

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE BENTONITA EM UM SOLO ARENO-
SILTOSO PARA USO COMO COBERTURA DE ATERROS

Katia Huse

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Cláudio Fernando Mahler, D. Sc., LD.

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

Prof. Mauricio Erhlich, D.Sc.

Prof. Luiz Antonio Bressani, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2007

HUSE, KATIA

Estudo da Influência da Adição de Bentonita
em um Solo Areno-Siltoso para Uso como
Cobertura de Aterros [Rio de Janeiro] 2007

XII, 126 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Civil, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Aterro de Resíduos Sólidos
2. Camada de Cobertura de Aterros
3. Bentonita

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, por me ensinarem e me ajudarem a caminhar.

Aos professores Cláudio Mahler e Otto Rotunno, pela orientação dada durante o desenvolvimento deste trabalho.

Obrigada a Geo-família por me receber de braços abertos e estar sempre disposta a me ajudar. Agradecimento especial a Sérgio Iório pelo carinho e pela dedicação, além de nunca desanimar, mesmo quando eu mesma não sabia mais como seguir.

Aos Geo-amigos, em especial Ronaldo Izzo, pelo apoio e estímulo e Vinícius Guedes, sempre contando uma novidade e me fazendo rir.

Ao Quarteto Fantástico, pelas horas de descontração no meio de tanta cansaça e tanto desespero. Sempre lembrarei desses momentos.

Obrigada aos amigos e professores que me ajudaram por todos esses anos.

À Bentonit União Nordeste S.A. e à S.A. Paulista.

Ao CNPq e à Fundação Coppetec pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE BENTONITA EM UM SOLO ARENO-SILTOSO PARA USO COMO COBERTURA DE ATERROS

Katia Huse

Dezembro/2007

Orientadores: Cláudio Fernando Mahler
Otto Corrêa Rotunno Filho

Programa: Engenharia Civil

A contaminação do solo e da água pode ser minimizada ou evitada através de um sistema de cobertura e de base impermeável em aterros sanitários. A camada de cobertura, ao ser impermeável, impede a penetração de precipitação de chuva, que leva a diminuição do volume de chorume ou lixiviado coletado e de gás produzido no aterro sanitário. Este estudo apresenta resultados de análises realizadas no solo usado como camada de cobertura no aterro de Nova Iguaçu, RJ, Brasil, considerando o uso de bentonita sódica adicionada ao solo. Em termos metodológicos, realizaram-se, inicialmente, ensaios de condutividade hidráulica visando identificar o adequado percentual de bentonita a ser adicionada ao solo que compõe o aterro estudado. Na seqüência, concebeu-se o desenvolvimento de um novo equipamento que permitisse a medição integrada de variação volumétrica, umidade, sucção e temperatura do solo. Cumpridas essas etapas, foi possível analisar a influência da adição de bentonita ao solo estudado.

Os resultados indicaram as vantagens da adição de bentonita sódica em pequenas proporções e as qualidades do equipamento desenvolvido.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE ADDITION OF BENTONITE TO A SANDY-SILTE SOIL USED AS LANDFILL COVER

Katia Huse

December/2007

Advisors: Cláudio Fernando Mahler
Otto Corrêa Rotunno Filho

Department: Civil Engineering

Soil and water contamination can be minimized or avoided by means of a waterproof system at the bottom and at the top of a landfill. The waterproof cover system prevents the penetration of rainwater, which leads to a decrease in the leachate collected and gas volume produced in the landfill. This work analyses the top layer used in the landfill of Nova Iguaçu, RJ, Brazil, considering the use of sodic bentonite in the mixture with the soil. The methodology consisted first of analysing the permeability aiming for identifying the adequate percentage of bentonite to be added to the soil that composes the studied cover. The next step was to conceive the development of a new equipment so that it allowed the integrated measurement of soil characteristics such as volumetric variation, humidity, suction and temperature. Finally, it was possible to analyze the influence of the addition of bentonite to the studied soil.

The results showed the benefits of the addition of sodic bentonite in small proportions and the quality of the equipment developed.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO:	1
1.1 Objetivo e Organização do Trabalho:	5
2. CAMADA DE COBERTURA.....	8
2.1 Componentes da Camada de Cobertura	8
2.2 Uso de Solo na Camada de Cobertura.....	10
2.3 Importância da Camada de Cobertura.....	11
2.4 Problemas dos Sistemas de Camadas de Cobertura	11
2.5 Alguns Tipos de Sistema de Camada de Cobertura	12
2.5.1 Sistema Convencional	12
2.5.2 Barreiras Capilares	13
2.5.3 Coberturas Evapotranspirativas.....	14
2.6 Algumas Normas.....	15
2.6.1 Norma Brasileira	15
2.6.2 Norma dos EUA.....	16
2.6.3 Norma Alemã.....	21
3. ÁGUA NO SOLO	24
3.1 Fases Constituintes do Solo Não Saturado.....	24
3.2 Sucção	25
3.2.1 Componentes da Sucção.....	26
3.3 Curva de Retenção de Água no Solo.....	27
3.3.1 Fatores que Afetam a Curva de Retenção	30
3.3.2 Modelagem da Curva Característica	32
3.4 Trincas no Solo.....	36
3.5 Balanço Hídrico.....	38
3.5.1 Infiltração de Água no Solo	40
3.5.2 Lixiviado	40
3.5.3 Importância e Problemas.....	41

3.5.4 Fatores que Afetam o Balanço Hídrico	42
3.5.5 Tipos de Modelos	43
4. ADIÇÃO DE BENTONITA AO SOLO UTILIZADO COMO CAMADA DE COBERTURA	46
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
5.1 Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Nova Iguaçu	57
5.1.1 A CTR Nova Iguaçu.....	57
5.1.2 Solo da CTR Nova Iguaçu	59
5.1.3 Características dos Resíduos da CTR Nova Iguaçu.....	64
5.2 Bentonita	67
5.3 Metodologia	68
5.4 Equipamentos Utilizados.....	73
5.4.1 Geotermômetro.....	73
5.4.2 Tensiômetro.....	74
5.4.3 Sistema de Aquisição de Dados	76
5.4.4 Balança.....	77
5.5 Ensaio de Ressecamento Livre.....	78
5.5.1 Preparação e Montagem do Ensaio	79
5.6 Recomendações	85
6. RESULTADOS.....	87
6.1 Ensaio de Ressecamento Livre.....	87
6.1.1 Sucção	87
6.1.2 Umidade Versus Variação Volumétrica.....	92
6.1.3 Temperatura	100
6.1.4 Ressecamento ao Ar.....	100
6.2 Curva Característica	102
6.2.1 Tamanho Proctor	102
6.2.2 Tamanho CBR.....	103
6.2.3 Aplicação do Modelo de Van Genuchten	104
6.3 Discussões	109
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	111

7.1 Conclusões	111
7.2 Recomendações	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXO A.....	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do sistema convencional de cobertura	12
Figura 2: Esquema de barreiras capilares.....	13
Figura 3: Esquema de cobertura evapotranspirativa	14
Figura 4: Componentes de um possível sistema de cobertura final em aterro sanitário ...	16
Figura 5: Sistema de cobertura final para camada dupla ou camada composta	19
Figura 6: Sistema de cobertura final para camada simples de argila –	19
Figura 7: Sistema de cobertura final para camada simples de argila em	20
Figura 8: Sistema de cobertura final para camada simples sintética –.....	20
Figura 9: Sistema de cobertura final para cobertura natural –	21
Figura 10: Esquema para sistema de cobertura de acordo com norma alemã.....	22
Figura 11: Elemento de solo não saturado com fase contínua de ar –	25
Figura 12: Característica da curva de retenção	29
Figura 13: Representação esquemática das curvas de retenção para diferentes tipos de solo	30
Figura 14: Representação do comportamento do solo durante ciclos de secamento e umedecimento	37
Figura 15: Esquema do balanço hídrico em um aterro.....	39
Figura 16: Curva de trincamento do solo e pontos de transição, de acordo com o modelo exponencial de trincamento.....	50
Figura 17: Mapa de localização de Nova Iguaçu e da CTR Nova Iguaçu	57
Figura 18: Aterro CTR Nova Iguaçu.....	58
Figura 19: Vista construção CTR Nova Iguaçu	59
Figura 20: Curva granulométrica do solo da CTR – Nova Iguaçu.....	60
Figura 21: Gráfico de compactação do tipo Proctor normal para o solo SA Paulista.....	61
Figura 22: Curvas de retenção de água no solo.....	63
Figura 23: Determinação do peso específico dos resíduos pelo método da cava –	64
Figura 24: Curva granulométrica do Permagel	67
Figura 25: Condutividade Hidráulica versus % de bentonita.....	69
Figura 26: Comparação da granulometria do solo SA Paulista e SA Paulista 5%.....	70

Figura 27: Gráfico de compactação do tipo Proctor normal para o solo SA Paulista 5%	71
Figura 28: Desenho esquemático do aparelho desenvolvido para o ensaio de ressecamento livre.....	72
Figura 29: (a)Copo em acrílico e (b)base metálica	73
Figura 30: Geotermômetro	74
Figura 31: Transdutor de pressão	75
Figura 32: Copo de acrílico com pedra porosa	76
Figura 33: Dispositivo armazenador de dados - modelo Agilent.....	77
Figura 34: Balança	78
Figura 35: (a)Conjunto no vácuo e (b)depois submerso	79
Figura 36: (a)Saturação do reservatório do transdutor e (b) acoplagem do transdutor ao copo de acrílico	80
Figura 37: Montagem tri-partido – tamanho Proctor	81
Figura 38: Montagem tri-partido – tamanho CBR.....	81
Figura 39: Pasta de solo colocada no tensiômetro	82
Figura 40: Detalhe tensiômetro e termômetro.....	83
Figura 41: CP envolto pela membrana.....	83
Figura 42: Encamisador	84
Figura 43: Ensaio de ressecamento livre.....	84
Figura 44: Comparação da sucção para os corpos de prova do tamanho Proctor, variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo.....	88
Figura 45: Comparação da sucção para os corpos de prova do tamanho CBR, variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo	89
Figura 46: Comparação da sucção para solo SA Paulista no tamanho Proctor e no tamanho CBR.....	90
Figura 47: Comparação da sucção para solo SA Paulista 5% no tamanho Proctor e no tamanho CBR	91
Figura 48: Comparação da sucção para solo SA Paulista 10% no tamanho Proctor e no tamanho CBR	91
Figura 49: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo.....	92
Figura 50: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo.....	93

Figura 51: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo.....	93
Figura 52: Comparação entre variação de umidade versus variação volumétrica para o tamanho Proctor	95
Figura 53: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo.....	96
Figura 54: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo.....	97
Figura 55: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo.....	97
Figura 56: Comparação entre variação de umidade versus variação volumétrica para o tamanho CBR	99
Figura 57: Diferença de cor entre corpos de prova do tamanho Proctor.....	101
Figura 58: Diferença de cor entre corpos de prova do tamanho CBR	102
Figura 59: Comparação da curva característica para os corpos de prova do tamanho Proctor, variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo.....	103
Figura 60: Comparação da curva característica para os corpos de prova do tamanho CBR, variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo	104
Figura 61: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista.....	105
Figura 62: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista 5%.....	106
Figura 63: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista 10%.....	106
Figura 64: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista.....	107
Figura 65: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista 5%.....	108
Figura 66: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista 10%.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Camadas do sistema de cobertura final	15
Tabela 2: Camadas do sistema de cobertura final	17
Tabela 3: Sistema de cobertura final mínimo recomenda	18
Tabela 4: Projeto de cobertura padrão para aterros classe I e II –	23
Tabela 5: Proposições para Modelagem da Curva Característica	33
Tabela 6: Fatores que influenciam a condutividade hidráulica da camada de argila compactada.....	47
Tabela 7: Composição granulométrica do solo da CTR - Nova Iguaçu.....	60
Tabela 8: Características geotécnicas do solo da CTR – Nova Iguaçu.....	60
Tabela 9: Capacidade de campo do solo SA Paulista	64
Tabela 10: Condutividade hidráulica para RSU de diversos estudos –.....	66
Tabela 11: Composição granulométrica do Permagemel.....	68
Tabela 12: Características geotécnicas do Permagemel.....	68
Tabela 13: Composição granulométrica do solo SA Paulista 5%.....	70
Tabela 14: Características geotécnicas do solo SA Paulista 5%.....	70

1. INTRODUÇÃO:

A produção de resíduos é uma característica ligada a toda atividade humana. Com o crescente aumento da população e da industrialização, essa produção tende a ser cada vez maior. Mesmo com a gradativa conscientização da sociedade, que passa a reduzir, reutilizar e reciclar, sempre restam resíduos a serem dispostos no meio físico.

Seguindo essa conscientização, alguns países criam grupos com o intuito de reduzir o volume de resíduos produzidos. A União Européia, por exemplo, possui diretrizes que devem ser utilizadas como referência para os países membros.

Na Alemanha, foi fundado, em 1990, o “Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH” (Ponto Verde – Sistema Dual), que possui em torno de 600 sócios, entre empresas do comércio, indústria de produtos de consumo e de embalagens e fornecedores de matérias primas. O Ponto Verde segue a premissa da lei das embalagens, de 12 de junho de 1991, que tem como objetivo reduzir o volume total do lixo, obrigando o comércio e a indústria a aceitarem a devolução e a reutilização das embalagens de venda e transporte. No caso das embalagens de venda, a lei das embalagens oferece aos fabricantes e aos comerciantes a possibilidade de recorrerem aos serviços de terceiros, ou seja, ao Sistema Dual, para cumprimento das obrigações específicas dessa lei. (<http://www.gruener-punkt.de>).

O Ponto Verde tem como objetivo minimizar a utilização excessiva de embalagens e reaproveitar os materiais existentes nas embalagens comerciais, produzir matérias-primas secundárias e reintroduzi-las no ciclo de materiais recicláveis. Com essas medidas, houve queda do consumo *per capita* de embalagens comerciais de 94,7kg em 1991 para 82,3kg em 1997. Essa marca (Ponto Verde) informa ao consumidor sobre o fato de que, nas embalagens em que a marca se encontra impressa, o fabricante da embalagem ou engarrafador pagou ao Sistema Dual uma retribuição de licença, com a qual são financiados o recolhimento e separação das embalagens, correspondente aos custos que incidem efetivamente sobre a eliminação das embalagens. O valor a ser pago depende do

material utilizado, do peso e da quantidade a ser recolhida (<http://www.gruener-punkt.de>).

Nas últimas décadas, ocorreu no Brasil o aumento da conscientização em relação à reciclagem. Podemos citar o surgimento de cooperativas de catadores de lixo e as associações que visam à conscientização da população quanto à reciclagem dentro dos preceitos do gerenciamento integrado do lixo.

Segundo dados da COMLURB (Companhia Municipal de Limpeza Urbana) (2007), no Município do Rio de Janeiro, a título de ilustração, a média diária de lixo domiciliar foi de 4,01 ton/dia e 3,187 ton/dia de lixo público em 2005, segundo os quais 20% são potencialmente recicláveis. A coleta seletiva foi definida para o Município do Rio de Janeiro na Lei Municipal de Limpeza Urbana nº 3273, de 06 de setembro de 2001. Segundo essa lei, caberá à população separar o lixo em casa, estabelecendo multa aos infratores. (COMLURB, 2007). A coleta seletiva já existe em alguns bairros do Rio de Janeiro, mas a separação do lixo ainda não é obrigatória, não havendo ainda a aplicação da multa aos infratores de tal lei.

Mesmo com a crescente preocupação da população e dos governos em reduzir a produção de resíduos, sempre são necessárias áreas para a disposição do que não pode ser mais utilizado. Esses resíduos podem ser dispostos em aterros controlados e sanitários, que seguem critérios rígidos de engenharia e normas operacionais específicas, a fim de minimizar impactos ambientais que podem vir a ocorrer em decorrência de tal disposição, como a contaminação dos solos e das águas superficiais e subterrâneas, além do aumento de doenças relacionadas à poluição ambiental, entre outros.

O problema da contaminação dos solos e das águas é de extrema importância, pois coloca em risco a população, que é abastecida com a água dos mananciais, que é suprida, em última instância, pelas águas subterrâneas. Com o intuito de se impedir tal contaminação, são desenvolvidos métodos para evitar e/ou minimizar a infiltração de precipitado na massa de resíduos e a infiltração do chorume, ou aqui chamado de lixiviado, no solo, e,

conseqüentemente, nas águas subterrâneas. Os sistemas de impermeabilização de cobertura e de fundo desempenham tais funções, respectivamente. Além disso, devem ser construídos drenos tanto para a água precipitada quanto para o lixiviado gerado. A água precipitada deve ser conduzida diretamente ao sistema de águas pluviais, enquanto o lixiviado deve ser drenado para um tanque, e, se possível, tratado, diminuindo assim seu poder de contaminação.

Os modelos de cálculo de balanço hídrico usualmente pressupõem que a camada de cobertura é homogênea e isotrópica, isto é, suas características não mudam ao se alterar a profundidade ou o local da superfície em análise. Sabe-se que solos naturais, mesmo quando provenientes de uma mesma jazida, possuem diferenças espaciais. Para amostras de locais distintos, serão encontradas alterações de composição granulométrica, e a condutividade hidráulica é sensível a tal mudança. A curva característica de retenção do solo também pode apresentar considerável variação para amostras coletadas em pontos distintos, e, mesmo assim, vários códigos computacionais adotam a curva característica como sendo única para solos de uma mesma área.

Concentrando-se a análise no parâmetro de condutividade hidráulica do solo, observa-se que os programas computacionais de simulação do comportamento e escoamento no solo adotam, na maioria das vezes, uma condutividade hidráulica média para as camadas analisadas. Mesmo para solos aparentemente intactos e relativamente homogêneos, a constatação da variabilidade espacial da condutividade hidráulica pode vir a ser especialmente significativa. Pode-se, então, imaginar a dificuldade de se obter valores representativos ou efetivos ou médios de condutividade hidráulica do solo quando a camada em questão apresenta caminhos preferenciais, como ocorre com a camada de cobertura de um aterro sanitário.

Os caminhos preferenciais podem ser conseqüência da presença de animais, de vegetação, onde as raízes levam a tais caminhos, e também da formação de trincas, geradas por sucessivos ciclos de umedecimento e ressecamento aos quais tal camada está submetida.

Nos Estados Unidos e na Alemanha, existem leis que definem, de forma clara, como os resíduos devem ser dispostos, de acordo com sua classificação e com a forma de disposição que será adotada. O Brasil ainda carece de leis que abranjam tal assunto, existindo apenas recomendações que são seguidas por consenso.

No Brasil, para os lixões e aterros, já existentes, que não possuem características adequadas de disposição de resíduos, deve-se melhorar a impermeabilização do sistema de cobertura com a utilização de um solo de qualidade, de geomembranas, geotêxteis, adição de bentonita ao solo de cobertura, ou até por meio do uso conjunto de tais alternativas. Estudos sobre a contaminação de solos e seus mecanismos e de alternativas para sistemas de impermeabilização são cada vez mais explorados e ganham relevância devido a necessidade de segurança, a longo prazo, exigida para sistemas de impermeabilização de aterros.

Em particular, a adição de bentonita ao solo vem se mostrando uma boa alternativa para os sistemas de impermeabilização (Hoeks *et al.*, 1987, Egloffstein, 2001), tanto de cobertura como de fundo, por ser um material de baixa condutividade hidráulica, melhorando as características do solo ao qual é adicionada, além de ter característica expansiva, interessante quando se leva em conta que trincas formadas em camadas de impermeabilização levam ao aumento da condutividade hidráulica e até à perda de função de tal camada.

Nesse contexto, o presente trabalho explora o emprego da bentonita como uma alternativa em sistemas de impermeabilização aplicável em lixões e em aterros sanitários, com especial enfoque na análise da camada de cobertura desses empreendimentos. Na seqüência do texto, detalha-se o objetivo desta pesquisa.

1.1 Objetivo e Organização do Trabalho:

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência da adição de bentonita sódica a solos utilizados como camada de cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos. Para tanto, foi feita a análise do solo utilizado como camada de cobertura no aterro sanitário de Nova Iguaçu, RJ, Brasil, considerando o uso de bentonita sódica, comercialmente conhecida como “Permagel”, adicionada ao solo. Foram realizados ensaios de condutividade hidráulica com variadas porcentagens de bentonita adicionada ao solo para se saber a partir de que porcentagem a condutividade hidráulica passava a ser inferior àquela recomendada no Brasil. Conduziu-se, então, a análise granulométrica e determinação de limites de Atterberg. Os resultados foram comparados ao solo sem adição de bentonita.

Para se analisar a influência da adição de bentonita ao solo, foi desenvolvido, no Laboratório de Geotecnia – COPPE – UFRJ, um equipamento especial que mede a variação volumétrica, a sucção, a temperatura do topo e da base do corpo de prova e a umidade do solo, de forma indireta. Com o uso desse equipamento, ensaios com dois tipos de corpo de prova – tamanho utilizado na compactação tipo Proctor Normal e na compactação do tipo CBR – foram realizados. A partir dos dados obtidos, foram construídos gráficos de sucção versus tempo, variação volumétrica versus umidade e a curva característica de retenção do solo. Nesse último gráfico, também foi adicionada a curva característica modelada de acordo com a proposta feita por Van Genuchten (1980).

Adicionalmente, cabe destacar que os gráficos de sucção versus tempo foram desenvolvidos usando-se o tamanho do corpo de prova e a quantidade de bentonita adicionada ao solo como parâmetros de referência na análise comparativa empreendida. Os gráficos de variação volumétrica versus umidade, por sua vez, foram comparados utilizando-se o tamanho do corpo de prova como parâmetro.

De forma a atender o objetivo desta dissertação, estruturou-se o texto em sete capítulos.

No Capítulo 2, são apresentados os componentes que podem existir em um sistema de camada de cobertura de um aterro, bem como sua importância e problemas que podem ocorrer à camada de cobertura. Também são apresentados alguns sistemas de camada de cobertura utilizados e as normas brasileira, americana e alemã.

O Capítulo 3 aborda a presença da água no solo e fatores relacionados ao escoamento dessa água em meio poroso, tais como sucção e curva característica de retenção do solo. Também é mostrado o fenômeno de formação de trincas no solo e explicado, de forma resumida, o balanço hídrico em um aterro sanitário.

O Capítulo 4 discute o uso da bentonita em solo de camada de cobertura de aterros de resíduos, revisando-se pesquisas relacionadas ao tema desenvolvido nesta dissertação.

O Capítulo 5 apresenta o material de pesquisa, bem como os ensaios realizados e a metodologia utilizada. Nesse capítulo, é feita a apresentação da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Nova Iguaçu, local de onde foi retirado o material estudado. É feita uma caracterização do local através de um breve histórico. Em seguida, é feita a caracterização do solo local através da curva granulométrica, dos limites de Atterberg, da condutividade hidráulica e da curva característica de retenção do solo. Também é apresentada uma breve caracterização dos resíduos recebidos na CTR Nova Iguaçu, bem como uma revisão de valores de condutividade hidráulica obtidos em diversos trabalhos publicados na literatura. Ainda nesse capítulo, é feita a descrição do “Permagel”, o tipo de bentonita utilizada neste trabalho. São mostradas a curva granulométrica, os limites de Atterberg e a condutividade hidráulica do material. A partir desses dados, indica-se como foi realizada a escolha da porcentagem de bentonita a ser utilizada nos ensaios, mostrando-se os ganhos obtidos com essa adição. Na seqüência, explica-se o funcionamento do equipamento desenvolvido para esta pesquisa e os aparelhos utilizados no ensaio de ressecamento livre, além de mostrar, em detalhes, o processo de montagem desse ensaio. Ao final do capítulo, são feitas recomendações relacionadas ao equipamento, que devem ser seguidas em ensaios futuros.

No Capítulo 6, estão apresentados os resultados obtidos através da elaboração dos gráficos de sucção versus tempo, variação volumétrica versus umidade e curva característica. Também é, nesse capítulo, feita a análise desses resultados.

No Capítulo7, são apresentadas as conclusões do trabalho, onde são destacadas as vantagens da utilização da bentonita, e são feitas recomendações para futuras pesquisas.

2. CAMADA DE COBERTURA

A camada de cobertura é um sistema que tem como objetivo principal impedir a entrada de líquidos no interior do corpo do aterro. Existem vários métodos de construção da camada de cobertura, sendo que a utilização de solos compactados com baixa condutividade hidráulica é o método mais empregado. Atualmente, existe um crescimento da utilização de uma geomembrana em conjunto com o solo compactado de baixa condutividade hidráulica.

A história dos geossintéticos confunde-se com a evolução da indústria petroquímica, e ao aparecimento de fibras sintéticas imputrescíveis, fazendo com que a indústria têxtil ganhasse espaço junto ao mercado da construção civil. Neste contexto surgiram os geossintéticos, materiais “sintéticos” e usados em aplicações com solo (“geo”). O surgimento de associações relacionadas com geossintéticos, como a OIBI (Instituto Brasileiro de Impermeabilização) em 1997 e a ABINT (Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos) em 1991, indicam a força que o setor vem adquirindo no Brasil (Maroni *et al.*, 1999).

2.1 Componentes da Camada de Cobertura

Existem algumas recomendações para um sistema de camadas de cobertura. De acordo com Saarela (1997), 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. A seguir, encontram-se algumas características dessas camadas:

- Camada de controle de gás

Tem como função direcionar os gases produzidos pela massa de lixo, em consequência da degradação da matéria orgânica, para a atmosfera.

- Camada de proteção

Tem como função separar o material fino dos grossos, prevenindo o entupimento da parte de granulometria grossa pelos finos. Assim, previne a mistura dos materiais de diferentes granulometrias, permitindo a passagem de fluidos, água e gases.

- Camada de proteção inferior

Essa camada isola a barreira hidráulica da massa de lixo e serve também como suporte para as demais camadas do sistema. Essa camada impede danos químicos e mecânicos que a massa de lixo pode provocar na barreira hidráulica.

- Barreira hidráulica

Tem como função mudar a direção e/ou impedir a percolação de qualquer forma de precipitação que entre em contato com esta camada. É importante que essa camada não sofra danos causados por raízes de plantas ou pela presença de animais, evitando-se assim que perca sua função.

- Camada drenante

Essa camada intercepta a percolação de precipitação, conduzindo-a lateralmente para fora do sistema.

- Barreira biótica

Tem como função impedir que as raízes da vegetação e a presença de animais danifiquem as camadas inferiores, especialmente a barreira hidráulica.

- Camada superficial

A vegetação planejada e controlada dessa camada previne a erosão, expõe parte da água do sistema de cobertura através da evapotranspiração, além de trazer melhorias estéticas ao ambiente

2.2 Uso de Solo na Camada de Cobertura

O solo pode ser utilizado como camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos. Para tanto, deve-se levar em conta os aspectos geotécnicos e os fatores que influenciam o crescimento de vegetação. A condutividade hidráulica é um fator importante, pois influencia o processo de infiltração da precipitação na massa de lixo. A qualidade de solos naturais utilizados como camada de cobertura pode ser melhorada com a adição de alguns materiais, como, por exemplo, bentonita, cinzas voláteis, entre outros. Também pode-se optar pelo uso desses solos conjuntamente com geomembranas, geotêxteis, geossintéticos e outros.

Em estudo realizado por Hoeks *et al.* (1987), utilizando um solo arenoso, com grande parte do solo de granulometria entre 0,1mm e 1mm, mostra-se que a adição de 5% de bentonita em peso seco ao solo é suficiente para obter-se uma condutividade hidráulica inferior a 5×10^{-10} m/s. Esse valor é suficientemente baixo para ser usado como camada de cobertura de aterro. Entretanto deve-se lembrar que a condutividade hidráulica da mistura depende do solo, do tipo de bentonita e da quantidade de bentonita adicionada ao solo. Ainda segundo Hoeks *et al.* (1987), indica-se o uso de bentonita na camada de cobertura, pois é um material resistente a deformações causadas por recalques diferenciais.

Após a construção de um aterro, um dos maiores perigos para as camadas de cobertura são as trincas que ocorrem na barreira hidráulica, causadas por recalque e ciclos de molhamento e secagem. Em aterros antigos, onde não existe qualquer tipo de impermeabilização, uma boa opção é adotar impermeabilização ao menos na cobertura do aterro. Desta forma, a contaminação das águas e dos solos pode ser reduzida, visto que a camada de cobertura reduzirá o volume infiltrado na massa de resíduos, reduzindo a produção de lixiviado.

2.3 Importância da Camada de Cobertura

Os principais objetivos do uso de cobertura final (IPT, 2000) são:

- promover, a longo prazo, a proteção da saúde humana e reduzir ou eliminar os riscos potenciais ao ambiente do local;
- minimizar os riscos controlando a migração dos gases e promovendo a separação física entre os resíduos dispostos e ao meio ambiente;
- minimizar, a longo prazo, os custos com manutenção.

O sistema deve ser projetado de forma a minimizar a infiltração e a erosão do material de cobertura. Esse sistema deve ser inspecionado, mantido e reparado sempre para assim garantir assim sua durabilidade. O sistema de cobertura também tem a finalidade de proteger as células de lixo, minimizando os impactos ao meio ambiente através da eliminação de vetores, reduzindo a exalação de odores, eliminando a queima de resíduos e a saída descontrolada de gases. Além disso, evita o espalhamento do lixo e/ou poeira e melhora a estética do local onde o aterro se encontra.

2.4 Problemas dos Sistemas de Camadas de Cobertura

O sistema de camadas de cobertura pode ser danificado por diversos fatores. A danificação de um dos componentes da camada de cobertura pode significar a perda da função do componente danificado e até mesmo o comprometimento do funcionamento da camada de cobertura como um todo.

Essas alterações podem ser provocadas pela erosão, ressecamento do solo, surgimento de trincas, colmatação, entre outros fatores. A erosão pode causar danos que requerem manutenção e reparos. Erosão extrema pode levar a exposição da camada de infiltração, iniciar ou contribuir para escorregamentos ou até expor o lixo. O ressecamento do solo, por sua vez, pode provocar trincas que podem vir a se aprofundar. Como a camada de cobertura não é muito espessa, trincas podem ocorrer por toda a camada, mudando radicalmente as características de condutividade hidráulica. Por essa razão, deve-se prestar atenção e detectar as trincas em estágio inicial, para, assim, mitigar esse problema.

O ressecamento do solo também traz problemas relacionados à penetração das raízes das plantas que se aprofundam mais em busca de água.

Complementarmente, a escolha da vegetação a ser utilizada na camada de cobertura também deve ser criteriosa. Deve-se considerar o crescimento das raízes através da camada de cobertura e sua penetração na camada de drenagem. Essa penetração forma caminhos preferenciais de infiltração de água, comprometendo a integridade do sistema. Por outro lado, a presença de animais sobre o aterro, após o seu fechamento, também deve ser evitada. Os animais podem fazer buracos na superfície do solo, tornando essas áreas caminhos preferenciais da água. Dependendo da profundidade desses buracos, uma camada subsequente pode ser exposta, danificando o sistema de camadas de cobertura.

2.5 Alguns Tipos de Sistema de Camada de Cobertura

2.5.1 Sistema Convencional

O sistema de cobertura usualmente utilizado (Figura 1) é a compactação de uma camada de solo argiloso diretamente sobre a massa de resíduos. Essa camada compactada tem como objetivo evitar a penetração excessiva de precipitação, podendo apresentar alguns problemas, tais como ressecamento e formação de fissuras e trincas quando utilizadas em alguns tipos de climas (Pimentel, 2006).

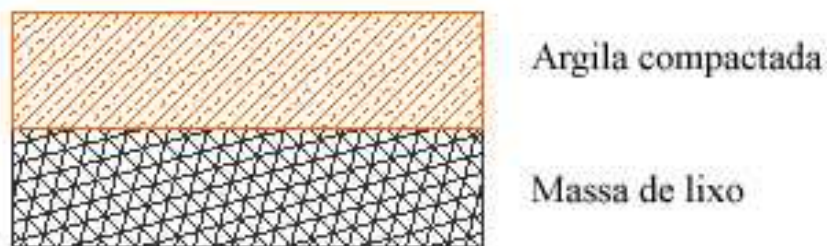


Figura 1: Esquema do sistema convencional de cobertura – Fonte: Pimentel (2006)

2.5.2 Barreiras Capilares

As barreiras capilares (Figura 2) são formadas pelo conjunto de camadas de solos, colocadas umas sobre as outras. É colocada uma camada de solo de granulometria fina sobre uma camada de material de granulometria grossa, como, por exemplo, areia ou cascalho. A capacidade de impedir o fluxo de água ocorre devido a grande mudança nos tamanhos dos poros entre as camadas de materiais mais finos e mais grosseiros. Essa diferença de tamanhos leva à intensificação do fenômeno de capilaridade. As barreiras capilares têm, assim, a finalidade de aumentar a capacidade de armazenamento de água na camada de material mais fino.

Esse sistema é eficiente para condições não-saturadas. Se ocorrer uma situação de saturação, mesmo que temporária, como, por exemplo, uma chuva intensa, poderá haver a infiltração de água na massa de resíduos (Pimentel, 2006).

