

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

LÍVIA GARCIA SILVEIRA

**Avaliação da redução da permeabilidade de solos usando
bentonita em suspensão**

São Carlos, SP
2012

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DE
SOLOS USANDO BENTONITA EM SUSPENSÃO

Aluno: Lívia Garcia Silveira

Orientador: Prof. Dr. Orenco Monje Vilar

Monografia apresentada ao curso
de graduação em Engenharia
Ambiental da Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo.

São Carlos, SP

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S587a

Silveira, Lívia Garcia

Avaliação da redução da permeabilidade de solos
usando bentonita em suspensão / Lívia Garcia Silveira;
orientador Orenício Monje Vilar. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2012.

1. bentonita. 2. impermeabilização. 3.
condutividade hidráulica. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

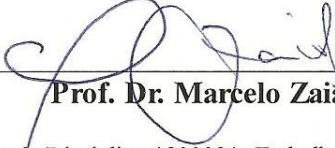
Candidato(a): Livia Garcia Silveira

Monografia defendida e aprovada em: 26/10/2012 pela Comisão Julgadora:


Prof. Dr. Orenco Monje Vilar


Profa. Dra. Valeria Guimarães Silvestre Rodrigues


Jefferson Lins da Silva


Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, por todo o apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

À todo a minha família, por todo apoio que sempre tive.

Ao Prof. Dr. Orenco Monje Vilar pela orientação, com toda dedicação e paciência.

Aos técnicos do Departamento de Geotecnica da Escola de Engenharia de São Carlos, em especial ao Oscar e ao José Luiz, por toda ajuda na realização dos ensaios.

A USP-EESC, pela minha graduação em Engenharia Ambiental.

A todos os docentes, que contribuíram para minha formação.

RESUMO

Silveira, L. G. (2012). **Avaliação da redução da permeabilidade de solos usando bentonita em suspensão.** Monografia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Algumas lagoas com água e efluentes apresentam uma impermeabilização insatisfatória, assim a maior parte do líquido armazenado é perdido, pois ele pode se infiltrar e percolar através do solo do fundo da lagoa ou dos taludes construídos para conter a água. A fim de estudar a viabilidade de reparar esses sistemas, sem a necessidade de drenar a água da lagoa, este estudo aborda a eficiência de suspensões de bentonita lançadas na água para reduzir a permeabilidade do solo. O estudo baseia-se em ensaios de laboratório realizados com areia e areia argilosa, um solo típico da região de São Carlos. Suspensões de bentonita com diferentes concentrações foram percoladas através de amostras de solo para observar se ocorreria algum mecanismo de obstrução e, consequentemente, a redução de permeabilidade do solo. Notou-se que a suspensão de bentonita, mesmo a uma baixa concentração de 4 g/L, foi capaz de reduzir a condutividade hidráulica do solo em, pelo menos, uma ordem de grandeza. Algumas características da formação da camada de bentonita sobre o solo são discutidas e a influência da formação das trincas na variação na permeabilidade do solo foi também discutida. Concluiu-se que a técnica parece promissora, uma vez que utiliza pequenas quantidades de bentonita e é fácil de realizar.

Palavras-chave: Bentonita, impermeabilização, condutividade hidráulica.

ABSTRACT

Silveira, L. G. (2012). **Evaluation of reduced of permeability soil using bentonite suspension.** Course Conclusion Monograph. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Some water and effluent ponds show poor permeability performance as much of the liquid stored is lost as it can infiltrate and percolate through soil foundation and soil embankment. In order to study the viability of repairing those systems without dewatering the pond, this study deals with the viability of using bentonite suspension thrown into water for reducing soil permeability. The study rests on laboratory tests performed with sand and a clayey sand, a typical soil of São Carlos area. Bentonite suspensions with different concentrations were percolated through soil samples to observe whether some clogging mechanism would take place and the correspondent soil permeability reduction. It was noticed that the circulation of bentonite even at a low concentration of 4 g/L was able to reduce the soil hydraulic conductivity by at least one order of magnitude. Some features of cake formation over the soil are discussed and the influence of bentonite cracking on some variation on soil permeability was also addressed. It was concluded that the technique seems promising as it uses small amounts of bentonite and it is easy to perform.

Keywords: Bentonite, sealing, hydraulic conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura geral dos argilominerais da bentonita. (a) Esquema do Arranjo atômico; (b) modelo estrutural das esmectitas. Fonte: Santos (1989).....	21
Figura 2: Foto ilustrando os folhelhos argilosos de Boa Vista (PB). Fonte: Silva (2011).....	22
Figura 3: Estrutura de duas lamelas de montmorilonita. Fonte: Arshak e Clifford, 2004	26
Figura 4: Comparação de inchamento entre montmorilonita de cálcio e sódio. Fonte: Lummus e Azar, 1986.....	27
Figura 5: Estrutura final do aterro sanitário. Fonte: Engecorps 2006.....	29
Figura 6: Estrutura floculada (a) e dispersa (b). Fonte : Lambe e Whitman 1969.	33
Figura 7: Foto ilustrativa da bentonita pura durante evolução sob temperatura ambiente. (a) início do ensaio; (b) 24 horas de ensaio; (c) um mês de ensaio. Fonte : Santos (2008)	34
Figura 8: Lama bentonítica sendo adicionada a um poço.	35
Figura 9: Ação estabilizante da lama. Fonte: Franki 2003.....	37
Figura 10: Formação do filter cake: (a) deposição das partículas coloidais nos vazios do solo; (b) filtração da lama por diferença de pressões; (c) formação do filme protetor ao longo da face da escavação. Fonte : Xanthakos, 1979.	38
Figura 11: “Método do revestimento”. Fonte: (http://sodiumbentonite.net).....	41
Figura 12: “Método revestimento misto”. Fonte: (http://sodiumbentonite.net).	42
Figura 13: “Método de lançamento superficial”. Fonte: (http://sodiumbentonite.net).	42
Figura 14: Ensaio de permeabilidade com carga constante. Fonte: Marangon (2009).....	47
Figura 15: Ensaio de permeabilidade com carga variável. Fonte: Marangon (2009).....	48
Figura 16: Curva Granulométrica da areia.....	49
Figura 17: Curva Granulométrica do solo.....	50
Figura 18: Curva de compactação na energia Proctor normal	51
Figura 19: Curva Granulométrica da bentonita Brasgel.	52
Figura 20: Permeâmetro com o corpo de prova preparado para ensaio.....	56
Figura 21: Esquema montado para ensaio com permeâmetros de parede rígida e carga constante, para percolar água e bentonita.....	56
Figura 22: Permeâmetro aberto ao final do ensaio, e permeâmetro percolando bentonita.	57
Figura 23: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com areia, percolando água.	59
Figura 24: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com areia percolando suspensão de bentonita (7g/L)	60
Figura 25: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (7g/L).....	61
Figura 26: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com areia percolando suspensão de bentonita (4g/L)	62
Figura 27: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (4g/L), (a)após abrir o permeâmetro; (b) após desmontar o permeâmetro.	62
Figura 28: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (4g/L), após desmontar o permeâmetro.	62
Figura 29: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com areia percolando suspensão de bentonita (10 g/L)	63
Figura 30: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (10g/L), (a)após abrir o permeâmetro; (b) após desmontar o permeâmetro.	64
Figura 31: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (10g/L).....	64
Figura 32: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo, para solo com compactação de 90% e ensaio com água.	65

Figura 33: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo, para corpo de prova com solo com compactação de 90% e ensaio com suspensão de bentonita 40g/L seguido por água.....	67
Figura 34: Permeâmetro um pouco antes de ser desmontado, ainda com um pouco de água e sem água.....	67
Figura 35: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (40g/L).....	67
Figura 36: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com solo compactado (90%) percolando suspensão de bentonita (4g/L).....	69
Figura 37: Permeâmetro com o corpo de prova e coberto com bentonita, (a) após aproximadamente 148 horas de ensaio; (b) ao final do ensaio ainda com um pouco de água.	69
Figura 38: (a)Permeâmetro com o corpo de prova e coberto com bentonita, já sem água (b) corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado.	69
Figura 39: (a) corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado; (b) detalhe para observar a fina camada de bentonita formada sobre o corpo de prova.....	70
Figura 40: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com solo compactado (90%) percolando suspensão de bentonita (2g/L)	71
Figura 41: a)Permeâmetro com o corpo de prova e coberto com bentonita, já sem água (b) corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado.	71
Figura 42: Corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado.	71
Figura 43: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com solo compactado (90%) percolando suspensão de bentonita (4g/L)	73
Figura 44: (a) Permeâmetro durante o ensaio; (b) permeâmetro ao final do ensaio.....	73
Figura 45: Corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado.	73
Figura 46: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com solo compactado (90%) percolando suspensão de bentonita (4g/L)	75
Figura 47: (a) Permeâmetro durante o ensaio; (b) Permeâmetro ao final do ensaio.	75
Figura 48: Corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação da bentonita para preparo de fluidos de perfuração. Fonte: NBR 6122	40
Tabela 2: Parâmetros para lama bentonítica. Fonte: NBR 6122	40
Tabela 3: Características do solo	50
Tabela 4: Composição Química da bentonita Brasgel. Fonte : Amorim Et al. (2004).....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Δh - carga hidráulica dissipada na percolação

γ - peso específico do líquido percontante;

μ - viscosidade do líquido percolante

ρ_d - Massa específica seca do solo

$\rho_{dmáx}$ - Massa específica seca máxima

ρ_s - Massa específica dos sólidos

A - área da amostra onde flui a água

e - Índice de vazios

GC - Grau de compactação

h - carga hidráulica (cm);

i - gradiente hidráulico;

IP – Índice de Plasticidade

k - condutividade hidráulica

l = distância ao longo do qual a carga é dissipada

LC - Limite de Contração

LL – Limite de Liquidez

LI – Limite de Plasticidade

PIB - Produto Interno Bruto

v – velocidade média de fluxo

USGS - Serviço Geológico dos Estados Unidos

w_m - teor de umidade do solo

w_{ot} - teor de umidade ótimo para compactação do solo.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2.2 BENTONITA.....	19
2.1.1. ORIGEM	19
2.1.2. DEFINIÇÃO	19
2.1.3. RESERVAS DAS BENTONITAS	20
2.1.4. PERSPECTIVAS NO MERCADO	22
2.1.5. ASPECTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO	23
2.1.6. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS	24
2.1.7. PROPRIEDADES COLOIDAIAS DO SISTEMA ARGILA - ÁGUA	25
2.2. UTILIZAÇÃO DA BENTONITA EM BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES.	28
2.3. FLUIDOS DE PERFURAÇÃO.....	34
2.4. UTILIZAÇÃO DA BENTONITA NO VAZAMENTO DE LAGOAS.....	40
2.5. PERMEABILIDADE.....	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1 MATERIAIS	49
3.1.1 AREIA.....	49
3.1.2. AREIA ARGILOSA.....	49
3.1.3. BENTONITA	51
3.2. MÉTODOS	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
4.1 ENSAIO 1: MEDIDA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO CORPO DE PROVA COM AREIA.....	59
4.2. ENSAIO 2: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 7 g /L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA.....	60
4.3 ENSAIO 3: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 4 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA.	61
4.4. ENSAIO 4 : CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 10 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA.	63
4.5 ENSAIO 5: MEDIDA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA.....	65
4.6. ENSAIO 6: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 40 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA.....	66
4.8. ENSAIO 8: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 2 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA.....	70
4.9. ENSAIO 9: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 4 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA COM 13,8% DE UMIDADE, COM O PERMEÂMETRO ABERTO.	72
4.10. ENSAIO 10: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 4 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA COM 11,0% DE UMIDADE, COM O PERMEÂMETRO ABERTO.	74
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1.INTRODUÇÃO

O uso de barreiras impermeabilizantes tem crescido em obras geotécnicas, principalmente naquelas de cunho ambiental. Camadas de solo compactado, de solo melhorado com aditivos, como bentonita e gossintéticos têm sido corriqueiramente utilizadas para essa finalidade.

Há, no entanto, várias situações em que as obras que demandariam algum tipo de barreira foram construídas sem estes dispositivos ou obras em que a barreira tem funcionado de forma pouco satisfatória. Nestes casos, fazem-se necessários reparos, nem sempre de fácil realização.

As qualidades da bentonita como aditivos em diversas aplicações geotécnicas são bastante conhecidas, podendo-se citar a sua mistura com solos e posterior compactação (Lukiantchuki, 2008), ou o seu uso na forma de lama para estabilização de furos de sondagem ou de estacas escavadas (Azambuja, 2004). Uma possível aplicação da bentonita pode ser em lagoas de retenção de efluentes em caso de desempenho insatisfatório, quanto à permeabilidade do fundo e dos maciços laterais dessa lagoa. Nesse sentido, vislumbra-se a sua utilização, adicionando-a ao efluente e aguardando a sua sedimentação sobre o solo da fundação e maciços de contenção ou mesmo a sua infiltração no interior do solo, vedando seus vazios.

O objetivo desta pesquisa foi verificar a viabilidade do uso de bentonita lançada em água na redução da permeabilidade de solos. Para tanto, foram ensaiados uma areia e uma areia argilosa, solo típico da região de São Carlos, buscando avaliar o efeito de diferentes concentrações de bentonita sobre a permeabilidade dos solos e, em adição, esclarecer os possíveis mecanismos que proporcionam esse efeito. Nos ensaios, primeiramente, buscou-se percolar suspensões de bentonita, em concentrações que variaram entre 10g/L e 2 g/L, sujeitas a um determinado gradiente hidráulico. Num dos ensaios, avaliou-se a percolação de suspensão em elevada concentração, 40 g/L. Posteriormente, realizaram-se ensaios procurando simular mais apropriadamente as condições de campo, isto é, aplicando-se a suspensão de bentonita sobre o solo, sem qualquer carga hidráulica adicional, além daquela determinada pela lâmina de água. Neste caso, tinham-se as proporções de 50 mm de amostra de solo e lâmina de água de 120mm. Os valores de condutividade hidráulica dos solos sujeitos apenas à percolação de água foram então comparados com os valores de condutividade medidos ao longo do tempo, após o fluxo da suspensão de bentonita.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2 BENTONITA

2.1.1. ORIGEM

Bentonitas são argilas que apresentam a propriedade de aumentar várias vezes o seu volume inicial quando se adiciona água e são compostas, predominantemente, por argilominerais do grupo da esmectita, tal como a montmorilonita que pode apresentar-se, dentre outras, nas formas sódica e cárlica.

A primeira comercialização de bentonita de Wyoming (EUA) foi realizada em pequenas quantidades, que foram exploradas e desenvolvidas na área de River Rock durante a década de 1880. Mais recentemente, durante a década de 1920, foram descobertos outros depósitos importantes em outras partes do Estado de Wyoming e a primeira planta de processamento foi construída. Atualmente, o mercado de bentonita ainda está muito concentrado nos EUA, sendo considerado o maior produtor mundial e que conta com elevados investimentos aplicados nessa indústria, os quais vêm proporcionando diversificação no seu uso e aplicação.

Segundo Amorim et al. (2005), no Brasil, as primeiras reservas de bentonita foram descobertas em Boa Vista, PB, na década de 60, e os primeiros estudos tiveram como objetivo, verificar se as argilas, naturalmente policatônicas, poderiam ser transformadas em sódicas com propriedades reológicas para uso em fluidos de perfuração de poços de petróleo. Assim, verificou-se que essas argilas eram compostas por argilominerais montmoriloníticos, ilíticos, cauliníticos, com camadas mistas de ilita-montmorilonita e quartzo, e que se tratadas com solução concentrada de carbonato de sódio seria possível a obtenção de bentonitas sódicas capazes de substituir satisfatoriamente a bentonita importada pelo Brasil. A partir deste estudo, pouco a pouco as argilas começaram a ser industrializadas para comercialização, produzindo bentonitas nas formas sódica e também cárlicas, para atender aos diversos usos industriais.

2.1.2. DEFINIÇÃO

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (Sumário Mineral, 2004) bentonita é o nome genérico da argila composta predominantemente por argilominerais do

grupo das esmectitas com o teor variando entre 55 % e 70%, independentemente de sua origem ou ocorrência. Também são consideradas bentonitas as argilas que possuem como características principais: o alto poder de inchamento, ou seja, podem apresentar até 20 vezes seu volume inicial; capacidade de atingir espaços interplanares de até 100Å; alta elevada área superficial (até 800m²/g); alta capacidade de troca catiônica (CTC) e tixotropia. Estas características conferem à bentonita propriedades bastante específicas, que justificam uma vasta gama de aplicações nos mais diversos segmentos industriais.

Segundo Luz e Oliveira (2005) a bentonita pode ser cálcica ou sódica, e apresenta uma característica física muito particular: expande várias vezes o seu volume, quando em contato com a água, formando géis tixotrópicos. Alguns cátions provocam uma expansão tão intensa que as camadas dos cristais podem se separar até a sua célula unitária. O sódio provoca a expansão mais notável

Para o grupo de pesquisadores liderado pelo Prof. Dr. Valenzuela-Diaz (2001), a bentonita é uma rocha constituída essencialmente por argilominerais do grupo das esmectitas, sendo eles: montmorilonita propriamente dita, nontronita, beidelita, hectorita, saponita e sauconita. Eses argilominerais caracterizam-se por apresentarem na sua estrutura cristalina o alumínio ou magnésio substituídos parcial ou totalmente por Mg^{2+} , Fe^{3+} e outros cátions. Do ponto de vista estrutural, os argilominerais da bentonita são constituídos por diversas unidades empilhadas que compreendem camadas, que contém íons coordenados octaedralmente entre duas camadas de íons coordenados tetraedralmente (Figura 1).

2.1.3. RESERVAS DAS BENTONITAS

Segundo USGS (2009), as reservas mundiais de bentonita em 2008, atingiram o montante de 1.360 milhões de toneladas. Os EUA possuem mais de 50% deste total e são o principal produtor mundial de bentonita sódica. Países da Ex-União Soviética possuem cerca de 17%. Outros países se destacam na produção de Bentonita: Argentina, México, Grécia, Alemanha, Itália, Turquia, Índia, Japão e Marrocos.

Segundo o Sumário Mineral (2011), as reservas mundiais de bentonita são abundantes, e por isso sua estimativa não vem sendo publicada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) nos últimos anos. Já no Brasil, as reservas lavráveis são de 31.388×10^3 t. Em termos de participação nas reservas, o estado do Paraná concentra 48,2% do total, o estado da Paraíba 24,5%, São Paulo 17,9% e a Bahia 9,4%.

