



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

KRISTIAN SALES VIEIRA

**PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DE UM SOLO COMPACTADO
COM VERMICULITA PARA FINS DE COBERTURA EM ATERRO DE
RESÍDUOS**

Guaratinguetá
2013



KRISTIAN SALES VIEIRA

**PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DE UM SOLO COMPACTADO
COM VERMICULITA PARA FINS DE COBERTURA EM ATERRO DE
RESÍDUOS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes

Guaratinguetá
2013



Vieira, Kristian Sales.

Propriedades Geomecânicas de um solo compactado
com vermiculita para fins de cobertura em aterro de
resíduos / Kristian Sales Vieira, 2013

119 f.

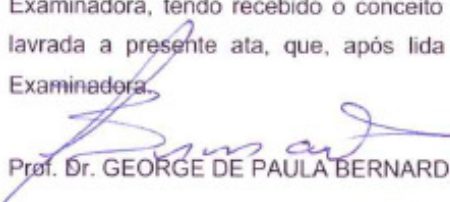
Orientador: George de Paula Bernardes

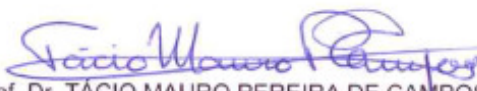
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2013

1. Aterro de resíduos. 2. Cobertura. 3.
Vermiculita. 4. Infiltração. 5. Características
Geotécnicas I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE KRISTIAN SALES VIEIRA,
DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL,
DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 26 dias do mês de fevereiro do ano de 2013, às 14:00 horas, no(a) SALA DE VIDEOCONFERÊNCIA DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP, Prof. Dr. TÁCIO MAURO PEREIRA DE CAMPOS do(a) Departamento de Engenharia Civil / Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC, Profa. Dra. ANNA SILVIA PALCHECO PEIXOTO do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de KRISTIAN SALES VIEIRA, intitulado "PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DE UM SOLO COMPACTADO COM VERMICULITA PARA FINS DE COBERTURA EM ATERRO DE RESÍDUOS". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES


Prof. Dr. TÁCIO MAURO PEREIRA DE CAMPOS


Profa. Dra. ANNA SILVIA PALCHECO PEIXOTO

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus, por estar sempre ao meu lado, me guiando, dando força, sabedoria e discernimento para entender, enfrentar, superar e vencer cada obstáculo na minha vida.

Agradeço à minha família, em especial a minha esposa e filhos pelo incentivo e compreensão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. George de Paula Bernardes, pela paciência e pelos conhecimentos transmitidos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores: Prof. Dr. Heraldo Giacheti e Prof^a. Dr^a. Anna Silvia Palcheco Peixoto pelas sugestões e orientações dadas no exame de qualificação desta dissertação.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Agradeço ainda aos alunos de graduação que me auxiliaram durante os ensaios laboratoriais e todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta dissertação.

Meu muito obrigado!

Resumo

A cobertura final de um aterro de resíduos se dá quando a última célula alcança sua cota mais alta. Os principais objetivos da cobertura final em aterros são: minimizar a infiltração de água de chuva, limitar a emissão descontrolada de gases proveniente da decomposição dos resíduos, suprimir a proliferação de vetores, fornecer uma superfície adequada para a revegetação e servir como o elemento central na recuperação do local. Esta pesquisa tem o propósito de analisar as características geotécnicas (mecânicas e hidráulicas) de um solo residual maduro de biotita gnaisse compactado com vermiculita expandida verificando a aplicabilidade desta mistura para construção de cobertura de aterros de resíduos. A vermiculita é um material inodoro, não abrasivo e não carcinogênico e suas propriedades de superfície, em especial a porosidade e carga superficial negativa, promovem a este material um alto poder de absorvente e carreador de nutrientes. Inicialmente foram realizados ensaios de absorção de água e de secagem ao ar em amostras compactadas com diferentes porcentagens em volume de vermiculita acrescentada ao solo. Os resultados preliminares mostraram que a relação vermiculita/solo na razão de 40% em volume de solo compactado apresentou um melhor resultado para os testes realizados. A absorção de água atingiu um valor de 51% quando comparada ao solo natural (14%) e com relação à perda de massa esta mesma mistura apresentou uma estabilidade de 72 horas da umidade absorvida enquanto o solo natural após 24 horas de secagem ao ar a umidade inicial já havia sido alcançada. Também foram realizados ensaios complementares tais como curva característica, ensaio de compressão diametral e compressão simples, compressibilidade e adensamento, resistência ao cisalhamento direto, permeabilidade e ensaio de formação de trinca. Diante dos resultados apresentados, o uso de vermiculita expandida ao solo compactado se apresenta como uma alternativa para cobertura de aterro de resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro de resíduos; Cobertura; Vermiculita; Infiltração; Características Geotécnicas.

Abstract

The final cover for a landfill of waste occurs when the last cell reaches its highest elevation, and the main objectives of this cover are: to minimize infiltration of rainwater, to limit the uncontrolled emission of gases from the decomposition of waste, to suppress the proliferation of vectors, to provide a suitable surface for revegetation and serving as the central element in the recovery site. This study aims to analyze the geotechnical characteristics (mechanical and hydraulic) of soil residual biotite gneiss mature compacted with expanded vermiculite and to verify the applicability of this mixture for construction in waste landfill cover. Vermiculite is a odorless, non-abrasive, non-carcinogenic material, in addition their surface properties, in particular the porosity and surface charge negative, make this material a high power of absorbing and nutrient carrier. Initially, were performed tests by water absorption and drying compressed air in samples with different percentages by volume of vermiculite added to the soil. Preliminary results showed that the vermiculite / soil ratio of 40% by volume of compacted soil was better for the tests. The water absorption reached a value of 51% compared to the natural soil (14%) and with about the mass loss, that same mixture showed a stability of 72 hours of the absorbed moisture while the natural soil, after 24 hours by drying the initial moisture content had already been achieved. Then, were conducted additional tests such as the characteristic curve, diametral compression test, simply compressive compressibility and density, direct shear strength, permeability and formation tests crack. Considering the results presented, the use of expanded vermiculite to the soil compacted presents itself as a alternative for a final landfill of waste cover.

KEYWORDS: Landfill; Cover; Vermiculite; Infiltration; Geotechnical characteristics.

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema ilustrativo da cobertura ou revestimento impermeável superior (Bosco, 2008).....	7
Figura 2: Sistema de Cobertura Convencional ou Monolítica (EPA 542-F-03-015).....	9
Figura 3: Sistema de Cobertura Evapotranspirativas (EPA 542-F-11-001).....	10
Figura 4: Cobertura Evapotranspirativa Monolítica (Zornberg & McCartney, 2007)	10
Figura 5: Sistema de Barreira Capilar (Bosco, 2008 – adaptado)	12
Figura 6: Sistema de cobertura por Barreira Capilar Dupla (Amorim, 2008 – adaptado) ..	13
Figura 7: Representação genérica para solos finos e grosseiros: (a) Curva Característica e (b) Condutividade Hidráulica não Saturada. (Khire, 2000).....	15
Figura 8: Cobertura final em aterros de resíduos perigosos EUA (Dwyer, 2003)	17
Figura 9: Cobertura final em aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) EUA (Dwyer, 2003).....	17
Figura 10: Sistema de cobertura para Camada Dupla, Camada Composta ou Camada Simples Sintética (EPA,2003)	21
Figura 11: Sistema de cobertura para Camada Simples de Argila (EPA,2003)	21
Figura 12: Sistema de cobertura para Camada Simples de Argila em Regiões Áridas (EPA,2003).....	21
Figura 13: Sistema de cobertura para Camada Simples de Argila em Regiões Áridas (EPA,2003).....	21
Figura 14: Modelo esquemático de uma amostra de solo em (a) sua formação natural e (b) diagrama de fases. (Braja, 2008).	22
Figura 15: Elemento do solo não saturado com fase contínua de ar (Fredlund e Morgenstern, 1977).	23
Figura 16: Representação da molécula de água (Martins, 2011).	24
Figura 17: Ilustração da tensão superficial: (a) forças intermoleculares da água; (b) tensão superficial. (Fonte: curiosidade.com.br)	25
Figura 18: Representação da ação da capilaridade (Fonte: feiradeciencias.com.br).....	26
Figura 19: Curva característica típica de um solo siltoso (Fredlund e Xing, 1994).....	31
Figura 20: Diferentes estágios de saturação da curva característica. (Vieira, 2005).....	32
Figura 21: Curva característica típica para solos arenosos, siltsos e argilosos, segundo Fredlund e Zing (1994).....	33
Figura 22: Taxa de infiltração pelo tempo (Torres, 2009).	37

Figura 23: Zona do perfil de umidade volumétrica (Oliveira, 2003).	38
Figura 24: Diminuição da área útil para o fluxo de água (Reichardt e Timm, 2004).	42
Figura 25: Ensaio de Permeabilidade x índice de vazios (Vargas, 1977).	44
Figura 26: Relação entre o grau de saturação e a permeabilidade em areias (Lambe e Whitman, 1969).	45
Figura 27: Ensaio de permeabilidade de carga constante (Dourado, 2003).	48
Figura 28: Ensaio de permeabilidade de carga variável (Dourado, 2003).	48
Figura 29: Mineral Vermiculita (Curbelo, 2002).	53
Figura 30: Fórmula estrutural da vermiculita (Avelino, 2009).	53
Figura 31: Fotografias de amostras de vermiculita (Santa Luzia, PB): (a) vermiculita natural; (b) vermiculita expandida (Ugarte <i>et al.</i> , 2004).	55
Figura 32: Estrutura cristalina da vermiculita (Ugarte <i>et al.</i> , 2005).	56
Figura 33: Formula Estrutural: (a) flogopita; (b) estrutura da vermiculita com cátions de Mg hidratado nas regiões entre camadas de H ₂ O e (c) estrutura estratificada de flogopita com vermiculita (Bigham <i>et al.</i> , 2001 <i>apud</i> Ugarte <i>et al</i> 2005).	56
Figura 34: Processo de beneficiamento a seco e úmido da vermiculita. (Hindman, 2006 <i>apud</i> Sznclwar & Scalabrin, 2009).	59
Figura 35: Comparação entre o tamanho de palhetas da vermiculita da Jazida Cerrado III:	60
Figura 36: Aplicações da Vermiculita expandida. (Fonte: SZW Engenharia Ltda, a partir de informações de técnicos do segmento).	62
Figura 37: Fluxo organizacional das atividades desenvolvidas.	66
Figura 38: Amostras compactadas.	68
Figura 39: Teste de secagem ao ar.	68
Figura 40: Teste de umedecimento.	69
Figura 41: Fluxo de água do solo para o papel filtro: a) medição da sucção total, b) medição da sucção matricial (Marinho, 1994 <i>apud</i> Pereira, 2010).	69
Figura 42: Representação esquemática do estado de tensões e plano de ruptura da amostra durante o ensaio (Pereira, 2010)	70
Figura 43: Prensas utilizadas no ensaio de compressão simples: (a) prensa automática; (b) prensa manual.	71
Figura 44: Representação esquemática da determinação da resistência à tração através do ensaio de compressão simples (Pereira, 2010).	72
Figura 45: Compactação das amostras para o ensaio de compressão simples.	73

Figura 46: Ensaio de compressão simples usando a prensa automática.....	74
Figura 47: Ensaio de compressão simples usando a prensa manual.	74
Figura 48: Aparelhagem usada no ensaio de cisalhamento direto.	75
Figura 49: Aparelhagem usada no ensaio de compressão edométrica.	76
Figura 50: Ensaio de Permeabilidade	77
Figura 51: Curva Granulométrica conjunta (solo residual maduro de biotita gnaiss).	78
Figura 52: Curva Granulométrica da Vermiculita Expandida Fina.....	79
Figura 53: Resultado do teste de secagem.....	80
Figura 54: Teste de imersão em água.	81
Figura 55: Resultado do teste de umedecimento e secagem.	82
Figura 56: Ciclo de umedecimento da amostra com 40% em volume de vermiculita.	83
Figura 57: Média dos valores obtidos no ciclo de secagem da amostra com 40% de vermiculita.	83
Figura 58: Gráfico de expansão das amostras no ciclo de umedecimento.	83
Figura 59: Curva de retenção de umidade do solo.	85
Figura 60: Ajuste da curva de retenção de umidade pela equação duplo Van Genuchten..	86
Figura 61: Curva de distribuição de poros.....	87
Figura 62: Resistência à tração <i>versus</i> sucção.....	89
Figura 63: Ensaio de compressão diametral: (a) antes da ruptura; (b) após ruptura da amostra.	90
Figura 64: Tensão cisalhante no plano de ruptura do solo.	91
Figura 65: Gráfico teor de umidade <i>versus</i> resistência ao cisalhamento dos corpos de prova.	92
Figura 66: Tensão vertical <i>versus</i> sucção.	92
Figura 67: Tensão vertical <i>versus</i> sucção.	92
Figura 68: Gráfico da envoltória de resistência ao cisalhamento direto.....	93
Figura 69: Índice de vazios <i>versus</i> tensão efetiva. (amostra saturada).....	94
Figura 70: Deformação vertical do solo. (amostra saturada).....	94
Figura 71: Ensaio de Permeabilidade.	95
Figura 72: Etapas de preparo das amostras para ensaio de trinca.	96
Figura 73: Amostras compactadas: (a) Mistura de solo e vermiculita; (b) Solo puro.....	96
Figura 74: Gráfico de Secagem das amostras do teste de formação de trinca.....	96
Figura 75: Contração da amostra no teste de formação de trinca:.....	97

Índice de Tabelas

Tabela 1: Camadas do sistema de cobertura final (IBAM, 2001)	18
Tabela 2: Sistema de cobertura final recomendado conforme EPA (2003) – chapter 11. ..	20
Tabela 3: Variação da tensão superficial em função da temperatura. (Fredlund e Rahardjo, 1993).....	25
Tabela 4: Métodos para medida da sucção.....	30
Tabela 5: Proposições empíricas para modelagem da Curva de Retenção. (Gerscovich, 2001).....	35
Tabela 6: Métodos de obtenção da evapotranspiração (Vescove e Turco,2005).	40
Tabela 7: Valores do coeficiente de permeabilidade (Soares, 2006).	42
Tabela 8: Coeficiente de Permeabilidade de um solo compactado.	44
Tabela 9: Fator de correção C_k em função da temperatura (Soares, 2006).....	46
Tabela 10: Proposições para a modelagem da curva de condutividade hidráulica. (Gerscovich e Guedes, 2004) <i>apud</i> Boszczowski (2008).....	52
Tabela 11: Classificação granulometria de padrões de concentrados de vermiculita natural (Reis, 2002 <i>apud</i> Ugarte <i>et al</i> 2005).....	58
Tabela 12: Composição química (%) média de vermiculitas comerciais brasileiras (Urgate <i>et al</i> , 2005).....	60
Tabela 13: Composição química (%) média de concentrados de vermiculitas comerciais internacionais (Hindman, 1994 <i>apud</i> Urgate <i>et al</i> , 2005).	61
Tabela 14: Aplicações da Vermiculita expandida. (Fonte: SZW Engenharia Ltda.).....	62
Tabela 15: Caracterização do solo.....	78
Tabela 16: Características físico-químicas da vermiculita expandida.	79
Tabela 17: Caraterização das amostras (solo + vermiculita).....	80
Tabela 18: Dados iniciais das amostras para determinação da curva característica (solo + 40% vermiculita).	84
Tabela 19: Dados iniciais das amostras para determinação da curva característica (solo puro).	85
Tabela 20: Resultados do ensaio de compressão diametral (solo + 40% vermiculita).	88
Tabela 21: Resultados do ensaio de compressão diametral (solo).	89
Tabela 22: Resultado do ensaio de compressão simples para amostra contendo 40% de Vermiculita.	90
Tabela 23: Resultado do ensaio de compressão simples para amostra de solo puro.....	91
Tabela 24: Custo Vermiculita Expandida.....	97

Sumário

RESUMO.....	I
ABSTRACT	II
SUMÁRIO.....	VII
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFIA	4
2.1 SISTEMAS DE COBERTURA	4
2.1.1 Cobertura Intermediária.....	4
2.1.2 Cobertura Final	5
2.2 CAMADAS DE COBERTURA	7
2.2.1 Camada de Base.....	7
2.2.2 Camada de Coleta de Gás	8
2.2.3 Barreira Hidráulica	8
2.2.4 Camada de Drenagem	8
2.2.5 Camada de Proteção.....	8
2.2.6 Camada de Superfície	8
2.3 CAMADAS ALTERNATIVAS	9
2.3.1 Cobertura Monolítica (convencional)	9
2.3.2 Cobertura Evapotranspirativa.....	9
2.3.3 Geomembranas Expostas.....	11
2.3.4 Coberturas Geoquímicas	11
2.3.5 Coberturas de Papel	11
2.4 BARREIRA CAPILAR.....	12
2.4.1 Barreira Capilar Dupla.....	13
2.4.2 Funcionamento da Barreira Capilar.....	14
2.4.3 Aspectos Construtivos para Sistemas de Cobertura.....	15
2.4.4 Aspectos Legais.....	18
2.5 INTERAÇÃO ÁGUA-SOLO	22
2.5.1 Solo.....	22

2.5.2	<i>Água</i>	23
2.5.3	<i>Potencial Total de Água no Solo</i>	26
2.6	INTERAÇÃO SOLO-ATMOSFERA	36
2.6.1	<i>Infiltração de Água no Solo</i>	36
2.6.2	<i>Escoamento superficial (run off)</i>	39
2.6.3	<i>Evapotranspiração</i>	39
2.7	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO	40
2.7.1	<i>Fatores que influenciam a condutividade hidráulica</i>	43
2.7.2	<i>Métodos de medida da condutividade hidráulica</i>	46
2.8	VERMICULITA	53
2.8.1	<i>Introdução</i>	53
2.8.2	<i>Mineralogia</i>	55
2.8.3	<i>Processamento</i>	57
2.8.4	<i>Características da vermiculita</i>	59
2.8.5	<i>Uso e aplicações</i>	62
2.8.6	<i>Cenário nacional e internacional</i>	65
3	MATERIAIS E MÉTODO	66
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	67
3.1.1	<i>Propriedades Físicas – Ensaios de caracterização</i>	67
3.1.2	<i>Propriedades Mecânicas</i>	67
3.1.3	<i>Propriedades Hidráulicas</i>	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	78
4.2	ENSAIOS PRELIMINARES	80
4.2.1	<i>Ensaio de Secagem ao ar</i>	80
4.2.2	<i>Ensaio de Umedecimento</i>	81
4.2.3	<i>Curva de retenção de água</i>	84
4.2.4	<i>Compressão diametral</i>	88
4.2.5	<i>Compressão simples</i>	90
4.2.6	<i>Resistência ao Cisalhamento</i>	93

4.2.7	<i>Compressão Edométrica</i>	93
4.2.8	<i>Permeabilidade</i>	95
4.2.9	<i>Formação de trinca</i>	95
4.2.1	<i>Trabalhabilidade e custos</i>	97
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1 INTRODUÇÃO

A destinação final de resíduos sólidos municipais ainda continua sendo o aterro sanitário, sendo que Monteiro (2006) considera essa, a maneira mais apropriada para se tratar os resíduos de forma adequada. Porém, um dos principais problemas em um aterro sanitário consiste em sua cobertura final.

Esta preocupação não é atuais, segundo McBean *et al* (1995), na década de 50 muitos dos aterros municipais eram projetados e construídos sem nenhum estudo de engenharia e quando atingiam sua capacidade de recebimento, eles simplesmente eram cobertos com uma camada mínima de solo seguida de uma cobertura vegetativa. Todavia, esta medida não era suficiente sendo que, após um período de chuva a água que infiltrava na superfície do aterro era contaminada pela massa de resíduo, ocasionando assim um grave problema ambiental. Desta forma, era também necessária uma cobertura final a fim de minimizar o impacto produzido no meio ambiente, além de uma proteção em toda a base do aterro,

A partir deste momento, surgiu a necessidade de desenvolvimento de técnicas de projetos de coberturas mais apuradas e economicamente viáveis para o controle da lixiviação dos contaminantes.

Além de minimizar a infiltração de águas pluviais o sistema de cobertura é responsável ainda por eliminar a proliferação de vetores, reduzir a exalação de odor, a saída descontrolada do biogás, além de reduzir os fenômenos de erosão e proporcionar o desenvolvimento da biota. (Hoeks and Ryhiner, 1989; Dwyer, 2000 *apud* Rosa, 2011).

Sistemas de cobertura, frequentemente estudados, como elemento responsável pelo controle parcial da quantidade de contaminantes a ser lixiviada, são: coberturas por barreiras capilares e coberturas prescritivas.

Tami (2004) relata que sistemas de coberturas constituídos por barreiras capilares têm sido estudados e utilizados amplamente na engenharia geo-ambiental para reduzir a infiltração de água. Estes sistemas podem ser construídos horizontalmente, em que a água infiltrada é geralmente removida do sistema por evapotranspiração, ou com uma leve inclinação, ocorrendo a drenagem lateral da água superficial.

Porém, Parent e Cabral (2005), relataram que em regiões úmidas a evapotranspiração pode não ser eficiente para remover toda a água armazenada em sistemas de cobertura horizontais, podendo resultar assim numa redução das forças capilares quando ocorrer uma forte precipitação. Nestas regiões, portanto, como forma de minimizar a infiltração, a inclinação do sistema de cobertura é a mais recomendada.

Sistemas de cobertura prescritiva constituem uma camada de solo vegetativo sobreposto a uma camada de solo compactado (barreira) de baixa permeabilidade, sobreposto à camada de resíduo. O objetivo da camada vegetativa neste sistema é o de favorecer a evapotranspiração além de proteger a cobertura de agentes erosivos. A camada de solo compactado, por sua vez, serve como barreira cuja função é de impedir que ocorra infiltração de água no resíduo e consequentemente um aumento do volume de percolado.

No Brasil, a camada de barreira segue a recomendação mínima de 50 cm de espessura de solo compactado (ReCESA, 2008). Entretanto, por não existir uma norma que determine padrões para este sistema de cobertura, geralmente é executada sem um estudo detalhado das propriedades hidráulicas e mecânicas do solo a ser utilizado. Atrélado a este problema existe o surgimento de fissuras causadas no período de estiagem devido ao ressecamento do solo (Furlan, 2008; Benvenuto, 2011).

Desta forma, o tipo do material a ser utilizado em sistemas de cobertura em aterro é fundamental e crítico, pois o coeficiente de permeabilidade deste solo irá influenciar significativamente no acúmulo de água proveniente de precipitações e na drenagem desta água que por ventura possa infiltrar no maciço de resíduos. Sendo assim, vários estudos vêm sendo desenvolvidos em prol de um projeto de cobertura alternativo mais eficiente e economicamente viável. Entretanto, a literatura não menciona o uso e aplicação da vermiculita expandida em mistura como solos compactados para esta finalidade.

A vermiculita é um argilomineral pertencente à família das micáceas, a qual é constituída principalmente por silicatos e hidratos de magnésio, ferro e alumínio. Uma das principais características deste material está na sua capacidade de expansão quando submetido a uma temperatura de aproximadamente 1000°C, caracterizando este mineral como vermiculita expandida. Os espaços vazios decorrentes desta expansão são

preenchidos por ar, conferindo à vermiculita expandida, dentre outras características, um poder de reter grande quantidade de água. (Ugarte *et al*, 2005).

Em virtude disto, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a aplicabilidade de uso de uma mistura de vermiculita expandida a um solo residual maduro de biotita gnaisse visando à melhoria das propriedades geotécnicas deste solo para fins de sistema de cobertura de aterros. A geometria (espessuras das camadas e inclinação) da cobertura do aterro será fundamentada no modelo proposto no manual de aterro de resíduos publicado pela ReCESA (2008) além de projetos realizados por Ross (1990) e Dwyer (2003).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFIA

2.1 Sistemas de Cobertura

De acordo com Amorim (2008), sistemas de coberturas (diário ou intermediário e final) são utilizados principalmente para reduzir a quantidade de água que infiltra nos resíduos, controlar a migração de gases e isolar os resíduos do meio.

Alguns aspectos importantes devem ser avaliados na elaboração de um eficiente sistema de cobertura, como por exemplo, o tipo e classe do resíduo a ser coberto, o balanço hídrico e do clima do local, a estabilidade dos taludes do sistema de cobertura, a recuperação da área do aterro e a disponibilidade de jazida de material próximo ao aterro. Além destes fatores, devem ser investigados também os aspectos geotécnicos dos solos utilizados, os fatores que influenciam o crescimento de vegetação e a possibilidade de uso dos solos conjuntamente com geomembranas, geotexteis, geossintéticos e outros, além da geometria da cobertura e identificação de plantas disponíveis e propriedade das coberturas vegetativas (Barros, 2005).

O uso e o tipo de cobertura intermediária bem como a concepção e desempenho da cobertura final em aterros são, portanto questões decisivas e críticas na implantação do método de disposição e eliminação de resíduos.

Um plano de monitoramento contínuo do aterro, após o fechamento, também deve ser estabelecido a fim de acompanhar o desempenho do sistema de cobertura adotado no projeto.

2.1.1 Cobertura Intermediária

Camadas de coberturas intermediárias são usadas diariamente como coberturas necessárias à operação do aterro de forma a limitar a quantidade de água que infiltra na superfície, isolando as células, pois a maior parte da geração de lixiviado provém da entrada de água da chuva nos períodos em que o aterro está sendo preenchido. Além disso, esta camada também tem como função melhorar a aparência estética do aterro, eliminar os vetores de doenças e evitar o espalhamento de resíduos pela ação do vento.

Outro aspecto importante está em minimizar a proliferação de odores provenientes da operação de aterros às comunidades vizinhas e permitir o tráfego de veículos e equipamentos diretamente sobre a camada.

Dentre os tipos de materiais que têm sido utilizados como cobertura intermediária em aterros está uma variedade de solos nativos, geomembranas, podas de jardins, resíduos agrícolas, resíduos de construção, e segundo Kreith (1994), destes materiais listados, apenas os solos nativos e geomembranas são os mais eficazes para limitar a entrada de água de superfície para o aterro.

Para ser eficaz, a cobertura intermediária, deve ainda, ser inclinada corretamente para melhorar o escoamento da água de superfície e com a menor espessura possível, pois grandes espessuras reduzem o volume útil do aterro e demandam a exploração de jazidas. Usualmente, espessuras entre 20 e 40 cm de solo são as mais utilizadas. (Lange *et al*, 2008).

Usando esta técnica de armazenamento temporário de material de cobertura sobre a célula de resíduo, a quantidade de água que entra no aterro pode ser limitada de forma significativa. Entretanto, em aterros projetados para a recirculação do lixiviado, a questão de saber se uma camada de cobertura intermediária é mesmo necessária, ou deveria ser necessária, é assunto que merece uma especial atenção e discussão.

2.1.2 Cobertura Final

Segundo Ferreira *et al* (2006), a cobertura de um aterro se dá quando a última célula alcança sua cota mais alta, finalizando desta forma, a disposição de resíduos nesta área.

Os principais objetivos da cobertura final de aterros são: minimizar a infiltração de água de chuva após fechamento da célula do aterro, limitar a emissão descontrolada de gases proveniente da decomposição dos resíduos, suprimir a proliferação de vetores, limitar o potencial de incêndios, fornecer uma superfície adequada para a revegetação e servir como o elemento central na recuperação do local.

Para atender a esses fins a cobertura deve ser capaz de resistir a fatores climáticos extremos (por exemplo: variações de temperatura, ciclos de molhagem e secagem); ser capaz de resistir à erosão hídrica e eólica; ter estabilidade contra deslizamentos e rachaduras; resistir às falhas devido ao acréscimo de cargas resultantes do armazenamneto de material de cobertura e ao tráfego dos veículos em toda a extensão do aterro; resistir às

deformações causadas por terremotos; resistir a perturbações causadas por plantas, animais e insetos (Koerner, 1992).

Camadas de argila com espessuras de 60 cm compactadas e um coeficiente de permeabilidade da ordem de 1×10^{-5} cm/s tem sido usado como cobertura final. Porém devido aos recalques diferenciais causados pela massa de resíduo disposto no aterro, esta camada de argila está sujeita a fissuramentos.

Uma alternativa a ser utilizada consiste na aplicação de uma camada de argila com geomembranas, tornando a cobertura mais flexível. Geomembranas de polietileno de muito baixa densidade (PEMBD) ou policloreto de vinila, com uma espessura mínima de 0,5 mm, são mais recomendáveis por apresentar uma boa flexibilidade e resistência. Entretanto, devido às condições climáticas, este material pode sofrer ressecamento.

Uma camada de solo vegetativo com uma espessura entre 20 a 40 cm e uma declividade de 3 a 5%, pode ser adotada de forma a prevenir os processos erosivos além de favorecer um maior escoamento superficial. As gramíneas (grama-amendoim, cacto-margarida, azulzinha, tapete-inglês, grama-esmeralda, orelha-de-rato), são as mais recomendada, por apresentarem uma vegetação resistente e densa o suficiente para minimizar os processos erosivos além de possuir raízes curtas (EPA, 1993; Zornberg & McCartney, 2007; Lange *et al*, 2008; Willians *et al*, 2011), pois segundo manual de resíduos sólidos (ReCESA, 2008) gramas com raízes longas podem penetrar na camada de proteção e criar caminhos para água.

A cobertura final deve ser, portanto, configurada de tal maneira que ela possa ser mantida de forma eficiente e ser passível de reparo relativamente fácil quando necessário.

2.2 Camadas de Cobertura

Na construção de um sistema de cobertura, diferentes tipos de materiais podem ser usados, tanto naturais, quanto sintéticos, podendo ainda ser usados individualmente ou pela combinação de um ou mais componentes, conforme o grau de segurança exigido no projeto.

Boscov (2008) relata que a cobertura final de um aterro é composta de uma série de camadas (Figura 1), sendo que cada uma delas tem uma função especial e, estas camadas, podem estar assim divididas: camada de base ou fundação, camada de coleta de gás, barreira hidráulica, camada de drenagem, camada de proteção e camada superficial (Porro, 2000; Vieira, 2005).

Porém, segundo Barros (2005), nem todas estas camadas são necessárias em todos sistemas de cobertura final e isto vai depender, por exemplo, do clima da região (em regiões áridas, a camada de drenagem não se faz necessária) ou ainda da composição do resíduo disposto (geração de gás que necessite de uma camada de coleta e gerenciamento).

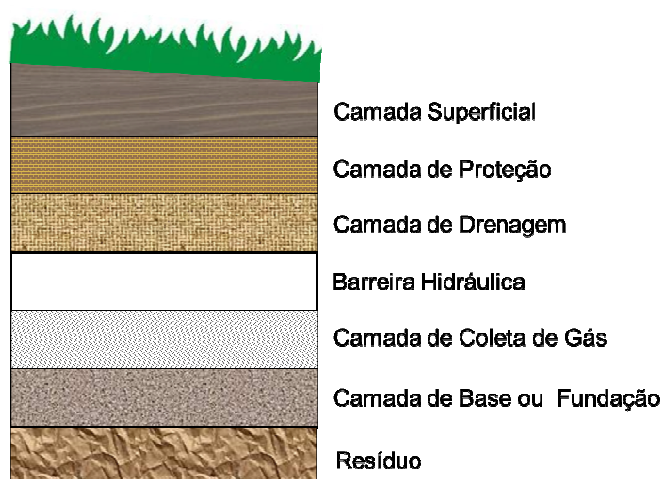


Figura 1: Esquema ilustrativo da cobertura ou revestimento impermeável superior (Boscov, 2008).

2.2.1 Camada de Base

Esta camada é construída logo após a disposição dos resíduos com a principal função de impedir o ataque químico ou físico que os resíduos sólidos podem provocar nas camadas superiores.

O tipo de solo utilizado nesta cobertura pode variar de acordo com o resíduo sólido disposto na célula, podendo ser o mesmo solo usado na cobertura diária (argila).

2.2.2 Camada de Coleta de Gás

A principal função desta camada é servir como transporte dos gases gerados através da decomposição orgânica dos resíduos sólidos. Nesta camada pode ser utilizado materiais granulares (cascalhos, brita, areia) ou geotêxteis (geocompostos drenantes).

2.2.3 Barreira Hidráulica

O objetivo desta camada é impedir o avanço do percolado (proveniente do processo de infiltração de água nas camadas superiores) às camadas inferiores, evitando desta forma o contato com o resíduo disposto.

Na construção desta camada, geralmente, são utilizados um solo natural rico em argila de baixa permeabilidade, geomembranas ou geocompostos bentoníticos.

2.2.4 Camada de Drenagem

A camada de drenagem tem a função de drenar lateralmente a coluna de água que percola nas camadas superiores proveniente da precipitação. Os materiais utilizados nesta fase podem ser areias, pedregulhos ou geocompostos drenantes.

2.2.5 Camada de Proteção

A finalidade e aplicação desta camada estão em reter a infiltração da água que percola através da camada de superfície, separar o material fino do material granular e proteger as camadas inferiores do ciclo de molhagem e secagem.

Materiais reciclados, pedregulhos, cascalhos, concreto asfáltico ou geossintéticos podem ser usados na camada de proteção. Porém os arenosos, por causa da sua alta permeabilidade, podem causar problemas devido à perda de nutrientes por lixiviação.

2.2.6 Camada de Superfície

Nesta fase o uso de vegetação é indispensável ao sistema de cobertura final, pois além de promover um conforto estético, evita a erosão, reduz a temperatura e promove a evapotranspiração. Pode ser utilizada, nesta camada, camada vegetativa.

2.3 Camadas Alternativas

Os sistemas de coberturas alternativas podem ser divididos em: coberturas monolíticas; coberturas evapotranspirativas; geomembranas expostas; coberturas geoquímicas e coberturas de papel. (Bosco, 2008).

2.3.1 Cobertura Monolítica (convencional)

Este sistema de cobertura é composto de uma camada de solo argiloso compactado e com baixa permeabilidade, disposta diretamente sobre o resíduo (Figura 2), o qual tem como principal objetivo evitar a penetração excessiva da precipitação. Porém podem apresentar alguns problemas, tais como ressecamento e formação de fissuras e trincas quando utilizadas em alguns tipos de climas.

Segundo Shackelford (1997), para que a camada de solo argiloso tenha um bom funcionamento como barreira, o ideal é que ela tenha uma condutividade hidráulica saturada igual ou inferior a 1×10^{-5} cm/s.



