



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AJUSTE DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO DA CAMADA DE
COBERTURA DE UMA CÉLULA EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

PEDRO VÍTOR CARTAXO TAVARES

CAMPINA GRANDE – PB

Setembro de 2017

PEDRO VÍTOR CARTAXO TAVARES

**AJUSTE DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO DA CAMADA DE
COBERTURA DE UMA CÉLULA EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande como
requisito para a obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

CAMPINA GRANDE – PB

Setembro de 2017

Aluno: Pedro Vítor Cartaxo Tavares

Título: AJUSTE DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO DA CAMADA DE COBERTURA DE UMA CÉLULA EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
(Examinador Interno – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

Prof. Msc. Pablio da Silva Araújo
(Examinador Externo – Faculdade Maurício de Nassau)

CAMPINA GRANDE – PB

Setembro de 2017

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me acompanhar e me amparar em momentos de dúvida e tristeza

A meus pais, José Marquinélio Tavares e Luciana Cartaxo Araújo por me educarem e proporcionarem tudo o que eu precisei para atingir meus objetivos.

Aos meus irmãos, Lucas Cartaxo Tavares, Isadora Cartaxo Tavares e Martina Cartaxo Tavares, por me apoiarem e me impulsionarem sempre que possível.

Aos demais familiares que alegraram as minhas férias e mostraram o verdadeiro significado de união.

A minha namorada, Rebecka Marques, por não deixar que pensamentos ruins me abalassem e sempre me persuadir a procurar o melhor de mim.

Aos amigos que dividiram apartamento comigo durante todos esses anos, Vitor Torquato e Pedro Sampaio, por aguentarem momentos de estresse e tristeza ao meu lado.

Aos amigos do grupo Canafista, que me acompanharam mesmo à distância. Aos amigos de Fortaleza, que mesmo depois de anos ainda estão em sintonia comigo. A todos os amigos de Cajazeiras, que também fizeram parte da minha vida.

A todos os amigos que fiz durante esses cinco anos de curso, que vieram a se tornar minha família.

Ao grupo GGA que me acolheu e me mostrou o verdadeiro sentido de trabalho em equipe.

Aos professores que me orientaram durante todo o processo para me tornar Engenheiro Civil, em especial a professora Veruschka Monteiro por ter aceitado o desafio de me orientar no TCC.

A banca examinadora, nas pessoas dos professores, Adriano Lucena e Pablllo Araújo, por participarem e contribuírem na minha vida acadêmica.

A todos que vieram a fazer parte desta pequena parcela da minha jornada chamada vida.

RESUMO

Os aterros sanitários necessitam de monitoramento constante de sua camada de cobertura visando melhorar sua capacidade de isolar os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e evitar a exposição desses resíduos no meio ambiente. Os aterros sanitários, geralmente, possuem uma camada de cobertura impermeabilizante que restringe o contato desses resíduos com o meio externo, além de impedir que os gases gerados dentro da Célula entrem em contato com o ambiente e que a água da chuva percole para o interior Célula. A determinação do solo mais adequado para compor a camada de cobertura é de suma importância para o estudo dos aterros sanitários, tendo em vista a necessidade de isolar os resíduos que compõe o aterro. O presente trabalho consiste na análise da camada de cobertura de uma célula experimental, que simula uma célula de aterro sanitário, localizada na Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, objetivando avaliar a relação sucção/umidade do solo e compará-la com a da camada de cobertura do aterro em escala real. Amostras indeformadas foram retiradas da camada de cobertura de solo compactado da célula experimental e levadas ao laboratório de Geotecnia Ambiental onde foi realizada a medição da sucção pelo método do papel filtro, possibilitando a obtenção dos dados necessários para construção da curva de retenção de água do solo. Utilizando o Software STATISTICA for Windows 8.0 foi possível ajustar a curva, obter os parâmetros necessários, sendo eles o Coeficiente de Determinação (R^2), Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e o Critério de Informação AKAIKE (AIC), e assim determinar o modelo que melhor se adequa ao solo estudado. Os resultados encontrados mostraram que a curva de retenção de água do solo da camada de cobertura da célula experimental apresentava baixa retenção de água, caracterizando um solo arenoso, ao contrário da caracterização realizada anteriormente, que encontrou uma classificação para um solo argiloso, demonstrando que o solo estudado sofreu alterações com o tempo devido a intemperismos, lixiviação, variações de temperatura, possibilitando inconformidade com a relação sucção/umidade de um solo argiloso. A partir da curva ajustada, verificou-se que a equação de Van Genuchten melhor representava o solo estudado devido aos parâmetros estatístico encontrados. Também foi possível determinar, a partir da análise da curva de retenção de água do solo, que o solo da camada de cobertura do aterro sanitário se mostrou mais eficaz para a finalidade de camada de cobertura, tendo em vista sua maior capacidade de retenção de água em comparação com o solo da camada de cobertura da célula experimental.

Palavras-chaves: Resíduos Sólidos Urbanos, Camada de cobertura, Sucção Matricial, Papel Filtro.

ABSTRACT

Landfills require constant monitoring of their cover layer in order to improve their ability to isolate Urban Solid Waste (MSW) and to avoid exposure of these wastes to the environment. Sanitary landfills generally have a layer of waterproofing cover that restricts the contact of these residues with the external environment, in addition to preventing gases generated inside the cell from coming into contact with the environment and that the rainwater falls to the inside Cell. The determination of the most suitable soil to compose the cover layer is of paramount importance for the study of the sanitary landfills, considering the need to isolate the wastes that make up the landfill. The present work consists in the analysis of the cover layer of an experimental cell, which simulates a landfill cell, located at the Federal University of Campina Grande, Paraíba, to evaluate the suction / moisture ratio of the soil and to compare it with the layer landfill coverage. Undeformed samples were taken from the compacted soil cover layer of the experimental cell and taken to the Environmental Geotechnics laboratory where the suction measurement was carried out by the filter paper method, enabling the data required to construct the soil water retention curve. Using the STATISTICA for Windows 8.0 software, it was possible to adjust the curve to obtain the necessary parameters, such as the Determination Coefficient (R^2), Sum of Squares of Residuals (SQR) and the AKAIKE Information Criterion (AIC). model that best suits the studied soil. The results showed that the soil water retention curve of the cover layer of the experimental cell presented low retention of water, characterizing a sandy soil, unlike the previous characterization, that found a classification for a clay soil, demonstrating that the soil studied underwent alterations with time due to weathering, leaching, temperature variations, allowing nonconformity with the suction / moisture ratio of a clay soil. From the adjusted curve, it was verified that the Van Genuchten equation better represented the studied soil due to the statistical parameters found. It was also possible to determine, from the soil water retention curve analysis, that the soil of the landfill cover layer was more effective for the cover layer purpose, considering its greater water retention capacity in comparison with the soil of the cover layer of the experimental cell.

Key words: Urban solid waste, cover layer, Matrix Suction, Filter paper.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de retenção por tipo de solo	7
Figura 2 – Zonas da curva de retenção de água no solo	8
Figura 3 – Elementos da curva da retenção	9
Figura 4 – Técnica do papel filtro	11
Figura 5 – Fluxograma da Metodologia	16
Figura 6 – Esquema da célula experimental (lisímetro)	19
Figura 7 – Retirada de amostras	20
Figura 8 – Saturação das amostras	22
Figura 9 – Embalagem das amostras após a saturação	22
Figura 10 – Curva característica: Umidade Volumétrica x Sucção Matricial	25
Figura 11 – Curva característica: Umidade Gravimétrica x Sucção Matricial	26
Figura 12 – Curva de retenção de água no solo da camada de cobertura de uma célula experimental (Van Genuchten, 1980)	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Técnicas de medição de sucção	10
Tabela 2 – Equações de calibração para o papel filtro Whatman N°42	12
Tabela 3 – Resumo da granulometria (Solo da camada de cobertura da célula experimental).	17
Tabela 4 – Resumo da granulometria (Solo da camada de cobertura da do aterro sanitário)	18
Tabela 5 – Análise estatística do ajuste da curva	28
Tabela 6 – Parâmetros estimados e equação	29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Equações de ajuste para a curva de retenção de água	13
Quadro 2 – Parâmetros geotécnicos (Solo da camada de cobertura da célula experimental)	17
Quadro 3 – Parâmetros geotécnicos (Solo da camada de cobertura do aterro sanitário)	18

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo Geral	3
2.2	Objetivos Específicos	3
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1	Camada de impermeabilização de aterros sanitários	4
3.2	Célula Experimental.....	4
3.3	Solos não saturados.....	4
3.4	Relação Sucção - Umidade	5
3.5	Curva característica	7
3.5.1	Métodos de medição de sucção	9
3.5.2	Método do papel filtro.....	10
3.5.3	Ajuste da curva de retenção de água.....	12
4.	METODOLOGIA	16
4.1	Característica dos solos.....	16
4.1.1	Solo da camada de cobertura da célula experimental.....	16
4.1.2	Solo da camada de cobertura do aterro sanitário	17
4.2	Etapas Executadas	18
4.3	Etapas da pesquisa	20
4.3.1	Retirada da amostra de solo da camada de cobertura da célula experimental..	20
4.3.2	Determinação da sucção	20
4.3.2.1	Método do papel filtro	20
4.3.3	Ajuste da curva experimental.....	23
5.	RESULTADOS.....	25
5.1	Curva de retenção de água do solo	25
5.2	Ajuste da curva de retenção de água	28
6.	CONCLUSÕES	30
7.	REFERÊNCIAS	31

1. INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento humano, atrelado com sua exorbitante necessidade de consumo, proporciona uma produção exacerbada de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Essa geração descontrolada de materiais constitui um dos maiores dilemas vividos pelos humanos.