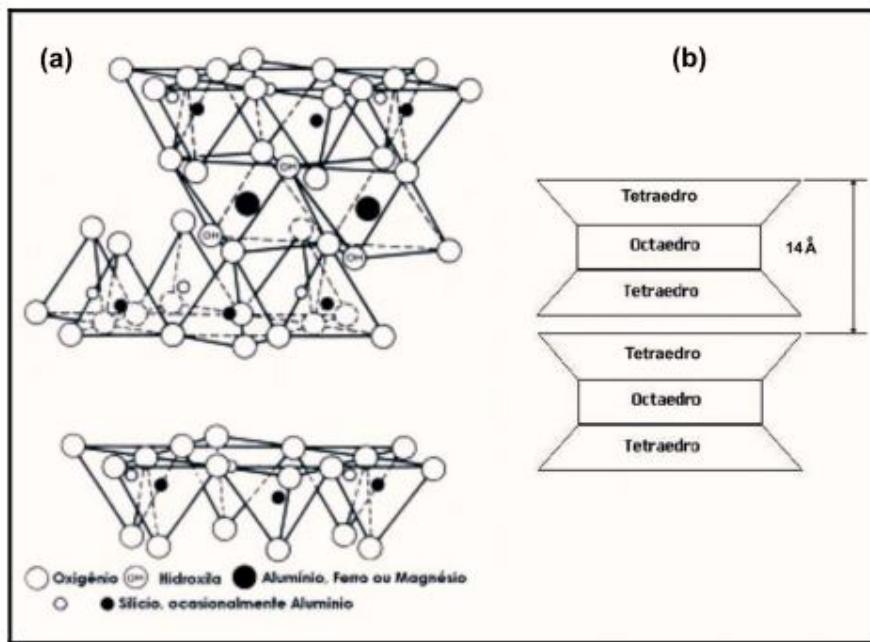


Figura 1: Estrutura geral dos argilominerais da bentonita. (a) Esquema do Arranjo atômico; (b) modelo estrutural das esmectitas. Fonte: Santos (1989)

Ainda, segundo o Sumário Mineral (2011), a produção de bentonita bruta no Brasil em 2010 aumentou sensivelmente, alcançando um patamar de 531.696 t. Isso representa um aumento de produção de 101,2% em comparação com o ano anterior, e indica um aumento de dinamismo dos compradores, que são essencialmente nacionais. Do total produzido, a Paraíba produziu 79,34%, a Bahia produziu 15,12%, São Paulo 4,69%. Na produção beneficiada, a bentonita moída seca correspondeu a 34.804 t, o que representou um aumento de 20,76% em relação a 2009 e a bentonita ativada a 291.623 t, 54,21%, no mesmo período.

As principais jazidas de bentonita em operação no Brasil estão localizadas no município de Boa Vista, estado da Paraíba. As bentonitas das minas de Boa Vista-PB apresentam-se cobertas por uma camada de solo argiloso, variando de 1 a 10 m (figura 2). Nos níveis onde é feita a lavra, as argilas se apresentam em camadas de cores variadas, por vezes formando estratificações ou zonas uniformes. Localmente, essas argilas recebem as denominações de: chocolate; verde lodo, vermelha; sortida ou mista e bofe ou leve (Luz et al., 2001).



Figura 2: Foto ilustrando os folhelhos argilosos de Boa Vista (PB). Fonte: Silva (2011)

A bentonita possui variadas aplicações industriais, dentre elas podemos citar: fundição; perfuração de poços (indústria do petróleo); indústria de descorante de óleos; clarificação do caldo de cana (substituindo enxofre, cal e carvão ativado); clarificação da água: em associação ao sulfato de alumínio; construção civil (paredes contínuas/impermeabilizante); pesticidas: a agro-indústria, principalmente no setor de fruticultura irrigada; pelotização de minérios (ferro); indústria veterinária (aditivo de ração e adsorvente de toxinas), além da indústria de produtos de limpeza, cosmética e farmacêutica (Silva, 2010)

2.1.4. PERSPECTIVAS NO MERCADO

Segundo Coelho e Cabral (2010) no mercado mundial, o segmento de pet litter (absorvente de dejetos de animais domésticos) era maior consumidor final de bentonita no ano de 2010 tendo alcançado 4,5 Mt, em 2007. No entanto eles previam que o ramo de fundição deveria ultrapassá-lo já em 2012, devido ao aumento da demanda de bentonita na pelotização de minério de ferro. A previsão era que a procura de bentonita para lamas de perfuração também aumentasse, cerca de 2% por ano até 2012. Esse consumo está intimamente associado à atividade de perfuração, que está ligada ao mercado de petróleo/gás. Fora estas utilizações principais, elevadas taxas de crescimento eram esperadas em outros mercados especializados. A indústria de óleos comestíveis, e em particular as do óleo de palma, que já apresentou um aumento médio de 8,2 % ao ano no período 1997 a 2006, atingindo a produção recorde de 37,3 Mt em 2006. Considerando que grande quantidade de óleos comestíveis é vendida em

bruto, especialmente na Ásia, ainda há um potencial significativo para a expansão da utilização desse insumo no processo de clareamento na região.

Em 2010, a capacidade brasileira de produção de pelotas (pelotização) era cerca de 56,0 Mt/ano, e a projeção era que esta capacidade atingisse 70 Mt/ano em 2013. Esta elevação implicará na ampliação da demanda de bentonita que deverá ser atendida em grande parte pela importação, devido, principalmente, às características das reservas nacionais que, em geral, apresentam baixa qualidade para essa finalidade. O Brasil precisa incrementar os investimentos em pesquisa mineral e tecnológica a fim de buscar a ampliação de reservas e a melhoria da qualidade dos produtos a base de bentonita, para evitar que o seu mercado seja dominado por importações oriundas da Argentina, dos Estados Unidos e Índia (Coelho e Cabral, 2010).

Nos últimos cinco anos, vêm ocorrendo um aumento no consumo de bentonita no Brasil, relacionado ao crescimento do país (aumento do PIB e da produção de produtos para exportação). Esta pressão de demanda certamente deverá fomentar a mineração nacional. No entanto, existem alguns fatores que podem inibir o aumento da produção nacional. Dentre esses fatores, destaca-se: a carência de investimentos em pesquisa mineral no país; a possibilidade da utilização dos minerais ou materiais substitutos da bentonita, e a concorrência das importações de bentonitas da Argentina e Índia, que apresentam melhor qualidade e menores preços. (Silva, 2010)

2.1.5. ASPECTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO

Segundo Coelho (2009) na mineração de Bentonita a agressão ao meio ambiente geralmente é restrita a desmatamento, às vezes clandestino, e deposição de efluentes líquidos e de finos em suspensão. O volume de resíduos gerado está condicionado às relações de mineração (estéril/minério). Em decorrência do baixo valor do minério, são lavradas jazidas com baixa relação estéril/minério, geralmente com valores inferiores 0,25, isto é, para cada tonelada de bentonita são removidas menos de 0,25 tonelada de materiais estéreis.

Ainda segundo Coelho (2009) as práticas mais comuns utilizadas no controle das áreas impactadas pela mineração envolvem medidas de mitigação convencionais, tais como: restrição da remoção da vegetação ao mínimo necessário e, quando possível revegetação das áreas impactadas; instalação de sistema de drenagem das águas pluviais nas frentes de lavra e nos pátios de estocagem, de forma a conduzi-las para tanques de decantação antes da

liberação para o meio externo e instalação de barreira vegetal nos entornos da cava e do pátio de estocagem para o controle de poeira.

Segundo Reis (2001), parcela importante das minerações ainda carece de práticas mais adequadas de controle e recuperação ambiental. Pois, embora a agressão ao meio ambiente, nessas minerações, aconteça de forma branda devido ao pequeno tamanho das operações, a aglomeração de empreendimentos acaba provocando um impacto acumulativo considerável, causando, processos de desmatamento, assoreamento de drenagem, formação de pequenos lagos, pilhas abandonadas de argila e de material estéril, e taludes expostos sujeitos à erosão.

2.1.6. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

A bentonita origina-se frequentemente da desvitrificação e alteração química de cinzas vulcânicas (Darley e Gray, 1988). Essas cinzas, transportadas via atmosfera, teriam sido depositadas em lagos, lagoas, zonas marinhas pouco profundas gerando esmectita (bentonita) ou em pântanos, gerando caolinita (*tonstein*). Segundo Albarnaz (2009) para a geração de bentonitas, é importante que o ambiente deposicional seja de fraca energia. A origem vulcânica é evidenciada pela presença de quartzo-beta, biotita, sanidina, plagioclásio e fragmentos vítreos.

Diferentemente das bentonitas clássicas originadas de alterações de cinzas vulcânicas transportadas vias atmosfera, as bentonitas de Paraíba parecem ser originadas de alteração de rochas vulcânicas extrusivas em ambiente subaquático.

Segundo Gopinath (2003), os depósitos de bentonitas da Paraíba são associados aos arenitos grosseiros conglomeráticos na base gradando para arenitos finos, siltitos e argilas montmoriloníticas no topo, com intercalações de delgadas camadas na porção medial, e possivelmente no topo. Ainda se encontram intercaladas camadas finas de calcedônia na parte superior da sequência.

No que se refere à idade de formação, foram atribuídos aos derrames basálticos que a capeiam a idade de Cretáceo superior e Terciário inferior. Os estudos detalhados de geologia, mineralogia e química por Gopinath et.al. (1981) mostraram que as bentonitas de Boa Vista são resultado de alterações dos materiais piroclásticos de natureza tufo e lapilli provenientes do vulcanismo local.

2.1.7. PROPRIEDADES COLOIDAIS DO SISTEMA ARGILA - ÁGUA

A principal forma de se caracterizar uma bentonita, considerando o seu uso industrial é baseada na capacidade de inchamento, quando adicionado água. A bentonita que possui o sódio como principal cátion interlamelar apresenta elevada capacidade de inchamento e tem as características de um gel, quando se adiciona água. Esse é o caso das bentonitas sódicas do estado de Wyoming, EUA. Já a bentonita que possui o cálcio como cátion principal apresenta menor capacidade de inchamento. Existe ainda a bentonita conhecida como mista, que é formada por cátions de sódio e cálcio, que incham de forma moderada e formam géis de menor volume do que a bentonita sódica. Dessa forma, segundo Luz e Oliveira (2005), as bentonitas são classificadas como de alto inchamento ou sódica, baixo inchamento ou cárlica e de moderado inchamento ou tipo mista.

Segundo Santos (1989), materiais que podem ser dispersos em fluidos, formando uma dispersão ou solução de fase única (efeito óptico de Tyndall) são denominados coloides. Santos (1989) sintetiza que para uma argila ser considerada um colóide deve apresentar uma faixa granulométrica específica no qual é possível estabelecer uma solução dispersa onde as cargas elétricas das partículas anisométricas se equalizam às forças cinéticas impedindo a dissolução e precipitação. Normalmente convencionam-se sistemas coloidais como aqueles constituídos por partículas de dimensões no intervalo entre 0,1 μm e 0,001 μm (faixa granulométrica corriqueira nas bentonitas).

Como dito anteriormente a bentonita é constituída essencialmente por argilominerais do grupo das esmectitas, cujo argilomineral mais abundante é a montmorilonita, cuja fórmula química geral é dada pela $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}-(OH)_4$. Possui partículas de tamanhos que podem variar de 2 μm a tamanhos bastante pequenos como 0,1 μm em diâmetro, com tamanho médio de 0,5 μm e formato de placas ou lâminas. Pertence ao grupo dos filossilicatos 2:1, cujas placas são caracterizadas por estruturas constituídas por duas folhas tetraédricas de sílica com uma folha central octaédrica de alumina, que são unidas entre si por átomos de oxigênio que são comuns a ambas as folhas. (Paiva et. al, 2007).

As placas da montmorilonita apresentam perfil irregular, são muito finas, tem tendência a se agregarem no processo de secagem, e apresentam boa capacidade de laminação quando colocadas em contato com a água. O empilhamento dessas placas é regido por forças polares relativamente fracas e por forças de van der Waals, e entre essas placas existem lacunas denominadas camadas interlamelares nas quais residem cátions trocáveis como Na^+ , Ca^{2+} , Li^+ , fixos eletrostaticamente e com a função de compensar cargas negativas geradas

por substituições isomórficas que ocorrem no reticulado, como por exemplo, Al^{3+} por Mg^{2+} ou Fe^{2+} , ou Mg^{2+} por Li^+ (Figura 3). (Paiva et.al, 2007).

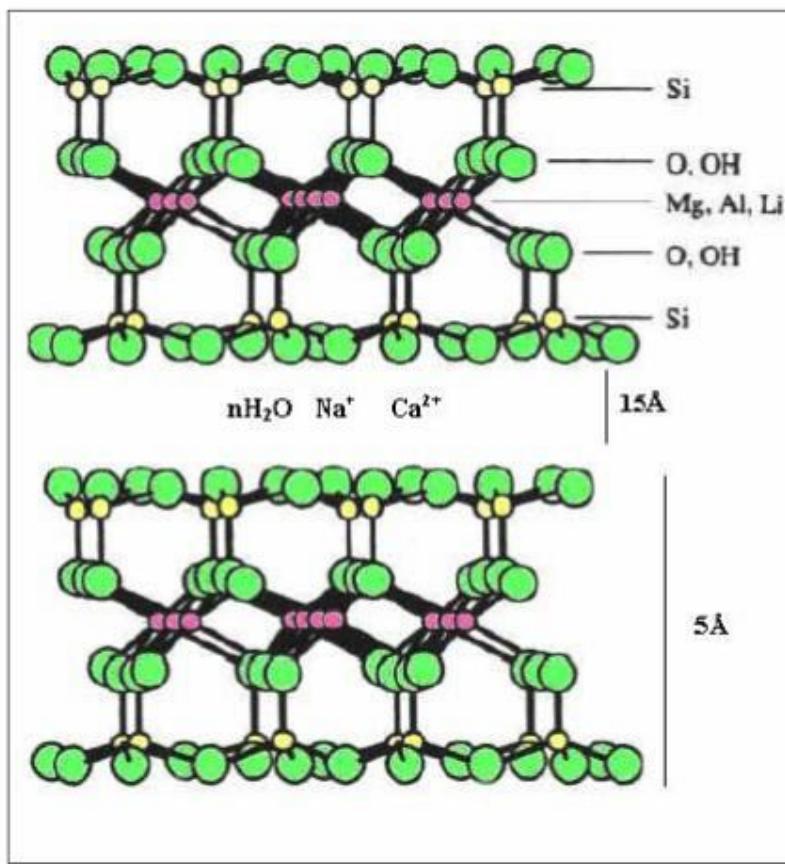


Figura 3: Estrutura de duas lamelas de montmorilonita. Fonte: Arshak e Clifford, 2004

Segundo Ribas (2006), dadas as fracas ligações existentes entre estes cátions e a estrutura primitiva, eles são facilmente substituídos por outros, o que resulta daí a designação de cátions permutáveis ou trocáveis. Esses cátions trocáveis dos argilominerais montmoriloníticos são os fatores determinantes para os usos industriais específicos das argilas montmoriloníticas. Assim, a industrialização de uma argila montmorilonítica, ao usar a reação química de troca de cátions, quer seja a “ativação ácida” para a produção de uma argila descorante, quer para formar as formas sódicas, leva a uma indústria de processo. É exatamente a este fato que a bentonita deve suas características de expansibilidade quando em contato com a água. Com efeito, as forças de ligação entre camadas são relativamente fracas, especialmente quando comparadas com as que se desenvolvem no sentido de se produzir a adsorção de moléculas de água. Deste modo, estas são atraídas e forçam a estrutura a separar-se ao longo dos planos potencialmente fracos, que são os de ligação entre camadas. As bentonitas expostas à umidade adsorvem água formando uma espessa camada de água

entre camadas, ou interlamelar, que varia com a natureza do cátion adsorvido e de acordo com a quantidade de água disponível.

Segundo Lemos (2006) as argilas são agregadas em pacotes laminares como um baralho de cartas. Cada lâmina mede 10 Å, ou seja, cada milímetro comporta 1 milhão lâminas. Se pudessem ser espalhadas, uma ao lado da outra, as lâminas presentes em 1 g de argila ocupariam área de 750 m². Ao entrarem em contato com água, os pacotes de argila vão se separando à medida que a água penetra entre as camadas. Este efeito é chamado de dispersão – a separação das lâminas aumenta sua área de superfície exposta com as cargas atraindo as moléculas de água criando o efeito gel.

Uma característica importante das bentonitas está relacionada à expansão interplanar basal além do limite original (em torno de 9,5 Å), como resultado da hidratação nos espaços interlamelares. A expansão nas montmorilonitas de cálcio chega a 17 Å e nas montmorilonitas sódio, a 40 Å, isto é, a primeira incha 4 vezes menos que a segunda (figura 4).

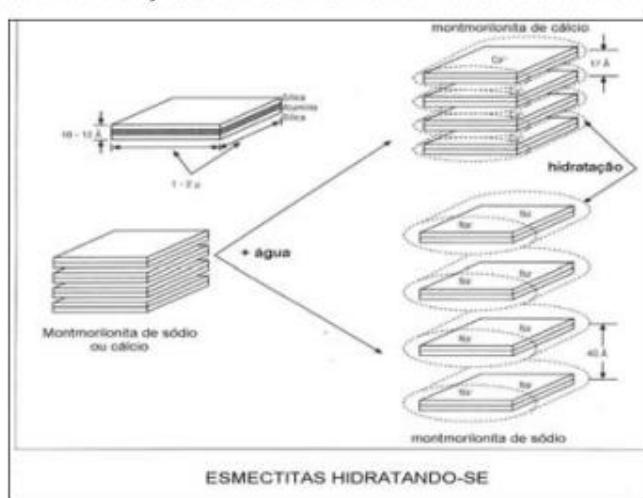


Figura 4: Comparação de inchamento entre montmorilonita de cálcio e sódio. Fonte: Lummus e Azar, 1986.

A força de atração intercamadas exercida pelo Ca^{+2} é 4 vezes maior que o Na^+ e impede a penetração de maior quantidade de água. Este fato resulta em viscosidades 4 vezes maiores das bentonitas sódicas em relação às bentonitas cálcicas. Lemos (2006) explica que os espaços interplanares podem ser preenchidos por água, uma vez que esta possui natureza bipolar e pode ser adsorvida em soluções catiônicas nos espaços intercamadas.

Segundo Darley e Gray, (1988), as bentonitas podem apresentar maior ou menor capacidade de inchamento, dependendo de muitos fatores, tais como: natureza do cátion interplanar, carga lamelar, natureza dos sítios geradores de carga, interestratificação e

presença de contaminantes (saís solúveis, substâncias orgânicas, etc.). De uma forma geral, o fator mais importante costuma ser a natureza do cátion interplanar, uma vez que se o íon sódio, que se hidrata muito facilmente, estiver presente em quantidades apreciáveis, a esmectita apresenta alta capacidade de inchamento, enquanto que se outros íons, como o cálcio ou o potássio, forem predominantes, sua hidratação pouco intensa não permite uma grande separação das camadas.

2.2. UTILIZAÇÃO DA BENTONITA EM BARREIRAS IMPERMEABILIZANTES

O aterro sanitário é o método mais seguro para disposição de resíduo domiciliar do ponto de vista econômico e ambiental, segundo a legislação brasileira. A segurança dos aterros sanitários se deve principalmente à eficiência das barreiras impermeabilizantes. Segundo Lukianchuki (2007), essas barreiras, também denominadas *liners*, são camadas de um determinado tipo de material, utilizadas para isolar os resíduos sólidos do ambiente circundante, reduzindo a geração de percolados, quando utilizado com cobertura, ou o fluxo de percolados para o ambiente hidrogeológico subjacente, quando colocados como revestimento de fundo. Dessa maneira consegue-se proteger o ambiente circundante ao aterro contra a poluição, garantindo a potabilidade das águas de subterrâneas. A Figura 5 ilustra o uso de liners, tanto no revestimento quanto na cobertura do aterro.

Lukianchuki (2007) descreve que as barreiras impermeabilizantes devem atender os critérios de baixa condutividade hidráulica, estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica, resistência a intempéries e compatibilidade química com os resíduos confinados. A principal característica que um solo deve ter para ser utilizado como barreira impermeável é o baixo valor de condutividade hidráulica, portanto essas são geralmente compostas por solos argilosos.