Figura 2: Sistema de Cobertura Convencional ou Monolítica (EPA 542-F-03-015)

2.3.2 Cobertura Evapotranspirativa

Segundo Amorim (2008), camadas evapotranspirativas são sistemas de coberturas compostas por uma camada de solo com alto teor de matéria orgânica sobreposta a uma camada de solo pouco compactada, seguido por uma cobertura vegetativa capazes de resistir e sobreviver às condições locais, (Figura 3).

O sistema de camadas de solo é dimensionado de forma a armazenar o máximo de água e, essa água é eliminada posteriormente através da evapotranspiração das espécies vegetais, presentes no solo de cobertura/restituição (EPA, 2003; Hauser, 2009). Siltes e argilas de baixa plasticidade são os solos mais usados em coberturas evapotranspirativas porque são capazes de armazenar água ao mesmo tempo em que minimizam a ocorrência de potenciais rachaduras e trincas devido ao ressecamento do solo (Zornberg *et al*, 2003).

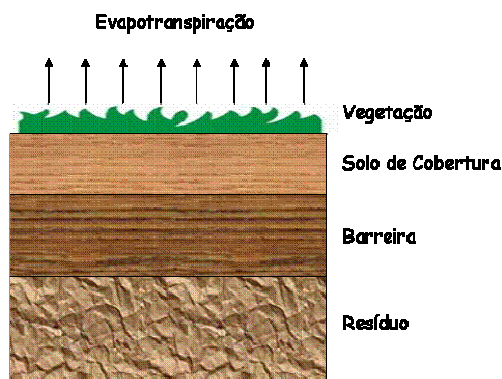


Figura 3: Sistema de Cobertura Evapotranspirativas (EPA 542-F-11-001)

As camadas evapotranspirativas, ainda podem ser divididas em: camadas monolíticas e barreiras capilares (Amorim, 2008).

2.3.2.1 Camada Evapotranspirativa Monolítica

Este tipo de camada (Figura 4) é similar à cobertura monolítica convencional, ou seja, é caracterizada por uma única e espessa camada de solo com alta capacidade de armazenamento de água, porém, recoberta por vegetação e atua como barreira hidráulica (Scanlon *et al*, 2005; Zornberg & McCartney, 2007).

As maiores variações na umidade, devido ao umedecimento e ressecamento, irão ocorrer no topo da camada.

As camadas monolíticas requerem seleção de espessura de camada e armazenamento de umidade necessária para manter a percolação abaixo do valor de projeto, dado as condições necessárias ao local.



Figura 4: Cobertura Evapotranspirativa Monolítica (Zornberg & McCartney, 2007)

2.3.2.2 Barreira Capilar Evapotranspirativa

De acordo de acordo com a *US Resources Conservation and Recovery Act (RCRA) Subtitles D*, o sistema de cobertura por barreira capilar evapotranspirativa consiste de uma camada de solo de granulometria fina colocada sobre uma camada de material de granulometria grossa, como, areia ou cascalho. O solo fino, neste tipo de cobertura, atua como um substrato para vegetação.

2.3.3 Geomembranas Expostas

A vantagem de se utilizar estes materiais está em reduzir o volume de cobertura, aumentando, desta forma, a vida útil do aterro; promover uma barreira hidráulica capaz de impedir a entrada de água no resíduo ou de diminuir a infiltração na camada de solo abaixo desta camada de geomembrana. (Bosco, 2008; Korner and Daniel, 1997).

Porém, segundo Lodi *et al* (2007), após exposição excessiva aos efeitos da intempérie, os geossintéticos e, em particular, as geomembranas, podem sofrer processos degradativos e apresentar fissuras sob tensão (*stress cracking*) e com consequência a infiltração de água para as camadas inferiores.

2.3.4 Coberturas Geoquímicas

O sistema de proteção por barreiras geoquímicas está associado à disposição de resíduos provenientes de mineração, a qual tem como objetivo diminuir a oxidação de sulfetos e a geração de drenagem ácida.

O material usado como barreira geoquímica na área de rejeitos deverá ser composto por rocha de composição carbonática, tipo calcário calcítico ou dolomítico com granulação contínua entre 50 e 5 mm, atuando desta forma como neutralizadores de pH e a formação de fases mineralógicas secundárias (Bosco, 2008; Borma, 2003).

2.3.5 Coberturas com Resíduos de Papel

Segundo Bosco (2008), os resíduos de papel apresentam uma permeabilidade compatível com os sistemas de cobertura de solos compactados (10^{-10} e 10^{-9} m/s) e resultam em camadas flexíveis ajustando-se aos elevados recalques diferenciais a que estão sujeitas as coberturas de aterros sanitários.

2.4 Barreira Capilar

Barreiras capilares são formadas na interface de diferentes estratos do solo hidrológicamente não saturados onde uma camada de solo relativamente fina recobre uma camada de solo relativamente grossa (Figura 5), podendo conter uma camada de solo superficial ou de cobertura. Estas barreiras podem estar dipostas em camadas horizontais ou inclinadas (Kämpf and Montenegro, 1997; Lu & Likos, 2004; Gartnung *et al*, 2009; Ityel *et al*, 2010; Zornberg *et al*, 2010).

Em barreiras horizontais, devido à diferença de sucção entre o material grosso e fino, ocorre o acúmulo de água no material fino num equilíbrio hidrostático, o qual este por sua vez é quebrado quando a sucção do material grosso se reduz, igualando ao seu valor de entrada de água. Em barreiras capilares inclinadas, o fluxo de água lateral aumenta ao longo da inclinação pelo incremento do volume de infiltração, ocasionando assim uma redução progressiva da sucção no material fino (Morris and Stormont, 1997; Khire *et al*, 2000; Parent and Cabral, 2006; Trpkosová and MLS, 2010).

Ferreira *et al* (2006), complementa que a barreira capilar além de impedir a infiltração da água de chuva deve também minimizar a saída dos gases gerados pela decomposição dos resíduos evitando desta forma o contato com a atmosfera.

A eficiência da barreira capilar está ligada à capacidade de retenção e distribuição de água nos poros, ou seja, ao fenômeno da capilaridade nos solos e segundo Shackelfor (1997) *apud* Borma (2003), o efeito da barreira capilar é tanto maior quanto for maior o contraste entre as condutividades hidráulicas das camadas do solo fino e granular.



Figura 5: Sistema de Barreira Capilar (Boscov, 2008 – adaptado)

2.4.1 Barreira Capilar Dupla

Em regiões áridas e semiáridas, estudos de campo têm mostrado a eficiência do uso de barreiras capilares, porém estas, por sua vez, compostas por duas camadas (Figura 6) (Amorim, 2008). Entretanto, em climas úmidos também o uso de barreira capilar dupla aparece como uma alternativa.

A barreira capilar dupla consiste em uma camada de areia sobreposta a uma camada argilosa.

Nesse sistema de cobertura, a camada de material granular superior exerce duas funções importantes: na época de seca ela impede que a água armazenada na camada de material fino migre por capilaridade para a camada de material granular e na época de chuva, essa camada funciona como um dreno, conduzindo lateralmente a água que infiltra na cobertura, prevenindo a saturação da camada de material fino. Isso é bastante importante para a maioria dos climas das regiões brasileiras, que apresentam períodos de seca bem definida no inverno e elevadas precipitações no verão (Borma *et al*, 2003; Souza *et al*, 2003).

Esse tipo de barreira é também muito usado em resíduos de mineração a fim de evitar a drenagem acida.



Figura 6: Sistema de cobertura por Barreira Capilar Dupla (Amorim, 2008 – adaptado)

2.4.2 Funcionamento da Barreira Capilar

Em linhas gerais, a barreira capilar deve atuar como barreira hidráulica para controlar a infiltração da água na superfície do aterro, armazenar toda a água infiltrada e reduzir a entrada de oxigênio, que pode reagir quando em contato com alguns resíduos, aumentando a produção de contaminantes (Vieira, 2005).

A capacidade de impedir o fluxo desta água ocorre devido ao fenômeno de capilaridade, o qual é inversamente proporcional ao tamanho dos poros entre as camadas de materiais finos e grosseiros.

De acordo com Borma *et al* (2003), o funcionamento da barreira capilar só é garantido desde que os materiais que fazem parte da sua composição estejam na condição não saturada. Na condição não saturada, a camada de material fino tende a reter a água no seu interior, devido ao efeito de sucção. A camada granular, por sua vez, apresenta baixa permeabilidade na condição não saturada, devido à presença de ar nos poros do material granular que reduz a interligação dos vazios preenchidos por água.

Porém, se ocorrer uma situação de saturação nestas camadas, poderá haver a infiltração de água para a camada de resíduos. Portanto, a relação de tamanho, forma e estrutura dos vazios das duas camadas do solo é crucial para a função de barreira.

Segundo Khire *et al* (2000), o contraste nas propriedades hidráulicas não saturada entre a camada de solo fino e granular, na barreira capilar, forma uma impedância hidráulica a qual diminui o movimento da água para camadas inferiores. Este autor ainda comenta que de acordo com as pesquisas realizada por Stormont and Anderson (1999), quantidades significativas de água entrará no solo mais grosseiro somente quando a sucção matricial na superfície da camada grossa diminuir para o valor próximo à curva característica de água no solo, próximo de teor de água residual (anotado como B_C na Figura 7a). A sucção matricial correspondente é ψ_B e a umidade volumétrica de água na camada mais grossa é θ_{BC} .

Uma continuidade na poro-pressão exige que a sucção matricial nas duas camadas seja igual em sua interface. Como resultado, a sucção matricial na interface da camada mais fina deve ser igual a ψ_B antes da água entrar na camada mais grossa. O conteúdo de água na camada mais fina de ψ_B é anotado como θ_{BF} em Figura 7b, e corresponde ao ponto B_F na curva característica para a camada mais fina. Mesmo quando B_F é alcançado, a água ainda entra vagarosamente na camada mais grossa porque a condutividade hidráulica da camada grossa ainda é menor como mostrado em B_C (Figura 7b). A impedância hidráulica

fornecida pela interface capilar faz com que a camada superficial mais fina atue como um buffer que armazena a água infiltrada (S_W) até θ_{BF} ser atingido.

A umidade retida na camada fina pode ser removida pelo processo de evapotranspiração e, além do processo de perda da água por evapotranspiração, a barreira capilar pode ainda possuir uma camada de transporte inclinada (inclinação entre 5 a 10 graus) com uma condutividade hidráulica maior que a camada fina e um potencial mátrico semelhante ao da camada grossa, para que a água possa drenar, (Morris and Stormont, 1997; Cui and Zornberg, 2008).

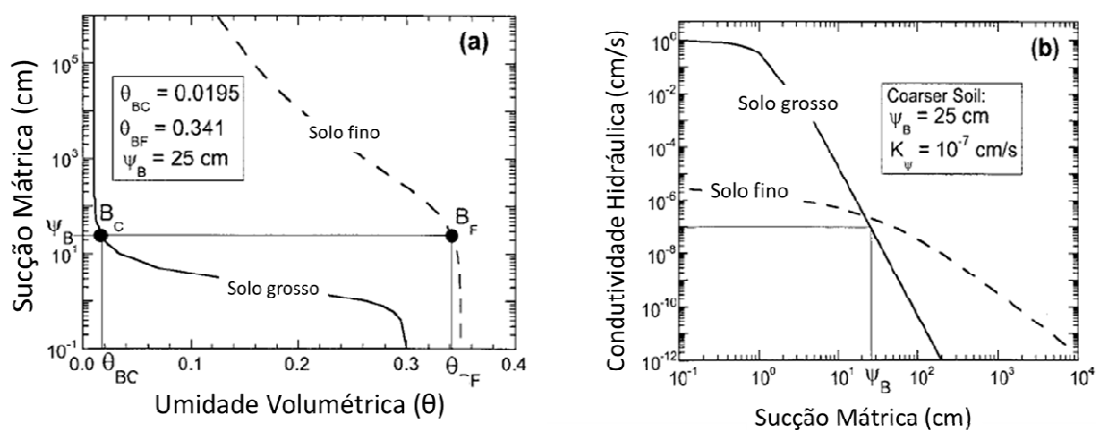


Figura 7: Representação genérica para solos finos e grosseiros: (a) Curva Característica e (b) Condutividade Hidráulica não Saturada. (Khire, 2000)

Abdolazadeh *et al* (2011), complementa dizendo que a garantia da viabilidade técnica de uma barreira capilar inclinada pode ser assegurada pela adição de uma camada de controle da infiltração (no topo da barreira) constituída por um material capaz de manter, de forma consistente, uma taxa de infiltração suficientemente baixa e sempre drenar o líquido percolado lateralmente de forma eficaz.

2.4.3 Aspectos Construtivos para Sistemas de Cobertura

Vários estudos têm sido desenvolvidos a respeito da geometria e tipo de solos a serem utilizados em sistema de coberturas em aterros como barreira capilar (Ross, 1990; Kovačić, 1994; Melchior, 1997; Morris, 1997; Khire *et al*, 2000; Albright *et al*, 2004; Gartung, 2009), bem como sistemas alternativos de coberturas como, por exemplo, resíduos da construção civil, resíduos de mineradoras, resíduos da indústria de papel, areia

de fundição dentre outros. (Borma, 2003; Simon and Muller, 2004; Zhan, 2006; Oliveira e Marinho, 2007; Gomes *et al*, 2007; Soares e Souza, 2007; Ityel *et al*, 2010).

Dell Avanzi (2008), por exemplo, desenvolveu uma pesquisa para o tratamento de um material arenoso com PTFE – politetrafluoretileno – Teflon, como forma de produzir um areia repelente. Em seus estudos, os resultados comprovaram ser possível produzir uma areia repelente, porém devido ao Teflon ser um material caro, estão sendo pesquisados materiais alternativos que possam reproduzir o mesmo efeito, porém com um custo inferior.

O tipo do material a ser utilizado em sistemas de cobertura em aterro é fundamental e crítico, pois o coeficiente de permeabilidade deste solo irá influenciar significativamente no acúmulo de água proveniente de precipitações e na drenagem desta água que por ventura possa infiltrar no sistema de barreiras. A compactação da camada de cobertura é também um requisito essencial para que se obtenha do solo uma condutividade hidráulica baixa.

De acordo com Lambe and Whitman (1969), a compactação do solo com teor de umidade acima do teor ótimo confere uma baixa condutividade hidráulica.

Shakelford *et al* (2005) relata que as primeiras coberturas de aterros eram confeccionadas como uma camada de argila com espessura em geral maior que 60 cm (exceto em climas áridos) e permeabilidade entre 10^{-6} a 10^{-8} cm/s e, acima dessa, uma camada de solo em torno de 15 cm para cobertura vegetal.

Atualmente, as barreiras capilares são constituídas, na sua forma mais simplificada, de uma camada de material fino (argila, silte-argiloso), com permeabilidade variando entre 10^{-5} a 10^{-7} cm/s sobre uma camada de material granular (areia, cascalho), seguido de uma camada superficial com vegetação, com uma espessura entre 60 a 80 cm. A camada vegetativa, neste caso, terá como objetivo prevenir a erosão, aumentar a evapotranspiração e minimizar o impacto visual do aterro (Vieira 2005).

Quissini (2009) ainda menciona o uso de geocomposto argiloso (*Geosynthetic Clay Liners* – GLs), o qual consiste em uma camada de argila bentonítica entre duas camadas de membranas geotêxtil. Porém alguns problemas de desempenho para este tipo de composto podem ser perceptíveis se este material for exposto por um longo período de tempo. Exemplos desta natureza estão relacionados ao surgimento de trincas devido ao ressecamento do material, cisalhamento em taludes íngremes e a penetração de raízes da camada vegetativa. A formação das trincas pode ser restaurada por umedecimento da

camada de GLs devido ao poder de inchamento do material bentonítico. (Heerten 2002 *apud* Izzo 2008).

Dependendo do propósito a ser atingido e do que for definido no projeto do sistema de cobertura final, poderão existir vários tipos de cobertura.

Dwyer (2003) apresenta uma configuração utilizada em suas pesquisas, nos EUA, como cobertura final em aterros de resíduos perigosos (Figura 8) e uma cobertura convencional para aterros de resíduos sólidos urbanos (Figura 9).

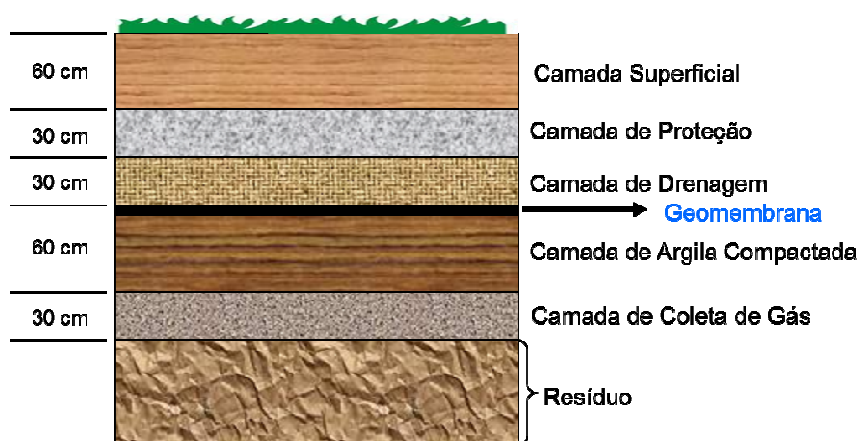


Figura 8: Cobertura final em aterros de resíduos perigosos EUA (Dwyer, 2003)



Figura 9: Cobertura final em aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) EUA (Dwyer, 2003)

Em função dos vários fatores que são avaliados num projeto de cobertura final, em particular aqueles que estão relacionados ao balanço hídrico e ao clima local, inúmeras pesquisas e descobertas de materiais alternativos têm sido incentivados para sistemas de coberturas em aterro.

2.4.4 Aspectos Legais

2.4.4.1 Brasil

No Brasil, o manual de resíduos sólidos publicado pelo IBAM (2001), sugere algumas recomendações quanto ao sistema de cobertura em aterros. Segundo este manual, para aterro industrial classe I, a camada de impermeabilização superior é obrigatória, mas não há regulamentação para espessura. Além da camada de impermeabilização, o manual ainda recomenda a existência de uma camada de drenagem com espessura igual a 25 cm.

Para aterro industrial classe II, segundo Manassero *et al* (2000), a cobertura, se existir, deve ter a seguinte configuração: uma camada de geomembrana de espessura entre 0,8 a 1,2 mm ou por uma camada de argila de boa qualidade, com coeficiente de permeabilidade (k) igual a 10^{-6} cm/s e espessura maior que 50 cm; possuir uma camada drenante de areia com 25 cm de espessura; uma camada de solo orgânico de espessura maior que 60 cm e cobertura vegetal com espécies de raízes curtas.

Tal recomendação é usada devido ao fato de não existir, atualmente no Brasil, uma norma técnica ou uma regulamentação para sistema de coberturas em aterro.

Na Tabela 1, está descrito o tipo de material usado nas camadas de cobertura final de resíduos sólidos, normalmente adotados no Brasil.

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

Camada	Tipo de material
Camada Superficial	Solo; camada geotécnica de controle de erosão; blocos rochosos; seixos.
Camada de Proteção	Solo; material residual recuperado ou reciclado; blocos rochosos.
Camada Drenante	Areia e/ou cascalho; georrede ou geocompósitos
Camada Impermeável	Argila compactada; geomembrana; camada geossintética
Fundação / Camada coletora de gás	Areia e/ou cascalho; solo; georrede ou geotêxtil; material residual recuperado ou reciclado.

2.4.4.2 E.U.A

De acordo com CFR (Código de Regulamentação Federal) n° 40 Parte 258 de 01 de outubro de 1993, publicado pela EPA (*Environmental Protection Agency*), o fechamento final e o pós-fechamento em aterros são itens obrigatórios a todos os proprietários e operadores das unidades que recebem resíduos sólidos municipais de forma a reduzir a infiltração e a erosão.

Conforme esta regulamentação, o sistema de cobertura deverá ser projetado e construído de maneira a se obter uma permeabilidade inferior a 10^{-5} cm/s. A camada de infiltração deverá ser constituída por espessura mínima de 45 cm e a erosão deverá ser minimizada com a aplicação de uma camada de cobertura com espessura mínima de 15 cm e que tenha capacidade de suporte para o desenvolvimento vegetativo.

Não há um número exato de camadas que se deve colocar nas barreiras capilares, isso dependerá de cada projeto (*USEPA, 2003 - United States Environmental Protection Agency*). A geometria da cobertura e o número de camadas dependem, além das propriedades do solo, do propósito em que a barreira deve ser construída.

Na Tabela 2 é apresentado um quadro resumo com os tipos de cobertura e os sistemas normalmente usados para cada camada, bem como suas espessuras e seus valores de condutividade hidráulica.

Estes sistemas de coberturas recomendadas estão representados nas figuras: Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13.

Tabela 2: Sistema de cobertura final recomendado conforme EPA (2003) – chapter 11.

Tipo de Cobertura	Sistema de camada recomendado (de baixo para cima) ^a	Espessura (cm)	Condutividade hidráulica (cm/s)
Camada dupla <i>Double liner</i>	Camada de superfície	30	Não Aplicável
	Camada drenante	30 ^b	10^{-2} a 10^{-3}
	Geomembrana	0,07 – PVC 0,015 – HDPE	-----
	Argila	45	$\leq 10^{-5}$
Camada composta <i>Composite liner</i>	Camada de superfície	30	Não Aplicável
	Camada drenante	30 ^b	10^{-2} a 10^{-3}
	Geomembrana	0,07 – PVC 0,015 – HDPE	-----
	Argila	45	$\leq 10^{-5}$
Camada simples de argila <i>Single Clay Liner</i>	Camada de superfície	30	Não Aplicável
	Camada drenante	30 ^b	10^{-2} a 10^{-3}
	Argila	45	$\leq 10^{-7}$
Camada simples de argila em regiões áridas <i>Single Clay Liner in an Arid Area</i>	Blocos rochosos	4 - 10	Não Aplicável
	Camada drenante	30 ^b	10^{-2} a 10^{-3}
	Argila	45	$\leq 10^{-7}$
Camada simples sintética <i>Single Synthetic Liner</i>	Camada de superfície	30	Não Aplicável
	Camada drenante	30 ^b	10^{-2} a 10^{-3}
	Geomembrana	0,07 – PVC 0,015 – HDPE	-----
	Argila	45	$\leq 10^{-5}$
Camada de solo natural <i>Natural Soil Liner</i>	Solo	60	Não deve ser mais permeável que o solo de base

(^a) A seleção do tipo de geomembrana, espessura, e camada drenante requerida no projeto de cobertura final deve estar de acordo com as recomendações exigidas em cada estado.

(^b) Esta espessura recomendada é para solo com alta permeabilidade e com uma inclinação mínima de 3% do topo da camada. Alguns geonet (georredes) com espessura mínima que 2 cm, apresentam uma transmissividade igual a uma camada muito mais grossa de agregados ou areia.

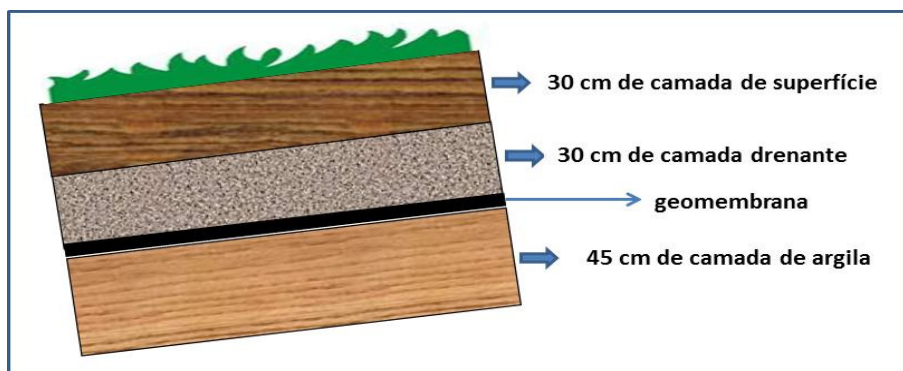


Figura 10: Sistema de cobertura para Camada Dupla, Camada Composta ou Camada Simples Sintética (EPA,2003)

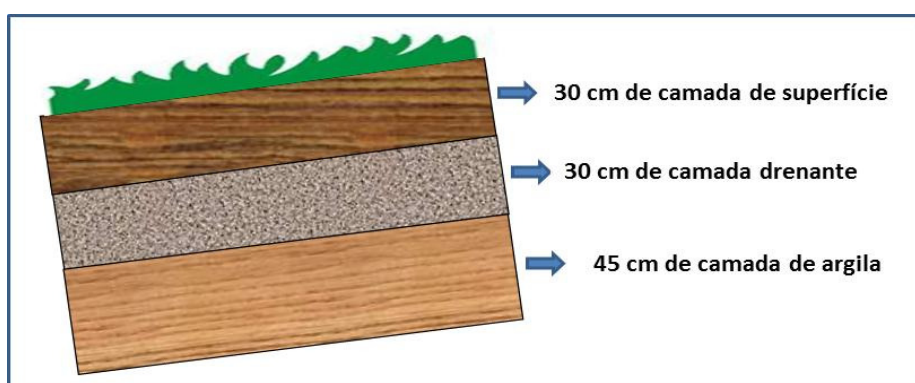


Figura 11: Sistema de cobertura para Camada Simples de Argila (EPA,2003)

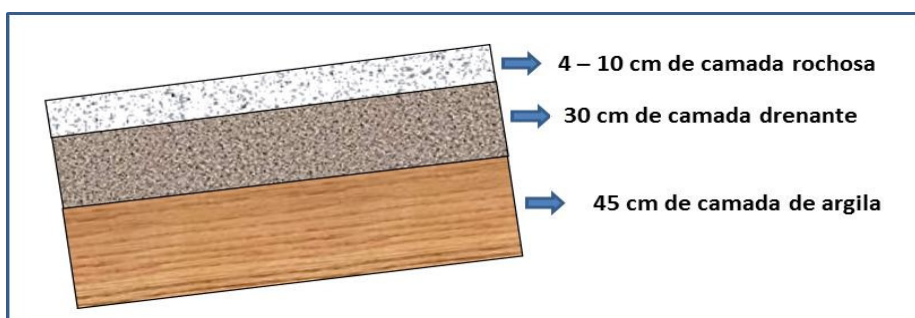


Figura 12: Sistema de cobertura para Camada Simples de Argila em Regiões Áridas (EPA,2003)

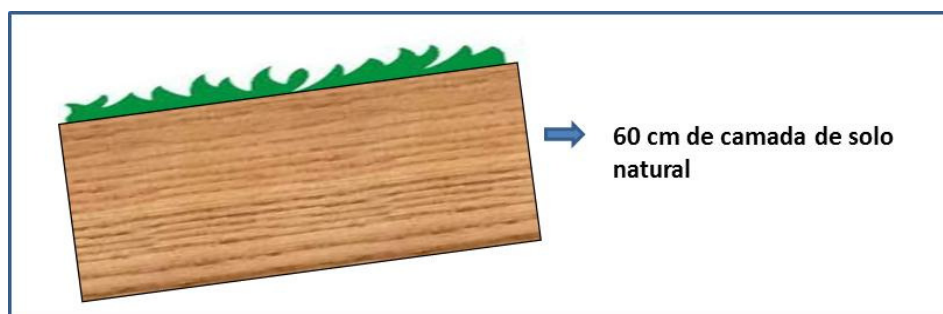


Figura 13: Sistema de cobertura para Camada Simples de Argila em Regiões Áridas (EPA,2003)

Conseqüentemente o projeto das camadas de coberturas está ligado diretamente à interação água-solo-atmosfera, ou seja, ele está sujeito ao balanço hídrico da região e as características geotécnicas do material.

2.5 Interação Água-Solo

2.5.1 Solo

A definição de solo, segundo Soares *et al* (2006), depende em muitos casos de quem o utiliza. O conceito mais popular de solo vem a ser a camada externa e mais superficial do globo terrestre. Sua origem é a rocha que, através de processos de intemperismo físicos e químicos, se transformou em material poroso com características peculiares (Reichardt e Timm, 2004).

É um material trifásico (Figura 14), ou seja, constituído por uma fase sólida (partículas minerais), fase líquida (geralmente água) e uma fase gasosa (a qual compreende todo o ar existente nos espaços entre as partículas), (Taylor, 1948; Lamb e Whitman, 1969; Soares *et al*, 2006; Braja, 2008).

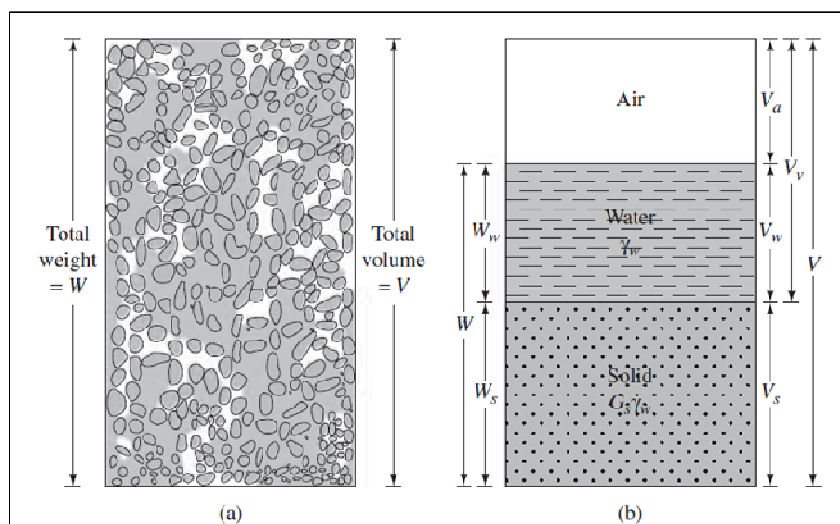


Figura 14: Modelo esquemático de uma amostra de solo em (a) sua formação natural e (b) diagrama de fases. (Braja, 2008).

Entretanto, Fredlund e Morgenstern (1977) propuseram a introdução de uma quarta fase (referente à interface ar-água), denominada de membrana contrátil (Figura 15), a qual

possui uma propriedade chamada de tensão superficial que faz com que esta membrana se comporte como uma membrana elástica.

Frendlung e Rahardjo (1993), afirmam que, quando a fase de ar é contínua, ocorre uma interação entre esta membrana contrátil e as partículas do solo, promovendo uma influência no comportamento mecânico do solo. Ainda, segundo estes mesmos autores, em termos de relação massa-volume, esta membrana contrátil pode ser considerada como parte da fase líquida.

Destas três fases do solo (sólida, líquida e gasosa), as duas últimas são complementares, isto é, a máxima presença de uma implica na ausência da outra. Sempre a porção do espaço poroso, não ocupada pela fase líquida, será complementada pela fase gasosa.

Portanto, a fase líquida pode estar presente nos poros do solo completa ou parcialmente. No primeiro caso, o solo é dito saturado e, no segundo, não saturado.

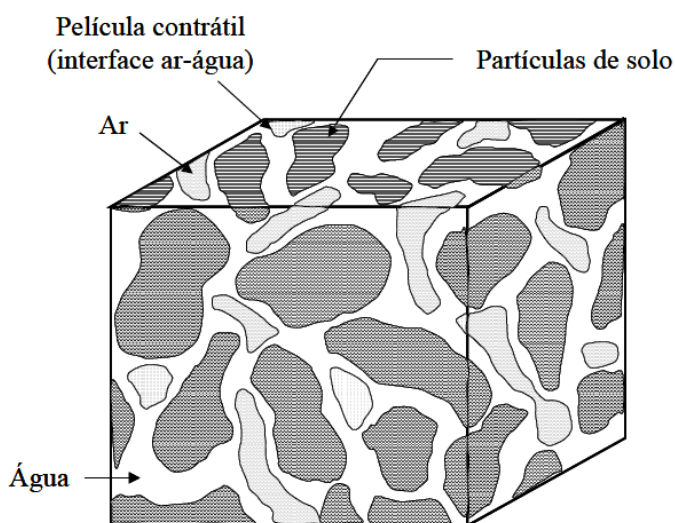


Figura 15: Elemento do solo não saturado com fase contínua de ar (Fredlund e Morgenstern, 1977).

2.5.2 Água

A água é uma das mais importantes e abundantes substâncias do planeta. Nas formas líquida e sólida cobre mais de dois terços da terra e, na sua forma gasosa, está presente na atmosfera.

Em sua fórmula química (H_2O) os átomos de hidrogênio estão ligados aos de oxigênio, por uma ligação de baixa energia chamada ponte de hidrogênio, formando um ângulo de

cerca de 105° (Figura 16). Esta distribuição entre os átomos confere à água uma polaridade, a qual é responsável por uma série de propriedades físico-químicas da molécula de água.

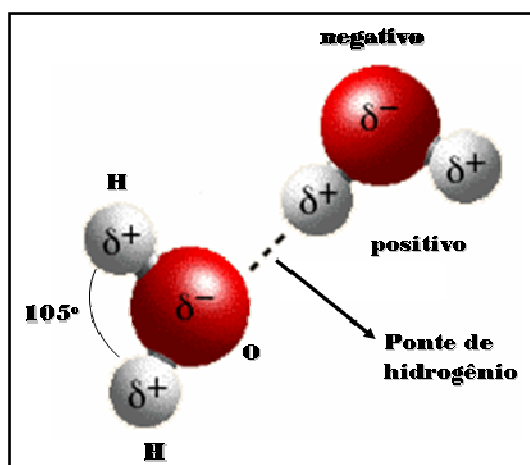


Figura 16: Representação da molécula de água (Martins, 2011).

A água no solo é dinâmica e encontra-se em constante movimento de um local para outro, em resposta às forças que são criadas pela percolação, evaporação, irrigação, chuva, uso pelas plantas e temperatura.

Ela ocupa os espaços porosos do solo e a energia com que esta é armazenada depende das características intrínsecas do solo como textura, estrutura, porosidade, distribuição de poros, e do estado de umidade.

2.5.2.1 Tensão Superficial

As moléculas localizadas no interior de um líquido sofrem atrações intermoleculares em todas as direções (força de Van der Waals). Porém, estas moléculas, quando encontradas na superfície desse líquido, são atraídas somente pelas moléculas situadas abaixo ou ao lado delas (Figura 17a). Essa desigualdade de atrações na superfície provoca a contração do líquido, dando a impressão de existir uma fina película na sua superfície. Esse fenômeno é denominado tensão superficial (Figura 17b) e sua media é dada como força de tração por unidade de comprimento representada por N/m.

