a *total*. Quando o papel é colocado em contato direto com o solo, o fluxo ocorre apenas por capilaridade, ou seja, junto com a água adsorvida, e a sucção medida é a *matricial*.

Greacen et al (1987) mostrou que quando o papel filtro é colocado em contato direto com a amostra, grande parte da água é absorvida nos primeiros minutos, e a partir daí é lentamente

absorvida, atingindo o equilíbrio em aproximadamente 7 dias. Já no caso em que o papel filtro não está em contato direto com a amostra, o tempo de equilíbrio dependerá do nível de sucção, sendo que quanto mais alto o valor de sucção, maior o tempo de equilíbrio.

A amostra deve ser colocada num lugar com isolamento térmico, para não haver influência da temperatura na interação entre o papel e o solo. Segundo Marinho (1995), uma caixa com aproximadamente 10cm de “isopor” deve ser satisfatória se a mesma ficar em uma sala com variação de temperatura de no máximo 5° C.

Os papéis mais usados são Whatman N° 42 ou Schleicher & Schuell N° 589, os quais devem ser usados diretamente da caixa (CHANDLER & GUTIERREZ *apud* MARINHO, 1994). A norma americana ASTM – D5298-92 sugere que o papel filtro seja seco em estufa por no mínimo 16 horas antes do uso. Para Marinho (1994), este procedimento pode afetar as características de absorção do papel resultando na alteração da curva de calibração.

2.2.1.2. Placa de Sucção

Através da *placa de sucção* pode-se medir a sucção matricial de forma direta. A amostra é colocada em contato com uma pedra porosa (pedra cerâmica de alta entrada de ar), que deve ser previamente saturada. Este conjunto é colocado sobre uma plataforma de altura variável e ligado a um reservatório com água, posicionado numa cota inferior, conforme figura 5. A figura 6 apresenta os equipamentos utilizados no ensaio de placa de sucção.

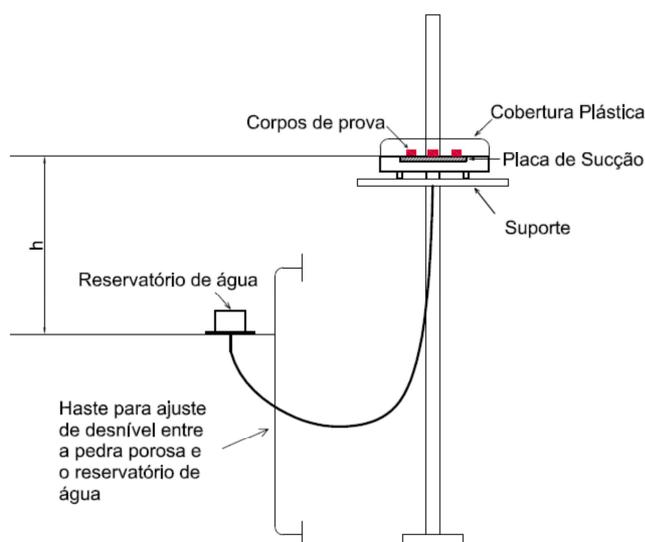


Figura 5 – Esquema da aparelhagem do método da placa de sucção (Fonte: OLIVEIRA *apud* GOMES, 2007)



Figura 6 – Equipamentos utilizados no ensaio de placa de sucção

Para diferentes potenciais gravitacionais predeterminados (sucção) a partir da diferença de cota (h) entre a plataforma variável e o reservatório de água, a umidade da amostra é medida.

A principal desvantagem deste método é o limite de sucção a ser medido, devido ao fato da altura da plataforma variável está restringida a altura do teto do laboratório do ensaio, em torno de 30 kPa (3 metros de coluna d'água), além de haver possibilidade de cavitação para valores maiores que 100 kPa (GOMES, 2007).

2.2.1.3. Câmara de Pressão

A câmara de pressão ou aparelho extrator de Richards é um equipamento utilizado no laboratório para medição da sucção matricial do solo. Compõe-se de uma câmara hermética, na qual se situa o corpo de prova sobre um disco cerâmico saturado, conectada a uma tubulação de ar pressurizado e a um reservatório de água deaerada.

Para realização do ensaio, impõe-se inicialmente uma pressão de ar sobre o interior do equipamento, havendo uma interação entre o corpo de prova e o disco cerâmico, e conseqüentemente uma troca de água entre estes dois elementos. A diferença entre a pressão de ar imposta e a pressão hidráulica medida no manômetro do reservatório de água é a sucção matricial do corpo de prova (figura 7).



Figura 7 – Câmara de pressão (Fonte: REICHARDT *apud* SANTOS, 2009)

Este ensaio é recomendado para sucções maiores que 100 kPa, podendo atingir valores de 1500 kPa com o uso de pedras cerâmicas especiais e 10.000 kPa com o uso de membrana de celulose (SANTOS, 2009).

A possibilidade de se medir ou controlar a sucção é um aspecto vantajoso do método, além de poder ser incorporado a diversos tipos de equipamentos de ensaio (anéis edométricos, caixas de cisalhamento, câmaras triaxiais etc.).

Como desvantagens estão: os riscos de obterem valores superestimados de sucção para amostras com graus de saturação superior a 80%, ou que contenham bolhas de ar oclusas; a possibilidade de se obterem valores subestimados de sucção em virtude de difusão de ar através da pedra porosa; e a possibilidade de ocorrer osmose, em função da qualidade de pedra porosa e do tipo de solo ensaiado (GOMES, 2007).

2.3. Curva de retenção de água

A *curva de retenção de água (curva característica)* relaciona a umidade gravimétrica, ou volumétrica ou saturação com a sucção do solo (Figura 8). Através da curva de retenção de água podem-se estimar diversos parâmetros que descrevem o comportamento dos solos não saturados tais como permeabilidade, resistência, compressibilidade entre outros, já que a quantidade de água nos poros determina as variações nas propriedades do solo.

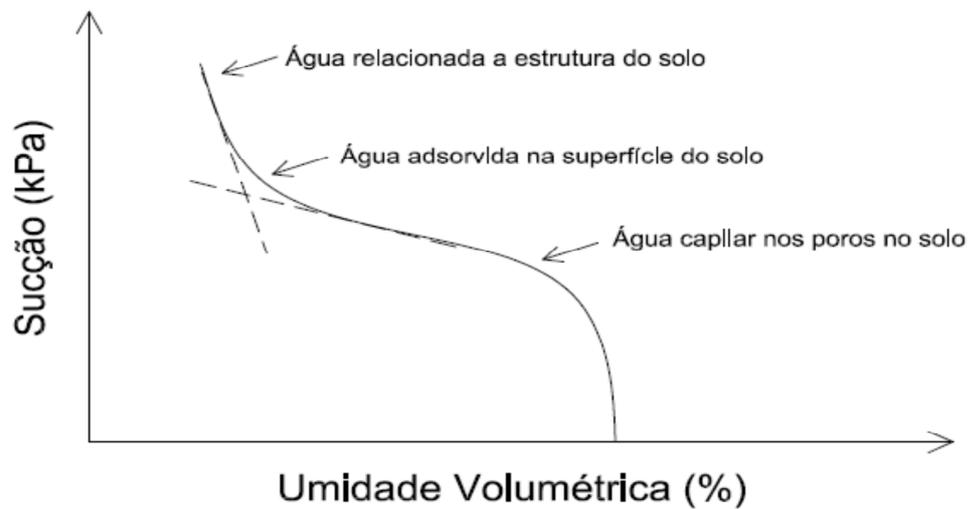


Figura 8 – Curva de retenção de água (GERSCOVICH, 1994)

A curva de retenção fornece informações importantes relacionadas à estabilidade de taludes, capacidade de carga de estradas e pistas de aeroportos, desempenho de solos de coberturas e *liners*, instalações para resíduos industriais e de lixo, comportamento de solos residuais, fluxo e movimento de contaminantes no solo em condições não saturadas (VANAPALLI et al, 2004). Uma curva de retenção de água relaciona a energia necessária para a retirada da água no solo e a quantidade da mesma.

Devido ao fato das diferentes terminologias usadas na literatura, as curvas de retenção de água do solo assumiram diversas formas. Fredlund e Xing (1994) sugerem que o termo *curva característica de umidade do solo* seja utilizado para representar a relação entre o teor de umidade volumétrica, θ , e a sucção matricial. Para baixos valores de sucção são apresentados resultados em escala aritmética no eixo das abscissas. Para valores de sucção ao longo de todo intervalo da curva característica de umidade do solo, ela é frequentemente apresentada utilizando-se uma escala logarítmica.

A parte inicial da curva (utilizando o processo de secagem) é caracterizada pela entrada de ar, ou seja, é a sucção matricial, na qual o ar começa a entrar nos vazios do solo. A umidade inicial é denominada de umidade saturada (θ_s). Enquanto que na parte final para umidade residual (θ_r) uma sucção muito grande deve ser aplicada para remover água do solo. Este valor máximo de sucção corresponde a uma umidade normalizada zero, sendo umidade

normalizada $\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$, onde θ é umidade do solo, θ_s é a umidade saturada e θ_r a umidade residual.

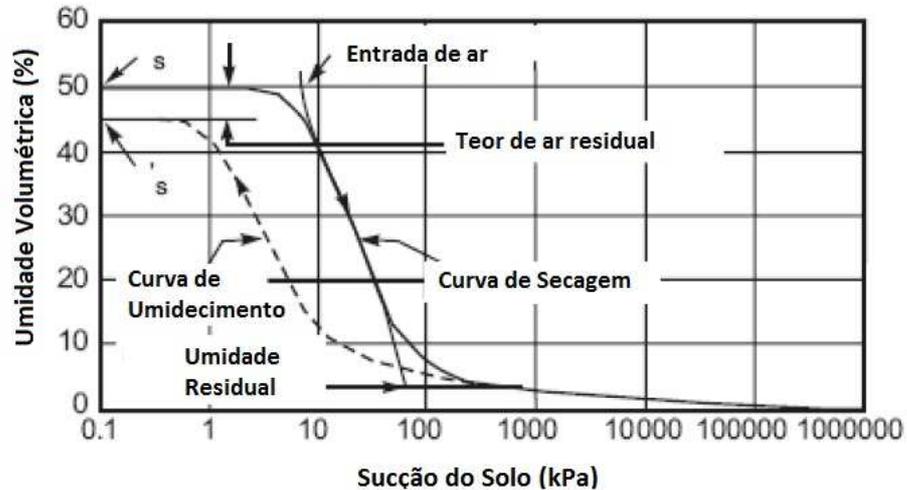


Figura 9 – Característica da curva de retenção de água (Fonte: FREDLUND & XING, 1994)

Alguns formatos de curva de retenção de água para tipos de solo diferentes são apresentados na figura 10.

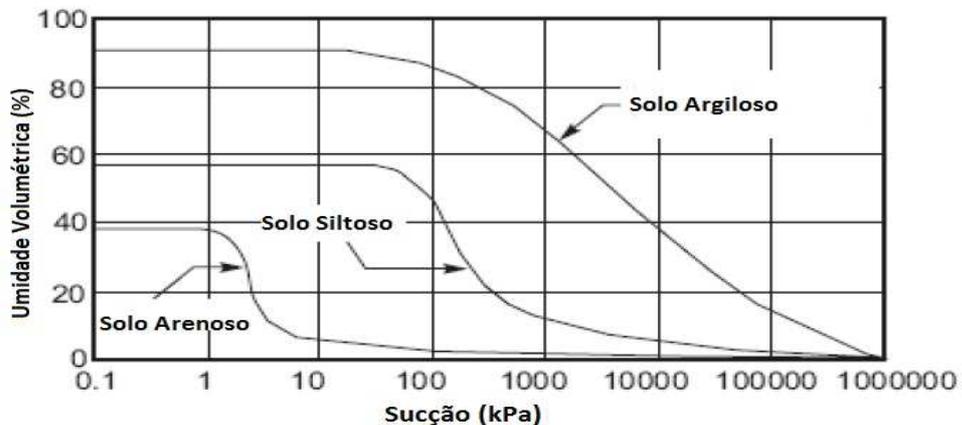


Figura 10 – Curva de retenção para diferentes tipos de solo (Fonte: FREDLUND & XING, 1994)

A curva característica pode ser traçada através dos dados obtidos no laboratório com o processo de secagem, quando há uma diminuição gradativa da umidade da amostra (ou por secagem ao ar ou pela aplicação de pressão), ou por umedecimento, quando a umidade é

acrescida com o tempo. Ambas têm um formato similar, mas diferem devido à histerese, como podemos observar nas Figuras 9 e 11.

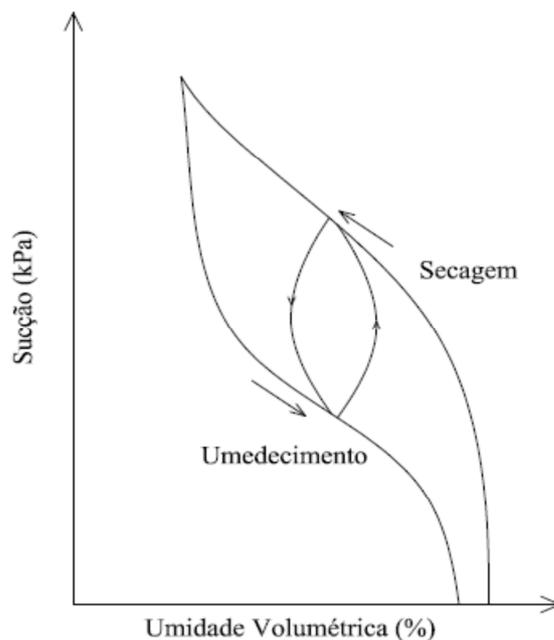


Figura 11 – Curva de retenção no umedecimento e secagem (Fonte: GERSCOVICH 1994)

Este comportamento histerético da curva de retenção ocorre devido aos seguintes fatores: efeitos dos diferentes ângulos de contato durante o avanço do menisco (umedecimento) e retrocesso (secagem); não uniformidade geométrica dos vazios do solo; presença de ar retido nos poros do solo e variações da estrutura do solo associadas a fenômenos de inchamento (durante umedecimento) ou contração (durante secagem).

Algumas proposições empíricas já existem na literatura para relacionar o teor de umidade volumétrica e a sucção, ou seja, de simular a curva característica. Em geral, tais proposições se ajustam a determinados tipos de materiais e a diferentes níveis de sucção.

Dentre tais proposições está a de Brooks e Corey (1964), equação 1, uma das mais antigas. Na qual θ é o teor de umidade normalizado (equação 2), ψ é a sucção, ψ_b é o valor de entrada de ar e λ é o índice de distribuição de porosidade, θ_R é a umidade residual e θ_s a umidade de saturação.

$$\theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \text{ (equação 1)}$$

$$\Theta = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \text{ (equação 2)}$$

McKeen e Bumb (1984) sugeriram uma função exponencial, denominada *distribuição de Boltzman*, para relacionar a umidade normalizada e a sucção, conforme equação 3, sendo que a_2 e b_2 são parâmetros de ajuste da curva. No entanto tal equação não se ajusta a baixos valores de sucção (menores que os valores de entrada de ar). Por isto, MacKeen e Bumb (1987) sugeriram uma nova relação, equação 4, onde a_3 e b_3 são parâmetros da curva.

$$\theta = e^{-(\psi - a_2)/b_2} \text{ (equação 3)}$$

$$\theta = \frac{1}{1 + e^{(\psi - a_3)/b_3}} \text{ (equação 4)}$$

Outra forma para relacionar a umidade normalizada e a sucção foi feita por van Genuchten (1980), equação 5, na qual α , n e m são parâmetros do solo. De forma a obter uma expressão fechada para a condutividade hidráulica, Van Genutchten (1980) descreve m e n através de uma relação fixa $m = (1 - 1/n)$. Tal relação reduziria a flexibilidade da equação. Fredlund e Xing (1994) recomendam que os parâmetros sejam deixados sem uma relação fixa. A tabela 2 apresenta algumas referências para relacionar a sucção do solo com a umidade volumétrica, sendo Se a umidade normalizada Θ .

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \text{ (equação 5)}$$

Tabela 2 – Referências para o ajuste da curva de retenção de água (Fonte: FREDLUND et al, 2004)

Referências	Equações	Parâmetros
Brooks and Corey (1964)	$S_e = 1$, $\alpha\psi \leq 1$ $S_e = (\alpha\psi)^{-\lambda}$ $\alpha\psi > 1$	$\theta_r, \theta_s, \alpha$, and λ $\theta_r \geq 0$
Campbell (1974)	$S_e = \left(\frac{\psi}{\psi_e}\right)^{-\frac{1}{b}}$, $\psi > \psi_e$	$\theta_r = 0, \theta_s, \psi_e$, and b $\theta_r \geq 0$
van Genuchten (1980)	$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$, $m = 1 - \frac{1}{n}$	$\theta_r, \theta_s, \alpha$, and n $\theta_r \geq 0$
van Genuchten (1980)	$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$, $m = 1 - \frac{2}{n}$	$\theta_r, \theta_s, \alpha$, and n $\theta_r \geq 0$
Fredlund and Xing (1994)	$\theta(\psi) = C(\psi) \times \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^m}$ $C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (1000000/\psi_r)]}$	a, n , and m

2.4. Compactação

Segundo Pinto (2000), a *compactação* de um solo é a sua densificação por meio de um equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora em alguns casos, como em pequenas valetas, até soquetes manuais possam ser empregados. Para Braja (2007) a compactação é a densificação do solo por meio da remoção de ar, o que requer aplicação de energia mecânica. Tal processo é de grande importância na construção dos aterros, pois aumenta o peso específico do solo, a resistência e sua estabilidade, e por meio destas condições, os aterros passam a ter seu uso imediato.

Proctor (*apud* VARGAS, 1978) diz que a densidade alcançada após o solo ser compactado, sob uma determinada energia de compactação depende da umidade do solo no momento da compactação. O ensaio de compactação que no Brasil é padronizado pela ABNT NBR 7182/86 – “Solo – Ensaio de compactação”, o qual com os dados obtidos é feita a relação entre a massa específica aparente seca (ou o peso específico aparente seco) e a umidade do solo, como o mostrado na figura 12.

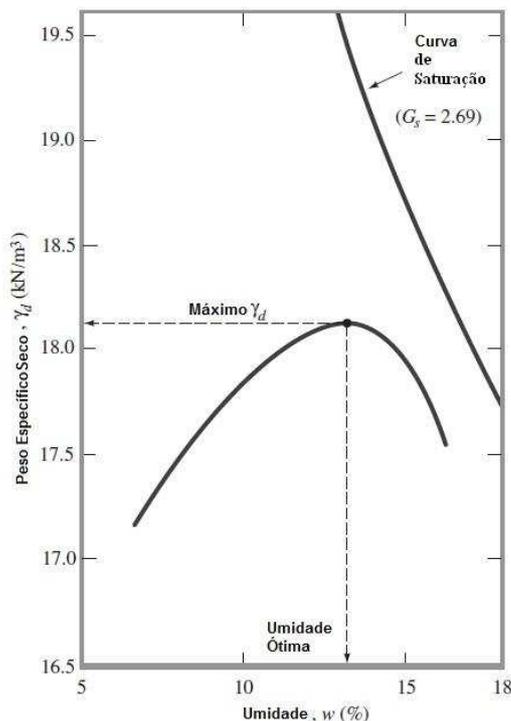


Figura 12 – Resultado de ensaio de compactação (Fonte: BRAJA, 2007)

Através do gráfico é observado que as massas específicas são pequenas para baixas umidades do solo e à medida que a umidade cresce a massa específica também aumenta até um determinado valor máximo. A umidade para a massa específica seca máxima é denominada de *umidade ótima*, e a partir desta qualquer aumento no teor tende a reduzir a massa específica seca.