Porém, em locais onde o solo natural não é indicado para uso como barreira, pode-se adicionar algum aditivo, como a bentonita ao solo local (siltoso ou arenoso) a fim de viabilizar a sua utilização. Segundo Lukianchuki (2007) desde a década de 70, países como Estados Unidos, Alemanha, Suíça e França, já utilizam como solução uma camada conhecida como barreira ativa. Essas barreiras são camadas de solo local tratadas com bentonita, a fim de garantir proteção constante mesmo em condições adversas.

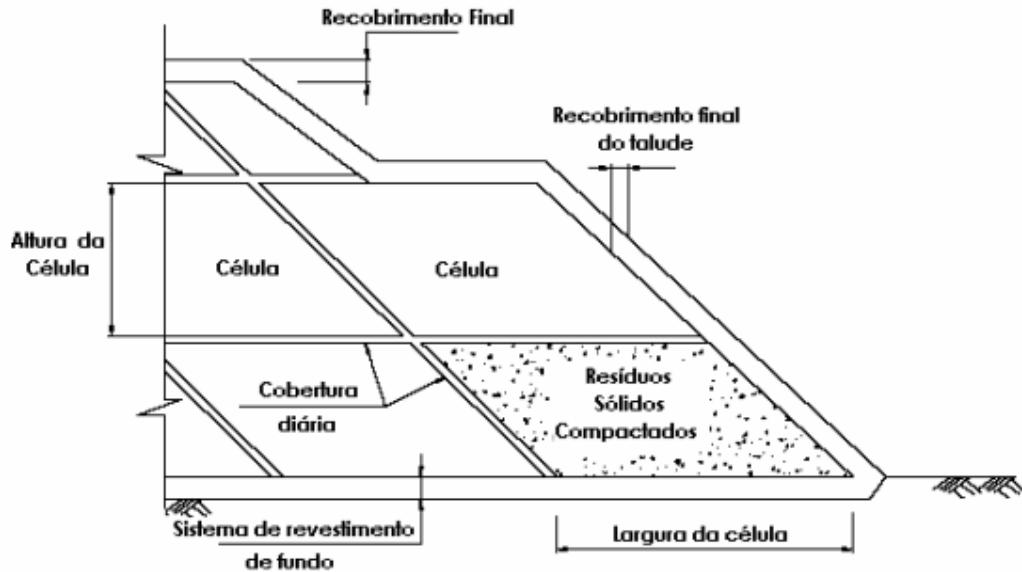


Figura 5: Estrutura final do aterro sanitário. Fonte: Engecorps 2006

Segundo Santos (1989), como alternativa para o melhoramento das características físicas, físico-químicas, químicas e geotécnicas dos solos, a adição de bentonita, em pequenas quantidades, é uma opção bastante interessante, principalmente para diminuição da condutividade hidráulica destes solos quando compactados. A adição de bentonita também proporciona um aumento na capacidade de sorção de contaminantes no solo, principalmente cátions, fato que pode auxiliar na diminuição do fluxo por difusão em camadas selantes basais de aterros sanitários. No entanto, poucos são os estudos que abordam integradamente a interação química da mistura solo-bentonita com as características geotécnicas do sistema de selagem.

Segundo Lukiantchuki (2007), a maioria das legislações e recomendações ambientais estabelece como valor de referência para a utilização em camadas impermeabilizante valores de condutividade hidráulica da ordem de 10^{-7} cm/s. Para Santos (2008), e Moradini (2009) esse também foi o valor adotado como referência.

Nesta revisão, foram analisados principalmente três trabalhos para verificar a viabilidade do uso de bentonita em barreiras impermeabilizantes, além de analisar de que forma esse uso deve ser feito. Esses trabalhos foram desenvolvidos por: Lukiantchuki (2007), Santos (2008) e Morandini (2009), onde os autores avaliaram a condutividade hidráulica de misturas de solos naturais com diferentes teores de bentonita para aplicação em sistemas de contenção de resíduos. Abaixo estão descritos o tipo de bentonita e de solo utilizado e como se deu a variação da condutividade.

Moradini (2009) utilizou um solo argiloso não laterítico, com as seguintes características: Massa Específica dos Sólidos (ρ_s), 2,84 g/cm³; Limite de Liquidez (LL), 51,9%; Limite de Plasticidade (LP), 29,6%; Índice de Plasticidade (IP), 22,3%; e a bentonita utilizada foi a benonita sódica Brasgel PA. Foram feitas análises com solos com teores de bentonita de 3, 6, 9 e 12% (peso seco), além da amostra do solo tropical e bentonita puros. As misturas foram realizadas manualmente e foram realizados ensaios em permeâmetro de parede flexível em câmara triaxial, sob condições de carga hidráulica constante de 50 kPa e tensões confinantes de 20, 40 e 80 kPa. Os valores de condutividade obtidos para solo tropical puro foram de $1,74 \cdot 10^{-6}$ cm/s, $1,15 \cdot 10^{-6}$ cm/s, $8,07 \cdot 10^{-7}$ cm/s, respectivamente, para as diferentes tensões. Através dos resultados obtidos, conclui-se que para atender o referido critério seria necessário um teor de bentonita de aproximadamente 4% para tensão de 20 kPa, 3,3% para tensão de 40 kPa e 2,5% para tensão de 80 kPa.

Santos (2008) realizou misturas de cada horizonte (A, B e C) de um solo predominantemente arenoso, com as seguintes características: Horizonte A apresentava uma composição areno-argilosa, com Limite de Liquidez (LL), 46%; Limite de Plasticidade (LP), 29%; Índice de Plasticidade (IP), 17%; o Horizonte B também apresentava uma composição areno-argilosa, com Limite de Liquidez (LL), 45%; Limite de Plasticidade (LP), 24%; Índice de Plasticidade (IP), 20%; já o solo do Horizonte C foi caracterizado como areno-siltoso, e não plástico. A bentonita utilizada foi a “Permagel” da marca Brasgel, e a mistura solo-bentonita foi realizada nos teores de 5% e 10%, considerando a massa seca dos materiais. As misturas foram efetuadas de forma manual sendo homogeneizadas dentro de sacos plásticos. Em seguida as amostras, para os 3 horizontes puros, e com os diferentes teores de bentonita, foram compactadas em torno de suas umidades ótimas e foram realizados os ensaios de permeabilidade em permeâmetro de carga variável para as amostras com solo do horizonte A e B e em permeâmetro de carga constante para as amostras com solo do horizonte C, por essa amostra ser mais permeável. A partir desses ensaios concluiu-se que a adição de bentonita nos horizontes A, B e C, mesmo em pequenas quantidades (5%), foi suficiente para reduzir significativamente o valor da condutividade hidráulica, k. Os valores iniciais foram de $6,7 \cdot 10^{-5}$ cm/s, $5,1 \cdot 10^{-6}$ cm/s e $7,4 \cdot 10^{-4}$ cm/s, para os horizontes A, B e C respectivamente. No caso do horizonte C, está redução foi de três ordens de grandeza (10^{-4} para 10^{-7}).

Lukiantchuki (2007) utilizou misturas de solo com bentonita nos teores de 3%, 5% e 7%. O solo estudado é uma areia fina a média argilosa, com as características: Específica dos

Sólidos (ρ_s), 2,61 g/cm³; Limite de Liquidez (LL), 26%; Limite de Plasticidade (LP), 17%; Índice de Plasticidade (IP), 9%; a e a bentonita utilizada foi a “Permagel”. A preparação das misturas foi feita manualmente, adicionando o teor de bentonita desejado, a quantidade de água necessária, e em seguida foi feita a completa mistura dos materiais, e esta mistura foi acondicionada em sacos plásticos por 2 a 3 dias para homogeneização total do material. Os ensaios de condutividade hidráulica para o solo puro compactado foram realizados em permeâmetros de parede rígida e apresentou valor médio para a condutividade hidráulica de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$. Os ensaios das amostras de solo com bentonita compactadas foram realizados em permeâmetro de parede flexível. Para a mistura com 3% de bentonita a condutividade hidráulica apresentou valor médio de $5,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$, enquanto que para a mistura com 5% de bentonita o valor médio foi de $2,6 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$, e para a mistura com 7% de bentonita o valor médio foi de $7,7 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$. Assim, concluiu que 5 % de bentonita é suficiente para atingir a ordem de 10^{-7} .

Analizando os trabalhos estudados podemos notar que valores baixos de bentonita, aproximadamente 5% de massa seca, já foram suficientes para se atingir a permeabilidade desejada. Entretanto de acordo com Rowe (2000) é importante estabelecer uma proporção ótima de bentonita e teor de umidade para cada caso específico, garantindo a obtenção de valores de condutividade hidráulica adequados, além de proporcionar uma melhor homogeneização, trabalhabilidade e uma aplicação econômica deste material.

De acordo com Rowe (2000), o sucesso da construção de camadas de solo-bentonita de baixa condutividade hidráulica, depende de vários fatores, sendo estes:

- obtenção e manutenção de uma mistura homogênea de solo-bentonita, evitando a segregação durante a mistura;
- controle de compactação e teor de umidade;
- espessura da camada.

Lukianthcuki (2007) indica que o êxito da mistura solo-bentonita para camadas impermeabilizantes está diretamente ligado aos processos de absorção de água e adsorção. A absorção ocorre primeiramente e consiste na entrada de água entre as lamelas da bentonita, garantindo a expansão mais benéfica do material para a utilização em impermeabilização de solos. Em seguida, ocorre uma adsorção de cátions (retração das lamelas), acompanhado de uma nova expansão. Este processo é denominado cicatrização da camada, que garante da eficiência quanto à impermeabilização do sistema, diferenciando as bentonitas específicas

para camadas de impermeabilização das bentonitas genéricas. Assim, a mistura solo-bentonita trabalha continuamente evitando que fluidos transpassem a camada tratada.

Segundo Moradini (2009) o processo de adensamento prévio na determinação da condutividade hidráulica, assim como as características expansíveis da bentonita, alteram de forma indeterminada a estrutura das amostras. Por este motivo, ele realizou o estudo do índice de vazios das amostras após o adensamento na câmara triaxial constatando que a porosidade aumentou proporcionalmente com o acréscimo de bentonita, ou seja, a porosidade variou de forma inversamente proporcional a condutividade hidráulica. Esta tendência sugere que a água aprisionada pelas forças de atração da bentonita não contribui para o fluxo total;

Santos (2008) e Moradini (2007) notaram também que a adição de bentonita não aumentou teor de argila em relação à amostra de solo puro, supondo então que a bentonita teria funcionado como um agente aglutinante, que agregou os grãos de argila presentes na amostra natural.

Esses autores analisaram ainda alterações de outras propriedades do solo tropical com a adição de bentonita, e notaram que a plasticidade do solo cresceu consideravelmente com a adição de bentonita, revelando uma tendência praticamente linear entre o índice de plasticidade e o teor de bentonita adicionado. Além disso, observou-se o aumento do pH, da condutividade elétrica do extrato aquoso e da expansão livre. Santos (2008) ressalta que esse aumento da eletronegatividade das misturas é de suma importância quando se trata de camadas selantes que envolvem resíduos, principalmente metais pesados

Santos (2008) ainda realizou análises em relação ao teor de umidade da mistura onde se pôde verificar que para solos finos compactados com teor de umidade acima do teor de umidade ótimo, as partículas ficavam arranjadas de forma paralela (estrutura dispersa). Quando compactadas com umidade inferior ao teor de umidade ótimo, apresentou-se uma estrutura definida como floculada (Figura 6). Quando um solo é compactado com valor maior ou igual à umidade ótima, os grumos no solo são mais suaves, remoldados com maior facilidade, pois estão mais úmidos e compressíveis. Por outro lado, quando compactados com baixa umidade, os grumos são duros e difíceis de destruir. Portanto, a compactação com umidade superior à ótima resulta em vazios internos entre grumos menores e consequentemente em uma menor condutividade hidráulica.

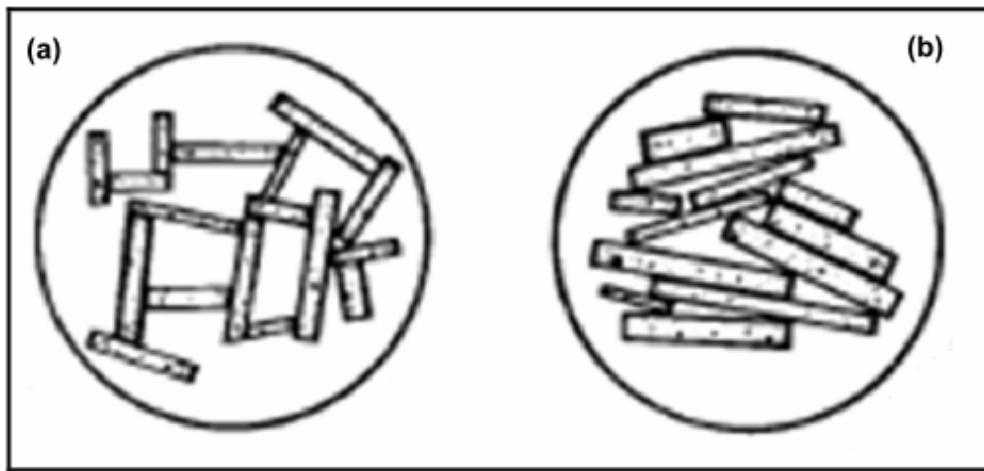


Figura 6: Estrutura floculada (a) e dispersa (b). Fonte : Lambe e Whitman 1969.

Santos (2008) alerta que o tipo de bentonita irá influenciar diversos processos no solo, como a formação de trincas durante o ressecamento. Kleppe & Olson (1985) verificaram que ciclos de umedecimento e secagem podem gerar propagação de trincas profundas em materiais acrescidos de bentonita sódica. Estes autores constataram também que após o ressecamento, se o solo for umedecido com água, esse expandirá e fechará as trincas, tornando a camada novamente íntegra. Porém se outro tipo de líquido penetrar nas trincas e não for adsorvido pelo solo, ou algum material ficar ao longo dessas, após o processo de reumedecimento, podem resultar zonas de condutividade hidráulica elevada. Santos (2008) observou também que estas trincas podem ser geradas na associação de solos muito plásticos a bentonita, pois essa mistura apresenta característica de contração e expansão com a variação de umidade. Estes fatores podem ser prejudiciais caso ocorram de forma intensa, pois podem gerar grandes fissuras.

Santos (2008) realizou ensaios de ressecamento, onde pôde observar que a bentonita pura possui um elevado limite de contração e quando este material é adicionado, em pequenas quantidades, ao solo tropical afeta sensivelmente o valor do limite de contração (LC) dessas amostras, ou seja, aumenta o comportamento de contração.

Santos (2008) ressalta que, quando há no solo uma constante perda de umidade, ocorre uma retração dos meniscos capilares, consequentemente aumentando a pressão capilar. Depois que estas pressões atingirem valores que ultrapassem a resistência à tração das argilas, surgem as trincas, que comprometem o bom funcionamento de uma camada selante. No entanto, a bentonita utilizada nos estudos realizados por Santos (2008), quando submetida à temperatura ambiente, comportou-se de forma diferente. Depois de passado um mês do início

do ensaio, verificou-se que apesar de ter ocorrido uma grande variação volumétrica não se formaram pronunciadas trincas externas (Figura 7-c). Este fato pode estar associado ao poder de “cicatrização” desta bentonita. Supõe-se que quando este material é exposto à temperatura ambiente, inicialmente contrai rapidamente formando algumas trincas superficiais (Figura 7-a), embora não variando muito de volume. Porém ao longo do tempo começa a ocorrer uma troca de umidade entre a amostra e a atmosfera, favorecendo a “regeneração” destas trincas.

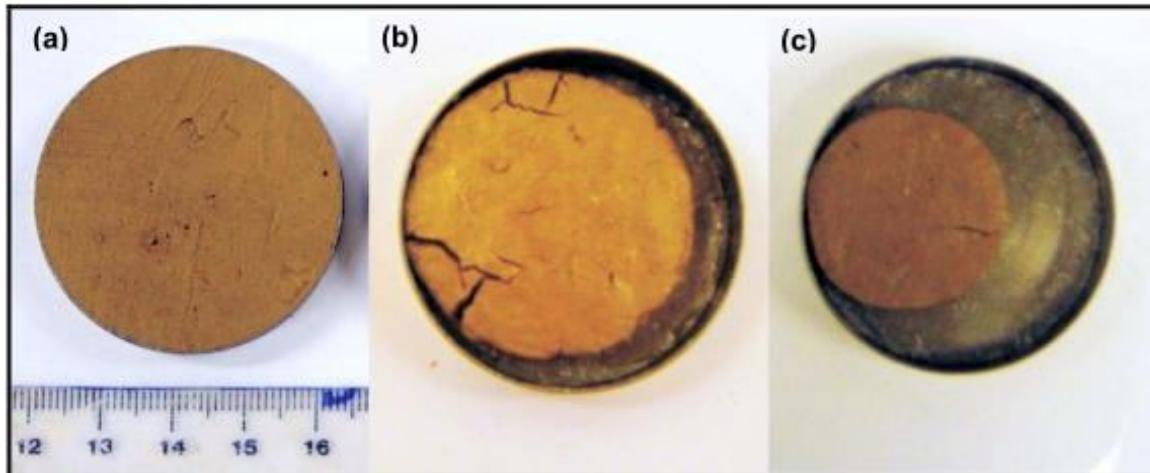


Figura 7: Foto ilustrativa da bentonita pura durante evolução sob temperatura ambiente. (a) início do ensaio; (b) 24 horas de ensaio; (c) um mês de ensaio. Fonte : Santos (2008)

Por fim, fica comprovado que a bentonita é uma alternativa viável, quando considerado apenas os aspectos técnicos, para serem utilizadas como camada selantes. Já que este material quando adicionado, em pequenas quantidades, a solos tropicais, podem desempenhar bem o papel de selo, ou seja, dificultar a movimentação de água no solo. Portanto podem ser usadas em camadas de cobertura e basais em aterros sanitários, barreiras hidráulicas verticais e horizontais, diques de contenção, lagoas de decantação, lagoas de tratamento, proteção de encostas, entre outros, porém é necessário em cada obra um estudo mais completo considerando os aspectos construtivos e a compatibilidade entre os materiais.

2.3. FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Um uso comum da bentonita, que se assemelha bastante com a presente pesquisa, é o uso como fluido de perfuração na escavação de poços, para auxiliar na formação de uma torta de filtragem nas paredes do poço, de baixa permeabilidade, de forma a controlar a perda de

filtrado do fluido de perfuração, contribuindo para evitar o desmoronamento do poço (Figura 8).



Figura 8: Lama bentonítica sendo adicionada a um poço.

Segundo Luz e Baltar (2003), os fluidos de perfuração foram ganhando importância, à medida que os poços se tornavam mais profundos. Considera-se que, tanto do ponto de vista técnico como do econômico, o sucesso da perfuração de um poço depende fortemente da composição do fluido e dos cuidados para a manutenção de suas propriedades durante a perfuração.

Estes fluidos são indispensáveis durante as operações de perfuração, pois desempenham uma série de funções essenciais, como resfriar e lubrificar a broca de perfuração, reduzir o atrito entre a coluna de perfuração e as paredes do poço, transportar os detritos de perfuração, permitir sua separação na superfície e formar um filme de baixa permeabilidade (reboco) nas paredes do poço. O desempenho destas funções é diretamente dependente das propriedades reológicas, de filtração e lubricidade (viscosidades, consistência de gel, controle de filtrado, reboco e coeficiente de lubricidade) dos fluidos de perfuração (Medeiros, 2008).