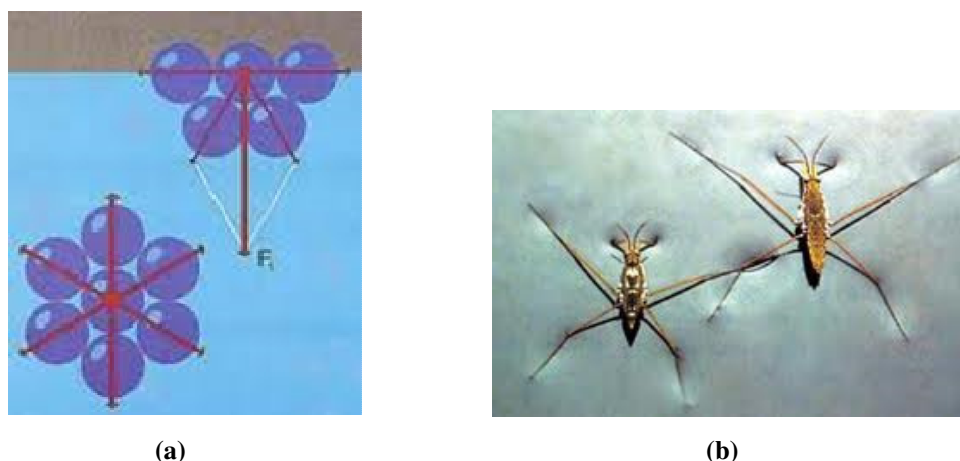


Figura 17: Ilustração da tensão superficial: (a) forças intermoleculares da água; (b) tensão superficial.

(Fonte: curiofísica.com.br)

A Tensão superficial pode ser compreendida como um fenômeno típico da interface ar-água que tem a capacidade de exercer uma tensão de tração, causada por forças intermoleculares, denominadas de forças coesivas superficiais (Reichardt e Timm, 2004; Libardi, 2005).

Segundo Libardi (2005), a tensão superficial não só depende do líquido como também do meio circundante. Este mesmo autor diz que a temperatura também afeta a tensão superficial, sendo inversamente proporcional. Na Tabela 3 são apresentados alguns valores da tensão superficial em diversas temperaturas, entre o vidro e água.

Tabela 3: Variação da tensão superficial em função da temperatura. (Fredlund e Rahardjo, 1993)

Temperatura (°C)	Tensão Superficial (mN/m)
0	75,7
10	74,2
15	73,5
20	72,7
25	72,0
30	71,2
40	69,6
50	67,9
100	58,8

2.5.2.2 Capilaridade

O fenômeno da capilaridade é realizado com base numa propriedade associada à superfície livre de qualquer líquido, ou seja, a tensão superficial.

Na prática, este estudo é visível se colocar uma das extremidades de um tubo capilar com raio ($r = 0,1 \text{ mm}$) dentro de um recipiente contendo água. A água sobe a uma altura h até que seja estabelecido um equilíbrio das pressões internas e externas à superfície. Ocorre, neste momento, a interação da tensão superficial na superfície do líquido onde está em contato com a parede do tubo capilar.

Estas forças intermoleculares entre o líquido e o vidro são maiores que as forças entre as moléculas do próprio líquido. Isto dá origem a um "menisco" curvado na parte superior da superfície da água, ou seja, a força de adesão entre as moléculas do líquido e as paredes do vidro são maiores que as forças de coesão da própria água.

As forças ao redor desta interface atuam segundo um ângulo α , com a vertical, de modo que existirá um componente vertical P capaz de manter a coluna de água em equilíbrio estático (Figura 18).

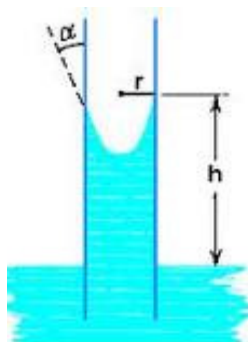


Figura 18: Representação da ação da capilaridade (Fonte: feiradeciencias.com.br).

Em outras palavras, a capilaridade pode ser entendida como o fenômeno de ascensão da água em uma coluna de pequeno diâmetro devido às forças de adesão e coesão e que, juntas (forças de adesão e coesão) tornam possível a retenção de água pelas partículas sólidas do solo.

2.5.3 Potencial Total de Água no Solo

A água pode ocupar os espaços porosos do solo e/ou estar contida nas unidades cristalinas dos minerais. Esta água presente contém energias, cinética e potencial, em diferentes quantidade e formas.

Quando ocorre um movimento muito lento desta água no solo, sua energia cinética é geralmente considerada irrelevante, porém a energia potencial do solo é bastante variável de um ponto para o outro, fazendo com que a água flua dentro do solo atingindo o equilíbrio. A regra do equilíbrio diz que, na natureza, a tendência universal é que toda a matéria mova-se do estado de maior energia total para o estado de menor energia total.

O conceito do potencial total da água do solo pode ser compreendido com sendo a quantidade de trabalho realizado com o objetivo de transportar reversível e isotermicamente uma quantidade infinitesimal de água, de um reservatório de água pura, a um ponto qualquer específico.

A mudança do potencial da água do solo em relação ao seu estado padrão é caracterizada pela presença de três importantes forças: força de atração da água pela matriz solo (força matricial); pela presença de solutos (força osmótica) e pela ação da gravidade (força gravitacional). Sendo assim, o potencial total (Φ) da água do solo pode ser considerado como a soma das contribuições separadas destas forças:

$$\Phi_t = \Phi_m + \Phi_g + \Phi_o + \Phi_p \quad [\text{equação: 01}]$$

onde:

Φ_t = Potencial total;

Φ_m = Potencial matricial;

Φ_g = Potencial gravitacional;

Φ_o = Potencial osmótico;

Φ_p = Potencial pneumático.

O potencial matricial é resultado das forças capilares e forças de adsorção que surgem da interação entre a água e as partículas sólidas do solo. Em um solo saturado, todos os poros estão preenchidos com água e a força capilar e adsorção é considerada nula. Nestas condições, o potencial matricial é zero e o Potencial Total da Água do Solo passa a ser determinado pelos outros componentes (potencial osmótico e o gravitacional). Entretanto, quando o solo começa a perder a umidade, o potencial matricial passa a ter grande importância, pois os espaços ocupados pela água começam a ser substituídos pelo ar e neste momento passa a atuar o efeito da capilaridade.

O potencial gravitacional também denominado de potencial de posição é determinado pela elevação do ponto considerado em relação a algum nível de referência arbitrário e amarrado no perfil do solo.

Já o potencial osmótico corresponde ao efeito combinado de todas as espécies de solutos (sais minerais e substâncias orgânicas) presentes no solo. Em outras palavras, a presença de solutos na água do solo diminui a energia potencial da água e esta redução de energia é chamada de potencial osmótico. O potencial osmótico desempenha uma importante função sobre o fluxo de água do solo, somente, quando existe uma membrana seletiva a qual transporta água pura mais rapidamente do que os sais.

O potencial pneumático também denominado de potencial de pressão é um componente que se faz presente, levando em consideração as pressões manométricas positivas. Em solos não saturados o potencial matricial passa a atuar no lugar do potencial pneumático.

2.5.3.1 Sucção

Segundo Menezes e Pejon (2010), sucção pode ser definida como uma pressão isotrópica da água intersticial que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou diminuindo o seu grau de saturação.

Em outras palavras, Lee e Wray (1995), interpretaram a sucção como sendo o resultado das forças capilares e forças de adsorção (adesão) as quais surgem em virtude da interação entre a água e as partículas sólidas do solo.

Quando água livre flui para dentro de um solo, ela será retida ou adsorvida por ele e, para desprender esta água adsorvida, deve ser aplicada uma energia externa, indo de encontro às forças de retenção do solo. Esta energia aplicada, por unidade de volume de água para desprendê-la, é a sucção. Quanto mais secos os solos, maior será a sucção.

Sendo assim, admitindo que não haja qualquer carga sobre o solo, que o ar existente nos poros esteja interligado com a atmosfera e desconsiderando ainda o potencial gravitacional, o potencial total pode ser reescrito levando em conta somente as parcelas do potencial matricial e o potencial osmótico, representado na equação abaixo:

$$\Phi_t = \Phi_m + \Phi_o \quad \text{[equação: 02]}$$

Neste caso, as pressões, correspondentes, a estas duas componentes são: a sucção matricial e sucção osmótica, e desta forma, a sucção total (ψ_t) é definida como sendo a somatória das parcelas mátrica e osmótica, respectivamente.

$$\psi_t = \psi_m + \psi_o \quad [\text{equação: 03}]$$

onde:

ψ_t = Sucção total;

ψ_m = Sucção mátrica;

ψ_o = Sucção osmótica.

A sucção matricial, segundo Fredlund (1979) é suficiente para descrever o comportamento de resistência dos solos não saturados, pois equivale à diferença entre as pressões no ar (u_a) e na água (u_w) dos poros do solo.

$$\psi_m = u_a - u_w \quad [\text{equação: 04}]$$

onde:

u_a = Pressão no ar

u_w = Pressão na água

Quando o solo se encontra saturado, a sucção osmótica se iguala a sucção total restando apenas o efeito das diferentes concentrações de soluto.

2.5.3.2 Métodos para medição da sucção do solo

Atualmente a sucção no solo, pode ser medida por um grande número de ensaios, sejam de forma indireta (ensaios laboratoriais) ou na sua forma direta de medição (ensaios de campo). Instrumentos de medição direta medem a quantidade de energia da água dos poros. Na medição indireta, parâmetros como umidade relativa, resistividade e condutividade são medidas e estes são relacionados com a sucção atuante através de uma calibração (Soares, 2005).

Dentre estes métodos estão: psicrômetros; papel filtro; tensiômetro; placa de pressão; câmara de pressão. Segundo Soares (2005), um resumo de cada técnica pode ser encontrado em trabalhos desenvolvidos por Fredlund e Rahardjo (1993); de Campos (1994); Ridley e Wray (1995); Marinho (1997); Villar e de Campos (2001); Marinho (2005).

Villar (1997) *apud* Calle (2000) apresenta uma tabela com uma síntese dos métodos para a determinação da sucção no solo. Este resumo pode ser visualizado na Tabela 4.

Tabela 4: Métodos para medida da sucção

Método	Realizado em	Tipo de sucção matricial	Faixa de medida (kPa)	Observação
Funil de pedra porosa	Laboratório	Matricial	0 - 70	Para baixas sucções Sucção aplicada diretamente à amostra
Tensiômetro	Laboratório e campo	Matricial	0 - 70	Tempo de resposta em função da condutividade da pedra porosa.
Blocos porosos	Laboratório e campo	Matricial	10 - 1000	Histerese pronunciada; mais sensível às altas sucções. Longo tempo de resposta. Fácil deterioração do material. Blocos compostos de gesso, fibra de vidro, etc.
Placa de pressão	Laboratório	Matricial	20 - 1500	A capacidade depende da pedra porosa (pressão de entrada de ar). Utiliza a técnica de transição de eixos.
Psicrômetro	Laboratório e campo	Total e Osmótica	100 - 8000	Mais recomendado para laboratório. Depende de rigoroso controle de temperatura.
Membrana de pressão	Laboratório	Matricial	Até 10000	Emprega a técnica de translação de eixos. Emprega membrana de celulose.
Papel filtro	Laboratório	Matricial e Total	Todos os valores	Precisa de uma máxima precisão na pesagem.
Extrato da solução do solo		Osmótica	Todos os valores	Condutividade do extrato. Concentração de solutos. Extrato e psicrômetro (resolução não satisfatória)

2.5.3.3 Curva de Retenção de Água no Solo

Também conhecida como curva de retenção de água no solo, a curva característica é a representação gráfica do comportamento de um solo não saturado, que traduz a relação entre a quantidade de água que está presente no solo com a sucção (Figura 19).

Segundo Fredlund e Xing (1994) a quantidade de água presente nos poros do solo pode ser medida em relação ao teor de umidade volumétrica (θ), unidade gravimétrica (w)

ou ainda pelo grau de saturação (S). A sucção pode ser expressa em função da sucção matricial ou pela sucção total e para valores de sucção acima de 1500 kPa, a sucção matricial e a sucção total podem ser consideradas equivalentes.

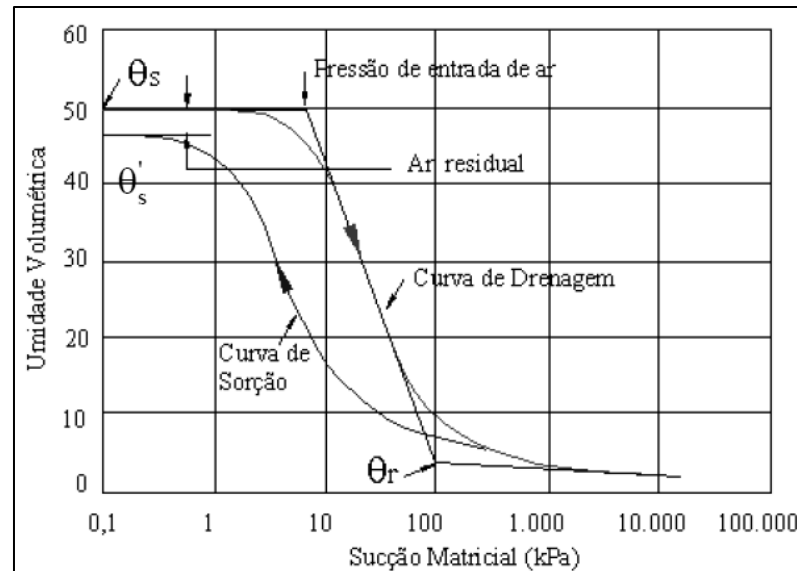


Figura 19: Curva característica típica de um solo siltoso (Fredlund e Xing, 1994).

Onde:

- (θ_s) representa o teor de umidade volumétrica de saturação da curva de drenagem (secagem). Neste ponto, todo o espaço vazio do solo está preenchido com água, ou seja, 100% saturado;
- (θ'_s) está relacionado com o teor de umidade volumétrica da curva de sorção (umedecimento);
- (θ_r) o teor de umidade volumétrica residual, que pode ser definida como sendo o menor valor para a qual um acréscimo qualquer na sucção matricial, pouco afeta os valores de umidade;
- Pressão de entrada de ar indica a sucção matricial necessária para causar a entrada de ar nos maiores poros do solo;
- Ar residual é a diferença entre θ_s e θ'_s entre o processo de secagem (drenagem) e a curva de sorção (umedecimento).

De acordo com Vanapalli *et al* (1996), na curva de retenção de água existem 03 estágios de drenagem (Figura 20).

O primeiro estágio chamado de Zona de Efeito de Borda ou Efeito Limite (*Boundary Effect Zone*) é onde praticamente todos os poros do solo estão preenchidos com água (saturado). Esta fase ocorre até ao valor e entrada de ar.

O segundo estágio, denominado de Zona de Transição (*Transition Zone*) é a faixa compreendida entre a pressão de entrada de ar e o início da umidade residual. Nesta fase o fluxo de água é na fase líquida com o aumento da sucção. Ocorre então a drenagem do solo com o aumento da sucção.

No terceiro e último estágio, Zona Residual ou Fase Residual de Drenagem (*Residual Zone*) ocorre uma pequena redução no teor de umidade do solo para um determinado acréscimo de sucção, levando à pequena mudança no grau de saturação do solo.

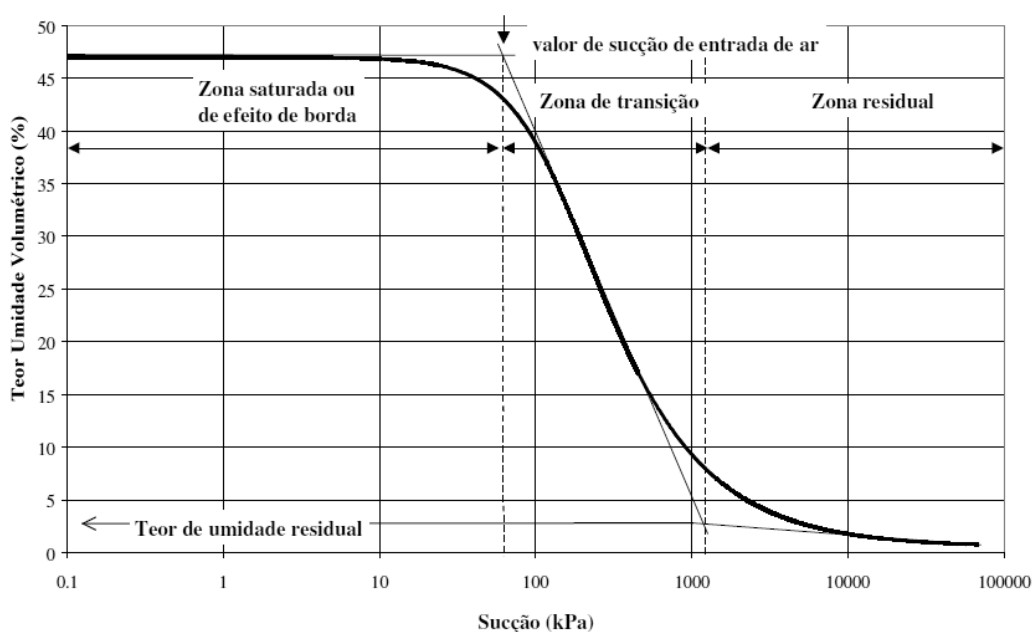


Figura 20: Diferentes estágios de saturação da curva característica. (Vieira, 2005).

Existem fatores que influenciam as características e a forma de uma curva de retenção de água, dentre os quais podem citar: o tipo do solo, sua composição mineralógica, umidade de moldagem e histerese.

O tipo do solo tem influência no valor de entrada de ar e na inclinação da curva de retenção de água e esta inclinação representa a faixa da curva entre a sucção de entrada de ar e a sucção residual. Na Figura 21 é mostrada esta relação quanto ao tipo de solo.

Note que quando comparados solos arenosos e argilosos, no primeiro, ocorre uma pequena variação da sucção que corresponde a uma maior variação na sua umidade

enquanto que os solos argilosos necessitam de uma grande variação de sucção para modificar o seu valor de umidade volumétrica.

Quanto maior a quantidade de argila no solo maior será o teor de umidade volumétrica para um mesmo valor de sucção.

Isto se deve ao fato de que os solos argilosos apresentam vazios bem pequenos e uma superfície específica grande, característica esta que faz com que, este tipo de solo apresenta uma grande capacidade de retenção de água.

Portanto, a curva característica pode ser um grande indicativo da fração de argila presente no solo, pois um aumento nesta fração leva, geralmente, a um aumento na quantidade de água retida no solo, ou seja, o efeito da capilaridade (força de adesão entre a água e as partículas do solo) está diretamente ligado à distribuição granulométrica e a estrutura do solo (Fredlund e Xing, 1994).

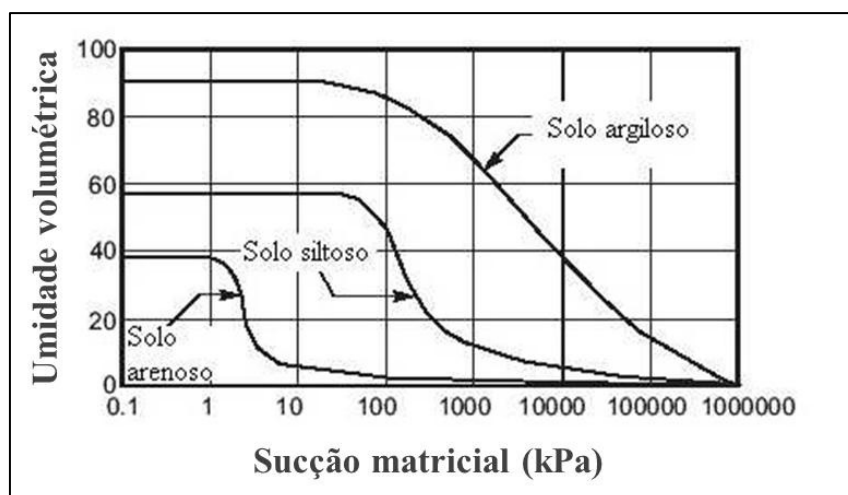


Figura 21: Curva característica típica para solos arenosos, siltosos e argilosos, segundo Fredlund e Zing (1994)

Vanapalli *et al* (1999), afirmam, através de seus estudos, que para um mesmo tipo de solo moldados com umidades diferentes, as curvas características apresentam diferentes comportamentos.

Amostras moldadas com umidade abaixo da umidade ótima apresentarão inclinações mais bruscas quando comparadas àquelas inicialmente mais úmidas.

Isto acontece porque a forma de agregação das partículas sólidas ocorre de uma maneira diferente para cada nível de umidade e esta variação irá influenciar diretamente na capacidade de retenção de água pelo solo.

Outro fator a considerar é a histerese, fenômeno este que diferencia o comportamento da curva de retenção de água pelos ciclos de secagem e umedecimento.

Segundo Calle (2000), a histerese pode ser atribuída a diversos fatores: a uma não uniformidade dos vazios e poros do solo; às bolhas de ar nos vazios do solo durante a fase de umedecimento e à alteração na estrutura do solo decorrente de sua expansão ou contração.

2.5.3.4 Modelagem da Curva Característica de Água no Solo

Segundo Gerscovich (2001), 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.

Na Tabela 5 são apresentadas algumas destas proposições empíricas.

Tabela 5: Proposições empíricas para modelagem da Curva de Retenção. (Gerscovich, 2001).

Referência	Equação	Definição das Variáveis
Gardner (1958)	$\Theta = \frac{1}{1 + q\Psi^\eta}$	Θ: teor de umidade normalizado $\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \rightarrow$ θ, θ_r, e θ_s são teor de umidade volumétrico, residual e saturado, respectivamente. η, q : parâmetros de ajuste.
Brooks e Corey (1964)	$\Theta = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\lambda$	Θ: teor de umidade normalizado λ: índice de distribuição de diâmetro de vazios.
Van Genuchten (1980)	$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n} \right]^m$	Θ: teor de umidade normalizado Ψ: sucção matricial α, m, n : parâmetros de ajuste
Gosh (1980)	$\Psi = \Psi_b \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-\beta}$ $\beta = 2,619 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda} \right)^{0,2822} (\lambda + 0,7)^{0,0625} \lambda_4^{0,1250} \left(5,91 \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2} + 1,1 \right)^{0,0625}$	θ_s : teor de umidade saturado (= porosidade) λ_1 : % fração da areia λ_2 : % fração da silte λ_3 : % fração da argila $\lambda_4 = 6,2 \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} - 5,91 \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_3} \right)$
Fredlund e Xing (1994)	$\Theta = C_\Psi \frac{\theta_s}{\left[\ln \left(e + \left(\Psi/a \right)^n \right) \right]^m}$ $C_\Psi = 1 - \frac{\ln \left(1 + \Psi/\Psi_r \right)}{\ln \left(1 + \Psi_o/\Psi_r \right)}$	a, m, n : parâmetros de ajuste e : base log neperiano = 2,718 $\Psi_o = 10^6$ kPa $a = \Psi_i$ (sucção no ponto de inflexão da curva característica) $m = 3,67 \ln (\theta_s / \theta_i)$ $n = \frac{1,31^{m+1}}{m\theta_s} 3,72s \psi$ Sucção (ψ) (escala natural) Ponto de inflexão Inclinação (s) $s = \theta_i / (\psi_p - \psi_i)$ Teor de Umidade Volumétrico (θ)

2.6 Interação Solo-Atmosfera

As coberturas de aterros por barreira capilar estarão sempre sujeitas a ciclos de umedecimento e secagem e que, dependendo do tempo de duração de cada ciclo, o projeto de cobertura por este sistema pode não ser eficaz. Sendo assim, a compreensão do mecanismo de interação do solo usado no sistema de cobertura torna imprescindível para o dimensionamento e equacionamento de uma barreira capilar.

Além disto, o estudo das condições climáticas é importante para a determinação da quantidade de água que infiltra no solo e da água que sofre o processo de evaporação, pois o balanço hídrico de cada região impõe um volume de água disponível para infiltração no solo e, a absorção desta pelo solo depende das características geotécnicas do material usado no projeto de cobertura (Vieira, 2005).

Desta forma, como a variação de umidade no solo é sazonal e depende dos fluxos de água líquida (infiltração) e vapor d'água (evaporação) que ocorrem na interface solo-atmosfera, deve-se compreender como esses processos se associam para que o sistema de barreira capilar seja efetivo.

Além destes aspectos atmosféricos, a eficiência de uma barreira capilar está, também, condicionada à capacidade de retenção de água pelo solo utilizado no projeto de cobertura e relação existente entre a permeabilidade deste solo.

2.6.1 Infiltração de Água no Solo

A definição da infiltração pode ser entendida como o processo de entrada de água (proveniente da chuva, irrigação ou neve derretida) no solo, através da interface solo-atmosfera, a qual irá perdurar enquanto houver disponibilidade de água em sua superfície (Reichardt e Timm, 2004; Libardi, 2005). Esta água que penetra no volume útil do solo se movimenta pelo espaço poroso por percolação atingindo, eventualmente, uma zona saturada formando assim o lençol freático.

A infiltração da água no solo é influenciada por um grande número de fatores relativos ao solo e as condições a que ele é submetido. Estes fatores que condicionam o movimento de água no solo são: a porosidade, a densidade do solo, a cobertura do solo, a textura e o grau de agregação do solo, o selamento superficial, a umidade inicial, a matéria orgânica, a estrutura e a variabilidade espacial do terreno.

Porém, segundo Silva e Kato (1997) *apud* Fiorin (2008), a textura e a estrutura do solo, são as que influenciam expressivamente a movimentação da água no solo, sendo o

tamanho das partículas e a macroporosidade os atributos mais importantes. Todos os fatores que influenciam na infiltração de água no solo, interferem também no escoamento superficial resultante. Portanto, o entendimento do processo de infiltração e sua relação com as propriedades do solo são de grande importância para o correto manejo do solo e da água.

Libardi (2005) define o termo taxa de infiltração refere-se à quantidade de água que atravessa a unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo e, experimentalmente, durante o processo de infiltração, estando o solo inicialmente seco, a taxa de infiltração tende a decrescer com o tempo, atingindo um valor final constante (Figura 22).

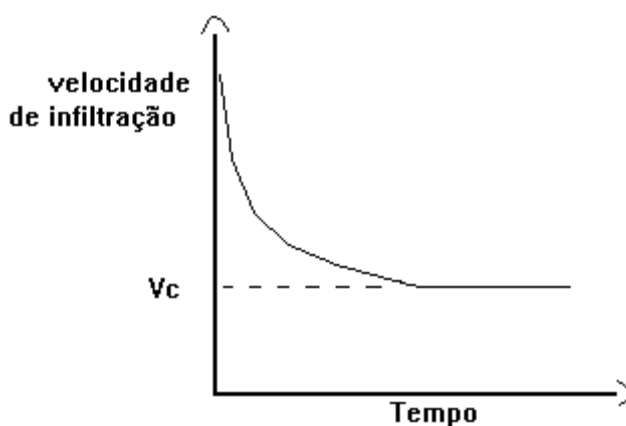


Figura 22: Taxa de infiltração pelo tempo (Torres, 2009).

Esse valor constante da taxa de infiltração é conhecido pelo nome de capacidade de infiltração e é um importante atributo para a elaboração de projetos de irrigação, de drenagem, conservação do solo e manejo da irrigação.

A forma da curva de infiltração pode ser melhor compreendida dada a seguinte explicação: durante um processo de infiltração, estão presentes dois tipos de fluxo de água: o fluxo insaturado (ocorrendo no início da infiltração) e o fluxo saturado (acontece no final do processo, com velocidade de infiltração constante), alterando desta forma, a distribuição de teor de água com a profundidade. Ocorre, então, que durante o fluxo insaturado, a água entra no solo com o gradiente hidráulico maior do que no saturado.

No início do processo de infiltração o potencial mátrico é mais negativo ocasionando um aumento significativo no fluxo da água. Com o tempo, este potencial se torna menos negativo, até que alcança um valor insignificante ou zero. Quando isto acontece, o único

componente do potencial total da água do solo é o potencial gravitacional e assim a velocidade de infiltração se torna aproximadamente constante.

Segundo Vieira (2005), a infiltração depende do perfil da umidade volumétrica do solo e Bond e Collis-George (1981a) *apud* Oliveira (2003) reproduziram o trabalho de Bodman e Colman (1943) e confirmando a existência de cinco zonas no perfil de umidade. A representação deste perfil pode ser visualizada na Figura 23.

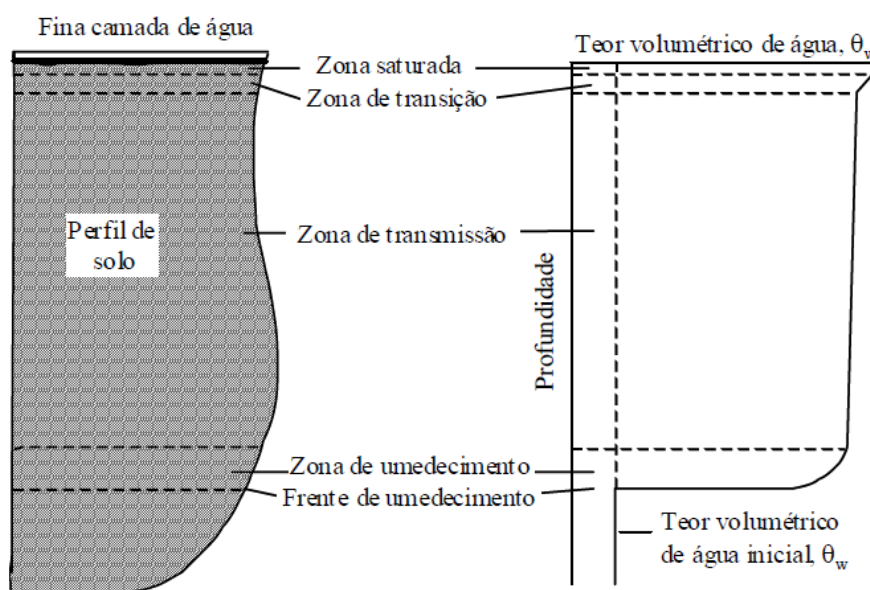


Figura 23: Zona do perfil de umidade volumétrica (Oliveira, 2003).

Na zona saturada, o espaço poroso é totalmente ocupado pela água, restringindo à camada superficial do solo e que dependendo do tempo decorrido desde a aplicação inicial da água (precipitação, irrigação), esta zona se estenderá à apenas alguns milímetros de profundidade. A zona de transição é caracterizada por uma diminuição rápida do conteúdo de água com a profundidade, se estendendo a alguns centímetros, dependendo da textura do solo. A zona de transmissão se caracteriza por uma pequena alteração no conteúdo de água em relação à profundidade, ou seja, apresenta uma região umidade, porém, não saturada. Esta zona é de tamanho variável e é através dela que a água infiltrada alcança as camadas mais secas do solo. O gradiente hidráulico dentro desta zona é impulsionado pelas forças gravitacionais. Na zona de umedecimento o teor de água diminui acentuadamente com a profundidade a partir do teor de água da camada de transição para próximo do teor de água inicial do solo. Normalmente esta zona é muito fina a qual se encontra nas camadas mais profundas, representando o limite de alcance da água que infiltra no solo.

Com relação à frente de umedecimento, esta zona é caracterizada por um gradiente hidráulico muito grande e forma uma fronteira nítida entre o solo molhado e seco, sendo este gradiente impulsionado principalmente por potenciais matriciais. Além desta última camada não há penetração visível de água. (EPA, 1998).

2.6.2 Escoamento superficial (run off)

Quando a intensidade de precipitação à superfície do solo excede ao seu regime de infiltração, ou quando a capacidade de retenção de água pela superfície do terreno tiver sido ultrapassada, esta água tende a acumular na superfície do solo e depois escorrer até às cotas inferiores. Este processo é definido como escoamento superficial.

De acordo com Amorim *et al* (1999) *apud* Panachuki (2003) a precipitação e o escoamento superficial afetam o desprendimento e transporte das partículas de solo de forma bastante diferenciada, e além das partículas de solo em suspensão, são também transportados: nutrientes, matéria orgânica, sementes e agroquímicos que, dentre outros prejuízos, poluem os cursos de água.

2.6.3 Evapotranspiração

Evapotranspiração pode ser definida como um processo combinado de transferência de água do solo para a atmosfera, ou seja, é a perda da água armazenada na superfície do solo por evaporação ou pela transpiração das plantas. (Reichardt e Timm, 2004; Vescove e Turco, 2005). A evaporação envolve a alteração no estado de água de líquido para vapor de água devido a um aumento de energia cinética da água. Durante a evaporação, as ligações de hidrogênio são quebradas e o vapor de água se difunde a partir de regiões de alta para baixa pressão de vapor, isto é, a partir da superfície do solo para o ar circundante. A evaporação a partir de solos é um fenômeno importante que deve ser quantificada a fim de definir a condição limite de fluxo de superfície em uma análise de fluxo não saturado. Transpiração é a evaporação devida à ação fisiológica dos vegetais. As plantas, através de suas raízes, retiram do solo a água para suas atividades vitais. Parte dessa água é cedida à atmosfera, sob a forma de vapor, na superfície das folhas.

Porto *et al* (2000), classificam a evapotranspiração como potencial e real (ou efetiva) e definem da seguinte forma: evapotranspiração potencial é a máxima evapotranspiração que ocorreria se o solo dispusesse de suprimento de água suficiente para total evaporação;

evapotranspiração real ou efetiva é a perda d'água por evaporação ou transpiração, nas condições reinantes (atmosféricas e de umidade do solo). Nos períodos de deficiência de chuva em que os solos tornam-se mais secos, a evapotranspiração real é sempre menor do que a potencial.

A evapotranspiração depende de dois elementos principais: o calor fornecido pela radiação solar e da água disponível no solo. Embora a quantidade de energia solar que atinge a superfície do solo é aproximadamente constante, a evapotranspiração é muito sensível às variações climáticas e características da planta.

Na escolha de um método para a determinação da evapotranspiração, devem ser levados em consideração praticidade e precisão, pois, apesar de esses métodos teóricos e micrometeorológicos serem baseados em princípios físicos, apresentam limitações, principalmente quanto à instrumentação, o que pode restringir a utilização (Berlato e Molion, 1981, *apud* Vescove e Turco, 2005). Na Tabela 6 são apresentados os principais meios utilizados nas determinações da evapotranspiração real e potencial.