Segundo a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) a disposição final ambientalmente adequada se dá com a distribuição ordenada dos RSU em aterros sanitários. Esses reservatórios de resíduos possuem camada de cobertura impermeabilizante de diversos tipos, como por exemplo as camadas de cobertura convencionais, de barreira capilar simples, barreira capilar dupla, entre outras (LOPES, 2009). Esse elemento impede o escoamento superficial das águas pluviais para dentro da Célula, controla a umidade e percolação dos resíduos, minimiza erosão, evita a exposição direta dos resíduos, entre outras funções importantes para manter a finalidade adequada dos aterros (ARAÚJO, 2017).

Essas camadas de cobertura de aterro sanitário, caso mal dimensionados, possuem grande potencial de poluição do solo, água e ar, possibilitando um ambiente favorável para a proliferação de agentes transmissores de doenças, sendo eles macro ou micro vetores.

As normas brasileiras, NBR 13896 (ABNT, 1997) e NBR 15849 (ABNT, 2010), não estabelecem o tipo de solo mais adequado a ser utilizado na composição das camadas de cobertura, embora exija um coeficiente máximo de permeabilidade à água de 10^{-8} m/s (ARAÚJO, 2017). Sendo assim, é necessário entender outros fatores que podem afetar a eficiência da camada de cobertura, como por exemplo por meio da curva de retenção de água no solo, tendo em vista que os solos utilizados nessas camadas são de condição não saturada, existindo assim a presença do elemento sucção.

A curva de retenção de água analisa a capacidade do solo de reter água para determinadas sucções, sendo a sucção uma energia por unidade de volume. Essa curva

é influenciada por diversos parâmetros, como a granulometria do solo estudado e as condições em que o mesmo está exposta, como ambiente e temperatura.

Uma das formas de se estudar essas camadas de cobertura e o comportamento dos aterros sanitários em geral, é utilizando as células experimentais de RSU, tendo em vista que estas células simulam o comportamento do aterro em escala reduzida, facilitando as análises e possibilitando futuras alterações em normas técnicas ou aprimorar estudos já existentes (MONTEIRO et al, 2006).

Dessa forma, este trabalho analisou a camada de cobertura compactada de uma célula experimental localizada na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), na cidade de Campina Grande – PB, visando entender a partir da sua curva de característica a sua capacidade de reter água, contribuindo para a avaliação de sua eficácia através do ensaio de sucção.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Ajustar a curva de retenção de água do solo da camada de cobertura de uma célula experimental na cidade de Campina Grande – PB a partir da equação que melhor representa o solo estudado e compara-la com a curva de retenção de água no solo da camada de cobertura do aterro sanitário de Campina Grande – PB.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter a curva de retenção de água do solo compactado da camada de cobertura de uma célula experimental.
- Ajustar a curva de retenção da camada de cobertura de uma célula experimental para às curvas de ajuste da literatura.
- Determinar qual modelo matemático melhor a representa a partir de parâmetros estatísticos.
- Comparar a curva de retenção de água do solo da camada de cobertura de uma célula experimental com a curva de retenção de água típicas de diferentes solos de Fredlund & Xing.
- Comparar a curva de retenção de água no solo compactado de uma célula experimental com a do aterro sanitário.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Camada de impermeabilização de aterros sanitários

A camada de cobertura dos aterros sanitários, tem como principais funções isolar os resíduos do meio externo, impedir que a água das chuvas percolem por meio dos poros, bem com evitar a saída dos gases gerados dentro das células (MARIANO, 2008). Logo, o desempenho dessas camadas de impermeabilização são de suma importância no desempenho dos aterros (SIMON e MULLER, 2004).

O controle das camadas de cobertura deve ser constante, pois eventos naturais como penetração de raízes dos vegetais, a falta de chuva e as mudanças climáticas da região, podem gerar danos no sistema de impermeabilização e, conseqüentemente, proporcionar o aparecimento de fissuras e microfissuras (JESSBERGER & STONE, 1991).

3.2 Célula Experimental

As células experimentais ou lisímetros funcionam de maneira a reproduzir em escala reduzida as condições de campo estabelecidas em um aterro sanitário. A partir dessa ferramenta é possível obter informações e parâmetros para projetos, dimensionamentos, construção e monitoramento de aterros.

Essas células experimentais (lisímetros) também podem servir como importante instrumento de estudo para possibilitar alterações futuras em normas técnicas ou aprimorar estudos já existentes (MONTEIRO et al., 2006).

3.3 Solos não saturados

A condição não saturada dos solos consiste no estado de que os vazios do solo estão ocupados apenas em parte por água. No Brasil, esta condição é facilmente encontrada devido as condições ambientes de grande parte do seu território, principalmente, nas zonas tropicais e semiáridas (PRESA et al.; 1991).

Segundo Lopes (2007), um solo não saturado é considerado uma mistura de várias fases que influenciam diretamente em seu estado de tensão, sendo considerado como um sistema trifásico, ou seja, constituído de três fases: líquida (água), sólida (partículas de minerais) e gasosa (Ar) (LAMBE & WHITMAN, 1969), entretanto, Fredlund & Morgenstern (1977), introduziram uma quarta fase independente, a interface ar – água, denominada de membrana contrátil.

Algumas forças intermoleculares atuam dentro dessa membrana e são denominadas de tensões superficiais. Essas tensões exercem tração no interior da membrana, fazendo com que a mesma passe a se comportar de maneira elástica (SANTOS, 2009). A atuação dessas tensões faz com que a superfície de contato entre a água e o solo nos vazios das partículas apresente uma curvatura, o que indica uma diferença de pressão nos dois fluidos, diferença essa denominada de sucção (SANTOS, 2009).

3.4 Relação Sucção - Umidade

Segundo Marinho (1997), existindo a possibilidade de movimentação da água livre por meio dos vazios do solo, ela pode ser adsorvida ou retida pelo solo, e assim, para que essa porção de água seja desprendida, é necessário a utilização de uma energia por unidade de volume, chamada de sucção.

Os tipos de sucção podem ser divididos em matricial, osmótica e total. A sucção matricial que se dá, mais costumeiramente, através dos fenômenos de capilaridade e de adsorção, sendo definida como a diferença entre pressão de ar e de água ($u_a - u_w$). A sucção osmótica corresponde a presença de íons e outros solutos na água intersticial. A sucção total (ψ_t) é composta pelo somatório da sucção matricial (ψ_m) e osmótica (ψ_o) conforme a Equação 1, sendo esta quantificada em função do teor de umidade relativo (FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_o \quad (\text{Eq. 1})$$

Ψ_t = Sucção Total

Ψ_m = Sucção Matricial

Ψ_o = Sucção Osmótica

Conforme estudos de vários autores, a análise utilizando apenas a sucção matricial é suficiente para determinação do comportamento mecânico dos solos não saturados (MARTINEZ, 2003), embora, existam casos onde a sucção osmótica tem fundamental importância no comportamento mecânico dos solos, como encontrado em Vivian (2008), que utiliza a sucção total em seu estudo. Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), quando se analisa a sucção matricial relacionada à capilaridade, pode-se observar uma maior importância no domínio das baixas sucções, em solos com granulometria maior. Em contra partida, nos domínios dos altos valores de sucção, as forças de adsorção são mais atuantes, onde normalmente se encontra em solos com poros de menor diâmetro.

Segundo Araújo (2017), diversos fatores podem influenciar na sucção do solo, tendo em vista a sua dependência na condição não saturada. Entre eles pôde-se citar a granulometria do solo, a mineralogia, a estrutura do solo, a trajetória de umedecimento/secagem do solo, entre outros.

- Granulometria e mineralogia: Solos com maiores dimensões granulométricas necessitam de baixas sucções para que ocorra a dessaturação do solo, enquanto que, solos mais finos, como argilas, precisam de valores de sucção mais elevados para que a dessaturação aconteça.
- Estrutura do solo: A estrutura do solo está relacionada aos vazios existentes entre suas partículas, logo, a análise de curva de retenção para um mesmo solo compactado e no estado natural será diferente, tendo em vista que a variação da dimensão desses vazios interferirá na sucção do solo (CALLE, 2000)