Segundo Darley e Gray (1988), a bentonita é a argila comercial mais utilizada em fluidos à base de água doce. Para Alderman (1988), as funções que os fluidos de perfuração devem desempenhar são mais facilmente alcançadas com o uso de dispersões de bentonita, em virtude das excelentes propriedades coloidais e tixotrópicas que esta argila apresenta.

No Brasil, as argilas bentoníticas comumente utilizadas no preparo de fluidos de perfuração são provenientes dos depósitos localizados no Município de Boa Vista, PB. Contudo, após décadas de exploração, as variedades de argilas bentoníticas utilizadas no preparo de fluidos de perfuração não são mais encontradas em quantidades apreciáveis para exploração, restando, em grande quantidade, as argilas consideradas de qualidade inferior para utilização como agente tixotrópico e viscosificante em fluidos de perfuração. Para tentar melhorar a qualidade dos fluidos de perfuração preparados com essas argilas bentoníticas é freqüente a prática de aditivação do fluido, sendo comumente utilizados aditivos poliméricos como carboximetilcelulose (CMC) e poliacrilamida (PAM) (Barbosa, 2006).

Segundo Melhado et al. (2002) o efeito estabilizante da lama bentonítica é eficaz quando a pressão hidrostática da lama no interior da escavação é superior à exercida externamente pelo lençol e a granulometria do terreno é tal que possa impedir a dispersão da lama. A coluna de lama exerce sobre as paredes da vala uma pressão que impede o desmoronamento, formando uma película impermeável denominada "*cake*", a qual dispensa o uso de revestimentos. Na Figura 9 pode-se observar as tensões envolvidas na estabilização.

O *cake* é formado pela deposição de sólidos presentes no fluido nas paredes do poço à medida que a fase contínua (água) deste penetra nos seus poros. A espessura do *cake* aumenta enquanto o fluido ceder água às formações geológicas com as quais está em contato até conseguir impermeabilizar o envoltório do poço, impedindo a perda de água por filtração. Segundo Melhado et al. (2002) a lama bentonítica é preparada em uma instalação especial denominada central de lama, onde se faz a mistura da bentonita com água pura, em misturadores de alta turbulência, com uma concentração variando de 25 a 70 kg de bentonita por metro cúbico de água, em função da viscosidade e da densidade que se pretende obter.

Segundo Darley e Gray (1988), as quantidades de argila adicionadas ao fluido variam de acordo com as formações a serem perfuradas; para promover a estabilização de formações instáveis, 70 a 100 kg/m^3 de argila devem ser utilizadas, enquanto que para evitar problemas de perdas de circulação, essa concentração varia de 85 a 110 kg/m^3 .

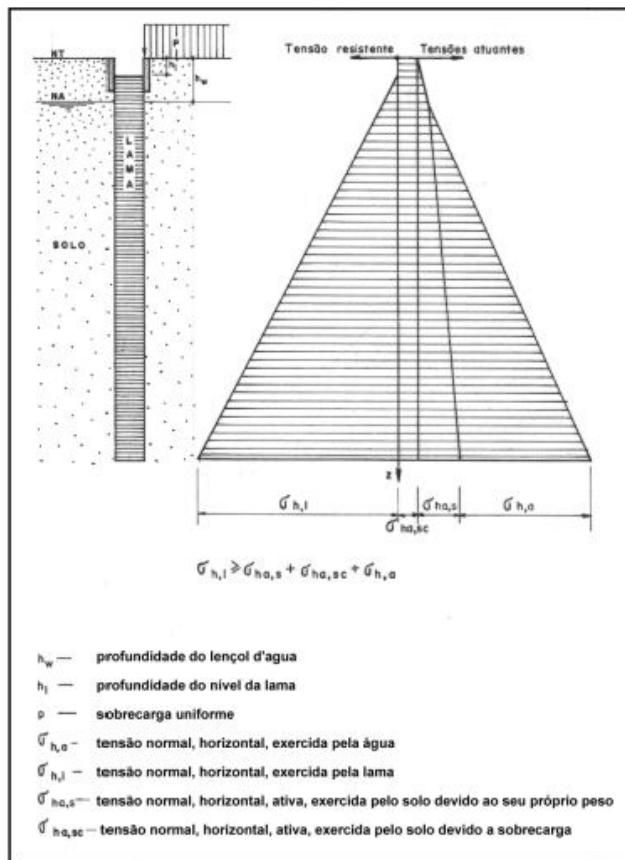


Figura 9: Ação estabilizante da lama. Fonte: Franki 2003

Como geralmente existe possibilidade de desmoronamento das paredes da vala e a escavação atinge horizontes abaixo do lençol freático, a perfuração é executada em presença de lama bentonítica. Terminada a perfuração inicia-se a colocação da armadura, com guindaste auxiliar ou com o próprio guindaste utilizado na abertura da escavação. A fim de evitar que a lama se misture com o concreto lançado, coloca-se um obturador no interior do tubo, que funcionando como êmbolo, expulsa a lama pelo peso próprio da coluna de concreto.

O *cake* também é utilizado na construção de paredes diafragmas. Essa técnica consiste na escavação de trincheiras profundas até as cotas de projeto, com auxílio de ferramentas especiais chamadas clam-shell. Para essa escavação permanecer estável é utilizado lama bentonítica como fluido estabilizante, funcionando da mesma forma que na escavação de poços. Na seqüência, é escavado o trecho onde o material de preenchimento será colocado. Segundo Xanthakos (1979), a lama bentonítica quando lançada para dentro do trecho penetra no interior dos vazios do solo adjacente por diferença de pressões. Durante esse processo, grupos de partículas sólidas (colóides) se acumulam dentro dos poros das partículas do solo adjacente formando uma camada fina na interface da lama bentonítica e o solo, conhecida

como *filter cake*. Logo após, geralmente depois de alguns segundos, o *filter cake* é coberto por uma fina camada de bentonita, também chamada de filme protetor. O processo é ilustrado na Figura 10. Nesse estágio, a barreira está praticamente impermeável e oferece grande resistência à penetração de líquidos. A pressão lateral exercida pela lama bentonítica no trecho age contra o *filter cake*, estabilizando as paredes da escavação e evitando, assim, o seu colapso.

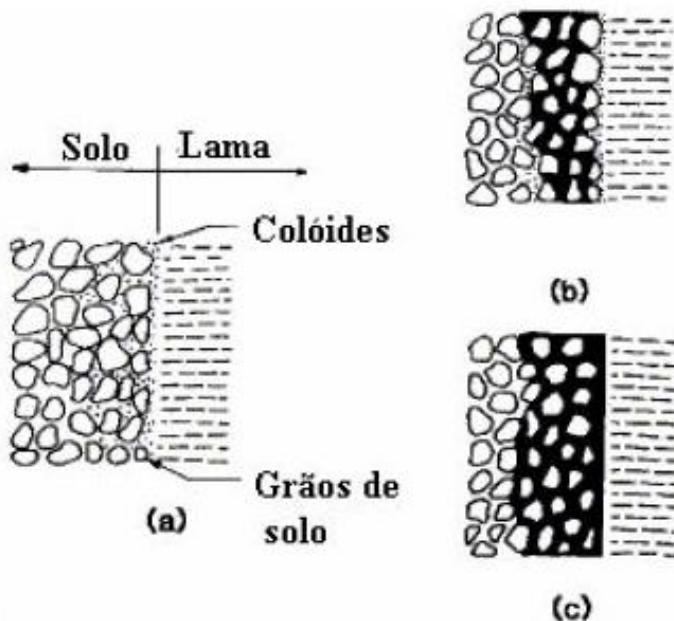


Figura 10: Formação do filter cake: (a) deposição das partículas coloidais nos vazios do solo; (b) filtração da lama por diferença de pressões; (c) formação do filme protetor ao longo da face da escavação. Fonte : Xanthakos, 1979.

Se durante o processo de escavação o nível da lama bentonítica estiver abaixo do nível d'água subterrânea, devido a um aumento repentino do lençol freático ou a uma perda excessiva de lama bentonítica para um solo adjacente muito poroso, a pressão na água do solo adjacente irá gerar uma força interior sobre o *filter cake*, provocando a sua desintegração. Com isso, o nível d'água ficará livre para escoar para dentro do trecho escavado, gerando um colapso da parede de escavação (Xanthakos, 1979). Além da variação do nível d'água, outro fator atribuído ao colapso das paredes de escavação, deve-se à redução da densidade da lama bentonítica devido à sedimentação das partículas suspensas. (Morgenstern e Amir-Tahmasseb, 1965).

Segundo Xanthakos (1979) os métodos de preparação da lama bentonítica para a introdução no trecho escavado irão variar com a magnitude do projeto. Os métodos mais

comuns utilizados envolvem o uso de misturadores (flash-type mixers) e tanques de circulação. A bentonita seca é colocada junto com um jato d'água turbulento dentro de misturadores, os quais descarregam essa mistura dentro de um tanque de baixa circulação onde a bentonita é hidratada. Para D'Appolonia (1980), em pequenos projetos, vale mais a pena a utilização de misturadores (propeller-type) que despejem a lama diretamente dentro do trecho escavado. Nesse caso, a bentonita deve ficar dentro dos misturadores até a sua hidratação completa.

As propriedades da lama bentonítica são determinadas de maneira que se mantenha o trecho de escavação estável. Na maioria dos casos, os valores das propriedades recomendados em projetos estão baseados em experiências passadas. Segundo Evans e Dawson et al. (1999), para a formação da lama bentonítica, geralmente é utilizado 5 % de bentonita misturada a 95 % de água. Em trabalho realizado por Amorim et al. (2004), os fluidos de perfuração foram preparados com concentração de 4,86 % em massa de argila (24,3 g de argila em 500 mL de água deionizada).

As propriedades mais importantes de um fluido bentonítico são a densidade (que depende da percentagem utilizada), a viscosidade, a tixotropia e o valor de pH. Quando se trata de reutilizar a lama, o que importa é o teor de areia (contaminação), que quando excede a valores da ordem dos 2 ou 3%, reduz as propriedades básicas do fluido. Essas propriedades devem ser controladas, ao se elaborar a lama e principalmente durante a concretagem das valas, dentro de valores pré-determinados em estudos laboratoriais, que definem quais devem ser as características dos materiais constituintes da “lama” bentonítica.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros que devem ser seguidos para que a lama bentonítica esteja em condições de ser utilizada como fluido de perfuração, e, a tabela 2, apresenta as características que a bentonita utilizada na preparação da lama deve possuir, de acordo com a Norma Brasileira (NBR 6122). Além de seguir esses parâmetros é sempre importante preparar a lama bentonítica no mínimo 12 horas antes do seu uso, para que ela possa hidratar bem.

Tabela 1: Especificação da bentonita para preparo de fluidos de perfuração. Fonte: NBR 6122

Requisito	Valor
Resíduos em peneira nº 200	$\leq 1\%$
Teor de umidade	$\leq 15\%$
Limite de liquidez	≥ 440
Viscosidade Marsh 1500/1000 da suspensão a 6° em água destilada	≥ 40
Decantação da suspensão a 6% em 24 horas	2%
Água separada por presso-filtração de 450 cm ³ da suspensão a 6% nos primeiros 30 min., à pressão de 0,7 MPa (7 kg/cm ²)	$\leq 18\text{cm}^3$
pH da agua filtrada	7 a 9
Espessura do "cake" no filtroprensa	$\leq 2,5\text{mm}$

Tabela 2: Parâmetros para lama bentonítica. Fonte: NBR 6122

Parâmetros	Valores	Equipamento para ensaio
Densidade	1,025 g/cm ³ a 1,10 g/cm ³	Densímetro
Viscosidade	30 s a 90 s	Funil Marsh
pH	7 a 11	Papel de pH
Cake	1,0 mm a 2,0 mm	Filter press
Teor de areia	até 3%	Baroid sand content ou similar

2.4. UTILIZAÇÃO DA BENTONITA NO VAZAMENTO DE LAGOAS

A maioria dos textos encontrados sobre esse assunto, cita que existem três métodos de conter o vazamento em um lago artificial, represa e afins. Os três principais métodos são: o “revestimento”, o “revestimento misto” e o “lançamento superficial”. Nos dois primeiros métodos é necessário drenar toda a água do reservatório, e apenas no último método é possível fazer a correção sem a necessidade de drenar a água, porém esse último método é o que contém menos informações.

Segundo a empresa *Texas Sodium Bentonite, Inc.* o método do “revestimento” é geralmente o método mais eficaz para selar tanques que estejam vazando com bentonita. No entanto, é necessário tomar mais cuidados durante sua aplicação. O primeiro passo é drenar a água do reservatório e preparar a superfície a ser selada, para isso é necessário remover todas as pedras, lixo e vegetação, incluindo árvores e raízes. Em seguida deve-se retirar de 4 a 6 centímetros da parte superior do solo, e cobrir toda a área, principalmente os furos ou fendas, se estes existirem, com bentonita. Em seguida, deve-se cobrir a camada de bentonita com o solo que havia sido retirado anteriormente, e por fim, compactar o solo. É preciso cuidados ao encher o tanque, e fazê-lo com um fluxo suave de água, para prevenir a erosão das camadas do solo e bentonita. Pode demorar alguns dias para que a bentonita sature completamente e ocupe todos os vazios do solo. O mecanismo pode ser observado na Figura 11.



Figura 11: “Método do revestimento”. Fonte: (<http://sodiumbentonite.net>)

O método “revestimento misto” é semelhante ao anterior, deve-se drenar e limpar toda a área, em seguida deve-se retirar de 4 a 6 cm da superfície do solo, e misturá-lo com bentonita na proporção de uma parte de bentonita para 5 partes do solo, e em seguida cobrir toda a área com a mistura, como apresenta a Figura 12. Por fim, ela também deve ser compactada, e deve-se tomar os mesmos cuidados do método anterior para que não ocorra erosão do solo.

Caso não seja possível drenar a água da lagoa as empresas recomendam que seja utilizado o método de lançamento superficial. Este método é menos eficaz do que os outros dois métodos por várias razões: a colocação uniforme e precisa da bentonita é difícil, e no fundo do tanque podem existir detritos, como lixo, vegetação, troncos, pedras, o que pode impedir uma cobertura suficiente. Porém, esse é o método que mais interessa nesse estudo, visto que diversas vezes é inviável drenar toda a água de um reservatório, especialmente se pensarmos em lagoas de tratamento.



Figura 12: “Método revestimento misto”. Fonte: (<http://sodiumbentonite.net>).

Para esse método o mais recomendado é o uso de bentonita granular, já que as partículas são grandes o suficiente para decantar até o fundo, enquanto que partículas mais finas ficariam em suspensão. Nesse método deve-se simplesmente espalhar bentonita pela superfície da água, e aguardar que ela decante, como mostra a Figura 13. Segundo a empresa *J.P. Self and Associates, Inc.* embora este método seja menos eficiente que os outros dois, ele pode proporcionar uma boa vedação se o fundo do lago estiver limpo.



Figura 13: “Método de lançamento superficial”. Fonte: (<http://sodiumbentonite.net>).

Segundo *Texas Sodium Bentonite*, pode-se usar dispositivos flutuantes (barcos de fundo chato, chatas de trabalho, as docas flutuantes, etc) com funis para obter uma distribuição uniforme da bentonita de sódio granulado em cima da superfície da água. Os grânulos de bentonita irão decantar para o fundo do tanque, onde ele começa a absorver a água e inchar. Em seguida, ele se transforma em um gel que adere ao fundo ou aos lados da lagoa, dependendo de onde ele foi aplicado. Uma porcentagem deste gel seguirá o fluxo da água para ajudar a procurar as fendas onde a infiltração ocorre.

Ainda segundo Texas Sodium Bentonite a eficácia deste método depende da precisão para identificar as áreas de infiltração e para aplicar a bentonita nesses pontos. Se não se tem certeza de onde os vazamentos estão localizados ou se o tipo de solo for muito poroso, necessita-se tratar toda a área para obter melhores resultados. Durante a aplicação uma ligeira turvação da água pode ocorrer. No entanto, a turbulência diminuirá dentro de alguns dias, quando a bentonita de sódio começar a hidratar e instalar-se no lago. A eficácia deste método geralmente ocorre de 60 a 90 dias após o tratamento.

Segundo *Dam Seal*, nesses casos em que a água não pode ser drenada, recomenda-se a aplicação de 25 kg de bentonita por metro quadrado de superfície da água. Caso não existam correntes ou ondas a aplicação de bentonita granular é o método mais simples. Ocasionalmente, as condições podem exigir uma preparação líquida, isto pode ser feito misturando de dois a oito partes de bentonita para 100 partes de água. A mistura pode ser vertida em água ou pode ser bombeada a partir de tanques, para os lados e fundo do reservatório dando um tratamento localizado.

Ainda segundo *Dam Seal*, para localizar o vazamento em um canal pode-se introduzir uma pequena quantidade de bentonita a montante do local em que há suspeita, e continuar introduzindo a jusante. Tais aplicações produzirão um líquido leitoso que deverá fluir para o ponto do vazamento. Uma vez que o vazamento está localizado deve-se jogar uma porção de bentonita em pó imediatamente a montante do vazamento. O fluxo d'água vai conduzir a bentonita para o vazamento. Se a fissura não for muito grande, a bentonita irá inchar e selar a abertura. As taxas de aplicação e metodologia da bentonita irão variar de acordo com o solo e as condições do local.

Segundo Wynne (1993) a bentonita pode ser adicionado a um tanque, quando a drenagem não é viável, de duas formas. Pode ser distribuído bentonita granular a partir de um barco sobre a superfície do tanque inteira ou sobre a área em que há o vazamento; ou a bentonita em pó pode ser misturada com água para formar uma pasta que deverá ser vertida sobre a superfície do tanque, para que ela decante. Qualquer um desses dois métodos permitirá que as partículas de argila se expandam para tapar fendas e poros do solo devido à pressão da água.

Em todos os métodos de aplicação de bentonita, é o inchaço das partículas que para o vazamento. Em alguns casos pode demorar até uma semana para que o vazamento cesse. Além disso, caso a água contenha grandes quantidades de sais minerais e ácidos os resultados podem não ser os esperados.

Em trabalho apresentado por Ferreira et al. (2003), foi realizado um estudo para utilização da bentonita sódica na impermeabilização de lagoas de estabilização. Esse estudo foi realizado em uma lagoa de estabilização de efluentes resultantes dos processo de obtenção do ferro gusa. Foi analisada a impermeabilização da lagoa já com o efluente, pelo método do lançamento superficial.

Segundo Ferreira et al. (2003), o solo da lagoa constitui-se essencialmente de areia, silte e o argilomineral caulinita, e apresenta valores de condutividade hidráulica da ordem de 10^{-6} . Para este tipo de solo recomenda-se adição de argilas bentoníticas sódicas na proporção de 12kg/m^2 , em relação a área da lagoa, porém como a aplicação por lançamento superficial é bastante complexa, a quantidade a ser lançada deverá ser avaliada *in loco*.

Ferreira et. al (2003) afirmam que o processo de impermeabilização da lagoa foi satisfatório. Contudo foi constatado que o elevado poder floculante dos efluentes poderia comprometer em médio prazo, o processo de impermeabilização, sendo necessária sua manutenção periódica de forma a manter a estanqueidade do sistema com risco mínimo de contaminação do lençol freático. Caso não seja possível determinar a condutividade hidráulica da lagoa *in situ*, recomenda-se uma nova aplicação a cada dois anos na proporção de 4 kg/m^2 .