Tabela 6: Métodos de obtenção da evapotranspiração (Vescove e Turco, 2005).

	Obtenção	
	Direta	Indireta
Evapotranspiração Potencial	Lisímetros Tipos de percolação Tipos de pesagem	➤ Equação de Thorntwaite ➤ Método de Blaney-Criddle ➤ Método de Penman
Evapotranspiração Real ou Efetiva	-----	➤ Método do Balanço Hídrico ➤ Método dos Coeficientes de Cultura

2.7 Condutividade Hidráulica do solo

A condutividade hidráulica do solo representa a facilidade (seja maior ou menor) com que a água pode fluir através dos vazios de um solo. Trata-se de uma propriedade dinâmica e, juntamente com a curva de retenção de água no solo, determina o comportamento de fluxo de água em um meio poroso.

Quando um solo está na condição saturada, ou seja, todos os poros preenchidos com água, a umidade volumétrica é constante e igual à porosidade.

Nesta situação, a condutividade hidráulica é máxima e o movimento desta água no solo segue o princípio estabelecido por Darcy, que através de seus experimentos sobre o processo de infiltração em filtros de areia homogênea e sob uma condição de saturação, verificou que o fluxo de água é proporcional ao gradiente hidráulico do solo (Reichardt e Timm, 2004). Segundo Taylor (1948), a lei de Darcy é válida para fluxo laminar (solos com $D_{10} \leq 5$ mm) e sua quantificação é expressa pela equação 05. Na prática, segundo Gerscovich (2011), siltes, areias e argilas, em geral, satisfazem à lei de Darcy.

$$v = k \frac{\Delta h}{L} A \quad [\text{equação: 05}]$$

onde:

v = velocidade de descarga (fluxo)

k = coeficiente de permeabilidade

$\Delta H / L$ = gradiente hidráulico (i)

ΔH = perda de carga entre os pontos

L = distância entre os pontos

A = área da seção

O solo é considerado não saturado quando há presença de ar nos vazios, mesmo em pequena quantidade, gerando assim uma perda na capacidade de fluxo de água neste meio.

Segundo Reichardt e Timm (2004), para um solo não saturado, a área útil para o fluxo é proporcional à umidade volumétrica, ou seja, a condutividade hidráulica decresce rapidamente com o decréscimo da umidade (ou potencial matricial h), pois ocorre uma diminuição da área útil para o fluxo de água (Figura 24). Em outras palavras, quanto maior a sucção do solo menor será sua condutividade hidráulica.

Boszczowzki (2008) complementa dizendo que em virtude disto, a permeabilidade dos solos não saturados é menor que a permeabilidade dos solos saturados e, a relação entre o coeficiente de permeabilidade e o grau de saturação é chamada de função de permeabilidade (Marinho 2005).

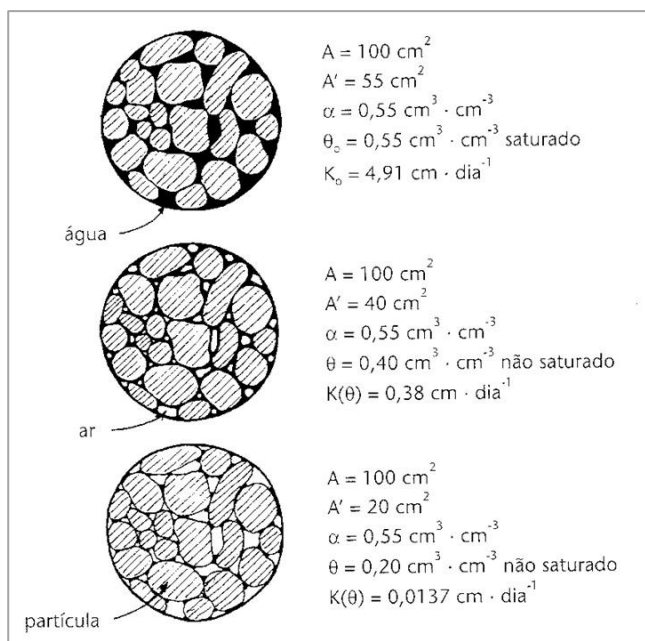


Figura 24: Diminuição da área útil para o fluxo de água (Reichardt e Timm, 2004).

Como o coeficiente de permeabilidade (condutividade hidráulica) decresce com a diminuição do grau de saturação do solo, a equação de Darcy (lei de Darcy) não é válida. Foi partindo deste pressuposto que a equação de Darcy foi adaptada por Buckingham (1907) para solos não saturados e a equação passou então a se chamar equação Darcy-Buckingham, sendo reescrita da seguinte forma:

$$q = - K \cdot \nabla H \quad [\text{equação: 07}] \quad \text{ou} \quad q = - K \cdot \text{grad } H \quad [\text{equação: 08}]$$

onde:

q = Fluxo de água

∇H ou $\text{grad } H$ = gradiente de potencial hidráulico

K = condutividade hidráulica (permeabilidade) do solo

Nota: o sinal negativo indica que o sentido da densidade de fluxo (q) é inverso ao gradiente hidráulico (∇H ou $\text{grad } H$), pois a água move-se de um ponto com maior potencial hidráulico para o ponto de menor potencial hidráulico. O coeficiente de permeabilidade é um dos parâmetros de maior variação em materiais inconsolidados. A Tabela 7 apresenta valores típicos do coeficiente de permeabilidade em função do tipo de solo.

Tabela 7: Valores do coeficiente de permeabilidade (Soares, 2006).

Tipo do Solo	Valo de K [cm/s]	Grau de Permeabilidade
Pedregulho	$> 10^{-1}$	Alto
Areia Grossa	10^{-1}	Médio
Areia Média	10^{-2}	Médio
Areia Fina	10^{-3}	Médio
Areia Siltosa	10^{-3} a 10^{-5}	Baixo
Argila Siltosa	10^{-5} a 10^{-7}	Muito Baixo
Argila Plástica	$< 10^{-7}$	Baixíssimo
Rochas Maciças	$< 10^{-9}$	Impermeáveis

2.7.1 Fatores que influenciam a condutividade hidráulica

Segundo Dourado (2003), em um mesmo solo, a condutividade hidráulica pode apresentar variações de algumas ordens de grandeza como resultado de mudança na sua estrutura, índices de vazios e umidade (grau de saturação). Outros fatores a serem considerados são a temperatura e a viscosidade da água.

▪ Índice de vazios

Quanto maior o índice de vazios maior será a permeabilidade do solo, ou ainda, quanto mais poroso for o solo maior será o índice de vazios e consequentemente este solo será mais permeável. Taylor (1948) equacionou esta relação da seguinte forma:

$$k_1 \div k_2 = \frac{e_1^3}{1 + e_1} \div \frac{e_2^3}{1 + e_2} \quad [\text{equação: 09}]$$

Entretanto, esta equação é válida para areia. Para solos finos (argilosos, por exemplo) uma relação logarítmica do coeficiente de permeabilidade pelo índice de vazios torna-se mais apropriada. Vargas, (1977) *in* Notas de Aula – Mecânica dos Solos, apresenta alguns resultados de ensaios de permeabilidade em relação ao índice de vazios em solos residuais brasileiros (Figura 25).

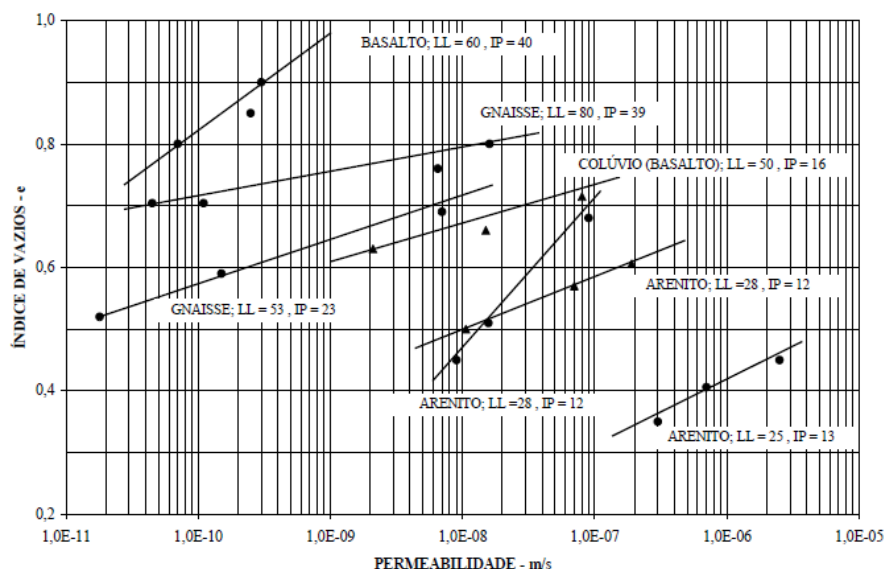


Figura 25: Ensaio de Permeabilidade x índice de vazios (Vargas, 1977).

▪ Estrutura

Trata-se do arranjo das partículas do solo. Em areia, seu arranjo estrutural é mais simplificado, em virtude dos macroporos de sua estrutura, com isto a água flui mais facilmente (maior permeabilidade). Segundo Gerscovich (2001), este fator pode ser visualizado em solos compactados com um mesmo índice de vazios e diferentes teores de umidade. A Tabela 8 mostra como exemplo, coeficientes de permeabilidade de um solo compactado da Barragem de Ilha Solteira realizado por Souza Pinto (2000).

Tabela 8: Coeficiente de Permeabilidade de um solo compactado.

Umidade de Compactação	Índice de Vazios	Coeficiente de Permeabilidade
17%	0,71	2×10^{-8} m/s
19%		9×10^{-9} m/s
21%		5×10^{-9} m/s

▪ Grau de Saturação

Segundo Lambe e Whitman (1969), o grau de saturação do solo tem uma grande influência no valor da permeabilidade. Quanto maior o grau de saturação de um solo maior será também a sua permeabilidade. Estes mesmos autores trazem como exemplo, resultados realizados por Wallace (1948) mostrando esta relação, entretanto eles alertam pela influencia da estrutura do solo para um melhor estudo da relação grau de saturação e permeabilidade (Figura 26).

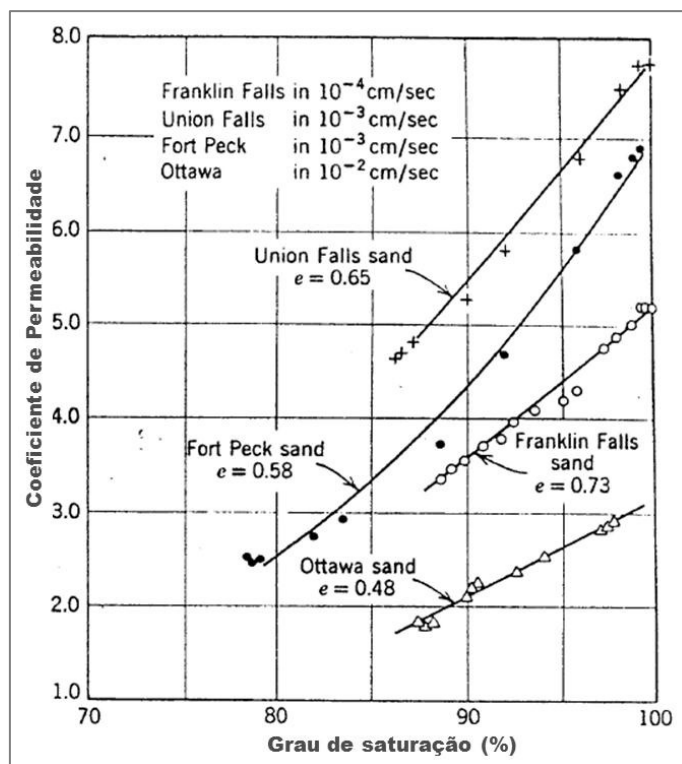


Figura 26: Relação entre o grau de saturação e a permeabilidade em areias (Lambe e Whitman, 1969).

▪ Temperatura e Viscosidade da água

A viscosidade da água é inversamente proporcional a sua temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura menor será a viscosidade da água e, como consequência, devido à facilidade de escoamento desta água nos vazios do solo, ocorre um aumento do coeficiente de permeabilidade. Desta forma, os valores do coeficiente de permeabilidade são geralmente referidos à temperatura de 20°C, conforme a seguinte equação:

$$k_{20} = \frac{k_T \cdot \mu_T}{\mu_{20}} = k_T \cdot C_k \quad [\text{equação: 10}]$$

onde:

k_{20} = coeficiente de permeabilidade a 20°C

k_T = coeficiente de permeabilidade a T°C

μ_T = viscosidade da água a T°C

μ_{20} = viscosidade da água a 20°C

$C_k = \mu_T / \mu_{20} \rightarrow$ fator de correção em função da temperatura

A Tabela 9, abaixo, apresenta alguns valores típicos para o fator de correção C_k em função da temperatura.

Tabela 9: Fator de correção C_k em função da temperatura (Soares, 2006).

Temperatura [°C]	C_k
10	1,298
15	1,135
20	1,000
25	0,887
30	0,793

2.7.2 Métodos de medida da condutividade hidráulica

Atualmente são encontrados vários métodos e técnicas para a quantificação da condutividade hidráulica (saturada e não saturada) do solo. Conforme descritos na literatura, esta propriedade pode ser determinada diretamente através de ensaios de laboratório (utilizando amostras deformadas ou indeformadas) ou ensaios *in situ* (campo), ou indiretamente através de correlações empíricas.

Os métodos realizados em laboratório para determinação da condutividade hidráulica do solo envolvem quantidades de amostras, as quais podem ser coletadas também durante o processo de perfuração do solo. A seleção de um método específico para uma aplicação particular dependerá dos objetivos a serem alcançados. O valor da condutividade hidráulica determinado por métodos de laboratório pode não refletir com precisão um valor respectivo no campo. Portanto, sempre quando o objetivo é caracterizar as propriedades físicas do sistema subterrâneo, os métodos de campo devem ser usados com a maior precisão possível. Todavia, os métodos de campo, são geralmente, mais caros do que os métodos de laboratório e, conseqüentemente, quando a questão de custo torna-se decisivo, ou quando a representação real das condições de campo não é de importância fundamental os métodos laboratoriais podem perfeitamente ser utilizados para determinar a condutividade hidráulica.

2.7.2.1 Métodos laboratoriais

Segundo Libardi (2005), estes métodos podem ser subdivididos para solos em condições de saturação e para solos não saturados.

Em solos saturados, os equipamentos utilizados em laboratório para a determinação da condutividade hidráulica são denominados de permeâmetros sendo estes classificados em: permeâmetro de parede rígida e permeâmetro de parede flexível. O permeâmetro de parede rígida é ainda subdividido em: molde de compactação, tubo amostrador e célula de adensamento.

Com relação ao método de execução os ensaios, estes podem ser classificados como: ensaio de carga constante; ensaio de carga variável; ensaio com vazão constante.

Segundo Soares *et al* (2006), o permeâmetro de parede rígida não é indicado para ensaios de solos com baixa permeabilidade, pois pode ocorrer fluxo lateral entre o corpo de prova e o molde. A alternativa para estes solos é a execução do ensaio segundo a NBR 13292/95.

O permeâmetro de parede flexível, por sua vez, é utilizado em ensaios de solo cuja condutividade hidráulica seja menor ou igual a 10^{-3} cm/s. Entretanto, para realização dos ensaios, os custos da célula e dos equipamentos envolvidos são relativamente elevados.

O método para o ensaio de carga constante é mais utilizado em amostras de solo com um coeficiente de permeabilidade estimado acima de 10^{-1} cm/s, ou seja, materiais que correspondem à fração mais grossa do solo (solos arenosos, pedregulhos, cascalhos). Este teste é executado de acordo com a aplicação direta da lei de Darcy para uma configuração solo-líquido em que representa um fluxo constante e unidimensional de um líquido de percolação de uma coluna saturada de solo (Figura 27).

O princípio deste método se baseia na colocação de uma amostra cilíndrica de solo de secção transversal A e comprimento L entre duas placas porosas que não fornecem qualquer resistência. Uma diferença de carga ($H1$ e $H2$) é aplicada e o volume V do fluido que passa pela amostra num intervalo de tempo t é recolhido num proveta graduada.

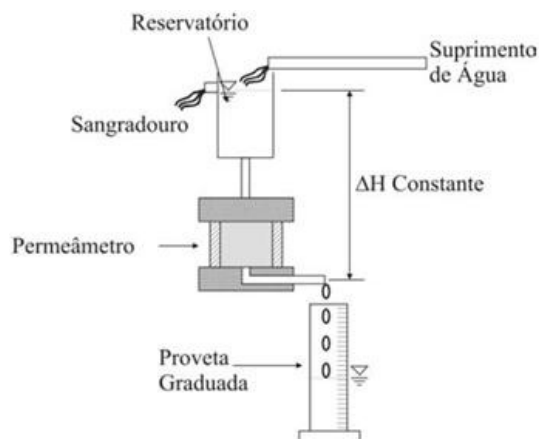


Figura 27: Ensaio de permeabilidade de carga constante (Dourado, 2003).

O valor da condutividade hidráulica saturada (k) pode então ser determinado pela equação abaixo:

$$K = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot (H_2 - H_1)} \quad [\text{equação: 11}]$$

Com relação ao ensaio de carga variável, este é usado para determinar a condutividade hidráulica de solos de granulação fina (argilosos e siltosos). Neste teste a carga total varia com o tempo.

Para realizar este método, uma amostra de solo, de área A e comprimento L , é acondicionada num permeâmetro. Acoplado a este, está um tubo vertical transparente de secção transversal a (o qual será introduzido o líquido de percolação), e uma escala (graduada) para que em intervalo especificado de tempo t a diferença de cargas H_1 e H_2 seja medida. Uma representação esquemática deste sistema é demonstrada na Figura 28.

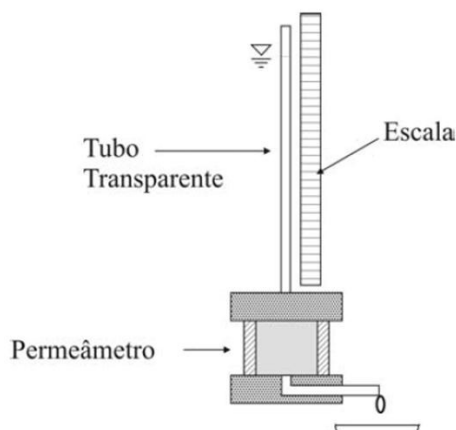


Figura 28: Ensaio de permeabilidade de carga variável (Dourado, 2003).

Desta forma, a condutividade hidráulica (k) pode ser determinada pela seguinte equação:

$$k = \left(\frac{a \cdot L}{A \cdot t} \right) \cdot \ln \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \quad [\text{equação: 12}]$$

Para solos não saturados, o valor de K pode ser obtido por meio de ensaios diretos ou ainda ser determinado de forma indireta.

Os métodos diretos são classificados, quanto ao tipo de fluxo em: método de regime permanente (ou estacionário) e método de regime transiente.

De acordo com Libardi (2005), para determinar o valor da condutividade hidráulica do solo, em condição de regime estacionário, basta desenvolver a experiência de Darcy sob diversas condições de não saturação, aplicando gradiente de potencial total constante ao longo da amostra e medindo a densidade de fluxo de água resultante. Ainda, segundo este autor, amostras utilizadas neste ensaio, podem ser tanto o solo com estrutura deformada como indeformada.

Sob condição de regime transiente, os parâmetros hidráulicos variam com o tempo, conduzindo desta forma a dificuldades consideráveis tanto na medição dos parâmetros em pontos diferentes dentro da amostra durante o fluxo quanto na interpretação dos dados.

Na sua forma indireta, o valor de k é obtido por meios de correlações empíricas, as quais serão abordadas no item 2.7.2.3.

Segundo Soares *et al* (2006), os ensaios em laboratório da condutividade hidráulica são mais utilizados na avaliação de solos compactados durante a fase de projeto devido os baixos custos comparados com ensaios de campo. Os resultados destes ensaios ajudam na seleção de materiais, normalmente mais indicados como camada impermeabilizante de fundações e aterros sanitários.

2.7.2.2 Métodos de campo (*in situ*)

De acordo com Vilar (1997) *apud* Calle (2000), os ensaios de permeabilidade *in situ* podem ser realizados em furos de sondagem, poços ou em cavas, utilizando equipamentos e/ou arranjos especiais.

Dentre estas técnicas estão: o ensaio de bombeamento; ensaios de permeabilidade em furo de sondagem (carga variável e carga constante); ensaios com piezômetros; ensaio de

perda de água sob pressão. Entretanto, os ensaios por infiltrômetros de anel duplo e os ensaios determinados em furos de sondagem são os procedimentos mais utilizados.

- Infiltrômetro de anel duplo

Este infiltrômetro é constituído por dois tubos cilíndricos com diâmetro diferente e bordas inferiores biseladas as quais permitem uma maior facilidade na penetração destes cilindros no solo. Estes cilindros devem ter 3 mm de espessura e 30 cm de altura com diâmetros de 30 e 50 cm, e são cravados a percussão.

Para realizar o ensaio, coloca-se água no cilindro interno até que se forme uma lâmina de 7,5cm de altura e de 5 cm entre os cilindros interno e externo.

Com auxílio de uma régua graduada, lê-se o posicionamento do nível d'água no instante zero e assim sucessivamente respeitando a ordem crescente de tempo (1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos) até que a velocidade determinada de entrada de água no solo seja praticamente constante. Obtido um valor de vazão constante se calcula o valor da condutividade hidráulica do solo.

- Permeâmetro de Guelph

Este permeâmetro foi desenvolvido por Reynolds e Elrick (1983), e em (1985) foi aperfeiçoado pelos mesmos autores, na *University of Guelph* no Canadá. Este equipamento é um permeâmetro de furo e de carga hidráulica constante que mede a condutividade hidráulica saturada de campo acima do lençol freático.

O permeâmetro tipo GUELPH (de carga constante) segue o princípio do frasco de Mariotte e é projetado para medir a condutividade hidráulica na faixa de 10^{-2} e 10^{-6} cm/s.

Para realizar a medição da permeabilidade com este equipamento, inicialmente deve-se fazer um furo com auxílio de um trado manual, até a profundidade a ser estudada. Atingindo o ponto de estudo, se faz necessário a troca da ponteira de perfuração do trado por uma ponteira de limpeza, nivelando a base e regularizando as paredes do furo. Neste momento, o equipamento é instalado. É introduzida a garrafa de Mariotte e a válvula de saída de água é aberta, deixando fluir a água para dentro da perfuração.

Após certo tempo a área em torno do furo ficará saturada e o fluxo tornar-se-á constante. É este valor de fluxo constante o qual será utilizado no cálculo da permeabilidade, ou seja, a permeabilidade do Solo saturado ocorre quando a velocidade de percolação da água torna-se igual à velocidade de saída da água do Permeâmetro.

2.7.2.3 Correlações empíricas

Segundo Libardi (2005), os métodos para a determinação da condutividade hidráulica de um solo não saturado além de caros, consomem muito tempo. Sendo assim esse parâmetro, normalmente, é determinado indiretamente e de acordo com Huang *et al* (1997) *apud* Boszczowski (2008), a condutividade hidráulica pode ser expressa de três maneiras diferentes, a saber:

1. Através de funções empíricas relacionadas à sucção matricial ou teor de umidade volumétrica, utilizando resultados de ensaios de laboratório (por exemplo, Richards, 1952; Gardner, 1958);
2. Por modelos macroscópicos baseados no grau de saturação “efetivo”, os quais se utilizam de expressões analíticas que levam em consideração muitas variáveis que influenciam o fluxo no solo (por exemplo, Brooks e Corey, 1964, *apud* Vanapalli *et al.*, 2002);
3. Através de modelos estatísticos nos quais a condutividade hidráulica relativa é calculada a partir da curva característica (por exemplo, van Genuchten, 1980 e Fredlund e Xing, 1994).

Analogamente, a determinação da condutividade hidráulica saturada pode ser determinada utilizando o coeficiente de permeabilidade e a curva característica (Gardner, 1958; Brooks e Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Leong e Rahardjo, 1998) *apud* Boszczowski (2008). Na Tabela 10 são mostradas algumas destas relações empíricas.

Tabela 10: Proposições para a modelagem da curva de condutividade hidráulica. (Gerscovich e Guedes, 2004) *apud* Boszczowski (2008).

Referência	Equação	Definição das Variáveis
Gardner (1958)	$k = \frac{k_{sat}}{1 + \alpha \left(\frac{\Psi}{\rho_w g} \right)^n}$	ψ = sucção; α e n = parâmetros de ajuste; ρ_w = densidade da água; g = aceleração gravitacional;
Brooks e Corey (1968)	$\begin{cases} k(\psi) = k_{sat} \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^n \Rightarrow \psi > \psi_b \\ k(\psi) = k_{sat} \Rightarrow \psi \leq \psi_b \end{cases}$	ψ = sucção; ψ_b = sucção de entrada de ar; n = parâmetros de ajuste;
Van Genuchten (1980)	$k(\theta) = k_{sat} \cdot S^l \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$ $S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	S = grau de saturação; $l = 0,5$; m = parâmetro de ajuste;
Leong e Rahardjo (1998)	$\frac{k}{k_{sat}} = \Theta^p \rightarrow \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	Θ = teor de umidade normalizado; p = parâmetro de ajuste;
Vanapalli e Lobbezoo (2002)	$\frac{k}{k_{sat}} \approx 10^{\left(7,9 \cdot \log S^\gamma \right)}$ $\gamma = 14,08 (IP)^2 + 9,4 (IP) + 0,75$	IP = índice de plasticidade

2.8 Vermiculita

2.8.1 Introdução

A vermiculita (Figura 29) é um argilomineral pertencente à família das micáceas, a qual é constituída principalmente por silicatos hidratado de magnésio, ferro e alumínio (Figura 30).



Figura 29: Mineral Vermiculita (Curbelo, 2002).

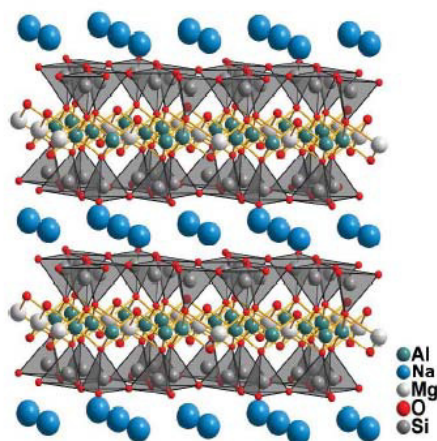


Figura 30: Fórmula estrutural da vermiculita (Avelino, 2009).

De acordo com Sznclwar e Scalabrin (2009), a descoberta e o início da utilização da vermiculita ocorreu nos Estados Unidos. Mais precisamente, a vermiculita foi descrita, pela primeira vez, por Thomas H. Webb como mineral, em 1824, a partir de amostra da região de Worcester – Massachusetts e começou a ser explorada comercialmente em 1915 no Colorado – EUA (Silva, 2006).

Entretanto, no Brasil, a vermiculita foi identificada pela primeira vez em 1942, em Liberdade, MG e, as primeiras pesquisas, iniciaram-se em 1949 em Congonhal, Tatuí, (SP), onde posteriormente implantou uma lavra (1954). Posteriormente surgiram as instalações para exploração nas regiões de Brumado (BA), de Sancierlândia (GO), de São Luiz de Montes Belos (GO), em Paulistana (PI) e em Santa Luzia (PB). Atualmente sua produção em escala industrial é realizada de forma concentrada em algumas poucas regiões no mundo e sua aplicação está grandemente concentrada em nações de maior desenvolvimento. Pode-se afirmar, por essa razão, que a sua intensidade de uso pode ser considerada um indicador do grau de desenvolvimento tecnológico do país em foco (Sznclwar e Scalabrin, 2009).

A origem deste mineral está nas rochas ígneas, principalmente naquelas onde o feldspato é predominante, como o granito e sienito. Também pode ser encontrada em grandes folhas nos diques de pegmatito e em muitas lavas felsíticas e pórfiros, em alguns gnaisses e xistos, associados muitas vezes, com a muscovita e menos comum nas rochas ferro-magnesianas. As principais fontes de vermiculita são encontradas em terrenos de topografia ondulada e montanhosa. O processo de extração é executado a céu aberto, semi ou totalmente mecanizado. O teor de vermiculita na jazida é de 10% a 15% do minério, então a vermiculita é concentrada a teores de 15% a 95% e comercializada depois de classificada em vários tamanhos (Silva Curbelo, 2002).

Uma das principais características deste mineral está na sua capacidade de expansão. Este material em seu estado natural quando submetido a temperaturas elevadas (800 a 1100°C), toda água intermolecular é evaporada, ocorrendo desta forma uma rápida expansão no plano perpendicular ao eixo basal. Este processo de aquecimento faz com que a vermiculita aumente seu volume em torno de 30 a 40 vezes do volume inicial, passando da forma lamelar para uma estrutura em flocos, recebendo assim denominação de vermiculita expandida.

Ainda segundo este mesmo autor, a densidade aparente da vermiculita pura é reduzida de 640-960 kg/m³ para 56-192 kg/m³ quando se obtém um produto expandido com 90% em volume de ar aprisionado. A Figura 31 ilustra esta propriedade de expansão da vermiculita.

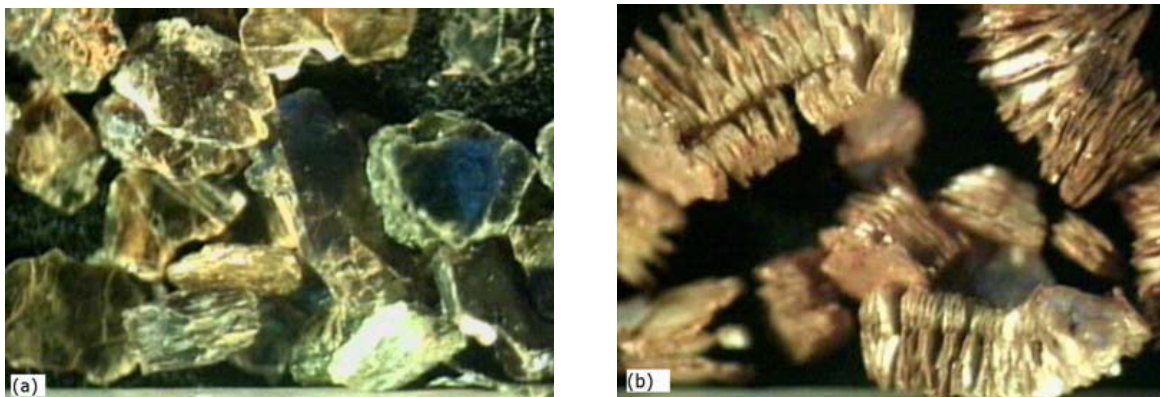


Figura 31: Fotografias de amostras de vermiculita (Santa Luzia, PB): (a) vermiculita natural; (b) vermiculita expandida (Ugarte *et al.*, 2004).

2.8.2 Mineralogia

O argilo mineral vermiculita é um silicato hidratado de formato lamelar, contendo quantidades variáveis de ferro, magnésio, potássio e alumina.

Sua estrutura básica (Figura 32) é um filossilicato tipo 2:1, composto por duas folhas planas de tetraedros de Si e Al (as folhas tetraédricas), as quais são unidas em uma folha octaédrica de hidróxido de Mg, na qual parte das hidroxilas é substituída pelo oxigênio apical da folha tetraédrica (Silva, 2006).

As características físicas são as mesmas das micas, no que se refere à clivagem típica, separando-se em finas lamelas flexíveis, porém sem elasticidade, e com cores que variam do bronze ao amarelo-amarronzado, com brilho perolado típico (Ugarte *et al.*, 2005).

Ainda segundo este mesmo autor, os minerais comumente associados à vermiculita são a biotita, hidrobiotita, piroxenita, apatita, anfibólio, sienito, serpentinito, flogopita, diopsídio, clorita, amianto, talco e minerais argilosos.

Esta derivação pode ser por intemperismo ao longo de zona de falha até a profundidade de 100 m, ou alteração hidrotermal a baixa temperatura (menos que 350°C) de piroxenito, peridotitos, dunitos, carbonatitos e anfibolitos cortados por granodioritos e pegmatitos, ambos alcalinos.

2.8.3 Processamento

Ugarte *et al*, (2005), Sznclwar e Scalabrin, (2009), relatam que a mineração e beneficiamento da vermiculita diferem dos outros bens minerais uma vez que seu valor depende da distribuição e eficiência na recuperação das partículas mais grossas.

Por conta disto é desejável lavar a vermiculita com teor bastante elevado. Os minérios ricos ou com teores elevados chegam até a 80% de vermiculita. Todavia, minérios de baixo teor (entre 20 e 30%) podem ser aproveitados economicamente.

Em geral, o processamento do minério lavrado é feito na própria mina sendo comum a lavra a céu aberto, como é o caso no Brasil, com desmonte mecânico utilizando trator de esteira na etapa de escarificação. O minério bruto é retomado por carregadeira frontal para abastecer os caminhões basculantes, que fazem o transporte até a usina de concentração. As bancadas possuem, como de hábito, largura média de 3,0 m e talude de 30°, o que permite a operação dos equipamentos de desmonte e transporte. Tal procedimento pode variar de acordo com a espessura da camada de minério no jazimento (Ugarte *et al*, 2005).

Nas minas modernas a abertura de cavas, geralmente rasas, cerca de 50 m, é feita com equipamentos convencionais tais como escavadeiras mecânicas, carregadeiras e caminhões, onde as jazidas de vermiculita estão associadas aos diques e/ou outros corpos rochosos e compactos.

As técnicas de beneficiamento são baseadas em propriedades como forma, densidade, composição e resistência à cominuição. Os minérios e concentrados são normalmente analisados pelo teor de vermiculita e tamanho das partículas. A amostra seca é peneirada em várias frações segundo a classificação granulométrica que exemplifica a diferença dos padrões de concentrados de vermiculita natural, internacional, americana e brasileira (Tabela 11). Cada fração é pesada e então submetida ao processo de expansão térmica em fornos com temperatura na faixa de 800 a 1.100°C. Após o resfriamento a vermiculita expandida é novamente pesada e a ganga residual é removida por meio de separação a seco ou a úmido, esta última menos utilizada.