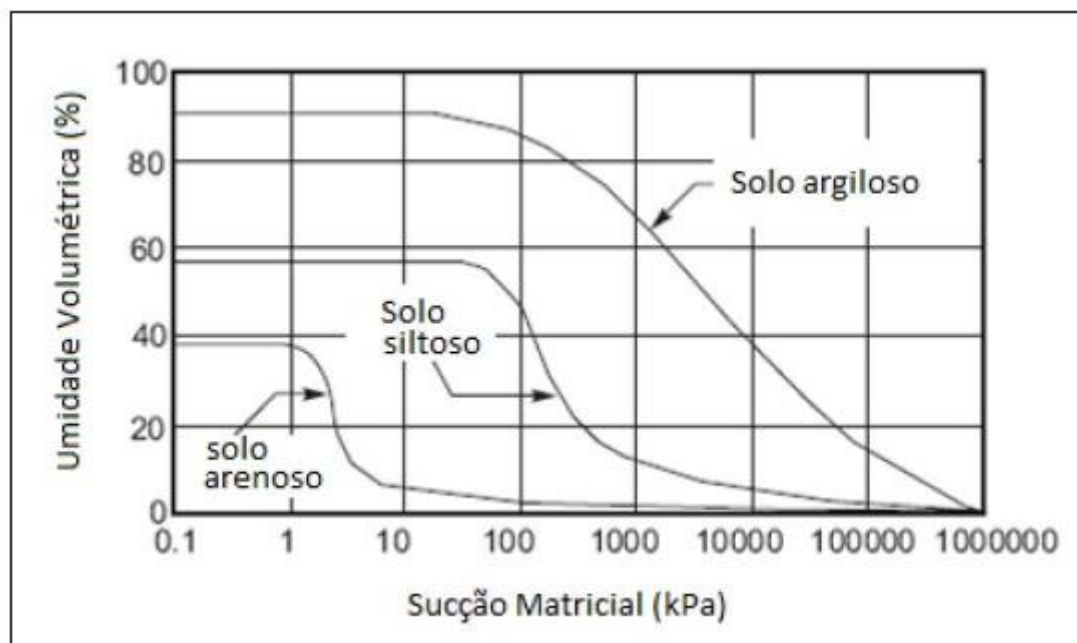
- Trajetória umedecimento/secagem: As trajetórias de umedecimento e secagem provocam as condições de maior estresse no solo, ocasionando expansão durante o umedecimento e de contração durante a dessaturação pelo método de secagem (ARAÚJO, 2017).

3.5 Curva característica

O entendimento conceitual do comportamento dos solos pode ser realizado com a utilização de uma ferramenta chamada de curva característica de sucção ou curva de retenção da água, sendo ela a relação entre a umidade (gravimétrica ou volumétrica) e sucção do solo. Segundo Lopes (2007), à medida que existe uma diminuição do grau de saturação do solo, a distribuição das três fases (sólida, líquida e gasosa) se modifica, juntamente com o estado de tensões do solo.

A configuração da curva de retenção de água depende de três fatores: o tipo do solo, organização do tamanho dos vazios e da distribuição das frações volumétricas. Logo, os solos mais granulares possuem curva característica brusca, tendo em vista a perda de umidade mais rápida, enquanto que solos mais finos possuem curvas mais suaves (Figura 1) (GERSCOVICH, 2001).

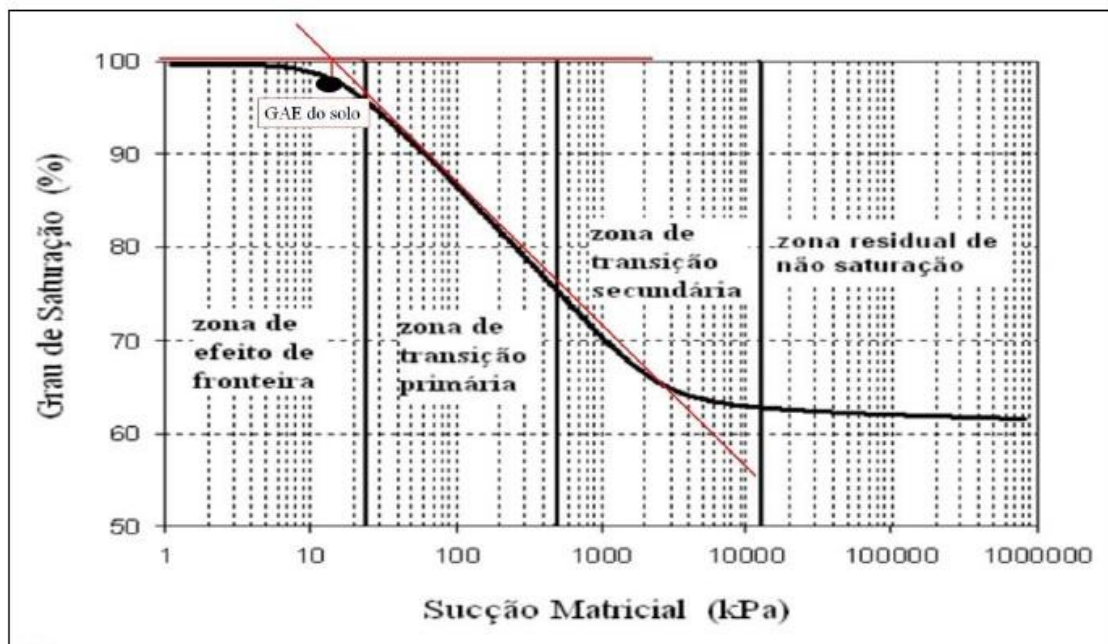
Figura 1 - Curva de retenção por tipo de solo.



Fonte: FREDLUND & XING (1994).

Mendes (2008) afirma que existem quatro estágios de dessaturação ao longo da curva característica, sendo elas o estágio de efeito de fronteira, estágio de transição primário, estágio de transição secundário e estágio residual de não saturação (Figura 2). No estágio de efeito de fronteira, o solo está praticamente em sua saturação máxima, possibilitando uma fase contínua de contato entre os grãos do solo e os meniscos de água, até a sucção atingir o valor de entrada de ar. A dessaturação se inicia no estágio de transição primária e contínua, aumentando os valores de sucção durante o estágio de transição secundária, diminuindo drasticamente os valores de umidade do solo. No último estágio o grau de saturação é muito pequeno, tornando a fase líquida descontínua e a fase gasosa ocupando a maior parte dos poros do solo. Nesse estágio (estágio residual), para que seja possível a retirada de uma quantidade mínima de água, é necessário valores elevados de sucção.

Figura 2 - Zonas da curva de retenção de água no solo.

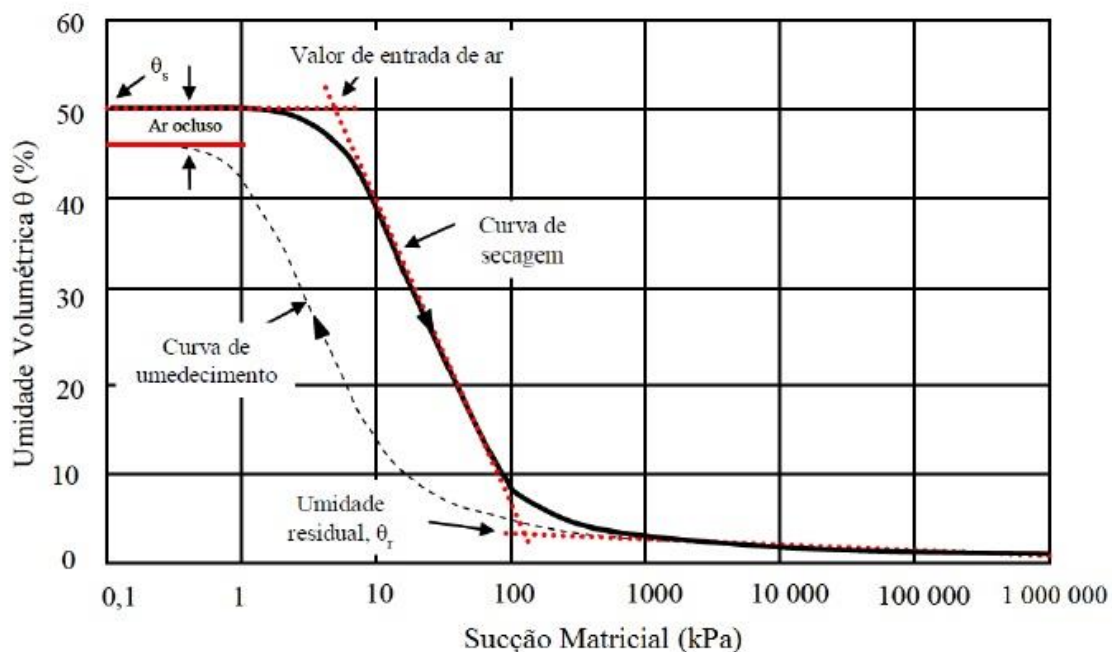


Fonte: Adaptado de Fredlund et al. (1996).

Dois pontos em específicos merecem maior atenção na análise da curva característica (Figura 2), o primeiro referente ao ponto onde ocorrer o início da dessaturação, ou seja, onde se introduz a pressão de entrada de ar, que representa o diferencial de pressões entre água e ar que ocasiona o início da drenagem do maior poro

do solo. O outro indica o início do estágio residual, onde a sucção passa a perder efeito e a remoção adicional de água requer o fluxo de vapor (LOPES, 2007).

Figura 3 – Elementos da curva de retenção.



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing. (1994).

3.5.1 Métodos de medição de sucção

A evolução da análise da sucção motivou diversos autores a estudarem e desenvolverem métodos melhorados para medição da sucção (Tabela 1). Esses métodos variam tanto para análises *in situ*, como para análises laboratoriais, tendo como prioridade a determinação da sucção total e matricial. As diversas ferramentas utilizadas para a medição da sucção variam quanto a sua interação com o solo, ou seja, direta ou indiretamente.

Segundo Araújo (2017), os métodos diretos medem a energia da água dos poros, como por exemplo o método utilizando o tensiômetro, enquanto que os indiretos, que tem como destaque o método do papel filtro, ocorre quando se obtém um parâmetro a ser correlacionado com a sucção do solo através de uma calibração.

A escolha do método a ser utilizado na medição de sucção depende do tipo de sucção a ser medida. Associa-se, para cada valor de sucção medido, uma umidade (gravimétrica ou volumétrica), um grau de saturação e/ou índice de vazios (STUERMER, 1998).