2.5. PERMEABILIDADE

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o grau de permeabilidade expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade (Caputo, 1996).

Chama-se permeabilidade a maior ou menor facilidade com que a percolação d'água ocorre através de um solo. Segundo Vargas, 1977 a água livre escoa entre os grãos, se esta estiver sujeita a um potencial hidráulico haverá o fenômeno do escoamento da água através do solo.

O conhecimento do valor da permeabilidade é muito importante em diversas obras de engenharia, essencialmente, na estimativa da vazão que percolará pelo meio do maciço e da fundação em barragens, hidroelétricas, filtros drenantes, fundações, fossas sépticas, construções que envolvem movimentação do solo e estabilidade.

A condutividade hidráulica de um solo varia de acordo com os vazios presentes no material, sendo que quanto menor o tamanho das partículas, menor será o volume de vazios no solo e menor a condutividade hidráulica deste.

A condutividade hidráulica é um dos parâmetros que apresenta maior faixa de variação para os solos. Os valores variam da ordem de 10^2 cm/s para materiais com alta condutividade hidráulica (pedregulhos), a valores da ordem de 10^{-12} cm/s, para materiais com baixíssimos valores de condutividade hidráulica (solo com a presença de argilas de alta atividade).

A determinação da condutividade hidráulica é realizada tendo em vista a lei experimental de Darcy. O engenheiro francês Henry Darcy, em 1856 publicou um trabalho referente ao estudo do movimento de água em um filtro de areia, e através do qual conseguiu definir a Equação 1, conhecida como Lei de Darcy, que correlaciona a velocidade média de escoamento do fluido no meio poroso ao gradiente hidráulico.

$$v = k \cdot i$$

Equação 1

Onde: v = velocidade média de fluxo

k = condutividade hidráulica

i = gradiente hidráulico;

O gradiente hidráulico é definido pela equação 2:

$$i = \frac{\Delta h}{l}$$

Equação 2

Onde: Δh = carga hidráulica dissipada na percolação

l = distância ao longo do qual a carga é dissipada

Ressalta-se que a condutividade hidráulica (k) é um parâmetro característico do meio poroso e do fluido que percola por este meio. Para um caso onde percola-se através de um meio poroso fluidos com densidades e viscosidades distintas, o valor de k obtido será diferente para cada caso. Considerando-se outro caso, onde o fluido percolado seja o mesmo, porém em meios porosos diferentes, os valores de k também são diferentes. Dessa forma a Lei de Darcy pode ser escrita de acordo com a Equação 3.

$$v = K \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot i$$

Equação 3

Onde: k = condutividade hidráulica

K = permeabilidade intrínseca do solo, função exclusiva do meio poroso;

γ = peso específico do líquido percolante;

μ = viscosidade do líquido percolante.

Para determinação da condutividade hidráulica de um solo normalmente são utilizados o peso específico e a viscosidade dinâmica da água à temperatura de 20°C.

A determinação dos valores de condutividade hidráulica pode ser realizada através de ensaios de campo e ensaios de laboratório. Segundo Daniel (1987), os ensaios de laboratório apresentam como vantagens o controle das condições de contorno tais como a saturação, o nível de tensões efetivas, a carga hidráulica e a direção de fluxo, tempo de ensaio curto e custo baixo. Em contrapartida, os ensaios de campo sofrem um menor de efeito escala, devido ao fato de que o volume de solo ensaiado é superior ao volume ensaiado em laboratório.

Os métodos de laboratório baseiam-se no uso dos permeâmetros. Os ensaios com permeâmetros podem ser com carga constante ou carga variável, permeâmetros de carga constante são mais adequados para amostras com condutividade hidráulica acima de 0,01 cm/min, enquanto os de carga variável são para amostras com condutividade abaixo deste limite.

A Figura 14 apresenta o esquema de um ensaio com carga constante, onde a carga h é mantida constante durante um certo tempo, a água percolada é colhida e o seu volume é medido para encontrar a vazão (Q). No ensaio com carga constante, a condutividade hidráulica é calculada através da Equação 4.

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h}$$

Equação 4

Sendo: k = condutividade hidráulica (cm/s);

Q = vazão (cm³/s);

l = altura da amostra (cm);

A = área da amostra onde flui a água (cm²);

h = carga hidráulica (cm);

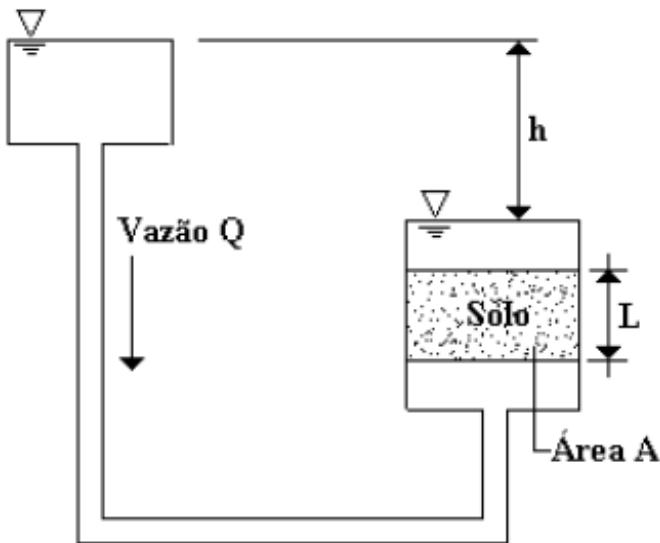


Figura 14: Ensaio de permeabilidade com carga constante. Fonte: Marangon (2009).

A Figura 15, apresenta o esquema para ensaio com carga variável, em que é necessário anotar a carga hidráulica inicial, e a carga hidráulica final, para calcular a condutividade hidráulica, através da Equação 5.

$$k = 2,3 \cdot \frac{a \cdot l}{A \cdot t} \log \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo: l = altura da amostra (cm);

A = área da amostra onde flui a água (cm^2);

a = área do tubo de carga (cm^2);

h_1 = carga hidráulica inicial (cm);

h_2 = carga hidráulica final (cm);

t = tempo de escoamento da água (s);

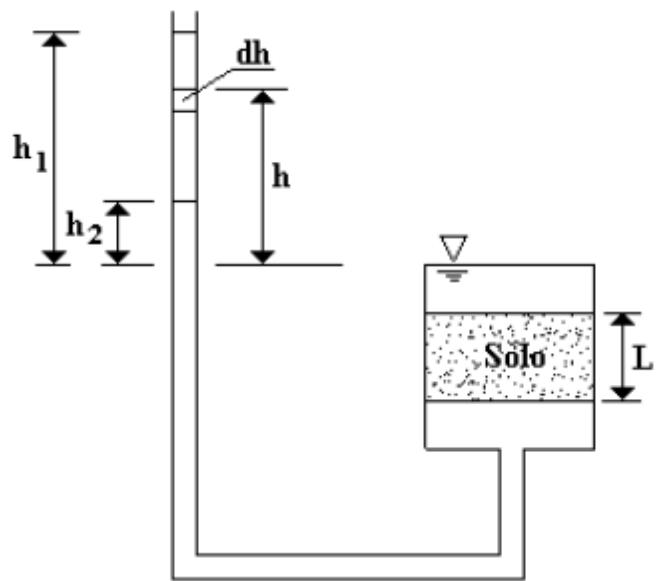


Figura 15: Ensaio de permeabilidade com carga variável. Fonte: Marangon (2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 AREIA

A areia utilizada nos ensaios é uma areia grossa a média lavada marrom claro, cuja curva de distribuição granulométrica se encontra na Figura 16. Adotou-se para a massa específica dos sólidos (ρ_s) o valor de 2,65 g/cm³.

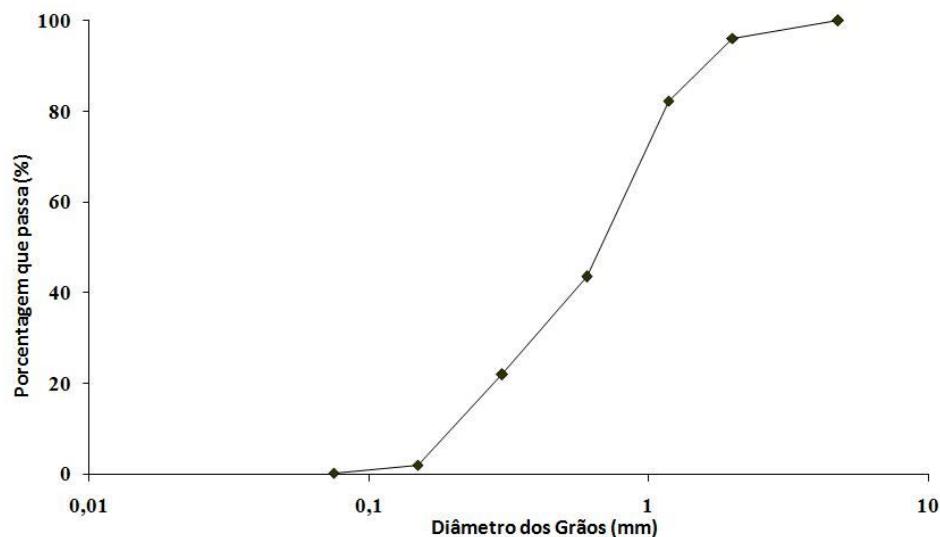


Figura 16: Curva Granulométrica da areia.

3.1.2. AREIA ARGILOSA

Foi utilizado um solo típico do interior do Estado de São Paulo, coletado no Campus 2 da Universidade de São Paulo, cidade de São Carlos-SP, em uma profundidade de aproximadamente um metro. Trata-se de um solo laterítico cuja origem geológica é sedimentar cenozóica, produto do retrabalhamento dos materiais do Grupo Bauru e das Formações Serra Geral e Botucatu.

As amostras de solo foram devidamente acondicionadas em sacos plásticos e transportadas até o laboratório de Mecânica dos Solos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), onde foi realizada a caracterização do material por Georgetti (2012), para trabalho que se encontra em andamento (informação verbal). Assim estão aqui apresentadas as caracterizações que foram feitas.

O solo estudado foi classificado quanto à sua textura como uma areia média a fina argilosa marrom escuro, composta por 67,3% de areia, 27,5% de argila e 5,2% de silte, como mostra a Figura 17. A massa específica dos sólidos e os limites de consistência obtidos para este solo são apresentados na Tabela 3.

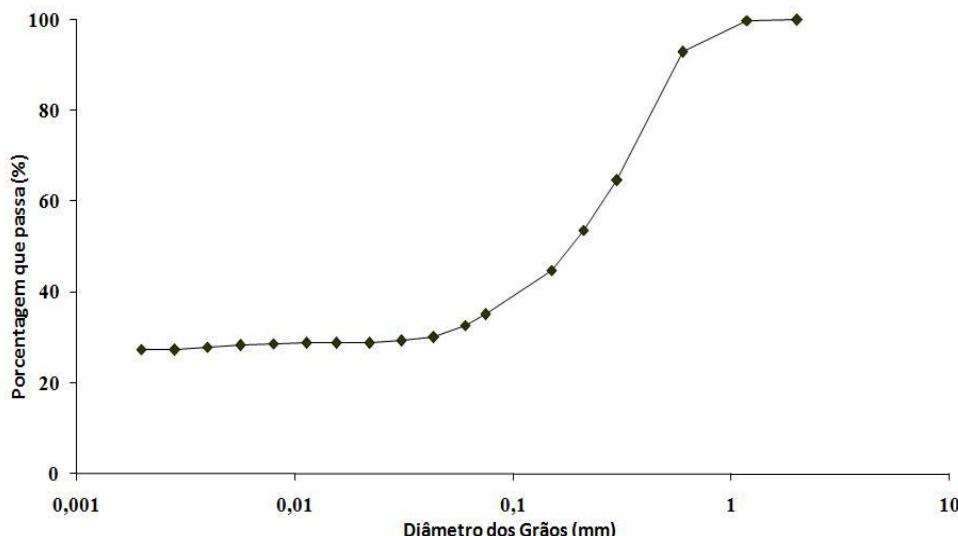


Figura 17: Curva Granulométrica do solo

Tabela 3: Características do solo

Massa específica dos sólidos	Limite de liquidez	Limite de plasticidade	Índice de plasticidade
2,63g/cm ³	32%	15%	16%

O ensaio de compactação na energia Proctor normal foi realizado com cinco pontos, sendo obtidos massa específica seca máxima de 1,80 g/cm³ e teor de umidade ótimo de 13,8%. Na Figura 18 está apresentada a curva de compactação.

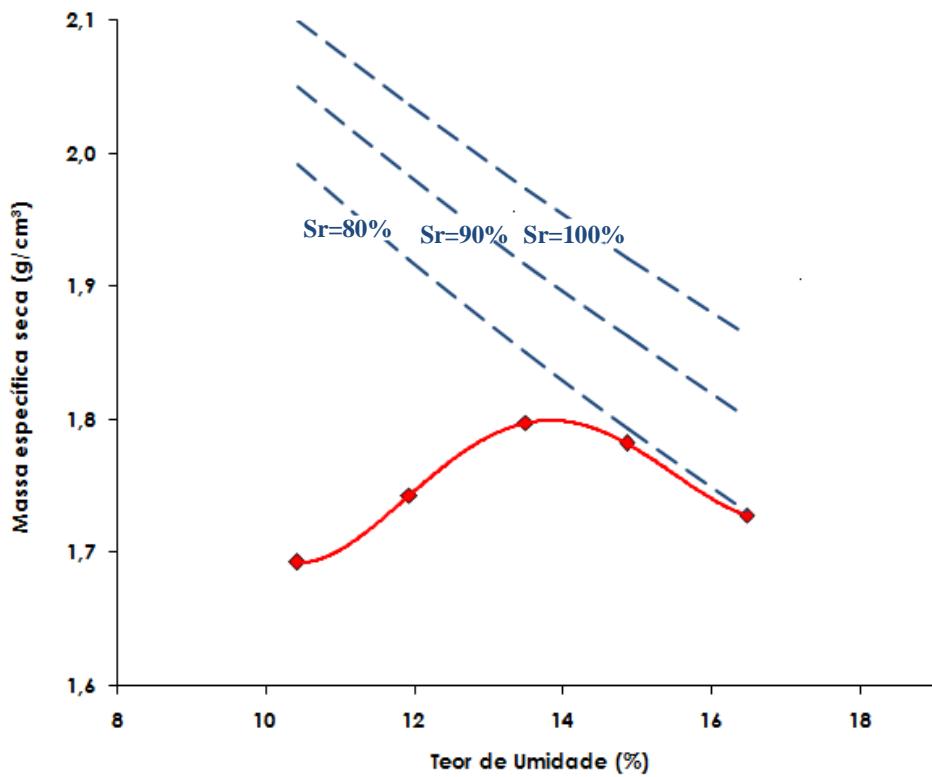


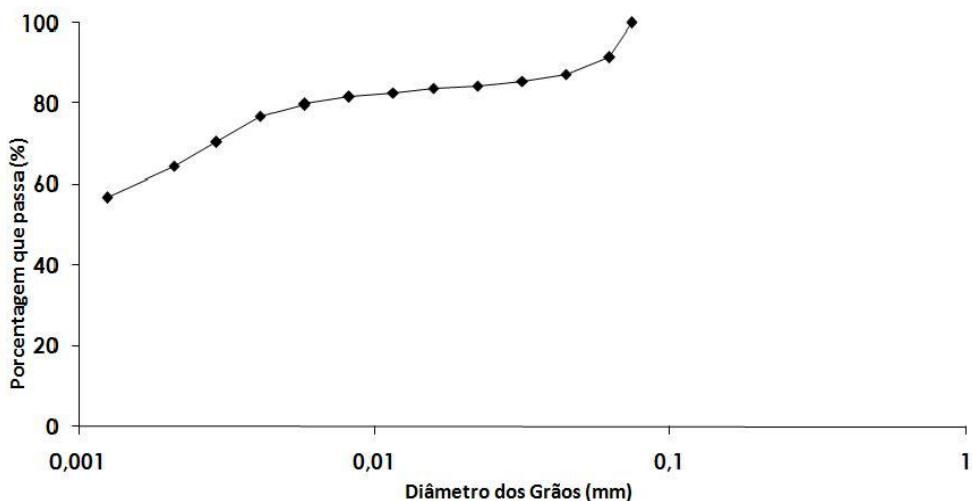
Figura 18: Curva de compactação na energia Proctor normal

3.1.3. BENTONITA

A bentonita utilizada para a realização dos ensaios é comercialmente denominada de “Brasgel”, e é comercializada pela Empresa Bentonit União Nordeste S.A. A Tabela 4 apresenta a composição química e a Figura 19, a curva granulométrica da Bentonita Brasgel.

Tabela 4: Composição Química da bentonita Brasgel. Fonte : Amorim Et al. (2004)

Componentes (%)	
Perda ao Rubro - PR	18,37
Resíduos Insolúveis - RI	2,14
SiO ₂	51,69
Fe ₂ O ₃	7,19
Al ₂ O ₃	18,76
CaO	Traços
MgO	Traços
Na ₂ O	1,5
K ₂ O	0,23
Total	99,88

**Figura 19: Curva Granulométrica da bentonita Brasgel.**

3.2. MÉTODOS

Foram realizados diversos ensaios de permeabilidade com diferentes amostras. Em todos os ensaios realizados as amostra foram submetidas a uma carga hidráulica constante. O valor da condutividade hidráulica foi determinado pela quantidade de água que percolou a amostra para um dado intervalo de tempo. A quantidade de água foi medida por uma proveta

graduada, determinando-se assim a vazão. E a partir da vazão utilizando-se a equação 4, já citada anteriormente, foi calculado o valor da condutividade hidráulica.

Foram realizadas duas séries de ensaios, a primeira série foi feita com corpos de prova com areia grossa a média, pois seria mais fácil notar a variação da permeabilidade por ser um tipo de solo mais permeável. A segunda série foi realizada com o solo descrito anteriormente, que é uma areia média a fina argilosa.

Para realização dos ensaios foram preparadas suspensões de bentonita com diferentes concentrações. Assim, inicialmente mediou-se a condutividade hidráulica do corpo de prova passando água. Em seguida, percolou-se a suspensão pelo corpo de prova, que havia sido moldado em um permeâmetro de parede rígida, a fim de verificar se de alguma forma essa suspensão de bentonita passando pelo corpo de prova poderia diminuir sua permeabilidade, seja penetrando o corpo de prova ou formando uma camada sobre este. E por fim, em alguns casos percolou-se água novamente para verificar se a condutividade hidráulica teria alguma variação.

Nos ensaios realizados com areia argilosa, durante o período em que a suspensão de bentonita percolou o solo, ficou circulando a suspensão de bentonita o tempo todo, inclusive durante a noite. Já nos ensaios feitos com areia não foi possível realizar dessa forma pois, devido à alta permeabilidade da areia, a suspensão percola muito rápido, assim seria necessário um volume muito grande de suspensão para que não houvesse o risco do permeâmetro ficar sem líquido sobre o corpo de prova, sendo assim, ficou passando a suspensão de bentonita pelo corpo de prova durante longos períodos durante o dia, em seguida tampava-se a saída do permeâmetro para que não passasse toda a suspensão durante a noite, impedindo assim que o solo secasse.