O teor de vermiculita nos concentrados finais varia desde 90 até 99%. Os concentrados são também especificados em função do desempenho do material durante o processo de expansão térmica, o qual pode ser avaliado em teste de laboratório que simula o processo industrial. Nas unidades produtoras, rotineiramente, a avaliação da vermiculita expandida é feita segundo a pesagem do produto acondicionado em sacos de 100 litros.

Tabela 11: Classificação granulometria de padrões de concentrados de vermiculita natural (Reis, 2002 *apud* Ugarte *et al* 2005).

Padrão Internacional	Tamanho (mm)	Padrão Americano	Tamanho (mm)	Padrão Brasileiro	Tamanho (mm)
Grossa	-8,0 + 2,8	1	-7,0 + 3,327	-	-
Média	-4,0 + 1,4	2	-3,5 + 1,75	Média	55-95%> 2,4
Fina	-2,0 + 0,71	3	-2,0 + 0,6	Fina	65-95%> 1,2
Superfina	-1,0 + 0,355	4	-0,85 + 0,212	Superfina	70-95%> 0,6
Micrometro	-0,71 + 0,25	5	-0,3	Micrometro	80-100> 0,3

A Figura 34 mostra de uma forma genérica os processos de beneficiamento da vermiculita, tanto a seco como úmido.

De acordo com Ugarte *et al*, (2005), Sznclwar e Scalabrin, (2009), o processo de beneficiamento a seco é mais utilizado no Brasil e em geral, requer uma etapa de secagem antes da separação. O minério lavrado é exposto ao sol para secagem até uma umidade de 4%, ideal para a alimentação do processo, que é baseado em etapas de moagem, em moinhos de martelo, e peneiramento, para obtenção de concentrados com diferentes frações granulométricas.

A classificação, normalmente é feita por meio de separadores pneumáticos, ou mesas vibratórias, estas utilizadas em menor escala. A fração fina (pó) abaixo de 0,5 mm é descartada do circuito por meio de correia transportadora. Pode-se utilizar ainda de técnicas de separação magnéticas e eletrostáticas quando, por exemplo, existe a presença de biotita do minério.

Utilizam-se classificadores pneumáticos em função de sua maior seletividade, obtendo faixas granulométricas mais estreitas do concentrado.

O beneficiamento a úmido, em geral com menor aplicação, é utilizado nos casos em que o teor de vermiculita no minério bruto é baixo, ou existe a presença de contaminantes. Este tipo de beneficiamento possui duas linhas de processo: flotação da fração fina, menor que 1 mm, e técnicas de beneficiamento baseadas na morfologia ou densidade das partículas maiores.

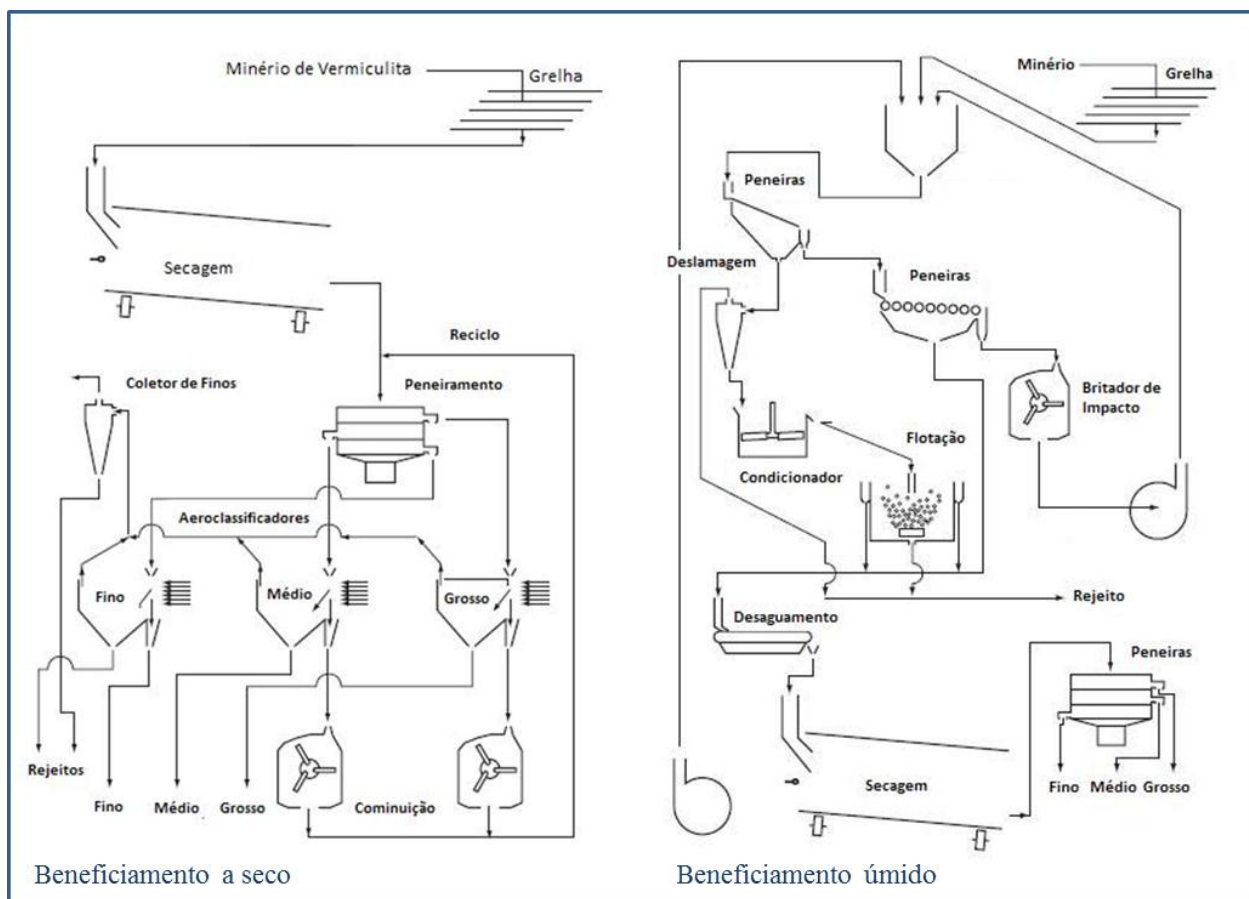


Figura 34: Processo de beneficiamento a seco e úmido da vermiculita. (Hindman, 2006 *apud* Sznclwar & Scalabrin, 2009).

2.8.4 Características da vermiculita

Em seu estado natural, a vermiculita é composta por superposição de finíssimas lamínulas que ao serem submetidas a uma temperatura de aproximadamente 1000°C, ocorre uma expansão em seu volume de aproximadamente 12 vezes o seu valor original, caracterizando este mineral como um produto industrializado denominado de Vermiculita expandida.

Os espaços vazios decorrente desta expansão são preenchidos por ar, conferindo a vermiculita expandida, dentre outras características, leveza, isolamento térmica e absorção acústica.

A dureza do mineral pode variar de 2,1 a 2,8, na escala Mohs e quando expandida apresenta uma dureza próxima a 1,5 Mohs. A densidade aparente da vermiculita pura é reduzida de 640-960 kg/m³ para 56-192 kg/m³ quando se obtém um produto expandido com 90% em volume de ar aprisionado.

A Figura 35 ilustra este processo de expansão da vermiculita.

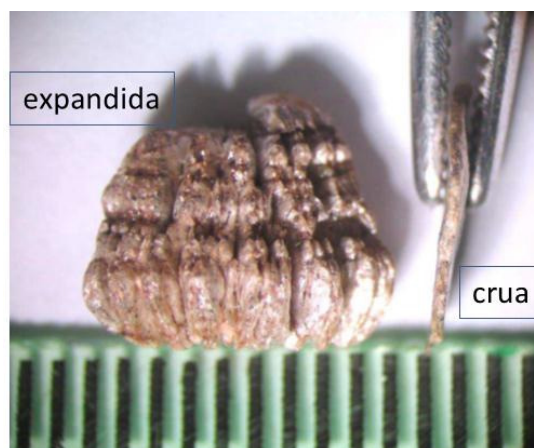


Figura 35: Comparação entre o tamanho de palhetas da vermiculita da Jazida Cerrado III: crua - cerca de 0,8 mm e esfoliada - cerca de 8 mm. (Ugarte *et al.*, 2005).

A vermiculita é um material inodoro, não abrasivo, incombustível (funde a 1315°C), não se decompõe ou deteriora, é inerte, não libera gases tóxicos, não promove irritações na pele, é totalmente isenta de amianto e é um material não carcinogênico.

Sua cor é uma variação entre o bege e o dourado, em virtude do baixo teor de ferro. Possui uma baixa condutividade acústica (reduzindo em até 62% os ruídos). Sua condutividade térmica é aproximadamente 0,048 Kcal/m²/h/°C, o que permite sua utilização para a produção de refratários em isolamentos térmicos. Apresenta uma capacidade de troca iônica, sendo importante nas aplicações na agricultura, pois ela é utilizada como veículo não só de nutrientes orgânicos, como também, como portador de defensivos agrícolas. Tem poder de reter grande quantidade de água.

Os concentrados de vermiculita são comercializados de acordo com sua granulometria, dependendo do tipo de aplicação. A Tabela 11 encontra-se este critério de classificação da vermiculita expandida.

Segundo Ugarte *et al* (2005), a composição química da vermiculita é rica em óxidos e, de forma ilustrativa, este autor relata (Tabela 12 e Tabela 13) uma comparação entre composições químicas médias de vermiculitas comerciais brasileiras e internacionais.

Tabela 12: Composição química (%) média de vermiculitas comerciais brasileiras (Ugarte *et al*, 2005).

Composto	Santa Luzia (PB)	Sancrelândia (GO)	Massapê (PI)
SiO ₂	42,8	40,4	45,10
MgO	19,9	18,3	23,60
Al ₂ O ₃	6,8	13,0	10,20
Fe ₂ O ₃	6,7	8,5	5,80
K ₂ O	4,6	3,7	0,50
Na ₂ O	1,0	2,5	0,10
CaO	0,56	1,4	3,60
MnO	0,11	0,12	-
TiO ₂	0,86	1,0	0,70
NiO	0,29	0,21	-
BaO	-	-	0,20
Cr ₂ O ₃	0,45	0,31	-
H ₂ O (total)	15,80	10,40	10,20
Total	99,87	100,00	100,00

Tabela 13: Composição química (%) média de concentrados de vermiculitas comerciais internacionais (Hindman, 1994 *apud* Urgate *et al*, 2005).

Composto	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	36,50	41,20	37,67	39,37	43,05	38,66	38,34
MgO	19,20	24,22	17,16	23,37	21,39	20,04	16,38
Al ₂ O ₃	14,50	12,68	14,23	12,08	10,01	17,36	12,85
Fe ₂ O ₃	10,50	4,60	8,07	5,45	1,90	8,45	8,80
K ₂ O	0,50	5,97	1,36	2,46	2,56	4,24	6,63
Na ₂ O	2,00	1,61	1,95	0,80	0,03	-	1,72
CaO	0,21	0,93	2,18	1,46	0,20	0,75	1,12
MnO	0,18	0,05	0,18	0,30	-	0,07	0,14
FeO	-	1,54	0,48	1,17	3,56	-	-
TiO ₂	0,75	1,38	0,20	1,25	1,00	-	1,66
Li ₂ O	-	-	-	-	0,03	-	0,01
BaO	-	-	-	-	0,03	0,12	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0,20	0,50	0,23
H ₂ O (total)	15,41	5,82	15,71	11,20	15,70	8,71	10,66
Total	99,64	99,99	99,19	98,97	99,4	98,61	99,34

1- Austrália (Munglinup), 2- China (Qieganbulake), 3- Egito (Hafafit), 4- África do Sul (Phalaborwa), 5- Rússia (Kovdor), 6- Estados Unidos (Chicago) e 7- Estados Unidos (Louisa)

2.8.5 Uso e aplicações

A aplicação da vermiculita em cada uso específico depende da sua granulometria e pureza. Devido ao seu alto poder de isolamento térmico e acústico, sua aplicação era restrita a este segmento, tanto no mundo como no Brasil.

Entretanto, em decorrência de todas as qualidades descritas acima a respeito da vermiculita, seu uso tem servido como base para numerosos produtos em diferentes áreas de aplicação, sendo que atualmente, o primeiro lugar em demanda pela vermiculita está na agricultura através de plantio de flores, fumo e reflorestamentos. A Tabela 14 e a Figura 36, mostram um estudo realizado por Sznclwar e Scalabrin (2009) sobre a aplicação da vermiculita expandida no Brasil.

Tabela 14: Aplicações da Vermiculita expandida. (Fonte: SZW Engenharia Ltda.).

Aplicações vermiculita expandida (2006)		
Construção Civil	15.600	12%
Isolação térmica	19.800	16%
Agricultura	84.200	66%
Outras	7.400	6%
Total	127.000	100%

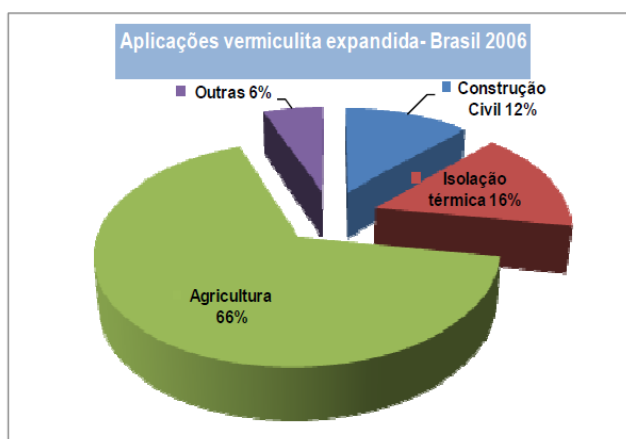


Figura 36: Aplicações da Vermiculita expandida. (Fonte: SZW Engenharia Ltda, a partir de informações de técnicos do segmento).

A seguir será detalhado o uso da vermiculita expandida em cada ramo industrial. Cabe salientar que a aplicação e o uso deste material dependem da granulometria (média, fina, superfina ou microfina).

Construção civil:

Devido ao baixo peso específico da vermiculita expandida e o poder de isolante térmico e acústico podem-se encontrar várias aplicações, como relacionada abaixo:

- Como agregado para concretos leves; Argamassa de gesso;
- Proteção nos revestimentos de estruturas metálicas, paredes e forros;
- Proteção e impermeabilizantes em lajes de coberturas;
- Câmaras a prova de som e fogo; Rebocos isolantes;
- Isolação termo acústica em: divisórias, forros, paredes, lajes, construção naval;
- Tijolos, placas e argamassas isolantes e refratárias;
- Isolante térmico e anticorrosivos;
- Isolação térmica de fornos, chaminés e dutos;
- Aplicada em fossos para piscinas de vinil, como camada de apoio e amortecimento.

Agricultura:

Devido a sua grande capacidade de retenção de água e liberação gradativa para a planta quando necessário; sua capacidade de troca catiônica disponibilizando para as plantas nutrientes necessários ao seu desenvolvimento; constitui-se também num ótimo condicionador de solos ácidos e argilosos, por auxiliar na correção do pH, tornando-os mais soltos e porosos promovendo uma boa aeração no solo a qual facilita o desenvolvimento do sistema radicular e conseqüentemente melhora as condições de alimentação da planta; fazem com que a vermiculita expandida se destaque na aplicação neste ramo industrial, como:

- Substratos para criação de mudas em estufas, permitindo o rápido e arejado crescimento das raízes, economizando irrigação, portando nutrientes e água, facilitando o transporte das mudas para o campo em razão de seu baixo peso e protegendo as raízes no replantio;
- Componente na fabricação de substratos orgânicos e fertilizantes organominerais;
- Condicionador de solos argilosos ou de baixa permeabilidade;
- Possui uma grande capacidade de retenção de água em solos arenosos;
- Veículo de macro e micronutrientes. Sua propriedade de liberação lenta evita a lixiviação natural dos mesmos pela irrigação;
- No enchimento de vasos de floricultura e de uso doméstico;
- Na criação de frutas e hortaliças hidropônicas.

Isolantes Térmicos:

- Isolante térmico em equipamentos aquecidos (fornos, muflas, estufas, tanques, vagões e caminhões frigoríficos, caldeiras, reatores, turbinas);
- Isolante térmico em fundição e siderurgia, na indústria do cimento, vidro, petroquímica, papel e celulose, alumínio;
- Fabricação de tijolos isolantes sílico-aluminosos, para temperaturas até 1.200°;
- Na proteção contra fogo de estruturas e anteparas navais em navios ou em plataformas de extração de petróleo;
- Na cobertura de tanques de galvanoplastia para reduzir perdas de calor.

Outras Aplicações:

Diversos ramos industriais vêm desenvolvendo aplicação para a vermiculita em seus produtos, como por exemplo:

- Indústria automotiva: como aditivo para pastilhas e lonas de freio;
- Indústria química: como elementos filtrantes; como carga para aumento na viscosidade de óleos; como carga para produção de texturas em pinturas e revestimentos; como componente de tintas e vernizes resistentes à temperatura; carga na fabricação de certo tipo de borracha; como carga na fabricação de plásticos;
- Indústria metalúrgica: como proteção de estruturas de aço; esfriamento dentro de peças forjadas; isolantes de peças que trabalham em baixas temperaturas;
- Indústria Siderúrgica: isolação em fornos de carvão coque e como “hot topping” (cobertura isolante para metais líquidos);
- Aplicação Ambiental: remoção de resíduos, purificação de água, tratamento de esgotos, na prevenção de danos à atmosfera, auxiliando no controle de poluição por gases; no combate a incêndios através de fabricação de materiais (roupas, portas corta-fogo, etc...), sistema de extinção de incêndios - usada como pulverizador tipo “spray”.
- Com crescimento da indústria de extração de petróleo, a vermiculita expandia vem ganhando mercado neste ramo por se apresentar como um excelente agente hidrofóbico na coleta de hidrocarboneto em meio aquoso.

2.8.6 Cenário nacional e internacional

A vermiculita é encontrada em diferentes regiões do mundo, como África do Sul, Estados Unidos, China, Egito, Austrália, Brasil, Zimbábue e Uganda, porém sua produção é realizada em poucos países.

Devido à aquisição de minas feita por grandes grupos mineradores internacionais o mercado de vermiculita se mostra bastante promissor, considerando a produtividade, logística, desenvolvimento de tecnologias de beneficiamento, garantia de qualidade e de atendimento a especificações importantes fatores competitivos para os países produtores.

De acordo com os dados obtidos do Sumário Mineral 2011 realizado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), a produção mundial da vermiculita em 2010 cresceu 5% em comparação com o ano anterior. Os três maiores produtores concentraram 78,4% da produção mundial e incrementaram as suas produções em torno de 6,5%. O líder mundial na produção de vermiculita foi a África do Sul, com 37,4% da produção mundial, seguida pela China, com 23,2%, e Estados Unidos, com 17,8%. O Brasil manteve o mesmo patamar de produção do ano anterior, figurando em 2010 na 4ª colocação, à frente da Rússia, na 5ª posição. A participação mundial do Brasil diminuiu de 9,4% em 2009 para 8,9% em 2010.

O Brasil, devido sua posição geográfica favorável em relação aos portos das América do Norte, Central e Europa, o Brasil, tem condições de se posicionar consideravelmente no mercado internacional, desde que atendida às questões de qualidade exigidas no produto final.

Os depósitos e jazidas de vermiculita, no Brasil, se encontram nos estados de Goiás, Pernambuco e Bahia. O polo do Piauí, recentemente teve suas reservas esgotadas e paralização das atividades. O polo da Paraíba necessita em princípio de maior aporte de capital para aproveitamento do potencial das jazidas e para tirar vantagem competitiva das proximidades dos Portos de Cabedelo e Suape, focando o mercado internacional.

Especialistas afirmam que a mineração e industrialização da vermiculita no país podem propiciar um desenvolvimento regional e nacional de forma sustentável, gerando empregos, impostos e divisas no comércio internacional, uma vez que os minérios brasileiros não contêm asbestos, o que confere aos concentrados de vermiculita maior valor agregado, além de favorecer o melhor aproveitamento econômico do bem mineral.

3 MATERIAIS E MÉTODO

Aqui serão abordados os materiais e procedimentos laboratoriais (análises e experimentos) utilizados no estudo de sistema de cobertura de aterros. A Figura 37 mostra de forma resumida a organização das atividades desenvolvidas.

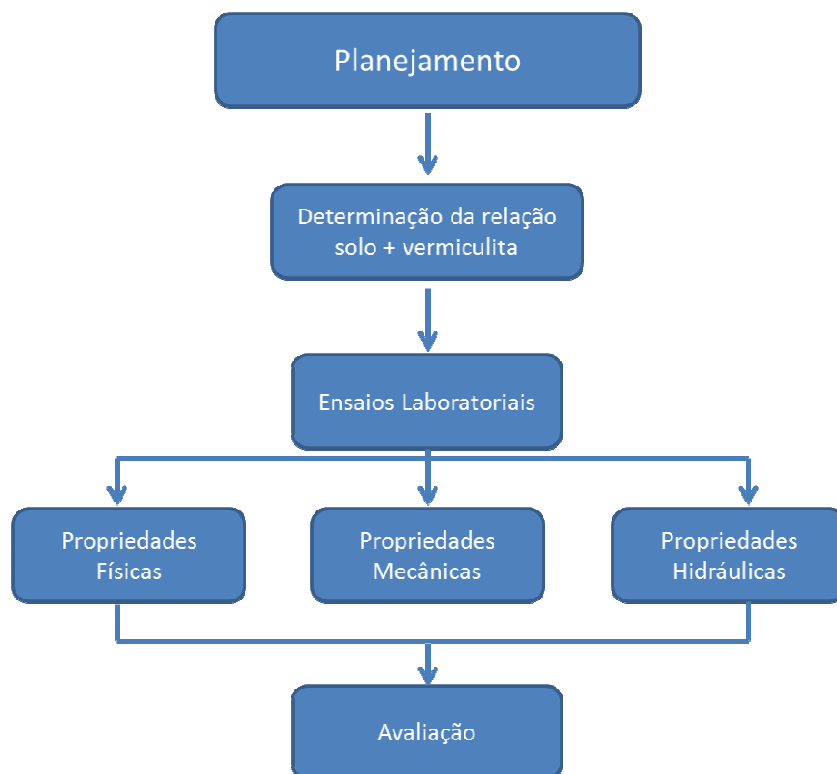


Figura 37: Fluxo organizacional das atividades desenvolvidas.

Muitos estudos têm sido desenvolvidos com relação aos tipos de solos e materiais alternativos utilizados em sistemas de cobertura de aterros e barreiras capilares. Entretanto, o uso e aplicação da vermiculita expandida em mistura com solo compactado não é evidenciada na literatura. Sendo assim, com base no levantamento bibliográfico, optou-se pelo estudo deste material em conjunto com a argila visando sua possível aplicação em sistemas de coberturas de aterro.

As amostras de vermiculita expandida utilizadas nos ensaios iniciais foram de granulometria fina e superfina. Nos testes complementares foi utilizada somente a vermiculita de granulometria fina.

3.1 Determinação da relação Solo + Vermiculita

Por se tratar de um material extremamente leve, a vermiculita expandida foi misturada ao solo nas proporções 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em volume de solo compactado, as quais correspondem respectivamente em % de massa a: (0,57%, 1,14%, 1,71%, 2,28% e 2,85%).

3.2 Ensaios Laboratoriais

3.2.1 Propriedades Físicas – Ensaios de caracterização

A vermiculita expandida, por se tratar de um material inerte, suas propriedades não sofrem variações que possam comprometer seu uso final. Sendo assim, usaremos como referência sua especificação de fábrica, apresentada na ficha técnica.

Entretanto, como o solo a ser tratado com a vermiculita expandida varia em cada região, este por sua vez foi determinado os índices físicos. O solo em questão trata-se de um solo residual maduro de biotita-gnaïsse. Os ensaios realizados e suas respectivas normas estão abaixo relacionados:

- ⇒ NBR 6457/1986 – Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e caracterização;
- ⇒ NBR 6457/1986 – Teor de umidade natural;
- ⇒ NBR 6459/1984 – Determinação do limite de liquidez;
- ⇒ NBR 7180/1984 – Determinação do limite de plasticidade;
- ⇒ NBR 6508/1984 – Massa específica real dos grãos;
- ⇒ NBR 7181/1984 – Análise granulométrica.

3.2.2 Propriedades Mecânicas

Após caracterização física do solo, foram realizados testes de compactação, misturando ao solo natural, volume de vermiculita expandida. As amostras foram preparadas na umidade ótima de compactação do solo em estudo (argiloso – $w = 21\%$). O volume ($29,35 \text{ g/cm}^3$) dos corpos de provas foi moldado utilizando anéis de PVC com 5,0 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura, as quais por sua vez foram compactadas estaticamente. As amostras preparadas foram embaladas em sacos plásticos a fim de evitar perda de umidade (Figura 38).



Figura 38: Amostras compactadas.

Inicialmente, os testes foram: Secagem ao ar e teste de umedecimento. Foram preparados dois conjuntos de 6 amostras cada e o objetivo destes testes estava em verificar o comportamento da vermiculita expandia misturada ao solo, analisado (análise gravimétrica) a perda e ganho de massa (umidade) nos corpos de prova em questão.

- **Teste de secagem**

No teste de secagem ao ar, as amostras, previamente preparadas, foram deixadas em estabilidade à temperatura ambiente (Figura 39) e analisadas diariamente a perda de massa das mesmas com o auxílio de uma balança de precisão.

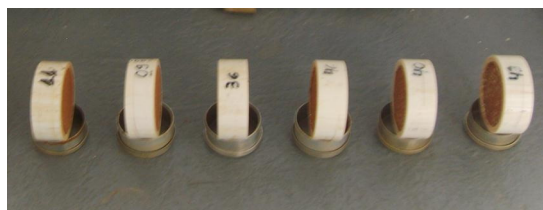


Figura 39: Teste de secagem ao ar

- **Teste de umedecimento**

Neste teste foi utilizada uma bandeja com dimensões de 30 cm x 15 cm. O interior de recipiente foi forrado com uma manta geotêxtil e então preenchido com água de forma que cobrisse até 2/3 do anel de PVC contendo a amostra compactada. Na parte inferior das amostras foi colocado papel filtro para que não houvesse desprendimento e perda de material (solo). Após estes preparativos, as amostras foram então deixadas, no recipiente com água, por um período de 72 horas (Figura 40). Passado este período foi realizada a pesagem destas amostras com o objetivo de verificar o ganho de massa (umidade) e em seguida foram deixadas à temperatura ambiente de forma a verificar a perda desta massa. Este ganho e perda de massa das amostras foram analisados com auxílio de uma balança de precisão.



Figura 40: Teste de umedecimento

3.2.2.1 Ensaios Complementares

Após fase preliminar de ensaios foi possível estabelecer uma proporção, considerada satisfatória, para a mistura de vermiculita expandida compactada ao solo. Os ensaios realizados foram: determinação da curva, compressão diametral, compressão simples, compressibilidade e adensamento e ensaio de permeabilidade.

- **Determinação da curva característica**

O procedimento utilizado para a determinação da curva característica foi à medição da sucção pelo método do papel filtro (Marinho, 1994). O princípio deste método consiste em colocar um papel filtro quantitativo à amostra com uma umidade inicialmente calculada e manter o conjunto em repouso até que ocorra a equalização da sucção. Dependendo do contato entre o papel filtro e amostra, é possível medir a sucção total (ocorre quando há um espaço entre o papel filtro e amostra, e neste caso, o fluxo de água se dá pelo vapor d'água) ou a matricial do solo (contato direto do papel filtro com a amostra em que o fluxo de água ocorre por capilaridade), (Figura 41). (Pereira, 2010).

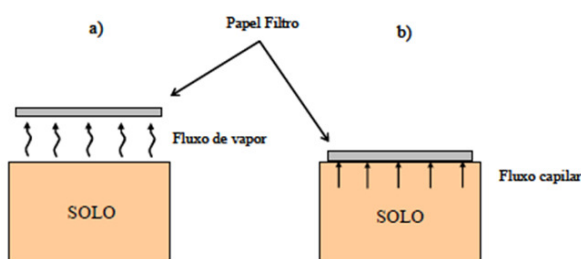


Figura 41: Fluxo de água do solo para o papel filtro: a) medição da sucção total, b) medição da sucção matricial (Marinho, 1994 *apud* Pereira, 2010).

Neste trabalho foi determinada a sucção matricial e para isto foram preparadas 15 amostras na umidade ótima de compactação. Os valores de água correspondente ao processo de secagem e umedecimento foram previamente calculados e, as amostras, foram então divididas da seguinte forma: 07 amostras para o ramo seco de umidade; 07 amostras para a faixa úmida; 01 amostra na umidade ótima. Após período de repouso (03 dias) e

estabilização (12 dias) das amostras, iniciou-se a pesagem dos papéis filtro. O tempo de equilíbrio entre o papel filtro e amostra de fundamental importância, pois irá determinar a correta sucção da amostra. Outro fator importante se diz respeito ao tipo de papel de filtro o qual este por sua vez irá influenciar na sensibilidade de resposta para diferentes níveis de sucção. O papel filtro utilizado foi o Whatman n°.42. A curva de calibração para este tipo de papel, segundo Chandler *et al*, 1992 é apresentado pelas seguintes equações:

Para umidade (w) do papel filtro superior a 47 %;

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05 - 2,48 \log W)}$$

Para umidade (w) do papel filtro igual ou inferior a 47 %.

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84 - 0,0622 W)}$$

- **Compressão Diametral**

À medida que se fazia as pesagens dos papéis de filtro para a determinação da curva característica, as amostras eram submetidas ao ensaio de compressão diametral com o objetivo de determinar da resistência à tração do solo e da mistura de solo com a vermiculita. O ensaio de compressão diametral foi elaborado pelo professor Luiz Lobo Carneiro em 1954 e reconhecido internacionalmente como *brasilian test*.

Em uma amostra cilíndrica de altura H e diâmetro D é aplicada uma carga de compressão a qual será distribuída uniformemente ao longo da amostra. Esta carga, aplicada progressivamente, irá provocar um estado de tensões na amostra (tensão de tração e compressão) até o momento que ocorrer a ruptura segundo um plano diametral vertical, separando a amostra em duas metades iguais. (Figura 42).

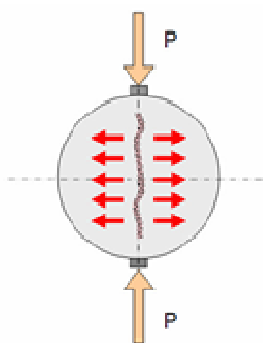


Figura 42: Representação esquemática do estado de tensões e plano de ruptura da amostra durante o ensaio (Pereira, 2010)

A resistência à tração da amostra foi calculada segundo a expressão:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DH} \quad [\text{equação: 13}], \text{ onde:}$$

σ_t = resistência à tração da amostra [N/cm²].

O valor final da resistência à tração foi convertido em kPa.

P = força axial máxima [N].

Esta força foi calculada multiplicando a leitura (em unidades) realizada no relógio comparador por uma constante 0,809 N/divisão.

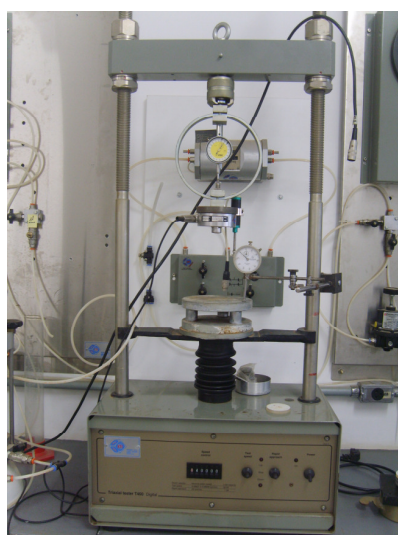
D = diâmetro da amostra [cm]

H = altura da amostra [cm]

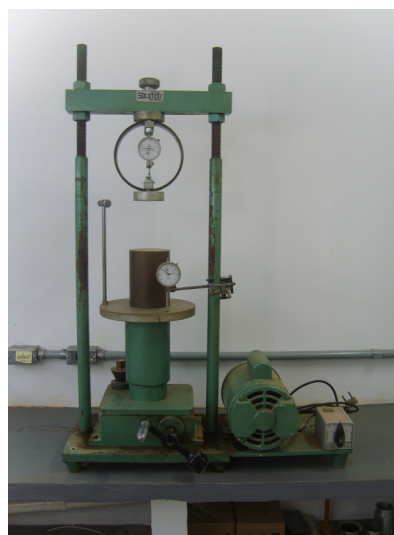
Para a execução do ensaio de compressão diametral foi utilizada uma prensa automática com velocidade constante de 0,5 mm/min, de forma que fosse possível a aplicação de uma carga até o surgimento da ruptura da amostra.

- **Compressão Simples**

O princípio deste método consiste em submeter uma amostra cilíndrica de altura H e diâmetro D a um carregamento axial. A carga e o deslocamento vertical em que a amostra é submetida são medidos respectivamente por uma célula de carga e um extensômetro (Figura 43).



(a)



(b)

Figura 43: Prensas utilizadas no ensaio de compressão simples: (a) prensa automática; (b) prensa manual.

Este ensaio permite determinar a tensão vertical máxima e o ângulo α (inclinação do plano de ruptura em relação a horizontal). Com estes dados e com base no conceito de pólo, é possível construir o Círculo de Mohr e definir o estado de tensões atuantes no plano de ruptura da amostra. O prolongamento de uma reta tangente ao Círculo de Mohr passando pelo ponto que representa o estado de tensões determina a envoltória de resistência de Mohr. (Figura 44).

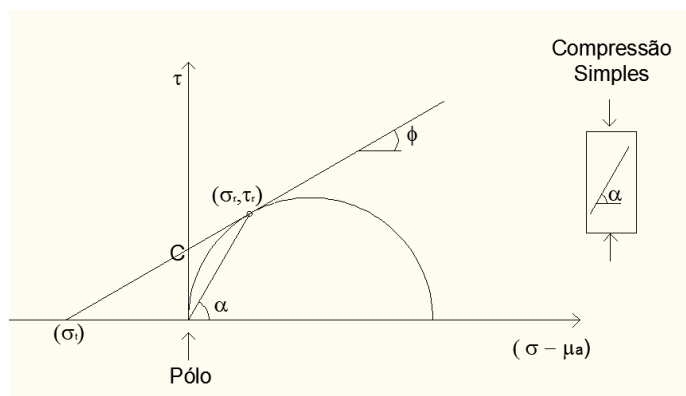


Figura 44: Representação esquemática da determinação da resistência à tração através do ensaio de compressão simples (Pereira, 2010).