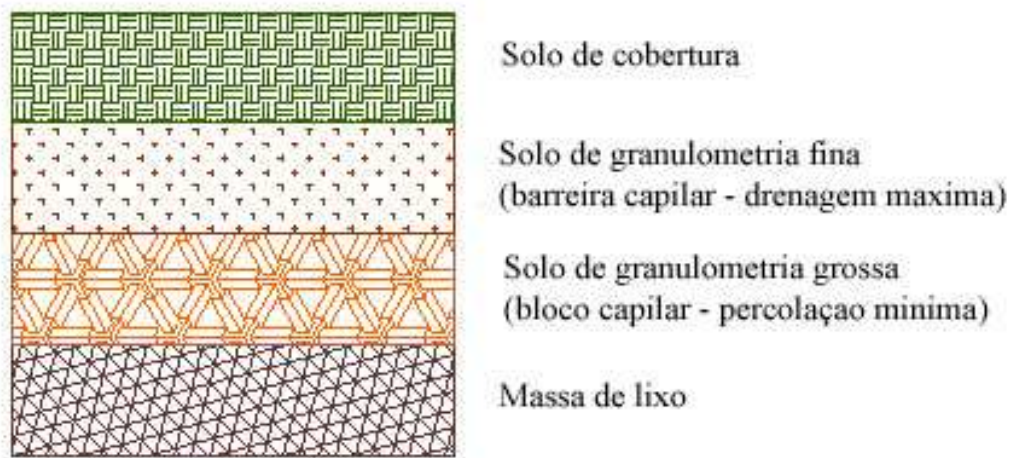


Figura 2: Esquema de barreiras capilares - Fonte: Pimentel (2006)

2.5.3 Coberturas Evapotranspirativas

Esse tipo de barreira (Figura 3) usa processos naturais para controlar a infiltração da água na superfície do aterro. O sistema de camadas de solo é dimensionado de forma a armazenar o máximo de água. Essa água é eliminada posteriormente através da evapotranspiração das espécies vegetais presentes no solo de cobertura/restituição.

Nesse sistema, dois aspectos merecem atenção especial: as camadas de solo precisam armazenar toda a água infiltrada, mesmo que a chuva seja intensa, e o solo de restituição deve ser compatível com a vegetação nativa a ser cultivada em sua superfície (Pimentel, 2006).

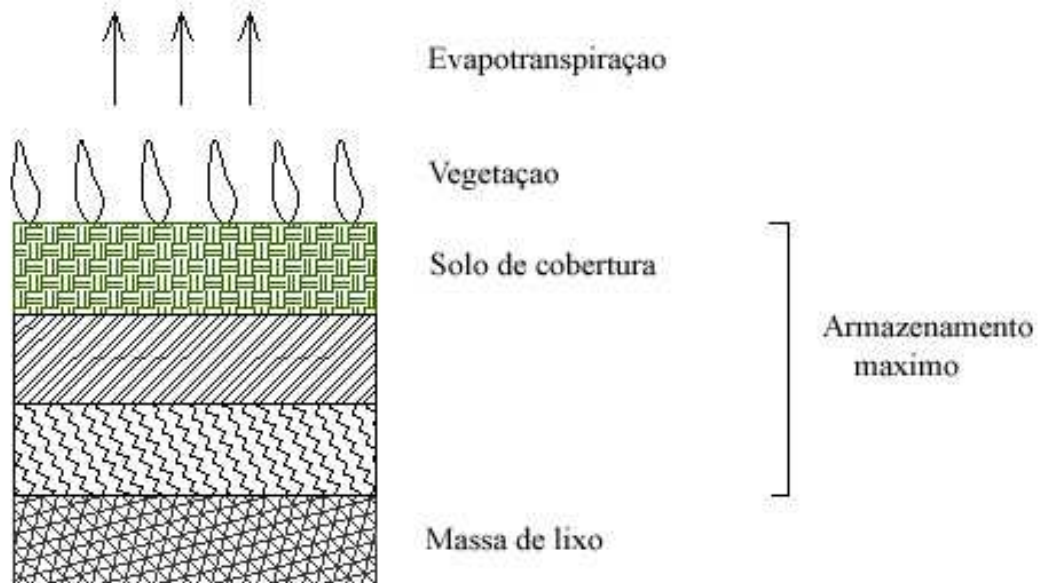


Figura 3: Esquema de cobertura evapotranspirativa - Fonte: Pimentel (2006)

2.6 Algumas Normas

2.6.1 Norma Brasileira

No Brasil, não existe uma regulamentação ou norma para a realização do projeto de sistema de cobertura de aterro, havendo apenas recomendações do que deveria ser feito.

De acordo com publicação do IBAM (2001), para aterro industrial classe I, a camada de impermeabilização superior é obrigatória, mas não há regulamentação para espessura, permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica. Já para aterro industrial classe II, a camada de impermeabilização superior não é obrigatória, mas, se existir, deve ser constituída de manta plástica (com espessura de 0,8 a 1,2 mm) ou de argila de boa qualidade ($K = 10^{-6}$ cm/s e espessura maior que 50 cm). Na Tabela 1, estão listados os tipos de camadas e os materiais que podem existir na cobertura final de aterros sanitários.

Tabela 1: Camadas do sistema de cobertura final – Fonte: IBAM (2001)

Camada	Tipo de camada	Tipo de material
1	Camada superficial	Solo, camada geossintética de controle de erosão, blocos rochosos
2	Camada de proteção	Solo, material residual recuperado ou reciclado; blocos rochosos
3	Camada drenante	Areia e/ou cascalho, georrede ou geocompósitos
4	Camada impermeável	Argila compactada, geomembrana, camada geossintética
5	Fundação / Camada coletora de gás	Areia e/ou cascalho, solo, georrede ou geotêxtil, material residual recuperado ou reciclado

É recomendado o uso de vegetação sobre a camada de cobertura final, pois esta aumenta a evapotranspiração, diminuindo a quantidade de chuva que se infiltra, reduzindo assim a quantidade de percolado/lixiviado gerado no aterro. O sistema de cobertura deve ser projetado de forma a atender a utilização futura do aterro, isto é, seu uso após o

fechamento do aterro. A Figura 4 ilustra os componentes de um sistema de cobertura final em aterro sanitário.

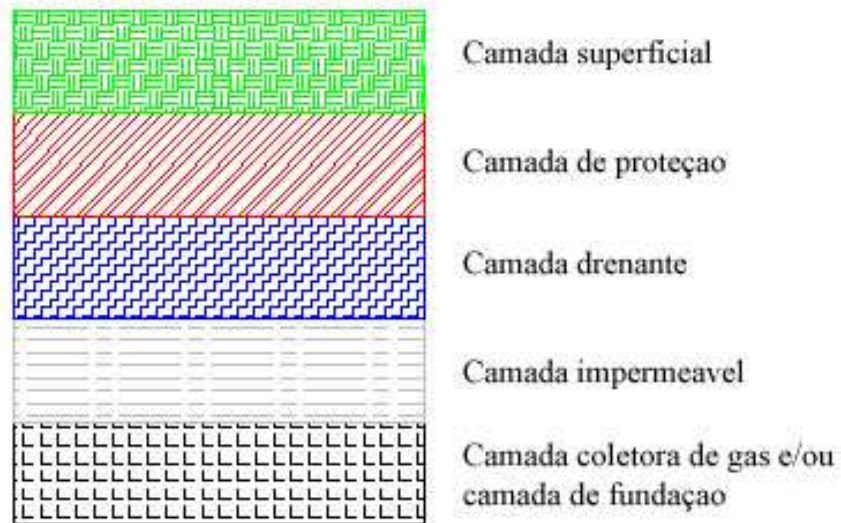


Figura 4: Componentes de um possível sistema de cobertura final em aterro sanitário

Fonte: IBAM (2001)

2.6.2 Norma dos EUA

O sistema de cobertura pode ser projetado de variadas formas, procurando atender as necessidades de fechamento do aterro. Na Tabela 2, estão os tipos de camadas e os materiais típicos que podem existir na cobertura final de um aterro. Pode-se observar que a recomendação brasileira para os tipos de camadas e materiais típicos que podem existir na cobertura final são similares aos da norma americana. Ressalte-se que a espessura recomendada de cada camada depende de vários fatores entre eles o sistema de drenagem, potencial de erosão, encostas, tipo de vegetação de cobertura, tipo de solo e clima. Na Tabela 3, estão listadas a espessura mínima e a condutividade hidráulica recomendada para cada tipo de cobertura, enquanto as Figuras 5 a 9 mostram os esquemas dos diferentes tipos de camada.

Tabela 2: Camadas do sistema de cobertura final – Fonte: *U.S. EPA*

Camada	Tipo de camada	Tipo de material
1	Camada superficial	Solo, camada geossintética de controle de erosão, blocos rochosos
2	Camada de proteção	Solo, material residual recuperado ou reciclado; blocos rochosos
3	Camada de drenagem	Areia e/ou cascalho, georrede ou geocompósitos, pneu picado ou triturado
4	Camada impermeável	Argila compactada, geomembrana, camada geossintética
5	Fundação / Camada coletora de gás	Areia e/ou cascalho, solo, georrede ou geotêxtil, material residual recuperado ou reciclado

Tabela 3: Sistema de cobertura final mínimo recomendado – Fonte: U.S. EPA (2003)

Tipo de cobertura	Sistema de camadas recomendado (do topo para baixo)	Espessura (cm)	Condutividade hidráulica (m/s)
Camada dupla (<i>Double liner</i>)	Camada de superfície	30	Sem restrição
	Camada drenante	30	1×10^{-4} a 1×10^{-5}
	Geomembrana	0,07 (PVC)	-
		0,015 (HDPE)	-
	Argila	45	$\geq 1 \times 10^{-7}$
Camada composta (<i>Composite liner</i>)	Camada de superfície	30	Não é aplicável
	Camada drenante	30	1×10^{-4} a 1×10^{-5}
	Geomembrana	0,07 (PVC)	-
		0,015 (HDPE)	-
	Argila	45	$\geq 1 \times 10^{-7}$
Camada simples de argila (<i>Single clay liner</i>)	Camada de superfície	30	Não é aplicável
	Camada drenante	30	1×10^{-4} a 1×10^{-5}
	Argila	45	$\geq 1 \times 10^{-7}$
Camada simples de argila (<i>single clay liner</i>) em semi-árido	Blocos rochosos	5-10	Não é aplicável
	Camada drenante	30	1×10^{-4} a 1×10^{-5}
	Argila	45	$\geq 1 \times 10^{-7}$
Camada simples sintética (<i>Single synthetic liner</i>)	Camada de superfície	30	Não é aplicável
	Camada drenante	30	1×10^{-4} a 1×10^{-5}
	Geomembrana	0,07 (PVC)	-
		0,015 (HDPE)	-
	Argila	45	$\geq 1 \times 10^{-7}$
Cobertura natural	Solo	60	Não mais permeável que o solo que serve de base

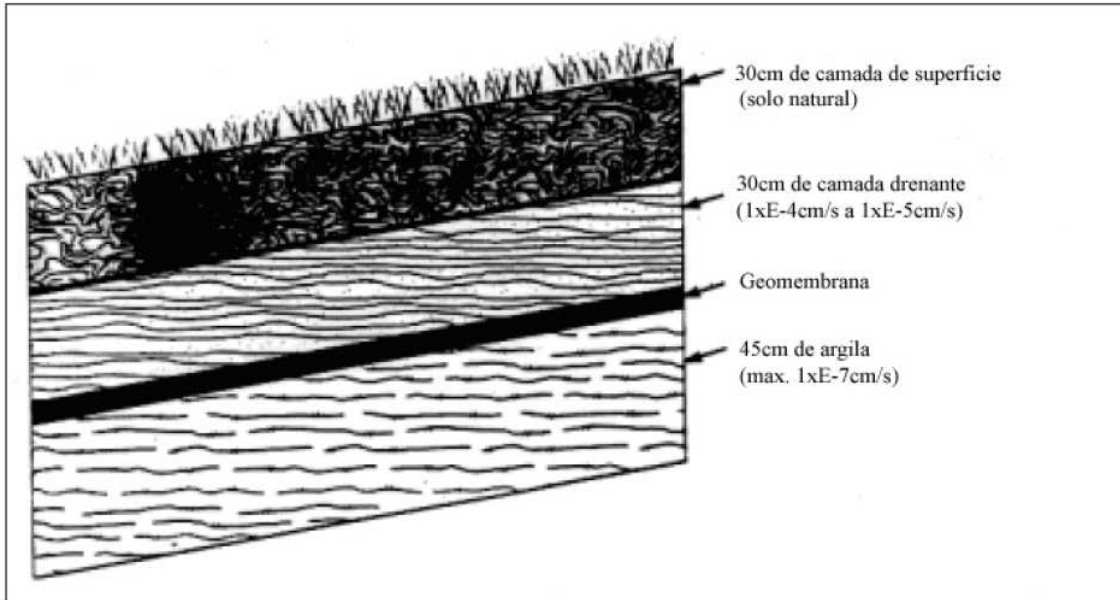


Figura 5: Sistema de cobertura final para camada dupla ou camada composta – Fonte: U.S. EPA (2003)

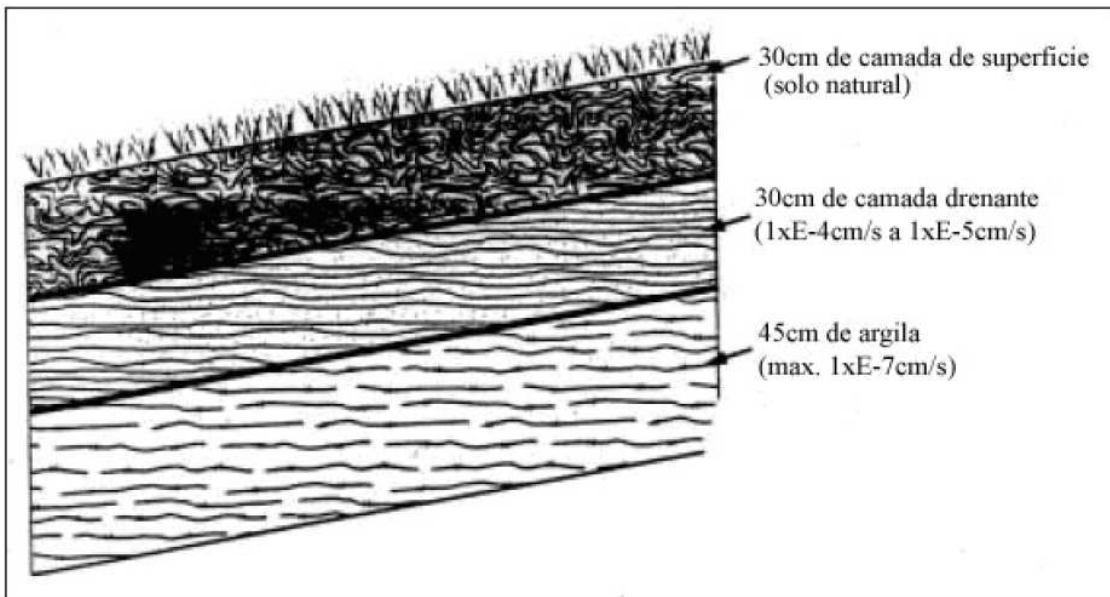


Figura 6: Sistema de cobertura final para camada simples de argila – Fonte: U.S. EPA (2003)

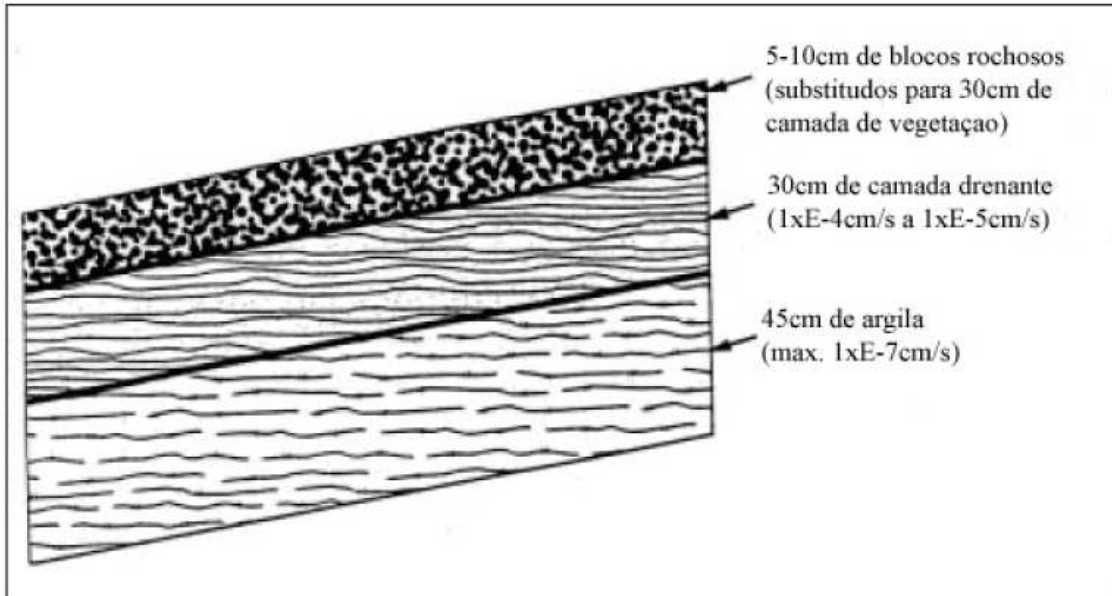


Figura 7: Sistema de cobertura final para camada simples de argila em clima semi-árido – Fonte: *U.S. EPA* (2003)

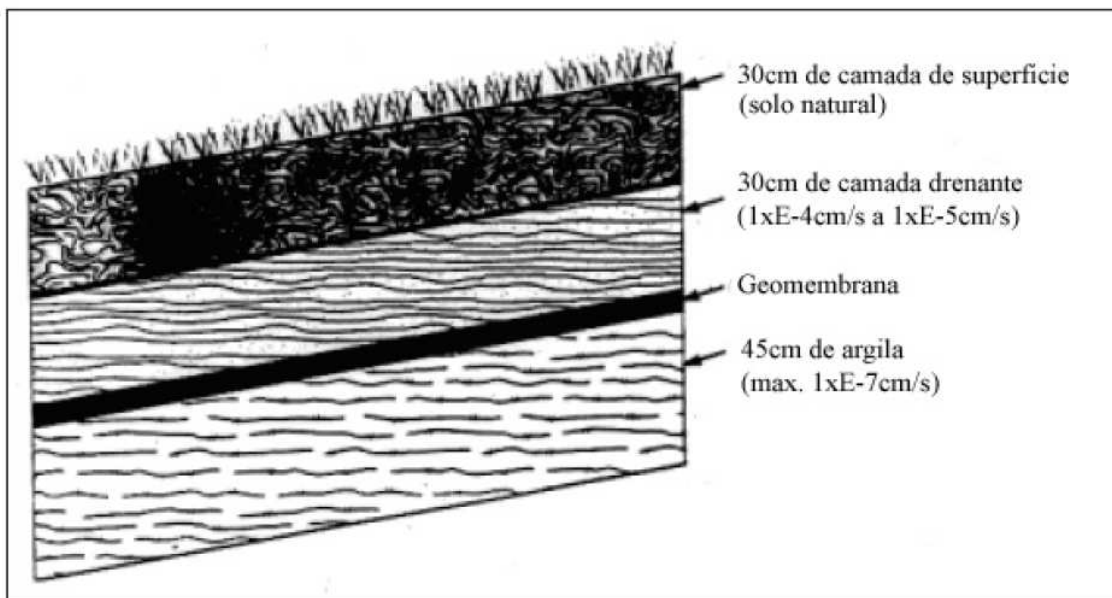


Figura 8: Sistema de cobertura final para camada simples sintética –
Fonte: *U.S. EPA* (2003)

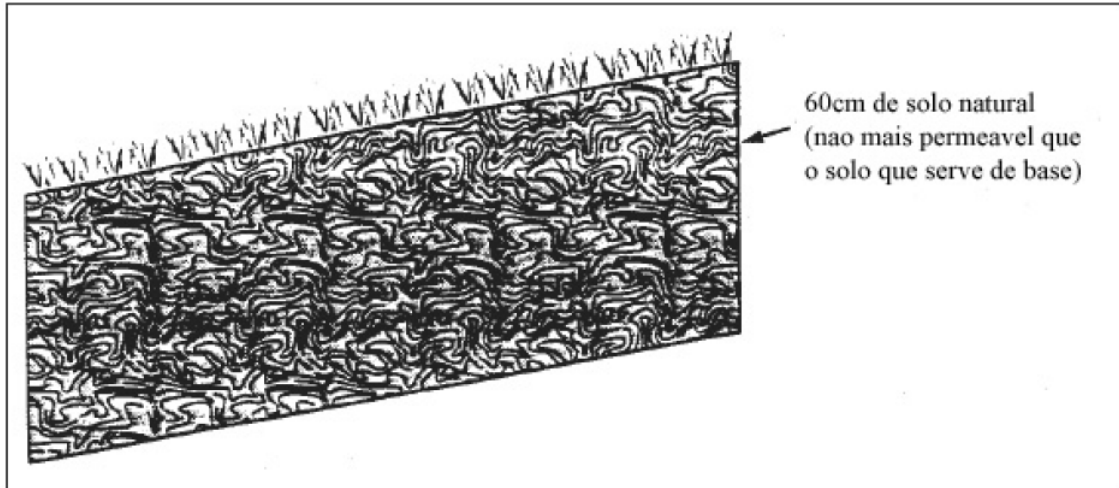


Figura 9: Sistema de cobertura final para cobertura natural –

Fonte: *U.S. EPA* (2003)

2.6.3 Norma Alemã

O principio básico de projeto de um aterro é baseado no conceito de multibarreiras. Esse conceito consiste na combinação de três barreiras independentes: a barreira geológica (situação hidrológica, presença de aquíferos e características do terreno no local em que se encontra o aterro), a barreira técnica (impermeabilização de fundo e cobertura do aterro) e o lixo propriamente dito formando uma barreira (imobilização de substâncias nocivas através do pré-tratamento do lixo e técnicas de disposição apropriadas).

Segundo a Norma Alemã – *TA Siedlungsabfall* (Bergs e Radde, 2002), o tipo de cobertura depende da classificação do aterro. A Figura 10 permite visualizar o sistema de cobertura proposto pela norma alemã.

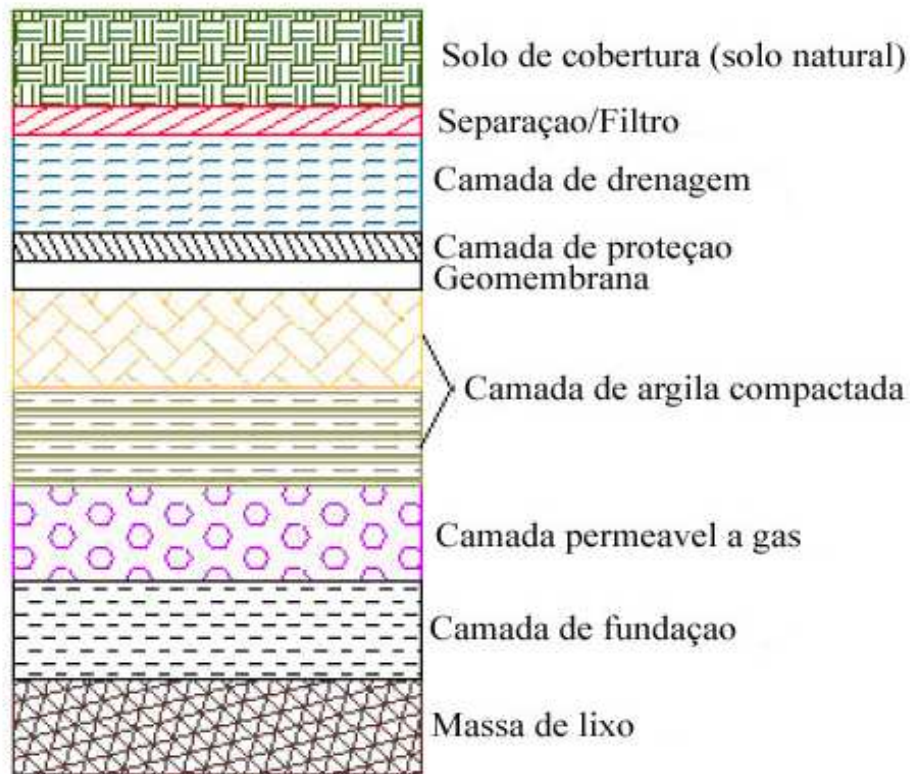


Figura 10: Esquema para sistema de cobertura de acordo com norma alemã

Fonte: Simon e Muller (2004)

Os aterros classe 0 são para materiais inertes. Já aterros classe I e II são aqueles destinados a receber resíduos minerais de baixa capacidade de contaminação e resíduos sólidos municipais tratados. Aterros classe III recebem resíduos perigosos.

O sistema de cobertura padrão para os aterros classe II e III é formado pela composição de geomembranas plásticas em contato direto com a camada de argila compactada. A geomembrana deve ter espessura mínima de 2,5 mm, enquanto a argila deve ser compactada com umidade superior à umidade ótima do ensaio de compactação do tipo Proctor para, então, se obter baixa condutividade hidráulica ($K \leq 5 \times 10^{-10}$ m/s com gradiente hidráulico $i = 30$ m/m). São necessárias, no mínimo, duas camadas com 25cm de espessura cada.

A camada de cobertura padrão para aterros classe I é a de argila compactada, seguindo as seguintes características: argila deve ser compactada com umidade superior a umidade ótima do ensaio de compactação do tipo Proctor, $K \leq 5 \times 10^{-10}$ m/s com gradiente hidráulico $i = 30$ m/m.

Na Tabela 4, estão colocadas, de forma resumida, as características de cada uma das camadas do sistema de cobertura de acordo com a classe do aterro.

Tabela 4: Projeto de cobertura padrão para aterros classe I e II –

Fonte: Simon e Muller (2004)

Componente	Aterro classe I	Aterro classe II
Vegetação	Necessário	Necessário
Solo de cobertura	> 1 m	> 1 m
Camada de drenagem	$d \geq 0,3$ m ; $K \geq 1 \times 10^{-3}$ m/s	$d \geq 0,3$ m ; $K \geq 1 \times 10^{-3}$ m/s
Camada de proteção	Não é necessário	Necessário
Geomembrana	Não é necessário	$d \geq 2,5$ mm
Camada de argila compactada	$d \geq 0,5$ m ; $K \geq 5 \times 10^{-10}$ m/s	$d \geq 0,5$ m ; $K \geq 5 \times 10^{-10}$ m/s
Camada permeável a gás	Não é necessário	Necessário

O solo de cobertura (camada na qual ficará a vegetação) deve ter, no mínimo, 1 m de espessura, para garantir o crescimento das raízes das plantas, de modo a impedir danos nas camadas subsequentes de cobertura.

Atualmente, sistemas alternativos de cobertura de aterros de resíduos sólidos estão sendo estudados. Podemos destacar a geomembrana HDPE-GM, feita de polietileno de densidade média, com estabilização UV com carbono preto, com e sem sistema de monitoramento de percolado, barreira geosintética, barreira de concreto-asfalto, barreira capilar, entre outros.

3. ÁGUA NO SOLO

Este capítulo aborda a presença da água no solo e fatores relacionados ao escoamento dessa água em meio poroso, tais como sucção e curva característica de retenção do solo. Também é mostrado o fenômeno de formação de trincas no solo e explicado, de forma resumida, o balanço hídrico em um aterro sanitário.

3.1 Fases Constituintes do Solo Não Saturado

O solo não saturado é, usualmente, compreendido por um sistema trifásico (Lambe e Whitman, 1969), constituído por uma fase sólida, formada de partículas minerais, por uma fase líquida, que, geralmente, é a água e por uma fase gasosa, o ar. Já Fredlund e Morgenstern (1977) propuseram a introdução de uma quarta fase independente, referente à interface ar-água, conhecida como membrana contráctil (Figura 11) (Fredlund e Rahardjo, 1993). Fredlund e Morgenstern (1977) reconheceram a vantagem dessa consideração multifásica e afirmaram que, sob o ponto de vista comportamental, um solo não saturado pode ser interpretado como uma mistura de duas fases em equilíbrio (partículas de solo e membrana contráctil) e duas fases que fluem (ar e água) (Farias, 2004).

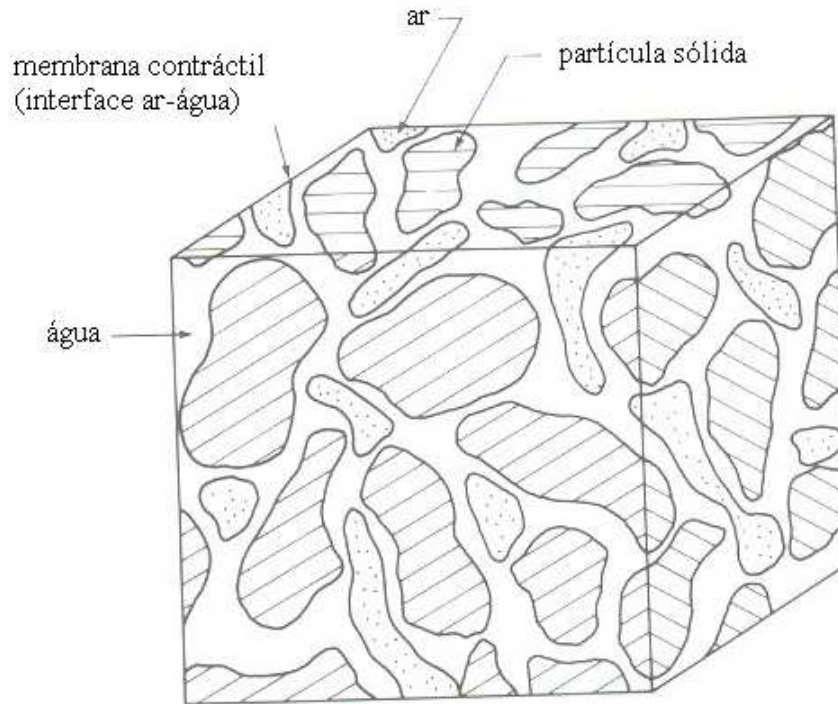


Figura 11: Elemento de solo não saturado com fase contínua de ar –

Fonte: Fredlund e Rahardjo (1993)

A interface ar-água possui uma propriedade chamada tensão superficial, que tem a capacidade de exercer uma tensão de tração, causada por forças intermoleculares atuando dentro dessa membrana contráctil. Essa tensão superficial faz com que a membrana contráctil se comporte como uma membrana elástica. Quando a fase de ar é contínua, a membrana contráctil interage com as partículas de solo, influenciando no comportamento mecânico do solo.

3.2 Sucção

Sucção pode ser entendida como sendo a pressão isotrópica da água intersticial que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais. A sucção tem sido objeto de estudos desde o início do século XIX, com interesse principal na agricultura. Somente nas décadas de 50 e 60 do século XX é que houve avanço no estudo da influência da sucção no comportamento de deformabilidade e de resistência dos solos saturados (Marinho, 1994).

A sucção total pode ser dividida em duas componentes: uma mátrica, relacionada à matriz do solo, como, por exemplo, o arranjo estrutural, e uma osmótica, que diz respeito à concentração de sais na parte líquida do meio poroso. Essas componentes serão vistas a seguir.

3.2.1 Componentes da Sucção

O gradiente que provoca fluxo pode ser expresso em termos de energia disponível na água no interior do solo, avaliada em relação à água livre. Essa energia disponível para realizar trabalho pode ser expressa em termos de potencial equivalente, sendo assim denominada de potencial total. Segundo a sociedade Internacional de Ciência do Solo (SSSA, 2007), o potencial total pode ser definido como sendo a quantidade de trabalho que deve ser realizado para transportar, reversa ou isotropicamente, uma quantidade infinitesimal de água de um reservatório de água pura, para uma elevação específica, até a água do solo, estando o reservatório submetido a uma pressão atmosférica.

O potencial total pode ser dividido em parcelas menores segundo a equação

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m + \phi_g + \phi_p + \phi_c \quad (3.1)$$

onde:

ϕ_o - potencial osmótico ou de soluto, correspondente à pressão da água no solo;

ϕ_m - potencial mátrico, resultante de forças capilares e de adsorção;

ϕ_g - potencial gravitacional, determinado pela elevação do ponto considerado em relação ao nível de referência;

ϕ_p - potencial pneumático, que corresponde a pressão na fase gasosa;

ϕ_c - potencial de consolidação, que corresponde à parcela de sobrecarga aplicada no terreno que é transmitida a pressão intersticial.

Admitindo-se que não há qualquer processo de adensamento e que o ar existente nos poros do solo esteja interligado com a atmosfera, as parcelas correspondentes ao potencial de consolidação e potencial pneumático podem ser desprezadas. O potencial

gravitacional também pode ser desprezado, sendo, então, o potencial total reescrito da seguinte forma:

$$\phi_t = \phi_o + \phi_m \quad (3.2)$$

Os potenciais mátrico e osmótico podem ser tratados pelas suas pressões correspondentes que são, respectivamente, a sucção mátrica e a sucção osmótica. A sucção total é, então, a soma das parcelas mátrica e osmótica calculada como

$$S_t = S_m + S_o \quad (3.3)$$

onde:

S_t - sucção total

S_m - sucção mátrica

S_o – sucção osmótica

Em síntese, a sucção mátrica pode ser definida como a pressão negativa da água intersticial devido aos efeitos de capilaridade e das forças de adsorção. Em outras palavras, a sucção mátrica está relacionada ao tipo de partícula e ao arranjo estrutural (matriz do solo), sendo seu valor representado pela diferença entre a pressão da água e do ar presente nos interstícios. Já a componente osmótica é a sucção equivalente relacionada à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre, função da quantidade de sais dissolvidos no interior do solo.