Embora algumas amostras apresentassem permeabilidade baixa, todos os ensaios foram feitos com carga hidráulica constante, para facilitar o uso do sistema para percolar a suspensão de bentonita.

Para preparar os corpos de prova com areia, foi montado o permeâmetro de parede rígida com altura de 20 cm e diâmetro de 15,35 cm, e foi pesado aproximadamente 1500 g do solo, para que este ocupasse todo o volume do permeâmetro até uma altura de 5 cm. O solo foi colocado no permeâmetro, sem ser compactado. Para os permeâmetros com areia foram feitos três ensaios com suspensão de bentonita com diferentes concentrações (7g/L, 4g/L e 10g/L).

Os ensaios de condutividade hidráulica para o solo (areia argilosa) compactado também foram realizados em permeâmetros de parede rígida com altura de 20 cm e diâmetro

de 15,35 cm. Foram feitos seis ensaios, que serão descritos abaixo. Para os quatro primeiros ensaios montou-se um corpo de prova que ocupava toda a área do permeâmetro até a altura de 10 cm e procurou-se atingir grau de compactação de 90% e teor de umidade de 13,8%. O quinto ensaio foi preparado com o mesmo grau de compactação e umidade, porém com uma altura de 5 cm, e o corpo de prova para o sexto ensaio foi preparado com altura de 5 cm, grau de compactação de 90% e teor de umidade de 11%.

Inicialmente foram realizados os cálculos para saber a massa do solo que deveria ser colocada no permeâmetro, para que este atingisse o grau de compactação desejado.

Para calcular a massa do solo que deve ser compactado no permeâmetro.

$$m_{\text{solo}} = \rho_{dmáx} \cdot vol \cdot GC \cdot (1 + w) \quad \text{Equação 6}$$

m_{solo} = massa do solo para compactação

$\rho_{dmáx}$ = massa específica seca máxima

vol = volume do corpo de prova

GC = grau de compactação do corpo de prova

w = teor de umidade para compactação do solo.

w_{ot} = teor de umidade ótimo para compactação do solo.

Assim sabendo que $GC = 90\%$, $\rho_{dmáx} = 1,80\text{g/cm}^3$, e considerando:

para os quatro primeiros ensaios:

$$w = w_{ot} = 13,8\% \text{ e } vol = 1838,54 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{solo}} = 3389,5\text{g}$$

Para o quinto ensaio:

$$w = w_{ot} = 13,8\% \text{ e } vol = 919,27 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{solo}} = 1694,75\text{g}$$

Para o sexto ensaio:

$$w = 11,0\% \text{ e } vol = 919,27 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{solo}} = 1653,0\text{g}$$

Para calcular o volume de água que deveria ser adicionada para preparar o corpo de moldagem utilizou-se a seguinte equação:

$$Vol = \left(\frac{m}{\left(1 + \frac{w_m}{100} \right)} \right) * \left(\frac{w}{100} - \frac{w_m}{100} \right) \quad \text{Equação 7}$$

Onde,

m = massa do solo a ser homogenizada

w_m = teor de umidade do solo

w = teor de umidade para compactação do solo.

Sabendo que o teor de umidade (w_m) do solo era de 1,03%, e considerando que por segurança seria necessário homogenizar um pouco a mais do que a quantidade de solo calculada para moldar o corpo de prova, calculou-se a quantidade de água que deveria ser adicionada ao solo para que este atingisse o teor de umidade desejado.

A preparação do corpo de prova foi realizada da seguinte maneira.

- 1) Adição da água na quantidade necessária;
- 2) Homogeneização do solo com auxílio da peneira de malha 4 mm;
- 3) O solo foi acondicionado em sacos plásticos e deixado em repouso por algumas horas a fim de se obter a completa homogeneização do material.

A compactação do corpo de prova foi feita no próprio permeâmetro com o auxílio de um compactador e foi realizada em duas etapas para os corpos de prova com altura de 10 cm, e em uma etapa para os corpos de prova com altura de 5 cm. Em seguida foi colocada uma pedra porosa sobre o solo compactado para que não houvesse a possibilidade da água perfurar o solo quando entrasse no permeômetro, como mostra a Figura 20.

Para todos os ensaios o tempo para a fase de saturação dos corpos de prova foi de pelo menos 24 horas, para a partir daí começar a medir a permeabilidade.

As suspensões de bentonita foram preparadas em galões de 20 L, inicialmente foi pesado a massa necessária de bentonita, de acordo com a concentração que desejava-se obter, em seguida dilui-se a bentonita em uma pequena quantidade de água para em seguida adicioná-la no galão, acrescentando água até encher o galão, que foi agitado manualmente até que a suspensão ficasse homogênea. Todas as suspensões de bentonita foram preparadas pelo menos 24 horas antes de começar a percolar para que a bentonita pudesse hidratar



Figura 20: Permeâmetro com o corpo de prova preparado para ensaio.

Após a suspensão ser deixada em repouso montou-se um sistema para percolar bentonita pelo corpo de prov. Nesse sistema a suspensão de bentonita passava do galão para um módulo de carga constante que determinava a altura da carga hidráulica, como mostrado nas Figuras 21 e 22. Os ensaios com água foram feitas da mesma forma, passando pelo módulo de carga constante que aparece a esquerda na foto.



Figura 21: Esquema montado para ensaio com permeâmetros de parede rígida e carga constante, para percolar água e bentonita.



Figura 22: Permeômetro aberto ao final do ensaio, e permeômetro percolando bentonita.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

4.1 ENSAIO 1: MEDIDA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO CORPO DE PROVA COM AREIA.

O corpo de prova deste ensaio foi preparado com areia seca no permeâmetro com altura de 20 cm e diâmetro de 15,35 cm, e foi pesado 1575 g do solo. Assim, o corpo de prova apresentava massa específica seca ρ_d de $1,70\text{g/cm}^3$. Sabendo que a massa específica dos sólidos ρ_s é de 2,65, pode-se calcular o índice de vazios (e) pela Equação 6.

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

Equação 8

Assim, encontra-se índice de vazios de 0,56.

Este ensaio foi realizado com água para verificar se haveria variação na condutividade hidráulica apenas passando água pelo corpo de prova. A Figura 23 mostra a condutividade hidráulica ao longo do tempo e pode-se notar que o valor se manteve constante durante as 140 horas em que se realizaram medidas, encontrando-se um valor médio de $5,9 \cdot 10^{-3}\text{cm/s}$.

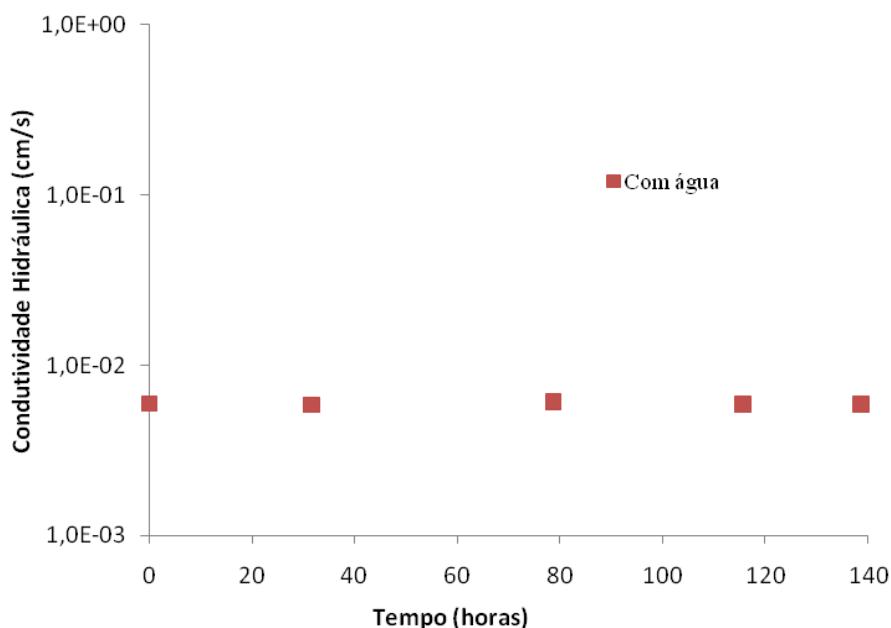


Figura 23: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com areia, percolando água.

4.2. ENSAIO 2: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 7 g /L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA.

Para o segundo ensaio com areia foi preparada uma suspensão de 7g/L de bentonita. O corpo de prova deste ensaio foi preparado 1557 g de areia, assim, o corpo de prova apresentava massa específica seca (ρ_d) de 1,68g/cm³, e índice de vazios (e) de 0,57.

No início o valor da condutividade hidráulica, medido com água, era de $4,1 \cdot 10^{-3}$ cm/s. Após aproximadamente 50 horas de ensaio com a suspensão de bentonita o valor caiu para $2,7 \cdot 10^{-4}$ cm/s. A partir daí voltou-se a percolar água e a condutividade hidráulica aumentou muito pouco, atingindo o valor de $3,0 \cdot 10^{-3}$ cm / s , após aproximadamente 130 horas de ensaio (Figura 24.)

Após o último ensaio o permeâmetro foi desmontado, para verificar o que ocorreu com a bentonita e notou-se que toda a bentonita permaneceu sobre a areia, formando uma camada que apresentava diversas trincas (Figura 25).

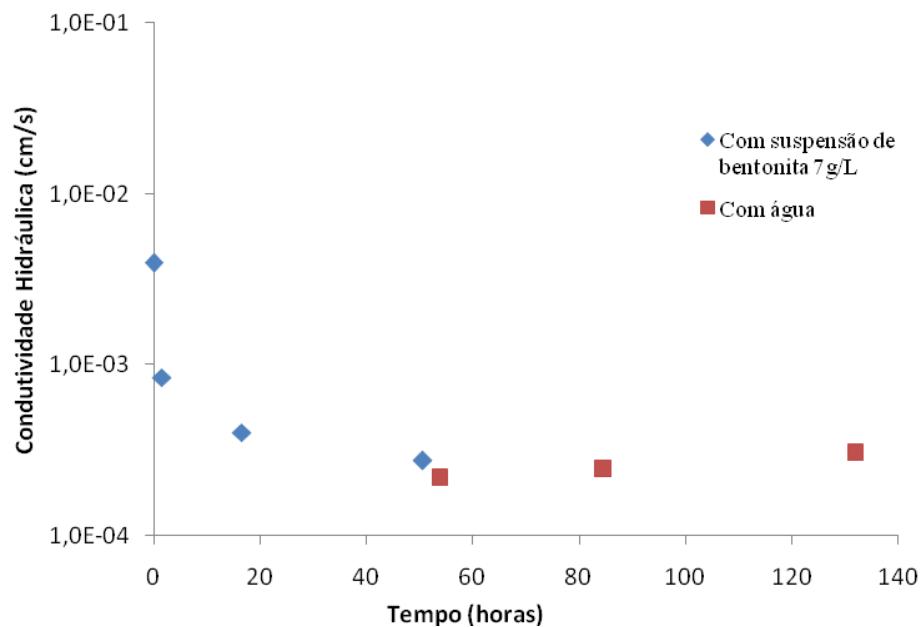


Figura 24: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com areia percolando suspensão de bentonita (7g/L)

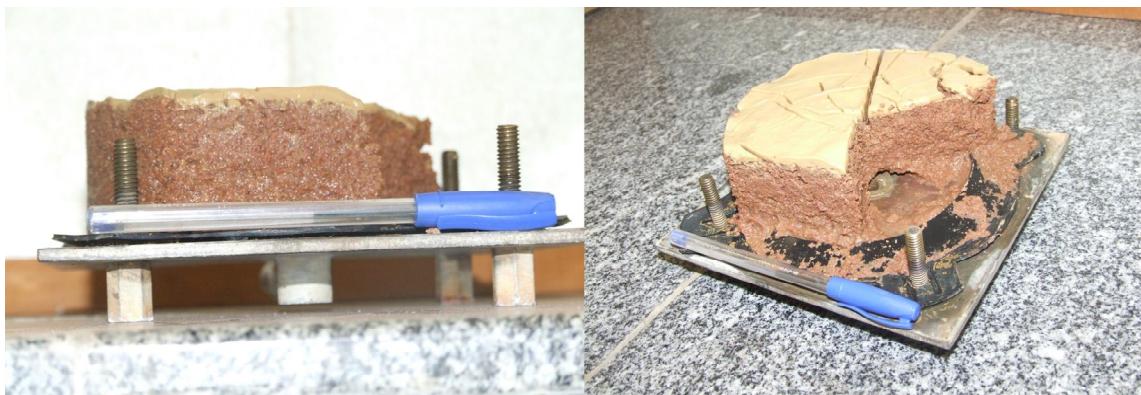


Figura 25: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (7g/L).

4.3 ENSAIO 3: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 4 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA.

Para o ensaio 3 o corpo de prova foi preparado com 1532 g de areia, assim, o corpo de prova apresentava massa específica seca ρ_d de $1,66 \text{ g/cm}^3$, e índice de vazios (e) de 0,60. Preparou-se uma suspensão de bentonita de 4 g/L para percolar o corpo de prova com areia. A permeabilidade inicial encontrada foi de $6,1 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$. Após, aproximadamente 5 horas de ensaio com a suspensão de bentonita a permeabilidade já caiu para $9,0 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$, e após esse momento variou pouco, chegando a $5,1 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$, com aproximadamente 70 horas de ensaio. A partir de então, voltou-se a percolar água, encontrando o valor de $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$ após aproximadamente 125 horas de ensaio (Figura 26).

Alguns dias depois o permeômetro foi desmontado para analisar o comportamento da bentonita. Pode-se observar que a bentonita não penetrou na areia, apenas formou uma camada sobre o corpo de prova, com espessura de aproximadamente 8 cm, e diversas trincas como mostram as Figuras 27 e 28.

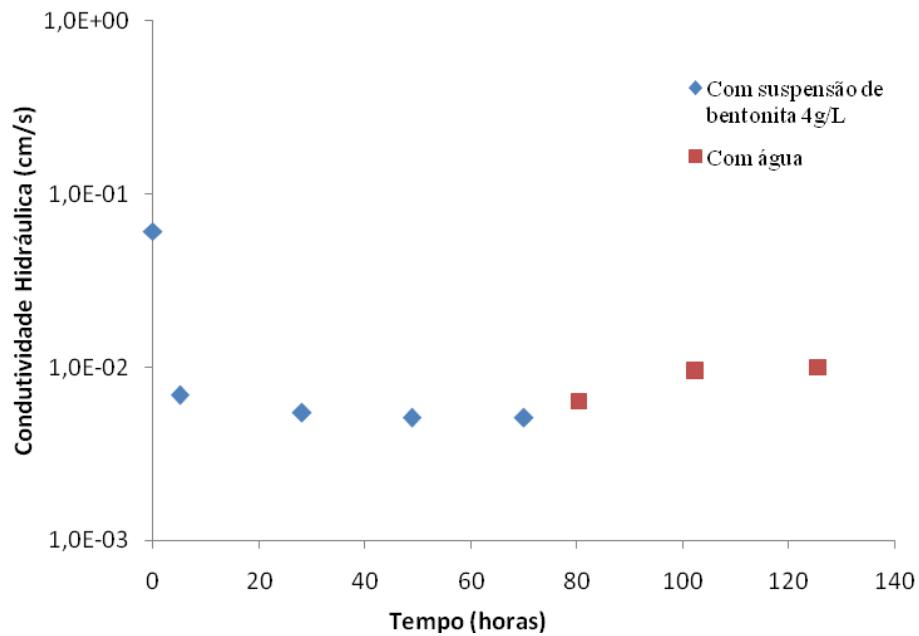


Figura 26: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com areia percolando suspensão de bentonita (4g/L)



Figura 27: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (4g/L), (a)após abrir o permeâmetro; (b) após desmontar o permeâmetro.



Figura 28: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (4g/L), aps desmontar o permeâmetro.

4.4. ENSAIO 4 : CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 10 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA.

Para o último ensaio com areia, o corpo de prova foi preparado com 1575 g de areia, assim, o corpo de prova apresentava massa específica seca ρ_d de $1,70\text{g/cm}^3$, e índice de vazios (e) de 0,56. A concentração da suspensão preparada para este ensaio era de 10g/L.

A condutividade hidráulica encontrada inicialmente foi de $6,0 \cdot 10^{-3}\text{ cm/s}$, apenas após alguns minutos circulando a suspensão com bentonita o valor da condutividade hidráulica caiu para $2,5 \cdot 10^{-4}\text{ cm/s}$. Após, aproximadamente 40 horas de ensaio, o valor da condutividade hidráulica era de $1,0 \cdot 10^{-5}\text{ cm/s}$. Em seguida voltou-se a percolar água, medindo-se a condutividade hidráulica de $4,1 \cdot 10^{-6}\text{ cm/s}$ após aproximadamente 140 horas.

Logo em seguida, o permeâmetro foi desmontado e pode-se observar que a bentonita não penetrou na areia, apenas formou uma camada sobre o corpo de prova, com espessura de aproximadamente 6 cm, que apresentava duas grandes trincas (Figuras 30 e 31)

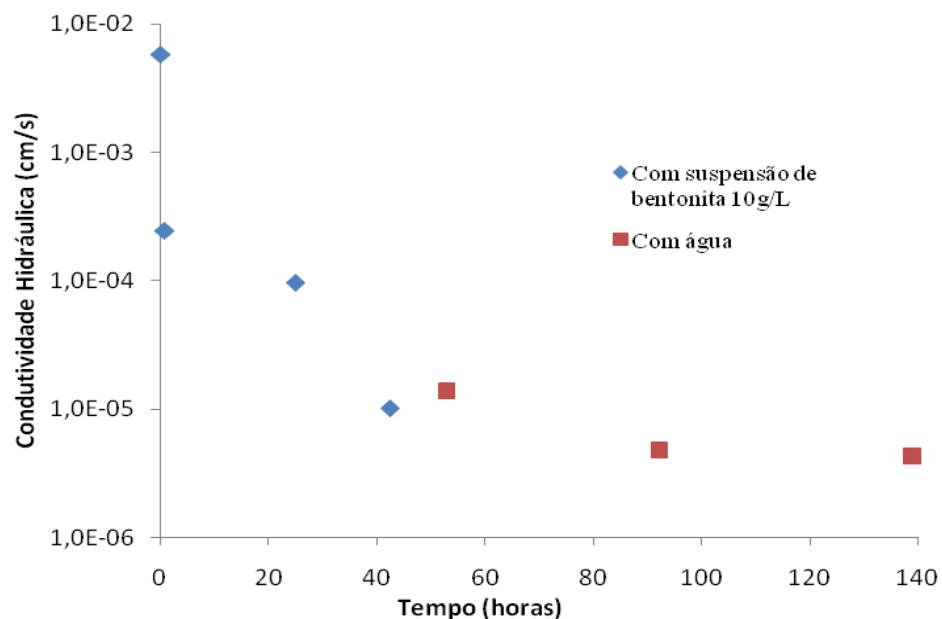


Figura 29: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com areia percolando suspensão de bentonita (10 g/L)



Figura 30: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (10g/L), (a)após abrir o permeâmetro; (b) após desmontar o permeâmetro.



Figura 31: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (10g/L).