Segundo Vargas (1978) este fato ocorre porque quanto maior for o esforço aplicado, os grãos ficam mais próximos uns dos outros. Para pequenas umidades aparecerá um atrito grão-grão que dificultará o esforço de compactação, o que impede o seu entrosamento completo (representando o ramo esquerdo do gráfico). No entanto, como os filmes de água em torno do grão crescerão à medida que a umidade cresce, as densidades tornam-se mais baixas (ramos direito do gráfico). *No ponto* correspondente à umidade ótima a espessura de filmes d água é próxima a suficiente para saturar os vazios correspondentes à máxima densidade possível de ser obtida com o esforço de compactação empregado.

Além da energia de compactação, a umidade ótima depende do tipo de solo. Na compactação do solo será mais ou menos efetivo conforme a sua granulometria, o peso específico dos sólidos, quantidade e tipo de minerais-argila.

A compactação no campo é realizada na maioria das vezes por rolos compactadores, sendo os mais comuns o rolo compactador liso, rolo compactador de pneus de borracha, rolo compactador pé de carneiro e rolo compactador vibratório. O grau de compactação (G_c) é a relação entre a massa específica aparente seca medida no campo e aquela obtida em ensaio em laboratório, equação 6.

$$G_c (\%) = \frac{\gamma_s (campo)}{\gamma_s \max(laborat)} \quad (\text{equação 6})$$

A estrutura do solo argiloso compactado dependerá da energia de compactação e da sua umidade. Ao se compactar abaixo da umidade, a energia de compactação não é suficiente para romper a atração face-aresta e o solo apresenta uma estrutura denominada *floculada*. Aumentando a umidade, conseqüentemente aumenta a repulsão entre as partículas, e a energia de compactação orienta as partículas de forma a ficarem paralelas. Desta forma, a estrutura é denominada *dispersa*. A estrutura do solo argiloso também dependerá da energia de compactação, sendo que maior a energia maior o grau de dispersão (figura 10).

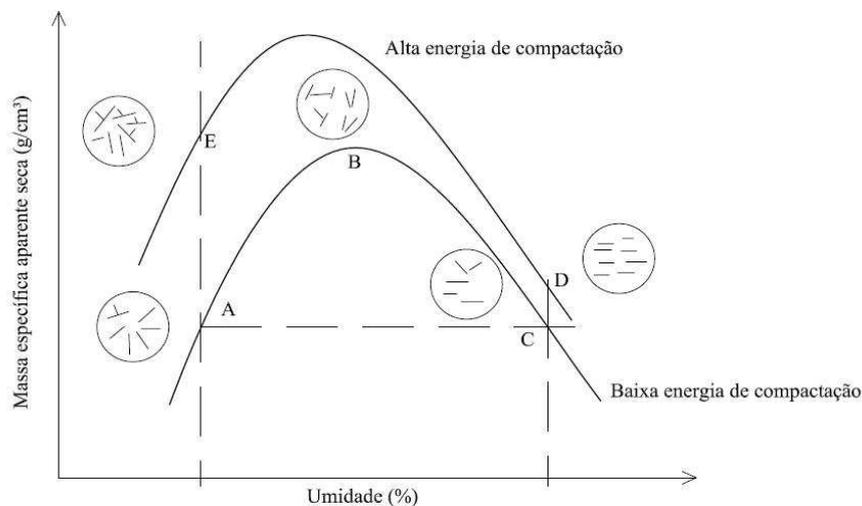


Figura 13 – Efeito da compactação na estrutura do solo argiloso (Fonte: LAMBE 1969)

A energia de compactação influencia no formato da curva característica. Como observa Marinho (2005), até a entrada generalizada de ar, quanto maior a umidade de compactação maior é o grau de saturação para uma mesma sucção (figura 14). Isto se dá, pois a estrutura do ramo seco apresenta poros de maior dimensão.

Após a entrada de ar as curvas se tornam praticamente únicas, independentemente do tipo de compactação. Tal fato ocorre porque os microporos possuem as mesmas características independentemente da energia utilizada.

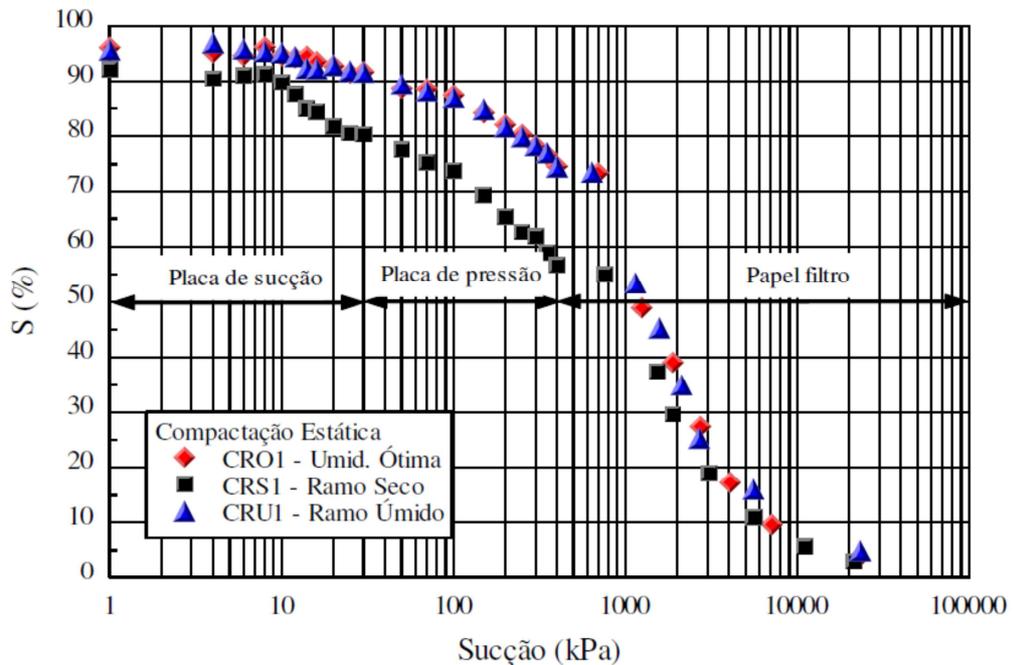


Figura 14 – Relação entre o grau de saturação e a sucção para amostras moldadas com diferentes teores de umidade (Fonte: MARINHO, 2005)

2.5. Camada de cobertura

Os resíduos sólidos urbanos devem ser isolados e depositados de forma a não causar danos ao ambiente (às águas subterrâneas, às populações no entorno etc.). E um dos principais componentes do projeto para conter tais resíduos é a *camada de cobertura*.

O objetivo principal da camada de cobertura é impedir a entrada de líquidos no interior do corpo do aterro. Deve ter um desempenho que assegure a proteção à saúde humana e ao meio ambiente, minimizando os impactos através da eliminação de vetores e da redução da exalação de odores, da minimização da infiltração da água de chuva do aterro encerrado, da drenagem da água e da minimização do fluxo de gases e da erosão (IPT *apud* HUSE, 2007). Segundo Huse (2007) existem vários métodos para a construção da camada de cobertura, sendo a utilização de materiais de baixa permeabilidade o método mais empregado.

A camada de cobertura interage diretamente com a atmosfera. Seu projeto envolve várias áreas da engenharia como a geotecnia, agronomia, hidrologia etc. e é feito de forma a

minimizar a infiltração e a erosão do material de cobertura. A camada de cobertura deve ter baixa permeabilidade de forma que a infiltração tenha um nível aceitável. Segundo Zornberg (2006) quantificar a infiltração é um desafio que envolve a análise de fluxo de solos não saturados sujeitos a complexas condições atmosféricas.

Na elaboração do projeto de cobertura final, como aponta Barros (2005), os fatores que devem ser analisados são: tipo e classe de resíduo a ser coberto, balanço hídrico e do clima local, estabilidade de taludes do sistema de cobertura, recuperação da área de aterro e disponibilidade de jazida de material próximo ao aterro.

Para o projeto de camada de cobertura, segundo Saarela apud Huse (2007) as seguintes camadas podem estar presentes: camada de controle de gás, camada de fundação, barreira hidráulica, camada drenante, camada biótica, camadas filtrantes/filtros e camada superficial para fins de vegetação (figura 15). A tabela 3 descreve finalidade destas camadas.

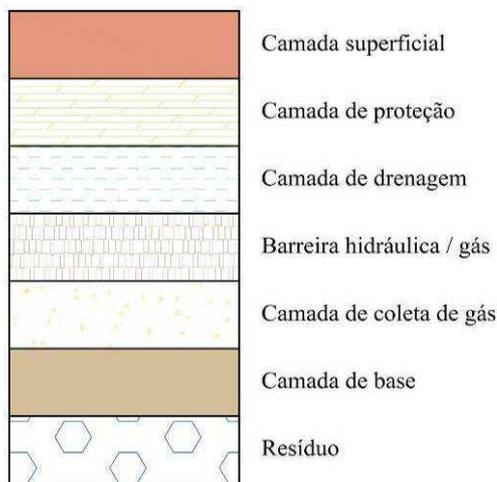


Figura 15 – Camadas de um sistema de cobertura (Fonte: SANTOS, 2009)

Tabela 3 – Características das camadas de um sistema de cobertura (Fonte: SANTOS, 2009)

Camadas de um sistema de cobertura		
Camada	Função	Material utilizado
Camada superficial	Separa da atmosfera os outros componentes que se encontram abaixo desta. Previne a erosão, promove a evapotranspiração e o crescimento da vegetação.	Podem ser utilizados solos naturais (misturados ou não), cascalhos, concreto asfáltico entre outros.
Camada de proteção	Separa o material fino dos grossos, prevenindo o entupimento da parte de granulometria grossa pelos finos. Armazena a água que percola através da camada de superfície. Protege as camadas inferiores contra ressecamento e contra a penetração de animais e raízes.	Solos de granulometria média apresentam condições de germinar sementes e promover o desenvolvimento das plantas. Solos arenosos podem ser problemáticos devido à baixa retenção de água e à perda de nutrientes devido à lixiviação. Cascalho também pode ser usado em casos especiais.
Camada drenante	Reduz a carga hidráulica drenando lateralmente a água do solo acima. Elimina a poropressão na interface da barreira subjacente. Tal camada só é necessária quando existem excessivas quantidades de água passando pelas camadas superiores ou quando as forças de percolação são altas.	São utilizados materiais granulares com elevada transmissividade.
Barreira hidráulica ou de gás	Muda a direção e/ou impede a percolação dos fluidos que entrem em contato com a camada.	São utilizados geomembranas, Geosynthetic Clay Liners (GCL), que seria uma fina camada de argila expansiva entre dois geotêxteis ou colada a uma geomembrana, e liners de argila compactada (solo natural rico em argila de baixa permeabilidade).
Camada de coleta de gás	Direciona os gases produzidos pela decomposição da massa de lixo, em consequência da degradação da matéria orgânica, para a atmosfera.	Pode usar materiais granulares, geotêxteis, georredes ou similares aos usados na camada de drenagem.
Camada de base ou fundação	Serve de base para as demais camadas do sistema e isola a barreira hidráulica da massa de lixo, evitando danos químicos e mecânicos.	Pode ser composta pelo solo utilizado no recobrimento diário após o final do expediente do aterro, por uma cobertura de solo temporária ou por uma camada de solo colocada previamente à construção do sistema de cobertura.

2.5.1. Tipos de sistema de camada de cobertura

2.5.1.1. Sistema convencional

O *sistema convencional* (figura 16) de camada de cobertura é o mais usual. Consiste na compactação de um solo argiloso diretamente sobre os resíduos. Têm como finalidade evitar a penetração excessiva de precipitação, podendo apresentar problemas como ressecamento e formação de fissuras e trincas, dependendo do tipo de clima o qual está sendo utilizada (PIMENTEL apud HUSE 2007).

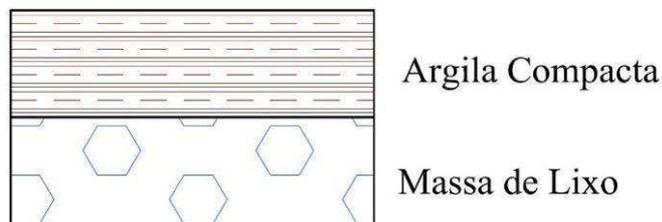


Figura 16 – Sistema convencional de camada de cobertura (Fonte: PIMENTEL *apud* HUSE, 2007)

2.5.1.2. Barreiras Capilares

As *barreiras capilares* são feitas através da disposição de camadas de solos com granulometrias diferentes (figura 17), impedindo o fluxo de água. Uma camada de granulometria fina é colocada sobre uma de granulometria grossa (areia ou cascalho). A diferença de tamanhos leva à intensificação do fenômeno de capilaridade, tendo com isso, a capacidade de armazenar água na camada de material mais fino.



Figura 17 – Barreiras capilares (Fonte: PIMENTEL *apud* HUSE, 2007)

2.5.1.3. Coberturas evapotranspirativas

As *coberturas evapotranspirativas* (figura 18) controlam a infiltração através de processos naturais. O dimensionamento das camadas é feito de forma a armazenar a água que é eliminada através da evapotranspiração das espécies vegetais presentes no solo de cobertura. Estas camadas são vegetadas com plantas nativas capazes de resistir e sobreviver às condições locais.

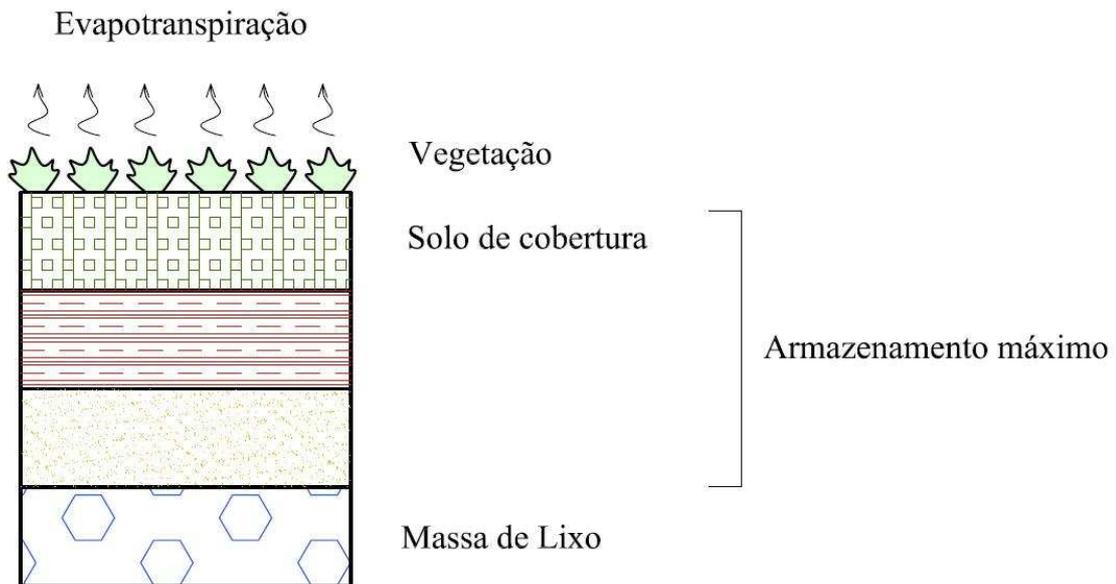


Figura 18 – Coberturas evapotranspirativas (Fonte: PIMENTEL *apud* HUSE, 2007)

Projetos de sistema deste tipo de cobertura levam em conta o balanço hídrico do local, infiltração, precipitação, escoamento superficial, etc. Segundo Zornberg (2006), siltes e argilas de baixa plasticidade são os solos mais usados em coberturas evapotranspirativas, pelo fato de serem capazes de armazenar água e minimizar a ocorrência de eventuais rachaduras e trincas devido ao ressecamento do solo.

2.6. Infiltração

Segundo Huse (2007) infiltração é a passagem da água da superfície para o interior do solo, processo este que depende da água disponível, da natureza do solo, do estado de sua superfície e do grau de saturação do solo. À medida que ocorre a infiltração da água, o perfil de umidade do solo vai se alterando gradativamente de cima para baixo, tendendo a saturação enquanto houver aporte de água.

Dependendo das diferenças entre os horizontes do solo, a infiltração pode se restringir à região superficial, gerando um fluxo paralelo à superfície do terreno (fluxo subsuperficial) ou se movimentar de forma descendente até encontrar a superfície freática ou uma fronteira impermeável (embasamento rochoso, por exemplo). O tempo decorrido da infiltração dependerá da condutividade hidráulica do solo.

A *condutividade hidráulica* (chamada também de *coeficiente de permeabilidade*) do solo é a capacidade de um fluido de se deslocar nos seus vazios devido à diferença de potenciais, sendo expressa em cm/s ou m/s. Segundo Braja (2007) a condutividade hidráulica dos solos depende da viscosidade do fluido, da distribuição do tamanho dos poros, da distribuição granulométrica, do índice de vazios, da rugosidade das partículas minerais e do grau de saturação do solo.

Para solos não saturados a condutividade hidráulica é menor que a de solos saturados e aumenta rapidamente com o grau de saturação, pelo fato de que a percolação da água não remove todo o ar existente num solo não saturado, permanecendo com bolhas de ar (contidos pela tensão superficial) que constituem obstáculos ao fluxo.

2.6.1. Condutividade hidráulica em solos saturados

Darcy (1856) postulou que a *velocidade de percolação* (a quantidade de água fluindo por unidade de tempo por uma área unitária de seção transversal bruta de solo normal à direção do fluxo) seria proporcional ao gradiente hidráulico. Sendo este coeficiente de proporcionalidade a condutividade hidráulica (equação 7). Desta equação conclui-se que o coeficiente de permeabilidade seria a velocidade de percolação de água para um gradiente igual a 1.

$$v = ki \text{ (equação 7)}$$

Os principais métodos diretos para a determinação dos coeficientes de permeabilidade de solos saturados são o permeâmetro de carga constante e o permeâmetro de carga variável. No permeâmetro de carga constante, a carga (h) que passa pelo permeâmetro é mantida e a vazão para um determinado tempo é medida (utilizada para solos granulares). Enquanto que no permeâmetro de carga variável, a carga varia e para tal variação mede-se o volume. Através da medida da vazão e da carga h, pode-se medir o coeficiente de permeabilidade.

2.6.2. Condutividade hidráulica em solos não saturados

Como os solos não saturados apresentam duas fases classificadas como fluidos (ar e água), deve-se fazer uma análise através de coeficientes apropriados que relacionam a vazão com o coeficiente de permeabilidade. De acordo com o grau de saturação o comportamento do ar ou da água irá predominar de forma que as leis de fluxo irão variar para tais casos (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

A permeabilidade hidráulica não saturada pode ser obtida através de ensaios de campo e laboratório de forma direta ou indireta. Os métodos diretos são classificados no que diz respeito ao regime, em permanente, no qual os parâmetros hidráulicos das amostras permanecem constantes durante o processo, e em transiente, no qual os parâmetros hidráulicos variam com o tempo. Já nos métodos indiretos a permeabilidade não saturada é obtida através de correlações.

A lei de Darcy pode ser aplicada para fluxo de água em solos não saturados (FREDLUND & RAHARDJO, 1993). O coeficiente de permeabilidade em solos não saturados, entretanto, não é considerado constante. A condutividade hidráulica seria função da umidade volumétrica ou da sucção matricial. A expressão pode ser dada segundo a equação 8, sendo $K_w(\theta)$ a permeabilidade não saturada, v a velocidade de descarga, θ umidade volumétrica, z distância ao referencial adotado e h_w carga hidráulica do solo.

$$v = -K_w(\theta) \frac{\partial h_w}{\partial Z} \text{ (equação 8)}$$

Na literatura existem algumas propostas para relacionar a permeabilidade hidráulica não saturada com os parâmetros da curva característica a partir de uma permeabilidade relativa $k_r = k_w / k_{sat}$, onde k_w é a condutividade hidráulica não saturada e k_{sat} é a condutividade saturada. Algumas proposições de determinação da condutividade hidráulica não saturada são demonstradas na tabela 4. Tais proposições estão relacionadas aos parâmetros da curva de retenção de água propostos por alguns autores.