Tabela 1 – Técnicas de medição de sucção.

Técnica	Sucção Mátrica	Sucção Osmótica	Sucção Total	Intervalo (kPa)
Psicrômetro		x	x	100 - 8000
Papel Filtro	x		x	0 - 29000
Tensiômetro	x		x	0 - 90 0 -> 1000
Translação de eixos	x			0 - 1500
Condutividade térmica	x			0 - 400
Condutividade elétrica	x	x		20 - 1500

Fonte: Marinho (1997).

3.5.2 Método do papel filtro

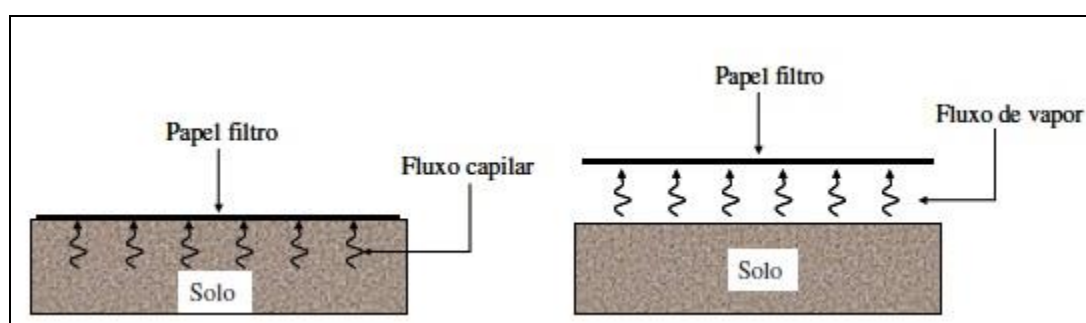
Segundo Camapum de Carvalho et al. (2015), o método do papel filtro é a técnica mais prática e econômica dentre todos os métodos mencionados na literatura para se medir a sucção do solo em uma faixa de sucção entre 10 e 100.000 kPa. Embora seja uma técnica simples de reproduzir, precisa ser executada de forma cautelosa e em perfeita sincronia com o tempo, tendo em vista que os maiores problemas são observados pela aplicação da metodologia pelo usuário, onde muitas vezes são realizadas de forma irregular.

Moncada (2004) afirma que o método do papel filtro se baseia no princípio de que um material poroso que possua a capacidade de absorver água, quando colocado em contato com o solo, direto ou indiretamente, em um ambiente fechado, irá sorver essa água até que o equilíbrio de sucção seja alcançado.

Na utilização do método do papel filtro, para obtenção do potencial matricial, é necessário que o contato entre a o material poroso (papel filtro) e o solo seja direto, em razão de que o fluxo ocorra por capilaridade, pois apenas tensões capilares são vencidas nesse processo. Em contra partida, para a medição do potencial total, o fluxo deve ocorrer em forma de vapor, sem contato direto entre o solo e o material poroso, já que são vencidas forças osmóticas e capilares, que retêm a molécula de água (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015).

Figura 4 – Técnica do papel filtro.

(a) Sucção Matricial; (b) Sucção Total



Fonte: Vivian (2008).

Os dois tipos de papel filtro mais utilizados nesse tipo de ensaio são o Whatman nº 42 e o Schleicher e Schuell nº 589. Estes precisam ser calibrados, permitindo que o papel atinja o estado de equilíbrio com uma sucção conhecida (MONCADA, 2004). Existem diversas maneiras para realizar a calibração do papel filtro (Tabela 2), como por exemplo através da placa de sucção, utilizando amostras de campo, amostras endométricas, placas de pressão e dessecador (MARINHO, 1997; ARAUJO, 2017).

Tabela 2 – Equações de calibração para o papel filtro Whatman N°42.

Referência	Sucção	Intervalo do teor de umidade gravimétrica do papel filtro (%)	Log_{10} (sucção) (kPa)
Fawcett e Collis - George (1967)	N/A	$w < 45,3$	$5,327-0,0779 w$
Hamblin (1986)	N/A	N/A	$6,281-0,0822 w$
Chandler e Gutierrez (1986)	N/A	N/A	$5,85-0,0622 w$
Chandler et al. (1992)b	N/A	$w \leq 47$	$4,84-0,0622 w$
	N/A	$w \geq 47$	$6,05-2,48\log(w)$
Crilly e Chandler (1993)	N/A	$15 \leq w \leq 47$	$4,84-0,0622 w$
	N/A	> 47	$6,05-2,48\log(w)$
Leong et al. (2002)	Matricial	< 47	$4,945-0,0673 w$
	Matricial	≥ 47	$2,909-0,0229 w$
Leong et al. (2002)	Total	< 26	$5,31-0,0879 w$
	Total	≥ 26	$8,779-0,222 w$
ASTM D5298 - 03	N/A	$< 45,3$	$5,327-0,0779 w$
	N/A	$>45,3$	$2,412-0,0135 w$

*N/A: não foi definido na publicação da equação de calibração

Fonte: Cupertino (2013).

3.5.3 Ajuste da curva de retenção de água

Segundo Camapum de Carvalho (2015), existem diversas equações empíricas capazes de representar a curva de retenção de água, tendo como primeiros pesquisadores de uma equação Brooks and Crony (1964), que tinham a pretensão o ajuste da curva de retenção até o valor de umidade residual.

$$\theta_n = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (\text{Eq. 2})$$

θ_n = Umidade normalizada

θ_{sat} = Umidade volumétrica do material saturado

θ_{res} = Umidade volumétrica residual

θ_n = Umidade volumétrica

Tomando como base essa mesma análise, outros autores propuseram equações para simular a curva característica de sucção (Quadro 1).

Quadro 1 – Equações de ajuste para a curva de retenção.

Autor	Equação	Parâmetros
Gardner (1956)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{(1 + \alpha\psi^n)}$	α, n
Brutsaert (1967)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]}$	α, n
Van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{(1 + \alpha\psi^n)^m}$	α, m, n
McKee & Bumb (1987)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{\left(1 + \text{Exp}\left(\frac{\alpha - \psi}{n}\right)\right)}$	α, n
Fredlund & Xing (1994)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]\right\}^m}$	α, n, m
Gitirana Jr. & Fredlund (2004)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{\left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_b \psi_{Res}}}\right)^d}$	d

Onde: α, n, m e d , são específicos para cada tipo de solo e encontrados por processos numéricos iterativos

Fonte: Araújo (2017)

Segundo Araújo (2017), para se analisar e avaliar a melhor curva de ajuste de retenção de um tipo de solo, é necessário a determinação de uma equação de ajuste que melhor se enquadre para uso prático. Para possibilitar este estudo e a devida análise ideal para a curva de retenção do solo, esta pesquisa adotou o coeficiente de determinação do modelo (R^2), a Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR), e o Critério de Informação de Akaike (ARAÚJO E NETO 2016; FARIAS, 2014; AKAIKE, 1973).

- Coeficiente de determinação (R^2): O coeficiente de determinação mede o quanto a variável dependente pode ser explicada pela equação de regressão (Equação 1). O R^2 pode assumir valores entre 0 e 1, onde os valores próximos a 1 são representativos, próximos dos valores observados, enquanto que valores próximos a 0 implicam que o modelo não consegue explicar a relação entre as variáveis.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_E - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_O - \bar{X})} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

R^2 = Coeficiente de determinação

n = Número de variáveis

X_E = Variáveis estimadas

X_O = Variáveis observadas

\bar{X} = Média das variáveis

- Soma do quadrado dos resíduos (SQR): O SQR também possui capacidade de determinação do melhor modelo indicado, observando os erros de aproximação associados para cada elemento da amostra (Equação 2). Quanto menor o SQR, melhor a relação entre as variáveis estimadas e a variável resposta (ARAÚJO NETO, 2016; ARAÚJO, 2017).

$$SQR = \sum_{i=1}^n (X_E - X_O)^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

SQR = Soma dos quadrados dos resíduos

n = Número de variáveis

X_E = Variáveis estimadas

X_O = Variáveis observadas

- Critério de informação de Akaike (AIC): O critério de informação Akaike utiliza como critério de determinação a qualidade entre as variáveis e a

quantidade que são utilizadas no modelo, selecionando o melhor modelo de ajuste para a curva de retenção, quanto menor valor de AIC, mais adequado será o modelo (Equação 3) (ARAÚJO, 2017; FARIAS, 2014).

$$AIC = n \times Ln \left(\frac{SQR}{n} \right) + 2k \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

AIC= Critério de Informação de Akaike

SQR= Soma dos Quadrados dos Resíduos

n= Número de observações (quantidade de pontos sucção/umidade utilizados pelo programa)