A partir desses ensaios realizados com areia, pode-se verificar que a percolação de bentonita pelo corpo de prova realmente diminui a condutividade hidráulica do solo, porém notou-se que em nenhum dos ensaios a bentonita penetrou no corpo de prova, apenas depositando-se sobre o solo e formando uma camada sobre este. Além disso, verificou-se a formação de trincas na camada de bentonita, que provavelmente, são as responsáveis pela condutividade hidráulica ter aumentado no ensaio 2 e no ensaio 3, após passar água por um tempo. Isto não ocorreu no ensaio 4, provavelmente porque, como a concentração da suspensão de bentonita era maior, mesmo depois que voltou a percolar água pelo corpo de prova, ainda havia bentonita decantando sobre a areia. A partir desses resultados decidiu-se realizar ensaios semelhantes com um solo típico da região, para verificar se o que ocorreu nesses ensaios se repetiria em ensaios com solo.

4.5 ENSAIO 5: MEDIDA DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA.

O primeiro ensaio realizado com solo foi preparado com um corpo de prova com altura de 10 cm, compactado com 90% de grau de compactação e teor de umidade de compactação de 13,8%. O corpo de prova deste ensaio foi preparado 3390 g de areia, assim, sabendo que a massa específica dos sólidos (ρ_s) do solo era de 2,63 g/cm³, o corpo de prova apresentava massa específica seca ρ_d de 1,83 g/cm³, e índice de vazios (e) de 0,44.

Esse ensaio foi feito apenas para verificar se a permeabilidade do corpo de prova variaria passando apenas água. Este ensaio durou 34 dias, aproximadamente 816 horas, passando água continuamente. Montou-se o ensaio e deixou-se passando água por 3 dias antes de começar a medir para elevar o grau de saturação do solo. A partir desse momento, começou-se a medir a condutividade hidráulica em horários diversos quase todos os dias, fazendo-se a média do dia para plotar o gráfico. O resultado está apresentado na Figura 32.

Pelo gráfico pode-se notar que a condutividade hidráulica diminui ao longo do tempo, em cerca de uma ordem de grandeza. O valor inicial era $3,0 \cdot 10^{-4}$ cm/s, e após 800 horas de ensaio, o valor reduziu-se a $4,4 \cdot 10^{-5}$ cm/s, mostrando uma tendência à estabilização. Uma possível causa para essa redução pode ser a migração de finos movimentados pelo fluxo e que tendem a obstruir alguns vazios, diminuindo, por consequência, a área disponível para fluxo.

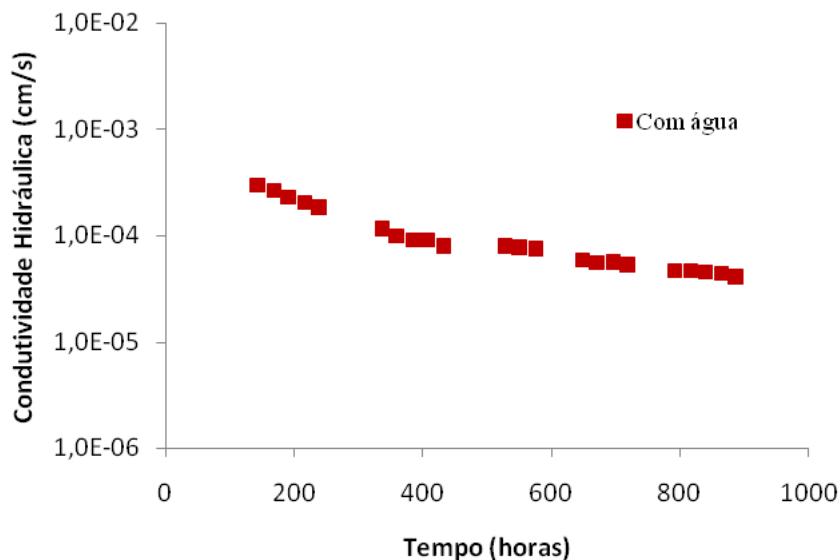


Figura 32: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo, para solo com compactação de 90% e ensaio com água.

4.6. ENSAIO 6: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 40 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA.

Este ensaio foi realizado com corpo de prova de solo compactado, com os mesmos parâmetros do anterior ($GC = 90\%$, $h = 10\text{ cm}$, $w_{ot} = 13,8\%$, $\rho_d = 1,83\text{ g/cm}^3$, e $e = 0,44$) e foi feito com suspensão de bentonita com concentração de 40 g/L , para verificar qual seria o impacto de uma suspensão com uma concentração alta. Inicialmente mediu-se a condutividade hidráulica do corpo de prova com água encontrando valor médio de $9,2 \cdot 10^{-5}\text{ cm/s}$, e em seguida começou-se a passar a suspensão de bentonita, e foi-se medindo ao longo do tempo.

Em aproximadamente 24 horas a condutividade já chegou a $4,7 \cdot 10^{-7}\text{ cm/s}$. Após esse tempo foi possível notar visualmente que a permeabilidade diminuiu um pouco mais, porém como a permeabilidade estava muito abaixo do que se costuma medir com um ensaio com carga constante, não foi possível medi-la. Algumas horas depois voltou-se a passar água pelo corpo de prova e pode-se notar que a condutividade hidráulica aumentou, porém apresentando muitas variações. Em alguns momentos era visível que a permeabilidade do corpo aumentava bastante e em seguida voltava a diminuir. Ainda assim a permeabilidade do corpo de prova apresentava muito abaixo do encontrado no início. Em seguida o permeômetro foi desmontado e verificou-se que existia uma grossa camada de bentonita sobre o corpo de prova, porém a camada de bentonita apresentava diversas trincas, como pode-se ver nas figura 34 e 35, provável razão das variações repentinas de permeabilidade. A figura 33 apresenta a variação média da permeabilidade ao longo do tempo.

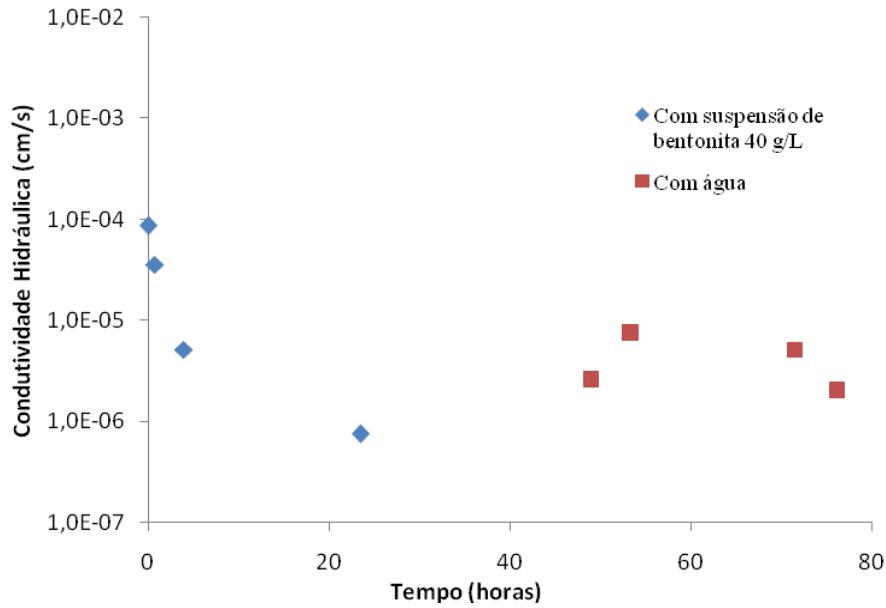


Figura 33: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo, para corpo de prova com solo com compactação de 90% e ensaio com suspensão de bentonita 40g/L seguido por água.



Figura 34: Permeômetro um pouco antes de ser desmontado, ainda com um pouco de água e sem água.



Figura 35: Corpo de prova, após percolar suspensão de bentonita (40g/L).

4.7. ENSAIO 7: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 4 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA.

Após o ensaio com a suspensão de bentonita 40g/L, montou-se um permeâmetro com o corpo de prova moldado da mesma forma ($GC = 90\%$, $h = 10 \text{ cm}$, $w_{ot} = 13,8\%$, $\rho_d = 1,83 \text{ g/cm}^3$, e $e = 0,44$), porém para passar uma suspensão com concentração bem mais baixa, 4g/L. Inicialmente o valor encontrado para condutividade hidráulica, percolando-se apenas água foi de $3,8 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$. Em seguida, começou-se a passar a suspensão de bentonita pelo corpo de prova, e a medir a condutividade hidráulica novamente. Nas primeiras 30 horas pode-se notar uma diminuição na condutividade hidráulica, sendo que o valor encontrado após aproximadamente 30 horas foi de $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$. A partir deste momento, embora a permeabilidade continuasse diminuindo, em alguns momentos o corpo de prova apresentava um valor um pouco mais alto de condutividade hidráulica, e em seguida voltava a diminuir, após 96 horas atingiu seu menor valor, $2,0 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$. A partir daí os valores continuaram variando, porém na média começaram a aumentar. Após aproximadamente 148 horas, abriu-se o permeâmetro para fotografar (Figura 37-a) e voltou-se a percolar água pelo corpo de prova. A condutividade continuou aumentando, porém com uma variação muito pequena ao longo do tempo, como pode ser visto na Figura 36. Após aproximadamente 196 horas de ensaio o permeâmetro foi aberto e pode-se notar que havia uma fina camada de bentonita sobre o corpo de prova com muitas trincas, como mostram as Figuras 38 e 39.

Observando-se a imagem pode-se notar que após 148 horas de ensaio, embora a permeabilidade já variasse bastante de um momento para o outro, a camada de bentonita sobre o corpo de prova quase não apresentava trincas, porém isso pode ter ocorrido porque ainda estava percolando suspensão de bentonita pelo corpo de prova. Sendo assim, é possível que tenham surgido trincas que posteriormente foram preenchidas com bentonita.

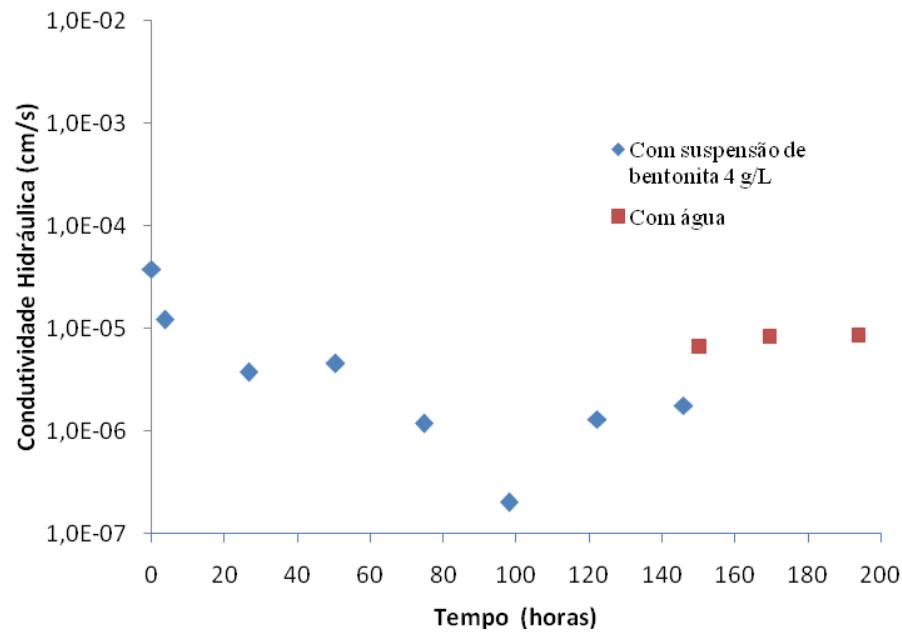


Figura 36: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com solo compactado (90%) percolando suspensão de bentonita (4g/L).



Figura 37: Permeâmetro com o corpo de prova e coberto com bentonita, (a) após aproximadamente 148 horas de ensaio; (b) ao final do ensaio ainda com um pouco de água.



Figura 38: (a)Permeâmetro com o corpo de prova e coberto com bentonita, já sem água (b) corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado.



Figura 39: (a) corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado; (b) detalhe para observar a fina camada de bentonita formada sobre o corpo de prova.

4.8. ENSAIO 8: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 2 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA.

Para o oitavo ensaio foi preparado um permeâmetro com o corpo de prova moldado nas mesmas condições dos anteriores ($GC = 90\%$, $h = 10 \text{ cm}$ $w_{ot} = 13,8\%$, $\rho_d = 1,83 \text{ g/cm}^3$, e $e = 0,44$), porém a suspensão de bentonita foi preparada com concentração de 2g/L. Esse ensaio foi mais difícil de realizar, pois a bentonita da suspensão estava decantando muito facilmente, sendo necessário agitar o galão diversas vezes durante o ensaio. Além disso, os valores de condutividade hidráulica não apresentaram uma variação muito grande, mesmo após aproximadamente 96 horas de ensaio com a suspensão. Após esse tempo, voltou-se a percolar água pelo corpo de prova, os valores de condutividade hidráulica apresentaram um pequeno aumento no começo, mas logo voltaram a se manter constantes. Após aproximadamente 192 horas de ensaio, notando que a permeabilidade não apresentava mais variações, decidiu-se abrir o permeâmetro, agitar a bentonita que estava decantada sobre o corpo de prova, e deixar o permeâmetro aberto para medir condutividade hidráulica nessa situação. Notou-se, a partir desse momento, que os valores de condutividade hidráulica voltaram a cair rapidamente. Na Figura 40 pode-se verificar a variação da condutividade hidráulica ao longo do tempo.

Nas Figuras 41 e 42 tem-se a situação de como ficou a amostra após o permeâmetro ter sido desmontado, onde se pode notar que ele apresenta uma fina camada de bentonita, apenas com uma pequena trinca.

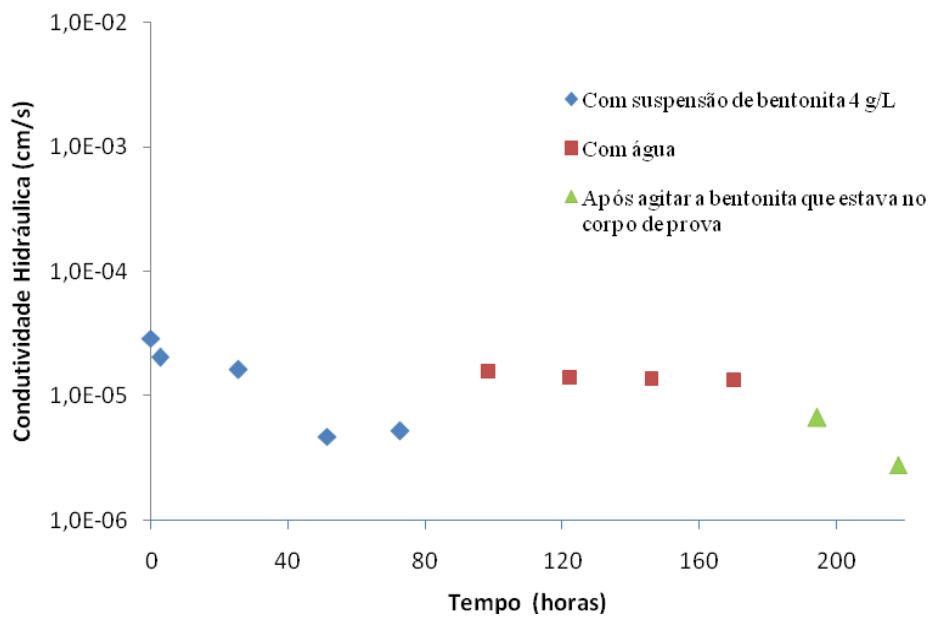


Figura 40: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com solo compactado (90%) percolando suspensão de bentonita (2g/L)



Figura 41: a)Permeâmetro com o corpo de prova e coberto com bentonita, já sem água (b) corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado.



Figura 42: Corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado.

4.9. ENSAIO 9: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 4 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA COM 13,8% DE UMIDADE, COM O PERMEÂMETRO ABERTO.

Para este ensaio, o corpo de prova foi preparado com os mesmos parâmetros anteriores ($GC=90\%$ e $w_{ot}=13,8\%$ $\rho_d = 1,83 \text{ g/cm}^3$, e $e = 0,44$), porém com uma altura de apenas 5 cm. E utilizou-se uma suspensão de bentonita com concentração de 4g/L, já que anteriormente esta apresentou bons resultados, sem gastar muita bentonita.

Esse ensaio foi feito sem utilizar o módulo de carga constante apenas vertendo a suspensão de bentonita diretamente no permeâmetro, para relizar um ensaio mais próximo da realidade. Para este ensaio o permeâmetro foi deixado aberto e foi adicionado água até uma altura de 17 cm, ou seja 3 cm abaixo do limite do permeâmetro, em seguida foi adicionado suspensão de bentonita aos poucos, conforme a água ia passando pelo corpo de prova, mantendo sempre o mesmo nível de líquido sobre o solo. A Figura 43, apresenta a variação da condutividade hidráulica ao longo do tempo para esse ensaio.

Inicialmente o valor da condutividade hidráulica era de $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$. Após aproximadamente 24 horas, notou-se que a permeabilidade estava diminuindo porém muito devagar, isso provavelmente devido ao fato de que, como a carga hidráulica era muita baixa, o líquido estava percolando muito lentamente e assim até o momento havia sido adicionado apenas cerca de 200mL de suspensão, sendo que no total havia aproximadamente 2.200mL de líquido no permeâmetro. Sendo assim, para que toda a suspensão sobre o solo ficasse com uma concentração de 4g/L, adicionou-se aproximadamente 8g de bentonita no permeâmetro, agitando para que ela dissolvesse na suspensão, e voltou-se a medir a condutividade hidráulica. A partir desse momento a permeabilidade foi diminuindo mais rapidamente, atingindo o valor da condutividade hidráulica de $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$, após, aproximadamente, 80 horas de ensaio.

Ao final do ensaio o permeâmetro foi desmontado e notou-se uma fina camada de bentonita sobre o corpo de prova (Figura 45), essa camada apresentava algumas pequenas trincas. Porém, observando-se a Figura 44, pode-se notar que essas trincas surgiram apenas depois que a camada secou.

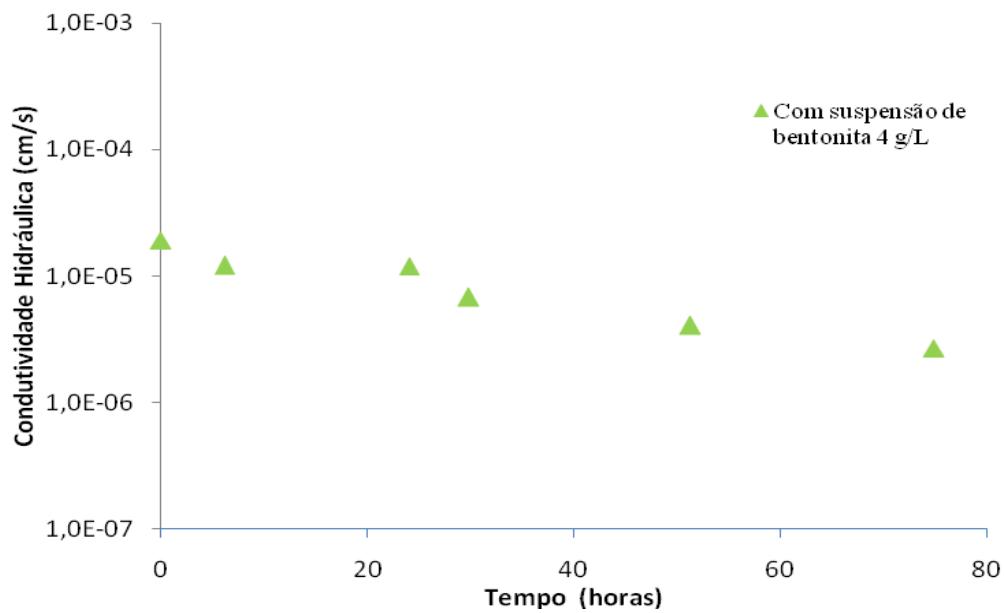


Figura 43: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com solo compactado (90%) percolando suspensão de bentonita (4g/L)



Figura 44: (a) Permeâmetro durante o ensaio; (b) permeâmetro ao final do ensaio.