Tabela 4 – Proposições de permeabilidade não saturada (Fonte: FREDLUND et al, 2004)

Modelos de Permeabilidade	van-Genuchten (1980)	Fredlund and Xing (1994)	Brooks & Corey (1964)	Campbell (1974)
Child and Collis- George (1950)	-----	$k_r = \frac{\int_{\ln(\psi_{sat})}^z \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{sat})}^z \frac{\theta(e^y) - \theta_0}{e^y} \theta'(e^y) dy}$	-----	$k_r = \left(\frac{\psi}{\psi_e} \right)^{-2 - \frac{2}{b}}$
Burdine (1953)	$k_r(\psi) = \frac{1 - (\alpha\psi)^{n-2} [1 + (\alpha\psi)^n]^m}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{2n}}, \quad m = 1 - \frac{2}{n}$	-----	$k_r(\psi) = (\alpha\psi)^{-2-3\lambda}$	-----
Mualem (1976)	$k_r(\psi) = \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^m\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{0.5}}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}$	-----	-----	-----

3. Metodologia

3.1. Local estudado

O local que serviu de estudo para análise da infiltração de camada de cobertura foi o Aterro de Morro do Céu, localizado no bairro do Caramujo em Niterói, ocupando uma área de 214.000 m². O histórico do aterro foi descrito por Santos (2007), sendo apresentado resumidamente a seguir.

O Aterro de Morro do Céu surgiu após uma tentativa mal sucedida da implantação de um Aterro Sanitário Metropolitano no bairro do Engenho Pequeno (no município vizinho de Niterói, São Gonçalo) para atender as cidades de São Gonçalo e Niterói. O aterro começou a operar em 1983 de forma emergencial, como um lixão, sem haver nenhuma preparação da área nem projeto executivo. A figura 19 mostra a área de espalhamento de resíduos no aterro do Morro do Céu no ano de 1986.



Figura 19 – Aterro do Morro do Céu no ano de 1986 (Fonte: SANTOS, 2007)

Em 1992, a Companhia Municipal de Limpeza Urbana de Niterói (CLIN) elaborou um documento denominado “Niterói Ficando Mais Limpa: Projeto Básico de Coleta e Destinação Final de Resíduos Sólidos” o qual indicava uma proposta para melhora, ampliação e implantação de serviços de limpeza urbana de Niterói.

Tal documento direcionou entendimentos com a secretaria Estadual de Obras e Serviços Públicos (SOSP), que buscava alternativas de cooperação e investimentos na área de resíduos sólidos. Isto resultou a inclusão do município de Niterói no Programa de Despoluição da Baía de Guanabara (PDGB) em convênio com o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) gerando a elaboração do projeto para construção do sistema de tratamento em usina e destinação final dos resíduos sólidos urbanos de Niterói composto de usina de triagem, trituração e compostagem natural de resíduos sólidos domiciliares, no aterro controlado do Morro do Céu e a recuperação do aterro controlado. No entanto, o aterro continuava sem critério técnico ou projeto, resultando num platô de grandes dimensões na porção mais alta do terreno tendo surgido um talude de grande altura, sem bermas intermediárias.

Em março de 1994 foi feito um convênio entre PDGB, o Estado e o Município onde o Estado se comprometia a realizar obras no aterro como impermeabilização da área do aterro, pavimentação dos acessos, construção da usina de triagem e compostagem entre outros. Ainda em 1994, a Prefeitura de Niterói, desapropriou 3 glebas de terra e 129 terrenos localizados no Morro do Céu em área adjacente ao aterro visando a ampliação e viabilizando fisicamente a implantação das obras do PDGB. Nesta época, a Companhia de Limpeza Urbana de Niterói (CLIN) iniciou os serviços de aterramento no platô inferior, da drenagem de águas pluviais e a execução de acesso interno à área desapropriada.

A operação do aterro seguiu convivendo com repetidas paralisações e reinícios das obras. Assim, a CLIN assumiu o término de várias obras que estavam a cargo do Estado, como a contratação de empresa para conclusão da usina de triagem, construção do muro em torno do aterro, construção de canaletas de captação de chorume, colocação de manta para impermeabilização na cota de 120 m, aquisição de tanques de polietileno de alta densidade para coleta e envio de chorume para tratamento no aterro metropolitano de Gramacho, em Duque de Caxias, Rio de Janeiro.

O Ministério Público entrou com ações contra a CLIN e a Prefeitura de Niterói a fim de apurar as responsabilidades sobre os atrasos nas obras e conseguiu uma decisão judicial que determinava o fechamento do aterro até dezembro de 2004.

A prefeitura municipal de Niterói estabeleceu uma parceria com a Universidade Federal Fluminense, no final de 2003, sendo desenvolvido um plano de gestão de encerramento do aterro controlado do Morro do Céu que foi apresentado em fevereiro de 2005. Este plano serviu de base para a elaboração do Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) com o

Ministério Público, a FEEMA, a Prefeitura de Niterói, a CLIN, e a concessionária “Águas de Niterói”. O cumprimento do TAC possibilitou a elaboração do Projeto de Adequação Ambiental para o encerramento do aterro controlado do Morro do Céu. Este projeto é baseado na reconformação do aterro controlado do Morro do Céu com a execução de obras de drenagem e de recobrimento, assim como monitoramento ambiental da área de forma que seja estendida sua vida útil dando condições para que uma solução ambientalmente correta seja viabilizada. Por falta de jazida específica, a cobertura do aterro era então feita com material de escavação de obras da prefeitura, entulhos, etc.



Figura 20 – Vista geral do aterro controlado (Fonte: SANTOS, 2007)

Em abril de 2010, como consequência das fortes chuvas que assolou a região de Niterói, a Secretaria Estadual do Ambiente anunciou a interdição definitiva do aterro do Morro do Céu, que voltou a operar em setembro do mesmo ano pela Vital Engenharia. Foi criada uma célula emergencial contígua ao corpo do aterro antigo, para receber os resíduos de Niterói até a implantação do novo aterro.

A célula recebe entre 700 e 800 toneladas de resíduos domiciliares por dia proveniente da cidade de Niterói, possui impermeabilização de base, drenagem de líquido e gases, camada de cobertura executada com material retirado de jazida específica para este fim e operação

condizente com a prática de aterros sanitários. A figura 21 apresenta uma vista da entrada do aterro e da célula e a figura 22 apresenta a operação da célula e o aterro antigo ao fundo.



Figura 21 – Entrada do Aterro do Morro do Céu localizado em Niterói/Célula Emergencial



Figura 22 – Célula Emergencial

Durante algum tempo o material utilizado para cobertura do aterro foi oriundo de materiais de escavação de obras realizadas pela prefeitura de Niterói, no entanto, a partir de 2010, foi iniciada uma nova etapa, sendo utilizados materiais argilosos provenientes de jazidas localizadas no próprio município para a camada de cobertura do aterro. Tais materiais foram denominados de argila vermelha (esta correspondendo a 90% da cobertura do aterro) e argila amarela, e são apresentados na figura 23. Eventualmente resíduos de construção ainda são utilizados nas vias de passagem, das máquinas caminhões etc.



Figura 23 – Materiais provenientes das jazidas, argila amarela e argila vermelha

O sistema de cobertura utilizado é do tipo convencional, com uma espessura de camada superficial de aproximadamente de 50 cm. A compactação da cobertura é feita através da passagem de tratores de esteira, sem controle de compactação no campo.

3.2. Ensaio

3.2.1. Coleta das amostras

Foram realizadas 3 amostragens, com a coleta de amostras deformadas e indeformadas dos dois solos argilosos. As amostras deformadas foram utilizadas para realização de ensaios de caracterização e compactação. Já as amostras indeformadas foram utilizadas para os ensaios de permeabilidade saturada e ensaio de retenção de água.

A primeira amostragem foi feita dia 3 de dezembro de 2010 na cobertura da berma lateral da célula sanitária. Foram retiradas 3 amostras indeformadas da argila vermelha, 2 com a utilização de anel de adensamento, para ensaio de retenção de água, e uma amostra com um cilindro maior, para ensaio de permeabilidade.

Na segunda amostragem, da argila amarela foi realizada no dia 18 de março de 2011. Foram retiradas 6 amostras para curvas de retenção, com anéis de 10 cm de diâmetro, 1 amostra para permeabilidade com cilindro e 1 amostra para ensaios de caracterização.



Figura 24 – Coleta das amostras da argila amarela para ensaio de retenção

A terceira amostragem ocorreu dia 6 de maio de 2011. Foram coletados amostras deformadas da argila amarela, para ensaio de compactação e uma amostra indeformada para ensaio de permeabilidade. Para a argila vermelha foi coletada uma amostra indeformada para realização de ensaio de permeabilidade (figura 25) e 6 amostras em anéis pequenos para ensaios de sucção.



Figura 25 – Amostragem indeformada para ensaio de permeabilidade

3.2.2. Ensaio realizados

Os ensaios foram realizados em laboratórios de diferentes universidades. A tabela abaixo apresenta os ensaios realizados e o local onde foram realizados.

Tabela 5 – Ensaio realizados, metodologia utilizada e local onde foram realizados

	Ensaio		Local	Solo
Amostras deformadas	Granulometria		Laboratório Geotecnia da COPPE/UFRJ	Argila Amarela
				Argila Vermelha
	Limites Atterberg		Laboratório Geotecnia da COPPE/UFRJ	Argila Amarela
				Argila Vermelha
	Densidade real dos grãos		Laboratório Geotecnia da COPPE/UFRJ	Argila Amarela
				Argila Vermelha
Compactação		Laboratório Geotecnia da COPPE/UFRJ	Argila Amarela	
			Argila Vermelha	
Amostras indeformadas	Permeabilidade saturada		Laboratório de Geotecnia - UFPE	Argila Amarela
				Argila Vermelha
	Curva de Retenção	Placa de Sucção	Laboratório de Mec Solos Poli/USP	Argila Vermelha
		Câmara de Pressão		Argila Vermelha
		Papel Filtro	Laboratório de Mec Solos Poli/UFRJ	Argila Amarela

A caracterização do solo (granulometria por peneiramento e sedimentação, umidade e limites de Atterberg) foi elaborada segundo as normas:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 6508/1984 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica;
- NBR 7180/1984 – Determinação do limite de plasticidade;

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a NBR 7182/1988 – Solo – Ensaio de Compactação utilizando a energia do proctor normal.

O ensaio de permeabilidade foi realizado segundo a norma ASTM D 5084 em permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 - Soil Test – ELE, seguindo-se a metodologia descrita por Lopes (2011) apud Maciel (2003) e Mariano (2008). A amostra foi colocada na célula para promover a saturação. Após isto, aplica-se uma tensão confinante depois de saturada, começando o ensaio propriamente dito, tendo sido utilizada uma diferença de carga piezométrica de 30 kPa com fluxo ascendente.

As curvas de retenção foram elaboradas através de três métodos distintos, descritos a seguir.

Para a argila amarela foi utilizado o método do papel filtro (MARINHO,1994). Para a aplicação deste método é necessário, uma balança de alta precisão, uma caixa hermeticamente fechada, uma caixa de papel filtro Whatman 32 e equipamentos diversos (pinça, papel filme, papel alumínio entre outros).

A caixa hermeticamente fechada tem a finalidade de manter a umidade da amostra. Para locais cuja variação de temperatura seja de 5° C é recomendado colocar uma caixa com parede de isopor de 10 cm de espessura (MARINHO, 1994).

A caixa foi projetada e construída para este trabalho e tem dimensões 63cmx53cmx43cm, sendo revestida com compensado e envernizada. Internamente tem revestimento de isopor com espessura de 10 cm resultando num espaço interno de 40cmx30cmx20cm. A figura 26 apresenta o aspecto interno e externo da caixa.



Figura 26 – Caixa térmica elaborada para realização do ensaio de papel filtro

A balança de precisão utilizada foi a *Ohaus Adventurer* – Toledo, com precisão de 0,0001 gramas conforme mostrado na figura 27.



Figura 27 – Balança de alta precisão utilizada

A seqüência executiva para determinação da curva de retenção está detalhada a seguir:

- Inicialmente 3 amostras da argila amarela obtidas na segunda amostragem foram moldadas e em seguida promovida a saturação das mesmas colocando-as sobre pedras porosas imersas em água (até perceber-se visualmente que o topo da amostra estava com água), como apresentado na figura 28;



Figura 28 – Saturação das amostras da argila amarela para ensaio de papel filtro

- Após a saturação, as amostras foram pesadas para o cálculo do peso específico saturado e da umidade (para isso foram necessários os dados de caracterização do solo – densidade real dos grãos). Através da equação 9 obteve-se o índice de vazios, onde G_s é a densidade real dos grãos, S o grau de saturação, e o índice de vazios e ρ_w o peso específico da água ;

$$\rho_{sat} = \frac{G_s + Se}{1 + e} \rho_w \text{ (equação 9)}$$

- Dois pedaços de papel filtro Whatman nº 42 foram colocados com cuidado, utilizando uma pinça, em cada lado da amostra (de forma a inferir a sucção matricial);
- As amostras foram envoltas com papel filme e papel alumínio;
- As amostras foram colocadas na caixa, hermeticamente fechada para evitar perda de umidade e influência da temperatura.

- Após sete dias os papéis filtro foram pesados rapidamente (o tempo de retirada e pesagem deve ser de alguns segundos), colocados em cápsulas e postos em estufas para nova pesagem, no período mínimo de 24 horas para cálculo da umidade do papel filtro;
- Com a umidade do papel calculada, pode-se obter a sucção através da proposta feita por Chandler et al. (1992), exposta adiante;
- Para o próximo ponto da curva as amostras foram deixadas ao ar para perder a umidade. Tal etapa era realizada com a pesagem das amostras até que estas alcançassem os pesos previamente calculados de forma a serem obtidas as umidades predeterminadas;
- Tal procedimento foi repetido até se atingir uma sucção de 1000 kPa, na 13ª leitura após 120 dias de ensaio;

A figura 29 mostra a sequência empregada para obtenção da umidade do papel filtro.



Figura 29 – Sequência para medição da umidade do papel filtro

Para o cálculo da sucção, utilizaram-se as equações das curvas de calibração de Chandler (et al 1992) para o papel Whatman nº 42, onde w é a umidade do papel filtro. Sendo:

- Para umidades do papel filtro $> 47\%$. Sucção (kPa) = $10^{(6,05-2,48\log w)}$ (equação 10)
- Para umidades do papel filtro $\leq 47\%$. Sucção (kPa) = $10^{(4,84-0,0622w)}$ (equação 11)

Segundo a norma ASTM D5298-92 para o papel filtro Whatman nº42 é recomendado utilizar as equações baseadas nas análises feitas por Greace et al. (1987), sendo:

- Para umidades do papel filtro $> 47\%$.Sucção (kPa) = $10^{(2,412-0,0135w)}$ (equação 12)
- Para umidades do papel filtro $\leq 47\%$. Sucção (kPa) = $10^{(5,327-0,0779w)}$ (equação 13)

As curvas de calibração obtidas por Chandler (et al 1992) foram utilizadas porque segundo Marinho (1994) tais equações foram obtidas com um número maior de pontos do que as obtidas por Greace (et al 1987).

Inicialmente a umidade gravimétrica para base seca do solo foi calculada de forma a obter pontos na curva com diferenças uniformes, e através da equação 14, a umidade foi convertida para volumétrica, onde θ é a umidade volumétrica, ρ_{dry} é o peso específico do solo seco, ρ_w é o peso específico da água e w_d é a umidade gravimétrica.

$$\theta = \frac{\rho_{dry}}{\rho_w} w_d \text{ (equação 14)}$$

O ensaio de retenção da argila vermelha foi realizado no laboratório de Mecânica dos Solos da USP através do método da placa de sucção nos estágios iniciais de sucção (até 30 kPa), conforme a figura 30, e em seguida utilizando-se o método da câmara de pressão.

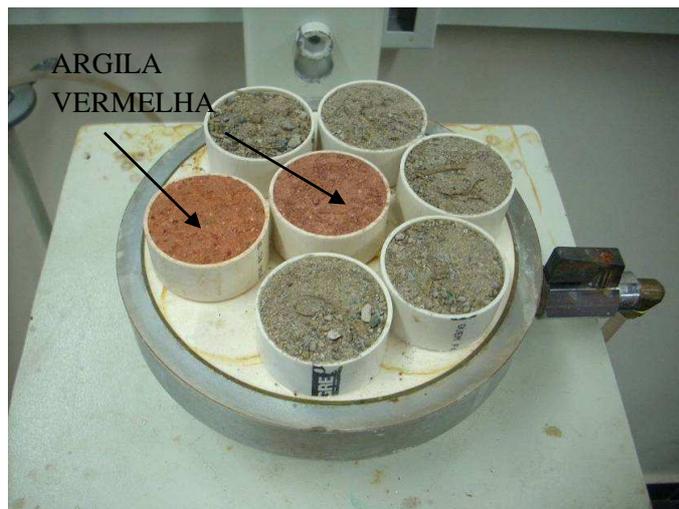


Figura 30 - Ensaio de placa de sucção para duas amostras de argila vermelha realizado no laboratório de Mecânica dos Solos da Poli/USP

3.3. Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos no *site* do Ministério da Agricultura, Agropecuária e Abastecimento, através do sistema de monitoramento agrometeorológico “Agritempo” (<http://www.agritempo.gov.br/>). Segundo Romani (et al, 2003) os dados meteorológicos armazenados pelo Agritempo (2003) são coletados por diversas instituições (CEMIG, INMET, UNICAMP, Centros da EMBRAPA, entre outras) através de estações mecânicas e automáticas.

Os dados levantados foram da estação de Niterói do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET durante o ano de 2010. Tais dados são simulados. Esta simulação é baseada na média ponderada e inversa do quadrado das distâncias, utilizando dados das estações vizinhas (ROMANI et al, 2003).

3.4. Modelagem

3.4.1. Programa RETC

O programa utilizado para ajustar a curva de retenção foi o RETC (VAN GENUCHTEN et al., 1991), de forma a analisar a retenção de água em solos não saturados. As propriedades hidráulicas estimadas através do programa são parâmetros chave em qualquer descrição quantitativa do fluxo de água para dentro e através da zona não saturada dos solos. Através de tal programa, que utiliza os modelos paramétricos de Brooks-Corey (1964) e Van Genuchten (1980) pelo método dos mínimos quadrados, são obtidos os melhores ajustes aos dados experimentais obtidos.

O programa apresenta algumas etapas simples para resolução do problema. A primeira determina o tipo de análise, que pode ser de retenção ou condutividade. No presente trabalho a abordagem foi de dados de retenção. Na outra etapa são determinadas as unidades de comprimento e tempo que, no caso deste estudo, foram centímetros e dias respectivamente.

Na etapa seguinte é determinado o tipo de modelo de curva de retenção para o qual os dados serão ajustados. Para análise foi utilizado o modelo de retenção de Van Genuchten (1980) (vide tabela 2) com os parâmetros m e n com relação fixa.

A quarta etapa tem a finalidade de definir os parâmetros α , n , θ_r (umidade volumétrica residual), θ_s (umidade volumétrica saturada) e K_s (permeabilidade saturada). O programa

pode determinar estes parâmetros através do tipo de solo (argila, areia etc), ou dos dados da caracterização, da granulometria entre outros, sem haver necessidade de ajustá-los. O usuário pode escolher nesta etapa se irão ajustar estes parâmetros ou não. Neste trabalho foram utilizados os resultados dos ensaios de laboratório para determinar os parâmetros α , n , θ_r , θ_s e K_s .

Por fim, na última etapa o usuário coloca os pontos obtidos no laboratório, a umidade volumétrica (de 0 a 1) e a sucção (no caso em estudo em cm de coluna d'água, ou seja, 1 cm equivale a 0,1 kPa). Pode-se adotar um peso para ponderação dos diferentes pontos caso haja necessidade. No trabalho todos os pontos tiveram peso 1.