3.3 Curva de Retenção de Água no Solo

Em um solo saturado, em estado de equilíbrio, a poro pressão é superior ou igual à pressão atmosférica. A aplicação de uma sucção provoca a drenagem da água nos vazios do solo e gera uma pressão negativa nos mesmos. A aplicação de elevados níveis de sucção afeta a água livre nos vazios e pode afetar a espessura das envoltórias de hidratação ou meniscos, provocando perda de umidade.

A curva característica expressa graficamente a relação entre o teor de umidade (ou grau de saturação), seja expresso em termos de peso ou volume, com a sucção (Figura 12). Nessa relação, a sucção varia inversamente com o teor de umidade, ou seja, a sucção

tende a zero quando o solo atinge o estado de total saturação, e a um valor máximo quando o grau de saturação tende a zero. Essa relação pode ser obtida através do uso de uma ou mais técnicas.

A curva de retenção de água é um instrumento conceitual e interpretativo para compreender o comportamento de solo parcialmente saturado. Enquanto há o ressecamento do solo, a distribuição de fases (solo, água e ar) no interior do solo se altera e a pressão também. A relação entre as diferentes fases influencia o comportamento do solo. Por exemplo, o volume relativo das diferentes fases afeta a quantidade de água e o coeficiente de vapor ou gás difundido no solo (Vanapalli *et al.*, 1999).

O formato da curva de retenção de água do solo é influenciado pelo índice de vazios, e conseqüentemente, pela distribuição das frações granulométricas, pela composição química, entre outros fatores. Deve-se observar que a relação entre a umidade e a sucção é não linear, e apresenta histerese, isto é, a curva não é a mesma para o solo sujeito ao processo de secagem e ao processo de umedecimento.

A Figura 12 apresenta uma curva típica de retenção de água no solo de um solo inicialmente saturado sob a condição de ressecamento. Importantes pontos de uma curva de retenção de água são o valor da entrada de ar e a umidade residual. O valor de entrada de ar representa a sucção necessária que causa a entrada de ar nos maiores poros do solo. Esse valor é estimado pela interseção de uma reta paralela ao eixo da sucção num grau de saturação correspondente a 100% e uma reta estendendo a porção linear da curva de secagem. Com o aumento gradual da sucção, vazios de diâmetros menores vão se esvaziando, até que para elevados valores de sucção, somente os vazios muito pequenos ainda retêm água.

Para se definir a sucção de entrada de ar, pode-se usar o método de Brooks e Corey (1964) *in* Gerscovich (2001), que sugerem um procedimento gráfico, mostrado na Figura 12, a partir da interseção entre dois trechos lineares. Já Aubertin *et al.* (1998) *in* Gerscovich (2001) observaram que, em geral a sucção de entrada de ar está associada a

um valor de umidade correspondente a 90% da umidade saturada. Esta proposição baseia-se no fato de que ao atingir a sucção de entrada de ar, o ar presente nos vazios passa a formar canais contínuos. Na prática esta hipótese resulta em valores de sucção de umidade cerca de 25% mais altos do que os obtidos graficamente.

A umidade residual é definida como o limite inferior a partir do qual qualquer acréscimo na sucção matricial pouco afeta os valores de umidade, porém não existe um consenso sobre esse valor. A determinação experimental de tal valor pode ser feita, como indicado na Figura 12, a partir da interseção das tangentes à curva característica. Van Genuchten (1980) sugere associar a umidade residual a um valor de sucção de 1500kPa. A sucção correspondente à condição de teor de umidade nulo foi determinada experimentalmente em uma variedade de solos, tendo sido observado um valor da ordem de 10^6 kPa (Fredlund e Xing, 1994).

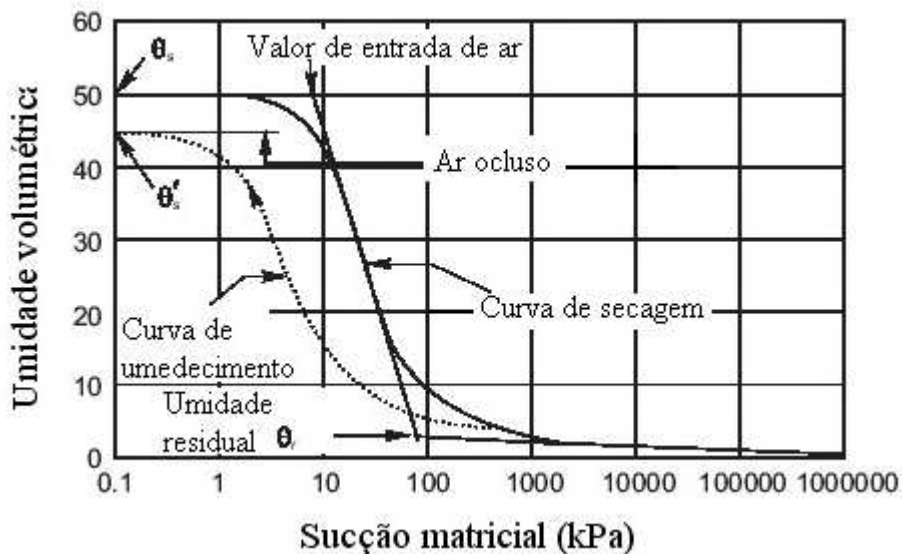


Figura 12: Característica da curva de retenção – Fonte: Fredlund e Xing, 1994

3.3.1 Fatores que Afetam a Curva de Retenção

Diversos são os fatores que influenciam a curva característica. Entre eles, estão a composição granulométrica, a composição mineralógica, a estrutura do solo e o efeito da temperatura.

Tipo de Solo

O tipo de solo influencia no valor de entrada de ar e na inclinação da curva de retenção. Essa inclinação refere-se ao trecho entre a sucção de entrada de ar e a sucção residual. Em geral, quanto maior a quantidade de argila, maior será o teor de umidade para o mesmo valor de sucção. Esse elevado valor do teor de umidade dos solos argilosos é explicado pelo fato que esses apresentam vazios muito pequenos e uma superfície específica grande. Essa elevada retenção de água no solo é devido ao efeito de capilaridade e também ao efeito proveniente das forças de adsorção. Solos argilosos apresentam uma relação gradual entre o teor de umidade e sucção. Já solos arenosos apresentam uma variação mais brusca dessa relação, uma vez que possuem poros com grandes dimensões quando comparados a solos argilosos. Quanto mais uniforme for o solo arenoso, mais brusca será a variação entre o teor de umidade e a sucção (Figura 13)

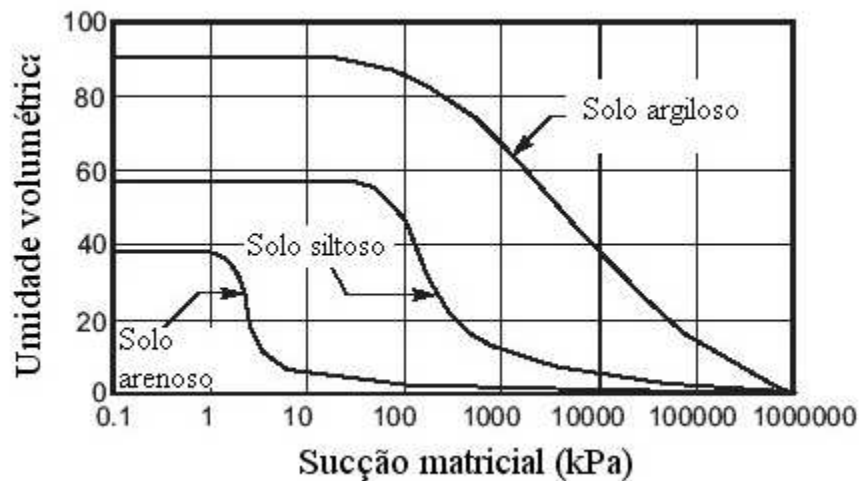


Figura 13: Representação esquemática das curvas de retenção para diferentes tipos de solo – Fonte: Fredlund e Xing, 1994

Composição Mineralógica

Esse fator influi na retenção de umidade nos solos argilosos pelo fato dos argilo-minerais apresentarem diferentes forças de adsorção. A natureza da superfície das partículas e os tipos de cátions trocáveis afetam a energia de adsorção. À medida que se aumenta o tamanho dos íons, a adsorção de água diminui.

Umidade de Moldagem

Um mesmo solo moldado com umidades diferentes apresenta diferentes curvas de retenção. Isso ocorre porque a forma de agregação das partículas ocorre de forma diferente para cada umidade.

A compactação no ramo úmido faz com que o solo apresente uma estrutura mais homogênea, obtendo uma capacidade de maior retenção de água, sendo controladas pela sua microestrutura. Para a moldagem no ramo seco, formam-se grandes poros interconectados. Já amostras moldadas na umidade ótima apresentam características intermediárias entre as duas situações anteriores.

Ciclos de Secagem e Umedecimento

A curva de retenção não é única para um mesmo corpo de prova, podendo ser diferente quando obtida por processo de secagem ou umedecimento. A variação da estrutura do corpo de prova durante a secagem e a ocorrência de ar ocluso durante o umedecimento são os dois principais fatores que interferem nesse fenômeno.

A história de variação de umidade deve ser considerada, pois o solo, em processo de secagem-drenagem, apresenta, na sua curva característica, para uma determinada umidade, valores de sucções maiores do que quando em processo de umedecimento.

Durante o processo de umedecimento, em oposição ao de secamento, o gás (normalmente ar) presente nos poros do solo é substituídos de forma contínua por líquido (geralmente a água). A água preencherá inicialmente os poros menores, enquanto que os maiores somente serão ocupados na fase final do processo, quando a sucção da água contida nos

poros é relativamente pequena, sendo essa é uma das causas da histerese. (Montañez, 2002)

Temperatura

A temperatura é um fator que também deve ser considerado, pois um aumento de seu valor pode causar uma diminuição na tensão superficial na interface solo-água, diminuindo a curvatura do menisco e, conseqüentemente, a sucção. Caso haja a existência de ar ocluso na massa de solo, esse aumento de temperatura forçaria um aumento no diâmetro dos poros devido à expansão do ar. Esse comportamento provocaria uma alteração da estrutura do solo, mudando o aspecto da curva característica.

3.3.2 Modelagem da Curva Característica

Várias proposições empíricas foram sugeridas para simular a curva característica. Algumas modelam a função que relaciona sucção com umidade (Gardner, 1985; Brooks e Corey, 1964; Farrel e Larson, 1972; Roger e Hornberger, 1978; William *et al.*, 1983; McKee e Bumb, 1987; Haverkamp e Parlange, 1986; Van Genuchten, 1980; Fredlund e Xing, 1994). Outras propõem a obtenção da curva característica a partir de frações granulométricas (Gosh, 1980; Rawls e Brakensiek, 1989). Essa última abordagem é bastante conveniente já que tais informações são rotineiramente determinadas experimentalmente (Gerscovich, 2001).

Os métodos que modelam a curva característica em função das frações granulométricas não consideram a influência do arranjo estrutural. Adicionalmente, ao relacionar diâmetros de vazio ao valor de sucção estes métodos não consideram a não uniformidade geométrica dos vazios, já que assumem que não existe uma relação unívoca entre sucção e vazio. De forma geral, os métodos pressupõem a inexistência de variação de volume de solo durante processos de umedecimento ou secagem (Gerscovich, 2001).

A Tabela 5 relaciona algumas das proposições para a modelagem da curva característica.

Tabela 5: Proposições para Modelagem da Curva Característica – Fonte: Gerscovich, 2001

Referência	Equação	Definição de Variáveis
Gardner (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + q \Psi^\pi}$	θ : teor de umidade normalizado $\theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$; θ , θ_r , θ_s , respectivamente os teores de umidade volumétrico, residual e saturado η , q : parâmetros de ajuste
Brooks e Corey (1964)	$\theta = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)$	θ : teor de umidade normalizado λ : índice de distribuição de diâmetro de vazios
Visser (1966)	$\Psi = a (\theta_s - \theta)^b / \theta^c$	a , b , c : parâmetros de ajuste θ_s : teor de umidade saturado (= porosidade)
Farrel e Larson (1972)	$\Psi = \Psi e^{\alpha(1-\theta)}$	α : parâmetro de ajuste
Roger e Hornberger (1978)	$\Psi = a (S_s - b)(S_s - 1)$	S_s : θ / θ_s a , b : parâmetros de ajuste Correção do moledo de Brooks e Corey (1964), na faixa de baixos valores de sucção
Van Genuchten (1980)	$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \Psi)^n} \right]^m$	θ : teor de umidade normalizado p , α , m , n : parâmetros de ajuste
Gosh (1980)	$\Psi = \Psi_b \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-\beta}$ $\beta = 2,619 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda} \right)^{0,2822} (\lambda_1 + 0,7)^{0,0625} \lambda_4^{0,1250} \left(5,91 \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2} + 1,1 \right)^{0,0625}$	θ_s : teor de umidade saturado (= porosidade) λ_1 : porcentagem de fração areia λ_2 : porcentagem de fração silte λ_3 : porcentagem de fração argila $\lambda_4 = 6,2 \sqrt{\lambda_2 / \lambda_1} - 5,91 \lambda_3 / \lambda_1 + \lambda_3$

William <i>et al.</i> (1983)	$\ln \Psi = a + b \ln \theta$	a, b: parâmetros de ajuste
Saxton <i>et al.</i> (1986)	$\Psi = a \theta^b$	a, b: parâmetros de ajuste
Haverkamp e Parlange (1986)	Umedecimento $\theta = \frac{n}{1 + \lambda} \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right) \dots \Psi > \Psi_b$	n: porosidade λ : parâmetro de ajuste θ_s : teor de umidade para condição de saturação ao natural (< porosidade)
	$\theta = n \left[1 - \left(\frac{\lambda}{1 + \lambda} \right) \left(\frac{\Psi}{\Psi_b} \right) \right] \dots \Psi \leq \Psi_b$ $\theta = \theta_s \dots \Psi \leq \Psi_b$	
	Secagem $\theta = n \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\lambda \left[1 - \frac{\Psi_b}{\Psi} \left(1 - \frac{\theta_s}{n} \right) \right] \dots \Psi > \Psi_b$ $\theta = \theta_s \dots \Psi \leq \Psi_b$	
McKee e Bumb (1987)	$\theta = \frac{1}{1 + e^{(\Psi - a)/b}}$	θ : teor de umidade normalizado a, b: parâmetros de ajuste
Rawls e Brakensiek (1989)	$\theta = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\lambda$	Ψ_b em cm H ₂ O n: porosidade (θ_s) C: porcentagem de argila (5%<C<60%) S: porcentagem de areia (5%<S<70%)
	$\Psi_b = e^{\begin{bmatrix} 5,3396738+0,1845038 (C)-2,438394546 (n)-0,00213853 (C^2)- \\ 0,04356349 (S)(n)-0,61745089 (C)(n)+0,00143598 (S^2)(n^2)- \\ 0,00855375 (C^2)(n^2)-0,00001282 (S^2)(C)+0,00895359 (C^2)(n)- \\ 0,00072472 (S^2)(n)+0,0000054 (C^2)(S)+0,50028060 (n^2)(C) \end{bmatrix}}$	
	$\lambda = e^{\begin{bmatrix} -0,7842831+0,017754 (S)-1,062498 (n)-0,000005304 (S^2)- \\ 0,00273493 (C^2)+1,11134946 (n^2)-0,03088295 (S)(n)+ \\ 0,00026587 (S^2)(n^2)-0,00610522 (C^2)(n^2)- \\ 0,00000235 (S^2)(C)+0,00798746 (C^2)(n)-0,00674491 (n^2)(C) \end{bmatrix}}$	

Fredlund e Xing (1994)	$\theta = C_{\Psi} \frac{\theta_s}{\left[\ln \left(e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right) \right]^m}$ $C_{\Psi} = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{\Psi_o}{\Psi_r} \right)}$	<p>a, m, n: parâmetros de ajuste e = base log neperiano (e = 2,718) $\Psi_o = 10^6$ kPa a = ψ_i (sucção do ponto de inflexão da curva característica) $m = 3,67 \ln (\theta_s / \theta_i)$ $n = \frac{1,31^{m+1}}{m \theta_s} 3,72s\Psi$ s = $\theta_i / (\psi_p - \psi_i)$ (s: inclinação)</p>
Aubertin et al. (1998)	$S_r = S_c + S_a (1 - S_c)$ $S_c = 1 - \left[\left(\frac{h_{co}}{\Psi} \right)^2 + 1 \right] e^{\left[-m \left(\frac{h_{co}}{\Psi} \right)^2 \right]}$ $S_a = C_{\Psi} \frac{a}{e^{1/3} \Psi^{1/6}} \Psi_{90}^{2/3}$ $C_{\Psi} = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{\Psi_o}{\Psi_r} \right)}$	<p>a, h_{co}, m: parâmetros de ajuste $h_{co} = 1$ a $2,5 \psi_b$ (cm H₂O) $S_r = \theta / \theta_s$ a $\approx 0,006$ (curva de dessaturação) $\Psi_o = 10^7$ cm H₂O $\Psi_r = 15 \times 10^3$ cm H₂O $\leftrightarrow \theta_r$ e: índice de vazios</p>

A representação analítica da curva de retenção empregada nesta dissertação foi a equação empírica proposta por Van Genuchten (1980), que assume a forma

$$\theta = \theta_R + (\theta_S + \theta_R) \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \Psi_m)^n} \right]^m \quad (3.4)$$

com $m = 1 - \frac{1}{n}$

onde:

θ – umidade volumétrica

θ_R – umidade volumétrica residual

θ_S – umidade volumétrica saturada

Ψ_m – potencial matricial

n, α – parâmetros de ajuste

3.4 Trincas no Solo

Durante o secamento do solo através da evaporação da água de sua estrutura, pode ocorrer o surgimento de microfissuras e/ou trincas, que, ao se formarem, podem mudar algumas características do solo, como, por exemplo, a condutividade hidráulica. A formação das trincas começou a ser estudada a partir do século 19, mas somente a partir do século 20 iniciou-se a modelagem de tal fenômeno.

Inicialmente, o estudo de trincas no solo foi realizado sob o ponto de vista da agricultura. Tempany (1917) *in* Marinho (1994) pesquisou a relação entre as trincas e a perda de água do solo, sendo o primeiro a observar a existência de uma fase de fissuras, onde, para corpos de provas saturados, a variação de volume era igual ao volume de água evaporado. Essa fase ocorre sem restrição devido à contração interna entre as partículas. Com a continuidade da contração, há um ponto onde o solo começa com uma fricção interpartículas, resistindo a formação de fissuras. A umidade do momento em que o solo pára de se contrair é chamada de limite de fissuras. O limite de fissuras e a variação total de volume foram observados por Tempany (1917) como sendo uma função da quantidade de colóides no solo.

O primeiro modelo de fissuras do solo a levar em conta a sucção foi o desenvolvido por Poulouvasilis (1970), citado por Marinho (1994). O gráfico de fissuras do solo foi apresentado em termos de volume de água no solo e sucção, como no Figura 14.

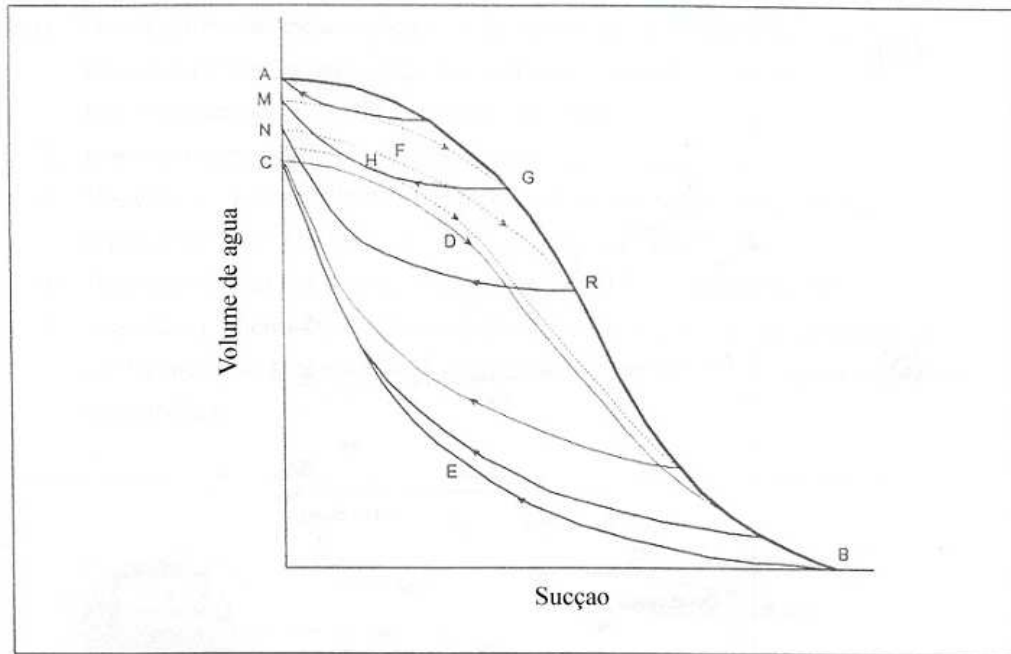


Figura 14: Representação do comportamento do solo durante ciclos de secamento e umedecimento – Fonte: Poulouvasilis, 1970 *apud* Marinho, 1994

A formação de trincas *in situ* é causada predominantemente pela perda de água por meio da evaporação através da superfície do solo, iniciando-se a partir do momento que o solo é exposto a atmosfera e por meio da evapotranspiração dos vegetais. A água contida nos poros evapora, causando poro-pressão negativa. Essa pressão negativa aumenta a pressão efetiva ocorrendo conseqüente redução de volume (Kleppe e Olson, 1985).

O fenômeno de ressecamento tende a causar mudanças irreversíveis em argilas, independente de sua composição. O ressecamento a elevadas temperaturas pode causar a remoção da água adsorvida e destruir as propriedades dos colóides e a capacidade expansiva das argilas (Unal e Trogol, 2001).

Se a perda de água do solo ocorrer de maneira gradual, o decréscimo de volume do solo praticamente termina quando o solo atinge o limite de trincamento. Neste ponto,

considera-se que o solo atinge seu menor valor de porosidade devido à evapotranspiração. Ao atingir este ponto, geralmente a umidade do solo atinge valor inferior a do limite de plasticidade (Unal e Trogol, 2001).

A capacidade de um solo ter trincas depende do tipo de solo, de sua mineralogia, de sua estrutura e da umidade inicial e final.

3.5 Balanço Hídrico

Uma forma tradicional de se analisar a presença de água no solo em aterros sanitários é através do cálculo do balanço hídrico (Figura 15). De forma simplificada, pode-se entender o balanço hídrico como sendo a soma das parcelas de água que entram no aterro e a subtração das parcelas que deixam o aterro em um dado período de tempo.

O balanço hídrico, tanto para o estudo do solo quanto da água, é baseado na relação existente entre a precipitação, a evapotranspiração, o escoamento superficial e o armazenamento de água no solo. A precipitação representa a recarga de água no sistema, enquanto a evapotranspiração representa a combinação entre a evaporação das plantas e da superfície do solo, incluindo a transpiração das plantas.

O processo de evapotranspiração é praticamente o transporte de água de volta para a atmosfera, sendo o inverso do processo de precipitação. O escoamento superficial representa o fluxo superficial da água diretamente da área de interesse. A capacidade de armazenamento representa a quantidade de água que pode ficar retida no solo e nos resíduos nos casos dos aterros sanitários.

Nesse processo, a mais importante fonte de entrada de água no sistema dá-se através da face superior do aterro, através da percolação pela camada de cobertura. Por essa razão, é de extrema importância o conhecimento do regime de chuvas na área do aterro.

A precipitação, em forma de chuva, cai sobre o solo. Este, por ser um meio poroso, absorve a água até que as camadas superiores atinjam a saturação. A partir desse momento, o excesso não infiltrado começa a escoar pela superfície. A água infiltrada no

solo sofre a ação da capilaridade e da gravidade, prosseguindo seu caminho até atingir a massa de resíduos, umedecendo-a de cima para baixo, alterando, assim, o perfil de umidade da célula. Mesmo após o encerramento da chuva, ainda há movimentação de água no interior da célula (IPT, 2000).

Parte da umidade presente no solo de cobertura é transferida para a atmosfera por evaporação direta ou por transpiração dos vegetais. A presença de vegetais na cobertura final promove a perda de água por evapotranspiração. Essa parcela é inferior à parcela que se perderia no solo sem cobertura vegetal. Por esse motivo, é interessante que haja vegetação sobre a camada de cobertura, pois é uma forma de minimizar a água que se infiltra na massa de resíduos.

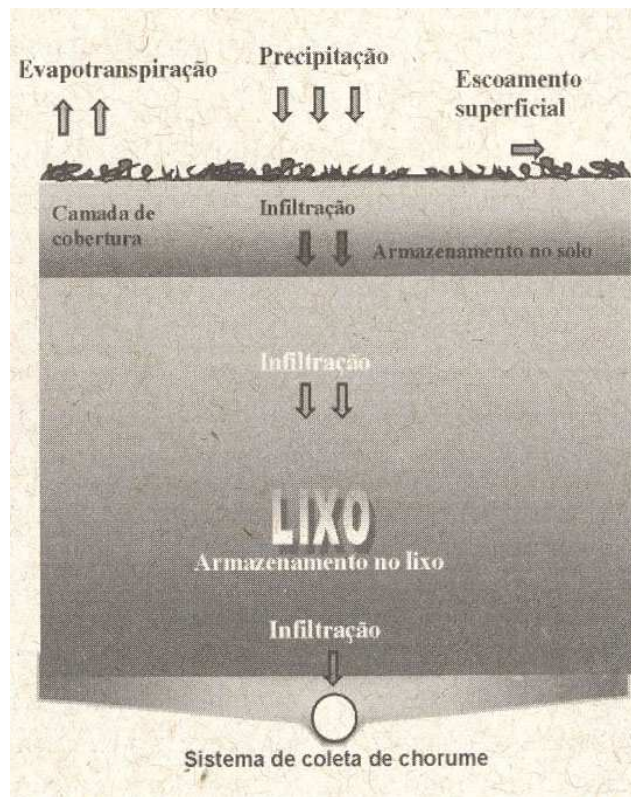


Figura 15: Esquema do balanço hídrico em um aterro – Fonte: IPT (2000)

Em muitos aterros, especialmente os brasileiros, a precipitação é a forma predominante de entrada de água no aterro, sendo por isso necessário projeto e construção de barreira efetiva, de vida útil longa, na superfície desses empreendimentos.

3.5.1 Infiltração de Água no Solo

Infiltração é a passagem da água da superfície para o interior do solo, sendo um processo que depende da água disponível, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes em seu interior.

Conforme ocorre a infiltração da água, as camadas superiores do solo umedecem, de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há aporte de água, o perfil de umidade tende a saturação em toda a profundidade. A superfície é o primeiro nível a saturar.

3.5.2 Lixiviado

O lixiviado é o produto da decomposição dos resíduos sólidos através de processos químicos como oxidação ou a decomposição de orgânicos feita por microorganismos.

O lixiviado é um líquido contaminante, cuja composição depende do tipo de resíduo depositado no aterro, podendo conter sais orgânicos e inorgânicos, metais pesados, pesticidas, químicos tóxicos, ácidos, vírus e patogênicos. De forma geral, o lixiviado é um líquido de característica ácida.

A quantidade de lixiviado gerado em um aterro depende de diversos fatores. Um deles é o teor de umidade presente na massa de resíduo. Essa água tenderá a solubilizar substâncias presentes nos resíduos sólidos, principalmente os de composição orgânica, dando origem a uma mistura líquida complexa que pode variar qualitativa e quantitativamente ao longo do tempo (IPT, 2000).

Outros fatores que influenciam a geração de lixiviado são: regime de chuvas, evapotranspiração, temperatura, composição, densidade e teor de umidade dos resíduos dispostos, condutividade hidráulica, idade e profundidade do aterro.

3.5.3 Importância e Problemas

O cálculo do balanço hídrico é importante no projeto de um aterro por alguns fatores, tais como:

- estimar a quantidade de lixiviado gerada;
- em regiões úmidas, onde a precipitação é maior que a evapotranspiração, sempre ocorrerá geração de lixiviado;
- caso haja uma estação de tratamento de lixiviado, é necessário o conhecimento do volume de lixiviado gerado no aterro;
- estimar, a longo prazo, a emissão de líquidos do aterro;
- projetar a camada de cobertura do aterro.

Existe grande dificuldade em fazer um cálculo preciso, tendo em vista fatores tais como:

- a não homogeneidade dos resíduos;
- distribuição desigual da quantidade de água na massa de resíduos;
- caminhos preferenciais da água dentro da massa de resíduos;
- camadas impermeáveis formadas pelos próprios resíduos;
- movimentação do gás que dificulta a percolação do lixiviado;
- mudanças nas características biológicas dos resíduos devido aos processos de decomposição (IPT, 2000), além dos processos de disposição, compactação e cobertura do aterro.

3.5.4 Fatores que Afetam o Balanço Hídrico

Precipitação

Esse é o fator que mais influencia no cálculo do balanço hídrico. Pode ser determinado de forma relativamente precisa, mas os dados devem ser obtidos no próprio local onde se encontra o aterro, pois variações, mesmo que em pequenas distâncias, podem conduzir a valores diferentes de precipitação do local em estudo.

Evaporação

A evaporação de superfícies cobertas por resíduos sólidos podem ser estimadas com a aplicação de equações empíricas, de instrumentos, como evaporímetros.

Na Alemanha, os cálculos de evaporação são feitos com o uso da temperatura do ar e da umidade, através do Método de HAUDE (Berger, 2000).

Superfície de Escoamento

Em áreas cobertas com lixo fresco, só ocorrerá escoamento superficial (*runoff*) em caso de chuva pesada e/ou nas encostas. Em áreas cobertas com solo, o escoamento superficial (*runoff*) depende de suas características.

Caso haja erosão do material, haverá maior infiltração, que pode levar a problemas de estabilidade da massa de lixo.

Armazenamento/Retenção

Armazenamento pode ser entendido como a capacidade da massa de lixo em reter a água em seus poros, podendo ser caracterizado como a capacidade de campo. Já a retenção seria caracterizada como o retardo na percolação do lixiviado através da massa.

De forma prática, pode-se dizer que ambos os fatores se referem a capacidade de armazenamento da massa de lixo. Essa capacidade de armazenamento depende da porosidade da massa de lixo e da quantidade de água presente no momento de disposição, da altura do aterro e de sua idade.

3.5.5 Tipos de Modelos

3.5.5.1 Modelos Estocásticos

Consiste em avaliar os dados medidos *in situ* e usá-los no aterro de interesse. Apresenta desvantagens, pois existem grandes diferenças de volume de lixiviado dentro do aterro, diferenças na composição e compactação do lixo, diferenças climáticas que influem diretamente no cálculo, além de que, muitas vezes, apenas a precipitação é considerada, sendo os demais fatores, tais como evaporação, armazenamento, escoamento superficial, entre outros, negligenciados (Münnich, 2006).

3.5.5.2 Modelos de Camadas

O aterro é dividido em camadas, e, para cada camada, é feito um cálculo de balanço hídrico. Sua desvantagem é que assume que apenas após a saturação da massa de lixo ocorre a infiltração. Adicionalmente, existem poucos dados físicos para a caracterização do lixo.

Um dos modelos mais conhecidos é o HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*), desenvolvido por Schroeder *et al.* (1994), sendo este programa determinístico recomendado pela EPA (Environmental Protection Agency/EUA). Deve-se observar que esse modelo é indicado para sistema de cobertura de aterro, mas não para ser usado diretamente na massa de lixo.

Trata-se de um modelo quase-bidimensional em que uma das dimensões é usada para calcular a percolação vertical e a outra, a drenagem lateral instalada sob o sistema de cobertura. Para a simulação dos processos hidrológicos, o modelo solicita dados de entrada dos parâmetros climatológicos e propriedades dos materiais envolvidos, além das características de projeto. Os processos hidrológicos externos são simulados através da alimentação de dados climáticos, como taxas médias diárias de precipitação, temperaturas médias mensais, umidades relativas trimestrais, velocidades médias do vento, radiação solar, crescimento vegetal e evapotranspiração, além das especificações do projeto para realizar a análise. Para o cálculo dos processos hidrológicos no interior do maciço, são

necessários dados referentes à geometria das camadas formadoras do aterro (Schroeder *et al.*,1994).

O modelo possibilita a entrada de dados referentes ao sistema de drenagem, tais como, declividades e distâncias máximas entre os drenos laterais, dados do sistema de cobertura, espessuras, descrição das camadas, área percentual do líquido utilizado na recirculação de percolado, infiltrações subsuperficiais, características do solo (capacidade de campo, ponto de murcha, condutividade hidráulica saturada, porosidade) e da geomembrana (densidade, defeitos de instalação, condutividade hidráulica saturada, transmissividade) (Schroeder *et al.*, 1994).