A envoltória de ruptura definida por Mohr é geralmente uma curva. Entretanto, para a maioria dos problemas em mecânica dos solos a tensão de cisalhamento no plano de ruptura é frequentemente associada a uma reta em função da tensão normal. Esta função linear é denominada de critério de ruptura de Mohr-Coulomb e defini o limite de ruptura do solo quando submetido a tensões e esta envoltória é representada pela seguinte expressão (Soares *et al*, 2006; Das Braja 2007):

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad [\text{equação: 14}]$$

onde:

τ = resistência ao cisalhamento do solo

c = coesão

σ = tensão normal vertical

ϕ = ângulo de atrito interno do solo.

Para realização deste ensaio inicialmente foram preparados 18 corpos de prova na umidade ótima de compactação ($w=21\%$). O volume da amostra ($220,62 \text{ g/cm}^3$) foi

moldado utilizando cilindros de PVC com altura 10 cm e 5,3 cm de diâmetro e em seguida compactada estaticamente. Após esta etapa cada corpo de prova foi embalado em filme plástico e deixado em repouso por 03 dias. Passado este período de equalização da umidade iniciou-se o teste propriamente dito. Para as amostras com teor de umidade teórico acima de 13% foi utilizado um prensa automática e para amostras baixo de 13% utilizou-se a prensa mecânica. Tal procedimento adotado foi necessário devido ao limite de carga (2 kN) a qual o anel de carga da prensa automática poderia ser submetido. Na prensa mecânica foi utilizada uma célula de carga com capacidade de carga de até 7,84 kN.

Cada amostra era colocada na prensa de forma a ficar centralizada sobre o prato inferior e então se iniciava o carregamento axial o qual era anotado simultaneamente a intensidade de carga aplicada e o deslocamento vertical em que o corpo de prova era submetido até ser caracterizada a condição de ruptura e que visualmente pudesse ser observar este plano de ruptura. Ao término do ensaio era retirada uma amostra de solo, no plano de ruptura, para ensaio de umidade.

As figuras a seguir (Figura 45, Figura 46, Figura 47) ilustram as fases deste ensaio.



Figura 45: Compactação das amostras para o ensaio de compressão simples.

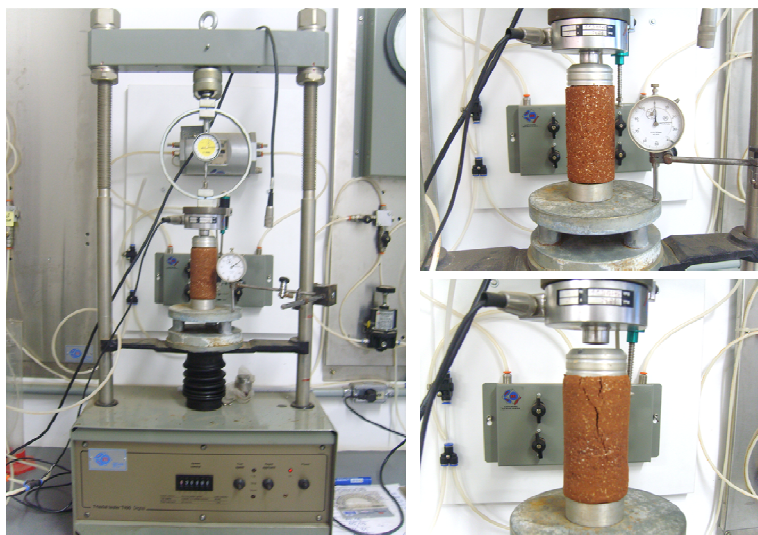


Figura 46: Ensaio de compressão simples usando a prensa automática.

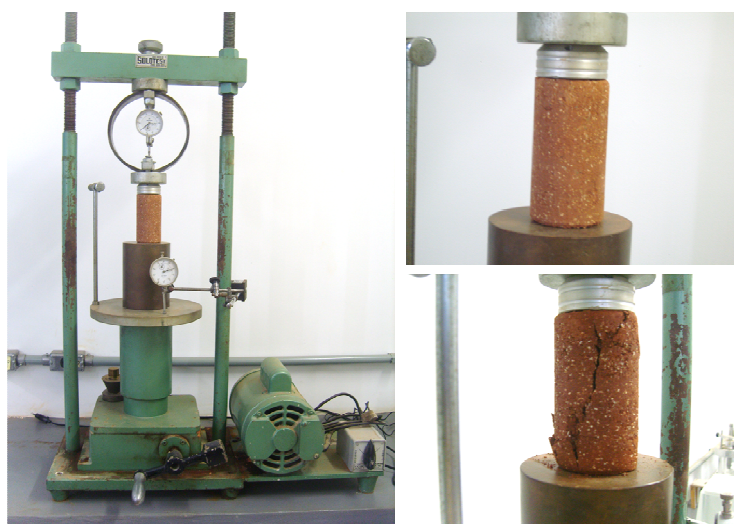


Figura 47: Ensaio de compressão simples usando a prensa manual.

- **Resistência ao cisalhamento direto**

Este ensaio consiste em submeter o corpo de prova a uma compressão (força normal) seguido da aplicação de uma força cisalhante. Esta força promove um deslocamento horizontal até o momento de ruptura da amostra. A cada tensão normal aplicada ao corpo de prova obtém-se um valor correspondente de tensão cisalhante de ruptura, permitindo desta forma, traçar a envoltória de resistência do solo.

Para realização deste ensaio cada corpo de prova foi preparado na umidade ótima de compactação ($w=21\%$). O volume da amostra (250 g/cm^3) foi moldado utilizando um molde metálico com 2,5cm de altura cm e 10 cm de comprimento e largura, e em seguida

compactada estaticamente. A tensão aplicada em cada ensaio foi: 5 kPa, 10 kPa, 15 kPa, 20 kPa, 25 kPa e 30 kPa.

Para execução deste ensaio é utilizada uma caixa metálica bipartida a qual é acondicionada na prensa de cisalhamento direto. Todos os acessórios e o equipamento estão ilustrados na Figura 48.

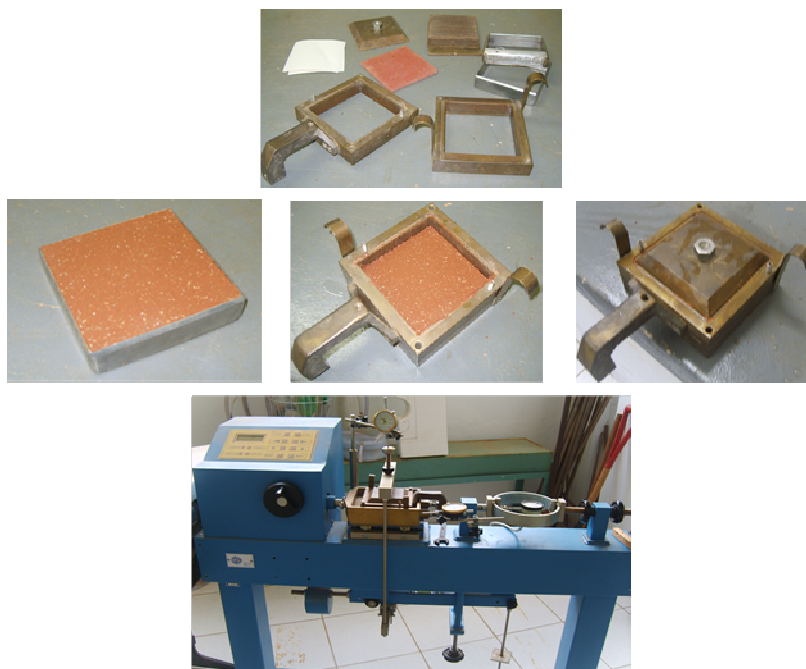


Figura 48: Aparelhagem usada no ensaio de cisalhamento direto.

Com a amostra preparada, esta por sua vez era transferida para a caixa bipartida e posicionada à prensa de cisalhamento, a qual era mantida por 24 horas inundada. Após este período, o corpo de prova era submetido à tensão correspondente ao ensaio e mantido por 1 hora em repouso antes de iniciar o ensaio propriamente dito.

- **Compressão edométrica**

Todos os materiais quando submetidos a carregamento tendem a se deformarem ou comprimirem. Esta compressão é causada pela deformação e deslocamento das partículas do solo e pela expulsão da água ou do ar dos espaços vazios e consequentemente redução em seu volume (Soares *et al*, 2006; Braja, 2007).

Esta diminuição do volume do solo pela ação de cargas a ele aplicadas é definida como compressibilidade.

Existem vários métodos para determinar este índice, entretanto o mais utilizado é o desenvolvido por Terzaghi e conhecido no Brasil como ensaio de adensamento

lateralmente confinado ou ensaio edométrico. O princípio do método consiste na aplicação de uma força vertical em uma amostra confinada lateralmente. A tensão aplicada sobre a amostra permite uma maior acomodação entre as partículas do solo seguido de uma redução no seu volume de vazios.

Durante o ensaio, são realizadas leituras (através de um extensômetro) em intervalos de tempo pré-estabelecidos, de forma a obter a variação da altura da amostra.

Os dados obtidos durante o ensaio são então usados para descrever a relação entre a pressão efetiva e o índice de vazios do solo bem como a evolução de sua deformação em função do tempo. A aparelhagem usada no ensaio está ilustrada abaixo. (Figura 49).



Figura 49: Aparelhagem usada no ensaio de compressão edométrica.

As amostras usadas neste ensaio foram preparadas na umidade ótima de compactação ($w=21\%$). O volume de cada amostra ($76,97 \text{ g/cm}^3$) foi moldado utilizando um anel metálico rígido com altura de 2 cm e 7 cm de diâmetro e em seguida compactada estaticamente.

Após preparo da amostra, o corpo de prova foi posicionado na célula de adensamento e este por sua vez acoplado à prensa de adensamento. Na etapa seguinte, foi ajustada a posição do extensômetro para 300 unidades. Em seguida, foi adicionado água na célula de adensamento de forma que a amostra ficasse totalmente submersa (saturada).

Este conjunto se manteve em estabilidade por 24 horas e passado este período iniciou-se o ensaio.

A amostra foi submetida a cargas de 5 kPa, 10 kPa, 15 kPa, 20 kPa e 30kPa e a cada estágio de carregamento foi realizado leituras no extensômetro nos intervalos de tempos de 0s, 4s, 15s, 34s, 60s, 1:34 min, 2:15 min, 3:00 min, 4:00 min, 6:15 min, 9:00 min, 12:15 min, 16:00 min, 20:15 min, 25:00 min, 30:15 min. Ao final do carregamento (30 kPa; 30:15min) fez-se o descarregamento (descompressão) do corpo de prova,

retirando os pesos correspondente à 15kPa, 5kPa e 0 kPa realizando suas respectivas leituras no extensômetro.

Foi realizado também o ensaio de compressão para amostra não saturada, ou seja, não submersa em água.

Para este corpo de prova foi mantido a mesma faixa de carregamento (5 kPa a 30 kPa) porém as leituras foram realizadas a cada 5 minutos num intervalo de 1 hora para cada carregamento.

3.2.3 Propriedades Hidráulicas

- **Ensaio de permeabilidade**

A permeabilidade de um solo é a propriedade que permite o escoamento da água e todos os solos são mais ou menos permeáveis. O método de ensaio utilizado foi à determinação da permeabilidade por carga variável conectada à célula de adensamento, Figura 50.



Figura 50: Ensaio de Permeabilidade

De acordo com Tavenas *et al* (1983) *apud* Soares *et al* (2006) a vantagem na utilização deste ensaio consiste na possibilidade de medir a variação da permeabilidade em função do índice de vazios com o aumento da tensão vertical efetiva. A preparação da amostra ocorreu de forma análoga ao ensaio de compressibilidade e adensamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

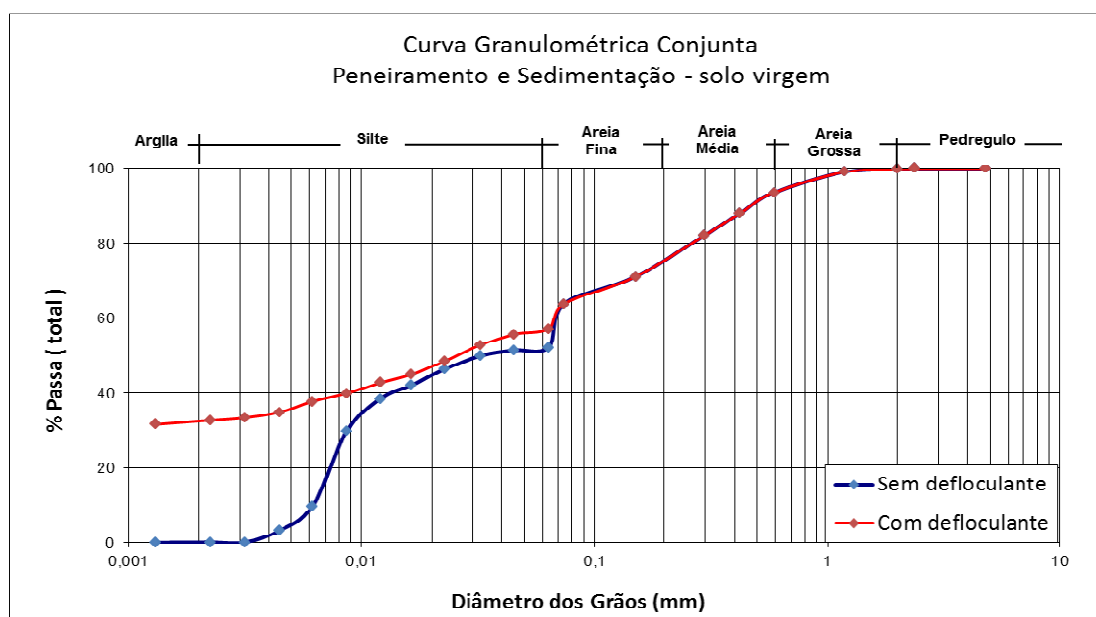
4.1 Preparação das amostras

Os dados da Tabela 15 referem-se aos ensaios realizados na caracterização do solo residual maduro de biotita gnaíse. A Figura 51 trás o resultado do ensaio de granulometria (a curva granulométrica conjunta).

Tabela 15: Caracterização do solo.

Ensaio	Resultado	
Massa específica real dos grãos (G _S) – [g/cm ³]	2,735	
Limites de Atterberg – [%]	LL	43
	LP	24
	IP	22
Umidade ótima de compactação – [%]	21	
Massa específica seca máxima – p _d - [g/cm ³]	1,583	

LL = Limite de liquidez; LP = Limite de plasticidade; IP = Índice de plasticidade.



Pedregulho (%)	Areia (%)			Silte (%)	Argila (%)	Total Grossos	Total Finos
	Grossa	Média	Fina				
0,1	6,3	11,6	24,9	24,4	32,7	42,9	57,1

Figura 51: Curva Granulométrica conjunta (solo residual maduro de biotita gnaíse).

De acordo com Sistema Universal de Classificação do Solo – SUCS e a designação da ASTM D-2487, os resultados apresentados este solo é classificado como CL (argila de baixa plasticidade).

Na Tabela 16 estão tabuladas as características físico-químicas da vermiculita expandida utilizada para o preparo das amostras usadas nos ensaios. (segundo laudo fornecido pela empresa Terra Mater).

Tabela 16: Características físico-químicas da vermiculita expandida.

(Adaptado do Laudo fornecido pela Terra Mater Ind. e Com. Ltda.)

Ensaio	Resultados	
Massa específica aparente (g/cm^3)	0,07 - 0,120	
Condutividade Térmica (W/m.k)	0,070	
Temperatura de Amolecimento ($^{\circ}\text{C}$)	Inicial: 1260 Final: 1350	
Umidade máxima (%)	7,0	
Análise Química	49,77% SiO_2	0,90% TiO_2
Espectrofotometria de absorção atômica com chama	16,73% MgO	3,20% K_2O
Espectrofotometria molecular	12,10% Al_2O_3	0,30% Na_2O
Complexometria com EDTA	5,95% Fe_2O_3	0,06% MnO
Gravimetria	0,80% CaO	0,21% Cr_2O_3
Ponto de fusão (2h a 900°C)	9,97	

Por se tratar de um material inerte, suas propriedades não sofrem variações que possam comprometer seu uso final. A massa específica da vermiculita expandida utilizada nos cálculos para preparação da mistura com o solo foi igual a $0,11 \text{ g/cm}^3$. A representação da curva granulométrica ilustrada na Figura 52.

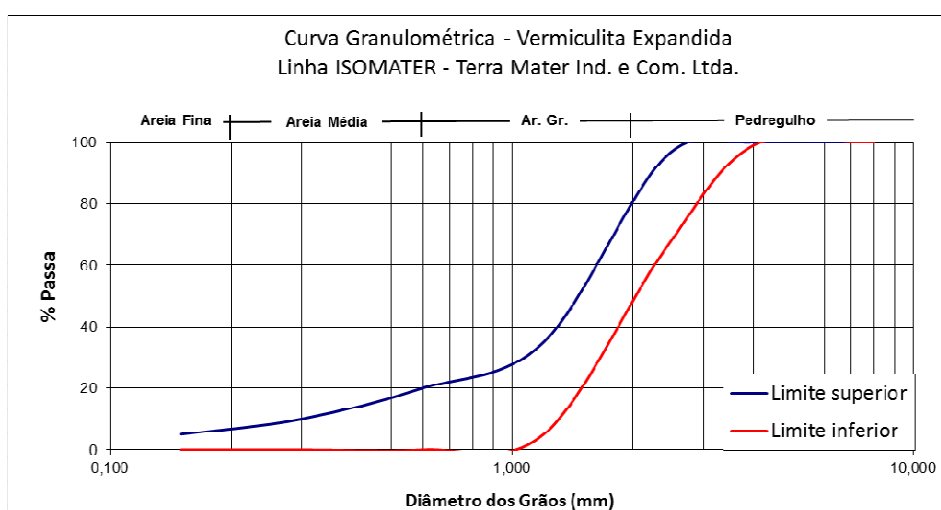


Figura 52: Curva Granulométrica da Vermiculita Expandida Fina.

(Adaptado do Laudo fornecido pela Terra Mater Ind. e Com. Ltda.)

Após caracterização física do solo, foram preparadas 12 amostras, misturando ao solo natural, volume de vermiculita expandida nas proporções 10%, 20%, 30%, 40% e

50%, que correspondem respectivamente a 0,57%, 1,14%, 1,71%, 2,28% e 2,85% em peso. Estas amostras foram divididas em dois grupos para os testes iniciais de secagem e umedecimento. A Tabela 17 mostra as características físicas destes corpos de prova.

Tabela 17: Caracterização das amostras (solo + vermiculita).

	Ensaio de Secagem						Ensaio de Umedecimento					
	n° CP						n° CP					
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Massa [g]	73,13	73,19	73,25	73,17	73,15	73,22	73,50	73,32	73,37	73,28	73,43	73,47
Vermiculita [%]	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
Umidade (w) [%]	21,06	21,07	21,03	21,06	21,08	21,06	21,1	21,08	21,06	21,07	21,09	21,06
Peso específico natural (pn) [g/cm ³]	1,865	1,865	1,866	1,864	1,864	1,866	1,873	1,868	1,869	1,867	1,871	1,872

4.2 Ensaios preliminares

4.2.1 Ensaio de Secagem ao ar

As amostras foram preparadas na umidade ótima de compactação. A quantidade de água adicionada ao solo para que se obtivesse a umidade ótima de compactado correspondia a 13 g. Com todas as amostras preparadas iniciou-se o teste de secagem ao ar propriamente dito.

A Figura 53 apresenta os resultados iniciais do ensaio de secagem ao ar. Nesta figura está representada a perda de massa de água da mistura solo/vermiculita.

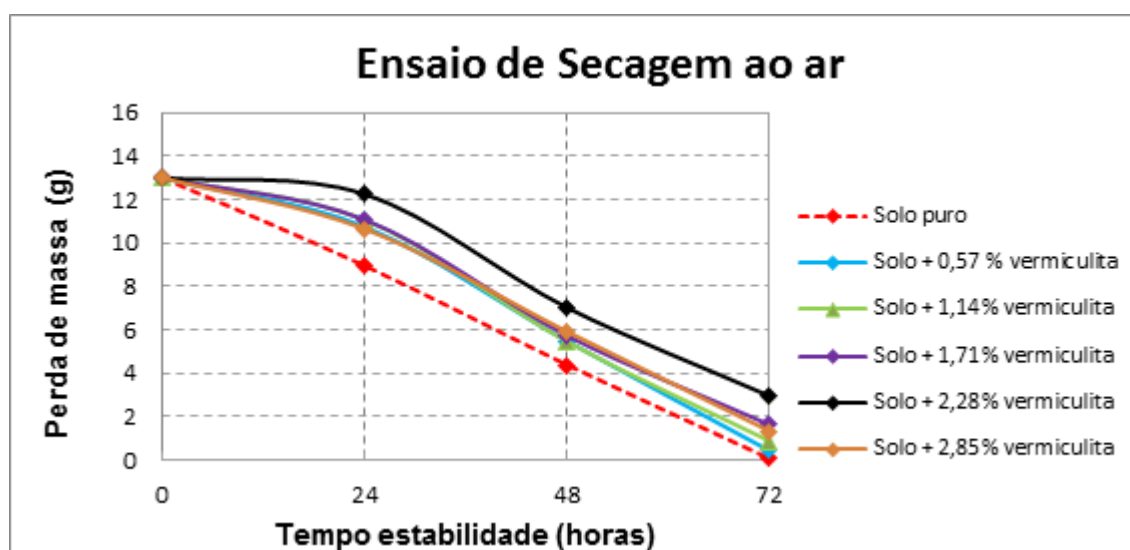


Figura 53: Resultado do teste de secagem.

Após período de 72 horas de secagem ao ar, foi possível verificar que a mistura contendo 2,28% em peso de vermiculita ao solo (40% em volume de solo compactado) apresentou uma retenção de água de aproximadamente 23%, o que corresponde a 2,95 g de sua umidade inicial, enquanto que no solo puro (argila compactada) a quantidade de 13 g de água inicialmente adicionada já havia sido totalmente evaporada.

4.2.2 Ensaio de Umedecimento

Como mencionado no item 3.2.1, as amostras foram submetidas à imersão em água com o objetivo de verificar o ganho de umidade. Porém, para que pudesse estabelecer um período para a imersão destas amostras, foi preparado um novo conjunto de amostras e deixadas submersas por 24, 48, 72, 96 e 120 horas.

As amostras foram preparadas na umidade ótima de compactação e a proporção da mistura (solo + vermiculita) escolhida para o ensaio foi de 40%, (2,28% em peso). A Figura 54 apresenta o resultado deste teste.

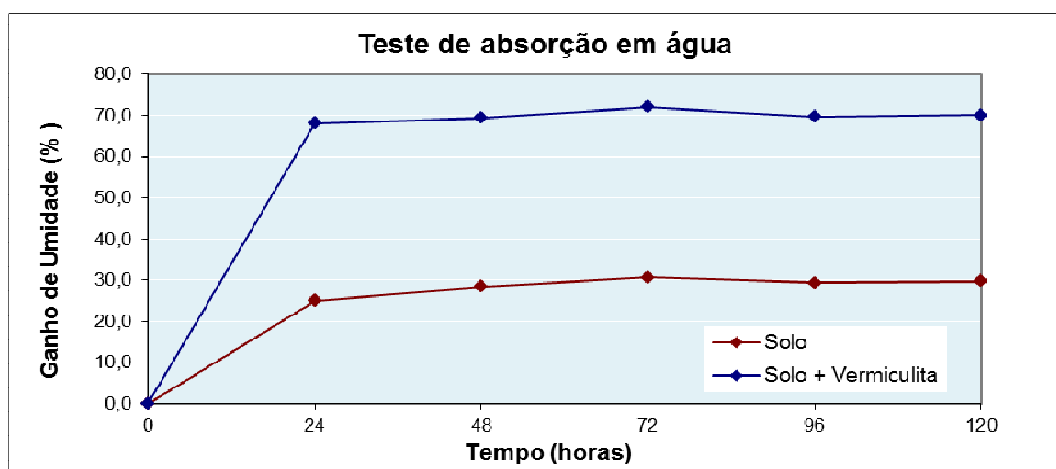


Figura 54: Teste de imersão em água.

Através deste gráfico foi possível verificar que o ganho de umidade ocorreu de forma gradativa até 72 horas, período este em que todos os poros haviam sido preenchidos com água.

Após 72 horas ocorreu uma estabilização na absorção de água tanto para o solo puro como na mistura com vermiculita.

A partir deste teste, iniciou-se o ensaio de umedecimento com todas as amostras, e o resultado está representado na Figura 55.

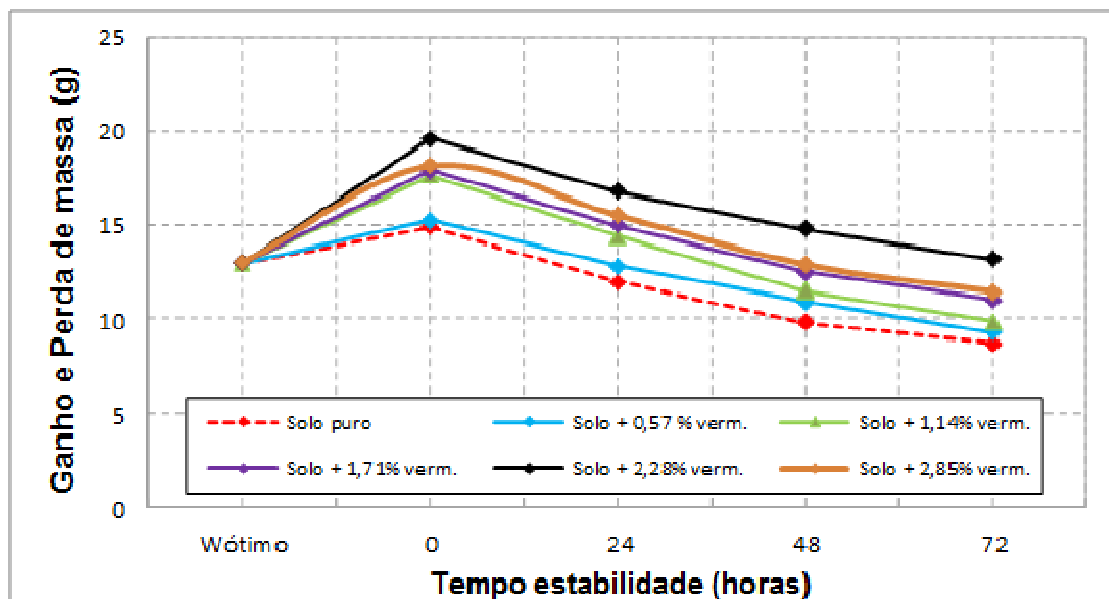


Figura 55: Resultado do teste de umedecimento e secagem.

As amostras foram preparadas na umidade ótima de compactação e da quantidade de água inicialmente adicionada (13 g) houve um ganho de massa (umidade) de aproximadamente 51% (19,51 g) contra 14% (14,89 g) da amostra com solo puro, e esta proporção se manteve durante o processo de secagem. Outro fator que também observado na figura 55 é que após 24 horas de secagem, a umidade inicial do solo puro já havia sido alcançada, enquanto que a mistura contendo 2,28% de vermiculita se manteve por 72 horas, evidenciando desta forma o poder de retenção de umidade na amostra quando misturada com vermiculita. Diante deste resultado, as amostras com 2,28% de vermiculita foram submetidas a mais quinze ciclos de umedecimento e secagem e a diferença no ganho de umidade entre o solo e a mistura com vermiculita se manteve em torno de 38%.

A Figura 56 apresenta o acompanhamento no ciclo de umedecimento e na Figura 57 encontra-se a média dos valores obtidos durante o ciclo de secagem. Na Figura 58 representada a expansão das amostras durante os ciclos de umedecimento. Neste gráfico é possível observar que a amostra com vermiculita apresentou uma expansão em torno de 20% da sua altura inicial enquanto o solo puro este valor foi de 10%.

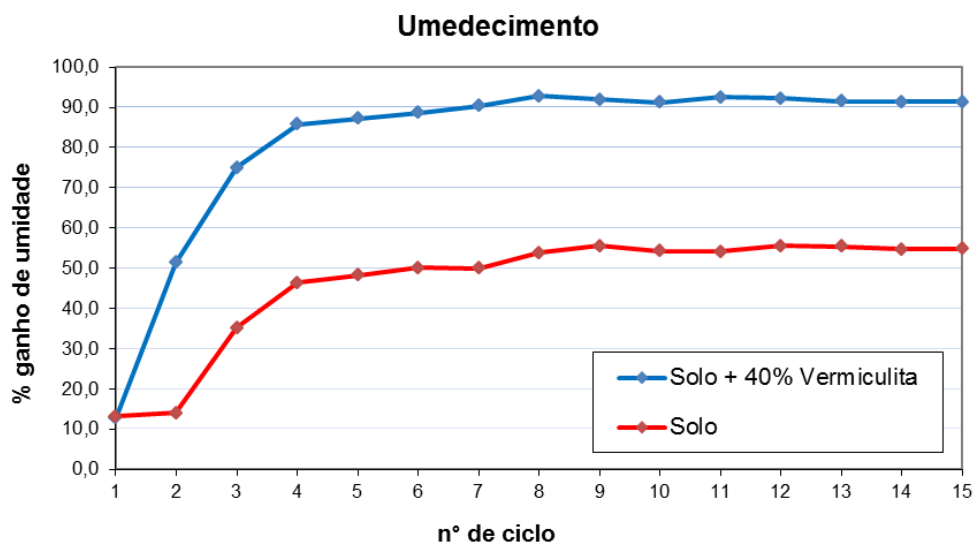


Figura 56: Ciclo de umedecimento da amostra com 40% em volume de vermiculita.

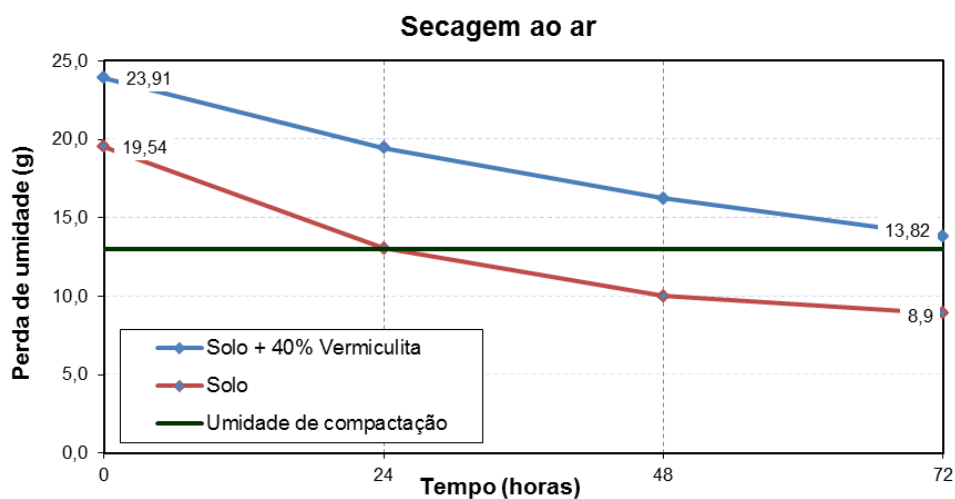


Figura 57: Média dos valores obtidos no ciclo de secagem da amostra com 40% de vermiculita.

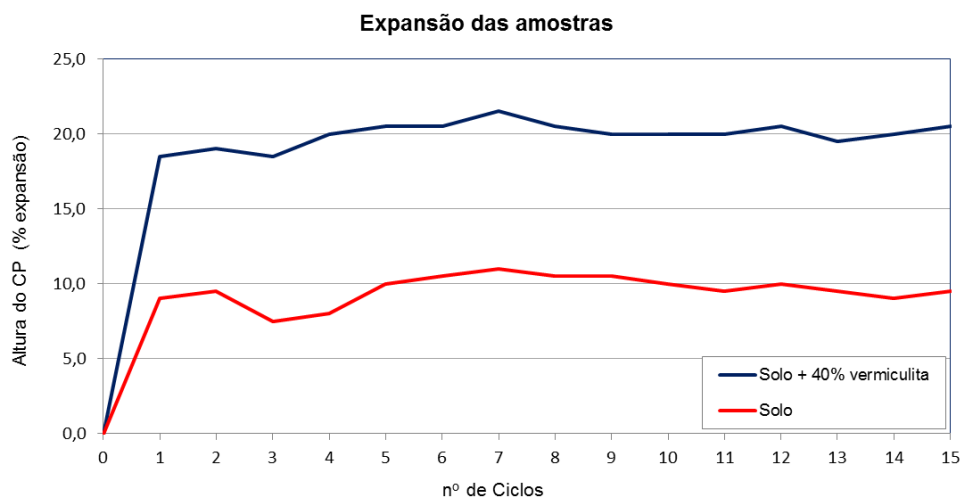


Figura 58: Gráfico de expansão das amostras no ciclo de umedecimento.

4.2.3 Curva de retenção de água

Foram preparados um total de 30 amostras, sendo 15 amostras de solo puro e 15 com a mistura de 40% (2,28% em peso) de vermiculita. A técnica utilizada neste ensaio foi a do papel filtro e as amostras ficaram em estabilidade por um período de 12 dias.

Os resultados estão dispostos nas Tabela 18 e Tabela 19. Diante destes valores foi possível construir a curva característica conforme ilustrada na Figura 59.

Tabela 18: Dados iniciais das amostras para determinação da curva característica (solo + 40% vermiculita).