3.4.2. Programa Hydrus 1D

A análise de infiltração foi feita através do programa Hydrus 1D (SIMUNEK et al, 2005). Este é um programa de elementos finitos desenvolvido pelo Departamento de Ciências Ambientais da Califórnia, (disponível em <http://www.pc-progress.com/>), o qual simula o movimento unidimensional da água, de calor e de soluto em meios porosos variavelmente saturados para várias condições limites, incluindo precipitação e evaporação. Além disto, um termo para absorção de água por conta das raízes foi inclusa no modelo.

Tal programa pode ser utilizado tanto em versões 1D ou 2D para estudo da camada de cobertura em aterros de resíduos de diversas origens e para analisar a infiltração de água da chuva em tais camadas, e com isso, definir sobre a melhor aplicação de revestimentos finais.

O programa pode ser dividido em 8 etapas. A primeira determina o tipo de fluxo, ou de água, ou de soluto, ou de gás etc. No estudo, pretendeu-se fazer a análise do fluxo de água. A segunda etapa determina a geometria da camada de cobertura (número de camadas, declividade, espessura da camada etc.). A camada de cobertura do aterro do Morro do Céu possui 50 cm de profundidade e a declividade considerada foi de 1%.

A terceira etapa fornece informações sobre o tempo (unidade, discretização) e se as condições de contorno variam com o tempo. A unidade utilizada neste projeto foi dias e o tempo final foi de 362 dias. A quarta etapa determina em quais intervalos de tempo o usuário pretende obter os dados básicos de umidade ou pressão entre outros, que neste caso foi de 30 em 30 dias.

A quinta etapa determina os critérios de iteração. A sexta etapa determina os modelos hidráulicos utilizados. Na sétima, são determinados os parâmetros de fluxo de água. Na etapa seguinte são determinadas as condições de contorno como precipitação, temperatura, umidade e vento.

Para as condições de contorno foi considerada a condição atmosférica, com a precipitação dada pela estação meteorológica de Niterói para os 365 dias do ano de 2010, e os parâmetros hidráulicos do solo considerados foram os obtidos no programa RETC. A umidade inicial (em janeiro) foi considerada como a umidade do solo saturado devido às chuvas de dezembro, as quais são mais intensas.

4. Resultados

4.1. Ensaio realizados na Argila Amarela

4.1.1. Caracterização

A composição e a curva granulométricas da argila amarela são apresentadas na tabela 6 e na figura 31 respectivamente. A unidade natural obtida foi de 26,3% e a densidade real dos grãos de 2,805.

Tabela 6 – Composição granulométrica da argila amarela

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
34	48	9	5	3	1

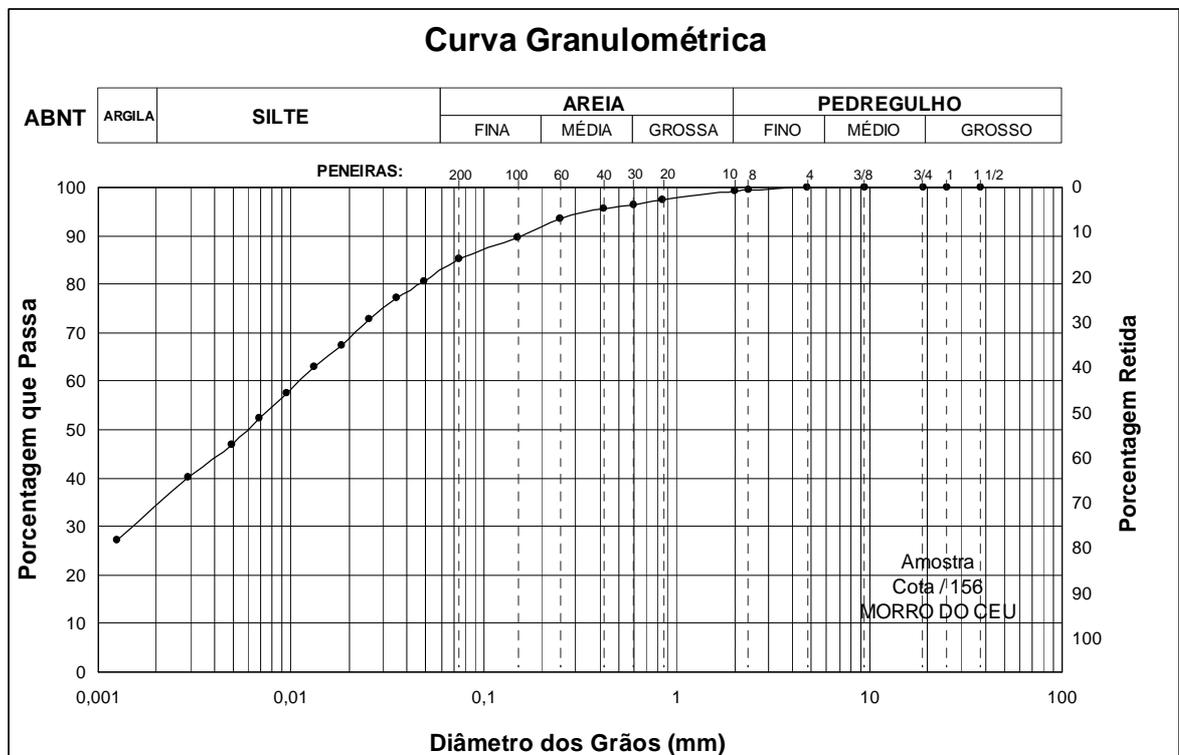


Figura 31 – Curva granulométrica da argila amarela

Os limites de Atterberg indicaram (tabela 7):

Tabela 7 – Limites de Atterberg

Limites de Atterberg		
Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
60%	22%	38%

De acordo com a classificação unificada o solo pode ser classificado como uma argila de alta compressibilidade (CH).

4.1.2. Compactação

O ensaio de compactação indicou uma umidade ótima de 23% e uma massa específica aparente seca máxima de 1,564 g/cm³ para energia do Proctor Normal.

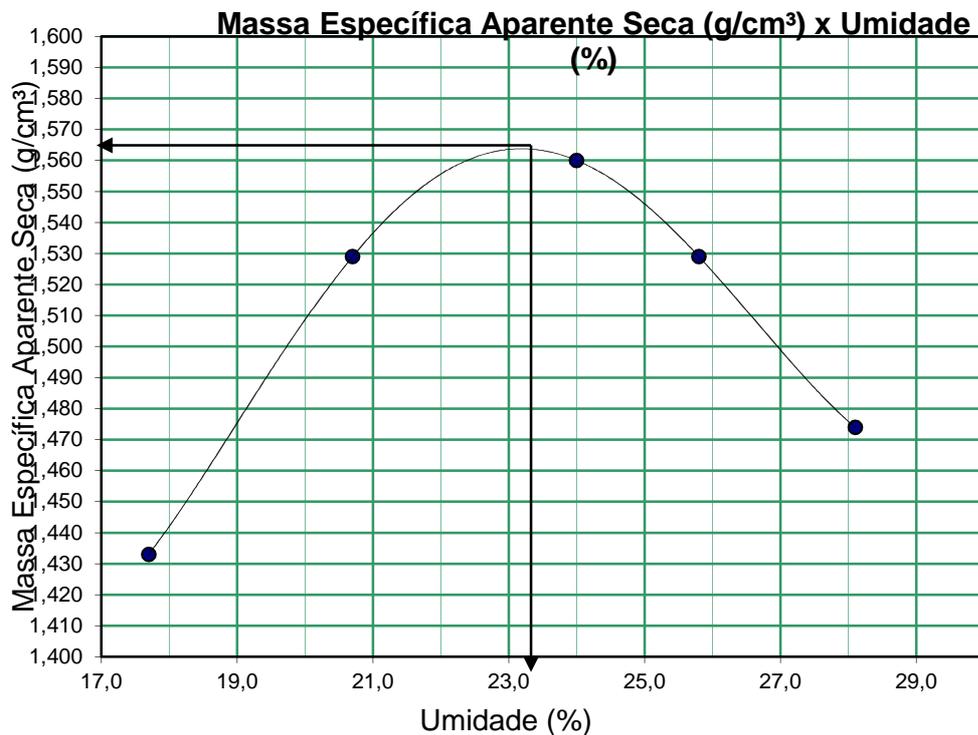


Figura 32 – Resultado do ensaio de compactação

Com os dados do ensaio de retenção a massa específica seca de campo foi calculada, e com a massa específica seca, o grau de compactação foi calculado (eq. 6). A amostra 3 apresentou $\rho_{sec.o} = 1,375 \text{ g/cm}^3$, a amostra 4 $\rho_{sec.o} = 1,480 \text{ g/cm}^3$ e a amostra 6

$\rho_{\text{sec } o} = 1,476 \text{ g/cm}^3$. O grau de compactação foi de: $G_c(\%) = 13,75/15,64 = 0,88$, para a amostra 3, de $G_c(\%) = 14,80/15,64 = 0,95$ para a amostra 4 e de $G_c(\%) = 14,76/15,64 = 0,94$ para a amostra 6, relativos a energia do Proctor Normal.

4.1.3. Ensaio de permeabilidade saturada

O ensaio de permeabilidade na amostra da argila amarela obtida com anel indeformado em campo, apresentou um coeficiente de permeabilidade de $1,033 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$.

4.1.4. Retenção

Inicialmente para o andamento do ensaio de retenção pelo método do papel filtro para argila amarela foi necessário calcular o índice de vazios, o peso específico do solo saturado e o peso específico do solo seco.

Os anéis que serviram para amostragem das amostras têm as dimensões e pesos apresentados na tabela 8. Os índices de vazios calculados são apresentados na tabela 9. Como era de se esperar, a amostra 3 apresentou índice de vazios maior que as outras duas amostras, visto que seu grau de compactação foi bem inferior às outras duas (amostra 4 e amostra 6).

Tabela 8 – Dimensões e Peso dos anéis de amostragem da argila amarela

Anel	D (cm)	Peso (g)	H (cm)	Volume (cm ³)
3	9,69	129,63	3,03	223,45
4	9,70	127,39	3,01	222,36
6	9,70	129,85	3,03	223,76

Tabela 9 – Índice de vazios das amostras da argila amarela

Anel	Peso anel + amostra in situ (g)	Peso anel + amostra saturada (g)	Peso da amostra saturada (g)	Peso específico Saturado (KN/m ³)	Saturação (%)	Gs - Densidade real dos grãos	e - índice de vazios
3	530,47	550,76	421,13	18,85	100	2,805	1,04
4	509,34	561,61	434,22	19,53	100	2,805	0,89
6	537,10	566,41	436,56	19,51	100	2,805	0,90

Os valores obtidos para sucção através das umidades correspondentes do papel filtro calculados pelas equações 10 e 11 e os valores das umidades das amostras são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Valores obtidos de sucção para umidades correspondentes pelo método do papel filtro

Amostra 03			Amostra 04			Amostra 06		
Umidade gravimétrica (%)	Umidade volumétrica (%)	Sucção (kPa)	Umidade gravimétrica (%)	Umidade volumétrica (%)	Sucção (kPa)	Umidade gravimétrica (%)	Umidade volumétrica (%)	Sucção (kPa)
37,09	50,99	3,92	31,93	47,25	5,01	32,11	47,38	3,87
35,98	49,46	4,65	30,97	45,83	5,90	31,13	45,94	4,27
34,96	48,07	5,78	30,06	44,48	8,12	30,20	44,57	5,81
33,26	45,73	6,40	28,54	42,23	20,44	28,62	42,24	10,69
32,63	44,86	6,64	28,01	41,45	19,18	28,11	41,49	12,70
31,07	42,71	9,64	26,68	39,47	39,97	26,85	39,63	28,43
29,51	40,56	19,71	25,64	37,94	57,90	25,46	37,57	40,88
28,32	38,93	28,99	24,31	35,97	56,91	24,39	36,00	66,74
27,25	37,46	52,15	23,38	34,59	197,76	23,50	34,68	83,87
25,59	35,19	75,10	21,85	32,33	259,26	22,05	32,54	125,11
23,37	32,13	300,19	19,84	29,36	374,83	19,92	29,40	192,29
19,43	26,72	627,99	16,07	23,78	522,99	16,16	23,84	505,95
15,72	21,62	478,42	12,69	18,77	1269,63	12,78	18,86	430,58

As figuras 33 a 38 mostram as relações entre a sucção e a umidade volumétrica e gravimétrica para as amostras da argila amarela.

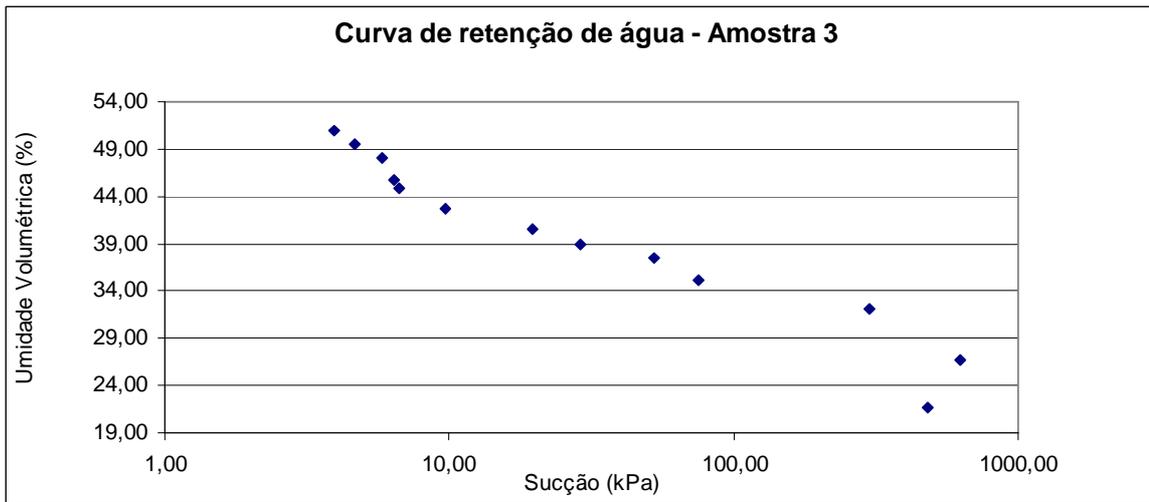


Figura 33 – Curva de retenção de água obtida para a amostra 3

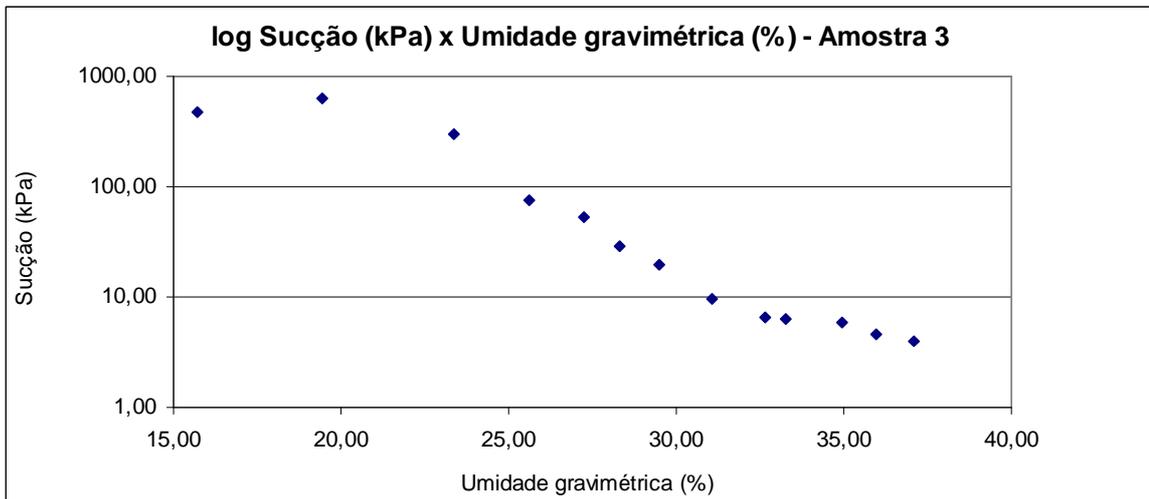


Figura 34 – Relação entre o logaritmo da sucção e a umidade gravimétrica para a amostra 3

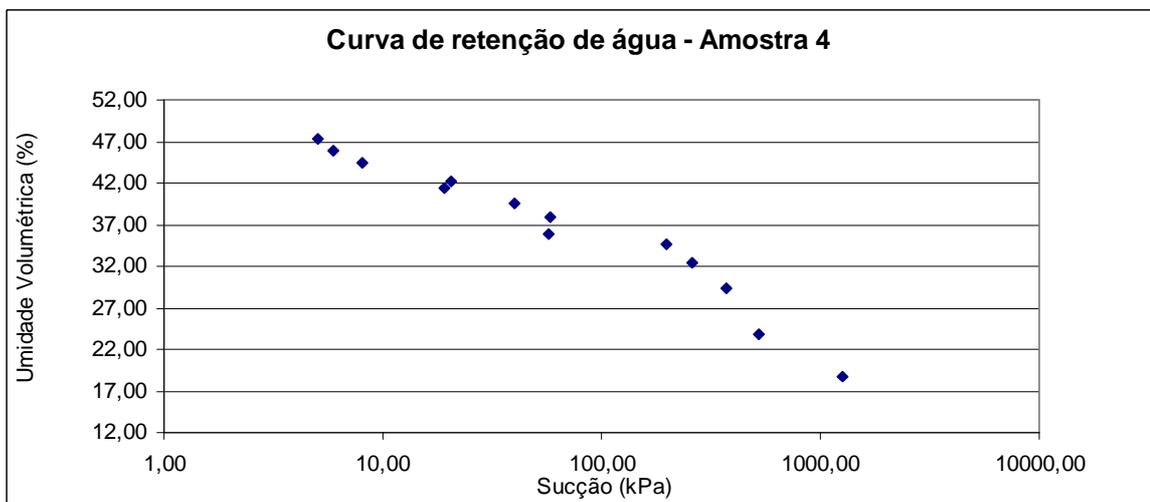


Figura 35 - Curva de retenção de água obtida para a amostra 4

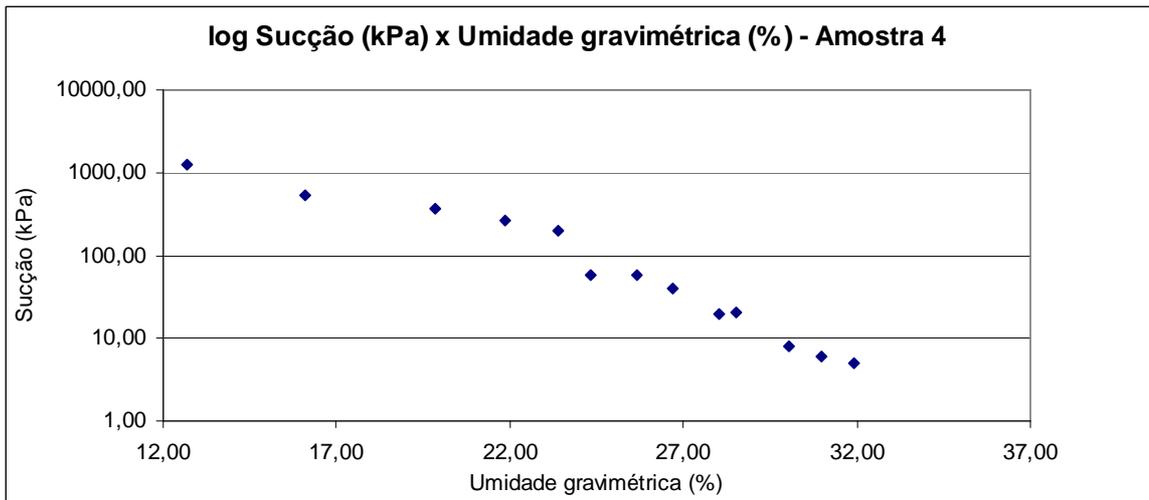


Figura 36 - Relação entre o logaritmo da sucção e a umidade gravimétrica para a amostra 4