O balanço hídrico é calculado considerando-se a capacidade de campo de um solo ao estimar o acúmulo de água em uma de suas camadas. O modelo considera também o tempo decorrido entre a ocorrência de precipitação e a geração de percolado, que ocorre quando o percolado transpassa a camada de resíduos.

O programa HELP apresenta algumas limitações, tais como a desconsideração da contribuição de líquidos provenientes das reações de degradação do resíduo, levando a subestimação do volume de lixiviado gerado. Os efeitos de capilaridade na taxa de fluxo também são desconsiderados; logo, a drenagem não saturada ocorre a partir do momento em que a umidade da camada alcança a capacidade de campo (Schroeder *et al.*, 1994).

O programa também despreza os caminhos preferenciais que podem levar ao aumento da condutividade hidráulica, tais como eventuais trincas no solo causadas por impacto de caminhões pesados e tratores. Também desconsidera o fluxo dos bolsões de gás comuns no interior dos aterros, outro caminho preferencial.

3.5.5.3 Modelo de Balanço

É feito um balanço para todo o aterro, e os resultados obtidos na simulação são comparados aos dados de volume de lixiviado obtidos em campo. Sua desvantagem é a escassez de dados físicos de comportamento da massa de lixo, além de grandes diferenças no volume de lixiviado dentro do aterro.

Um exemplo que está publicado em Yuen *et al.* (2001) propõem modelos de balanço hídrico para duas situações, o aterro antes de receber a cobertura final, isto é, antes do seu fechamento, e após o seu fechamento. Para a segunda hipótese, duas situações são levadas em conta, a recirculação de lixiviado e o bombeamento de lixiviado para fora do reservatório. Esse trabalho foi realizado em escala real, num aterro de resíduos sólidos em Melbourne, Austrália.

Alguns parâmetros climáticos, tais como evapotranspiração, escoamento superficial (após o fechamento do aterro), drenagem lateral e percolação, foram calculados no trabalho de Yuen *et al.* (2001) com o uso de outros programas ou modelos. Deve-se lembrar que, para a hipótese do modelo antes do fechamento, o escoamento superficial foi desconsiderado, devido a dificuldade de coleta devido a variação da superfície durante a fase da célula aberta (Yuen *et al.*, 2001).

4. ADIÇÃO DE BENTONITA AO SOLO UTILIZADO COMO CAMADA DE COBERTURA

A camada de cobertura tem várias funções, já descritas anteriormente, e pode-se destacar o fato de que ela deve prevenir a infiltração de precipitação. A infiltração é afetada pela precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial e sub-superficial, podendo ser reduzida com a presença de uma camada de baixa condutividade hidráulica abaixo do solo de cobertura.

Existem diversos materiais naturais e sintéticos que podem ser utilizados para a construção de camadas de impermeabilização em aterros de resíduos. A escolha do material a ser usado deve levar em consideração as condições da área, o período de armazenamento, o tipo de material a ser depositado e aspectos econômicos. O método de construção assim como a vida útil e o custo do material também devem ser levados em conta.

A condutividade hidráulica do material compactado utilizado deve ser inferior aos limites recomendados. A espessura da camada deve ser tal que não sofra danos mecânicos. A resistência do material a ataques químicos e físicos também deve ser analisada (Hoeks e Ryhiner, 1989).

Existem alguns fatores que influenciam a condutividade hidráulica da camada de cobertura, caso esta seja argilosa, e que devem ser levados em consideração durante a escolha do sistema de camada de cobertura a ser utilizado. Elsbury *et al.* (1990) procuraram listar esses fatores em ordem de influência, porém não foi possível por dois motivos: a complexidade da inter-relação entre os fatores listados e a insuficiência de dados para fazer essa hierarquização de importância. Então, foi desenvolvida uma lista, dividida em três estágios operacionais da construção da camada: o estágio de desenvolvimento do projeto, de construção e após a construção, com os principais fatores que influenciam cada estágio. Essa lista encontra-se a seguir (Tabela 6). Cada um desses fatores afeta a condutividade hidráulica de uma forma, descritas no citado trabalho.

Tabela 6: Fatores que influenciam a condutividade hidráulica da camada de argila compactada – Fonte: Elsbury *et al.*, 1990

Grupo Principal	Fator Chave
Estágio de Projeto	
Tipo de solo	Trabalhabilidade do solo Granulometria Potencial de inchamento
Outras considerações	Espessura da camada Estabilidade de fundação Esforços devido ao carregamento
Estágio de Construção	
Objetivos básicos da compactação	Destruição dos grumos de solo
Escolhas importantes (para obtenção dos objetivos básicos da compactação)	Umidade do solo Tipo e peso do compactador Número de passadas e camadas Tamanho dos grumos do solo
Elementos de suporte	Grau de saturação Densidade seca
Outras considerações	Preparação do solo Garantia da qualidade de construção
Estágio após a construção	
Influências ambientais	Ressecamento Congelamento

Em casos em que o solo que será utilizado como camada de cobertura de um aterro de resíduos não atenda às recomendações necessárias a essa finalidade, a adição de bentonita a ele pode ser uma boa opção (Hoeks *et al.*, 1987).

Ao se adicionar bentonita ao solo, a condutividade hidráulica da mistura depende do tipo de bentonita utilizada, da porcentagem adicionada ao solo e da granulometria do solo e do

grau de compactação. A qualidade da água que infiltra pela camada também pode influenciar a sua condutividade hidráulica (Hoeks *et al.*, 1987).

O aumento da energia de compactação em campo, obtida através do tipo de compactador utilizado, pode levar a uma condutividade hidráulica *in situ* 3 a 5 vezes menor que ensaios obtidos em laboratório (Gouveia e Oliveira, 2005). Nesse estudo, foi utilizada uma areia siltosa, a qual foi adicionada 4% de bentonita. Também foi observado não haver ganho com compactações superiores a 95% de Proctor Normal, obtidas após a quarta passagem do tipo de compactador utilizado no estudo (compactador de rolo plano, com auto propulsor, de 25 toneladas).

Hoeks *et al.* (1987) percebeu que o tempo também afeta a condutividade hidráulica. Nesse estudo, foi observado que a condutividade hidráulica ainda decresce por um período de 2-3 meses. Uma explicação seria a expansão da bentonita que ocorre por um certo período de tempo. Outra seria o fechamento dos poros devido a erosão interna das partículas de bentonita. Em aplicações práticas, recomenda-se a realização de ensaios de condutividade hidráulica durante um período de 3-4 semanas após a compactação.

Hoeks *et al.* (1987) constatou que, para as condições de seu estudo, a adição de 5% de bentonita reduz a condutividade hidráulica saturada para a ordem de 5×10^{-10} m/s, valor este suficientemente baixo para ser usado como camada de cobertura. Esse valor pode chegar a 1×10^{-10} m/s após o período de 2-3 meses, devido a expansão da bentonita, citada anteriormente.

Essa mistura de solo com bentonita é mais permeável ao lixiviado que à água limpa. Logo, ao ser utilizada como camada de impermeabilização de fundo deve conter maior porcentagem de bentonita que quando utilizada como camada de cobertura, impedindo, assim, a infiltração do lixiviado no subsolo (Hoeks *et al.*, 1987).

Outro importante fator a ser levado em conta durante o desenvolvimento de um projeto de sistema de cobertura é a formação de trincas, pois isto pode até inutilizá-lo. O

fenômeno de trincamento decorrente do ressecamento do solo foi primeiramente investigado por Tempany (1917) *in* Sitharam *et al.* (1995). Seguindo este estudo, Haines (1923) *in* Sitharam *et al.* (1995) fez a distinção de diferentes fases do fenômeno de trincamento. Alguns anos depois, Stirk (1953) *in* Sitharam *et al.* (1995) distingue quatro fases durante o processo de trincamento por perda de água, onde o primeiro é denominado de trincamento estrutural, o segundo, trincamento normal, seguido do trincamento residual e da fase onde não há trincamento.

O fenômeno de trincamento do solo em consequência do ressecamento inicia-se a partir do momento que o solo é exposto a atmosfera. A água contida nos poros evapora, causando poro-pressão negativa. Essa pressão negativa aumenta a pressão efetiva ocorrendo conseqüente redução de volume. Como a poro-pressão atua em todas as direções, o solo tende a trincar em todas as direções (Kleppe e Olson, 1985).

A perda de umidade causa o desenvolvimento de trincas e, ao se formarem as primeiras trincas, há mais perda de umidade, causando grande propagação das mesmas (Hewitt e Philip, 1999). Essas trincas podem causar o aumento definitivo da condutividade hidráulica.

As trincas podem ser representadas relacionando-se variação volumétrica específica à quantidade de água presente no solo, que é influenciada principalmente pelas características expansivas da argila (Boivin *et al.*, 2004).

O fenômeno das trincas pode ser dividido em duas fases. Inicialmente, a curva de trincamento tem inclinação de 1:1, a partir do ponto de expansão máxima da matriz porosa, até o ponto onde ocorre a entrada de ar.. Nesse ponto, o solo mantém-se saturado, e cada centímetro cúbico de perda de água corresponde a um centímetro cúbico de decréscimo de volume. Após a entrada de ar, o fenômeno de trincamento diminui, chegando-se ao limite de trincamento (Boivin *et al.*, 2004).

A curva de trincamento geralmente tem a forma de uma sigmóide, com parte linear e curvilínea separada por pontos de transição, como pode ser visto no gráfico abaixo (Figura 16).

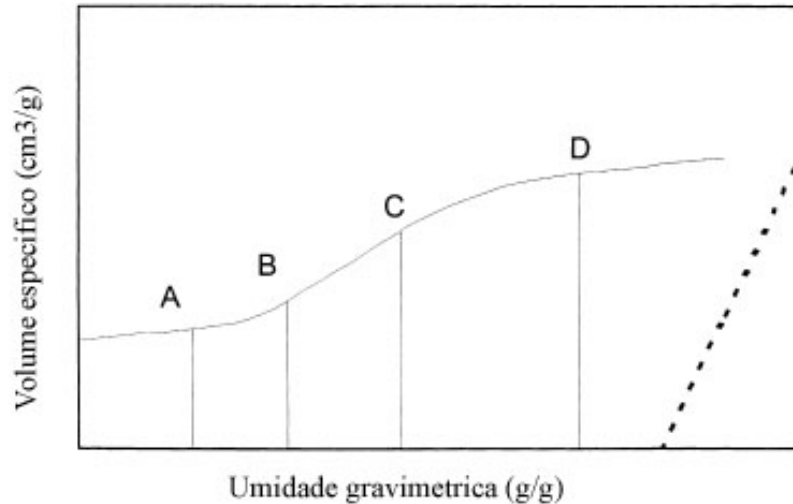


Figura 16: Curva de trincamento do solo e pontos de transição, de acordo com o modelo exponencial de trincamento (Braudeau *et al.*, 1999 *apud* Boivin *et al.*, 2004)

A, B, C e D são pontos de transição entre as fases linear e exponencial. A é definido como limite de trincamento, B, como ponto de entrada de ar, C, limite da macroporosidade, e D, ponto máximo de inchamento/expansão. A linha pontilhada representa a linha de saturação ou de carregamento.

Nos estudos realizados por Boivin *et al.* (2004), os pontos A, B e D podem ser considerados como valores estimados para limite de trincamento, ponto de entrada de ar e ponto máximo de expansão, respectivamente, estando de acordo com os valores obtidos através da aplicação do modelo exponencial de trincamento proposto por Braudeau *et al.* (1999) *in* Boivin *et al.* (2004).

Fredlund *et al.* (2002) propõe uma estimativa para a construção da curva de trincamento através do uso de alguns parâmetros, tais como porosidade, grau de saturação e sucção. Tal estimativa pode ser encontrada de forma aprofundada em tal trabalho.

A variação volumétrica de trincamento é como uma percentagem do volume de sólidos, como descrito a seguir (Sitharam *et al.*, 1995):

$$\frac{\Delta V}{V_s} = \frac{V_1 - V_2}{V_s} * 100 \quad (4.1)$$

onde:

$\frac{\Delta V}{V_s}$: variação volumétrica de trincamento expressa em %

V_1 : volume inicial

V_2 : volume final, após ressecamento

V_s : volume de sólidos

Em estudo realizado por Sitharam *et al.* (1995) foi observado existir comportamento similar entre o padrão de variação volumétrica de trincamento e a fase de trincamento normal, para solos saturados, visto que estas curvas eram paralelas. Além disso, também foi observado que o limite de trincamento aparentemente não é afetado pelo padrão das trincas, tanto para solos saturados quanto não-saturados.

Foi observado que os solos apresentavam diferentes propriedades relacionadas ao trincamento de acordo com o tipo e porcentagem de argila do solo (Boivin *et al.*, 2004).

A curva de trincamento e de retenção de água podem ser calculadas a partir da mesma equação, utilizando-se o modelo exponencial de trincamento (1999) ou de Van Genuchten (1980) (Boivin *et al.*, 2006). A equação de Van Genuchten apresenta valores satisfatórios, porém não reproduz bem o trecho linear e a inclinação de ambas as curvas (de trincamento e de retenção de água) e a parte assimétrica da curva de trincamento. Já o modelo exponencial de trincamento ajusta-se melhor tanto a curva de trincamento quanto a curva de retenção de água do solo (Boivin *et al.*, 2006).

Deve-se lembrar que, para solos nos quais a umidade é superior à umidade referente ao ponto B (entrada de ar), a inclinação inicial da curva de trincamento, denominada de normal ou básica (Mitchell, 1992 *apud* Boivin *et al.*, 2004), geralmente, não é igual a um.

Após o ressecamento, se o solo for umedecido com água, esse expandirá e fechará as trincas, tornando a camada novamente íntegra. Porém se outro tipo de líquido penetrar nas trincas ou algum material ficar ao longo dessas, após o processo de re-umedecimento, podem resultar zonas de condutividade hidráulica elevada. Ciclos de umedecimento e secamento podem gerar propagação de trincas profundas (Kleppe e Olson, 1985). Deve-se observar que tal comportamento depende do tipo de bentonita utilizado.

Se o fluido que penetrar numa trinca não for absorvido pelo solo, as trincas podem permanecer abertas, alterando a sua condutividade hidráulica do solo (Kleppe e Olson, 1985).

No caso de solos compactados, observa-se que o aumento das trincas está relacionado ao aumento da umidade de compactação. Para solos compactados com umidade baixa, o grau de saturação é baixo e a poro-pressão negativa tem pouco impacto na pressão efetiva. Já solos compactados com elevada umidade, o elevado grau de saturação conduz a uma mudança substancial na pressão efetiva (Kleppe e Olson, 1985).

A formação de trincas, além de estar relacionada à umidade de compactação, também está relacionada à quantidade de bentonita adicionada ao solo.

A bentonita, por ser um material expansivo, isto é, com capacidade de inchamento, é indicada nos casos em que se deseja evitar a formação de trincas, ou torna-las mínimas, com facilidade de recuperação do solo.

Tay *et al.* (2001) realizaram estudos com adição de 10 e 20% de bentonita e umidade de compactação variando de 8 a 32%. Os corpos de prova foram secos ao ar, e, durante esse período, foi observada a formação de trincas.

Os corpos de prova com adição de 10% de bentonita (em peso seco) ao serem compactados com 15% de umidade não apresentaram trincas visíveis, e os compactados com 20% de umidade, apenas trincas pequenas. Os corpos de prova com adição de 20%

de bentonita, ao serem compactados com 14% de umidade, não apresentaram trincas em decorrência do processo de ressecamento, e os compactados com 15%, apenas trincas pequenas. A conclusão do estudo de Tay *et al.* (2001) é que há um aumento da formação de trincas com o aumento da umidade de compactação, sendo que os ensaios realizados com 20% de bentonita são mais sensíveis a esse aumento. Não se notou efeito da energia de compactação nesse estudo.

Também nesse estudo foi preparado um corpo de prova com adição de 10% de bentonita compactado com umidade de 30%. Esse corpo de prova foi seco ao ar, notando-se a formação de trincas. Depois de seco, o mesmo foi, então, inundado, passando por um novo ciclo de secagem. Essa inundação resultou em uma regeneração aparente da maioria das trincas visíveis após a primeira secagem. Porém, após a segunda secagem, as trincas reapareceram maiores que anteriormente, e também houve o surgimento de novas trincas, bem finas, entre as originais.

O tipo de bentonita também influencia o processo de trincas. A maior parte das bentonitas comerciais é do tipo sódica, e relativamente nova, as bentonitas calcárias (Egloffstein, 2001).

Nos estudos de Egloffstein (2001), durante os quatro primeiros ciclos de ressecamento ao ar, as propriedades da bentonita sódica, com uma maior capacidade de expansão permanecem, enquanto observa-se uma mudança dessas propriedades na bentonita calcária a partir do quinto ciclo de secagem.

Nas condições nas quais foram realizados os ensaios, as bentonitas calcárias não se mostraram capazes da completa regeneração das trincas causadas por ressecamento extremo. Esse tipo de ressecamento deve ser evitado através da adoção de medidas como cobertura suficiente e controle do balanço hídrico (Egloffstein, 2001).

A bentonita sódica tem maior capacidade de regeneração também em relação a danos causados durante a construção da camada, em relação à bentonita calcária (Egloffstein, 2001).

A adição de bentonita também influencia a curva característica do solo. A partir dessa curva, pode-se entender o comportamento de solos parcialmente saturados. A curva característica de solos compactados pode ser influenciada por outros fatores, tais como umidade de compactação, densidade inicial do solo, tipo de solo, mineralogia, histórico de pressão e método de compactação, entre outros.

Em estudo realizado por Montañez (2002) utilizando solo arenoso com adição de bentonita, diversos corpos de prova foram compactados com diferentes umidades iniciais, porém todos com valores próximos ao valor do peso específico seco. O resultado de todos os ensaios de ressecamento tende a seguir uma relação comum. E durante o umedecimento, também existe tal relação, confirmando a histerese da curva de secamento e umedecimento.

Ainda no estudo realizado por Montañez (2002), em respeito à variação volumétrica de diversos corpos de prova, foi observado que durante o primeiro secamento não houve qualquer variação volumétrica. Já durante o primeiro ciclo de umedecimento houve um significativo aumento de volume. Para valores de sucção menores que 1000 kPa o aumento do volume foi mais perceptível, e o maior aumento volumétrico ocorreu para valores de sucção inferiores a 100 kPa. No segundo ciclo de secamento, há variação volumétrica até que o valor de saturação residual seja alcançado, e a partir deste ponto, não houve mais registro de variação volumétrica. Também foi observado haver influencia do tamanho do ciclo de secamento-umedecimento na variação de volume.

A quantidade de bentonita adicionada ao solo provoca um ligeiro deslocamento da curva característica do solo, em comparação ao solo sem adição de bentonita, e o grau de saturação residual aumenta com o aumento da adição de bentonita (Montañez, 2002).

As características da curva de retenção de água do solo são uma combinação da curva de retenção de seus componentes. No estágio inicial de secamento a presença da areia altera a curva de retenção da bentonita, resultando em valores de sucção mais elevados que os correspondentes aos da bentonita, para os mesmos valores de umidade. Conforme o secamento prossegue, a curva de secamento da mistura tende a se aproximar a curva de secamento da bentonita, e eventualmente, ambas podem coincidir. O resultado experimental sugere que quando a sucção atinge valores entre 1000 e 3000 kPa, toda a água presente na mistura está associada a bentonita. Para valores de sucção inferiores que esses valores, a água presente está associada aos dois componentes da mistura, a bentonita e a areia (Montañez, 2002).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, é feita a apresentação da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Nova Iguaçu, local de onde foi retirado o material estudado. É feita uma caracterização do local através de um breve histórico. Em seguida, é realizada a caracterização do solo local através da curva granulométrica, dos limites de Atterberg, da condutividade hidráulica e da curva característica. Também é apresentada uma breve caracterização dos resíduos recebidos na CTR Nova Iguaçu, bem como é mostrada uma revisão de valores de condutividade hidráulica obtidos em diversos trabalhos.

Ainda neste capítulo, descreve-se o Permagel, um tipo de bentonita utilizada neste trabalho. São mostrados a curva granulométrica, os limites de Atterberg e a condutividade hidráulica do material. A partir desses dados, indica-se como foi realizada a escolha da porcentagem de bentonita a ser utilizada nos ensaios, mostrando-se os ganhos obtidos com essa adição.

Em seguida, explica-se o funcionamento do equipamento desenvolvido para este trabalho e os aparelhos utilizados no ensaio de ressecamento livre, além de mostrar, em detalhes, o processo de montagem desse ensaio. Ao final do capítulo, são tecidas considerações relacionadas ao equipamento desenvolvido, que se recomenda sejam seguidas em ensaios futuros.

O solo utilizado nos ensaios foi cedido pela Central de Tratamento de Resíduos Nova Iguaçu, administrada pela S.A. Paulista. A Fundação Coppetec vem realizando ensaios com este material a pedido da CTR Nova Iguaçu. Esse material é utilizado como camada de cobertura após o fechamento do aterro. A bentonita (Permagel) utilizada foi cedida pela Bentonit União Nordeste S.A., tendo em vista contrato de pesquisa com a Fundação Coppetec, através de projeto coordenado pelo professor Cláudio Mahler.

5.1 Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Nova Iguaçu

5.1.1 A CTR Nova Iguaçu

O aterro sanitário de Nova Iguaçu, conforme mostra-se nas Figuras 17 e 18, está localizado no município de Nova Iguaçu situado na Baixada Fluminense, parte da região metropolitana do Rio de Janeiro, distando aproximadamente 50 km do Rio de Janeiro, tendo sido construído de acordo com as recomendações brasileiras, evitando a contaminação das águas e solos.



Figura 17: Mapa de localização de Nova Iguaçu e da CTR Nova Iguaçu



Figura 18: Aterro CTR Nova Iguaçu – Fonte: Google Earth

A CTR Nova Iguaçu está localizada nas latitudes $22^{\circ} 30'$ e $23^{\circ} S$ e meridianos de $43^{\circ} 00'' W$. Esse aterro ocupa uma área de $1.200.000m^2$, recebendo resíduos urbanos, de serviços de saúde e de construção civil. É composto de célula para aterro sanitário e industrial, e também unidade de tratamento de resíduos de serviços de saúde, unidade de tratamento de chorume, aproveitamento energético de biogás, unidade de britagem de entulho e unidade de gerenciamento de resíduos industriais. Inaugurado em fevereiro de 2003, o aterro é totalmente licenciado, sendo uma concessão de 20 anos nos moldes de parceria público-privada (PPP).

Sabe-se que os RSU dispostos neste aterro compreendem lixo industrial, domiciliar e público, mas existem variações regionais e sazonais que afetam sua composição. A Figura 19 ilustra a construção do aterro.



Figura 19: Vista construção CTR Nova Iguaçu – Fonte:

http://www.ecopop.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?inford=134&sid=10&from_info_index=6

5.1.2 Solo da CTR Nova Iguaçu

Foram realizados ensaios de caracterização do solo, de acordo com a NBR 7181/84. A partir desses ensaios, o solo foi caracterizado como sendo uma areia silto-argilosa, visto que, em sua composição, há mais de 50% (no caso, 51,5%) de areia (vide Figura 20 e Tabela 7). A seguir, são apresentados os resultados obtidos.

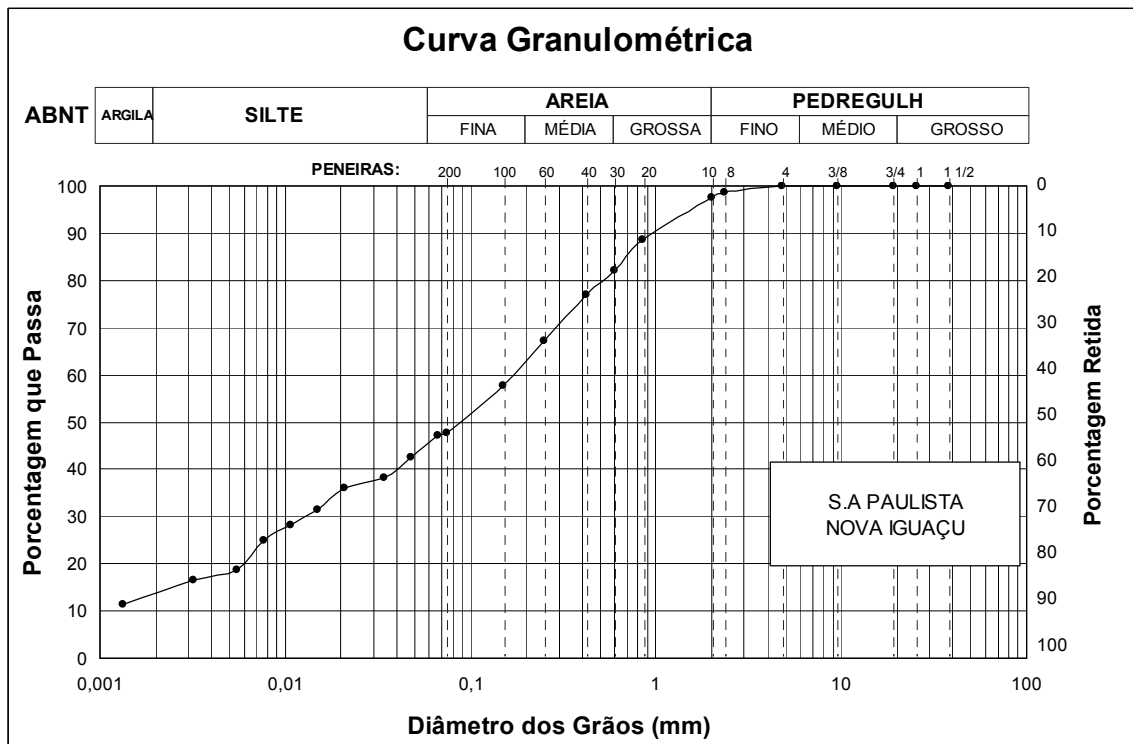


Figura 20: Curva granulométrica do solo da CTR – Nova Iguaçu

Tabela 7: Composição granulométrica do solo da CTR - Nova Iguaçu

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
13,8	31,8	16,8	19,3	15,4	2,9

A densidade real dos grãos para esse solo foi determinada como sendo 2,67. Também foram realizados ensaios para a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade para esse solo (Tabela 8), de acordo com a NBR 6459/84 e NBR7180/84, respectivamente.

Tabela 8: Características geotécnicas do solo da CTR – Nova Iguaçu

Característica	Valor
Limite de liquidez (%)	44,5
Limite de plasticidade (%)	21,12

A plasticidade do solo é uma propriedade que consiste na maior ou menor capacidade de trabalhabilidade do solo, isto é, serem moldados, sob certas condições de umidade, sem variação de volume. Quando um solo com umidade muito elevada perde água através da evaporação até endurecer, mas sem perder a capacidade de fluir, sendo moldado facilmente e conserva sua forma, diz-se que este é o limite de liquidez, encontrando-se o solo no estado plástico. Se a perda de água continuar, chega-se ao limite de plasticidade, momento no qual o solo desmancha ao ser trabalhado. Continuando a secagem, ocorre a passagem do solo para o estado sólido. O limite entre esses dois estados é chamado de limite de contração (Pinto, 2000).

O resultado do ensaio de compactação do tipo Proctor Normal, realizado de acordo com a NBR7182/86, apresentou uma umidade ótima de, aproximadamente, 24,5%, correspondendo ao peso específico aparente seco de 1,52 g/cm³ (Figura 21).

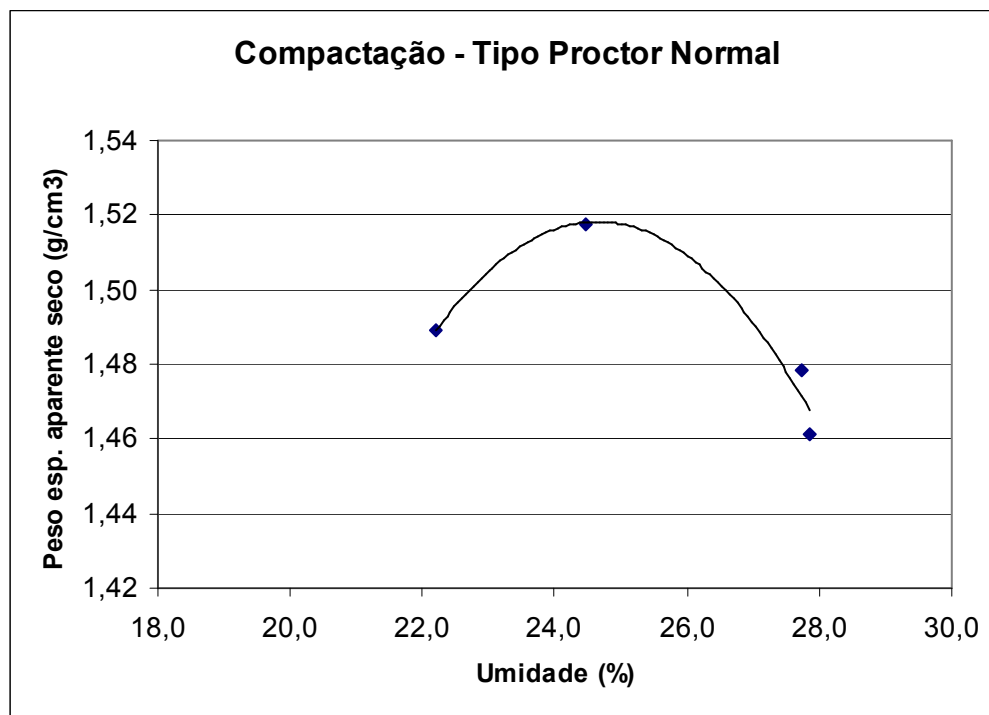


Figura 21: Gráfico de compactação do tipo Proctor normal para o solo SA Paulista

A condutividade hidráulica desse solo, em ensaio realizado a carga variável, é da ordem de 10^{-8} m/s, sendo um valor baixo, mas não suficiente para que esse solo possa ser

utilizado como camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos. Para que seja alcançado o valor recomendado, sugere-se a adição de bentonita, que será descrita posteriormente (item 5.3).

Ferreira (2006) apresenta resultados de curvas de retenção de água para cinco amostras indeformadas da mesma jazida (da CTR Nova Iguaçu), porém de pontos de coletas distintos dos do presente trabalho. Tais ensaios foram realizados pela EMBRAPA Solos.

Foram utilizadas cinco amostras indeformadas (AM1, AM2, AM3, AM4 e AM5) para o ensaio no aparelho de Richards. As amostras do solo são saturadas e submetidas a uma determinada pressão, até atingir a drenagem máxima da água contida nos seus poros, correspondente à tensão aplicada. Determina-se, então, a umidade da amostra. As tensões usualmente utilizadas são: 0,01; 0,033; 0,1; 0,5 e 1,5 MPa (Ferreira, 2006).

As curvas de retenção de água ou curvas características foram construídas com dados obtidos segundo a metodologia proposta por Richards e Weaver (1994), conforme a Figura 22 (Ferreira, 2006).

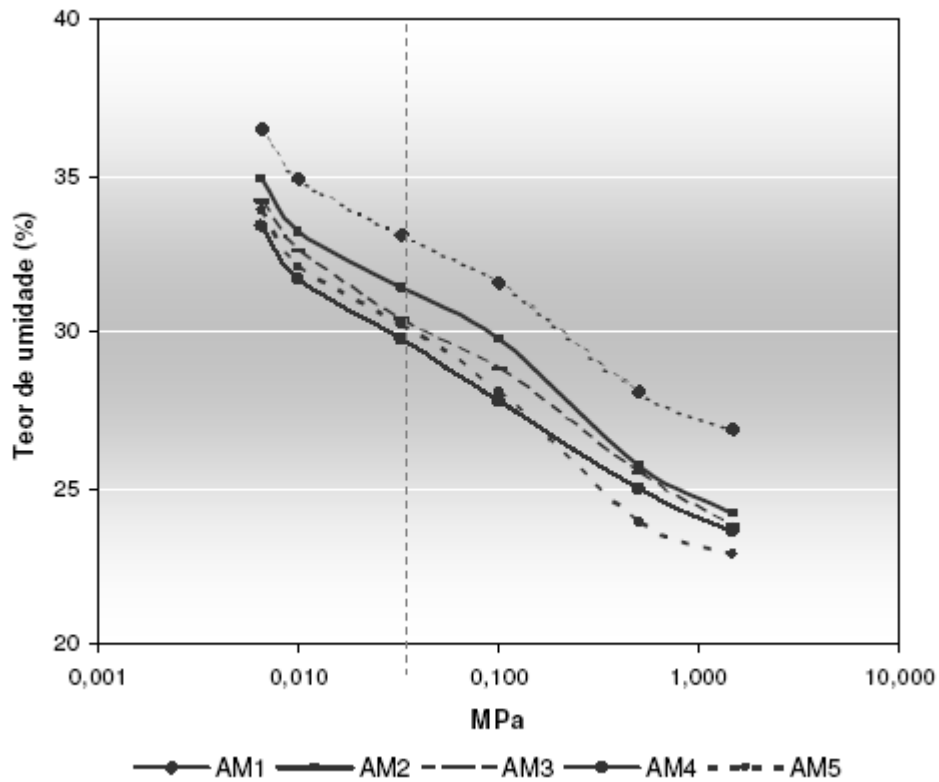


Figura 22: Curvas de retenção de água no solo – Fonte: Ferreira (2006)

A partir da curva característica, foi determinada a capacidade de campo conforme a metodologia de Cassel e Nielsen (1986), utilizando-se o potencial matricial de 0,033MPa. Esses dados estão apresentados na Tabela 9, sendo o valor médio (X) de teor de umidade de 30,98%, desvio padrão (s) de 2,65 % e um coeficiente de variação (s/X) de 0,09.