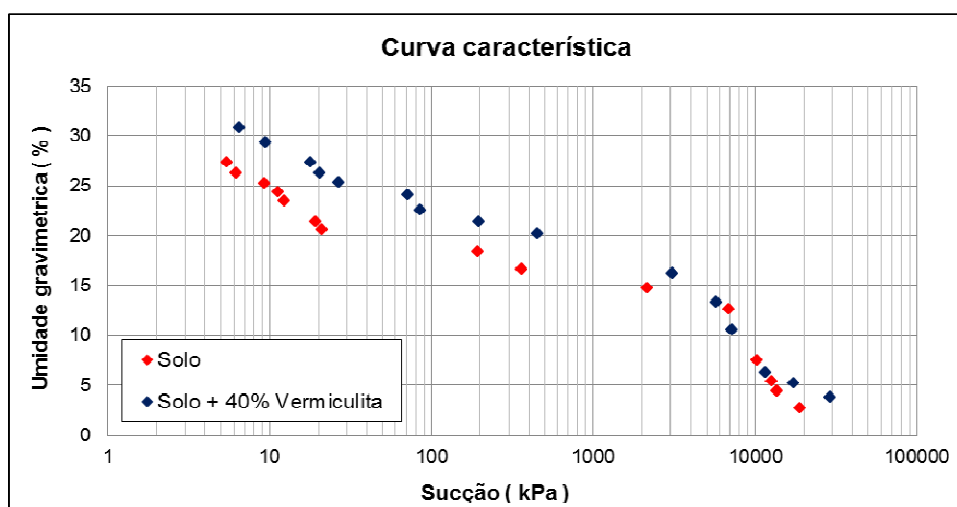
CP	ρ_n (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	θ (%)	w (%)	Ψ (kPa)
1	1,56	1,50	0,82	45,07	5,78	3,84	29253,51
2	1,59	1,51	0,82	44,64	7,86	5,19	17418,63
3	1,62	1,52	0,82	44,38	9,55	6,28	11580,95
4	1,71	1,55	0,82	43,50	15,88	10,56	7208,78
5	1,72	1,52	0,82	44,56	20,22	13,34	5740,69
6	1,76	1,52	0,82	44,54	24,57	16,2	3096,58
7	1,82	1,52	0,81	45,14	30,36	20,24	449,83
8	1,85	1,53	0,82	44,19	32,74	21,45	196,01
9	1,88	1,51	0,81	43,95	34,63	22,59	85,66
10	1,87	1,51	0,82	44,92	36,22	24,04	71,08
11	1,90	1,52	0,81	44,55	38,50	25,38	26,89
12	1,92	1,52	0,80	44,53	39,85	26,27	20,45
13	1,92	1,51	0,82	44,9	41,25	27,38	17,84
14	1,93	1,50	0,83	45,23	43,51	29,05	9,43
15	1,95	1,50	0,83	45,30	45,28	30,27	6,54

Legenda: CP = corpo de prova; ρ_n = massa específica total; γ_d = peso específico seco; e = índice de vazios; η = porosidade; θ = umidade volumétrica; w = umidade gravimétrica; Ψ = sucção.

Tabela 19: Dados iniciais das amostras para determinação da curva característica (solo puro).

CP	ρ_n (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	e	η (%)	θ (%)	w (%)	Ψ (kPa)
1	1,58	1,54	0,78	43,81	4,21	2,74	18803,05
2	1,61	1,54	0,77	43,51	6,81	4,41	13683,79
3	1,61	1,53	0,79	44,23	8,23	5,40	12621,04
4	1,65	1,53	0,78	43,95	11,45	7,47	10253,88
5	1,72	1,52	0,80	44,35	19,31	12,68	6882,68
6	1,77	1,54	0,77	43,63	22,77	14,77	2154,62
7	1,83	1,57	0,74	42,66	26,05	16,61	358,83
8	1,84	1,56	0,76	43,06	28,73	18,45	193,66
9	1,85	1,54	0,78	43,79	31,67	20,60	21,15
10	1,87	1,54	0,77	43,58	33,05	21,42	19,34
11	1,87	1,51	0,81	44,62	35,62	23,51	12,36
12	1,88	1,51	0,81	44,62	36,97	24,41	11,19
13	1,90	1,52	0,80	44,59	38,34	25,30	9,23
14	1,91	1,51	0,81	44,80	39,61	26,24	6,20
15	1,91	1,50	0,82	45,07	41,04	27,32	5,43

Legenda: CP = corpo de prova; ρ_n = massa específica total; γ_d = peso específico seco; e = índice de vazios; η = porosidade; θ = umidade volumétrica; w = umidade gravimétrica; Ψ = sucção;

**Figura 59:** Curva de retenção de umidade do solo.

A curva característica apresenta na figura acima foi ajustada utilizando a equação duplo de Van Genuchten conforme mencionado por Carducci *et al* 2011. A Figura 60 mostra este ajuste.

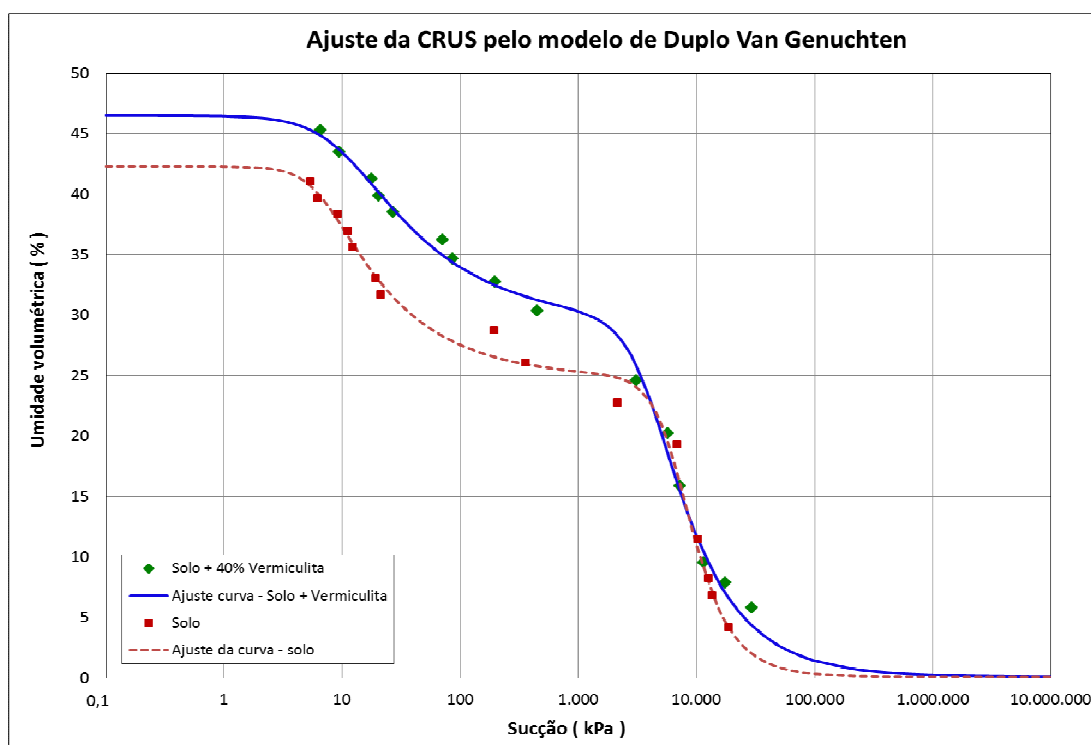


Figura 60: Ajuste da curva de retenção de umidade pela equação duplo Van Genuchten.

(Carducci *et al*, 2011).

Neste gráfico é possível verificar a maior capacidade de retenção de água na mistura de solo com vermiculita, menos no trecho de transição entre 5.000 e 10.000 kPa. É interessante observar que mesmo para amostras no ramo seco, sucção acima de 10000 kPa, a retenção é maior.

O comportamento bimodal das amostras, caracterizando uma distribuição de micro e macro poros também é perceptível.

Para melhor visualizar esta distribuição foi realizada a derivada da curva característica e o resultado está representado na Figura 61:

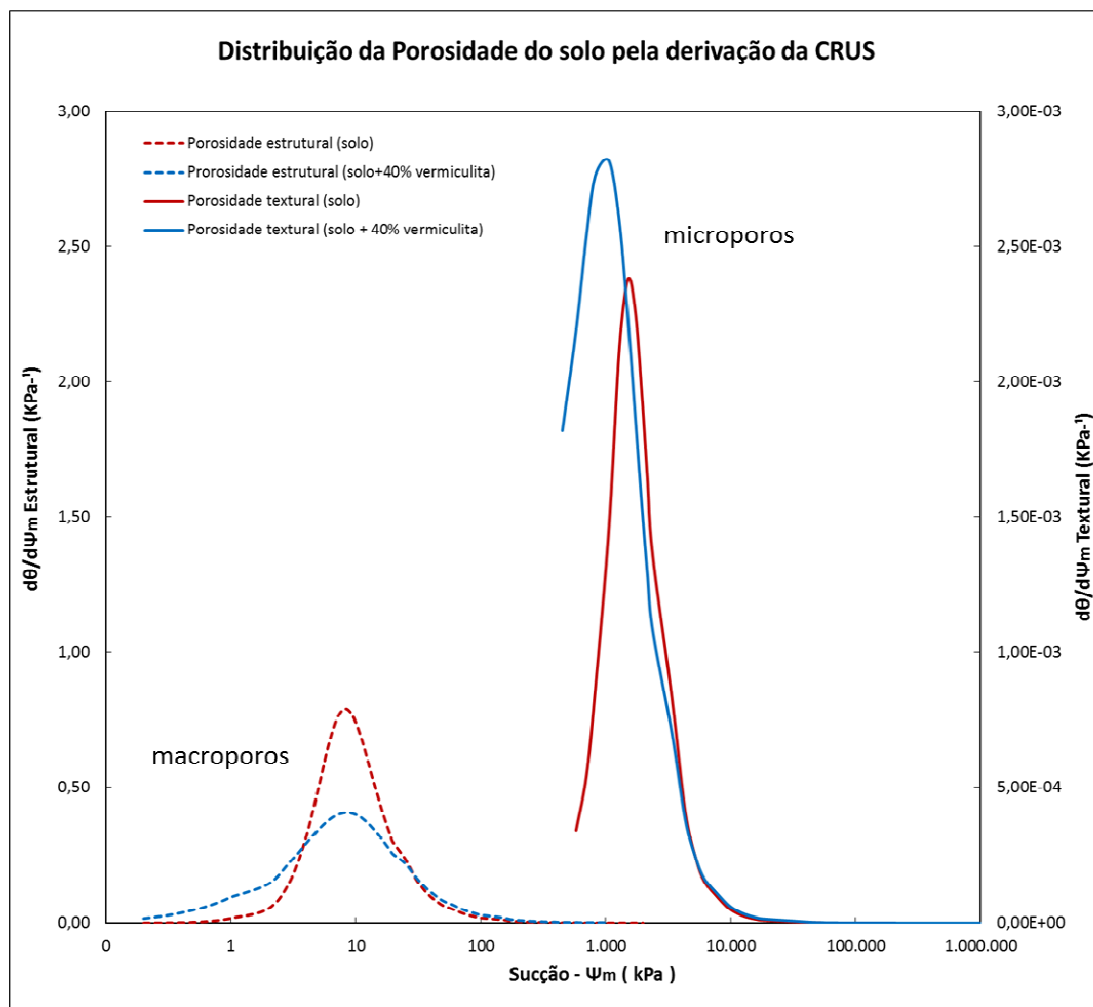


Figura 61: Curva de distribuição de poros

A porosidade do solo e a relação entre macro e microporos são fatores importantes para avaliação da estrutura do solo. A microporosidade está relacionada com o armazenamento de água no solo, com influencia no desenvolvimento das plantas especialmente nas épocas de estiagem e a macroporosidade está relacionada com a drenagem e areação do solo. De acordo com a figura 61, o solo com vermiculita mostrou-se superior nos valores de microporos quando comparado com o solo puro.

Por outro lado a quantidade de macroporos do solo misturado foi inferior ao solo puro. Uma explicação para isto pode ser devido à quantidade de vazios que a vermiculita promove ao solo e, segundo Klein e Libardi, 2002 a compactação do solo reduz a macroporosidade ou pode ocorrer uma transformação dos macroporos em microporos. Este resultado na macroporosidade da amostra contendo vermiculita nos dá um indício da sua permeabilidade final a qual tende a ser menor se comparada ao solo residual puro. Esta hipótese poderá ser confirmada mediante ensaio de permeabilidade.

4.2.4 Compressão diametral

À medida que se fazia as pesagens dos papéis filtro na obtenção dos valores para construção da curva característica, as amostras eram submetidas ao ensaio de compressão diametral (Lobo Carneiro, 1954) com o objetivo de determinar da resistência a tração do solo e da mistura com a vermiculita.

Os resultados deste ensaio estão dispostos na Tabela 20 e Tabela 21 e com os valores tabulados, foi construído o gráfico (Figura 62) de resistência à tração pela sucção.

De acordo com a literatura, a carga aplicada progressivamente irá provocar um estado de tensões até o momento que ocorre a ruptura na amostra segundo um plano diametral vertical, separando a amostra em duas metades iguais. Este processo pode ser visualizado na Figura 63.

Tabela 20: Resultados do ensaio de compressão diametral (solo + 40% vermiculita).

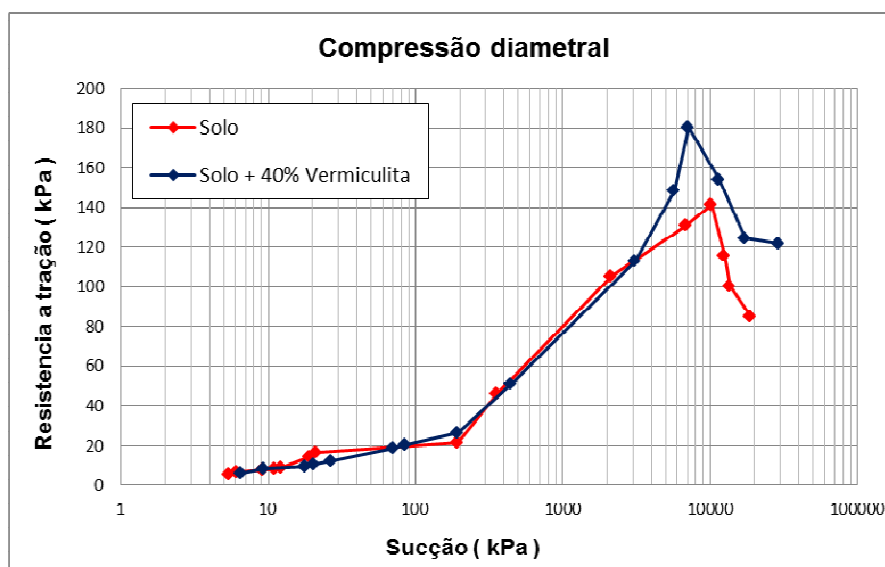
CP	w (%)	Ψ (kPa)	σ_t (kPa)
1	3,84	29253,51	121,57
2	5,19	17418,63	124,27
3	6,28	11580,95	153,99
4	10,56	7208,78	180,47
5	13,34	5740,69	148,59
6	16,2	3096,58	112,93
7	20,24	449,83	51,33
8	21,45	196,01	26,48
9	22,59	85,66	20,53
10	24,04	71,08	18,91
11	25,38	26,89	12,43
12	26,27	20,44	10,81
13	27,38	17,84	9,73
14	29,05	9,42	8,65
15	30,27	6,54	6,48

Legenda: CP = corpo de prova; w = umidade gravimétrica; Ψ = sucção; σ_t = resistência à tração.

Tabela 21: Resultados do ensaio de compressão diametral (solo).

CP	w (%)	Ψ (kPa)	σ_t (kPa)
1	2,74	18803,05	84,98
2	4,41	13683,79	100,43
3	5,40	12621,04	115,88
4	7,47	10253,88	141,63
5	12,68	6882,68	131,33
6	14,77	2154,62	105,58
7	16,61	358,83	46,35
8	18,45	193,66	21,63
9	20,60	21,15	16,48
10	21,42	19,34	14,42
11	23,51	12,36	9,27
12	24,41	11,19	8,24
13	25,30	9,23	7,73
14	26,24	6,20	6,70
15	27,32	5,43	5,67

Legenda: CP = corpo de prova; w = umidade gravimétrica; Ψ = sucção; σ_t = resistência à tração.

**Figura 62:** Resistência à tração *versus* sucção

A resistência à tração do solo comparado com sua respectiva sucção é mostrada na Figura 62. As curvas de resistência à tração são semelhantes até a sucção no entorno de 5.000 kPa. Quando a sucção entra na faixa referente aos microporos, a resistência à tração do solo com vermiculita aumenta e chega a cerca de 180 kPa contra 140 kPa para o solo puro. O ganho na resistência à tração do solo contendo vermiculita expandida foi também

uma das características observadas por Ugarte *et al* (2005) e segundo este autor uma das aplicações da vermiculita consiste na sua mistura com cimento *Portland* para obtenção de um concreto leve cuja a resistência à compressão pode chegar a 0,7 Mpa.

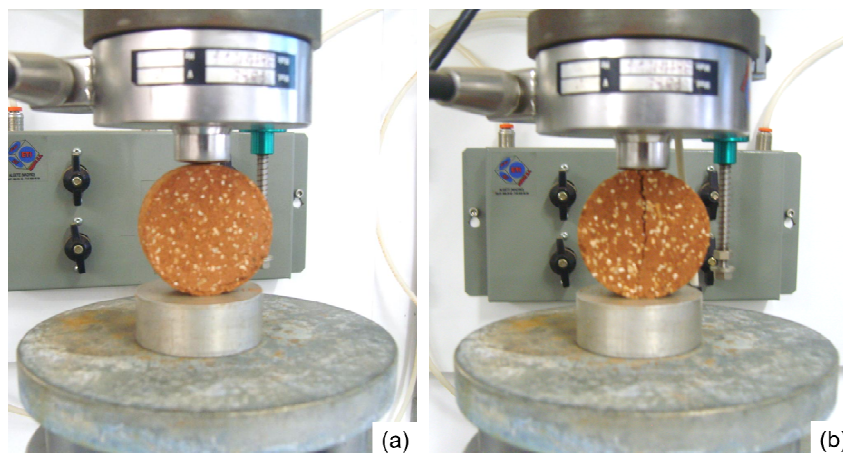


Figura 63: Ensaio de compressão diametral: (a) antes da ruptura; (b) após ruptura da amostra.

4.2.5 Compressão simples

O ensaio de compressão simples possibilitou determinar estes parâmetros, ou seja, à máxima tensão que o solo pôde suportar até o momento de ruptura deste solo e os resultados para os dois grupos de amostras ensaiadas (solo e solo + 40% de vermiculita) são apresentados a seguir, nas Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 22: Resultado do ensaio de compressão simples para amostra contendo 40% de Vermiculita.

CP	w (%)	τ (kPa)	σ (kPa)
1	9,15	194,19	70,69
2	13,70	226,04	82,29
3	15,77	198,17	72,14
4	17,49	178,78	65,08
5	19,50	147,14	53,56
6	20,69	131,78	47,97
7	21,90	87,10	31,71
8	22,71	65,85	23,97
9	23,46	39,43	14,36
10	24,73	36,77	13,39
11	25,78	29,23	10,64
12	26,37	24,06	8,76

Legenda: CP = corpo de prova; w = umidade gravimétrica; τ = tensão cisalhante no plano de ruptura;

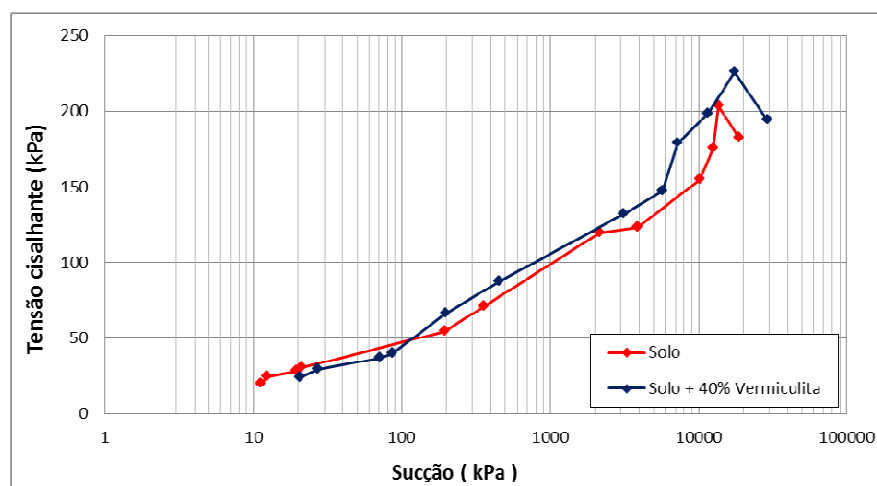
σ = tensão normal no plano de ruptura; ϕ = ângulo de atrito interno; c = coesão.

Tabela 23: Resultado do ensaio de compressão simples para amostra de solo puro.

CP	w (%)	τ (kPa)	σ (kPa)
1	9,22	182,59	66,47
2	13,25	203,53	74,09
3	15,13	175,18	63,77
4	17,16	154,96	56,41
5	19,18	123,42	44,93
6	20,08	119,62	43,55
7	21,14	70,56	25,69
8	22,14	54,21	19,73
9	23,07	30,50	11,10
10	24,17	28,16	10,25
11	25,10	24,20	8,81
12	26,03	19,68	7,16

Legenda: CP = corpo de prova; w = umidade gravimétrica; τ = tensão cisalhante no plano de ruptura;
 σ = tensão normal no plano de ruptura; ϕ = ângulo de atrito interno; c = coesão.

A representação gráfica dos valores obtidos para a tensão cisalhante do solo em função da sucção pode ser visualizada na Figura 64.

**Figura 64:** Tensão cisalhante no plano de ruptura do solo.

Os valores plotados na figura 64 mostra novamente a característica da vermiculita em resistir esforços, cujo comportamento já havia sido presenciado no gráfico de compressão diametral. Para uma melhor compreensão deste parâmetro, foi elaborado um gráfico relacionando o teor de umidade de cada corpo de prova pelos seus respectivos valores de tensão cisalhante e esta representação pode ser visualizada na Figura 65.

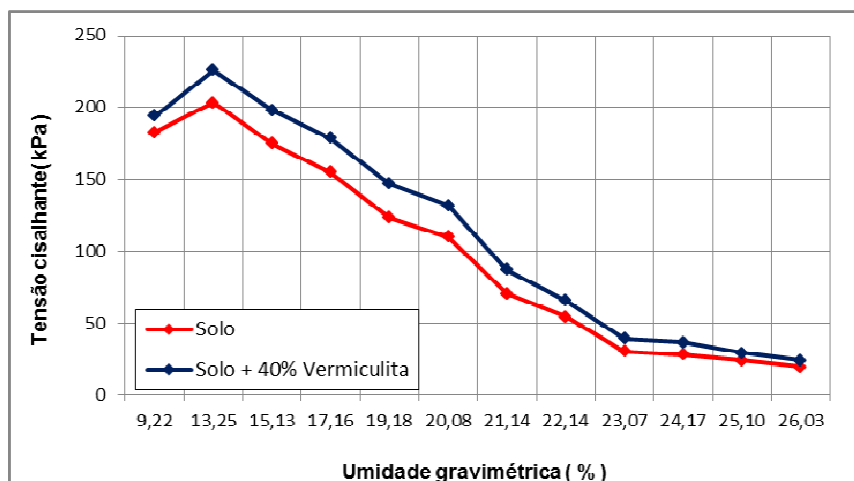


Figura 65: Gráfico teor de umidade *versus* resistência ao cisalhamento dos corpos de prova.

Neste gráfico é possível visualizar que o solo contendo vermiculita apresentou um ganho entre 6 a 30% no valor final de resistência à compressão simples. Ainda através do ensaio de compressão simples foram plotados os gráficos com os valores de tensão vertical *versus* sucção e tensão vertical *versus* umidade gravimétrica, e o resultado pode ser visualizado na Figura 66 e Figura 67, abaixo:

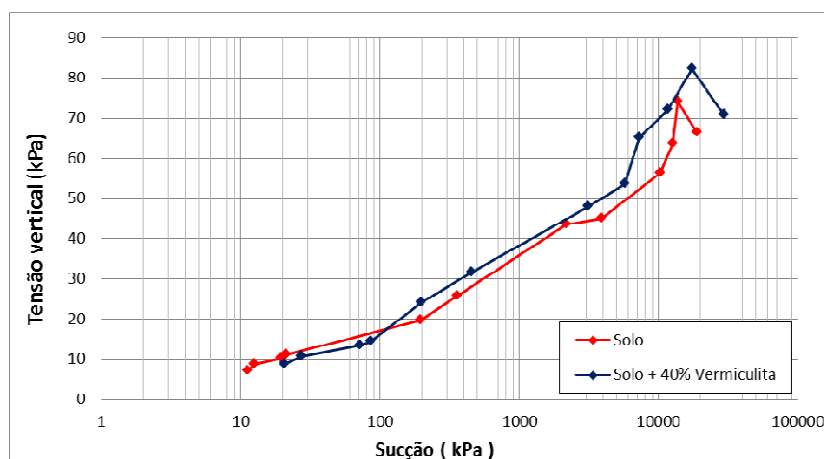


Figura 66: Tensão vertical *versus* sucção.

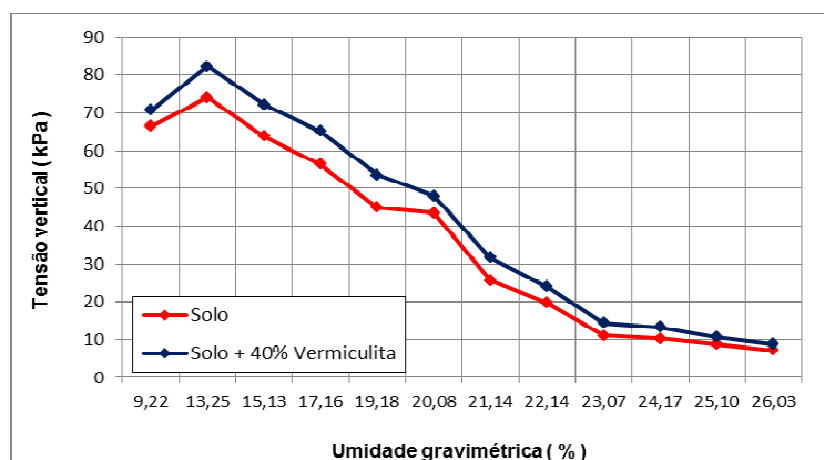


Figura 67: Tensão vertical *versus* sucção.

Novamente fica comprovado através destes dois gráficos o ganho na resistência do solo misturado com vermiculita.

4.2.6 Resistência ao Cisalhamento Direto

Como descrito na literatura, este ensaio consiste em submeter o corpo de prova a uma compressão (força normal) seguido da aplicação de uma força cisalhante, promovendo um deslocamento horizontal até a ruptura da amostra. A cada tensão normal aplicada obtém-se um valor correspondente de tensão cisalhante, permitindo desta forma, traçar a envoltória de resistência do solo. Na Figura 68 está representada o resultado obtido durante este ensaio.

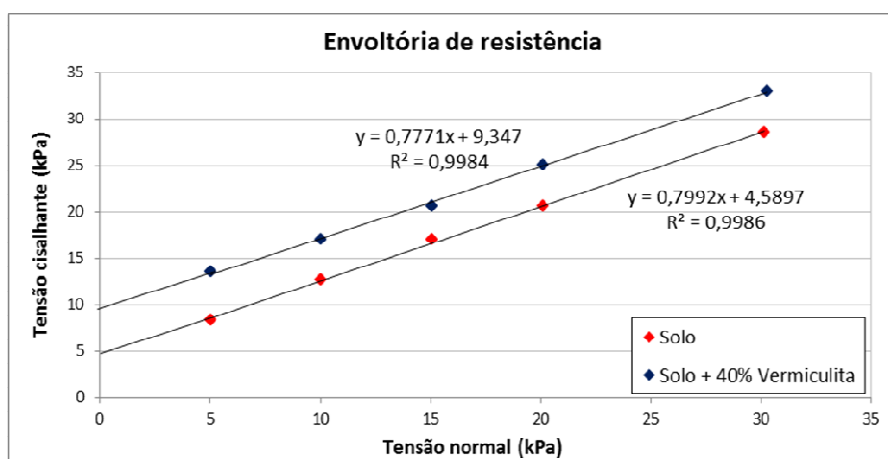


Figura 68: Gráfico da envoltória de resistência ao cisalhamento direto.

O gráfico apresentado na figura 68 permitiu determinar os valores de coesão e ângulo de atrito para as amostra ensaiadas. A mistura contendo vermiculita apresentou um valor de $c' = 9,35$ e $\phi' = 38,4^\circ$. Para o solo puro o valor de $c' = 4,59$ e $\phi' = 38,2^\circ$. O resultado indica que a vermiculita trabalha como um reforço no solo com influência apenas na coesão. Cabe salientar que este ensaio foi realizado a baixos valores de tensão (5 a 30 kPa).

4.2.7 Compressão Edométrica

Como visto na literatura, o adensamento do solo ocorre ao longo do tempo quando um solo é submetido a um carregamento externo, ou seja, é o decréscimo do volume do solo pela redução de seu índice de vazios e num solo saturado esta redução dos vazios se dá pela expulsão da água.

O resultado deste ensaio pode ser visualizado através das Figura 69 e Figura 70.

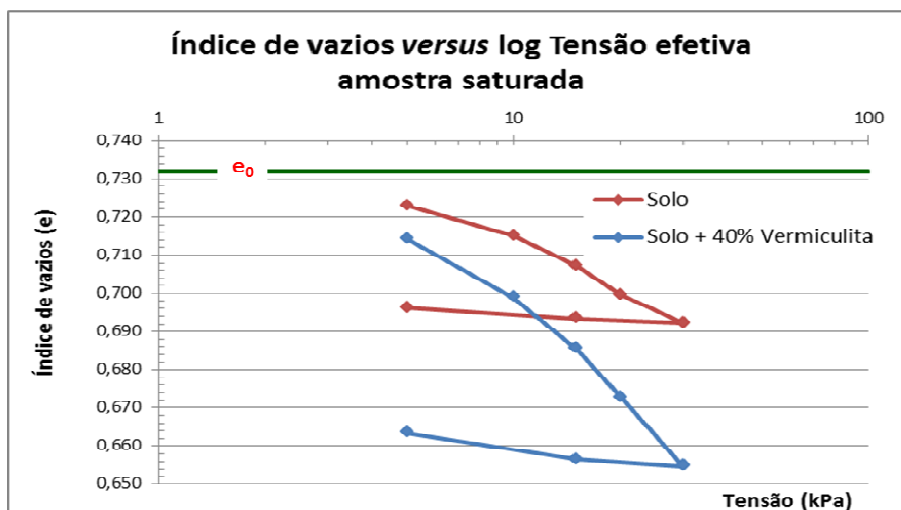


Figura 69: Índice de vazios *versus* tensão efetiva. (amostra saturada)

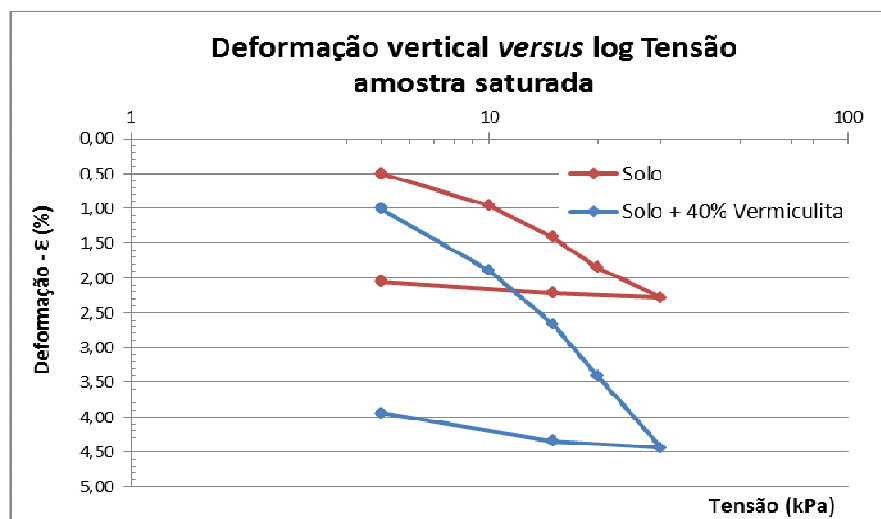


Figura 70: Deformação vertical do solo. (amostra saturada)

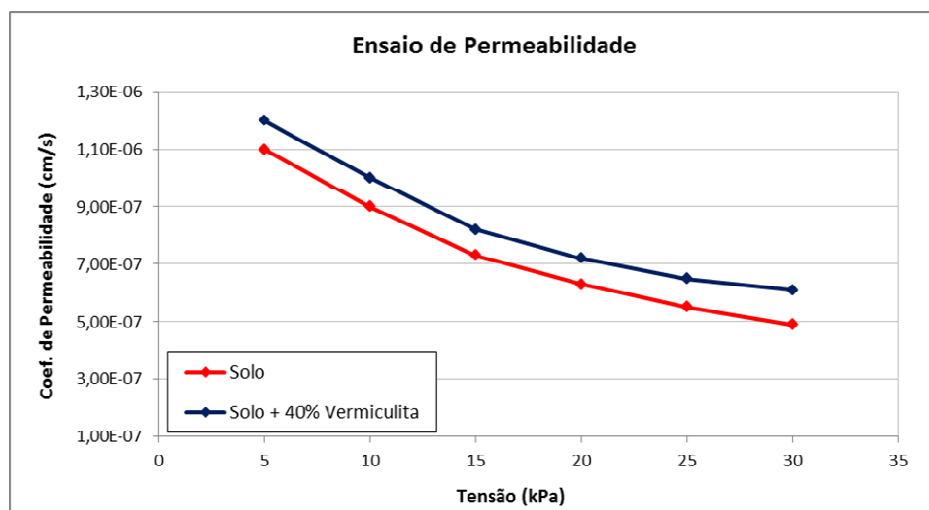
Como esperado e de acordo com os resultados apresentados neste ensaio, o solo quando misturado com vermiculita apresenta uma maior compressibilidade. Isto se deve ao fato de haver maiores espaços vazios entre as partículas decorrentes da expansão da vermiculita e conseqüentemente estar relacionada com a permeabilidade a qual a mistura do solo com vermiculita tende ser maior ou ainda ter uma maior propensão à drenagem que o solo puro.

Através destes gráficos, foi possível determinar o índice de compressão (C_c) para o cálculo futuro de recalque, em cada amostra. O solo puro apresentou um $C_c = 0,06$ e a mistura com vermiculita apresentou um resultado de $C_c = 0,10$.