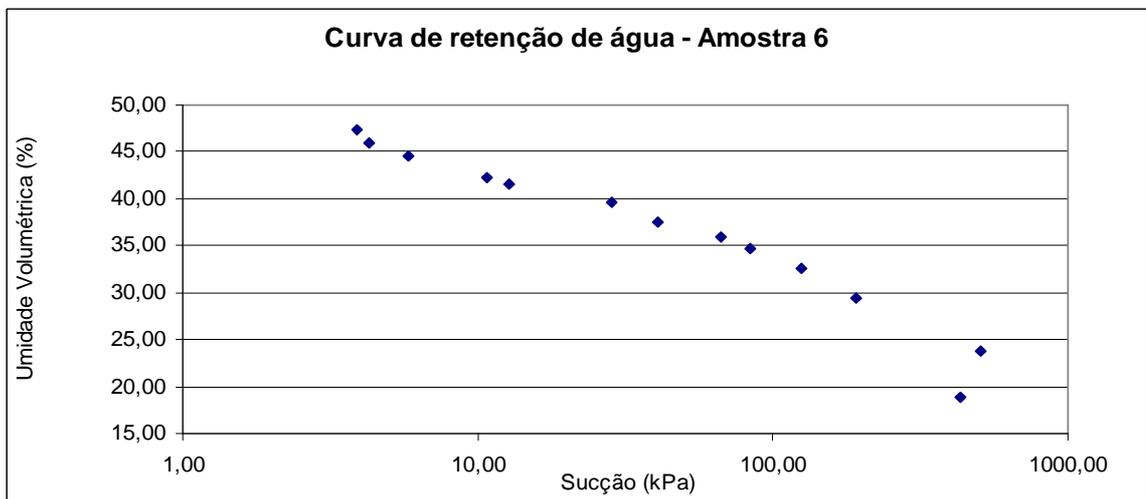


Figura 37 - Curva de retenção de água obtida para a amostra 6

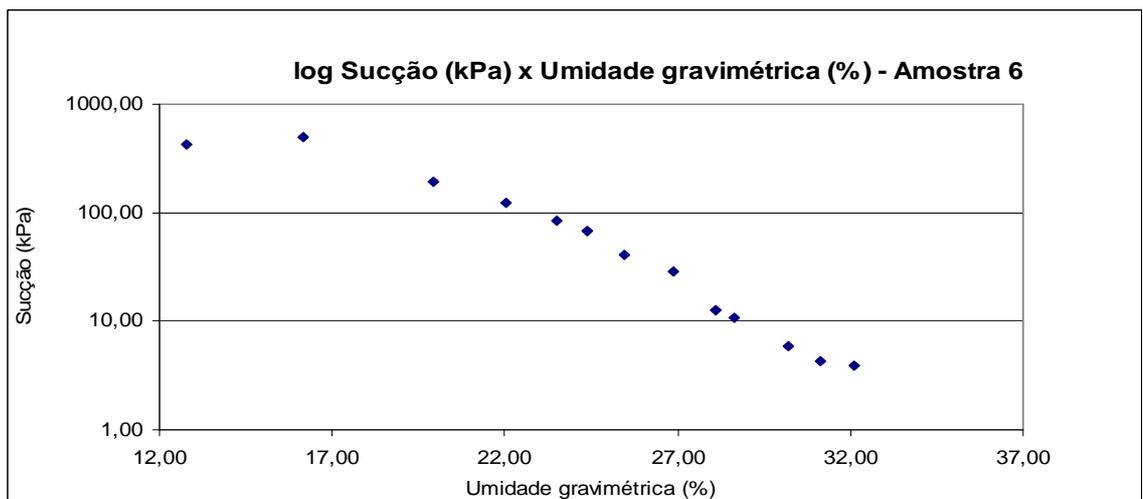


Figura 38 - Relação entre o logaritmo da sucção e a umidade gravimétrica para a amostra 6

As amostras 4 e 6 ao final da 13ª leitura após 120 dias de ensaios, apresentaram uma contração (não só devido a perda de umidade, mas também e principalmente devido a ação da gravidade) no topo de 1 mm aproximadamente conforme figura 39. Considerando que não houve perda de sólidos, o índice de vazios variou de 0,90 para 0,87 aproximadamente para as amostras 3 e 4, no entanto, isto não foi considerado no cálculo da curva de retenção.

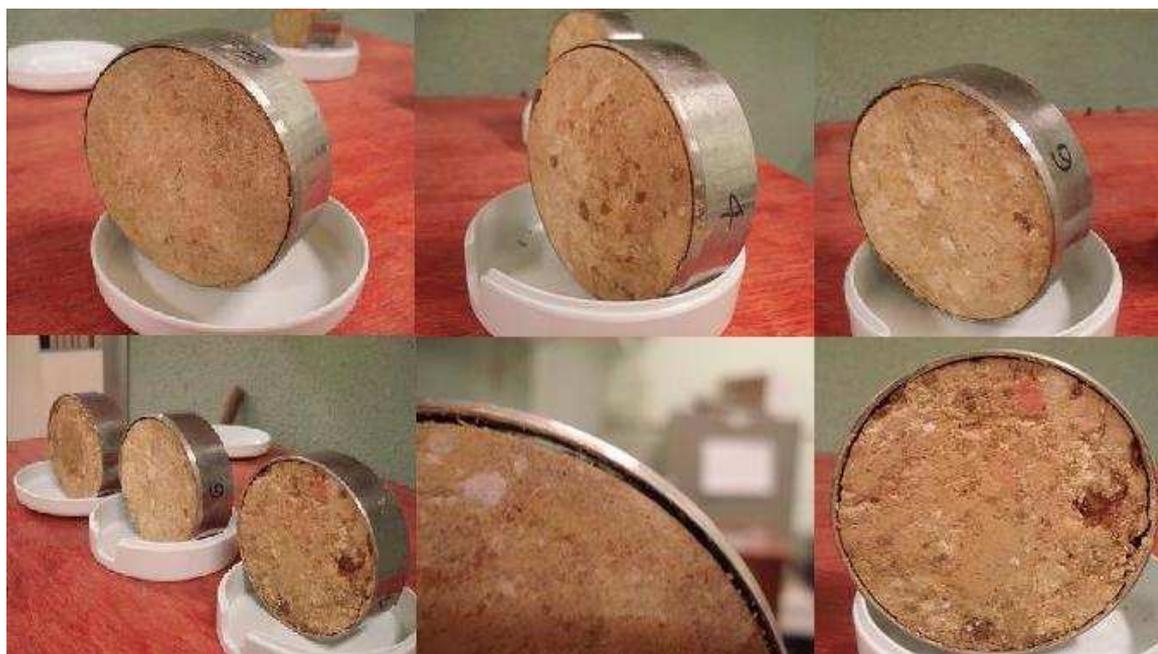


Figura 39 – Amostras da argila amarela ao final do ensaio

4.2. Ensaio realizado na Argila Vermelha

4.2.1. Caracterização

A granulometria e os limites de Atterberg para a argila vermelha estão descritos na tabela 11 e 12. A umidade natural encontrada foi de 16,32% e densidade real dos grãos foi de 2,683.

Tabela 11 – Composição granulométrica para argila vermelha

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
37	25	5	8	17	8

Tabela 12 – Limites de Atterberg da amostra vermelha

Limites de Atterberg		
Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
52%	20%	32%

Utilizando a o sistema de Classificação Unificada o solo é classificado como uma argila de alta compressibilidade (CH).

4.2.2. Compactação

O ensaio de compactação indicou uma massa específica aparente máxima de 1,53 e uma umidade ótima de 23% conforme figura 40 para energia do Proctor Normal.

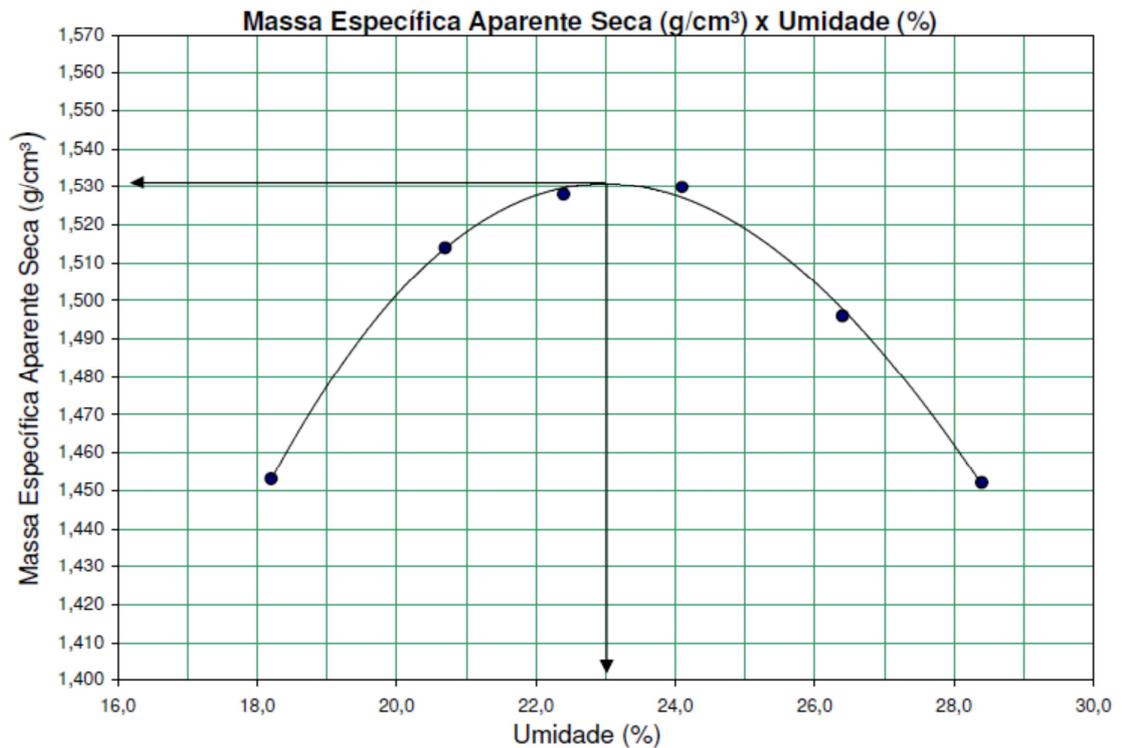


Figura 40 – Resultado do ensaio de compactação para argila vermelha

A massa específica seca de campo foi calculada através dos dados recebidos do ensaio de retenção da Poli/USP. A amostra MC1 apresentou $\rho_{sec o} = 1,250 g / cm^3$ e a amostra MC2 $\rho_{sec o} = 1,494 kg / m^3$. O grau de compactação foi de: $G_c (\%) = 1,250 / 1,53 = 0,82$, para a amostra MC1 e de $G_c (\%) = 1,494 / 1,53 = 0,98$ para a amostra MC2.

4.2.3. Ensaio de permeabilidade saturada

O ensaio de permeabilidade saturada á carga constante para argila vermelha apresentou um coeficiente de permeabilidade de $7,231 \times 10^{-6}$ cm /s.

4.2.4. Retenção

Os índices de vazios da argila vermelha foram calculados inicialmente e estão descritos na tabela 13. As umidades e as correspondentes sucções encontradas são mostradas na tabela 14.

Tabela 13 – Índices de vazios iniciais das amostras da argila vermelha

MC1		MC2	
Gs	2,683	Gs	2,683
Índice de vazios e	1,15	Índice de vazios e	0,80
ρ_d (kN/m ³)	12,50	ρ_d (kN/m ³)	14,94

Tabela 14 – Valores de sucções para umidades correspondentes do ensaio realizado na USP

MC1 - Umedecimento		MC2 - Umedecimento		Média	
Umidade volumétrica (%)	Sucção (kPa)	Umidade volumétrica (%)	Sucção (kPa)	Umidade volumétrica (%)	Sucção (kPa)
61,89	2	60,54	2	61,21	2
59,49	5	59,60	5	59,54	5
57,40	10	58,60	10	58,00	10
57,54	10	58,78	10	58,16	10
55,91	20	57,97	20	56,94	20
54,78	30	57,48	30	56,13	30
55,05	30	57,61	30	56,33	30
52,33	50	55,45	50	53,89	50
51,25	100	54,73	100	52,99	100
50,11	200	54,28	200	52,20	200
49,16	300	53,92	300	51,54	300
47,85	400	53,56	400	50,71	400
47,58	500	53,33	500	50,46	500

A figura 41 indica a relação entre as umidades das amostras e a sucção.

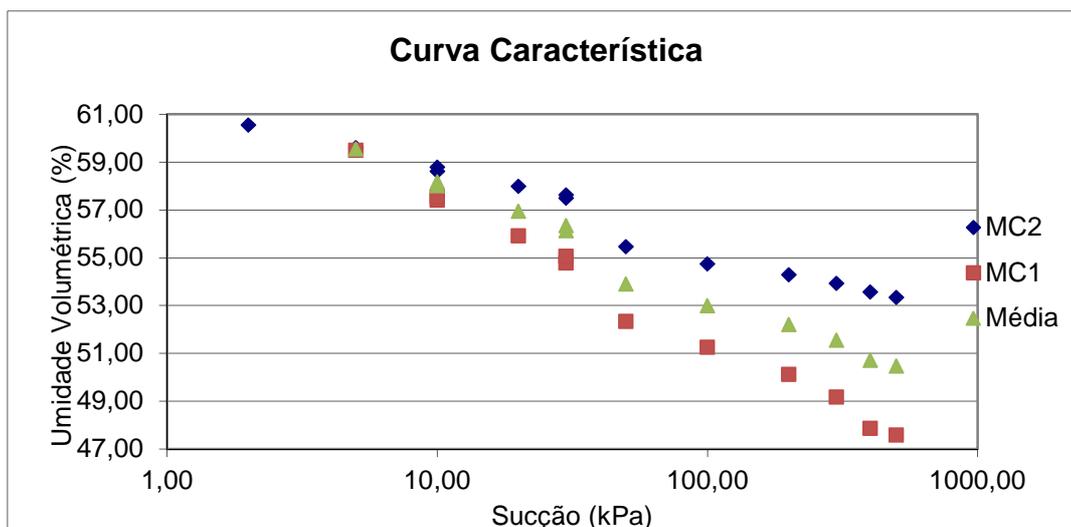


Figura 41 - Curva Característica obtida para as amostras MC1 e MC2 da amostra vermelha

4.3. Modelagem

4.3.1. Programa RETC

4.3.1.1. Argila amarela

O programa RETC gerou os parâmetros da curva, dados pela tabela 15, inicialmente sem ajuste, apenas com a granulometria (porcentagem de pedregulho, areia, silte e argila) da argila amarela.

Tabela 15 – Valores dos parâmetros da curva dados inicialmente pelo programa RETC apenas com os dados de caracterização

α	n	m	ΘS	ΘR	K_s (cm/dia)
0,0091	1,4722	0,3207	0,46	0,09	0,09

A permeabilidade saturada de entrada no programa utilizada foi a obtida em laboratório $1,033 \times 10^{-5} \text{ cm/s} = 0,892512 \text{ cm/dia}$. A tabela 16, a seguir, apresenta os dados de umidade volumétrica e sucção exigidos como dados de entrada do programa, os quais tiveram como base os resultados dos ensaios apresentados na tabela 10.

Tabela 16 – Dados de umidade volumétrica e sucção de entrada no programa RETC

Amostra 3		Amostra 4		Amostra 6	
Umidade volumétrica	Sucção (cm)	Umidade volumétrica	Sucção (cm)	Umidade volumétrica	Sucção (cm)
0,51	39,16	0,47	50,15	0,47	38,72
0,49	46,47	0,46	58,98	0,46	42,70
0,48	57,76	0,44	81,22	0,45	58,06
0,46	64,04	0,42	204,41	0,42	106,94
0,45	66,45	0,41	191,81	0,41	127,04
0,43	96,39	0,39	399,66	0,40	284,29
0,41	197,07	0,38	579,01	0,38	408,77
0,39	289,92	0,36	569,13	0,36	667,40
0,37	521,52	0,35	1977,58	0,35	838,68
0,35	750,96	0,32	2592,58	0,33	1251,07
0,32	3001,87	0,29	3748,29	0,29	1922,91
0,27	6279,94	0,24	5229,86	0,24	5059,46
0,22	4784,23	0,19	12696,30	0,19	4305,76

Os parâmetros ajustados obtidos são apresentados na tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros ajustados obtidos pelo programa RETC para as amostras da argila amarela

	α	n	m	ΘS	ΘR
Amostra 3	1,09991	1,12730	0,11292	0,81	0,00
Amostra 4	0,00309	1,20429	0,16964	0,46	0,00
Amostra 6	0,00263	1,27753	0,21724	0,45	0,00

As curvas experimentais e de acordo com os parâmetros de van Genuchten (1980) são apresentados nas figuras 42, 43 e 44 para as amostras 3, 4 e 6, respectivamente.

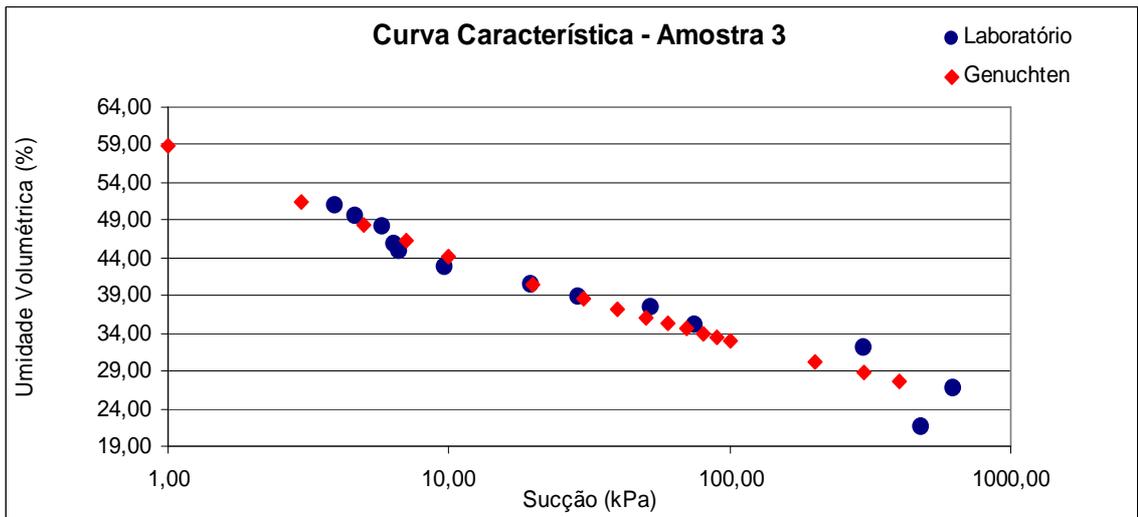


Figura 42 – Ajuste dos pontos obtidos no laboratório com a curva obtida no programa RETC para a amostra 3

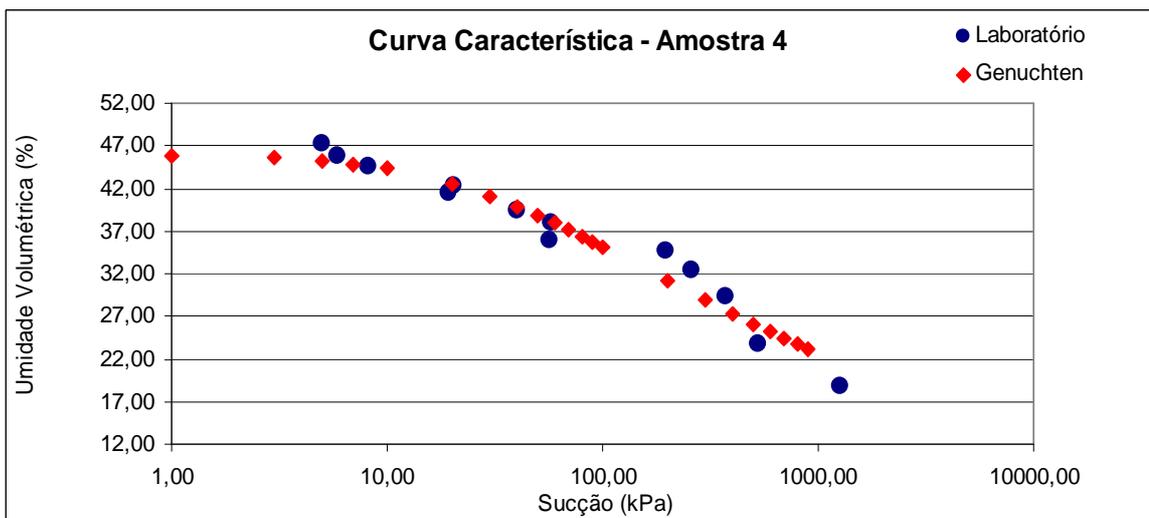


Figura 43 – Ajuste dos pontos obtidos no laboratório com a curva obtida no programa RETC para a amostra 4