Tabela 9: Capacidade de campo do solo SA Paulista – Fonte: Ferreira (2006)

Amostra	Capacidade de Campo (%)
AM1	33,1
AM2	31,4
AM3	30,4
AM4	29,8
AM5	30,2
$X \pm s$	$30,98 \pm 2,65$
s/X	0,09

5.1.3 Características dos Resíduos da CTR Nova Iguaçu

A CTR Nova Iguaçu foi inaugurada em fevereiro de 2003 e recebe diariamente 2000 toneladas de resíduos sólidos urbanos e resíduos industriais (classes IIA e IIB). Nem a CTR Nova Iguaçu nem a Prefeitura do município possuem uma composição gravimétrica dos RSU coletados. O peso específico para os resíduos dispostos na CTR foi determinado por meio de ensaios (método da cava – Figura 23), realizados por Silveira (2004), encontrando-se o valor de $9,15 \text{ kN/m}^3$.



Figura 23: Determinação do peso específico dos resíduos pelo método da cava –
Fonte: Silveira (2004)

Esse valor é compatível com os sugeridos por Kaimoto e Cepollina (1996) citado em Schueler (2005). Com base nesse estudo para aterros sanitários no Brasil, pode-se adotar valores entre 5 e 7 kN/m³ para aterros com elevada taxa de decomposição, com resíduos novos, não decompostos e pouco compactados. Após a compactação com tratores ou rolo compactador e após ocorrência de recalques no maciço de RSU, adotam-se valores entre 9 e 13 kN/m³.

O teor de umidade é uma característica influenciada pelo teor de umidade inicial, condições climáticas, condições de drenagem interna e superficial do maciço, composição dos RSU e profundidade. Em estudo realizado por Carvalho (2006), no aterro sanitário de Santo André-SP, foram encontrados valores de umidade entre 20 e 76%. Ainda segundo Carvalho (2006), valores para capacidade de campo variam entre 22,71 e 45,15%, com valor médio de 37,51%, não apresentando um comportamento característico observável.

A condutividade hidráulica é uma característica influenciada pela presença de matéria orgânica, visto que esta é a responsável pelo aumento percentual de partículas finas e diminuição do índice de vazios com o passar do tempo. Na Tabela 10, são apresentados valores de condutividade hidráulica de diversos estudos.

Tabela 10: Condutividade hidráulica para RSU de diversos estudos –

Fonte: Schueler, 2005

Pesquisador	Condutividade Hidráulica (m/s)
FUNGAROLI <i>et al.</i> (1979)	10^{-5} a 2×10^{-4}
KORIATES <i>et al.</i> (1983)	$3,15 \times 10^{-5}$ a $5,1 \times 10^{-5}$
OWEIS & KHERA (1986)	10^{-5}
OWEIS <i>et al.</i> (1990)	10^{-5} / $1,5 \times 10^{-4}$ / $1,1 \times 10^{-5}$
LANDVA & CLARK (1990)	10^{-5} a 4×10^{-4}
GABR & VALERO (1995)	10^{-7} a 10^{-5}
BLENGINO <i>et al.</i> (1996)	3×10^{-7} a 3×10^{-6}
MANASSERO (1990)	$1,5 \times 10^{-5}$ a $2,6 \times 10^{-4}$
BEAVEN & POWRIE (1995)	10^{-7} a 10^{-4}
BRANDL (1990)(1994)(1994)	3×10^{-7} a $5 \times 10^{-6} / 10^{-6}$ a $5 \times 10^{-4} / 3 \times 10^{-8}$ a 2×10^{-6}
MARIANO & JUCÁ (1998)	$1,89 \times 10^{-8}$ a $4,15 \times 10^{-6}$
CEPOLLINA <i>et al.</i> (1994)	10^{-7}
SANTOS <i>et al.</i> (1994)	10^{-7}
CARVALHO (1999)	5×10^{-8} a 8×10^{-6}
ERLICH <i>et al.</i> (1994)	10^{-5}
AGUIAR (2002) NO RSU	$3,9 \times 10^{-4}$ a $5,1 \times 10^{-4}$
AZEVEDO (2002) NO RSU	10^{-5} a 10^{-6}

Observa-se, na Tabela 10, que os valores apresentados para aterros brasileiros (entre 10^{-6} e 10^{-8} m/s) são inferiores aos encontrados na literatura internacional (de 10^{-4} a 10^{-6} m/s). Deve-se observar que os resultados de condutividade hidráulica obtidos dependem do procedimento adotado, se os dados foram obtidos em campo ou laboratório, se houve ou não a remoção da camada de cobertura, se os ensaios foram realizados em resíduos jovens ou maduros, sujeitos a pré-tratamento mecânico-biológico ou não. Segundo estudos da EPA (1983), a condutividade do lixo apresenta valores entre de 10^{-3} – 10^{-7} m/s, mas esse estudo não contém informações quanto à caracterização do lixo.

A Tabela 10 ainda deve ser observada com restrição, uma vez que compreende possivelmente ensaios completamente diferentes e talvez condições também diversas (lixo propriamente dito, cobertura intermediária, cobertura final, etc.).

5.2 Bentonita

Como aditivo para diminuir a condutividade hidráulica do solo da CTR Nova Iguaçu, utilizou-se o produto “Permagem”, bentonita sódica (aditivada) produzida pela Bentonit União Nordeste S.A. Essa bentonita possui uma condutividade hidráulica da ordem de 1×10^{-14} m/s (Ferrari, 2005). Na Figura 24 e na Tabela 11, são apresentados alguns dados relativos à bentonita utilizada.

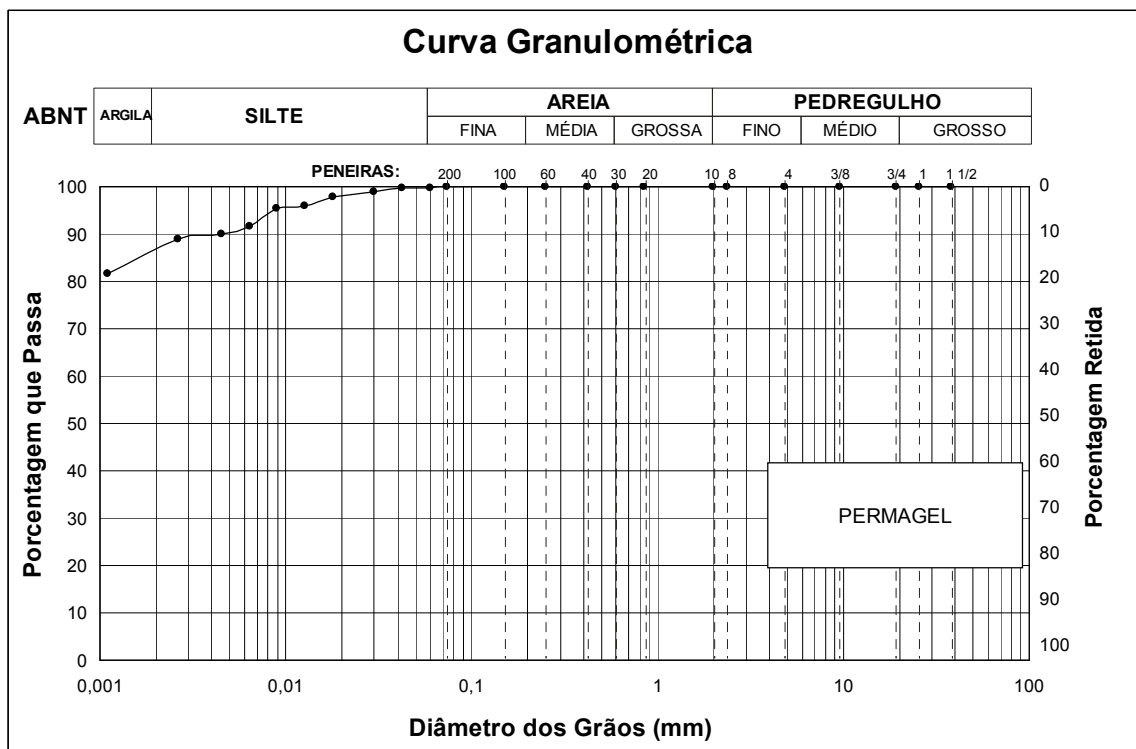


Figura 24: Curva granulométrica do Permagem – Fonte: Rose, 2007

Tabela 11: Composição granulométrica do Permagemel – Fonte: Rose, 2007

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
86,6	13,0	0,4	0,0	0,0	0,0

Como pode ser observado, a bentonita só possui finos (argila e silte), sendo caracterizada como uma argila. A densidade real dos grãos para esse solo foi determinada como sendo 2,78 (Rose, 2007). Também foram realizados ensaios para a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade para esse solo (Rose, 2007) (Tabela 12), indicando que esse solo apresenta grande trabalhabilidade, devido ao elevado valor de umidade correspondente ao limite de liquidez.

Tabela 12: Características geotécnicas do Permagemel – Fonte: Rose, 2007

Característica	Valor
Limite de liquidez (%)	505,6
Limite de plasticidade (%)	46,3

5.3 Metodologia

A camada de cobertura de um aterro de resíduos tem como principal função impedir a entrada de água na massa de resíduos, porém nem todos os solos naturais possuem condutividade hidráulica suficientemente baixa para serem utilizados como tal. A formação de trincas nessa camada, em consequência da erosão, do ressecamento do solo, da presença de animais e de vegetação, pois as raízes criam caminhos preferenciais para a água, também afetam a condutividade hidráulica.

Uma das propriedades da bentonita, como mencionado previamente, é a expansibilidade. Adicionando-se bentonita ao solo natural, espera-se a diminuição na formação de trincas, além de haver a redução da condutividade hidráulica e capacidade de recuperação do solo em caso de abertura de fissuras de maiores dimensões em longo período.

A fim de se verificar a quantidade ideal de bentonita a ser adicionada a mistura para se obter valores de condutividade hidráulica inferior a 10^{-9} m/s – de acordo com a recomendação brasileira (item 3.6.1) foram realizados ensaios variando-se a porcentagem de bentonita adicionada à mistura (Figura 25).

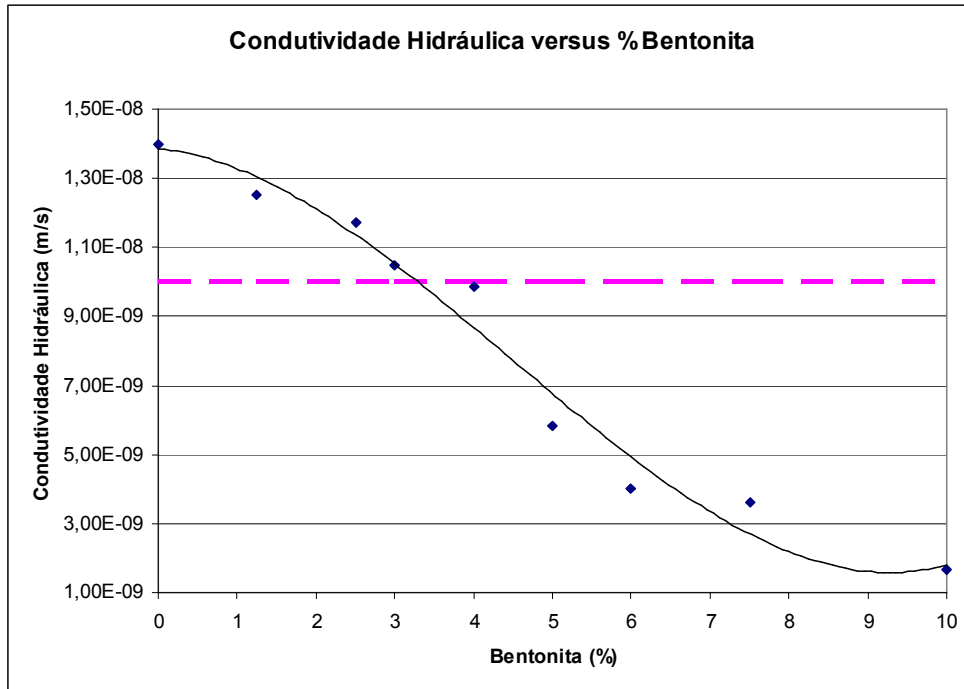


Figura 25: Condutividade Hidráulica versus % de bentonita

Pode-se observar que somente a partir da adição de 4% de bentonita em peso seco ao solo é que se obtém condutividade hidráulica inferior a 10^{-9} m/s, representado pelos pontos abaixo da linha tracejada da Figura 25. No entanto, esse valor não é suficiente de acordo com a norma americana (item 2.6.2) e nem com a alemã (item 2.6.3), que sugerem uma condutividade hidráulica da ordem de 10^{-10} m/s.

A partir da análise dos dados de condutividade hidráulica obtidos, foram realizados ensaios de caracterização para o solo com adição de 5% de bentonita em peso seco, aqui denominado SA Paulista 5%. A composição granulométrica encontra-se na Tabela 13, e os resultados dos limites de liquidez e de plasticidade, na Tabela 14.

Tabela 13: Composição granulométrica do solo SA Paulista 5%

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
16,1	29,8	16,8	19,9	14,7	2,7

Tabela 14: Características geotécnicas do solo SA Paulista 5%

Característica	Valor
Limite de liquidez (%)	75,5
Limite de plasticidade (%)	28,26

Observa-se pequena alteração da curva granulométrica, com ligeiro aumento da fração de argila e silte em relação ao solo SA Paulista (Figura 26). O grande ganho foi em relação às características geotécnicas, com aumento dos índices de plasticidade, melhorando as condições de trabalhabilidade.

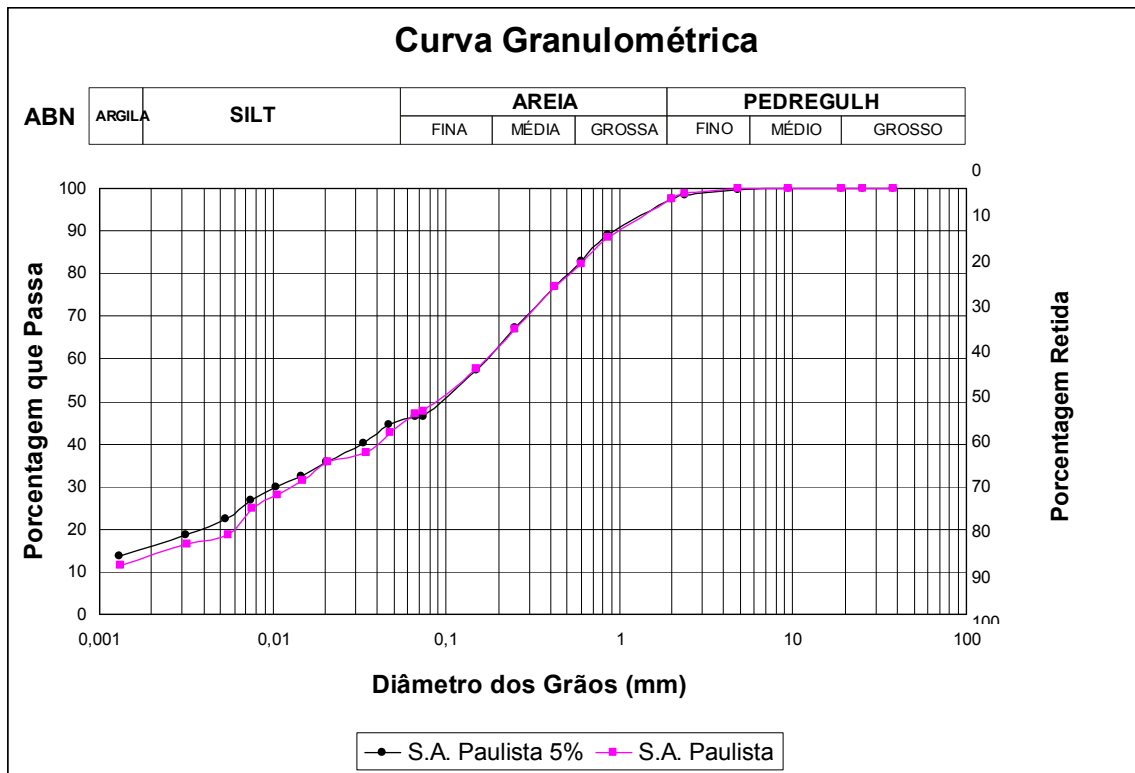


Figura 26: Comparação da granulometria do solo SA Paulista e SA Paulista 5%

No resultado do ensaio de compactação do tipo Proctor Normal para o solo SA Paulista 5%, foi determinada a umidade ótima de, aproximadamente, 23,4%, correspondendo ao peso específico aparente seco de 1,53g/cm³ (Figura 27). A condutividade hidráulica deste solo é da ordem de 10⁻⁹ m/s, valor suficiente de acordo com a recomendação brasileira (item 2.6.1) para ser utilizado como camada de cobertura de aterro de resíduos.

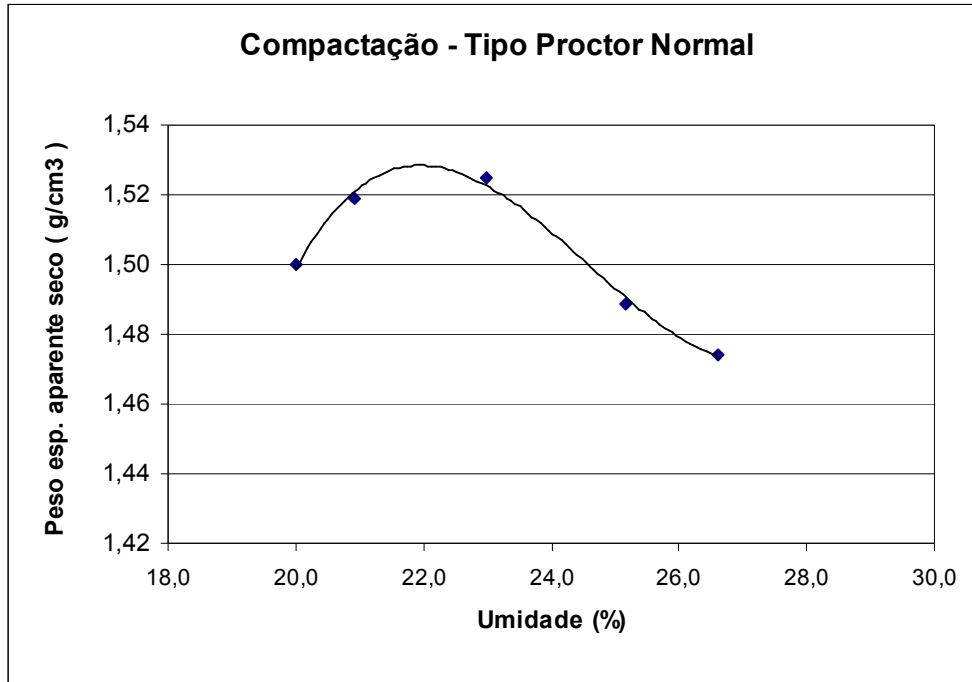


Figura 27: Gráfico de compactação do tipo Proctor normal para o solo SA Paulista 5%

A partir dessa avaliação, optou-se pela realização de ensaios utilizando-se solo sem adição de bentonita, para servir como controle, solo com 5% de bentonita em peso seco (SA Paulista 5%) e solo com 10% de bentonita em peso seco (SA Paulista 10%).

Os ensaios realizados tiveram como objetivo analisar a formação de trincas durante o processo de ressecamento do solo. A formação de trincas foi observada a partir da variação volumétrica do corpo de prova (CP), medida pela variação de nível de água na bureta. Também foi feito acompanhamento da variação de umidade (de forma indireta, através da variação de peso do CP), de temperatura (no topo e na base do CP) e de sucção

(na base do CP). Para tanto, foi desenvolvido e montado, no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, um aparelho, mostrado esquematicamente a seguir (Figura 28).

O aparelho segue os princípios do lisímetro de peso em que a umidade é medida pela variação de peso do conjunto, sendo o ensaio realizado diretamente sobre uma balança de boa precisão (Mahler, 2006).

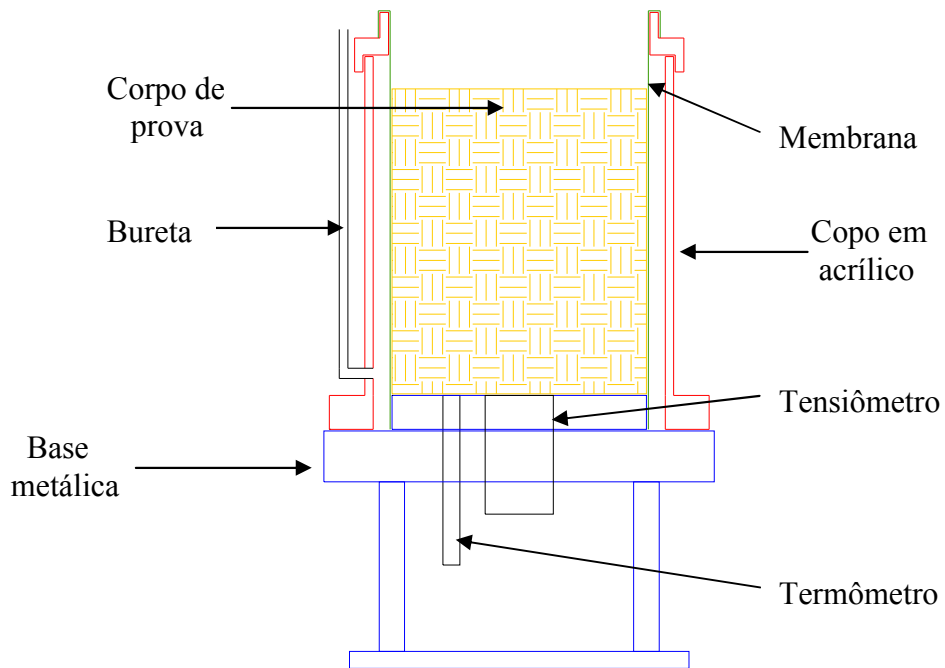


Figura 28: Desenho esquemático do aparelho desenvolvido para o ensaio de ressecamento livre



Figura 29: (a)Copo em acrílico e (b)base metálica

A aquisição dos dados de variação volumétrica e de peso foi realizada de forma manual, enquanto que os dados de temperatura e sucção de forma automatizada. Os equipamentos utilizados, a montagem do ensaio e os procedimentos seguidos serão mostrados no item a seguir.

5.4 Equipamentos Utilizados

5.4.1 Geotermômetro

O sensor de temperatura do solo (Figura 30) aplicado nos ensaios é do tipo Termistor de 10K ou 10000 ohms, bastante comum no ramo da eletrônica. O sensor funciona como uma resistência, permitindo ou não a passagem de corrente. Esse equipamento permite a leitura de -20 a +60°C com erro de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, fabricado pela UP – GmbH. Esse sensor apresenta um cabo comum com três pernas, um positivo e dois negativos.



Figura 30: Geotermômetro

O geotermômetro TMP, assim como os demais instrumentos, pode ser conectado a um dispositivo armazenador de dados (*data logger*), obtendo-se a leitura da temperatura do solo de forma contínua.

5.4.2 Tensiômetro

5.4.2.1 Funcionamento

Os transdutores de pressão têm como princípio básico de funcionamento um diafragma que se distende de acordo com a pressão do líquido ou gás atuando em um dos seus lados fechado em um compartimento estanque. Do outro lado desse compartimento, em contato com a pressão atmosférica, encontram-se os extensômetros que medem o movimento do diafragma. O valor da resistência elétrica dos extensômetros varia com o movimento do diafragma, sendo possível medir as pressões a partir de uma calibração do transdutor..

Para medir pressões de água negativas é necessário acoplar ao transdutor uma pedra porosa de alta pressão de borbulhamento. A pedra porosa funciona como uma interface entre solo, água e sistema de medição. O copo, que pode ser de aço, vidro ou acrílico, desenvolve a função de corpo de todo o conjunto do equipamento. Com a acoplagem do copo com a pedra porosa ao transdutor, obtém-se o tensiômetro, capaz de medir poro pressão negativa.

Para se medir o valor de sucção de um solo com o tensiômetro, deve-se garantir que a água presente em sua estrutura apresente uma continuidade hidráulica com a água da pedra porosa deste equipamento. O transdutor utilizado é composto de um invólucro em aço inoxidável, com acabamento polido e cabo blindado, com sinal de saída de 1-5 Vcc e alimentação de 10Vcc.

O fornecimento de energia foi garantido através de um cabo conectado ao corpo do instrumento, que é acoplado a uma fonte de alimentação, passando a gerar sinais analógicos de saída, que são armazenados no dispositivo armazenador de dados (*data logger*) (Diene, 2004).

5.4.2.2 Desenvolvimento e Montagem

O tensiômetro¹ usado neste estudo foi desenvolvido no Laboratório de Geotecnia da COPPE – UFRJ, permitindo a medição de sucção de pelo menos até 1500kPa. Esse tensiômetro foi desenvolvido por Mahler *et al.* (2004). O tensiômetro usado neste trabalho consiste de uma pedra porosa colada a um cabeçote acrílico, acoplada a um transdutor de pressão (Figuras 31 e 32).



Figura 31: Transdutor de pressão

138

¹ O tensiômetro está sob Depósito de Fase Nacional da Patente pelo professor Cláudio Mahler e Hércio Gonçalves, feito em 01/09/2004 (Tensiômetro para Medições de Sucções Elevadas), e está registrado no INPI sob o n° PI0403670-0.

O copo onde a pedra porosa é fixada deve ter superfície bastante lisa para não permitir a fixação de bolhas de ar, além de ter uma boa resistência inclusive a possíveis impactos e à corrosão. Neste estudo, são utilizados copos de acrílico fabricados sob encomenda.



Figura 32: Copo de acrílico com pedra porosa

A montagem do tensiômetro requer cuidados especiais. A pedra porosa deve ser saturada, seguindo-se procedimento de vácuo seco e posterior vácuo com água. A água deve ser destilada e deaerada. Neste estudo, a pedra porosa utilizada foi de 5 bar (500kPa), podendo este valor variar, bem como o transdutor (Mahler e Diene, 2007).

5.4.3 Sistema de Aquisição de Dados

O dispositivo armazenador de dados (*datalogger*) é um equipamento capacitado a realizar leituras e armazenar dados providos de uma diversidade de instrumentos com as mais variadas fontes. Esses dados podem ser lidos através do próprio visor do equipamento ou através de um código computacional instalado em um computador, constituindo-se assim uma interface.

A comunicação entre o armazenador de dados e o computador é feita por um cabo do tipo RS-232, desde que seja configurado o protocolo de comunicação em ambas as faces.

Neste trabalho, foi utilizado o modelo Agilent (Figura 33). Esse modelo tem a capacidade de armazenar até 50000 leituras.



Figura 33: Dispositivo armazenador de dados - modelo Agilent

5.4.4 Balança

A balança utilizada neste trabalho é feita em aço carbono, com capacidade de 20kg e precisão de 2g (Figura 34). Os dados são lidos no visor da balança.



Figura 34: Balança

5.5 Ensaio de Ressecamento Livre

O CP é compactado seguindo-se o procedimento de compactação de Proctor Normal para o CP de menor tamanho, em três camadas com vinte e seis golpes por camada. Já para o tamanho CBR, foi compactado com energia normal, isto é, em cinco camadas com doze golpes por camada e sem o disco espaçador, sendo este o CP de maior tamanho. O molde utilizado é tri-partido, de forma que o CP pode ser retirado do mesmo sem ser danificado. O solo é compactado com cerca de 25% de umidade, próximo a umidade ótima em todos os casos. Depois de retirado, o CP é colocado no aparelho para o ensaio de ressecamento. Durante todo o processo, são monitorados dados de umidade, variação volumétrica, temperatura e sucção.

5.5.1 Preparação e Montagem do Ensaio

5.5.1.1 Preparação do Transdutor

O copo de acrílico, já com a pedra porosa, é colocada em vácuo seco na câmara de saturação, por um período mínimo de 24h. Após esse período, a câmara é inundada com água, sendo sugada pelo vácuo até que o conjunto esteja submerso, ficando assim por um período mínimo de 12h (Figura 35).



Figura 35: (a) Conjunto no vácuo e (b) depois submerso

Para a montagem do tensiômetro, deve-se fazer a saturação do reservatório interno do transdutor, utilizando-se uma seringa com agulha (Figura 36 a). A partir de então, o procedimento deve ocorrer submerso em água deaerada a fim de evitar a entrada de bolha de ar no sistema. Aplica-se uma camada de teflon ao transdutor e, então, acopla-se o copo de acrílico ao transdutor (Figura 36 b). Após a acoplagem, o sistema deve continuar submerso até o momento do início do ensaio para que não ocorra a desaturação da pedra porosa.



Figura 36: (a) Saturação do reservatório do transdutor e (b) acoplagem do transdutor ao copo de acrílico

Após a acoplagem, o tensiômetro foi testado aplicando-se diferentes pressões para se ter a segurança que a acoplagem estava perfeita, isto é, sem perda de pressão.

5.5.1.2 Preparação do Corpo de Prova

O solo já destorroado e passado pela peneira 10 deve ser homogeneizado com água e colocado na câmara úmida por um período mínimo de 24h. Posteriormente, deve ser compactado no molde tri-partido, que deve estar envolto em filme plástico (Figuras 37 e 38). Ainda dentro do molde, faz-se a furação para a colocação do termômetro no topo e na base.



Figura 37: Montagem tri-partido – tamanho Proctor



Figura 38: Montagem tri-partido – tamanho CBR

5.5.1.3 Montagem do Ensaio de Ressecamento Livre

Inicialmente, é feita a furação para o termômetro da base e do fundo do CP. O CP é retirado do molde tri-partido, e, então, colocado sobre a base metálica, onde já se encontra o tensiômetro.

O tensiômetro deve ser acoplado à base metálica e sobre este deve ser colocada uma pasta em que o solo apresente uma umidade superior a de compactação (Figura 39). Essa pasta é colocada para se garantir o contato entre a pedra e o CP, funcionando como se fosse um ligante entre o corpo de prova e a pedra porosa.



Figura 39: Pasta de solo colocada no tensiômetro

Após esse procedimento, coloca-se o CP na base metálica. A partir desse momento, inicia-se a coleta de dados de pressão e da temperatura na base (detalhe da Figura 40).

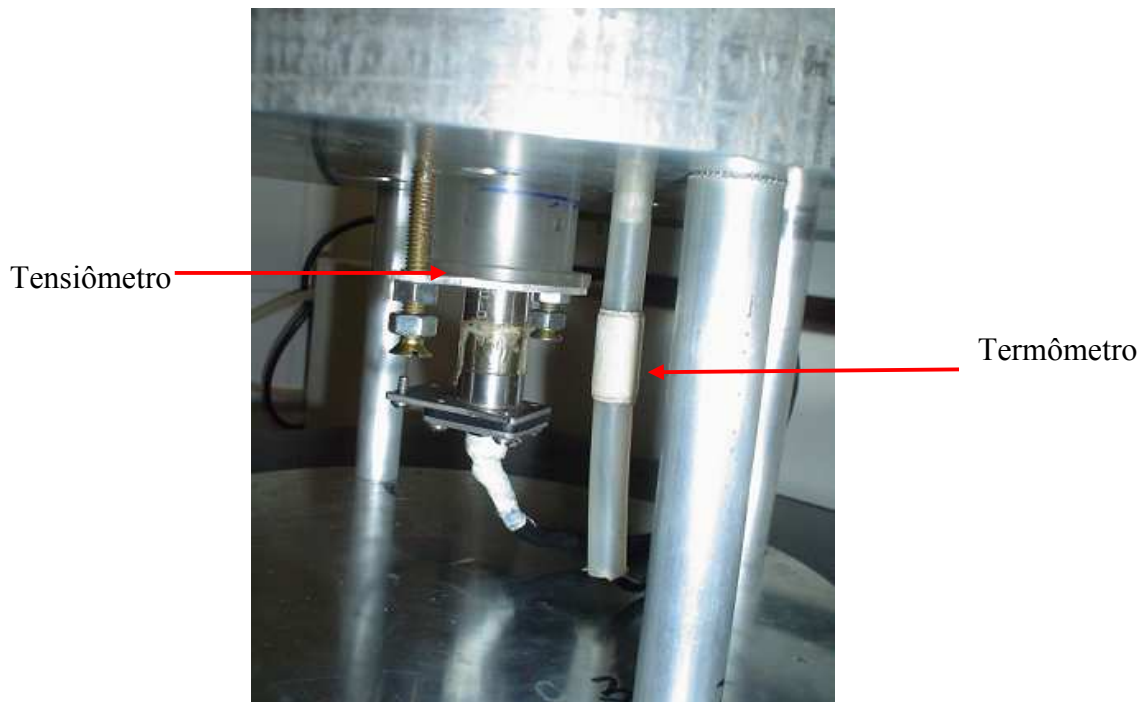


Figura 40: Detalhe tensiômetro e termômetro

Posteriormente, coloca-se a membrana no CP (Figura 41) com o auxílio do encamisador (Figura 42), sendo depois acoplado o copo de acrílico, que é preenchido com água. O termômetro é colocado no topo de CP.