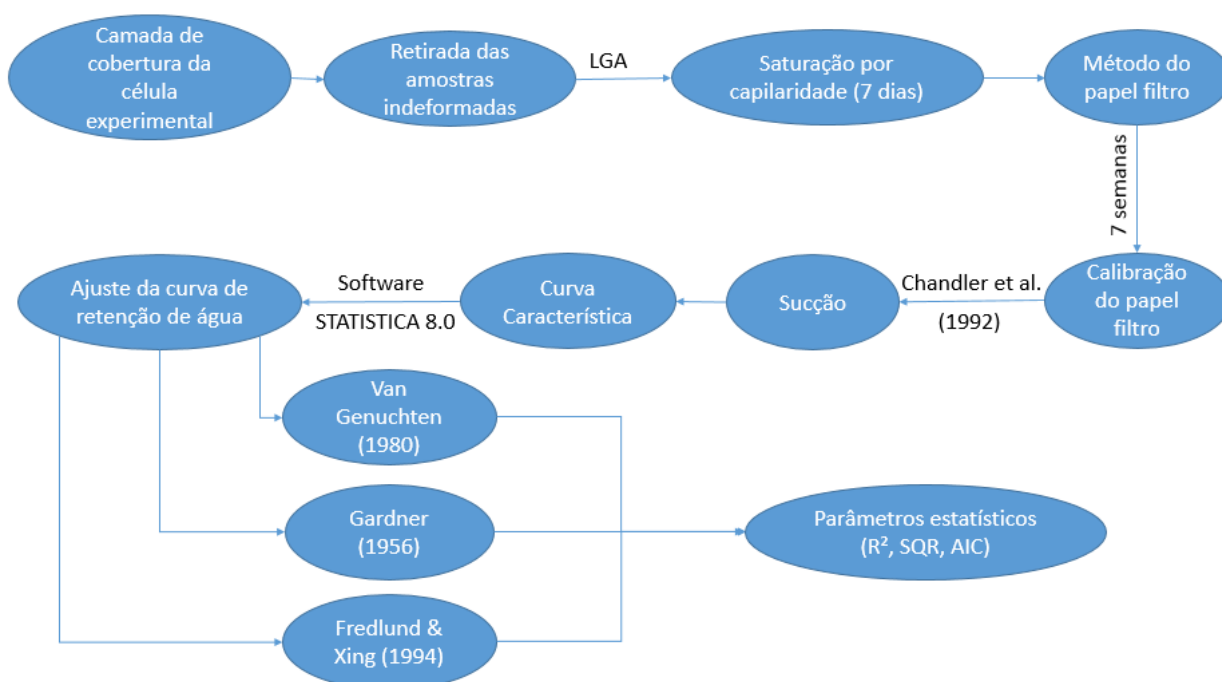
k= Número de parâmetros de ajustes utilizado na equação do modelo (α , m e n)

As informações e parâmetros necessários para a escolha adequada da equação mais representativa para o solo, Coeficiente de Determinação (R^2), Soma dos Quadrados dos resíduos (SQR) e o Critério de Informação de Akaike (AIC), são obtidos com a utilização de Software estatísticos.

4. METODOLOGIA

A presente metodologia pretende descrever a preparação e execução do ensaio do papel filtro realizado para a determinação da relação sucção umidade do solo da camada de cobertura compactada de uma célula experimental, bem como ajustar os dados obtidos a partir de análise estatística, reproduzindo a curva de retenção de água do solo estudado (Figura 5).

Figura 5 – Fluxograma da Metodologia



4.1 Característica dos solos

4.1.1 Solo da camada de cobertura da célula experimental

O solo de Boa Vista – PB, utilizado na camada de cobertura da célula experimental, foi caracterizado anteriormente por Araújo et al, (2014), e por Farias & Monteiro (2011). Os resultados dos ensaios estão representados pelo Quadro 2 e pela Tabela 3.

Quadro 2: Parâmetros geotécnicos (Solo da camada de cobertura da célula experimental)

SOLO	Teor de umidade (%)	Peso Específico	LL	LP	IP	Umid. Ótima	Permeabilidade	Classificação
		(kN/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(m/s)	Unificado
Boa Vista	4,2	20,0	23,0	16,0	7,0	11	5,97x10 ⁻⁸	CL

Fonte: Araújo et al. (2014)

Tabela 3: Resumo da granulometria (Solo da camada de cobertura da célula experimental).

Solo	% Retida na peneira
Pedregulho (acima de 4,8 mm)	0,05
Areia Grossa (0,84 – 4,8 mm)	2,28
Areia Média (0,25 – 0,84 mm)	16,22
Areia Fina (0,05 – 0,25 mm)	39,25
Silte + Argila (< 0,05 mm)	42,20
TOTAL	100,00

Fonte: Farias & Monteiro (2011)

Araújo & Monteiro (2012), a partir dos dados obtidos (Quadro), perceberam que o solo de Boa Vista – PB atendia as necessidade de impermeabilização para aterros, apresentando classificação unificada CL, que caracteriza um uma argila inorgânica de mediana plasticidade. Outra constatação importante realizada por esses autores foi a determinação da permeabilidade à água do solo estudado, que foi $K = 5,97 \times 10^{-8}$ m/s, sendo considerada baixa e se enquadrando no intervalo para a utilização do solo para camada de cobertura em aterros, segundo a NBR 13896 (ABNT,1997).

4.1.2 Solo da camada de cobertura do aterro sanitário

Araújo (2017), analisando os dados encontrados para o solo da camada de cobertura do aterro, este proveniente do leito de um reservatório vazio próximo a região , pode obter parâmetros que também se apresentam adequados para compor a camada de cobertura de um aterro (Quadro 3 e Tabela 4), como por exemplo um coeficiente de permeabilidade a água de valor $K = 2,77 \times 10^{-8}$ m/s, e uma classificação do solo tipo CL.

Quadro 3: Parâmetros geotécnicos. (Solo da camada de cobertura do aterro sanitário)

SOLO	Teor de umidade (%)	Peso Específico	LL	LP	IP	Umid. Ótima	Permeabilidade (m/s)	Classificação
		(kN/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)		Unificado
Camada de cobertura do aterro sanitário	Entre 3 e 6%	24,97	33	24	8	20,25	2,77x10 ⁻⁸	CL

Fonte: Adaptado Araújo (2017)

Tabela 4: Resumo da granulometria. (Solo da camada de cobertura do aterro sanitário)

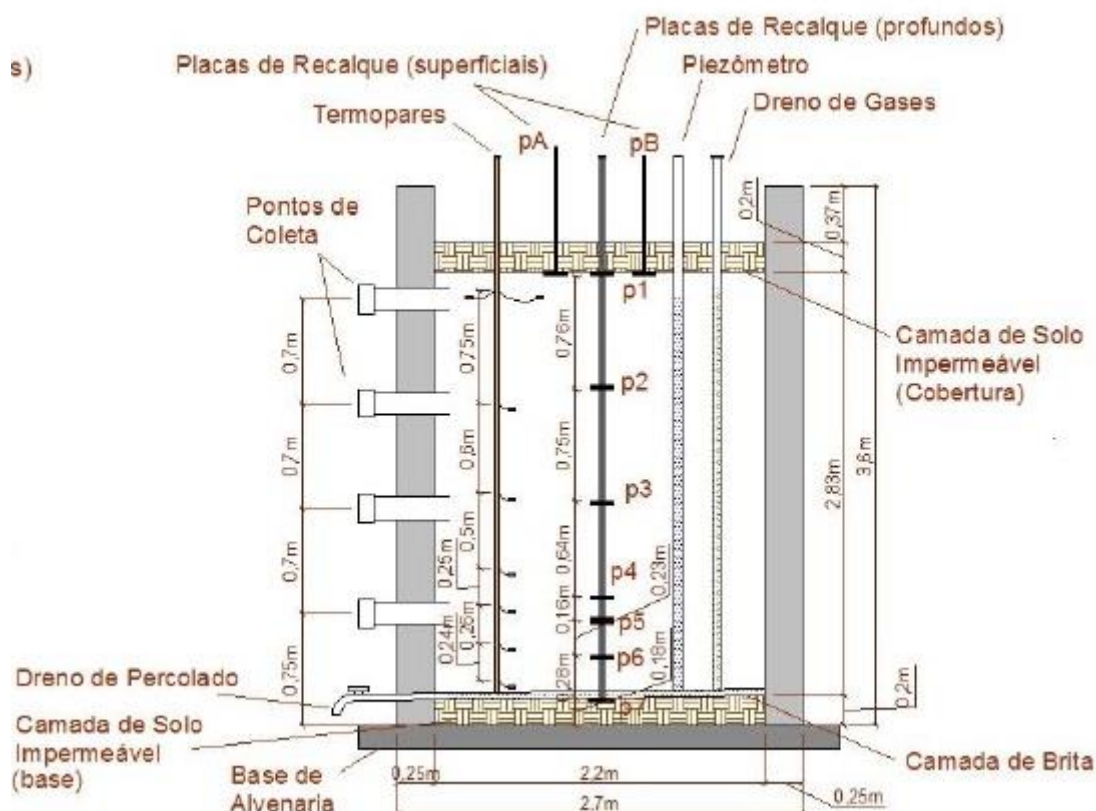
Solo	% Retida na peneira
Pedregulho (acima de 4,8 mm)	0,12
Areia Grossa (0,84 – 4,8 mm)	1,99
Areia Média (0,25 – 0,84 mm)	7,60
Areia Fina (0,05 – 0,25 mm)	37,60
Silte + Argila (< 0,05 mm)	52,69
TOTAL	100,00

Fonte: Adaptado Araújo (2017)

4.2 Etapas Executadas

O objeto de estudo, ou seja, a célula experimental, possui 3,5 metros de altura, 2,0 metros de diâmetro, totalizando 11 metros cúbicos de volume. Sua construção foi realizada utilizando alvenaria de tijolos manuais (Figura 6).