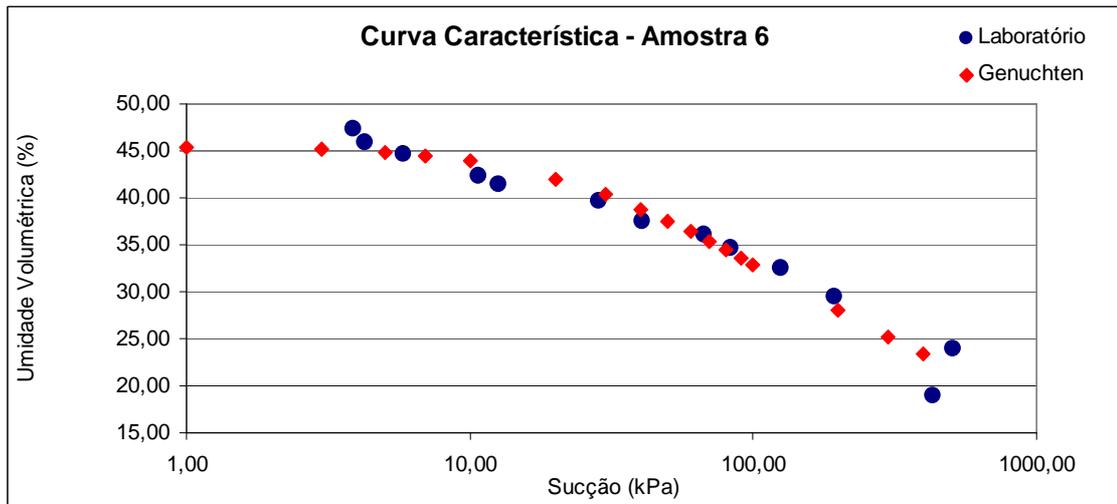


Figura 44 – Ajuste dos pontos obtidos no laboratório com a curva obtida no programa RETC para a amostra 6

Observa-se um excelente ajuste para as amostras 4 e 6, havendo pequenas discrepâncias no início e no fim da curva. Como esses ensaios foram realizados utilizando-se o método do papel filtro, não se obtiveram os dados para baixas sucções, o que poderia ser conseguido através do método de placa de sucção. O ajuste dos pontos experimentais da amostra 3 foi mais pobre que para as demais, além do que a forma da curva fugiu da tipologia típica desse tipo de solo.

A variação da permeabilidade em função da sucção e da umidade de cada amostra, analisada através do programa RETC segundo a proposta de Mualem (1976) é apresentada para cada amostra, nas figuras 45 a 50.

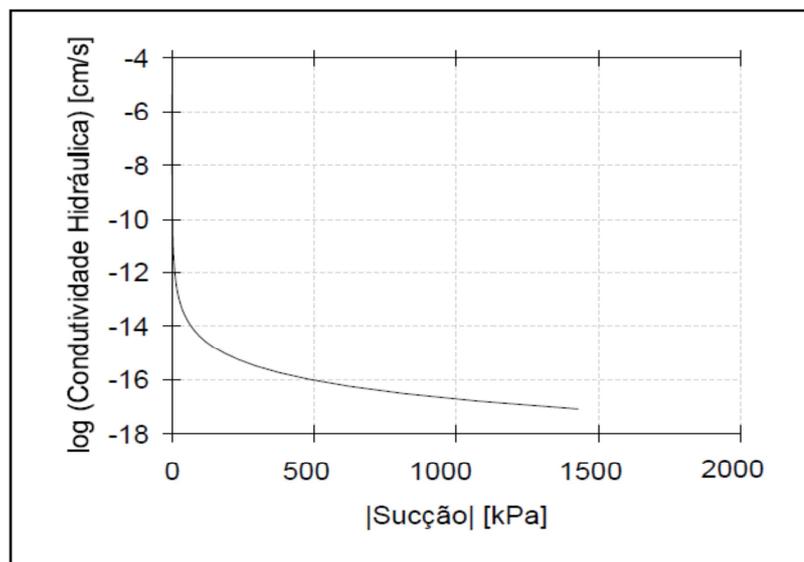


Figura 45 – Saída do programa RETC log(condutividade) X Sucção para Amostra 3

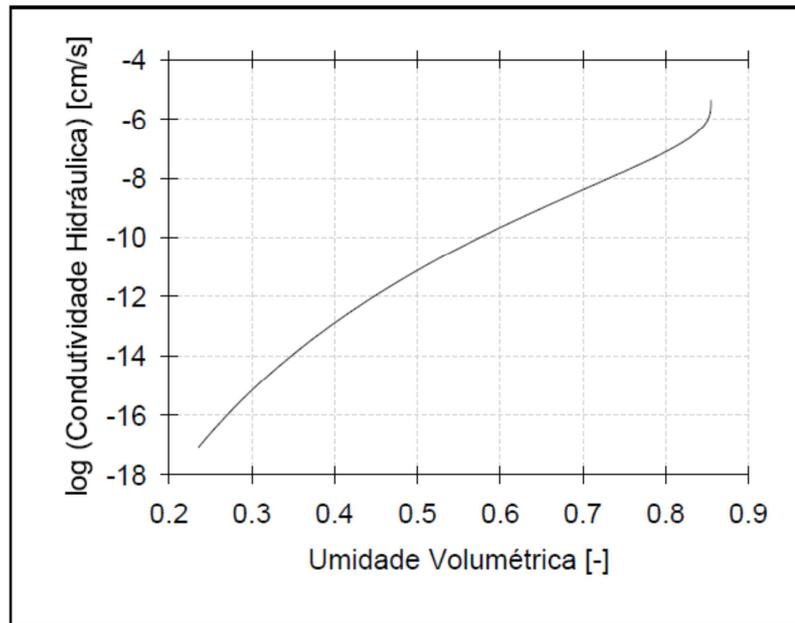


Figura 46 – Saída do programa RETC log(condutividade) x Umidade Volumétrica para Amostra 3

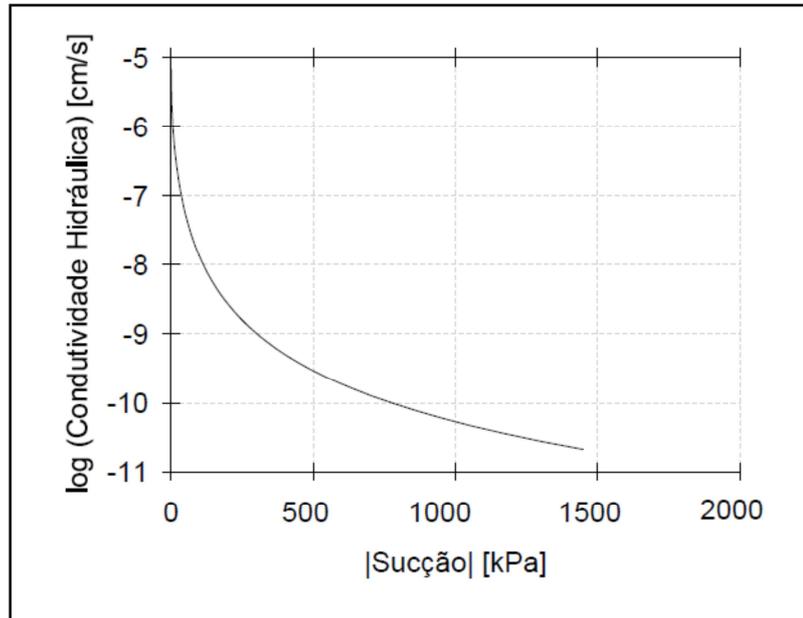


Figura 47 – Saída do programa RETC log(condutividade) X Sucção para Amostra 4

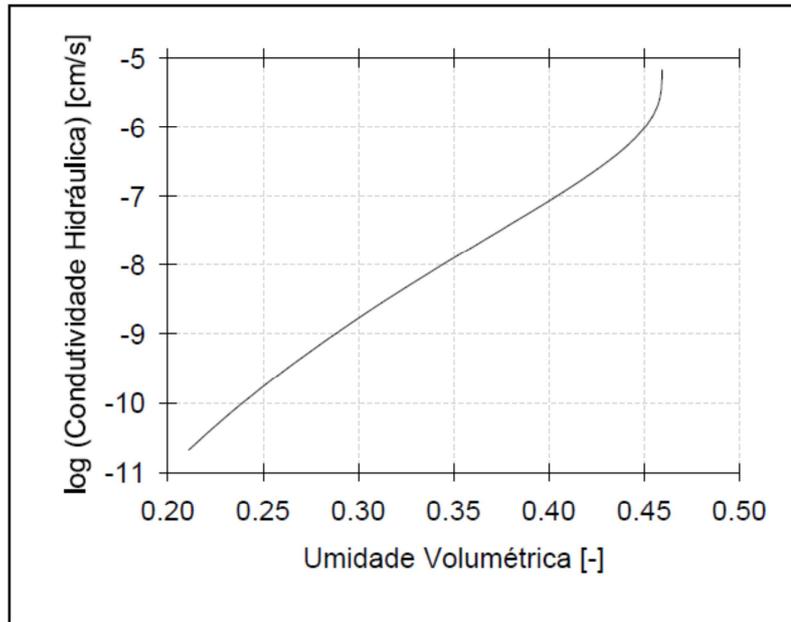


Figura 48 – Saída do programa RETC log(condutividade) x Umidade Volumétrica para Amostra 4

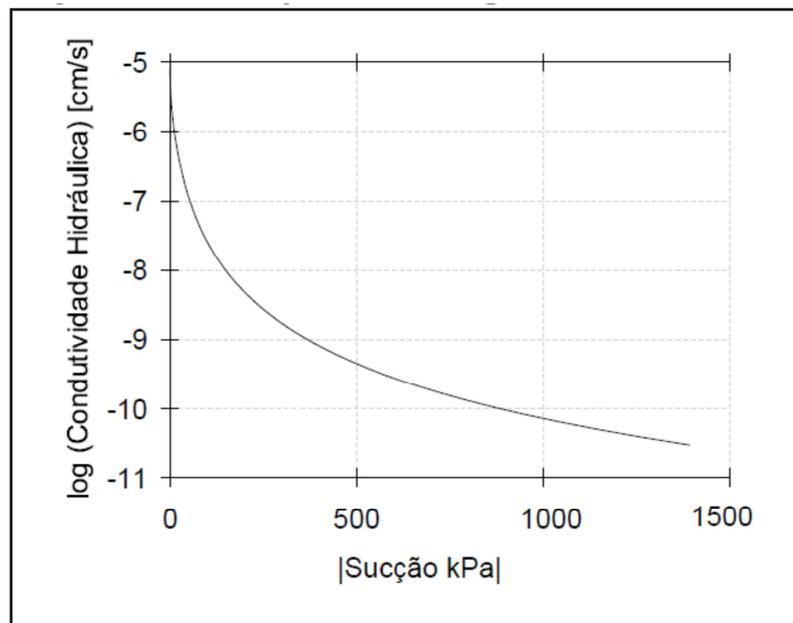


Figura 49 – Saída do programa RETC log(condutividade) X Sucção para Amostra 6

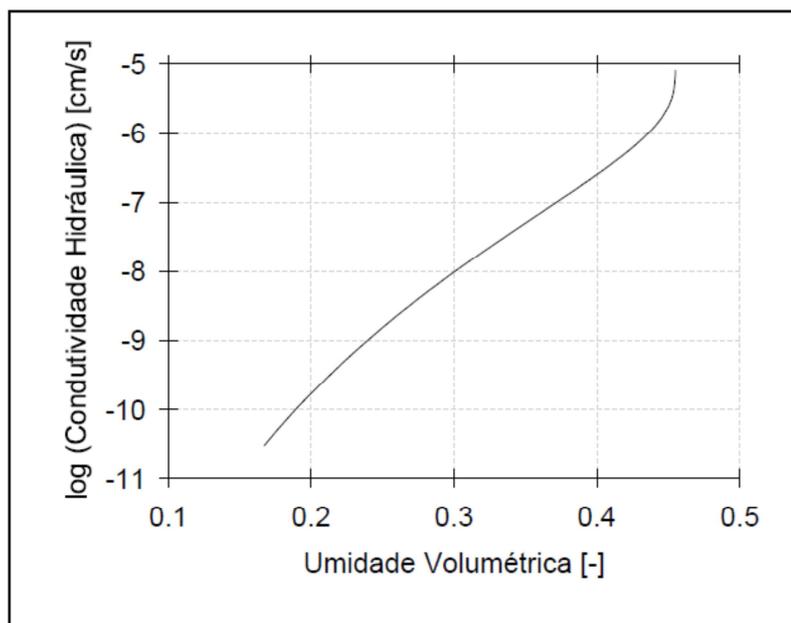


Figura 50 – Saída do programa RETC log(condutividade) x Umidade Volumétrica para Amostra 6

4.3.1.2. Argila vermelha

Utilizando o programa RETC através dos dados do ensaio de placa de sucção e câmara de pressão para argila vermelha foram obtidos os seguintes parâmetros ajustados:

Tabela 18 – Ajuste da curva característica obtido para argila vermelha

α	n	m	Θ_S	Θ_R
0,02596	1,19650	0,1642	0,6220	0,4327

A figura 51 apresenta o ajuste da curva para os parâmetros obtidos.

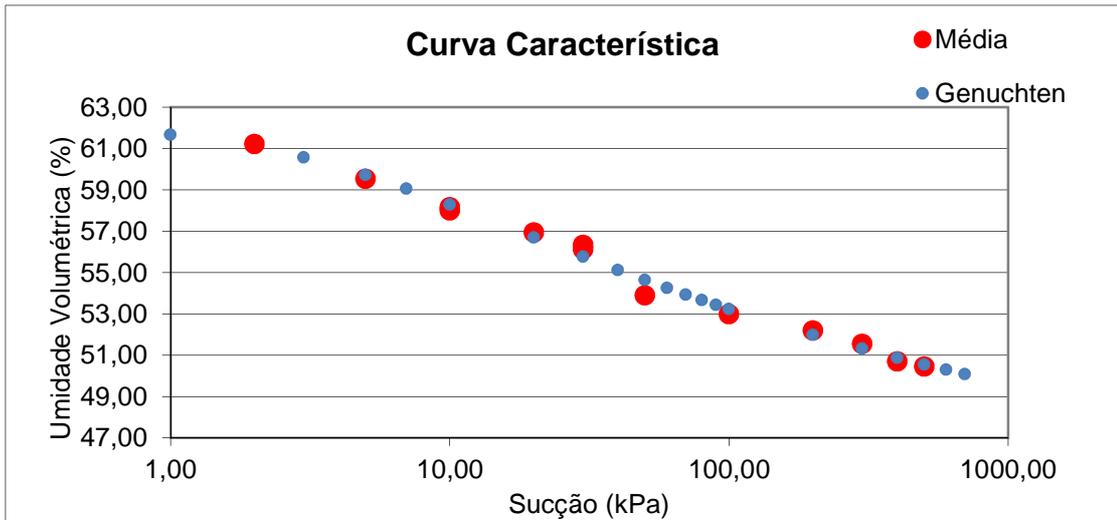


Figura 51 – Ajuste dos pontos obtidos no laboratório com a curva obtida no programa RETC para a argila vermelha

As figuras 52 e 53 apresentam a permeabilidade em função da sucção e da umidade pelo mesmo programa:

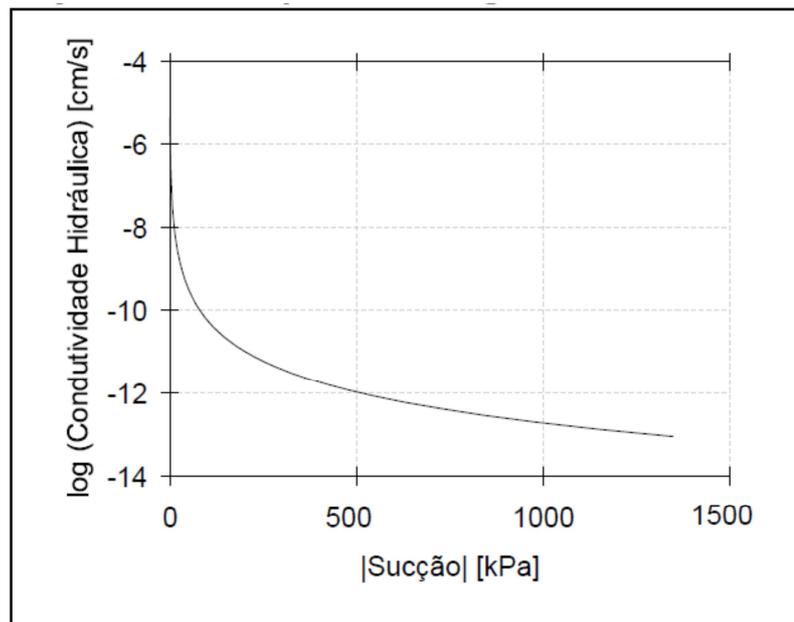


Figura 52 – Saída do programa RETC log(condutividade) x Sucção para argila vermelha

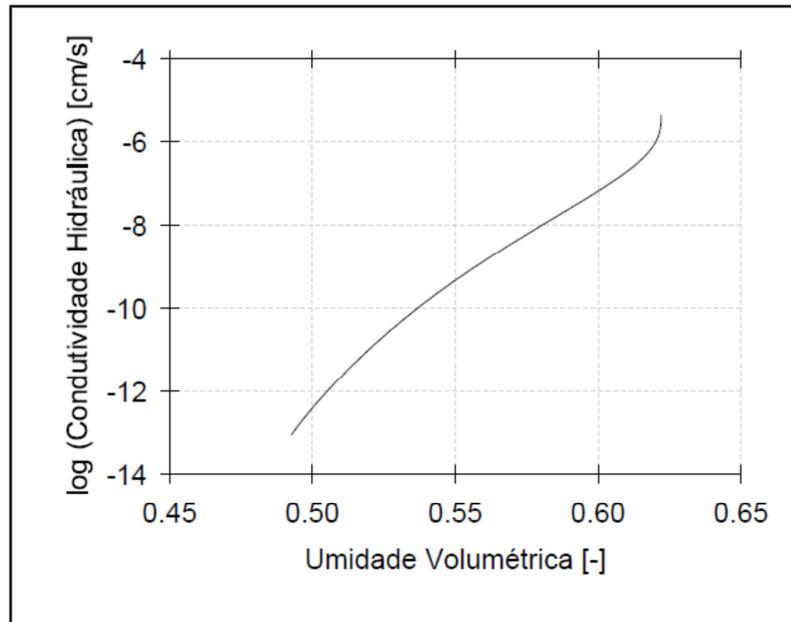


Figura 53 – Saída do programa RETC log(condutividade) x Umidade Volumétrica para argila vermelha

4.3.2. Infiltração – Programa Hydrus 1-D

Os dados meteorológicos que serviram como entrada para o programa Hydrus 1-D são apresentados resumidamente (dados mensais) na tabela 19. No entanto, para utilização do programa os dados meteorológicos dos 360 dias do ano foram utilizados como dados de entrada. A figura 54 mostra a precipitação ao longo do ano da estação meteorológica utilizada.