Figura 41: CP envolto pela membrana

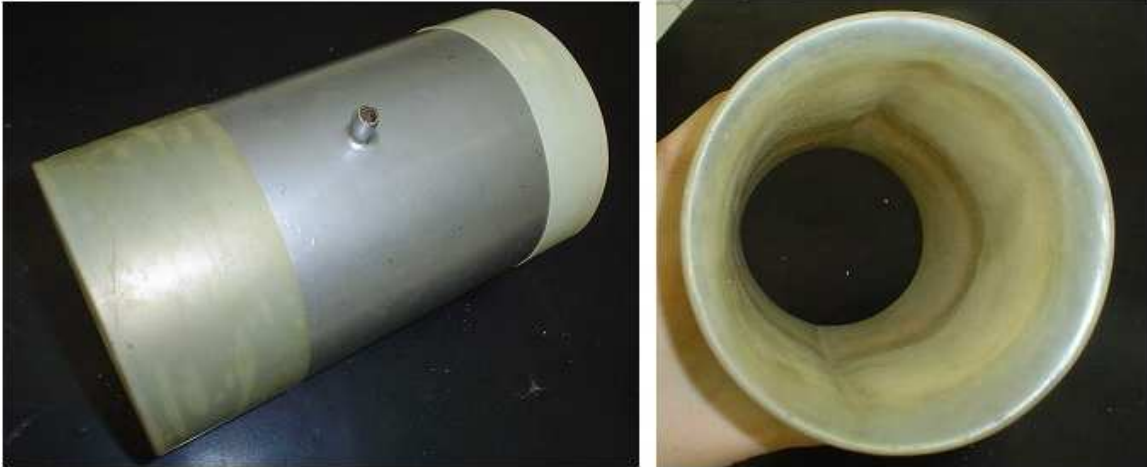


Figura 42: Encamisador

O sistema todo é colocado na balança (Figura 43). A partir de então são obtidos, também, dados de temperatura no topo, de variação volumétrica e de umidade.



Figura 43: Ensaio de ressecamento livre

Inicialmente, os dados são coletados em intervalos de 20 segundos nas horas iniciais, sendo depois espaçados para intervalos de 10 minutos. O tempo de duração do ensaio

varia, tendo uma duração média de cinco dias. O ensaio é encerrado quando a sucção está estável.

Antes do início de um novo ensaio, o conjunto copo de acrílico com pedra porosa era colocado no vácuo e depois submerso (ainda em vácuo) para garantir que não houvesse entrada de ar no interior da pedra porosa, o que acarretaria na perda do ensaio.

5.6 Recomendações

Para garantir o bom funcionamento do tensiômetro, este deve ser testado depois de montado para verificar se há perda de pressão e se o tempo de resposta da pressão está adequado. O teste consiste em aplicar variadas pressões no tensiômetro e verificar se a pressão aplicada equivale à pressão lida pelo transdutor.

A vedação entre a pedra porosa e o copo de acrílico deve ser perfeita, a fim de se evitar perda de pressão por essa junta. Pelo mesmo motivo, a vedação da rosca do transdutor, no local em que este é acoplado ao copo de acrílico também deve ser perfeita.

Danos ao copo de acrílico podem ocorrer devido à elevada pressão que ocorre durante o rosqueamento do transdutor ao copo. Mesmo tomando-se medidas preventivas como não ultrapassar o limite máximo de pressão suportado pelo transdutor, esperando-se a dissipação da pressão antes de continuar o processo de rosqueamento, pode haver fadiga do acrílico. Também pode ocorrer fadiga na cola utilizada para aderir a pedra porosa ao copo de acrílico, causada pela pressão no momento de rosqueamento, visto que não há garantia da sua resistência. Deve-se lembrar que o processo de rosqueamento ocorre a cada ensaio realizado.

Fabricar o copo, atualmente de acrílico, com outro material, pode ser uma alternativa interessante, pois houve fissura durante os ensaios, levando a perda de pressão e, logo, ao não funcionamento do tensiômetro.

É interessante a opção de um orifício na lateral no copo de acrílico, na altura do reservatório de água que fica entre o transdutor e a superfície da pedra porosa, como alternativa para evitar a fadiga dos materiais (do acrílico e da cola), durante o rosqueamento do transdutor ao copo. Através desse orifício, a pressão é dissipada quase instantaneamente. Depois de dissipada, fecha-se esse orifício e prosseguem-se os ensaios. Deve-se dar atenção especial para a vedação desse orifício, a fim de se evitar perdas de pressão através do mesmo.

6. RESULTADOS

6.1 Ensaio de Ressecamento Livre

Para este estudo, foram realizados dez ensaios de ressecamento livre, dos quais seis puderam ser utilizados, e os resultados obtidos encontram-se a seguir. Devido a problemas na medição da sucção, quatro ensaios tiveram que ser descartados.

Durante o ensaio de ressecamento livre, foram coletados dados de sucção, variação volumétrica, peso e temperatura, sendo, então, construídos gráficos com os resultados de sucção versus tempo, umidade versus variação volumétrica e sucção versus umidade, que é a curva característica. Esses resultados são apresentados para os dois tamanhos de corpo de prova, tipo Proctor (diâmetro de 10cm e altura de 13cm) e tipo CBR (diâmetro de 15cm e altura de 17,5cm), para se verificar possível interferência do tamanho do mesmo.

Deve-se lembrar que foram retirados dos gráficos aqui apresentados as instabilidades, que podem ter sido causadas por fatores externos, tal como oscilação de voltagem, entre outros. Os gráficos, na íntegra, encontram-se em anexo (Anexo A).

6.1.1 Sucção

Nem todos os ensaios de sucção apresentaram um resultado satisfatório. Os tensiômetros, após montados, eram testados para verificar se havia perda de pressão por problemas de vedação no local onde se rosqueia o transdutor. Não havendo perda de pressão, o tensiômetro poderia ser usado no ensaio

Os dados de sucção foram agrupados de acordo com o tamanho do corpo de prova, podendo-se fazer uma análise para o tamanho Proctor e para o tamanho CBR.

Também foi feito o gráfico de dados para os solos com a mesma porcentagem de bentonita. Mas para que essa análise possa ter validade, são necessárias repetições dos ensaios para garantir a confiabilidade dos dados.

6.1.1.1 Tamanho Proctor

O gráfico de sucção versus tempo (Figura 44) foi elaborado para os corpos de prova com mesmo tamanho, sendo, no caso, tamanho da compactação tipo Proctor, porém com variação da quantidade de bentonita adicionada ao solo (sem adição de bentonita, com 5% e com 10% de adição de bentonita).

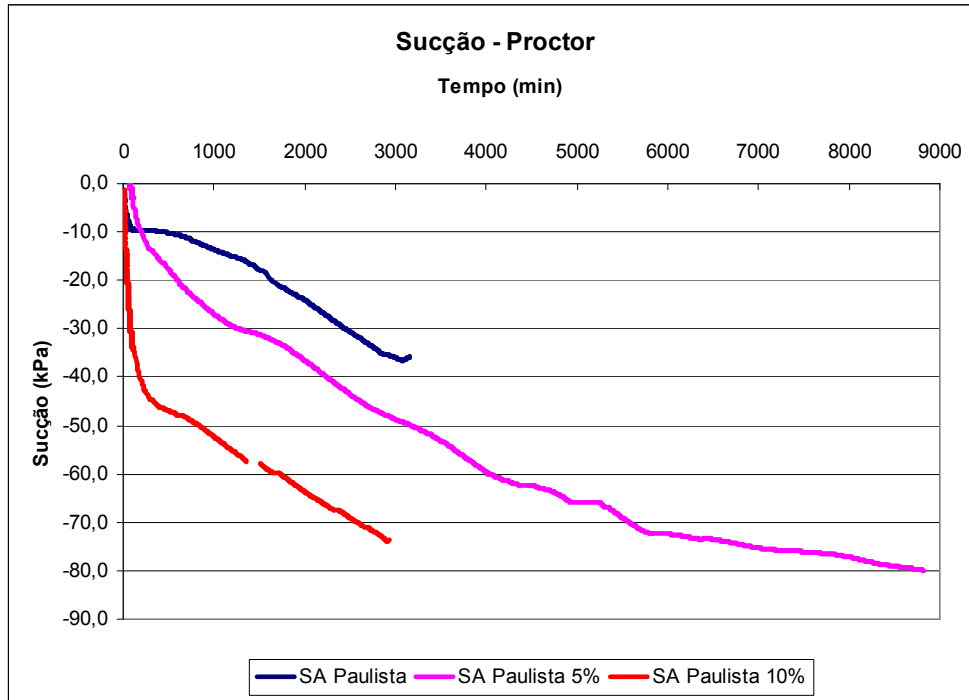


Figura 44: Comparação da sucção para os corpos de prova do tamanho Proctor, variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo

Observa-se, na Figura 44, o aumento da sucção com a adição de bentonita ao solo. Esse fato ocorre devido ao aumento de finos presentes no solo. Um maior percentual de bentonita conduz a um solo com menor volume de vazios, a uma menor condutividade hidráulica e a uma maior capacidade de retenção de líquidos, ou seja, maior capacidade de campo.

Deve-se lembrar que a umidade inicial do ensaio também influencia a sucção do solo. Quanto mais úmido se encontra o solo, menor será a sucção do mesmo.

6.1.1.2 Tamanho CBR

O gráfico de sucção versus tempo (Figura 45) foi construído para os corpos de prova de mesmo tamanho. No caso, empregou-se tamanho da compactação CBR, porém com variação da quantidade de bentonita adicionada ao solo (sem adição de bentonita, com 5% e 10% de adição de bentonita).

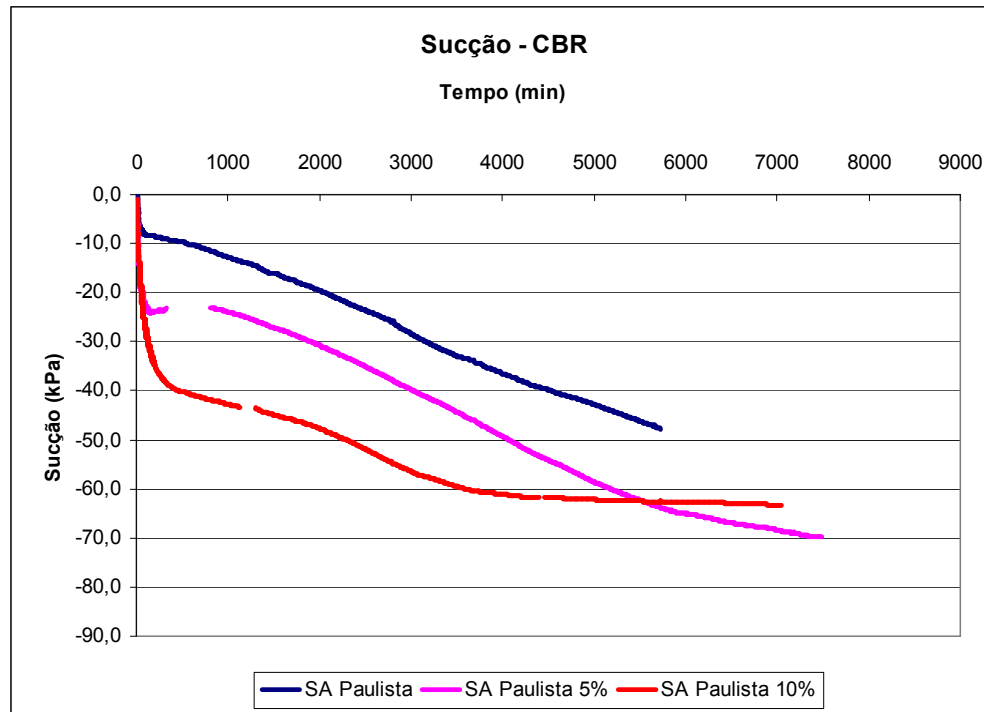


Figura 45: Comparação da sucção para os corpos de prova do tamanho CBR, variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo

Observa-se, na Figura 45, o aumento da sucção com a adição de bentonita ao solo. Assim como visto anteriormente, o aumento do percentual de bentonita conduz a um menor volume de vazios, a uma redução da condutividade hidráulica e a um aumento da retenção de líquidos, isto é, maior capacidade de campo.

A umidade inicial do ensaio também influencia a sucção, como mencionado anteriormente.

6.1.1.3 Comparação entre Tamanho Proctor e Tamanho CBR

Os gráficos de sucção versus tempo foram, então, feitos para os solos com a mesma porcentagem de bentonita adicionada ao solo (sem bentonita, com 5% ou 10% de adição de bentonita ao solo), para os dois tamanhos de corpo de prova ensaiados – tamanho Proctor e CBR (Figuras 46, 47 e 48), permitindo uma análise comparativa. Pode-se observar a tendência de maiores valores de sucção para o tamanho Proctor indicando um possível efeito de borda ou de preparação das amostras nos resultados dos ensaios, porém não se pode tirar nenhuma conclusão, visto que só foi realizado um ensaio para cada tamanho de corpo de prova, de modo que os resultados são pouco conclusivos.

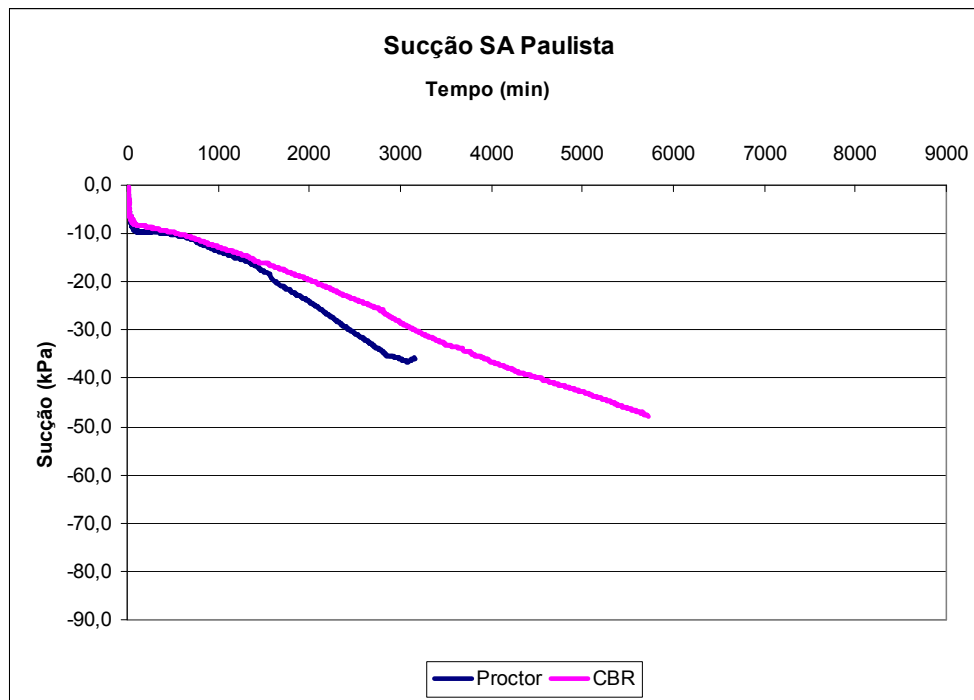


Figura 46: Comparação da sucção para solo SA Paulista no tamanho Proctor e no tamanho CBR

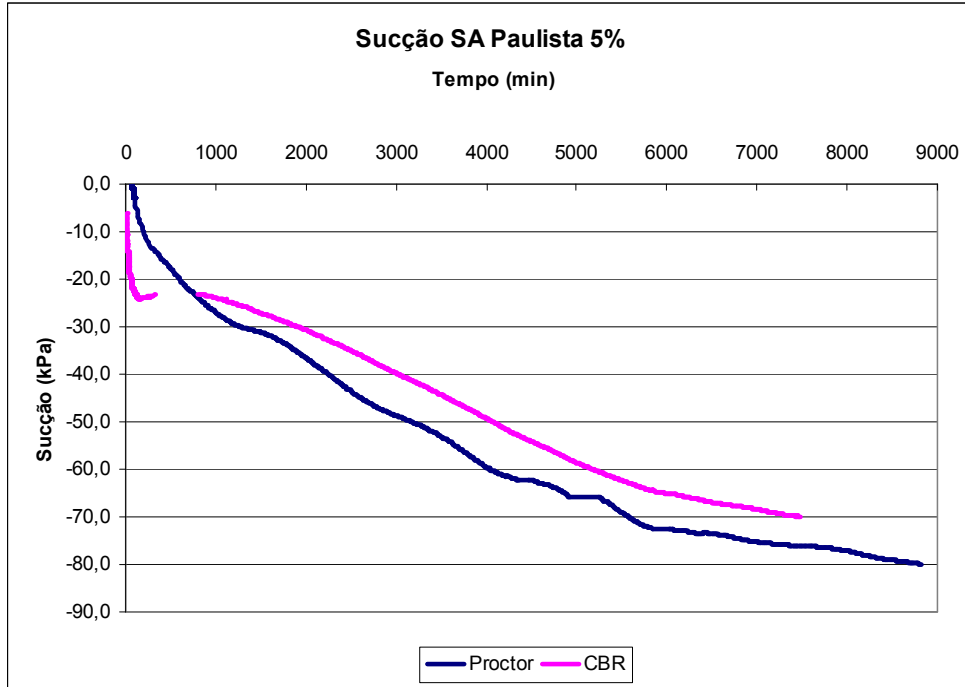


Figura 47: Comparação da sucção para solo SA Paulista 5% no tamanho Proctor e no tamanho CBR

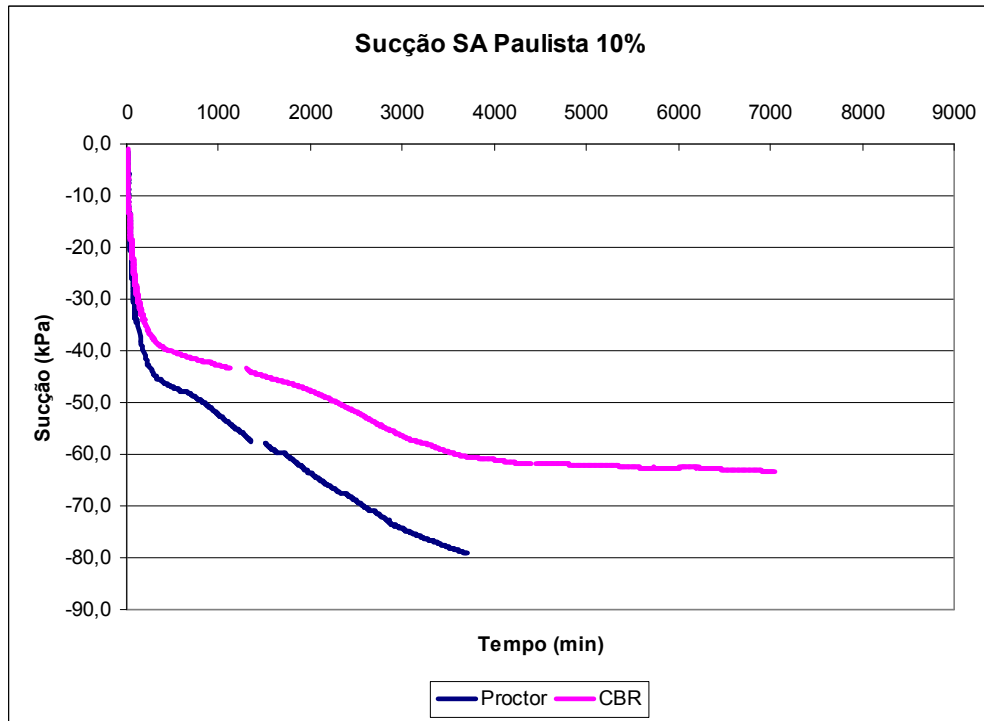


Figura 48: Comparação da sucção para solo SA Paulista 10% no tamanho Proctor e no tamanho CBR

6.1.2 Umidade Versus Variação Volumétrica

6.1.2.1 Tamanho Proctor

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios realizados utilizando-se o tamanho Proctor, para cada porcentagem de bentonita utilizada (sem bentonita, com 5% e 10% de bentonita) (Figuras 49, 50 e 51).

Nos gráficos de umidade versus variação volumétrica, esta foi adotada em valor absoluto. Nos ensaios realizados, houve contração do corpo de prova, o que foi representado por valores positivos de variação volumétrica, muito embora tenha-se medido contração (valores negativos).

Os ensaios referentes às Figuras 49 e 51 apresentam poucos dados de variação volumétrica, pois esses ensaios tiveram uma duração menor, devido a possível entrada de ar no ensaio, motivo que levou ao término do mesmo.

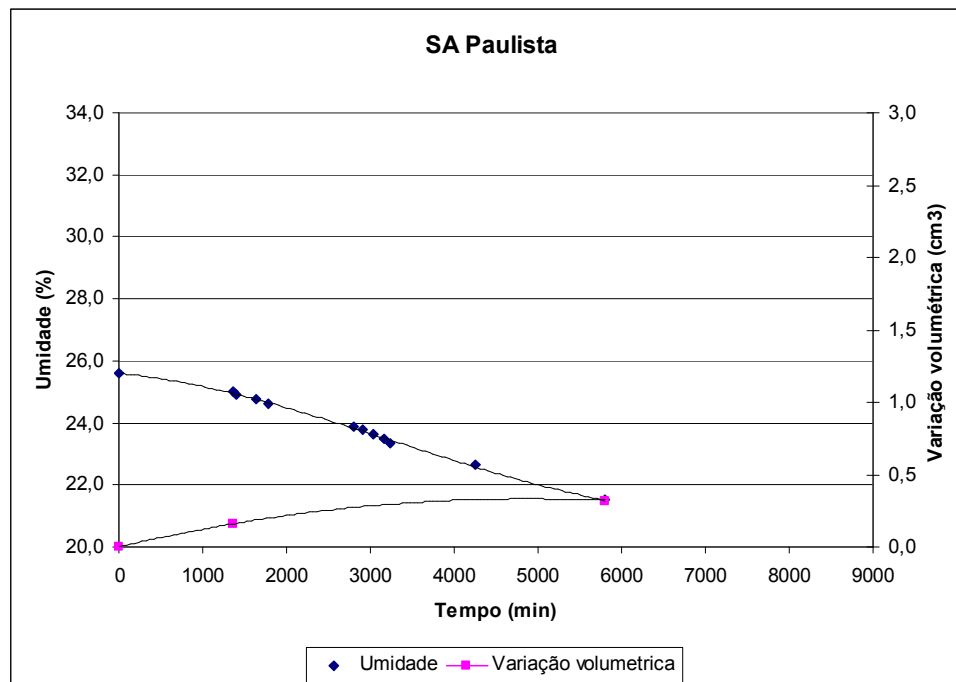


Figura 49: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo SA Paulista

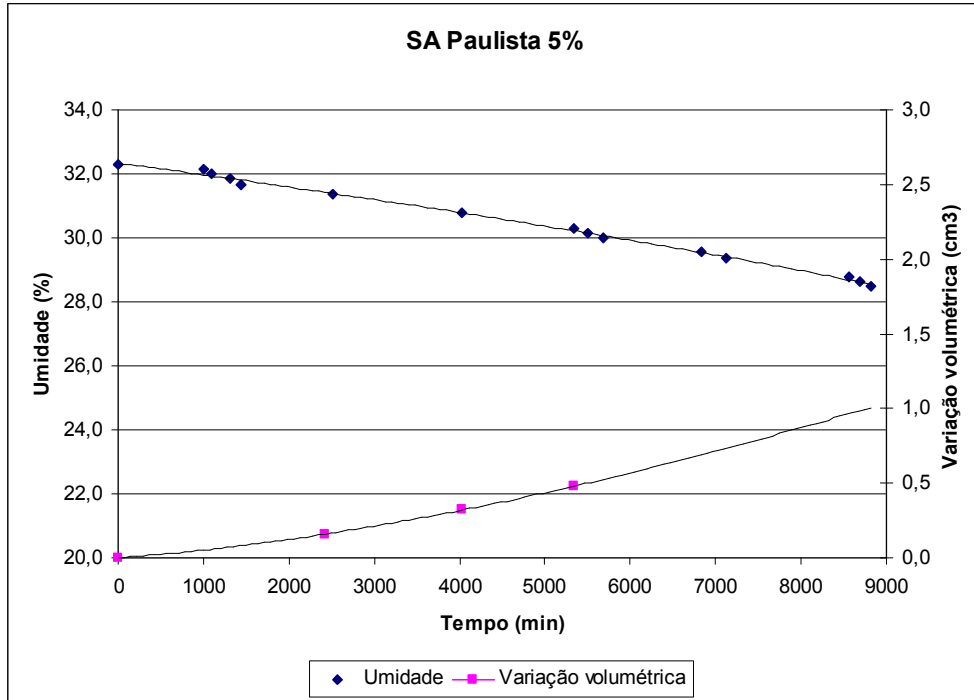


Figura 50: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo SA Paulista 5%

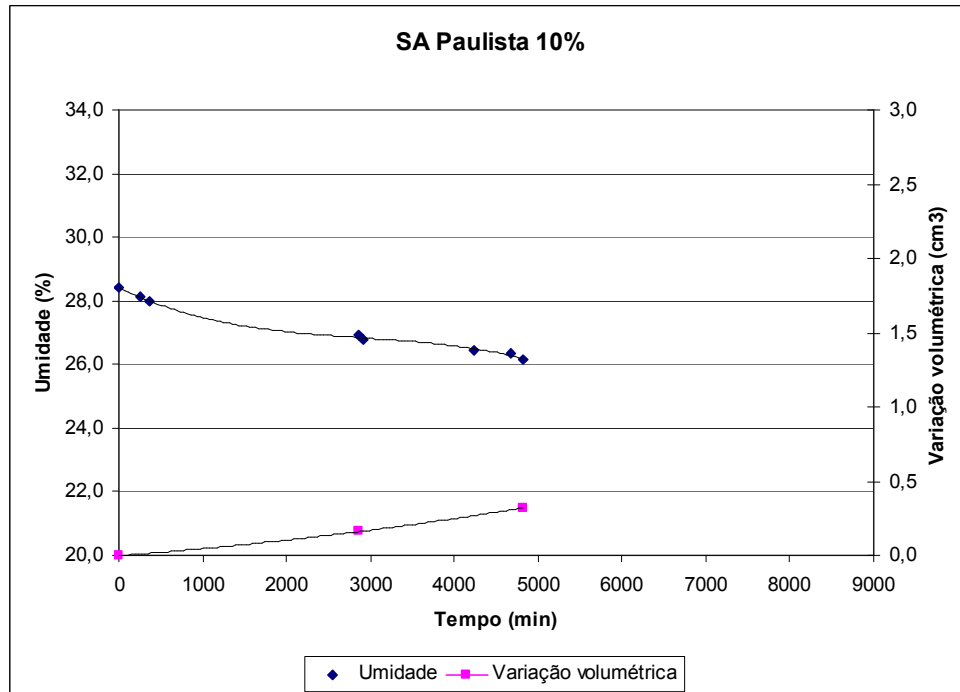


Figura 51: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo SA Paulista 10%

Na Figura 52, foi elaborado um gráfico conjunto de todos os resultados apresentados nas Figuras 49, 50 e 51, de forma a facilitar a análise.

Pode-se observar, na Figura 52, que, apesar da adição de bentonita ao solo, em diferentes porcentagens, a variação volumétrica tende a ser a mesma para todos os ensaios. Essa observação é importante para a camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos urbanos, pois, embora a formação de trincas permaneça praticamente a mesma para as condições dos ensaios realizados, há uma diminuição da condutividade hidráulica do solo, o que leva a uma menor infiltração de água no mesmo.

Devido à umidade inicial dos corpos de prova não ser a mesma nos três ensaios, há dificuldade em se tirar conclusões dos resultados obtidos, pois, apesar dos corpos de prova apresentarem umidade acima do valor ótimo de compactação, destaca-se a possibilidade que esses valores de umidade situem-se em diferentes trechos da curva de compactação, podendo este ser o motivo da diferença de comportamento entre os ensaios realizados.

Comparação Proctor

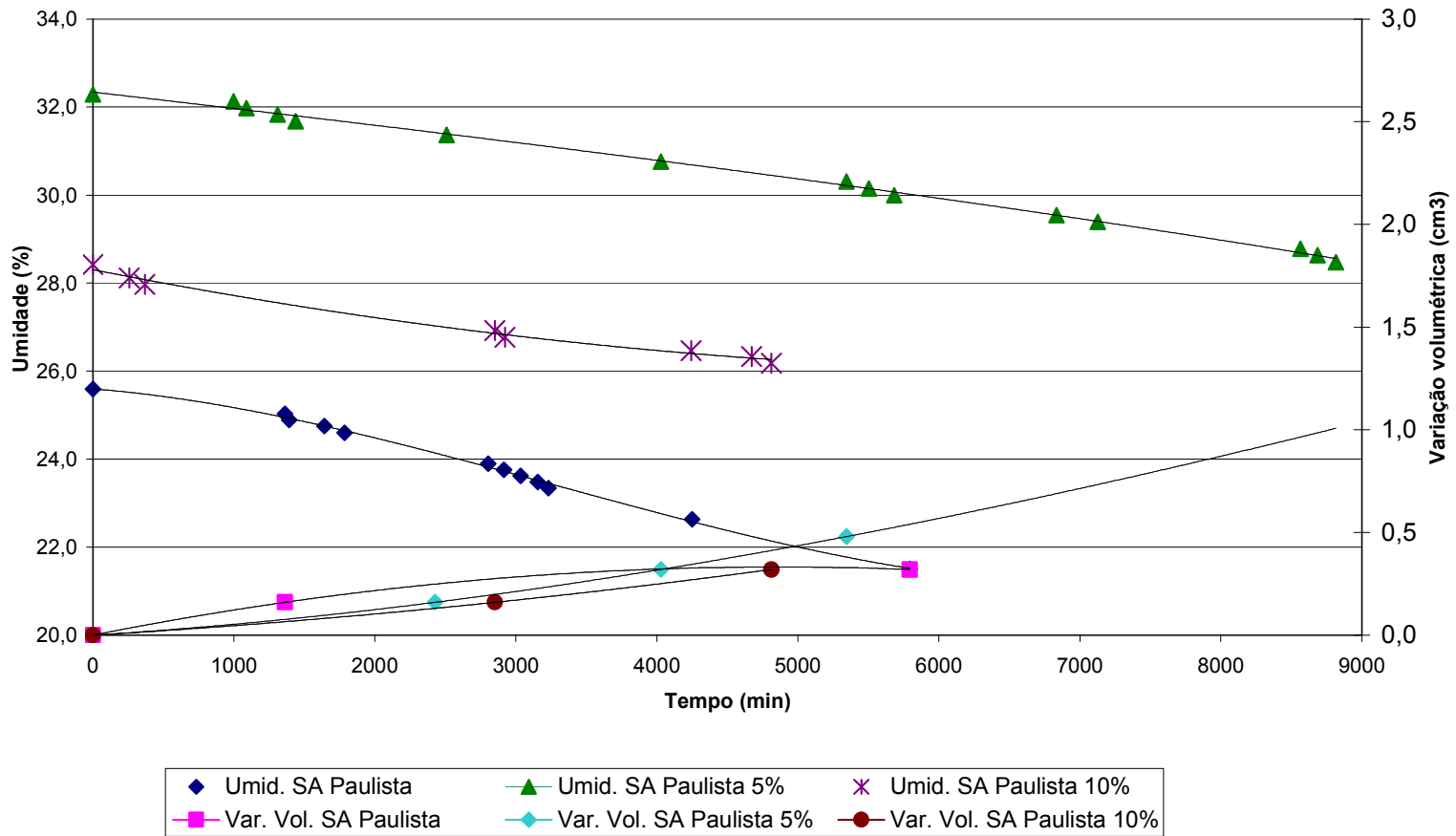


Figura 52: Comparação entre variação de umidade versus variação volumétrica para o tamanho Proctor

6.1.2.2 Tamanho CBR

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios realizados utilizando-se o tamanho CBR, para cada porcentagem de bentonita utilizada (sem bentonita, com 5% e 10% de bentonita) (Figuras 53, 54 e 55).

Nos gráficos de umidade versus variação volumétrica, a variação volumétrica foi adotada em valor absoluto. Nos ensaios realizados, houve contração do corpo de prova, o que foi representado por valores positivos de variação volumétrica, muito embora tenha se observado contração (valores negativos).