Figura 6 – Esquema da célula experimental



Fonte: Neto, 2012

Logo após a construção da célula experimental, a camada de base de solo foi compactada e em seguida a instrumentação da célula foi instalada. Foram utilizados medidores de temperatura (termopares), que verificaram as alterações de temperatura no interior da célula experimental, placas magnéticas, que permitiram o monitoramento dos recalques em profundidade e em superfície com o passar do tempo, tubos de drenagem para a realização de coletas, piezômetros para análise da altura líquida interna e para a medição do nível de líquidos ao longo da célula experimental, e as aberturas laterais, que são utilizados para coleta de amostras sólidas.

Após o processo de instrumentação, a célula foi preenchida com uma amostra de RSU representativa da cidade de Campina Grande – PB e impermeabilizada superficialmente utilizando uma camada de cobertura de solo compactado, solo este proveniente de uma jazida do município de Boa Vista – PB.

4.3 Etapas da pesquisa

4.3.1 *Retirada da amostra de solo da camada de cobertura da célula experimental*

As duas amostras indeformadas utilizadas para análise foram da camada de cobertura compactada da célula experimental localizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A extração foi realizada através do cravamento de tubos tipo shelby, ambos com diâmetro de 0,07 m e altura de 0,02 m, sendo assim consideradas amostras indeformadas de solo. A coleta realizada baseou-se nas preconizações da NBR 9604 (ABNT, 2016), além da cautela para que não fosse retirado resíduos despejados na célula, como demonstrado na Figura 7.

Figura 7 – Retirada de amostras



4.3.2 *Determinação da sucção*

A determinação da sucção e, conseqüentemente, a obtenção da curva característica foi realizada através do método do papel filtro seguindo as preconizações da D 5298 (ASTM, 2010), utilizando o caminho de secagem devido a melhor trabalhabilidade com as amostras de solo.

4.3.2.1 *Método do papel filtro*

Através do método do papel filtro, foi possível construir a curva de retenção de água no solo analisado, possibilitando a análise gráfica entre a sucção

matricial e a umidade volumétrica e gravimétrica, seguindo os procedimentos já utilizados na literatura por autores como Santos (2015), Araújo (2017) e seguindo rigorosamente os procedimentos descritos pela norma D5298 (ASTM, 2010).

Para a determinação da sucção foi utilizado o papel filtro quantitativo Whatman nº42, com umidade inicial no estado seco ao ar (aproximadamente 6%), que possibilita a obtenção de valores de sucção em um intervalo de zero a 29 MPa (ARAÚJO, 2017). Para a sua calibração, as equações utilizadas foram as propostas por Chandler et al (1992), conforme as Equações 3 e 4.

Umidades do papel filtro $\leq 47\%$:

$$Sucção (kPa) = 10^{4,84 - 0,0622 \times W_{pf}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Umidades do papel filtro $> 47\%$

$$Sucção (kPa) = 10^{6,05 - 2,48 \times \log W_{pf}} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

W_{pf} = umidade do papel filtro

O processo de obtenção dos dados para possibilitar a determinação da curva de retenção durou sete semanas entre as datas 18/05/2017 e 07/07/2017, sendo realizado no Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da UFCG.

Depois da retirada das amostras de solo da célula experimental, tais amostras foram levadas ao laboratório. Uma terceira amostra de solo, sendo essa deformada, foi retirada para a determinação da umidade de moldagem, possibilitando a encontrar o valor do peso seco do solo das amostras.

Os dois anéis, preenchidos respectivamente por solo, foram colocados sobre pedras porosas, juntamente com papéis filtros, dentro de um bandeja com água destilada onde passaram sete dias saturando por capilaridade, (Figura 8). Todos os cuidados necessários foram tomados, para que durante esse processo a água não ultrapassasse a espessura das pedras porosas e entrasse em contato direto com o solo

Figura 8 – Saturação das amostras



Após o processo de saturação, as amostras foram pesadas em uma balança de precisão 0,0001 g, onde obteve-se o peso da amostra saturada e verificado o grau de saturação (S). Dando seguimento ao procedimento de pesagem, foi colocado o papel filtro Whatman nº42 nas amostras. Em uma das faces foi colocado o papel filtro em contato direto com o solo, para a obtenção da sucção matricial e na outra face em contato indireto, separando o solo do papel apenas por uma tela espessa, para a medição da sucção total. Em seguida, após a colocação dos papéis filtros, foram colocadas esponjas para aumentar o contato direto e indireto entre o papel e as amostras. Depois, utilizou papel filme e papel alumínio para envolver as amostras, impedindo qualquer contato com o ambiente, além de dispor as amostras em uma caixa de isopor visando a minimização de interferências externas, como a troca de umidade com o ambiente (Figura 8).

Figura 9 – Embalagem das amostras após a colocação do papel filtro



A partir da determinação da umidade higroscópica, foi possível determinar o peso do solo seco, possibilitando o cálculo da umidade gravimétrica por meio da razão massa de água e massa de solo seco.

Com o valor da umidade de saturação encontrado, foi possível obter os pontos determinantes da curva de retenção. Foi determinado para os anéis 1 e 2 passos de 3% e 2% respectivamente, tendo em vista a melhor manuseio dos dados na curva de retenção.

O repouso das amostras durou sete dias possibilitando o equilíbrio mínimo entre o papel e o solo (MARINHO & OLIVEIRA, 2006). Após a obtenção do equilíbrio, as amostras foram desembrulhadas cuidadosamente, retirando de cada uma das faces os papéis filtros. Estes, foram imediatamente pesados em uma balança de precisão de 0,0001g, determinando o peso úmido do papel e em seguida colocadas diretamente na estufa, onde ficaram confinadas durante 24 horas para determinação da umidade.

Após a retirada dos papéis filtros, as amostras foram deixadas expostas ao ambiente, onde secaram naturalmente até o ponto seguinte, contabilizando as perdas de 3% e 2% (Amostra 1 e 2, respectivamente) de umidade, pesando constantemente o conjunto (anel + solo). Atingindo o ponto de umidade determinado, as amostras foram embaladas novamente repetindo o processo anterior já mencionado.

Utilizando as equações de Chandler et al. (1992), calibrou-se o papel possibilitando a determinação das sucções totais e matriciais e, assim, com os dados obtidos, pôde-se encontrar todos os pontos referentes a curva de retenção de água da camada de cobertura de solo compactado da célula experimental.

4.3.3 *Ajuste da curva experimental*

O ajuste dos dados da curva de retenção do solo da camada de cobertura da célula experimental foi realizado utilizando as equações propostas por Gardner (1956), Van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994), pois as mesmas melhor ajustam a curva de retenção de água para solos brasileiros (Gerscovich & Sayão, 2002).

Para que o ajuste das curvas fosse possível, utilizou-se o Software STATISTICA for Windows 8.0, onde o processo de interação escolhido foi o de Gauss-Newton, adotando um número de interações máximas de 100 e um critério de convergência de 10^{-6} . Vale salientar que a análise foi realizada entendendo as curvas de ajustes dos autores citados como não lineares.

Diante das curvas ajustadas e utilizando os parâmetros Coeficiente de determinação (R^2), Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e o Critério de Informação Akaike (AIC), foi possível a determinação da curva de ajuste que melhor representava o solo analisado.

5. RESULTADOS

5.1 Curva de retenção de água do solo

Nas Figuras 10 e 11 encontram-se dispostas as curvas de retenção de água do solo, por meio da relação entre sucção matricial (ψ) com a umidade volumétrica (θ) e com a umidade gravimétrica do solo, respectivamente.

Figura 10 – Curva Característica Sucção Umidade: Umidade Volumétrica x Sucção Matricial