4.2.8 Permeabilidade

A permeabilidade de um solo é a propriedade que permite o escoamento da água e todos os solos são mais ou menos permeáveis. O método de ensaio utilizado foi à determinação da permeabilidade por carga variável conectada à célula de adensamento.

Na Figura 71 é apresentado o resultado obtido para o ensaio de permeabilidade.



Tensão (kPa)	5	10	15	20	25	30
k solo (cm/s)	1,10E-06	9,00E-07	7,30E-07	6,30E-07	5,50E-07	4,90E-07
k solo+vermic. (cm/s)	1,20E-06	1,00E-06	8,20E-07	7,20E-07	6,50E-07	6,10E-07

Figura 71: Ensaio de Permeabilidade.

Através de ensaio foi possível verificar que a mistura contendo vermiculita expandida apresentou uma permeabilidade superior ao solo puro, porém dentro de um valor aceitável, pois, de acordo com o manual de Resíduos Sólidos publicado pela ReCESA (2008) a camada de cobertura deverá ter uma permeabilidade inferior a 10^{-5} cm/s.

4.2.9 Formação de trinca

Quando um solo puro compactado é exposto às condições naturais, este por sua vez pode sofrer fissuras devido ao ressecamento. Pensando nisto, este teste teve como principal objetivo verificar o comportamento do solo misturado com vermiculita expandida. Para isto foi preparadas duas amostra, uma contendo a mistura do solo com vermiculita e outra somente solo puro. O volume de solo compactado foi de $5826,1 \text{ cm}^3$ o que corresponde a uma massa de $11184,36\text{g}$ de solo compactada ocupando uma área de 1189 cm^2 (Figura 72 e Figura 73). Estas amostras foram deixadas no laboratório secando ao ar à temperatura

ambiente (média de 26°C). As amostras permaneceram por um período de 16 dias e o resultado está disposto na Figura 74.



Figura 72: Etapas de preparo das amostras para ensaio de trinca.



Figura 73: Amostras compactadas: (a) Mistura de solo e vermiculita; (b) Solo puro.

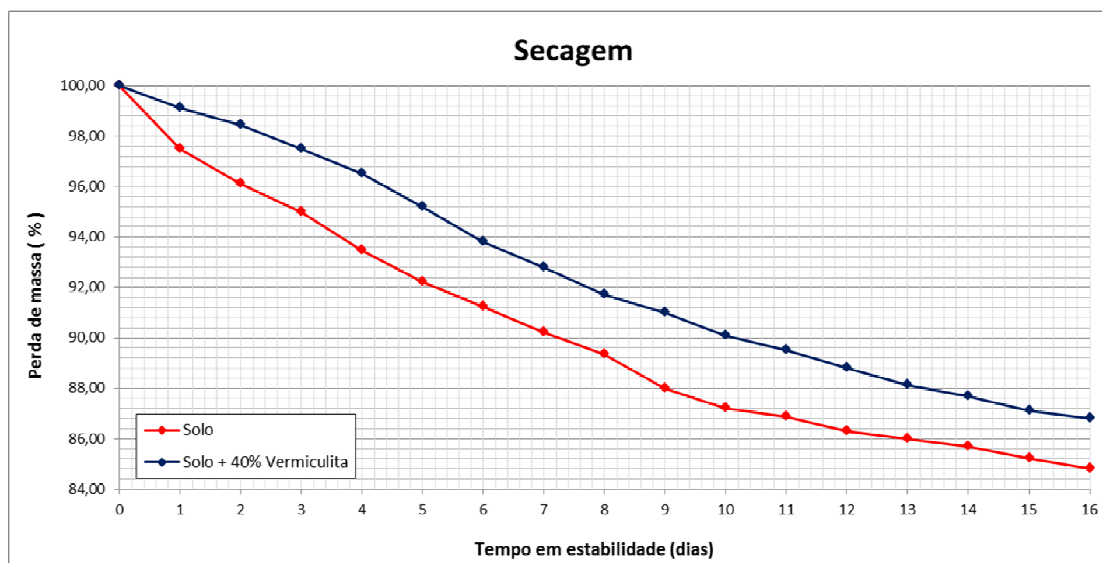


Figura 74: Gráfico de Secagem das amostras do teste de formação de trinca.

Com reação a perda de umidade, através deste gráfico foi possível verificar que a amostra contendo vermiculita expandida apresentou um poder de retenção de umidade entre 5% a 7% superior ao solo puro. No que diz respeito à formação de trinca, não foi verificado o surgimento destas trincas em nenhuma das amostras, entretanto, ao final dos 16 dias a amostra com solo puro apresentou uma contração em torno de 1 cm em toda sua

extensão enquanto a amostra com vermiculita esta contração chegou a cerca de 0,3 cm (Figura 75).

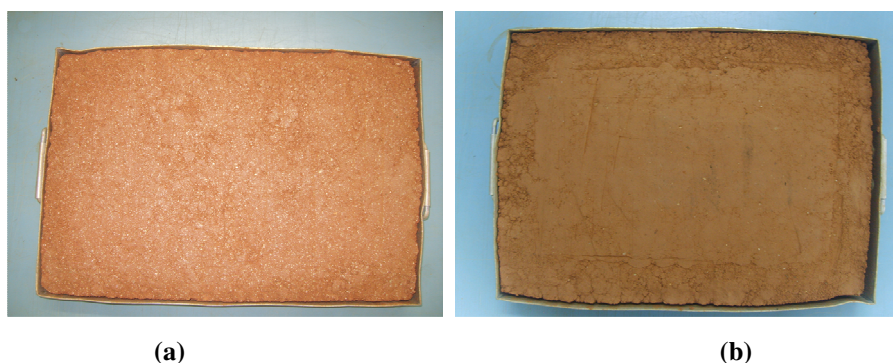


Figura 75: Contração da amostra no teste de formação de trinca:
(a) Mistura de solo e vermiculita; (b) Solo puro.

4.2.1 *Trabalhabilidade e custos*

O poder de retenção de umidade é uma característica da vermiculita expandida quando submetida a processos de umedecimento e secagem. Em condições normais este material não sofre decomposição permitindo que sua mistura ao solo puro ocorra de forma natural e a baixa densidade da vermiculita expandida facilita seu manuseio. Com relação a custos, foi realizada uma busca na internet de fornecedores de materiais alternativos como Bentonita, Manta de PVC, Manta de PEAD para comparar ao valor apresentado pelo fornecedor da vermiculita expandida. A Tabela 24 apresenta este resumo.

Tabela 24: Custo Vermiculita Expandida.

Material	Custo	Rendimento
Vermiculita Expandida	R\$ 166,00 / m ³ (± 100 kg)	5 m ² de cobertura
Bentonita	R\$ 13,50 / kg	
Manta de PVC	R\$ 30,5 – R\$ 45,00 / m ²	
Manta PEAD 2 mm	R\$ 26,00 / m ²	

De acordo com a tabela 24, o fator custo se torna um item atrativo para o uso e aplicação deste material em sistemas de cobertura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nesta dissertação permitiram estabelecer as seguintes conclusões:

Nos ensaios de secagem e umedecimento observou-se o desempenho favorável no uso da vermiculita expandida misturada ao solo residual a qual apresentou maior capacidade de retenção de água. Este comportamento pode reduzir o risco de abertura de trincas de contração do solo nos períodos de estiagem.

O caráter expansivo da vermiculita expandida permite um fechamento mais rápido das prováveis trincas que possam surgir durante o ressecamento do solo, eliminando ou reduzindo desta forma caminhos preferenciais da água no solo.

A curva de retenção de água apresentou um comportamento bimodal para as duas amostras ensaiadas, caracterizando uma distribuição de micro e macro poros. Este comportamento pode ser melhor interpretado após ajuste da curva característica pela equação dupla de Van Genuchten. A microporosidade permite avaliar o armazenamento de água no solo especialmente nas épocas de estiagem. A macroporosidade, por sua vez, diz respeito à drenagem e areação do solo. Estas características vão de encontro com as propriedades específicas da vermiculita expandida e diante dos resultados apresentados evidencia sua capacidade de reter e armazenar umidade.

Os ensaios de compressão diametral do solo compactado com vermiculita apresentaram uma maior resistência à tração para baixas umidades do que para o solo puro. O ganho na resistência à tração do solo contendo vermiculita expandida foi também uma das características observadas por Ugarte et al (2005). Comportamento semelhante foi observado também nos ensaios de compressão simples. Os ensaios de cisalhamento direto em amostras inundadas indicaram que a vermiculita teve influência no valor da coesão, e não afetou o ângulo de atrito interno. Esse comportamento provocou um deslocando da envoltória de resistência para cima melhorando a resistência da mistura.

A característica de expansão e contração da vermiculita fica evidenciada nos ensaios de compressão edométrica onde a mistura apresentou maior compressibilidade do que o solo puro.

Com relação às propriedades hidráulicas, a mistura com vermiculita apresentou uma permeabilidade um pouco superior ao solo puro, entretanto, os valores encontrados

estão dentro do valor sugerido na literatura permitindo desta forma sua utilização em sistemas de cobertura de aterro.

No ensaio de formação de trincas não foi observado fissuras em nenhuma das amostras (com e sem vermiculita). A retenção de umidade da amostra contendo vermiculita novamente pôde ser confirmada.

A vermiculita é um argilomineral pertencente à família das micáceas, a qual é constituída principalmente por silicatos hidratado de magnésio, ferro e alumínio. A vermiculita expandida é um material industrializado, pronto para uso e extremamente fácil de ser trabalhado. Sua característica de retenção de umidade está relacionada com o processo de fabricação por aquecimento, transformando a estrutura laminar em uma estrutura em flocos. Sendo assim, estas características permitem que este produto seja manuseado de forma natural em condições normais.

Com base nos resultados aqui apresentados, a inserção da vermiculita expandida no solo compactado, se mostra uma alternativa interessante e inovadora para coberturas de resíduos. Sua capacidade de retenção de água minimizaria o efeito de ressecamento devido às condições climáticas locais e consequentemente o surgimento de fissuras que poderiam provocar um aumento significativo na infiltração de água para camada de resíduos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADBOLAHZADEH, A.M; VACHON, B. L.; CABARAL, A.R. (2011). *Assessment of design of an experimental cover with capillary barrier effect using 4 years of fiel data.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Enginneering. Vol.29:783-802. NRC Research Press. 6Canadá.

ADBOLAHZADEH, A.M; VACHON, B. L.; CABARAL, A.R. (2011). *Evaluation of the effectiveness of a cover with capillary barrier effect to control percolation into a waste disposal facility.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Enginneering. Vol.48: 996-1009. NRC Research Press. Canadá.

ALBRIGHT, W.H.; BENSON, C.H.; GEE, G.W.; ROESLER, A.C.; ABICHO, T.; APIWANTRAGOON, P.; LYLES, B.F.; ROCK, S.A. (2004). *Field water balance of landfill final covers.* J. Environ. Qual. 33:2317-2332. ASA, CSSA, SSSA. USA.

AMORIM, N.R. ; AZEVEDO, R.F. ; FERREIRA, O. ; RIBEIRO, A.G.C. (2008). *Experimento para a determinação do desempenho de sistemas de cobertura no campo.* Geoestrutural Consultoria e Projetos Ltda. Belo Horizonte. MG. Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR13896. (1997). *Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.* Rio de Janeiro. Brasil.

AUBERTIN, M.; CIFUENTES, E.; APITHY, S.; BUSSIÈRE, B.; MOLSON, J.; CAHPUIS, R.P. (2008). *Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barriers effects.* Canadian Geotechnical Journal. Canadá.

AUGUST, H.; HOLZLÖHNER, U.; MEGGYES, T. (1997). *Advanced landfill liner systems.* Thomas Telford Publishing. 1ed. London. UK.

AVELINO, M. C. (2009). *Vermiculita organofuncionalizada com moléculas surfactantes como adsorventes para herbicidas em solução aquosa.* Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba.

BARROS, M.C. (2005). *Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura.* Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE /UFRJ.

BARTH, C. (2001). *Reduction of seepage water in landfills using capillary barriers – results of large scale lysimeters at a sanitary landfill.* New Approaches Characterizing Groundwater Flow, Seiler & Wohnlich (eds). Alemanha.

BENSON, C.H.; ALBRIGHT, W.H.; ROESLER, A.C.; ABICHOU, T. (2002). *Evaluation of final cover performance: field data from the Alternative cover assesment program (acap).* WM '02 Conference, February 24-28. Tucson. AZ.

BERGER, J.; FORNÉS, L.V.; OTT, C.; JAGER, J.; WAWRA, B.; ZANKE, U. (2005). *Methane oxidation in a landfill cover with capillary barrier.* Waste Management 25:269-373. ELSERVIER. Alemanha.

BENVENUTO, C. (2011). *Monitoramento geotécnico e a estabilidade dos aterros sanitário.* Artigo Técnico. Revista Limpeza Pública nº 77. ABLP – Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. São Paulo – SP.

BORMA, L. S.; MENDONCA, R. M. G.; SOUZA, V. P. (2002). *Processo de mitigação a formação de drenagens acidas utilizando coberturas secas.* CT -2003-025-00. Contribuição Técnica elaborada para o V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre. RS. Brasil.

BOSCOV, M.E.G. (2008). *Geotecnia Ambiental.* Oficina de Textos. São Paulo. Brasil.

BOSZCZOWSKI, R. B. (2008). *Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR.* Tese de Doutorado, PUC, Rio de Janeiro.

BUSSIÈRE, B.; AUBERTIN, M.; CHAPUIS, R.P. (2002). *A laboratory set up to evaluate the hydraulic behavior of inclined capillary barriers.* PaperID-No61. Canadá.

BRAJA, M. DAS (2006). *Principles of Geotechnical Engineering*. Fifth Edition. Thomson Canada Limited. Canada.

BRAJA, M. DAS (2007). *Fundamentos da Engenharia Geotécnica*. Tradução da 6ª edição norte-americana. Tradução All Tasks. Revisão técnica: Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo. Thomson Learning.

BRAJA, M. DAS (2008). *Advanced Soil Mechanics*. Third Edition. Taylor & Francis Group. London and New York.

BRAJA, M. DAS (2008). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*. Third Edition. Courtesy of Geopier Foundation Company, Inc. printed in USA.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. (1966). *Properties of porous media affecting fluid flow*. Journal of Irrigation and Drainage Division, v.92, p.61-88.

CALLE, J. A. C. (2000). *Análise de Ruptura de Talude em Solo Não Saturado*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Paulo, Brasil.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. (2011). *Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação duplo Van Genuchten*. Revista Brasileira em Ciência do Solo n° 35:77-86.

CHRISTENSEN, T.H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. (1992). *Lanfilling os Waste: Leachate*. Elsevier Science Published LTD. London. UK.

CHRISTENSEN, T.H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. (1997). *Lanfilling os Waste: Barriers*. E & FN Spon. 1ed. London, UK.

CURBELO, F. D. S. (2002). *Estudo da remoção de óleo em águas produzidas na indústria de petróleo, por adsorção em coluna utilizando a vermiculita expandida e hidrofobizada*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

CUI, Y-L; ZORNBERG, J.G. (2008). *Water Balance and Evapotranspiration Monitoring in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Geotech Geol Eng
DOI 10.1007/s10706-008-9198-z

DANIEL, D.E.; KOERNER, R.M. (2007). *Waste containment facilities: guidance for construction, quality assurance and construction quality control of liner and cover system*. 2nd ed. ASCE.

DELL AVANZI (2008) em Basta Clicar Notícias. *AREIA IMPERMEÁVEL - Pesquisa da UFPR desenvolve técnica para induzir a repelência à água em solos de aterros sanitários*. Brasil.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Sumário mineral 2011*. Brasília: DNPM/DIPLAM

DOURADO, K. A. (2003). *Condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade: Desenvolvimento, construção e teste de um sistema de medida*. Dissertação de mestrado em Geotecnia. USP - São Carlos.

DWYER, S.F.; REAVIS, B.; NEWMAN, G. (2000). *Alternative landfill cover demonstration*. FY2000 Annual Data Report. Sandia Report. Novo México, EUA.

DWYER, S.F. (2003). *Water Balance Measurements and Computer Simulations of Landfill Covers*. Dissertação Universidade do México.

EPA2006-0667 (2007). *Cappillary Barrier. Cover System Design Guidance and Requirements Document*.

EPA530-R-93-017 (1993). *Solid Waste Disposal Facility Criteria – Technical Manual*. United States Environmental Protection Agency. USA

EPA542-F-03-015 (2003). *Evapotranspiration landfill cover systems fact sheet*. United States Environmental Protection Agency. USA.

EPA542-F-11-001 (2011). *Fact Sheet on Evapotranspiration Cover Systems for Waste Containment.* United States Environmental Protection Agency. USA.

EPN625/R-94/008 (1994). *Design, Operation, and Closure of Municipal Solid Waste Landfills.* United States Environmental Protection Agency. USA

FERREIRA, M.A.S.; MAHLER, C.F. (2006). *Avaliação do Solo das Camadas de Cobertura Intermediárias e Finais – Estudo de Caso.*

FIORIN, T. T. (2008). *Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções.* Tese de Doutorado. Santa Maria, RS, Brasil.

FREDLUND, D. G. (1979). *Appropriate concepts and technology for unsaturated soils.* Second Geotechnical Colloquium, 31st Canadian Geotechnical Conference, Winnipeg, Manitoba, Canada, October, 1978, 16(1): 121–139.

FREDLUND, D. G.; FREDLUND, M. D.; ZAKERZADEH, N. (2001). *Predicting the permeability function for unsaturated soils.* Proceedings of the International Symposium on Suction, Swelling, permeability and Structured Clays. IS-Shizuoka. Japan. 215-222p.

FREDLUND, D. G., MORGENSTERN, N. R. (1977). *Stress state variables for unsaturated soils.* Journal Geotechnical. Enginnering. Div., ASCE, 5(103), 447-466.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils.* John Wiley and Sons, Inc. Canada. 510p.

FREDLUND, D. G.; SHENG, D.; ZHAO, J. (2010). *Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve.* Canadian Geotechnical Journal. 48:186-198, 10.1139/T10-060.

FREDLUND, D. G.; XING, A. (1994). *Equation for the soil-water characteristic curve.* Canadian Geotechnical Journal. 31:521-532, 10.1139/t94-061.

GATURNG, E.; HENKEN-MELLIES, W-U.; KANITZ, J.; RAMKE, H-G. (2009). *Geotechnical aspects of landfill closure and aftercare*. Proc. of Int. Symp. on Geoenvironmental Eng. ISGE. Hangzhou. China.

GENUCHTEN, V. M. Th. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal. 44(5):892-898.

GENUCHTEN, V. M. Th.; NIELSEN, D. R. (1985). *On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils*. Annales Geophysicae. 3, 5, 615-628.

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

GERSCOVICH, D.M.S.(2011). *Fluxos em solos saturados*. Apostila-UERJ.

GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J. (2002). *Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil*. Third International Conference on Unsaturated Soils - UNSAT2002, março, Recife, ISBN 90 58093727 v.1, p295-300.

GILL, M.D.; HAUSER, V.L.; HORIN, J.D.; WEAND, B.L.; CASAGRANDE, D.J. (1999). *Landfill Remediation Project Manager's Handbook*. Mitretek Technical Report. Virginia. EUA.

GOMES, L.P.; MORAES, C.A.M.; BOFF, R.D. (2007). *Emprego de areia usada de fundição em coberturas Intermediária e final de aterros sanitários de RSU*. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.3, n.4, p. 71-76, abr.-jun.

HAUSER, V.L. (2009). *Evapotranspiration Covers for Landfills and Waste Sites*. Taylor & Francis Group. Flórida. EUA.

HOEKS, J., RYHINER, A.H. (1989). *Surface Capping with Natural Liner Materials. Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*. Academic Press. New York. EUA.

IBAM (2001). *GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS*
Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro . RJ. Brasil.

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

ITYEL, E.; LAZAROVITCH, N.; SILBERBUSH, M. BEN-GAL, A. (2010). *An artificial capillary barrier to improve root zone conditions for horticultural crops: physical effects on water content.* Irrig SCI. vol. 29:171-180.

IZZO, R.L.S. (2008). *Comportamento de Resíduos Sólidos Inertizados em Barreira Capilar.* Teste Doutorado Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ. Brasil.

Kämpf, M.; MONTENEGRO, H. (1997). *On the performance of capillary barriers as landfill cover.* Hydrology & Earth System Sciences. Vol 4. EGS. Alemanha.

KHIRE, M.V.; BENSON, C.H.; BOSSCHER, P.J. (2000). *Capillary barriers: Design variables and water balance.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 126. nº8. Canadá.

KLEIN, V. A. ; LIBARDI, P. L. (2002). *Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo.* R. Bras. Ci. Solo, 26:857-867.

KOCAČIĆ, D. (1994). *Materials for the final cover of sanitary landfills.* Mining, Geology and Petroleum-Proceedings. Vol.6. Croácia.

KORNER, R.M.; DANIEL, D.E. (1992). *Better covers-ups.* Civil Engineering. GRI-127. volume 62. nº5.

KORNER, R.M.; DANIEL, D.E. (1997). *Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps.* American Society of Civil Engineers. 1 ed. New York, ASCE PRESS.

KREITH, F.; TCHOBANOGLIOUS, G. (1994). *Handbook of Solid Waste Management*. 2nd ed. McGRAW-HILL.

LAMBE, J.W.; WHITMAN, R.V. (1969). *Soil Mechanics*. Massachusetts Institute of Technology. John Wiley & Sons. New York. EUA.

LANGE, L.C.; CANTANHADE, A.L.G.; TEIXEIRA, E.N. (2008). *Resíduos Sólidos – Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários*. Guia do Profissional em Treinamento - Nível 2. Editora Sigma. Apresentação da ReCESA. Brasil.

LEE, G.F.; JONES-LEE, A. (2004). *Overview of Subtitle D Landfill Design, Operation, Closure and Postclosure Care Relative to Providing Public Health and Environmental Protection for as Long as the Wastes in the Landfill will be a Threat*. G. Fred Lee & Associates 27298 E. El Macero Drive, El Macero, CA 95618

LEE, H.C.; WRAY, W.K. (1995). *Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil water variable*. *Unsaturated Soils*, Vol. 2, 615 - 622.

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. (1997). *Review of soil-water characteristic curve equations*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 123(2):1106-1117.

LIBARDI, P. L. (2005). *Dinâmica da água no solo*. Edusp. São Paulo. Brasil.

LODI, P.C. ; BUENO, B.S. ; ZORNBERG, J.G. (2007). *Degradação de Geomembranas Poliméricas após Exposição à Intempéri*. REGEO-2007.

LU, N.; LIKOS, W. (2004). *Unsaturated soil mechanics*. John Wiley & Sons Inc. Hoboken. New Jersey.

MARINHO, F. A. (2006). *Cobertura de Aterro - Requerimentos, Definições e Visão geral dos sistemas*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MANASSERO, M.; BENSON, C.H.; BOUAZZA, A. (2000). *Solid Waste Containment Systems*. Torino. Italy.

MELCHIOR, S. (1997). *In situ studies of performance of landfill caps (compacted soil liners, geomembranas, Geosynthetic clay liners, capillary barriers)*. Land Contamination & Reclamation, 5 (3). EPP Publications Ltd. Alemanha.

MENEZES, M. B. M.; PEJON, O. J. (2010). *Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de estabilidade*. UNESP-Geociências, vol. 29, n.2, p.211-228. São Paulo.

McBEAN, E.A.; ROVERS, F.A.; FARQUHAR, G.J. (1995). *Solid Waste Landfill Engineering and Design*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River. NJ. EUA.

MITCHELL, J.K. et al. (2007). *Assessment of the Performance of Engineered Waste Containment Barriers*. Committee to Assess the Performance of Engineered Barriers. The National Academies Press. Washington. EUA.

MONTEIRO, V.E.D.; MELO, M.C.; ALCÂNTARA, P.B.; ARAÚJO, J.M.; ALVES, I.R.F.S.; JUCÁ, J.F.T. (2006). *Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos*. Artigo Técnico. Eng. Sanit. Ambiental. Vol.11 – nº3:223-230.

MORRIS, C.E.; STORMONT, J.C. (1997). *Capillary barriers and subtitle D covers: Estimating equivalency*. Journal of Environmental Engineering. ASCE.

O'KANE, M.; AYRES, B.; CHRISTENSEN, D.; MEIERS, G.(2002). *CANMET – CETEM Manual on Cover System Design for Reactive Mine Waste*. O'Kane Consultants Inc. Canadá.

OLIVEIRA, D.R. (2003). *Análise da Interação Solo-Atmosfera durante a Secagem para a Argila Porosa de Brasília*. Dissertação de Mestrado, Publicação G. DM-110/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.

OLIVEIRA, O.M.; MARINHO, F.A.M. (2007). *Estudos de barreiras capilares por meio de simulação de chuva em coluna de solo*. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador. Bahia. Brasil.

PARENT, S-É; CABARL, A. (2005). *Material selection for the design of inclined covers with capillary barrier effect*. Waste Containment and Remediation – GSP-142. Canadá.

PARENT, S-É; CABARL, A. (2006). *Design of inclined covers with capillary barrier effect*. Geotechnical and Geological Engineering. 24: 689–710. Canada.

PARENT, S-É; CABARL, A.; ZORNBERG, J.G. (2007). *Water retention curve and hydraulic conductivity function of highly compressible materials*. Canadian Geotechnical Journal. 44:1200-1214, 10.1139/T07-091. Canadá.

PEREIRA, A. L. (2010). *Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo residual maduro de biotita-gnaiss para baixos níveis de tensões*. Relatório parcial iniciação científica. UNESP – Eng. Civil.

PORTO, R.L.L. et al. (2000). *Apostila PHD-307 Hidrologia Aplicada – Evapotranspiração*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP.

PORRO, I. (2000). *Hydrologic Behavior of Two Engineered Barriers Following Extreme Wetting*. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Applied Geosciences Department Idaho Falls. Idaho 83415. EUA.

QUISSINI, C.S. (2009). *Estudo da aplicação da areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul. Brasil.

ReCESA, (2008). *Resíduos Sólidos: Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários - guia do profissional em treinamento: nível 2*. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). – Belo Horizonte. MG.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. (2004). *Solo, Planta e Atmosfera – Conceitos, Processos e Aplicações*. Editora Manole Ltda. Barueri. São Paulo. 478p.

REINSON, J.R.; FREDLUND, D.G.; WILSON, W. (2004). *Unsaturated flow in coarse porous media*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.. J42: 252-262. NRC Research. Canadá.

ROONEY, D.J.; BROWN, K.W.; THOMAS, J.C. (1997). *The effectiveness of capillary barriers to hydraulically isolate salt contaminated soils*. Water, air and soil pollution. 104:403-411. Holanda.

ROSA, A.S.; DAIMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A. (2011). *Caracterização do solo de cobertura de aterros encerrados com ferramentas (geo)estatísticas*. Nota Técnica. Eng. Sanit. Ambiental. Vol.16. nº2:121-126. Brasil.

ROSS, B. (1990). *The diversion capacity of capillary barriers*. Water Resources Research. Vol.26. nº 10. Washington. EUA.

ROWE, R.K.; QUIGLEY, R.M.; BRACHMAN, R.W.I.; BOOKER, J.R. (2004). *Barrier System for Waste Disposal Facilitie*. 2nd ed. Spon Press. New York.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. *Alternative Landfill Cover Designs Considered in ALCD*. em <http://www.sandia.gov/caps/designs.htm>. acessado em 17/10/2011.

SCALON, B.R.; REEDY, R.C; KEESE, K.E.; DWYER, S.F. (2005). *Evaluation of Evapotranspirative Covers for Waste Containment in Arid and Semiarid Regions in the Southwestern USA*. Vadose Zone Journal 4:55–71.USA.

SHACKELFORD, C.D.; BENSON, C.H.; BOUAZZA, A.; DE MELLO, L.; BOSCOV, M.E.; BOWDERS, J.; KATZENBACH, R.; MOO-YONG, M.; ZIMMIE, T.;ZORNBERG, J.G. (2005). *Innovative Barriers. Chapter 3. Part II*. TC5 Report. Environmental Geotechnics Committee, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

SHARMA, H.D.; LEWIS, S.P. (1994). *Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills – Design and Evaluation*. John Wiley & Sons Inc. New York.

SILVA, C.L.; KATO, E. (1997). *Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado*. Pesquisa Agropecuária Brasileira Brasília, v.32, n.2, p.213-220.

SILVA CURBELO, FABÍOLA DIAS DA (2002). *Estudo da remoção de óleo em águas produzidas na indústria de petróleo, por adsorção em coluna utilizando a vermiculita expandida e hidrofobizada*. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Natal – RN, Brasil.

SIMON, F.G.; MÜLLER, W.W. (2004). *Standard and alternative landfill capping design in Germany*. Environmental Science & Policy. ELSEVIER.

SOARES, A.B.; SOUZA, V.P. (2007). *Uso de coberturas secas sobre rejeitos de carvão da região de Santa Catarina*. Anais da I Jornada PCI-2007. Brasil.

SOARES, J. M. D. et al (2006). *Nota de aula – Mecânica dos Solos*. Apostila – Universidade Federal de Santa Maria.

SOARES, R. M. (2005). *Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar Não Saturado do Rio de Janeiro, RJ*. Dissertação de Mestrado. RJ.

SOUZA, V.P.; BORMA, L.S.; MENDONÇA, R.M.G. (2003). *Projeto de coberturas secas para controle da drenagem ácida em depósitos geradores de acidez*. Seminário Brasil-Canadá de Recuperação Ambiental de áreas Mineradoras. Florianópolis, SC. Brasil.

STORMONT, J.C. (1996). *Anisotropic capillary barrier for waste site surface covers*. United States Patent. Patent number 5,550,315.

SZNELWAR J. J.; SCALABRIN, R. (2009). *Relatório Técnico nº 48 – Perfil da Vermiculita*. Projeto ESTAL - Projeto de assistência técnica ao setor de energia. CONTRATO Nº 48000.003155/2007-17.

TAMI, D.; RAHARDJO, H.; LEONG, E-C.; FREDLUND, D.G. (2003). *A physical model for sloping capillary barriers*. Geotechnical Testing Journal. Vol. 27. nº2. Paper ID GTJ11431_272.

TAMI, D.; RAHARDJO, H.; LEONG, E-C.; FREDLUND, D.G. (2004). *Design and laboratory verification of a physical modelo f sloping capillary barrier*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. NRC Research Press. Canadá.

TAYLOR, D. W. (1948). *Fundamentals of Soils Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc. New York. Chapman & Hall, limited. London. 711p.

TORRES, R. (2009). *Regime hídrico do solo*. Notas de aula. Curso de Engenharia Agronômica. UFRRJ.

TRPKOŠOVÁ, D.; MLS, J. (2009). *The influence of artificial sealing on the capillary barrier's function*. Waste Management. ELSEVIER. EUA.

TRPKOŠOVÁ, D.; MLS, J. (2010). *Efficiency of capillary barriers in relation to retention curves data*. Acta Geodyn. Geomater. Vol 7. nº2 (158). 201-207. República Checa.

UGARTE, J.F.O.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. (2005). *Vermiculita – capítulo 32*. CT2005-143-00 Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. Rio de Janeiro. Brasil.

US EPA, US Environmental Protection Agency – Part V: Ensuring Long-Term Protection, Chapter 11 : Performing Closure and Post-Closure Care. (2003). Disponível em: <<http://www.epa.gov/industrialwaste/chapters/chap11.pdf>>. Acessado em 04/10/2011.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G. & PUFHAL, D.E. (1999). *The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till*. Geotechnique, Vol. 49, no 2, p. 143-159.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P.(2005). *Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara – SP.* Eng. Agríc., Jaboticabal, v.25, n.3, p.713-721.

VIEIRA, A.M. (2005). *Estudo De Barreiras Capilares Como Cobertura Final De Aterro De Resíduos.* Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil.

YONG, R.N.; THOMAS, H.R. (1997). *Geoenvironmental Engineering Contaminated Ground: Fate of Pollutants and Remediation.* ASCE.EUA.

ZHAN, G.; SCHAFER, W.; MILCZARECH, M.; MYERS, K.; GIRAUDO, J.; ESPELL, R. (2006). *The evolution of evapotranspiration cover systems at barrick goldstrike mines.* Paper presented at the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD). Published by the American Society of Mining and Reclamation (ASMR). EUA.

ZORNBERG, J.G.; LaFOUNTAIN, L.; CALDWELL, J.A. (2003). *Analysis and Design of Evapotranspirative Cover for Hazardous Waste Landfill.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol.126. nº6. NRC Research Press. Canadá.

ZORNBERG, J.G.; MCCARTNEY, J.S. (2007). *Chapter 34: Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment.* In: *The Handbook of Groundwater Engineering.* 2nd Edition. Jacques W. Delleur (Editor-in-Chief), CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida.

ZORNBERG, J.G.; BOUAZZA, A.; MCCARTNEY, J.S. (2009). *Geosynthetic Capillary Barriers: Principles and Applications.* Invited Keynote Lecture, Proceedings of the First African Conference on Geosynthetics, GeoAfrica 2009, Cape Town. Africa do Sul.

ZORNBERG, J.G. (2010). *Geosynthetic Capillary Barriers.* Invited Keynote Lecture. Proceedings of the First International GSI-Asia Geosynthetics Conference, Taichung, Taiwan.

WILLIAMS, L.; ZORNBERG, J.G.; DWYER, S.; HOYT, D.; HARGREAVES, G. (2010). *Analysis, Modeling, Design, and Evaluation Monitoring of Alternative Covers at the Rocky Mountain Arsenal*. Proceedings of the Sixth International Conference on Environmental Geotechnics, 6ICEG, New Delhi, India.

WILLIAMS, L.; HOYT, D.; HARGREAVES, G.; DWYER, S.; ZORNBERG, J.G. (2010). *Evaluation of a Capillary Barrier at the Rocky Mountain Arsenal*. Proceedings of the Fifth International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2010, Barcelona, Espanha.

WILLIAMS, L.; HOYT, D.; DWYER, S.; HARGREAVES, G.; ZORNBERG, J.G. (2011). *Design Criteria and Construction of a Capillary Barrier Cover System: The Rocky Mountain Arsenal Experience*. Proceedings of the GeoFrontiers 2011 Conference, Geo-Institute of ASCE, Dallas, Texas.

WORRELL, W.A.; VESILIND, P.A. (2002). *Solid Waste Engineering*. 2nd. Ed. Cengage Learning. EUA.