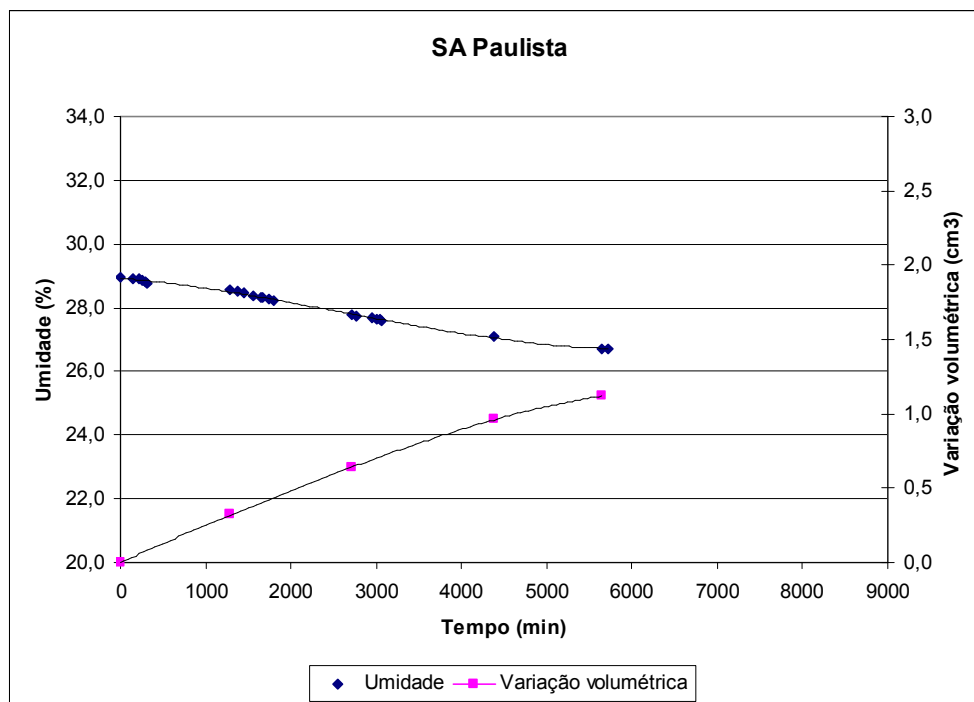


Figura 53: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo SA Paulista

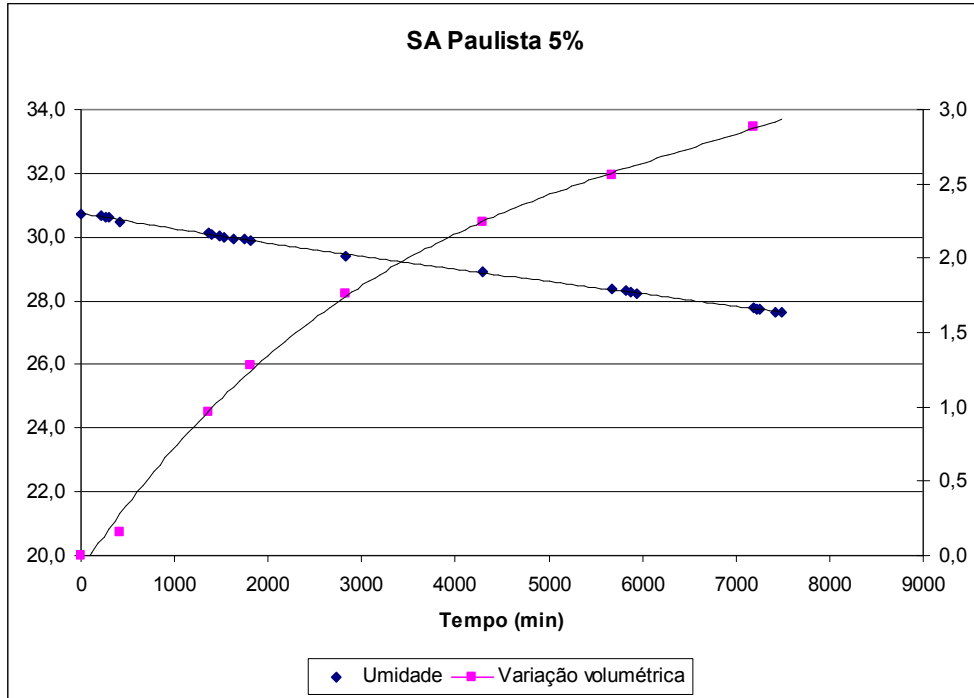


Figura 54: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo SA Paulista 5%

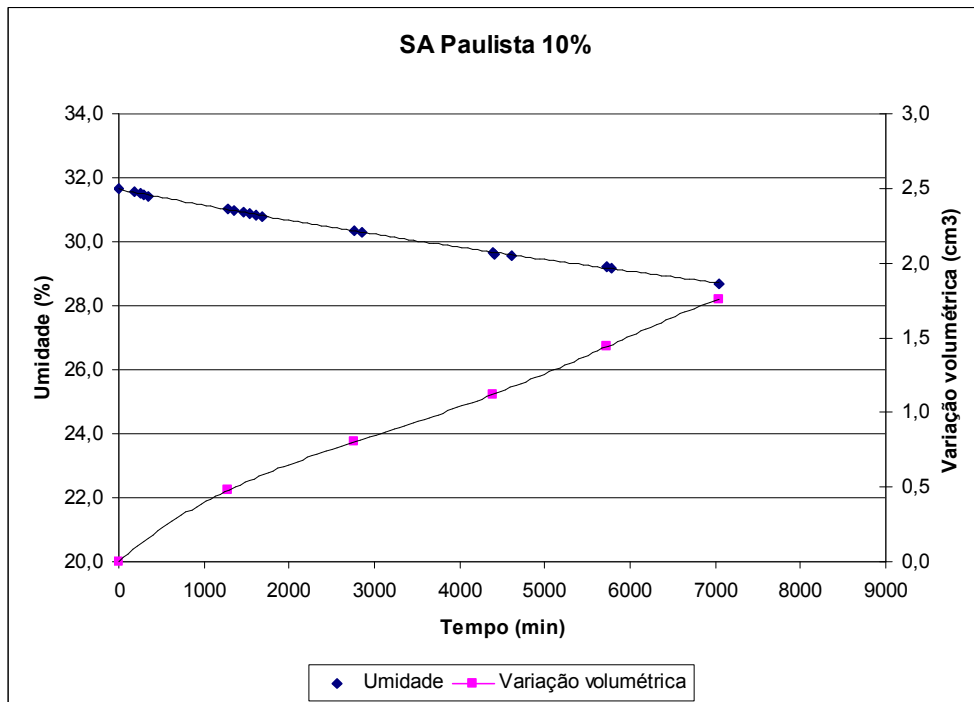


Figura 55: Variação de umidade versus variação volumétrica para o solo SA Paulista 10%

Na Figura 56, foi elaborado um gráfico com os resultados apresentados nas Figuras 53, 54 e 55, de forma a facilitar a análise.

Pode-se observar, na Figura 56, que, apesar da adição de bentonita ao solo, em diferentes porcentagens, a variação volumétrica tende a ser a mesma para todos os ensaios. Essa observação é importante para a camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos urbanos, pois, apesar da formação de trincas ser praticamente a mesma para as condições dos ensaios realizados, há uma diminuição da condutividade hidráulica do solo, o que leva a uma menor infiltração de água no mesmo. Porém, para a Figura 54 (SA Paulista 5%), essa afirmação não é válida. Esse fato pode ter ocorrido por fatores externos. Durante a realização desse ensaio, por exemplo, a temperatura estava mais baixa (em torno de 5°C) do que nos outros dois (SA Paulista e SA Paulista 10%), mas não se pode ter certeza da influência da temperatura externa na variação volumétrica. Adicionalmente, pode-se cogitar sobre algum problema na compactação, na própria montagem do ensaio ou mesmo erro de leitura.

Devido à umidade inicial dos corpos de prova não ser a mesma nos três ensaios, há dificuldade em se tirar conclusões dos resultados obtidos, pois, apesar dos corpos de prova se encontrarem com valores de umidade acima da umidade ótima de compactação, esses valores podem estar situados em diferentes trechos da curva de compactação, podendo ser essa a razão da diferença de comportamento entre os ensaios realizados.

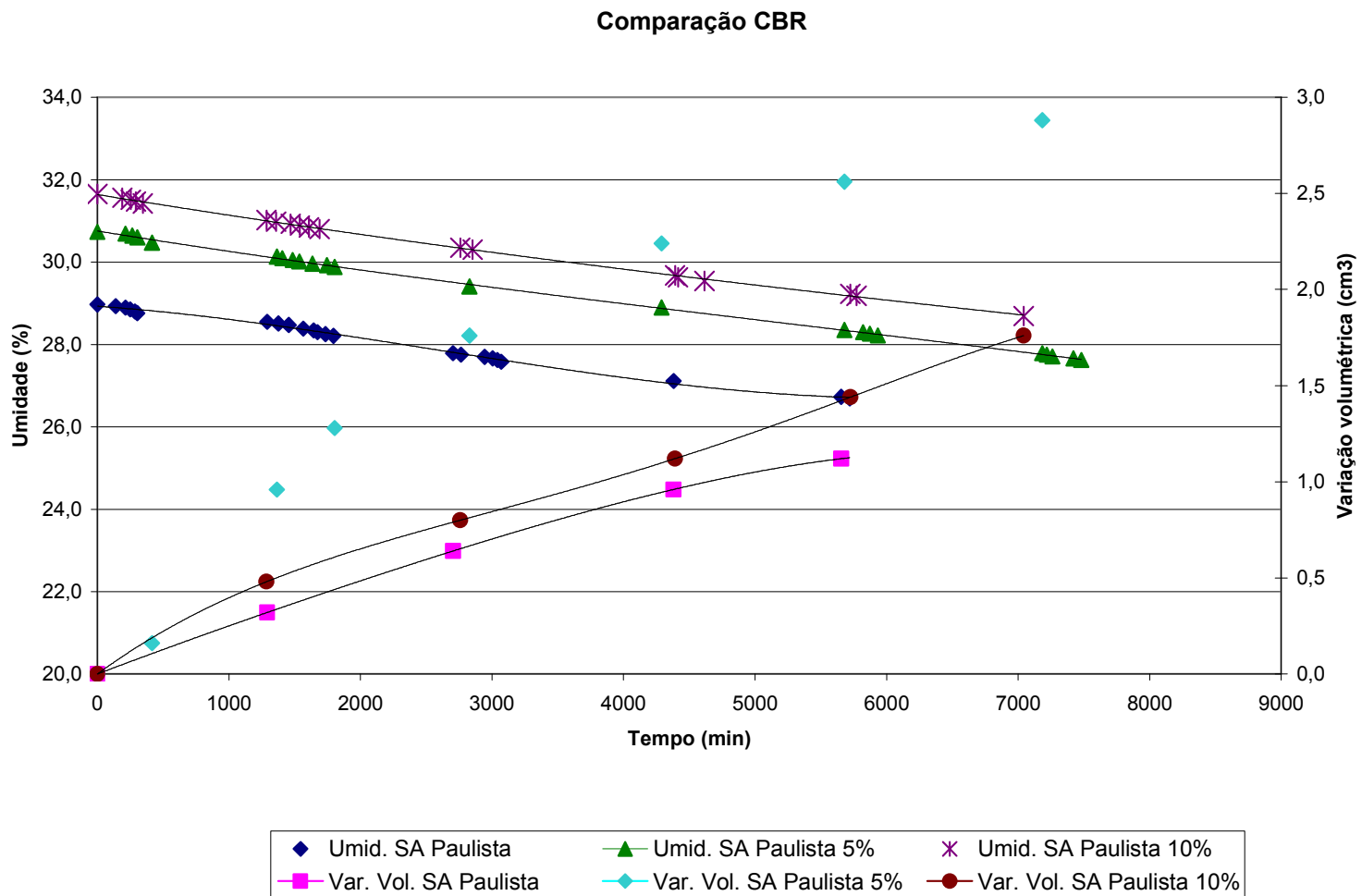


Figura 56: Comparação entre variação de umidade versus variação volumétrica para o tamanho CBR

6.1.3 Temperatura

A temperatura do topo e da base do corpo de prova foram monitoradas durante todo o tempo de ensaio (gráficos no anexo A). A sala onde foram realizados os ensaios não tinha temperatura controlada. Esse parâmetro foi medido apenas para controle, mas sugere-se, em ensaios futuros, elevar a temperatura do topo do corpo de prova, e assim verificar essa influência nos resultados.

Os termômetros apresentaram, para uma mesma temperatura, uma defasagem de leitura do topo e da base (de aproximadamente $0,5^{\circ}\text{C}$), o que justifica a diferença de temperatura apresentada durante o ensaio e pode estar associada à faixa de erro admitida para os equipamentos. A temperatura da base sempre era superior que a do topo, como pode ser observado nos gráficos no anexo A.

A temperatura do topo e da base variaram de forma simultânea, mostrando coerência entre os dados apresentados.

6.1.4 Ressecamento ao Ar

Depois de terminado o ensaio de ressecamento livre com a obtenção de dados de sucção, temperatura, umidade e variação volumétrica, os corpos de prova foram colocados para secarem ao ar, sendo feito o acompanhamento da variação de umidade, até que esta estabilizasse.

Durante esse processo, foram observadas mudanças de coloração dos corpos de prova e surgimento de microfissuras.

6.1.4.1 Tamanho Proctor

Na Figura 57, nota-se a diferença de cor entre os corpos de prova. O corpo de prova mais claro está menos úmido que o de cor mais escura, independente da quantidade de bentonita adicionada ao solo.



Figura 57: Diferença de cor entre corpos de prova do tamanho Proctor

6.1.4.2 Tamanho CBR

Na Figura 58, nota-se a diferença de cor entre os corpos de prova. O corpo de prova mais claro está menos úmido que o de cor mais escura independente da quantidade de bentonita adicionada ao solo.



Figura 58: Diferença de cor entre corpos de prova do tamanho CBR

6.2 Curva Característica

Os gráficos da curva característica foram definidos para os solos com a mesma quantidade de bentonita adicionada ao solo (sem bentonita, com 5% ou 10% de adição de bentonita ao solo), para os dois tamanhos de corpo de prova ensaiados – tamanho Proctor e CBR.

Em seguida, as curvas foram traçadas para cada ensaio, e os resultados obtidos foram comparados aos resultados calculados utilizando-se a equação proposta por Van Genuchten (1980).

6.2.1 Tamanho Proctor

O gráfico da curva característica (Figura 59) foi determinado para os solos tamanho tipo Proctor, com variação da quantidade de bentonita adicionada ao solo (sem adição de bentonita, com 5% e 10% de adição de bentonita). Observou-se que, para o mesmo valor de umidade, a sucção do solo SA Paulista 10% foi inferior à sucção apresentada para o solo SA Paulista 5%. Não há justificativa clara para tal comportamento, podendo ser

consequência de algum fator externo, como, por exemplo, influência da umidade de compactação. Também deve-se alertar que os ensaios com os solos SA paulista 5% e 10% foram realizados em dias chuvosos e de temperaturas baixas, havendo uma baixa evaporação durante esse período.

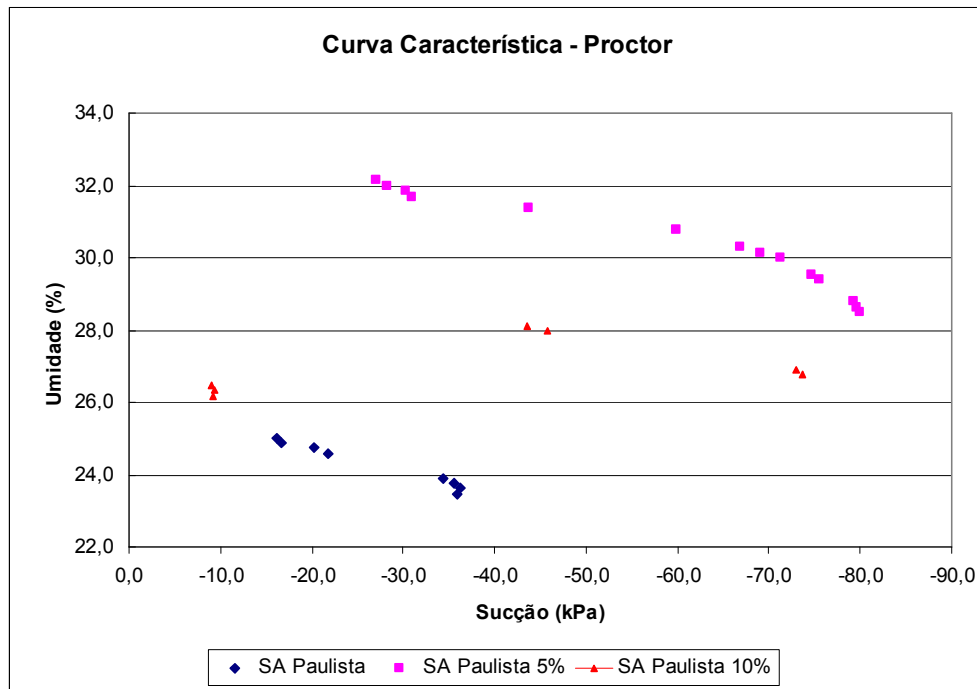


Figura 59: Comparação da curva característica para os corpos de prova do tamanho Proctor, variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo

6.2.2 Tamanho CBR

O gráfico da curva característica (Figuras 60) foi elaborado para os solos com o mesmo tamanho de corpo de prova. No caso, foi empregado tamanho do tipo CBR, porém com variação da quantidade de bentonita adicionada ao solo (sem adição de bentonita, com 5% e 10% de adição de bentonita). Observa-se que, para um mesmo valor de umidade, a sucção cresce com o aumento da adição de bentonita, o que está de acordo com o previsto, visto que com o aumento da adição de bentonita, aumenta-se o número de finos presentes no solo.

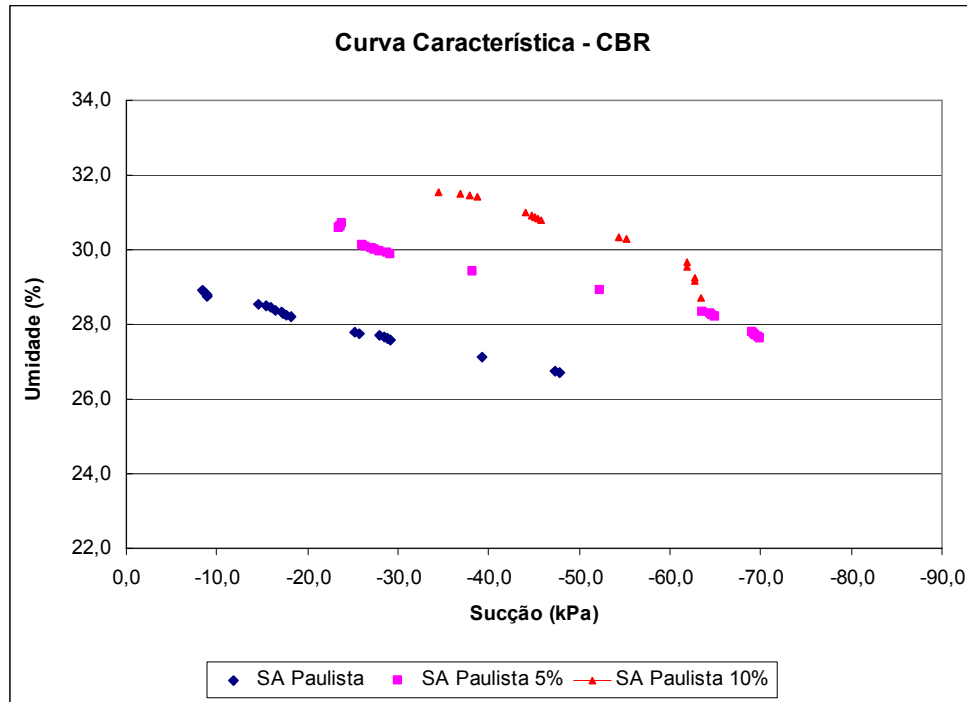


Figura 60: Comparação da curva característica para os corpos de prova do tamanho CBR, variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo

6.2.3 Aplicação do Modelo de Van Genuchten

Os dados da curva características obtidos foram comparados com a equação proposta por Van Genuchten (1980). Para os gráficos, a seguir, os valores de sucção são apresentados em valor absoluto.

Pode-se observar que as curvas para o corpo de prova de tamanho CBR ajustaram-se melhor ao modelo de Van Genuchten que as curvas traçadas com tamanho Proctor. Deve-se levar em conta que os ensaios de Proctor para os solos SA paulista 5% e 10% foram realizados durante dias chuvosos e de temperaturas baixas, observando-se a baixa evaporação durante esses ensaios, o que de alguma forma pode ter influenciado os resultados obtidos.

Como não se dispunham de todos os parâmetros para a utilização da equação de Van Genuchten (1980), foram feitas algumas considerações descritas a seguir. O valor da

umidade residual adotado foi o encontrado após se colocar o corpo de prova para secar ao ar, até que não houvesse mais variação do peso do mesmo, e o de umidade saturada, do ensaio de condutividade hidráulica variável, sendo esta um valor médio entre a umidade do topo e da base.

6.2.3.1 Tamanho Proctor

As curvas apresentadas nas Figuras 61, 62 e 63 não apresentaram bons ajustes da equação proposta por Van Genuchten. Isto pode ser influência da temperatura ambiente, visto que, durante os ensaios com os solos SA Paulista 5 e 10%, os dias apresentaram-se chuvosos e com baixas temperaturas, havendo baixa evaporação durante esses ensaios.

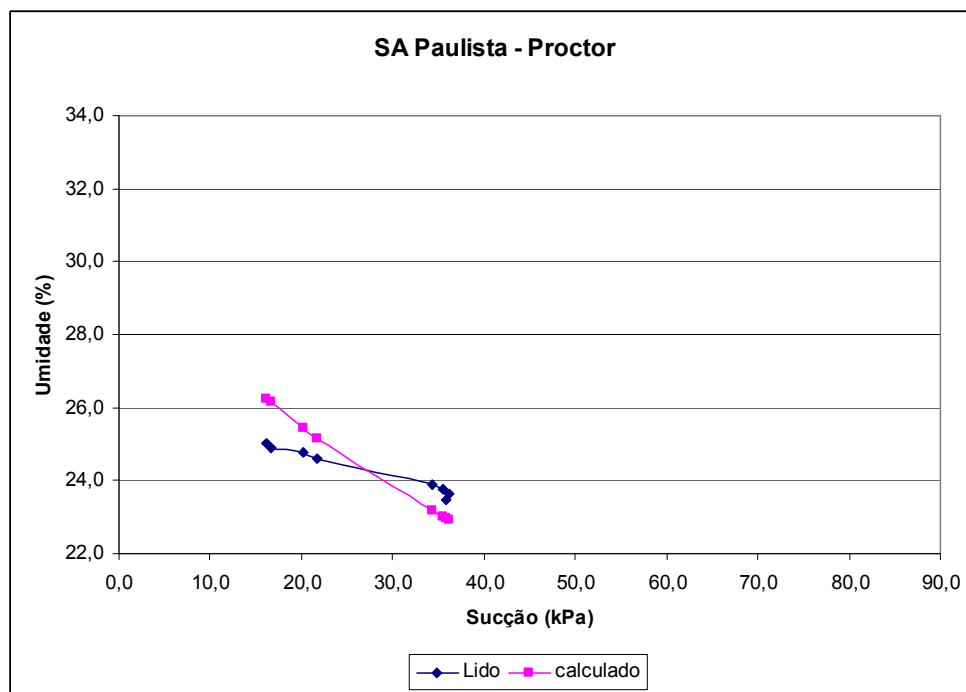


Figura 61: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista

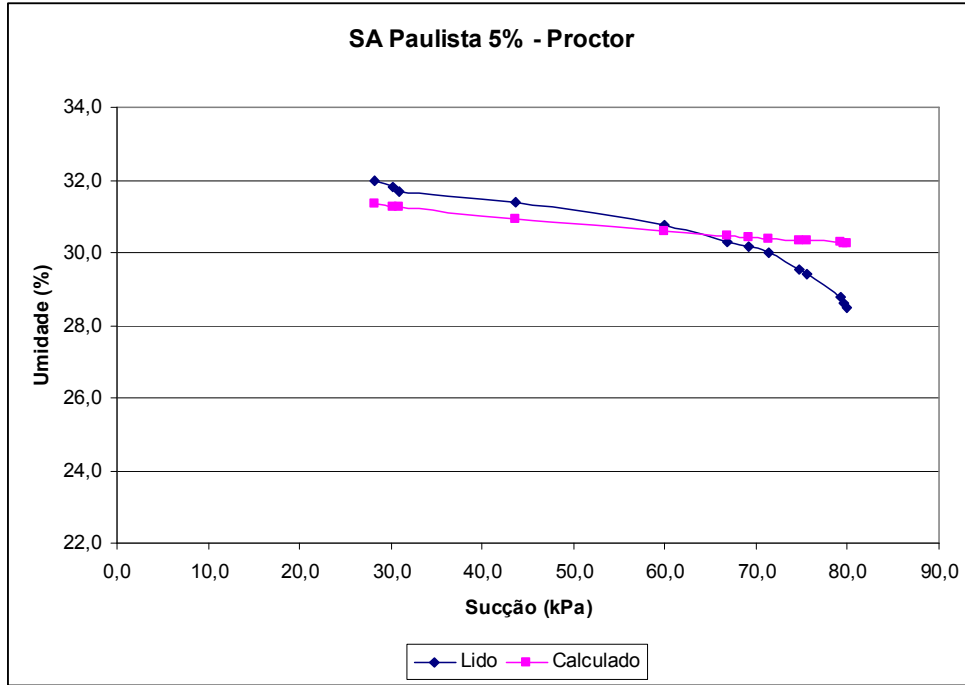


Figura 62: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista 5%

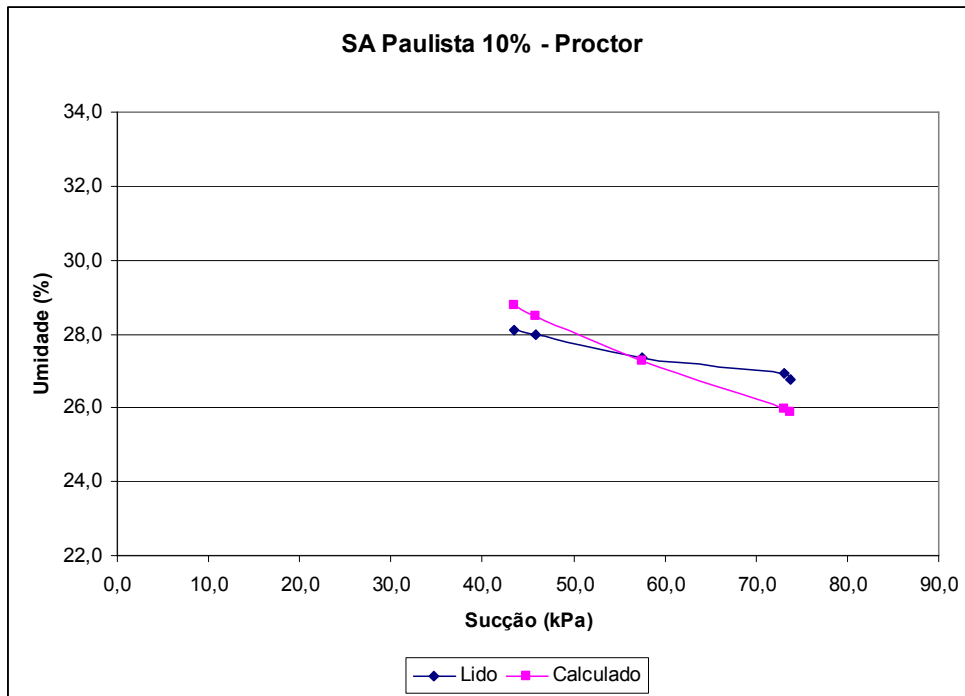


Figura 63: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista 10%

6.2.3.2 Tamanho CBR

As curvas apresentadas nas Figuras 64, 65 e 66 apresentaram ajustes satisfatórios para a equação proposta por Van Genuchten.

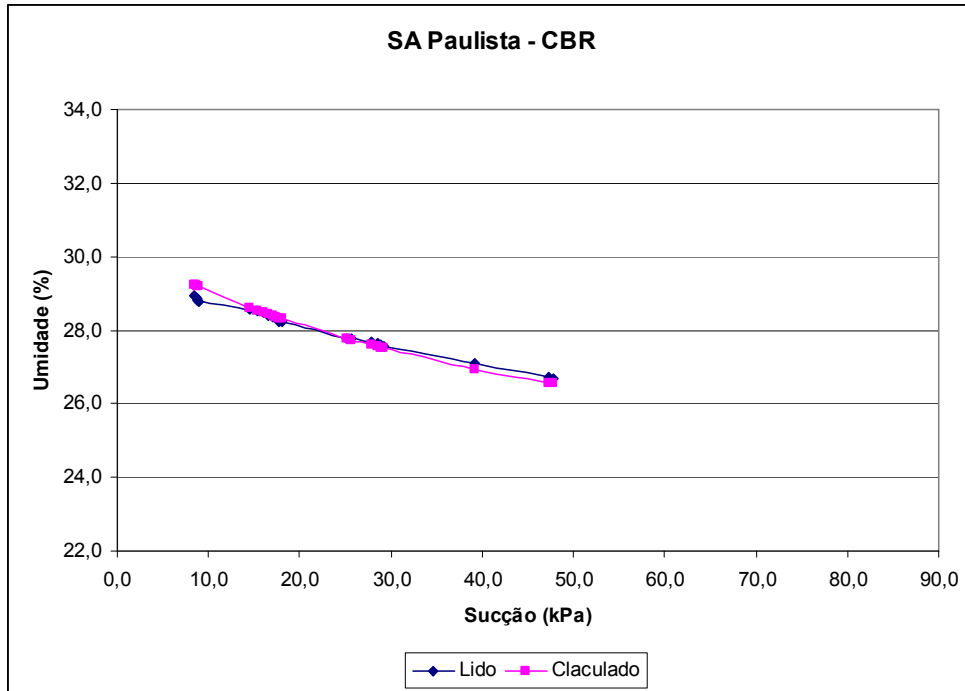


Figura 64: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista

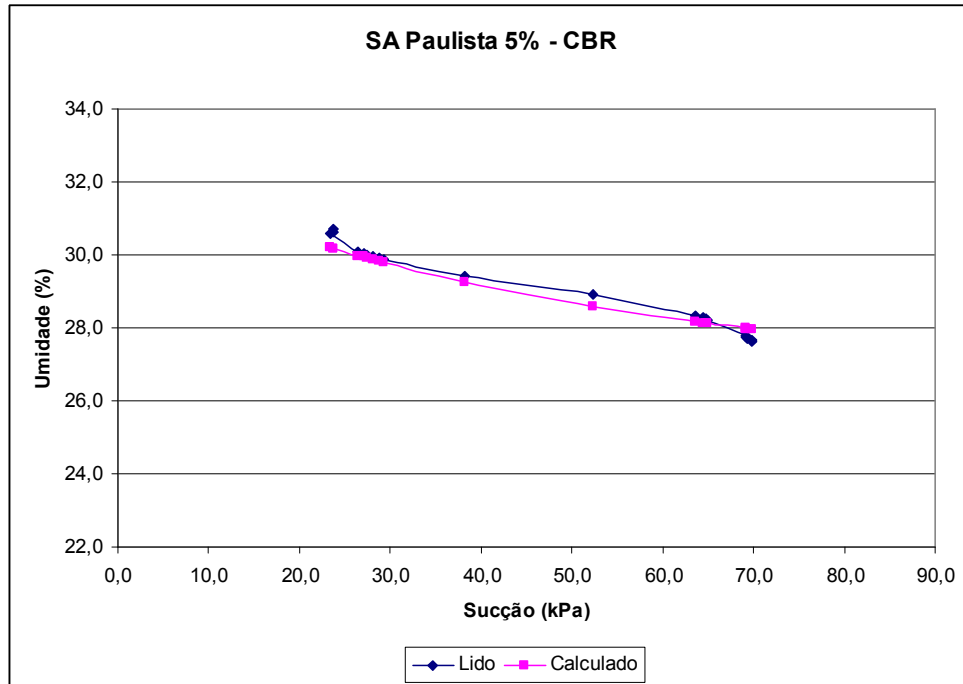


Figura 65: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista 5%

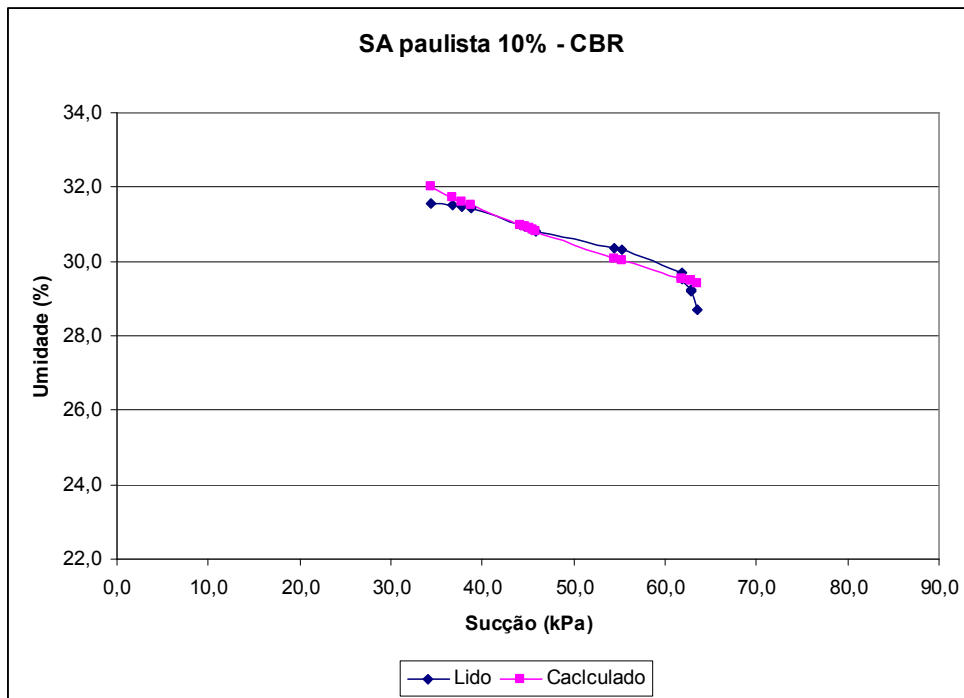


Figura 66: Comparação entre a curva característica obtida e a calculada pelo modelo de Van Genuchten (1980) para o solo SA Paulista 10%

6.3 Discussões

Para a realização dos ensaios neste trabalho, adicionou-se bentonita ao solo da Central de Tratamento de Nova Iguaçu, a fim de que o valor da condutividade hidráulica atendesse as recomendações mínimas de modo a poder ser utilizada como camada de cobertura. Este valor foi obtido a partir da adição de porcentagens de bentonita superiores a 4% em peso seco. Este valor mostrou-se compatível com o sugerido por Hoeks *et al.* (1987), onde verifica-se que a adição de porcentagens superiores a 5% de bentonita reduzem a condutividade hidráulica a patamares inferiores a 5×10^{-10} m/s. Ainda segundo Hoeks, esse valor pode chegar a 1×10^{-10} m/s após um período de 2-3 meses, devido a expansão da bentonita (capítulo 4).