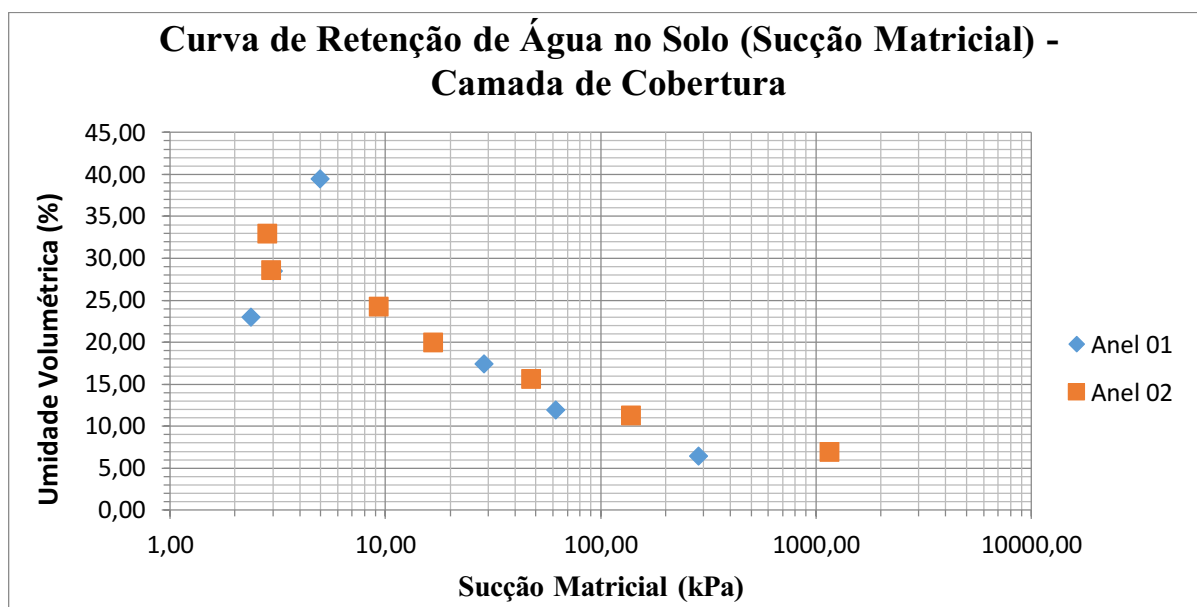
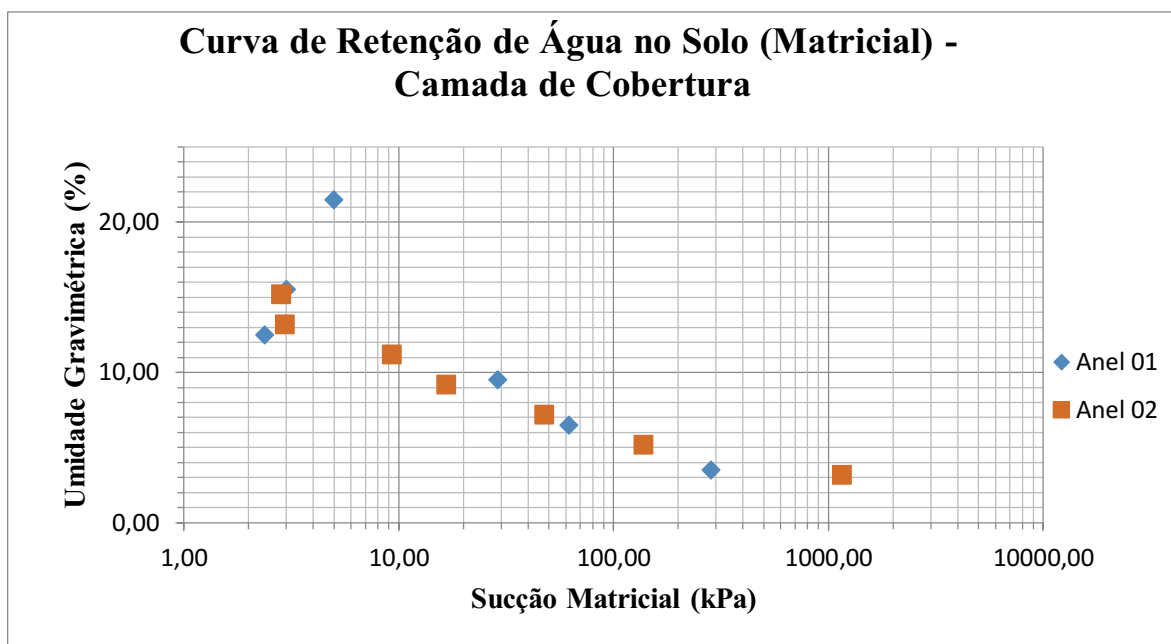


Figura 11 – Curva Característica: Umidade Gravimétrica x Sucção Matricial



Observa-se que os valores de sucção matricial variaram para os solos contidos nos anéis 1 e 2, de 2 kPa a 1500 kPa. Além disso observou-se o valor referente a umidade gravimétrica residual que atingiu valores aproximados a 3,5%, enquanto que para a umidade volumétrica residual, foi observado o valor de 6,5%.

Camapum de Cavalho et al. (2015) afirmam que o maior valor de umidade volumétrica após a saturação se refere a porosidade, que, para o solo estudado, foi de 33%. Araújo (2017), analisando a curva de retenção de água da camada de cobertura do aterro sanitário encontrou uma porosidade igual a 55%, implicando que o solo utilizado na camada de cobertura da célula experimental possui um melhor ajuste de suas partículas em relação ao número de vazios.

A partir da comparação entre o gráfico gerado para a curva de retenção de água do solo da camada de cobertura compactada de uma célula experimental e do gráfico de Fredlund & Xing (1994) para curvas de retenção de água típicas de diferentes texturas de solo, pôde-se analisar que a curva de retenção de água do presente trabalho se enquadra entre as curvas de solos arenosos e siltosos, tendo em vista as variações de umidade para certos níveis de sucção.

Verificou-se que para a umidade volumétrica inicial de 33%, foi necessário uma sucção 2 kPa para retirar a água dos vazios do solo, enquanto que para o valor da umidade volumétrica residual (6,5%), foi necessário, para a retirada dessa umidade, um valor de 1200 kPa, implicando em uma curva variando entre os solos arenosos e siltosos.

Araújo et al. (2014), determinaram o solo da camada de cobertura da célula experimental como sendo do tipo CL (solo argiloso), segundo a classificação Unificada, e obtiveram um valor de permeabilidade a água igual a $K = 5,97 \times 10^{-8}$ m/s, enquanto que, a relação sucção/umidade da curva encontrada nessa pesquisa demonstra o comportamento de uma areia siltosa, tendo em vista o gráfico gerado por Fredlund & Xing (1994) (Figura 1). Essa comparação mostra uma diferença exorbitante na caracterização do solo realizada por Araújo et al. (2014) que mostrou um solo argiloso, com o que a curva de retenção de água da camada de cobertura da célula experimental apresenta, tendo em vista a caracterização de um solo mais granular, devido a sua incapacidade de reter água. Analisando os fatores que propiciaram essa mudança, pode-se citar que a caracterização realizada por Araújo et al. (2014) ocorreu na data da compactação da camada de cobertura da célula experimental, três anos antes do presente trabalho, indicando que, devido a fatores externos, como por exemplo, variações climáticas, fissuras, intemperismo, lixiviação, entre outros, influenciou diretamente na sucção do solo, corroborando na alteração exacerbada da curva de retenção de água do solo da camada de cobertura da célula experimental.

Comparando a curva característica encontrada por Araújo (2017) para o solo da camada de cobertura do aterro sanitário de Campina Grande – PB com a curva encontrada para o solo da camada de cobertura da célula experimental estudada, foi possível observar que, para uma mesma umidade, a curva de retenção de água no solo do aterro necessita de uma sucção bem mais elevada para retirar a água dos vazios do solo. Sendo assim, o solo analisado por Araújo (2017) demonstra capacidade de retenção mais elevada, caracterizando um solo mais adequado para a função de camada de cobertura, tendo em vista a necessidade que essas camadas tem de impedir que as águas da chuva percolem para dentro da Célula.

5.2 Ajuste da curva de retenção de água

A curva para o solo estudado foi ajustada utilizando o Software STATISTICA for Windows 8.0, aplicando os dados obtidos pelo método do papel filtro. A curva de sucção foi gerada em função da umidade volumétrica e ajustada para três equações, sendo elas a de Van Genuchten (1980), Fredlund & Xing (1994) e Gardner (1956), equações que melhor representam os solos brasileiros segundo Gerscovich & Sayão (2002).

Analisando a Tabela 5 com os parâmetros obtidos pôde-se observar que a equação mais adequada no ajuste da curva foi a de Van Genuchten (1980), pois apresentou o coeficiente de determinação mais próximo da unidade e o menor valor do SQR, embora não tenha obtido o AIC mais negativo. Apesar da ordem de análise dos parâmetro encontrados seja AIC, SQR e R^2 , a equação de Van Genuchten (1980) provou ser a mais adequada. A equação de Gardner, mesmo tendo obtido o AIC mais negativo, não obteve valores de R^2 e SQR adequados. A equação de Fredlund & Xing (1994) obteve os piores parâmetros dentre as três equações analisadas, com o valor de AIC menos negativo, menor valor de R^2 e maior SQR.

Tabela 5 – Análise estatística do ajuste da curva

Modelo de ajuste	R^2	SQR	AKAIKE
Van Genuchten (1980)	0,9850	0,001529	-53,0033
Fredlund & Xing (1994)	0,9845	0,001581	-52,7692

Após o ajuste da curva pela equação de Van Genuchten (Figura 12), estimou-se os parâmetros da equação que estão representados na Tabela 6.

Figura 12 – Curva de retenção da água do solo da camada de cobertura de um lisímetro (Van Genuchten, 1980).