Tabela 19– Dados meteorológicos da estação de Niterói ao longo de 2010 (INMET)

Mês	Ano	Temperatura Máxima – Máxima (°C)	Temperatura Mínima – Mínima (°C)	Precipitação – Soma (cm)
1	2010	34,4	20,3	20,49
2	2010	36,2	23	8,5
3	2010	37,6	21,1	23,86
4	2010	35,9	16,9	5,69
5	2010	33,5	14,3	0,22
6	2010	33,5	15	0
7	2010	33,1	14	1,1
8	2010	37,2	13,3	0,38
9	2010	37,8	17,1	6,21
10	2010	39,2	19,6	7,21
11	2010	36	20,4	13,38
12	2010	36,4	21,5	36,2

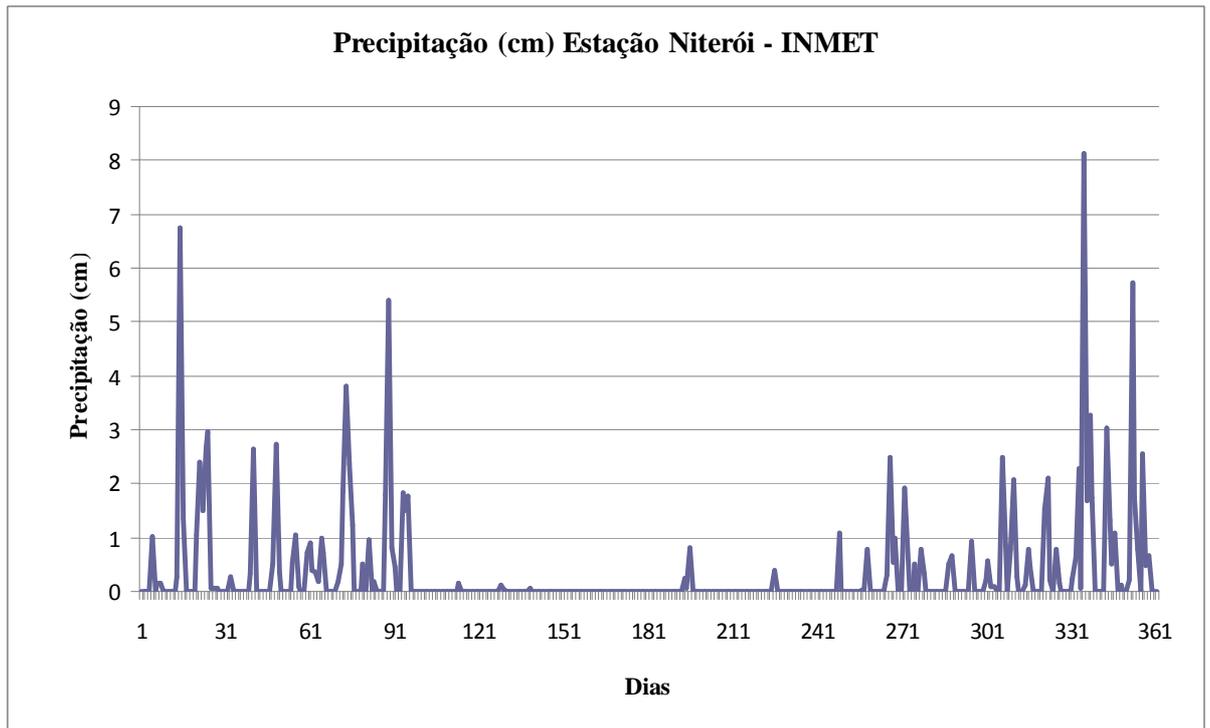


Figura 54 – Precipitação diária ao longo de 2010 na estação de Niterói (INMET)

4.3.2.1. Argila Amarela

Os parâmetros adotados na simulação foram os obtidos através do programa RETC para a amostra 4.

Nas figuras 55 e 56 a legenda T_1 a T_{12} representa os meses 1 a 12 do ano em estudo. Estas figuras apresentam a variação da umidade e da permeabilidade com a profundidade para cada mês do ano. Comparando-se as figuras 54 e 55 observa-se valores elevados de umidade no primeiro período chuvoso, de 90 dias (T_1 a T_3 , - 0 a 90 dias), diminuição da umidade no período seco (T_4 a T_8 - 90 a 180 dias) e novo aumento até T_{12} , mostrando coerência com o esperado. O mesmo pode ser observado para a variação da permeabilidade da camada ao longo do ano (figura 56).

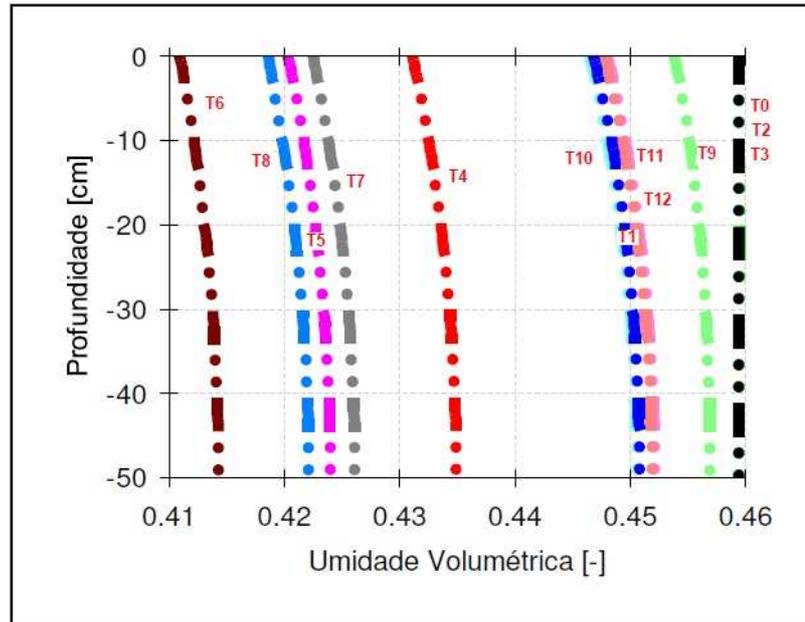


Figura 55 – Dados básicos de umidade volumétrica para os 12 meses com a utilização da argila amarela

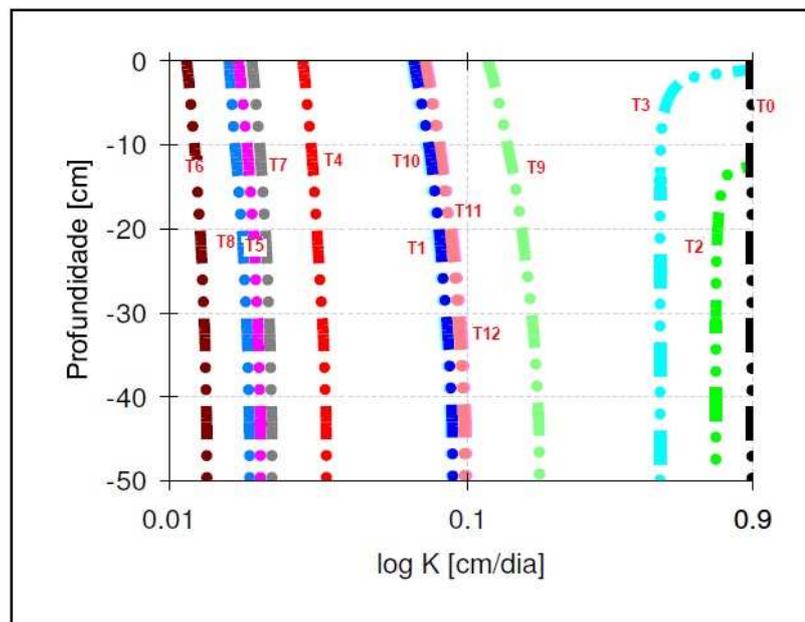


Figura 56 – Dados básicos de permeabilidade para os 12 meses com a utilização da argila amarela

As figuras 57 a 58 apresentam o run-off diário e acumulado e a figura 59 apresenta a infiltração acumulada durante o ano.

Pode observar, comparando as figuras 57 e 58 com os dados pluviométricos, coerência com os resultados esperados, embora quantitativamente avalie-se que os valores de infiltração são muito elevados para o solo em questão, uma argila compactada, do tipo CH.

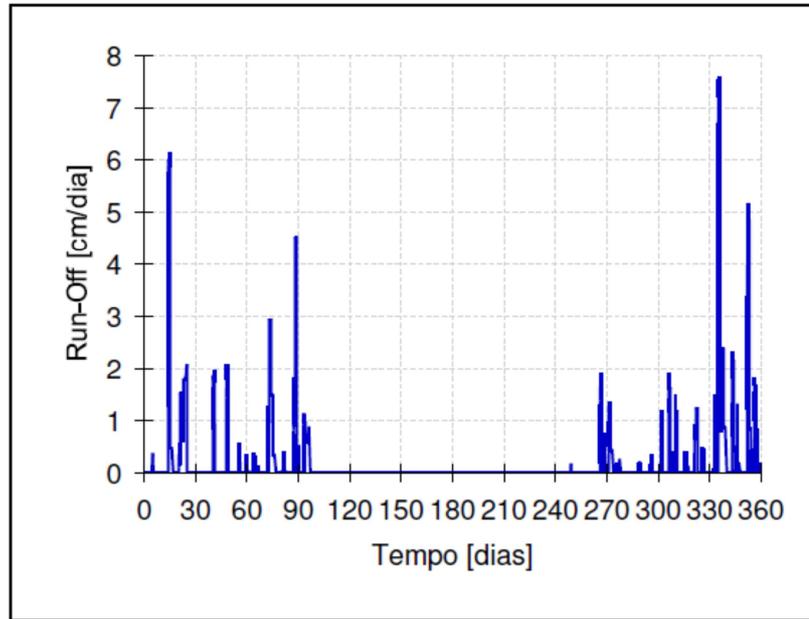


Figura 57 – Run-Off para os 12 meses com a utilização argila amarela

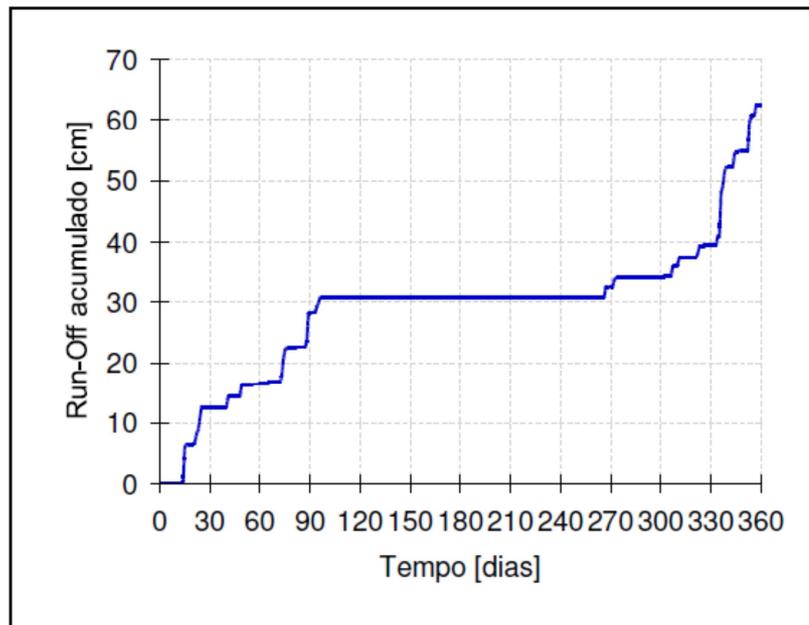


Figura 58 – Run-Off acumulado para os 12 meses com a utilização da argila amarela

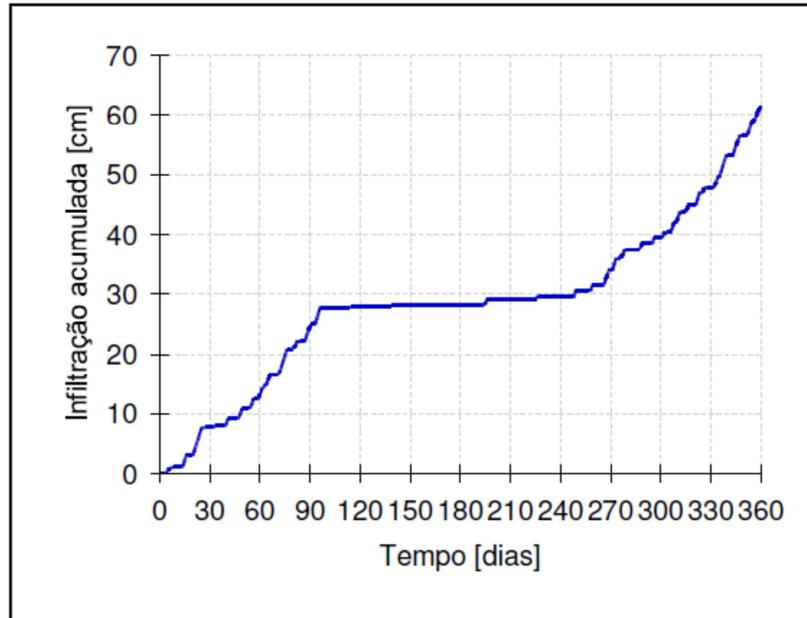


Figura 59 – Infiltração acumulada para os 12 meses com a utilização da argila amarela

4.3.2.2. Argila vermelha

Os parâmetros que serviram de entrada para o programa Hydrus foram os parâmetros das médias dos dados obtidos no ensaio da placa de pressão. O programa teve como saída as figuras 60 a 64:

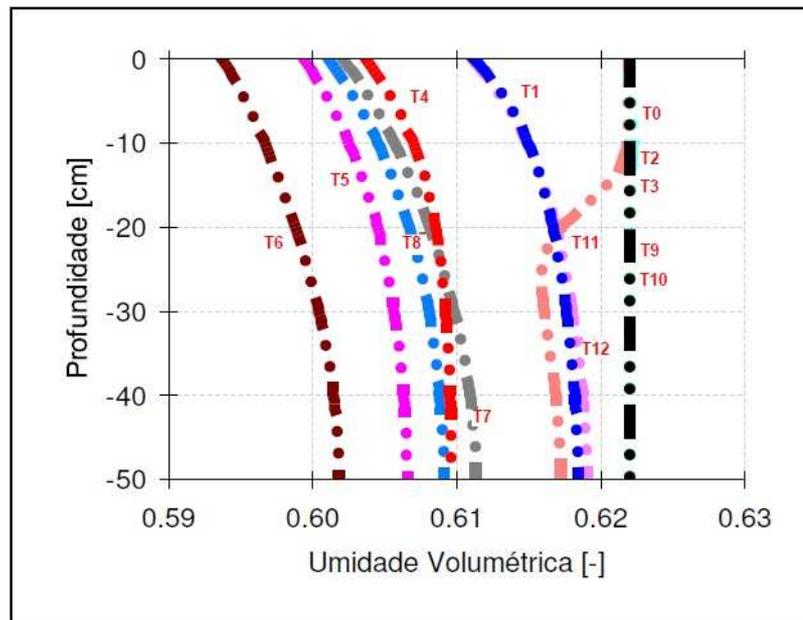


Figura 60 – Dados básicos de umidade volumétrica para os 12 meses com a utilização da argila vermelha

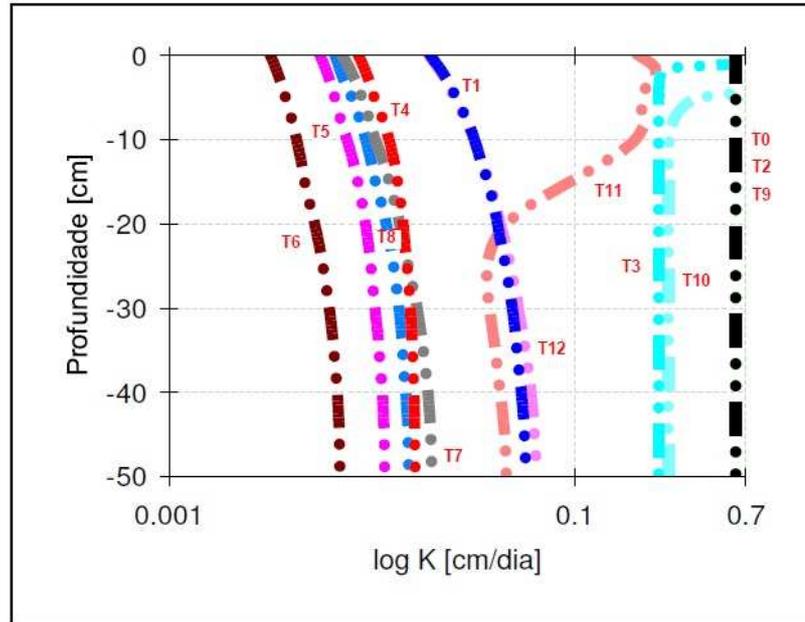


Figura 61 – Dados básicos de permeabilidade para os 12 meses com a utilização da argila vermelha

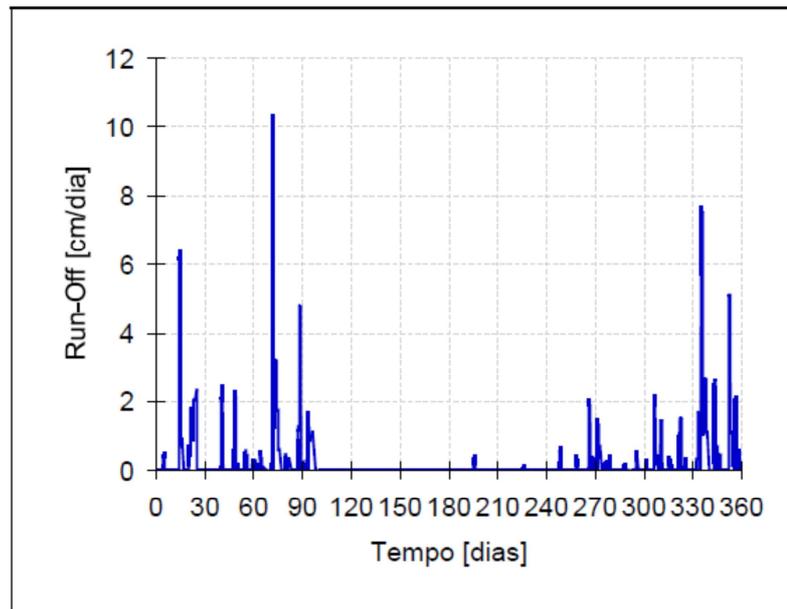


Figura 62 – Run-Off para os 12 meses com a utilização da argila vermelha

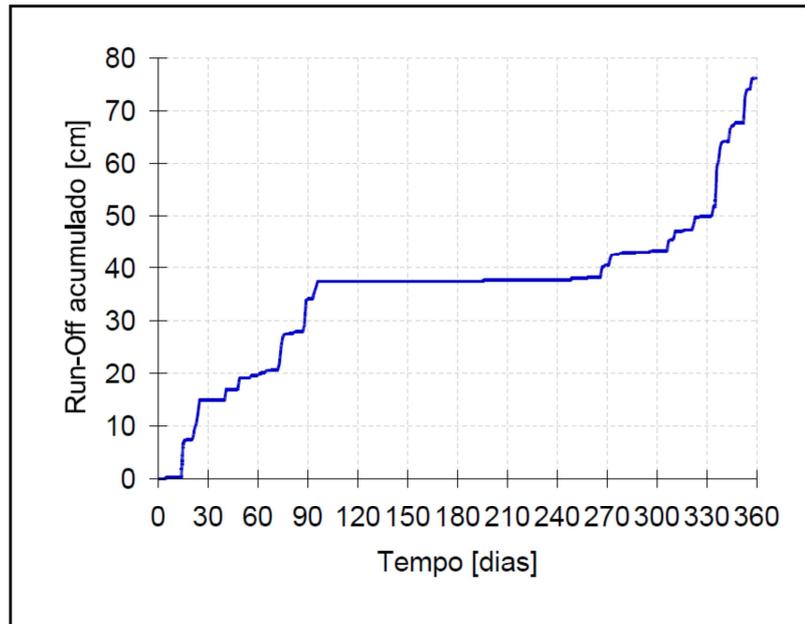


Figura 63 – Run-Off acumulado para os 12 meses com a utilização da argila vermelha

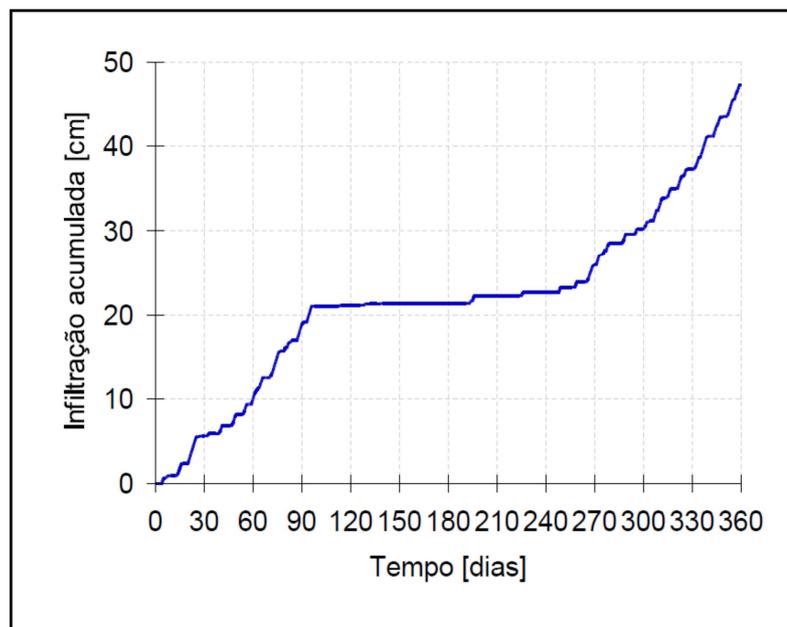


Figura 64 – Infiltração acumulada para os 12 meses com a utilização da argila vermelha

5. Discussões

A argila amarela foi classificada como argila de alta compressibilidade (CH), possuindo uma fração de grãos grossos de 18% com índice de plasticidade de 38%. O grau de compactação encontrado de 95%, para duas amostras, é o recomendado pela norma para aterros. A argila vermelha também pode ser considerada como argila de alta compressibilidade (CH) possuindo uma fração de grãos grossos de 38% com índice de plasticidade de 32%. O grau de compactação foi de 97 % para a amostra MC2 e de 80% para amostra MC1.