Durante os ensaios de ressecamento livre foram coletados dados de variação volumétrica, sucção, temperatura e umidade. Esses dados foram analisados através de gráficos de sucção versus tempo, variação volumétrica versus umidade e da curva característica.

Através dos gráficos de variação volumétrica versus umidade observa-se que a variação volumétrica tende a ser a mesma com o aumento da adição de bentonita adicionada ao solo. Tal resultado difere do encontrado por Tay *et al.* (2001), que observa a redução volumétrica, e os corpos de prova mais sensíveis à esta variação foram aqueles compactados com umidade em torno de 20%.

No presente estudo, os corpos de prova foram compactados com umidade em torno de 30%, valor superior à umidade ótima de compactação, não sendo possível observar a formação de trincas ou microfissuras nos mesmos. Este resultado é diferente do relatado por Tay, no qual foram observados trincas para os corpos de prova compactados com umidade de 20%.

No presente estudo, não foram observadas trincas em qualquer corpo de prova, mesmo variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo em 5% e 10%. Mesmo assim a variação volumétrica foi acompanhada, notando-se a variação tende a ser igual, mesmo

para o corpo de prova com maior adição de bentonita. Deve-se lembrar que todos os corpos de prova foram compactados com umidade em torno de 30%.

Observa-se o deslocamento da curva característica para os corpos de prova com diferentes porcentagens de bentonita, resultado esse também relatado por Montañez (2003), sendo este comportamento consequência de tal adição.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência da adição de bentonita na camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos, utilizando o solo da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu. Como visto, a camada de cobertura apresenta várias funções, entre elas prevenir a infiltração de precipitação.

Como tal solo não atendia as recomendações mínimas em relação a condutividade hidráulica, estudou-se a adição de bentonita a ele. Para se saber qual a porcentagem de bentonita a partir da qual o solo passava a apresentar condutividade suficientemente baixa, foram realizados ensaios de condutividade hidráulica. A partir desses ensaios, observou-se que, para adições de bentonita superiores a 4% em peso seco, tal valor de condutividade hidráulica era alcançado. Além do ganho em relação a condutividade hidráulica, há a melhora do comportamento plástico do solo em estudo.

Tendo esse valor em vista, foram realizados ensaios de ressecamento livre com o solo SA Paulista sem adição de bentonita, que era o controle, e SA Paulista 5% e 10%, com adição de 5 e 10% em peso seco, respectivamente.

Nos gráficos de sucção versus tempo, verifica-se a queda da sucção com o aumento da adição de bentonita ao solo para ambos os tamanhos de corpo de prova. Tal resultado é coerente, pois o maior percentual de bentonita conduz ao aumento de finos no solo, o que se reflete no aumento da sucção.

De acordo com os ensaios realizados, pode-se observar que o aumento da porcentagem de bentonita adicionada ao solo diminui a condutividade hidráulica do solo estudado e reduz a sucção. Esses fatores são de extrema importância para solos utilizados como camada de cobertura, pois afetam diretamente o balanço hídrico de um aterro de resíduos sólidos, evitando a infiltração de água e permitindo uma diminuição da produção de lixiviado.

Observa-se que os valores de variação volumétrica tendem a ser os mesmos para as diferentes porcentagens de bentonita adicionada ao solo. Além disso, deve-se lembrar que a bentonita possui característica expansiva, regenerando as trincas a cada ciclo de umedecimento, o que também leva a redução de caminhos preferenciais no solo. Tais características, adicionadas ao fato da redução de condutividade hidráulica com a adição de bentonita, indicam a grande vantagem na utilização da mesma para solos utilizados como camada de cobertura de aterros no caso dos solos não atingirem a condutividade hidráulica mínima exigida pelos órgãos ambientais..

As curvas de retenção apresentaram-se mais ajustadas à equação de Van Genuchten (1980) para o corpo de prova do tamanho tipo CBR. No momento, não há justificativa para tal questão, podendo isso ser consequência de fatores externos que, de alguma forma, afetaram os ensaios do corpo de prova do tamanho tipo Proctor.

Cabe ressaltar que, na visão da autora, o maior mérito desta dissertação consistiu no desenvolvimento do equipamento para realização de ensaios de ressecamento livre no âmbito do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ sob orientação do Prof. Cláudio Mahler. Registra-se que o equipamento mostrou-se adequado para as análises conduzidas nesta pesquisa.

7.2 Recomendações

A utilização de bentonita junto ao solo também deve ser analisada do ponto de vista econômico, levando-se em conta a quantidade ideal de bentonita a ser adicionada ao solo, de forma a equilibrar os ganhos relacionados às características do solo e aos fatores econômicos.

Em pesquisas futuras, devem ser realizados ensaios com outros tipos de solo e tamanho de corpos de prova de maiores dimensões, para verificar se o comportamento é o mesmo que o obtido nesta pesquisa. Também sugere-se que a umidade inicial dos ensaios seja a

mesma para todos os corpos de prova, desde que esta umidade esteja no ramo úmido da curva de compactação, de forma a facilitar a análise dos resultados obtidos.

Pode-se também aumentar a temperatura do corpo de prova, a fim de que as condições em laboratório sejam mais próximas às condições reais, além de ciclos de umedecimento-ressecamento, através da inundação do corpo de prova, e observando-se o comportamento da formação de trincas durante o processo de ressecamento.

Também é sugerida a adição de porcentagens de bentonita adicionadas ao solo superiores às utilizadas neste trabalho, para confirmar o resultado obtido por Tay *et al.* (2001), que relata a influência da quantidade de bentonita na formação de trincas, ou utilizar solos com elevadas características de contração e formação de trincas, de modo que a influência de bentonita fique mais clara.

O uso de uma célula de carga no lugar da balança também se mostra interessante, pois, dessa forma, os dados de peso seriam adquiridos de forma automática e contínua, melhorando a exatidão dos dados de umidade.

Outra recomendação seria a simulação do balanço hídrico utilizando-se os parâmetros aqui obtidos, para alguns modelos, variando-se os cenários e, posteriormente, comparando-se os resultados obtidos com a observação de campo, observando se há discrepância entre tais valores.

Em síntese, espera-se que esta dissertação proporcione novos caminhos para desenvolver pesquisas no tema de cobertura de aterros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica (Método de ensaio). Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180**: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade (Método de ensaio). Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6459**: Solo - Determinação do Limite de Liquidez (Método de ensaio). Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação (Método de ensaio). Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 6457**: Determinação do Teor de Umidade. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 14545**: Determinação do coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BRAVAL. VALORIZAÇÃO E TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Disponível em: <http://www.braval.pt/content01.asp?auxID=menu-instalacoes&treeID=02/01&newsID2>>. Acessado em: 20-12-2006.

BERGER, K. „Validation of the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model for Simulating the Water Balance of Cover Systems”. *Environmental Geology*, 39, pp. 1261-1274, 2000.

BERGS, C-G., RADDE, C-A. *Abfallablagerungsverordnung – 30.BlmSchV – TA Siedlungsabfall*. - 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Erich Schmidt, Alemanha, 2002. ISBN 3-503-06061-8

BOIVIN, P., GARNIER, P., TESSIER, T. “Relationship Between Clay Content, Clay Type and Shrinkage Properties of Soil Samples”. *Soil Science and Society American Journal*, 68, pp.1145-1153, 2004.

BOIVIN, P., GARNIER, P., VAUCLIN, M. “Modeling the Soil Shrinkage and Water Retention Curves with the Same Equations”. *Soil Science and Society American Journal*, 70, pp.1082-1093, 2006.

CARVALHO, A.R., 2006, *Desenvolvimento de um Equipamento para a Determinação de Parâmetros Geotécnicos de Resíduos Sólidos*. Tese de D.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CASSEL, D.K., NIELSEN, D.R. ”Field Capacity and Available Water Capacity”. In Kluite, A., *Methods of Soil Analysis, part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2ª ed. Madison, American Society of Agronomy & Soil Science Society of Agronomy, pp.901-926, 1986.

COMLURB: Companhia Municipal de Limpeza Urbana. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/comlurb>>. Acessado em: 02-08-2007.

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DO SOLO. Disponível em: <<http://www.dcs.ufla.br/nazareno/riscos/Nlixo.htm>>. Acessado em: 20-12-2006.

Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH. Disponível em: <<http://gruener-punkt.de>>. Acessado em: 10-08-2007.

DIENE, A.A., 2004, *Desenvolvimento de Tensiômetros para Sucção Elevada, Ensaaiados em Lisímetros de Laboratório*. Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

ECOPOP. Disponível em:

<http://www.ecopop.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=134&sid=10&from_info_index=6>. Acessado em: 20-12-2006.

EGLOFFSTEIN, T.A. “Natural Bentonites – Influence of the Ion Exchange and Partial Desiccation on Permeability and Self-healing Capacity of Bentonites Used in GCLs”. *Geotextiles and Geomembranes*, 19, pp. 427-444, 2001.

ELSBURY, B. R., DANIEL, D.E., SRADERS, G.A., ANDERSON, D.C. “Lessons Learned from compacted Clay Liners”. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 166, n. 11, pp. 1641-1660, 1990.

FARIAS, M.M., “Modelagem Constitutiva para o Comportamento Mecânico de Solos Não Saturados”. *Anais, 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados*, São Paulo, Brasil, 2004. pp.527-542. ISBN 85-98156-10-8

FERRARI, A.A.P., 2005, *Viabilidade da Utilização de Silte Compactado como Material de Impermeabilização em Aterros de Resíduos*. Dissertação de M.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil

FERREIRA, M.A.S., 2006, *Aplicação de Modelos de Avaliação Qualitativa e Quantitativa dos Percolados Gerados em um Aterro Sanitário*. Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

FREDLUNG, D.G., RAHARDJO, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, 1993. ISBN 0-471-85008-X

FREDLUND, D.G., XING, A. "Equation for Soil-Water Characteristic Curve". *Canadian Geotechnical Journal*, v.37, pp.521-532, 1994.

FREDLUND, M.D., WILSON, G.W, FREDLUND, D.G. Representation and Estimation of the Shrinkage Curve. Unsaturated Soil. Ed. Jucá, de Campos & Marinho, 2002. pp.145-149. ISBN 90 5809 371 9

GERSCOVICH, D.M.S. "Equações para Modelagem da Curva Característica Aplicadas a Solos Brasileiros". Anais, 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre, Brasil, 2001, pp.76-92.

GOUVEIA FILHO, P.P.F., OLIVEIRA, F.J.P. "Use of Soil/Bentonite Mix in Waterproofing Layer Composition of Upper Waterproofed Capping of Industrial Waste Landfill". *Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*, Cagliari, Itália, 3-7 Outubro 2005.

HEWITT, P.J., PHILIP, L.K. "Problems of Clay Desiccation in Composite Lining Systems". *Engineering Geology*, 53, pp. 107-113, 1999.

HOEKS, J., GLAS, H., HOFKAMP, J. & RYHINER, A.H. "Bentonite Liners for Isolation of Waste Disposal Sites". *Waste Management & Research*, 5, pp. 93-105, 1987.

HOEKS, J., RYHINER, A.H. *Surface Capping with Natural Liner Materials*. Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact. Academic Press, New York, pp.311-322, 1989.

IBAM. *Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*. 15ed. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.ISBN 85-09-00113-8.

IPT/CEMPRE. *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. 2ed. São Paulo: IPT/CEMPRE,2000. (Publicação IPT 2622).

KLEPPE, J.H., OLSON, R.E. “Desiccation Cracking of Soil Barriers”. *American society for Testing and Materials*, pp. 263-275, 1985.

LAMBE, T.W., WHITMAN, R.V. *Soil Mechanics, SI Version*. Ed. John Wiley & Sons, New York, USA, 1969.

MAHLER, C.F., DIENE, A.A. Um Instrumento para Medida de Potencial Matricial nos Solos sem Ocorrência de Cavitação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, pp.792, 2007.

MAHLER, C.F., GONÇALVES, H. Requerimento de Patente nº PI0403670-0.

MAHLER, C.F., PACHECO, A.C.C. DOS S., GONÇALVES, H. Desenvolvimento de um Tensiômetro para Medições de Sucções Elevadas. 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, V. 1, pp.69-72, São Carlos, SP. 2004

MAHLER, C.F. Recomendação de Ensaio para Observação de Trincas em Solos de Cobertura de Aterros. 2006.

Mapa do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <www.geocities.com/nbittencourt/images/rio_n.gif>. Acessado em:12-03-2006.

MARINHO, F.A.M., 1994. *Shrinkage Behaviour of Some Plastic Soils*. Tese de D.Sc., University of London, Londres, Inglaterra.

MARONI, L.G., ARAMAKI, R.T., MONTEZUMA, P.R.M. “Desenvolvimento dos Geossintéticos na América do Sul”. Anais, 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos, Rio de Janeiro, Brasil, 1999, p.9-20.

MONTAÑEZ, J.E.C., 2002. *Suction and Volume Changes of compacted Sand-Bentonite Mixtures*. Tese de D. Sc. University of London, Londres, Inglaterra.

MÜNNICH, K. “Water Balance”. *Simpósio Internacional de Tecnologia de Tratamento de Resíduos Sólidos*, Rio de Janeiro, Brasil, 24-27 Abril 2006.

PIMENTEL, V.E. “Landfill Covers with Geosynthetics”. *Simpósio Internacional de Tecnologia de Tratamento de Resíduos Sólidos*, Rio de Janeiro, Brasil, 24-27 Abril 2006.

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

Programa GOOGLE EARTH (2007).

RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. Disponível em: <<http://www.cm-evora.pt/Documentos/DAS/residuos.htm>>. Acessado em: 20-12-2006.

RICHRDS, L.A., WEAVER, L.R. “Moisture Retention by Some Irrigated Soil as Related to Soil-moisture Tension”. *Journal of Agricultural Research*, 69, pp. 215-235, 1944.

ROSE, J.L., 2007, *Estudo da Oxidação do Metano em uma Camada de Cobertura*. Qualificação de D.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SAARELA, J. *Hydraulic Approximation of Infiltration Characteristics of Surface Structures on Closed Landfills*. Finnish Environment Institute, Finland.1997.

SCHROEDER, P.R., DOZIER, T.S., ZAPPI, P.A., McENROE, B.M., SJOSTROM, J.W., PEYTON, R.L. *the Hydrologic Evaluation of landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3*. EPA/600/R-94/168b, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC, 1994.

SCHUELER, A.S., 2005, *Estudo de Caso e proposta para Classificação de Áreas Degradadas por Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de D.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVEIRA, A.M.M., 2004, *Estudo do Peso Específico de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SIMON, F-G., MÜLLER, W.W. “Standard and Alternative Landfill Capping Design in Germany”. *Environmental Science & Policy*,7, pp.277-290, 2004.

SITHARAM, T.G., SIVAPULLAIAH, P.V. & SUBBA PAO, K.S. Shrinkage Behaviour of Compacted Unsaturated Soils. *Unsaturated Soils/Sols Non Saturés*. Ed. Alonso & Delage, 1995. pp.195-200. ISBN 90 5410 583 6/2 85978 241 9

Society Soil Science of America: Glossary of Soil Science Terms. Disponível em: <<http://www.soils.org/sssagloss/>>. Acessado em: 10-08-2007.

TAY, Y.Y., STEWART, D.I., COUSENS, T.W. “Shrinkage and Desiccation Cracking in Bentonite-Sand Landfill Liners”. *Engineering Geology*, 60, pp.263-274, 2001.

TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004.

UNAL, G.Y., TOGROL, E. “Shrinking to the Limit”. Proceeding of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Istanbul, 2001.

US EPA, US Environmental Protection Agency – Part V: Ensuring Long-Term Protection, Chapter 11 : Performing Closure and Post-Closure Care. Disponível em: <<http://www.epa.gov/industrialwaste/chapters/chap11.pdf>>. Acessado em 20-10-2006. 2003.

US EPA, US Environment Protection Agency. *MSW Landfill Manual*, Revised April, 1998.

VAN GENUCHTEN, M. Th. “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils”. *Soil Science and Society American Journal*, 44, pp.892-898, 1980.

VANAPALLI, S.K., FREDLUND, D.G., PUFAHL, D.E. “The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till”. *Geotechnique* 49, n 2, pp.143-159, 1999.

YUEN, S.T.S., WANG, Q.R., STYLES, J.R., McMAHON, T.A. “Water Balance Comparison Between a Dry and a Wet Landfill – a Full-scale Experiment”. *Journal of Hydrology*, 251, p. 29-48, 2001.

ANEXO A

Neste anexo encontram-se os gráficos de sucção versus temperatura obtidos durante esta pesquisa. Os gráficos apresentados no corpo desse trabalho foram limpos, retirando-se as instabilidades. Essas instabilidades podem ter sido causadas por piques de luz, causadas, por exemplo, pelo ligamento e desligamento de ar condicionados. Mesmo a utilização de *no break* não garantia a total estabilização da corrente elétrica.

Os ensaios eram finalizados quando a sucção tendia a estabilização ou quando a curva apresentava algum problema, como grandes irregularidades (figuras A.3 e A.4). No ensaio correspondente a figura A.3 houve a provável entrada de ar no sistema, que levou ao término do ensaio. Durante o ensaio correspondente a figura A.4 houve o desgaste da cola que faz a vedação entre a pedra porosa e o copo de acrílico, levando a perda de pressão do sistema.

Em outros ensaios realizados nesta pesquisa, foi observado que a entrada de ar no sistema também levava a problemas na medição de sucção e até a perda do ensaio.

Na Figura A.1, no trecho final há a elevação da temperatura do topo do corpo de prova, devido ao aumento de temperatura em decorrência da colocação de uma lâmpada aquecendo o topo do corpo de prova.

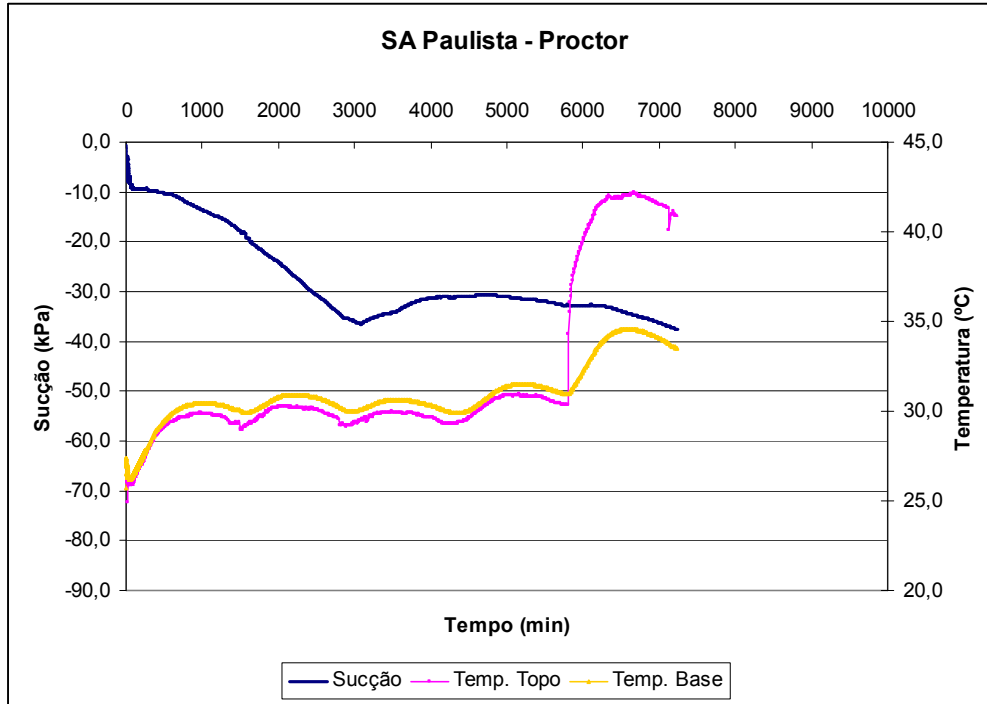


Figura A.1: Sucção versus temperatura para o solo SA Paulista no tamanho Proctor

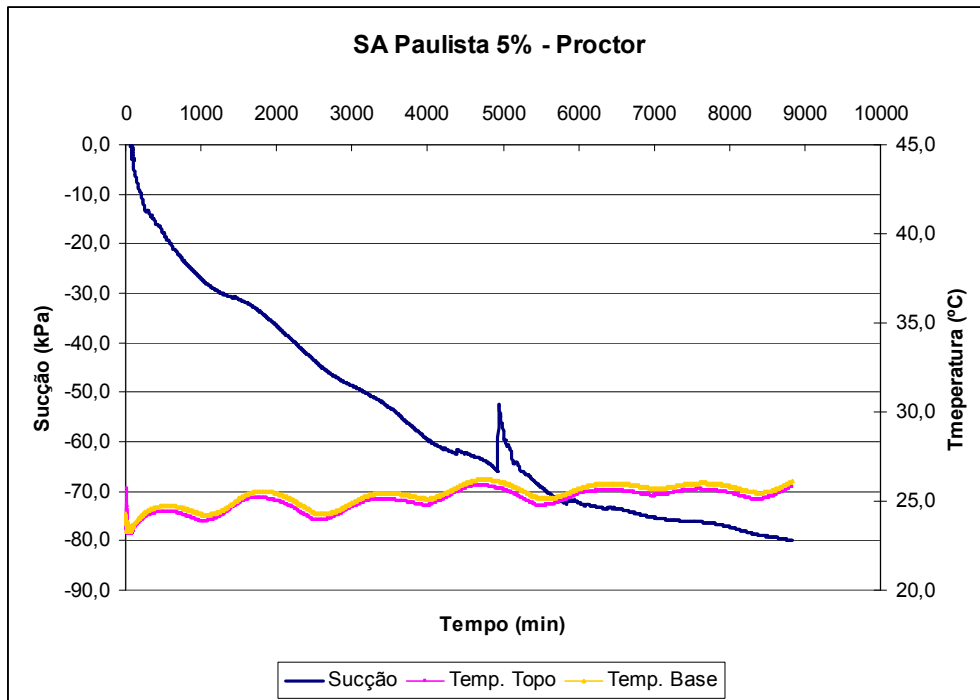


Figura A.2: Sucção versus temperatura para o solo SA Paulista 5% no tamanho Proctor

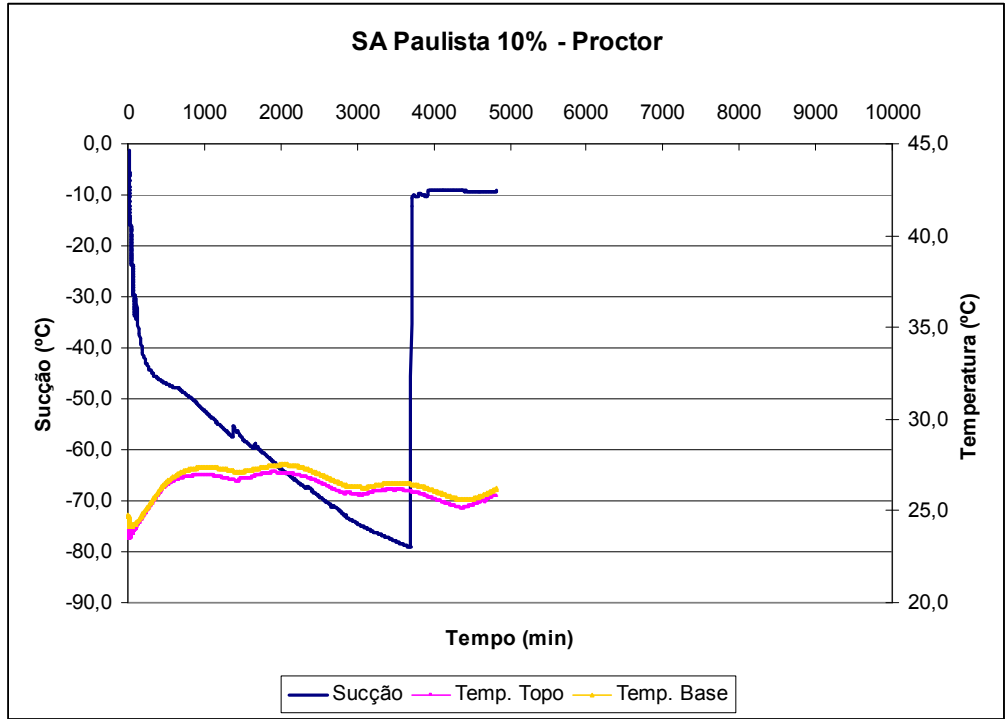


Figura A.3: Sucção versus temperatura para o solo SA Paulista 10% no tamanho Proctor

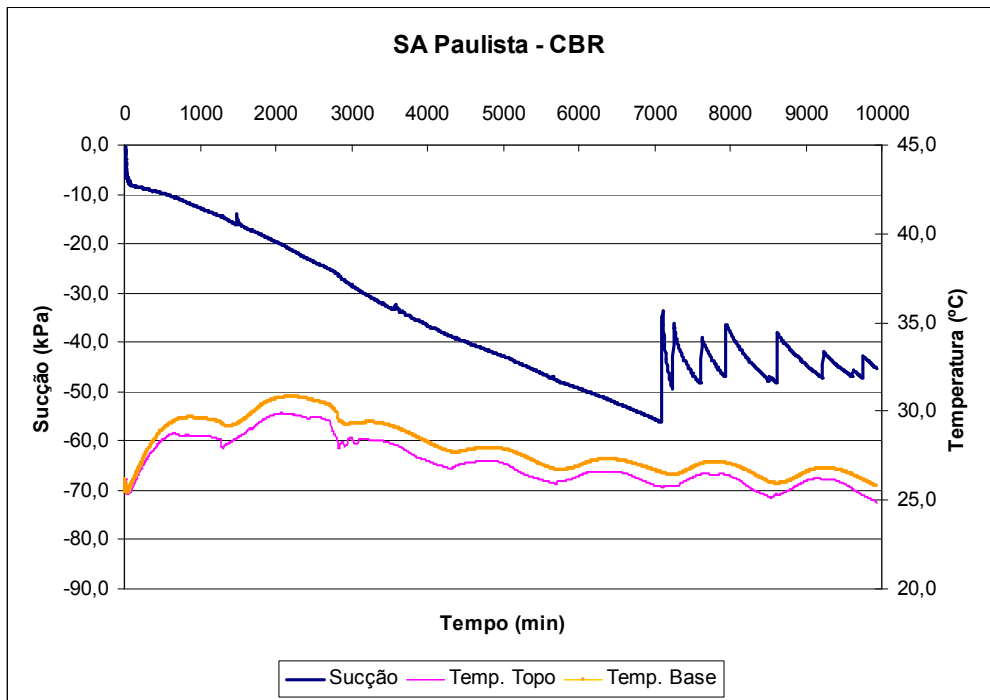


Figura A.4: Sucção versus temperatura para o solo SA Paulista no tamanho CBR

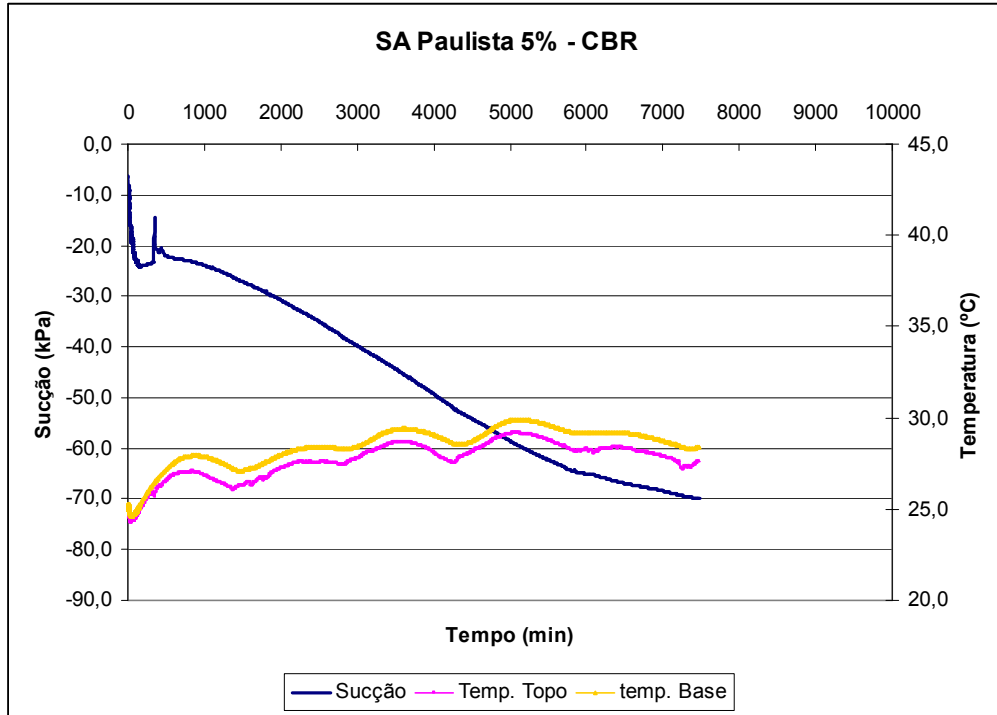


Figura A.5: Sucção versus temperatura para o solo SA Paulista 5% no tamanho CBR

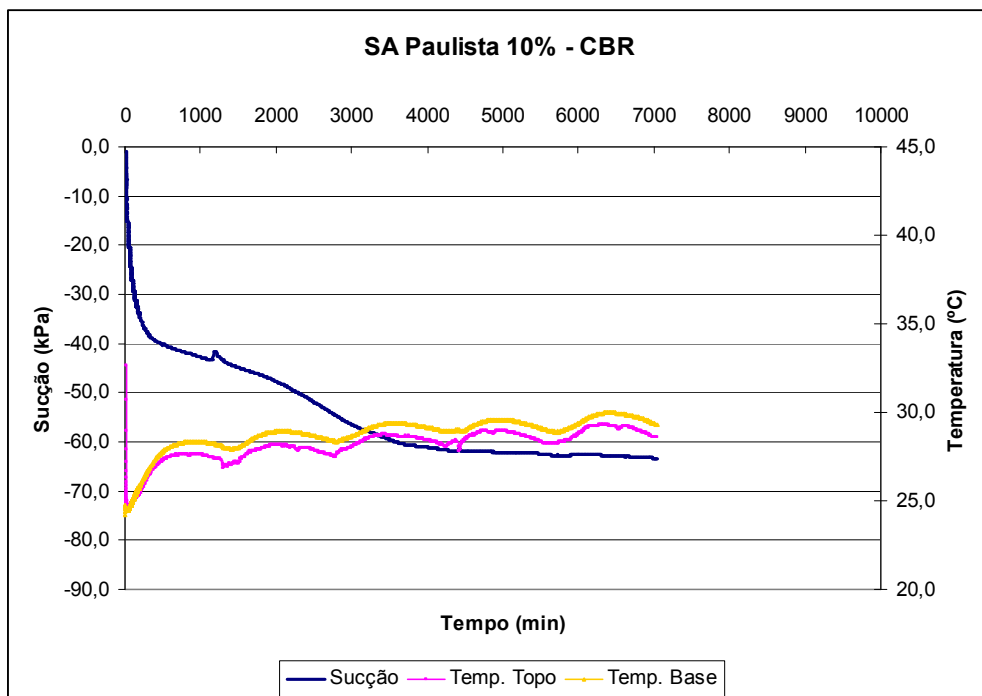


Figura A.6: Sucção versus temperatura para o solo SA Paulista 10% no tamanho CBR