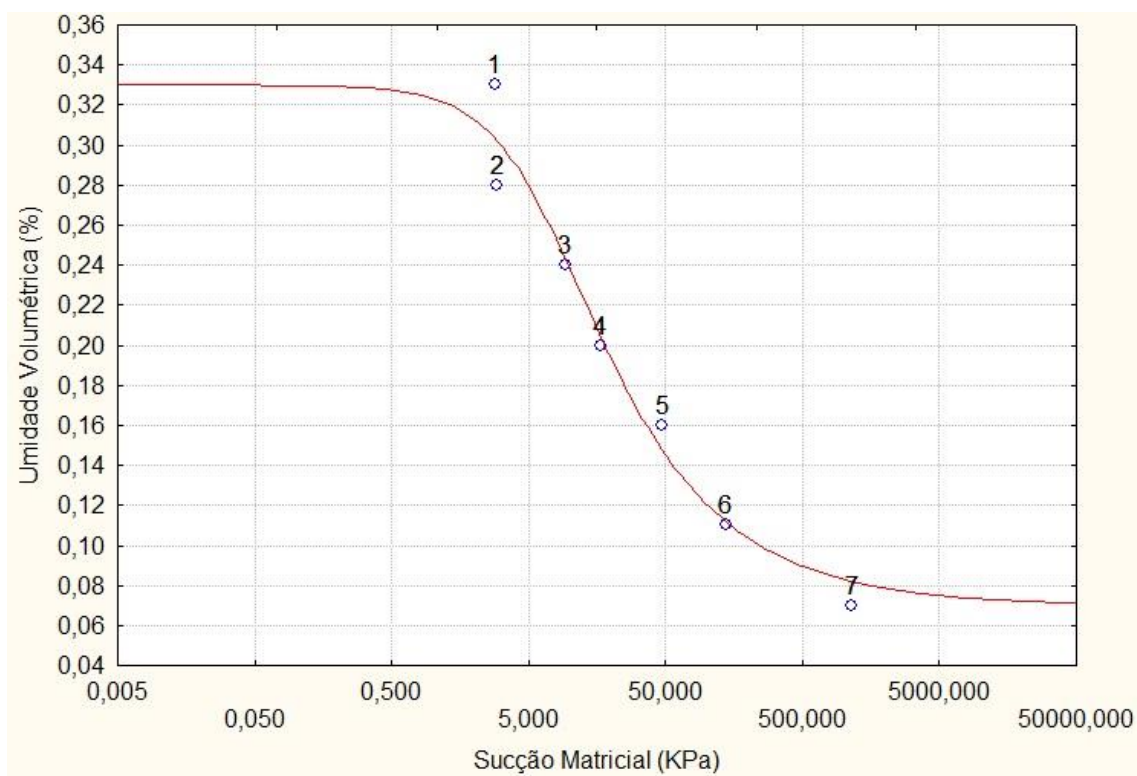


Tabela 6 – Análise estatística do ajuste da curva

Parâmetros	Valor estimado	Equação
α (kPa)	0,155576	$\theta = 0,07 + \frac{0,26}{(1 + 0,155576\psi^{1,457116})^{0,407074}}$
n	1,457116	
m	0,407074	

Os valores de entrada da equação são a sucção matricial (ψ_m), obtendo como resposta a umidade volumétrica para cada ponto. Pôde-se verificar o valor que representa a amplitude entre a umidade volumétrica inicial (θ) ou de saturação (S) e a umidade volumétrica residual (θ_{res}), encontrando o seguinte valor de 26%.

6. CONCLUSÕES

- O modelo matemático proposto por Van Genuchten se mostrou o mais adequado para explicar o comportamento dos pontos experimentais obtidos no ensaio pelo método do papel filtro.
- A partir da comparação entre a curva de retenção de água do solo compactado da camada de cobertura de uma célula experimental e as curvas de retenção de água típicas de diferentes texturas de solos gerado por Fredlund & Xing, verificou-se que o solo da camada de cobertura, devido a sua baixa capacidade de retenção de água, possui características de um solo silte arenoso, variando do encontrado por meio da caracterização realizada por Araújo et al, que determinou um solo tipo CL (argiloso), implicando que diversos fatores influenciaram na alteração das características da curva de retenção de água do solo da camada de cobertura da célula experimental, como temperatura, trajetórias de umedecimento/secagem, fissurações, entre outros.
- Comparando as curvas de retenção de água do solo da camada de cobertura compactada da célula experimental e do solo do aterro sanitário, foi possível observar que o solo utilizado no aterro tem uma melhor capacidade de retenção, sendo mais qualificado para a utilização em uma camada de cobertura de aterro.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – NBR 13896 (1997). **Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.**

ABNT – NBR 6457 (1986). **Amostras de solos: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.**

ABNT - NBR 9604 (2016). **Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – procedimento.** Rio de Janeiro, 2016. 9p.

ABNT - NBR 15849 (2010). **Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.** Rio de Janeiro, 2010. 24p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. D5298-10: **Standard test method for measurement** 2010. 6p.

AKAIKE, H. **Maximum likelihood identification of Gaussian autoregressive moving average models.** Biometrika, v.60, n.2, p.255-265, 1973.

ARAÚJO NETO, C. L. **Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários.** 2016. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2016.

ARAUJO, P. DA S.; **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário.** 2017. 138 f. DISSERTAÇÃO - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, PARAIBA, 2017.

ARAUJO, P. S.; MONTEIRO, V. E. D. . **Estudo de parâmetros geotécnicos: estruturação de banco de dados a partir de caracterização geotécnica aplicada a aterros sanitários.**In: IX Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2012, Campina Grande. Pesquisa e Inovação: Ideias Sustentáveis, 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 2 de Agosto de 2010.

BROOKS, R.H. & COREY, A.T. (1964). **Hydraulic properties of porous media,** Colorado State University Hydrology Paper, (3): 8-37.

CALLE, J. A. C. **Análise de ruptura de talude em solo não saturado.** 2000. 177f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2000.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (Org.). **Solos não saturados no**

contexto geotécnico. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759p.

CHANDLER, R. J.; CRILLEY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. **A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings.** In: **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering.** Thomas Telford-ICE Virtual Library, p.82-89, 1992.

CUPERTINO, K. F. **Análise de curvas de calibração utilizadas no método do papel filtro para estimar a sucção matricial em solos não saturados.** 2013.102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2013.

FARIAS, R. M. S. **Estudo dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem experimental e estatística.** 2014. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2014.

FARIAS, R. M. de S.; MONTEIRO, V. D. E. . **Estudo para estimativa da geração de biogás com base em parâmetros físico-químicos.** In: Encontro Unificado de Iniciação Científica e Extensão (VIII Congresso de Iniciação Científica da UFCG e VI Encontro de Extensão Universitária da UFCG) UFCG - Campus de Campina Grande, 2011, Campina Grande. Pesquisa, Extensão e Inovação: Ações que Transportam o pensamento, 2011.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. **Stress state variables for unsaturated soils.** Journal of The Geotechnical Engineering Division, v.103, n.5, p.447-465, 1977.

FREDLUND, D. G., RAHARDJO H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils.** John Wiley e Sons, USA, 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; FREDLUND, M. D.; BARBOUR, S. L. **The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve.** Canadian Geotechnical Journal, v. 33, n.3, p.440-448, 1996.

FREDLUND, D. G.; XING, A. **Equations for the soil water characteristic curve.** Canadian Geotechnical Journal, v.31, n.4, p.521-532, 1994.

GARDNER, W.R. **Representation of soil aggregate size distribution by a logarithmicnormal distribution.** Soil Science Society of America Proceedings, v.20, n.2, p.151-153, 1956.

GERSCOVICH, D. M. S. (2001). **Equações para Modelagem da Curva Característica Aplicadas a Solos Brasileiros.** IV Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre, RS, p. 76-92.

GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J. **Evaluation of the soil-water characteristic curves equations for soils from Brazil.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3., 2002, Recife-PE. **Proceedings...**Recife: v.1, p.293-300, 2002.

JESSBERGER, H., e STONE, K. (1991) **Subsidence Effects on Clay Barriers**. *Geotechnique*, 41(2), 185 – 194.

LAMBE, T. W.; WITHMAN, R. V. **Soil mechanics, SI version**. John Willey & Sons, New York, USA, 1969.

LOPES, M. B. L. **Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG**, Rio de Janeiro – RJ, 2007. P. 29 - 39.

MARIANO, M. O. H. (2008). **Avaliação da Retenção de Gases em Camadas de Cobertra de Aterros de Resíduos Sólidos**. Recife, PE.

MARINHO, F. A. M. **Medição de sucção em solos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3., 1997, Rio de Janeiro-RJ. Anais...Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, v.2, p.373-397, 1997.

MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M. **The filter paper method revisited**. 2006. *Geotechnical Testing Journal*, USA, v. 29, n. 3, p. 250-258, 2006.

MARTÍNEZ, G. S. S. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras**. 2003. 291f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2003.

MENDES, R. M.; **Estudo das propriedades geotécnicas dos solos residuais não saturados de Ubatuba (SP)**. 2008. 256F. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2008.

MONCADA, P. H. M.; **Estudo em laboratório de características de colapso e transporte de solutos associados a infiltração de licos cáustico em um solo laterítico**. 2004, 218f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Técnico Científico da PUC - Rio, Rio de Janeiro, 2004

MONTEIRO, V. E. D., MELO, M. C. de., ALCÂNTARA, P. B. de., ARAÚJO, J. M. de., ALVES, I. R. de. F. S., JUCÁ, T. F. J. **Estudo do Comportamento de RSU em uma Célula Experimental e suas Correlações com Aspectos Microbiológicos, Físicos e Químicos**. *Engenharia Sanitária Ambiental*, Vol. 11 – Nº3 – Jul/Set 2006, 223-230.

PRESA, E. P.; CAMPOS, L. E. P.; FONSECA, C. E. 1991. **Metodologias Empregadas no Estudo do Comportamento Geotécnico de Solos Não-Saturados**. Seminário sobre solos não saturados, Brasília – DF. P. 26-27.

NETO, J. M. V.; **Estudo do comportamento de metais em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos na cidade de Campina Grande - PB**. 2012 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2012.

SANTOS, T. F. L.; **Estudo experimental da camada de coberutra do aterro Morro do Céus, Niterói - RJ**. 2009. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - RJ, 2009.

SIMON, F. G, MULLER W. W. (2004). **Standard and alternative landfill capping design in Germany.** *Environment, Science and Policy*. Vol – 7, P. 277 – 290.

STUEMER, M. M.; **Estudo da capacidade de retenção de água de um solo de água em um solo residual compactado.**1998, 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 1998.

VAN GENUCHTEN, M. T. A **closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** *Soil Science Society of America Journal*, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VIVIAN, J. B.; **Utilização do método do papel filtro para a determinação das curvas características de um solo coluvionar não saturado contaminado com óleo diesel.** 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre - RS, 2008.