Os pontos das curvas de retenção obtidos para as três amostras da argila amarela ficaram próximos (figura 65), chegando-se a valores elevados de sucção, já que para Zorneberg e MCarteney apud Santos (2009) um referencial para valores de sucção alto seria 1000 kPa.

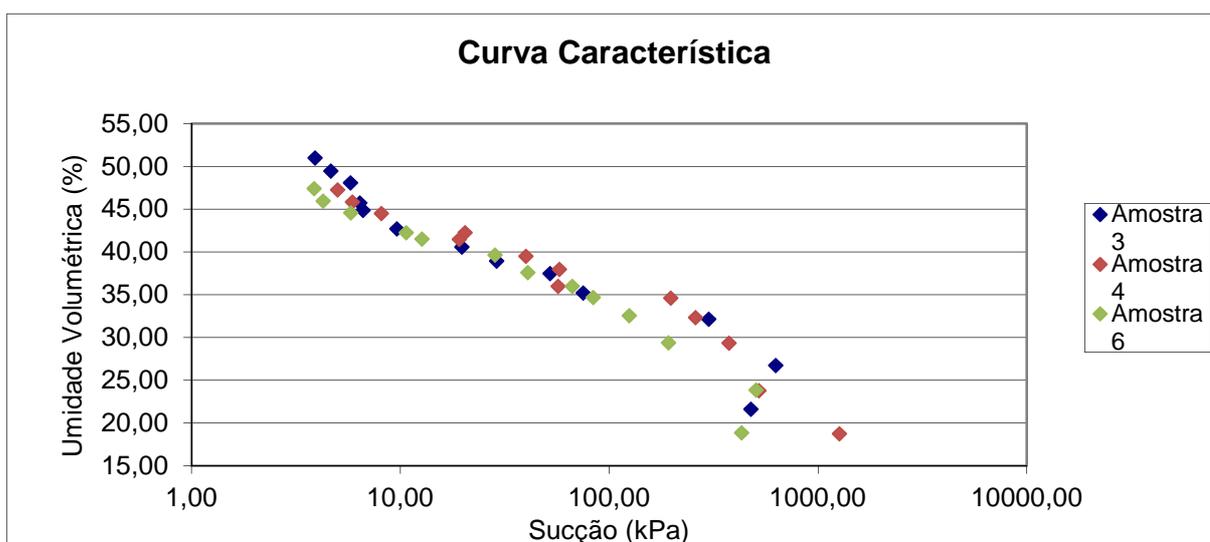


Figura 65 – Resultados do ensaio de retenção para as três amostras da argila amarela

No entanto, a curva ajustada através dos parâmetros obtidos do programa RETC para a amostra 3 diferiu das amostras 4 e 6 (figura 66). Mesmo apresentando um índice de vazios maior que das demais amostras de 1,04 (as outras apresentaram índices de vazios de 0,90), a amostra 3 apresentou uma sucção maior para mesma umidade. Além do que através dos parâmetros de ajuste foi obtida uma umidade volumétrica saturada $\theta_s = 81\%$, um valor incoerente porque após a saturação da amostra esta estava com umidade de 51 %. Observando-se ainda a figura 66 verifica-se que esta apresenta um padrão diferenciado das outras duas. Portanto, os dados da curva 3 seriam desprezados para a análise de infiltração na camada de cobertura.

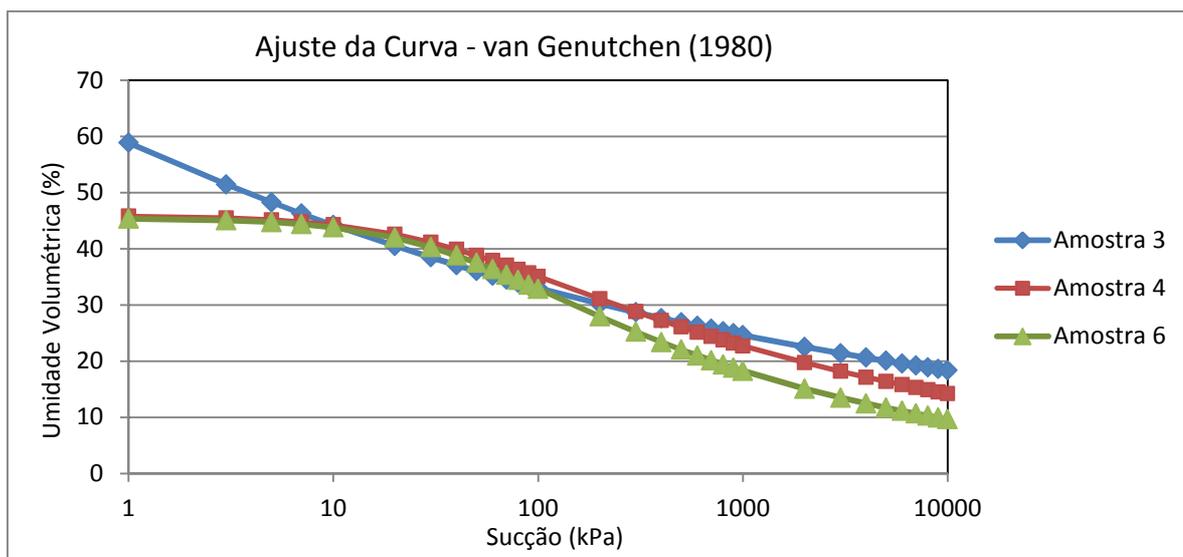


Figura 66 – Ajustes da Curva Característica segundo Van Genuchten (1980)

Para argila vermelha houve uma discrepância das amostras MC1 e MC2 no ensaio de placa de pressão, sendo que a primeira apresentou sucções menores para uma mesma umidade volumétrica. Tal fato ocorre devido que a amostra MC1 apresenta um índice de vazios maior que a amostra MC2, ou seja, a quantidade de macroporos é maior. E para esta argila mesmo com uma elevada quantidade de grãos grossos o programa RETC ajustou a umidade residual muito alta $\theta = 43,27\%$.

Os valores calculados para a permeabilidade não saturada pelo método de Mualem (1976) através dos parâmetros de van Genuchten (1980), para diferentes níveis de sucção estão apresentados na tabela 20, para argila amarela e na tabela 21 para argila vermelha. Tal fato confirma a discrepância da amostra 3 da argila amarela perante as outras duas amostras.

Tabela 20 – Permeabilidade não saturada (cm/s) segundo Mualem (1976) para argila amarela

Sucção (kPa)	Permeabilidade não saturada (cm/s) - Mualem (1976)							
	5	10	50	100	500	1000	5000	10000
Amostra 3	1,61E-12	2,31E-13	2,49E-15	3,53E-16	3,79E-18	5,37E-19	5,76E-21	8,16E-22
Amostra 4	1,06E-06	5,42E-07	3,63E-08	6,77E-09	7,37E-11	9,46E-12	7,61E-14	9,46E-15
Amostra 6	1,92E-06	1,06E-06	7,95E-08	1,43E-08	1,22E-10	1,39E-11	8,30E-14	9,09E-15

Tabela 21 – Permeabilidade não saturada (cm/s) segundo Mualem (1976) para argila vermelha

Permeabilidade não saturada (cm/s) - Mualem (1976)								
Sucção (kPa)	5	10	50	100	500	1000	5000	10000
Argila Vermelha	5,00E-08	1,01E-08	1,21E-10	1,58E-11	1,32E-13	1,67E-14	1,36E-16	1,71E-17

Apesar de apresentar uma quantidade de finos menor que a argila amarela, a argila vermelha apresenta uma permeabilidade não saturada segundo Mualem (1976) menor para um mesmo valor de sucção.

O programa Hydrus 1-D indicou uma infiltração com a utilização da argila amarela de 60 cm aproximadamente e um Run-Off também de 60 cm para o ano de 2010, enquanto que para a utilização da argila vermelha ocorre uma infiltração de 45 cm e um Run-Off de aproximadamente 75 cm, sendo que a precipitação total da estação meteorológica foi de 123,0 cm. A maior infiltração com a utilização da argila amarela do que com a argila vermelha pode ser explicada por sua maior permeabilidade.

6. Conclusões

O ensaio de papel filtro mesmo que de fácil realização apresentou algumas dificuldades como as variações do peso do papel ao decorrer do tempo entre a retirada da estufa e a pesagem e na determinação da variação dos índices de vazios.

A utilização do programa RETC permitiu fazer bons ajustes dos dados experimentais de comportamento da variação da sucção com a umidade dos solos estudados. As duas argilas utilizadas na cobertura do aterro de Morro do Céu apresentam características granulométricas e índices de Atterberg semelhantes. No entanto, a argila vermelha apresenta um percentual de argila maior do que a amarela o que a tornou menos permeável (segundo os ensaios de permeabilidade saturada). E por este motivo através do programa Hydrus 1D foi encontrada uma infiltração menor para a argila vermelha em relação a argila amarela e conseqüentemente um escoamento superficial (Run Off) maior, indicando a argila vermelha como um material mais recomendado para a camada de cobertura de aterro sanitário. No entanto, os valores encontrados foram considerados elevados, 60 cm de infiltração para a argila amarela e 45 cm para argila vermelha em 123 cm de precipitação.

A estimativa de infiltração em aterro sanitário pelo fato de envolver diversas variáveis muito complexas como precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento entre outros e assuntos distintos como solos não saturados, balanço hídrico etc. Desta forma, um estudo mais rigoroso deste processo necessitaria de uma análise mais profunda tanto dos parâmetros quando dos dados de entrada utilizados nos programas de simulação dos processos, o que requereria um tempo não disponível para este trabalho.

Pretendeu-se com este trabalho contribuir para estabelecer uma metodologia para os estudos de infiltração em camada de cobertura em aterro sanitário de forma a se ter referência da quantidade de líquido infiltrado para dimensionamento das camadas de cobertura. Seria recomendável a realização de ensaios de permeabilidade não saturada para os solos estudados, com a finalidade de inferir os modelos utilizados.

Referências Bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: **Solo - Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1988.

_____. NBR 6457: **Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1986.

_____. NBR 6459: **Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 6508: **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7180: **Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7182: **Solo - Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 1986.

_____. NBR 13292: **Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante- Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1986.

ASTM D5084-10 - **Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter**. American Society for Testing and Materials. Volume 04.08.

ASTM D5298-92 - **Standard Test Methods for Measurement of soil potential (suction) using filter paper**. American Society for Testing and Materials. Volume 15.09.

AGRITEMPO. **Sistema de monitoramento agrometeorológico**. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br>>. Acesso em: 12 junho de 2011, 20:04:11.

BRAJA, M. DAS., 2007, **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6ª Ed. São Paulo, Thomson Learning.

BROOKS, R. H. E COREY, A. T. 1964. **Hydraulic properties of porous medium**. Colorado State University, Hydrology Paper, nº 3.

CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S. E MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). **A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings**. Proc. of the Institute of Civil Engineering, 92, No. 2, pp. 82-89

EBRAHIMI, B. N., FREDLUND, D.G., FREDLUND, M. D., GITIRANA JR., G. F. N., SAMARASEKERA, L., 2004, "A lower limit for the water permeability coefficient". In: **57th Canadian Geotechnical Conference**, pp.12-19, Québec, oct.

EVANGELISTA , S. R. M., MONTAGNER, A. J., ROMANI, L. A. S., SANTOS, E. H., TERNES, S., 2003, "Organização do banco de dados meteorológicos do sistema agritempo". In: **Anais do IV Congresso Brasileiro da Sociedade Brasileira de Informática Aplicada à Agropecuária e à Agroindústria**, pp.01-014, Porto Seguro, oct.

FREDLUND, D.G., MORGENSTERN N.R. and WIDGER R.A. (1977) **The shear strength of unsaturated soils**. Canadian Geotechnical Journal. 15, n°3: 313-321.

FREDLUND, D. G., RAHARDJO., H., 1993, **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, John Wiley & Sons.

FREDLUND, D. G., XING, A., 1994, "Equation for Soil-Water Characteristic Curve", **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 3 (march), pp. 521-532.

GENUCHTEN, M. T., LEIJ, F. J., YATES. S. R., 1991, **The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soil**. Oklahoma, U.S. Environmental Protection Agency.

GERSCOVICH, D. M. S., 1994, **Fluxo em Meios Porosos Saturados-Não Saturados: Modelagem Numérica Com Aplicações ao Estudo da Estabilidade de Encostas na Cidade do Rio de Janeiro**. Tese de D. Sc., Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

_____, 2010, **Fluxo em Solos Saturados**. Apostila da disciplina Fluxo em Solos, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro.

GREACE, E. L., WALKER, G. R. E COOK, P. G. (1987). **Evaluation of the filter paper method for measuring soil water suction**. International Conference on Measurement of Soil and Plat Water Status. Pp. 137-143.

GOMES, J. E. S., 2007, **Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel filtro**. Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, Brasil.

HILF, J. W. (1956)- **An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils. PhD Tese, Denver, Colorado, apud Vieira, A. M. (2005).** Estudo de Barreiras Capilares como Cobertura Final de Aterro de Resíduos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. Brasil.

HUSE, K., 2007, **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura em aterros.** Dissertação de M. Sc., Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

IBGE (2010) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- Cidades. <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acessado em 15 /12/2011.

LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V., 1969, **Soil Mechanics.** New York, Wiley & Sons.

LEE, H. C., WRAY, W. K., 1995, “Techniques to evaluate soil suction – Avital unsaturated soil water variable”, **Unsaturated Soils**, v. 2, pp. 615-622.

LIBARDI, P. L. (2005). **Dinâmica da água no Solo.** Ed. USP, São Paulo.

LOPES, R. L. (2011). **Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.

MACIEL, F. J. (2003). **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil, apud Lopes, R. L. (2011). Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.

MCKEEN, C. R. E BUMB., A. C. (1984). **The importance of unsaturated flow patterns in designing a monitoring system for hazardous wastes and environmental emergencies.** Proceedings, Hazardous Materials Control Research Institute National Conference, Houston, Março de 1984. Pp. 50-58.

MCKEEN, C. R. E BUMB, A. C. (1987). **Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas**. SPE FormationEvaluation, Dezembro, pp. 599-608.

MACHADO, R. A., 2005, **Variação sazonal da sucção matricial e estabilidade de taludes de solos residuais não saturados**. Dissertação de M. Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, UFV, Minas Gerais, MG, Brasil.

MARIANO, M. O. H (2008). **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólido. Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil. Recife, Pernambuco, Brasil.

MARINHO, F. A. M., 1994, “A Técnica do Papel Filtro para Medição de Sucção”. In: **Encontro sobre Solos Não Saturados**, pp. 01-14, Rio Grande do Sul, Out.

_____, 2005, **Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados**. Texto apresentado à Escola Politécnica para o Concurso de Livre-Docência do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo.

_____, 1994, **Shrinkage Behaviour of Some Plastic Soils**. Tese de D.Sc., University of London, Londres, Inglaterra.

MARINHO, F.A.M., STUERMER, M. M, 2000, “The influence of the compaction energy on the SWCC of a residual soil”, In: SHACKELFORD, S. L., HOUSTON, S. L., CHIEN, NY, Eds., **Geotechnical Special Publication 99**, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp 125-141.

MUALEM, Y., 1976, “A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media”, **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, pp. 513-522.

NISHIMURA, T. E VANAPALLI, S. K. (2004). **Shear strength behavior of an unsaturated silty soil under constant volume conditions**. 57th Canadian Geotechnical Conference, GeoQuebec.

OLIVEIRA, O. M. DE (2004)- **Estudo sobre a Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual Compactado Não Saturado**. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. Brasil.

PC-Progress: Engineering Software Developer. <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx>. Acedido em 15/12/2011.

PINTO, C. DE S., 2000, **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo, Oficina de Textos.

SANTOS, M. F., 2007, **Plano de gestão do aterro controlado do Morro do Céu: instrumento de mudança**. Dissertação de M. Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SANTOS, T. F. L., 2009, **Estudo experimental da camada de cobertura do aterro Morro do Céu, Niterói, RJ**. Dissertação de M. Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. Th., SEJNA, M., 2005, **The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 3.0**, HYDRUS Software Series 1, Riverside, Department of Environmental Sciences, University of California.

VAN GENUCHTEN, M. T., 1980, "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", **Soil Science Society of American Journal**, Vol. 44, pp 892-898.

VAN GENUCHTEN, M. T., LEIJ, F. J. E YATES, S. R. (1991). **The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soil**. Oklahoma, U.S. Environmental Protection Agency.

VARGAS, M., 1978, **Introdução à Mecânica dos Solos**. Vol. 1, São Paulo, McGRAW – HILL do Brasil.

VIEIRA, A. M. (2005). **Estudo de Barreiras Capilares como Cobertura Final de Aterro de Resíduos**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. Brasil.

VIVIAN, J. B., 2008, **Utilização do Método do papel filtro para a Determinação das Curvas Características de um Solo Coluvionar Não Saturado Contaminado com Óleo Diesel**. Dissertação de M. Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

YONG, R. N., WARKENTIN, B. P., 1965, "Studies on the mechanism of failure under load in expansive soils". In: **International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils**. Texas A & M University, College Station.

ZORNBERG, J. G., MCCARTNEY, J. S., 1998, "Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment." In: DELLEUR, J.W. (ed.), 1998, **The Handbook of Groundwater Engineering**, 2nd Edition, Florida, CRC Press Inc.