Figura 45: Corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado.

4.10. ENSAIO 10: CIRCULAÇÃO DE SUSPENSÃO DE BENTONITA NA CONCENTRAÇÃO DE 4 g/L, PELO CORPO DE PROVA COM AREIA ARGILOSA COMPACTADA COM 11,0% DE UMIDADE, COM O PERMEÂMETRO ABERTO.

O último corpo de prova foi moldado com grau de compactação de 90% e altura de 5 cm, mas, considerando teor de umidade para compactação do solo de 11%. Assim, esse corpo de prova tem as seguintes características: massa específica seca, (ρ_d), $1,78 \text{ g/cm}^3$ e índice de vazios de solo (e), 0,47. Isso foi feito, para que a condutividade hidráulica inicial desse corpo de prova fosse maior do que dos anteriores, e assim fosse possível verificar melhor a variação desta.

A suspensão utilizada neste ensaio também foi a de concentração 4g/L. Assim como o corpo de prova do ensaio anterior, esse também foi moldado com 5cm de altura e o ensaio foi realizado com o permeâmetro aberto com o líquido em uma altura de 17 cm. Inicialmente foi medida a condutividade hidráulica passando apenas água, encontrando-se o valor de $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$. Para não ocorrer o mesmo problema que no ensaio anterior, em que a suspensão de bentonita estava sendo colocada no permeâmetro muito vagarosamente, nesse ensaio após medir-se a permeabilidade com água na altura de 17 cm, retirou-se um pouco de água até que a altura da água fosse de apenas 13 cm, então completou-se com suspensão de bentonita até a altura de 17 cm, adicionando-se assim aproximadamente 740 mL de suspensão. Esse último ensaio foi realizado dessa forma, pois acredita-se que é a forma que mais se aproxima da realidade.

Após ser adicionada a suspensão de bentonita, pode-se verificar que a condutividade hidráulica diminuiu rapidamente, e após aproximadamente 50 horas a condutividade ficou praticamente constante com o valor médio de $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}$, como pode ser visto na Figura 46. Em seguida o permeâmetro foi desmontado, observando-se uma fina camada de bentonita sobre o corpo de prova sem nenhuma rachadura (Figuras 47 e 48).

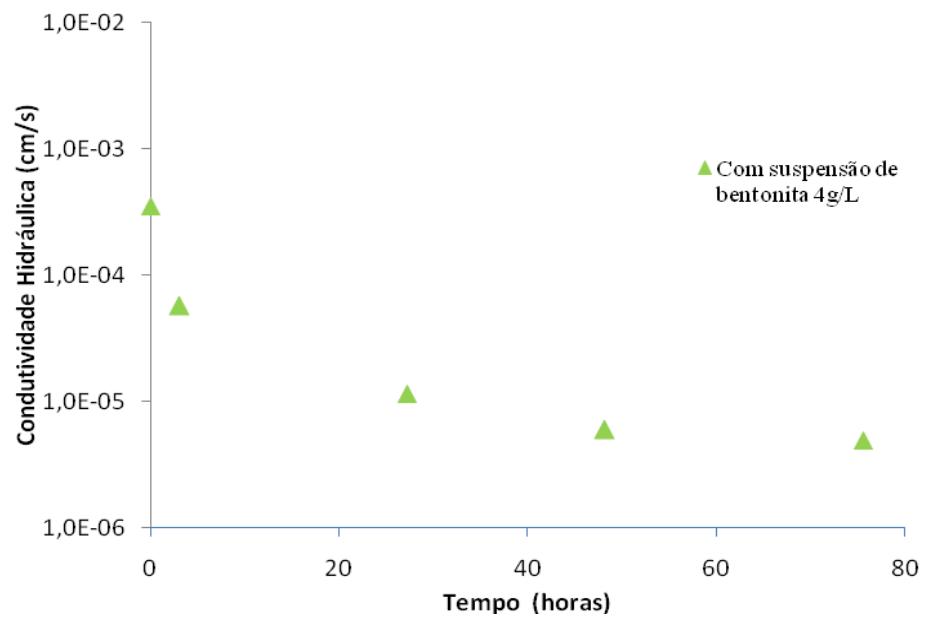


Figura 46: Variação da condutividade hidráulica em função do tempo para corpo de prova feito com solo compactado (90%) percolando suspensão de bentonita (4g/L)



Figura 47: (a) Permeâmetro durante o ensaio; (b) Permeâmetro ao final do ensaio.



Figura 48: Corpo de prova após o permeâmetro ser desmontado.

Comparando-se os ensaios com areia e com o solo pode-se dizer que o resultado de ambos foi semelhante, porém durante os ensaios com areia, a água que era recolhida após percolar o corpo de prova, continha um pouco de bentonita. Já a água que percolou o solo, aparentemente, não continha bentonita nenhuma. Ou seja, nos ensaios com solo toda a bentonita que foi adicionado ao permeâmetro ficou retida sobre o corpo de prova, ou em seu interior, já nos ensaios com areia parte dela percolou através do corpo de prova, mas aparentemente nada ficou retido dentro do corpo de prova, apenas sobre este.

Após todos os ensaios realizados pode-se concluir que a suspensão de bentonita de fato diminui a condutividade hidráulica dos corpos de prova, formando uma camada de bentonita sobre estes. Porém, o principal problema dos ensaios foi o surgimento de diversas trincas nessa camada. Em estudo realizado por Santos (2008) e citado anteriormente, foi constatado que solos associados à bentonita podem apresentar trinca após ressecamento. Porém no presente estudo, embora se tenha notado que a camada de bentonita apresentava algumas trincas após ressecamento, em diversos casos a bentonita apresentou trincas mesmo ainda estando molhada.

Nos ensaios com areia, os ensaios 2 e 3 apresentaram diversas trincas, já o ensaio 4 apresentou apenas duas pequenas trincas, isso provavelmente deve-se ao fato de que a concentração da suspensão de bentonita no ensaio 4 era maior, e assim, mesmo depois que voltou a percolar água pelo corpo de prova, provavelmente ainda havia bentonita decantando sobre a areia.

Já nos ensaios com o solo, a bentonita apresentou trincas nos ensaios 2 e 3, que foram os ensaios com maior tempo de duração. No ensaio 4 que também teve um grande tempo de duração a bentonita não apresentou trincas em nenhum momento, porém isso pode ter ocorrido devido a agitação da bentonita no meio do ensaio. Nos ensaios 5 e 6, a camada de bentonita também não apresentou trincas, isso provavelmente ocorreu porque a carga hidráulica era menor que nos ensaios anteriores, e assim a pressão sobre o corpo de prova era menor também, e além disso esses ensaios foram mais curtos.

Vale ressaltar as bruscas variações de condutividade hidráulica que ocorreram, fugindo da tendência de variação que vinha ocorrendo. Geralmente essas variações ocorreram após a condutividade hidráulica atingir valores muito baixos. Acredita-se que quando os valores de permeabilidade ficaram muito baixos, a água, ao encontrar um ponto de fraqueza na camada de bentonita, percolava o corpo de prova com facilidade, registrando-se algum aumento na condutividade hidráulica. Porém, logo essa rachadura se recupera fechando

novamente, fazendo a condutividade hidráulica diminuir. Assim, isso pode ter ocorrido sucessivas vezes como pode-se observar ao medir a condutividade hidráulica.

Observando os ensaios podemos dizer que a concentração de 4g/L para a suspensão de bentonita é suficiente para formar a camada de bentonita sobre o solo. Concentrações maiores que essa não são necessárias, já que não são interessantes economicamente, e menores que essa também não são interessantes, visto que o resultado com a concentração de 2g/L não foi tão significante quanto com 4g/L.

5. CONCLUSÃO

A partir do presente estudo pode-se observar que a utilização de suspensão de bentonita para impermeabilizar reservatórios, sem que a água seja drenada, pode ser viável. A melhor concentração do ponto de vista técnico e econômico foi a de 4g/L, pois foi possível diminuir a condutividade hidráulica da ordem de duas grandezas, e mesmo com a formação de trincas com o passar do tempo a condutividade hidráulica ainda se apresentou pelo menos uma grandeza abaixo do que se encontrava com o solo puro. Como esta é uma concentração baixa o gasto com bentonita também seria baixo.

Devido a falta de informações encontradas sobre o método faz-se necessário realizar mais estudos para comprovar sua eficácia, principalmente aprofundar os estudos sobre a formação das trincas, pois, se estas não ocorressem, a condutividade hidráulica teria se mantido mais baixa, próximo aos valores que são aceitáveis para a construção de barreiras impermeáveis, por exemplo, que são valores da ordem de 10^{-7} cm/s.

Um ponto importante da possível aplicação prática do método em reservatórios, refere-se à forma com que a bentonita deve ser aplicada. Após vários ensaios, verifica-se que uma forma mais realista, e com bons resultados, é a colocação da suspensão de bentonita diretamente no reservatório, ao invés de percolá-la sob uma carga hidráulica superior à altura de carga correspondente ao nível de água do reservatório. Resta em aberto, verificar se a suspensão deve ser preparada a priori ou se é possível aplicar a bentonita diretamente à água agitando-a na mão. Outro ponto a verificar é a diferença entre aplicar a bentonita em pó ou na forma granular.

Outro ponto importante refere-se ao fato de que a técnica deve ser utilizada apenas em situações em que se deseja reduzir a permeabilidade do solo, ou seja, em problemas em que os vazamentos sejam condicionados por problemas estruturais ou por piping é necessário caracterizar adequadamente a situação para evitar mascarar um problema maior e que poderá se agravar com o passar do tempo. Estudos subsequentes poderão esclarecer estes itens, ficando aqui estas sugestões.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alderman, N. J., The Rheological Properties of Water-Based Drilling Fluids, The Royal Society of Chemical Conference, Proceedings of the 3th International Symposium on Chemical in Oil Industry. 1988.

Amorim, L.V. et al. **Comportamento reológico de dispersões de argilas bentoníticas: efeitos do tipo de ferramenta, velocidade e tempo de agitação.** Universidade Federal da Paraíba.Campina Grande. 2002

Amorim, L.V. et al. **Estudo Reológico de Fluidos de Perfuração à Base de Água: Influência do Teor de Sólidos, Velocidade e Tempo de Agitação.** Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Centro de Ciências e Tecnologia – CCT, Campina Grande, 2004

Amorim, L. V. et al. **Fluidos de perfuração à base de água. Parte I: Efeitos de aditivações poliméricas nas propriedades reológicas,** Cerâmica, v. 51, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: 2009. Disponível em: <<http://d.yimg.com/kq/groups/2354326/2132691438/name/NBR-6122-Texto-Final-Divulgacao-20090730.pdf>> Acesso em : 25 Ago. 2012.

Arshak, K. Moore, E. Lyons, G.M. Harris, J. e Clifford, S. Sensor Review Volume 24. 2004

Azambuja, R.M .B. **Estudo do comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento-bentonita para a aplicação em barreiras verticais de contenção de contaminantes.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

Barbosa, M. I. R.; Amorim, L. V.; Ferreira, H. C. **Avaliação de bentonitas aditivadas com compostos poliméricos para utilização em fluidos base água** – Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, 2007

Bertolino, L. C. et al. **Caracterização mineralógica e estudo de beneficiamento da bentonita de Pedra Lavrada – PB.** II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste. Campina Grande: CETEM – Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/livros/anais_segundo_simposio_minerais_industriais_d_o_nordeste.pdf>. Acesso em: 18 Ago. 2012.

Caputo, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações.** Rio de Janeiro, 1996.

Coelho, J. M. **Perfil da bentonita.** Relatório Técnico 43, Projeto ESTAL, MME/SGM – Banco Mundial.: J. Mendo Consultoria, Brasília, 2009

Coelho, M. J.; Cabral JR.,M. **Estudo prospectivo da bentonita: tendências de mercado.** II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste, Campina Grande, 2010. <http://www.cetem.gov.br/publicacao/livros/anais_segundo_simposio_minerais_industriais_d_o_nordeste.pdf> Acesso em: 13 Jul. 2012

Dam sealing bentonite; AMC – Drilling Fluids and Products. Dam Seal. Disponível em : <<http://www.thedrillshop.com.au/pds/Dam%20Seal.pdf>> Acesso em: 13 Jul. 2012

Darley, H. C.; Gray, G. R. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**, Fifth Edition, Gulf Publishing Company, Houston, 1988

D'Appolonia, D.J. **Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, New York, v.107, 1980.

ENGECORPS – Corpo de Engenheiros Consultores. Rel: 064-SS0-NOD-B173. Estado da arte dos aterros sanitários – Partell. São Paulo, 1996,

Evans, J. C.; Dawson, A. R. **Slurry Walls for Control of Contaminant Migration: A Comparison of UK and US Practices**, ASCE Specialty Conference on Geo-Engineering for Underground Facilities, ASCE Geotechnical Special Publication, 1999.

Ferreira, H.S. et al. **Uso de bentonitas na impermeabilização de lagoas de estabilização**. 47º congresso de cerâmica. João Pessoa, 2003.

Franki. 2003. Disponível em <www.franki.com.br>. Acesso em 15 Jul. 2012

Gopinath, T. R.; Schuster, H.D; Schuckmann, W.K. 1981. **Modelo de Ocorrência e Gênese da Argila Bentonítica de Boa Vista**, Campina Grande, Paraíba, Revista Brasileira de Geociências 11(3). São Paulo. 1981.

Gopinath, T.R., Cruz, V.C.A., Freire, J.A. **Estudo comparativo da composição química e as variedades de argilas bentoníticas da região de Boa Vista, Paraíba**. Revista de Geologia, vol.16 nº 1, Ceará, 2003. Disponível em <http://www.revistadegeologia.ufc.br/documents/revista/2003/03_2003.pdf> Acesso em 6 Ago. 2012 .

J.P. Self and Associates, Inc. Company Profile. **Pond sealant** Disponível em <<http://www.jpsself.com/bentonite>> Acessado em : 23 Ago 2012.

Kleppe, J. H., Olson, R. E., “Desiccation Cracking of Soil Barriers”. American society for Testing and Materials, 1985

Lambe, T. W., Whitman, R. V. Soil mechanics, SI version. New York, John Wiley and Sons Inc. 1969.

Lemos, R. G. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas**. Dissertação de Doutorado-Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.2006

Lukiantchuki, J. A., **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira selante**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Lummus, J.L. Azar, J.J., Drilling Fluids Optimization a Practical Field Approach, PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1986.

Luz, A.B., Baltar, C. A. M . **Comunicação técnica elaborada para o Livro: Insumos Minerais para Perfuração de Poços de Petróleo**, CT2003-100-00. A função dos minerais industriais componentes da lama de perfuração de poços. CETEM. Rio de Janeiro, 2003.

Luz, A. B., Oliveira, C. H. **Comunicação técnica elaborada para edição do Livro Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações**, CT2005-115-00. Bentonita, Cap. 10. CETEM. Rio de Janeiro, 2005.

Luz, A. B.; Sampaio, J. A; Lins, F. F. **Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil** . Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, Rio de Janeiro, 2001.

Marangon, M. **Mecânica dos Solos II**. Universidade Federal de Juiz de fora. Faculdade de Engenharia – NuGeo/Núcleo de Geotecnica. Juiz de Fora, 2009. Disponível em <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/ms2_unid01.pdf> Acesso em : 23 de Ago. 2012

Medeiros R. C. A. Amorim; L. V. Santana, L. N. L. **Avaliação de aditivos lubrificantes em fluidos aquosos para perfuração de poços de petróleo** - Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.3. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008. Disponível em: <<http://www.dema.ufcg.edu.br/revista>>. Acesso em : 5 de Ago. 2012

Melhado, S. B. Et al. **Tecnologia da Construção de Edifícios I**-Escola Politécnica Da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2002

Morgenstern, N; Amir-Tahmasseb,I. **The Stability of a Slurry Trench in Cohesionless Soils**. Geotechnique, London, v.28, 1998

Morandini T. L. C., **Condutividade hidráulica e compatibilidade em combinações de solo tropical e bentonita para uso em barreiras**. Dissertação de mestrado - Núcleo de Geotecnica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2009

Paiva, L. B.; Morales, A. R.; Díaz, F. R. V. **An overview on organophilic clays: properties, routes of preparation and applications**. Applied Clay Science, 2007.

Reis, E. **Levantamento da Situação e das Carências Tecnológicas dos Minerais Industriais Brasileiros – Com enfoque na mineração de: Argila para cerâmica, barita, Bentonita, Caulim para carga, talco/Agalmatolito e Vermiculita**. Relatório Preparado para o Ministério de Ciência e Tecnologia, 2001. Disponível em <<http://www.cgee.org.br/>> Acesso em 12 Jul 2012.

Ribas, L. C. – **Paredes Diafragma Sistema Construtivo**, 2004. Disponível em : <<http://www.cecc.eng.ufmg.br/trabalhos/pg1/Paredes%20Diafragma%20Sistema%20Construtivo.pdf>> Acesso em 17 Ago. 2012.

Rowe, R.K. Barrier Systems. In: Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook. Ontario, 2000.

Santos L.V. **Estudo da influência da bentonita em um solo residual para uso como camada selante.** Dissertação de Mestrado, COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008

Santos, P. S.. **Ciência e tecnologia de argilas.** 2^a edição. Vol1. São Paulo, 1989.

Silva, A. A. **Contribuição ao estudo das bentonitas do Município de Boa Vista Estado da Paraíba.** Tese de Doutorado em Engenharia Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Silva, A.; Ferreira, H.. **Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia. Campina Grande, 2008. Disponível em: <<http://www.dema.ufcg.edu.br/revista/index.php/REMAP/article/view/77/91>>. Acesso em: 23 de Ago. 2012.

Sturgis Materials, Inc **Disponível em :** <<http://sodiumbentonite.net/>> Acesso em: 25 Ago. 2012.

Sumário Mineral Brasileiro, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Bentonita, 2004.

Sumário Mineral Brasileiro, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Bentonita, 2011.

Texas Sodium Bentonite, Inc.. **Pure Blanket Method, Mixed Blanket Method and Sprinkle Method.** Disponível em <<http://www.texassodiumbentonite.com/>> Acesso em : 17 de Jul. 2012.

USGS. Clays. U. S. **Mineral Commodity Summaries**, 2009

Vargas, M. **Introdução à Mecânica dos Solos.** McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

Valenzuela-Díaz, F. R.; Souza Santos, P. **Studies on the acid ativation of Brazilian smectitic clays.** Química Nova, v.24, 2001.

Wynne, F. **Construction and Repair of Watershed Fish Ponds in Kentucky.** Kentucky State University Cooperative Extension Program. Disponível em: <http://www.extension.org/mediawiki/files/d/de/Construction_and_Repair_of_Watershed_Fish_Ponds_inKentucky.pdf> Acesso em: 25 Ago. 2012.

Xanthakos, P.P. **Slurry Walls.** New York: McGraw Hill, 1979, apud Azambuja 2004.

