

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Elisa Camargo Sobiesiak

**GEOCOMPOSTO ARGILOSO: ESTUDO COMPARATIVO AO
LINER DE ARGILA COMPACTADA EM
IMPERMEABILIZAÇÃO DE FUNDO DE ATERRO
SANITÁRIO**

Avaliador:

Defesa: dia __/__/2017 às _____ horas

Local: UFRGS / Engenharia Nova
Oswaldo Aranha, 99, sala 304

Anotações com sugestões para qualificar o trabalho são bem-vindas. O aluno fará as correções e lhe passará a versão final do trabalho, se for de seu interesse.

Porto Alegre
dezembro 2017

ELISA CAMARGO SOBIESIAK

**GEOCOMPOSTO ARGILOSO: ESTUDO COMPARATIVO AO
LINER DE ARGILA COMPACTADA EM
IMPERMEABILIZAÇÃO DE FUNDO DE ATERRO
SANITÁRIO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

Orientador: Lucas Festugato
Coorientadora: Marina Bellaver Corte

Porto Alegre
dezembro 2017

ELISA CAMARGO SOBIESIAK

**GEOCOMPOSTO ARGILOSO: ESTUDO COMPARATIVO AO
LINER DE ARGILA COMPACTADA EM
IMPERMEABILIZAÇÃO DE FUNDO DE ATERRO
SANITÁRIO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2017

Prof. Lucas Festugato
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Orientador

Eng.^a Marina Bellaver Corte
Ma. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Coorientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lucas Festugato
(UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul

Eng.^a Marina Bellaver Corte
(UFRGS)
Ma. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Prof. Sérgio Marques
(UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul

Profa. Karla Heineck
(UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul

Prof. Nilo Cesar Consoli
(UFRGS)
Ph. D. pela Concordia University, Canadá

“Eu acredito demais na sorte. E tenho constatado que, quanto mais duro eu trabalho, mais sorte eu tenho.”

Thomas Jefferson

RESUMO

Este trabalho versa sobre a análise comparativa entre dois métodos de impermeabilização de fundo de aterro sanitário, também chamados de *liners*. O primeiro método consiste no *liner* de argila compactada constituída por solo argiloso compactado que apresenta baixa condutividade hidráulica devido à elevada quantidade de partículas finas em sua composição. O segundo método consiste no uso de geocompostos argilosos que representam o uso associado de geossintéticos e bentonita, material argiloso que confere baixa permeabilidade ao *liner* devido a sua expansibilidade. Ambos os métodos foram caracterizados conforme a literatura de modo a obter uma comparação sob os aspectos construtivos, de desempenho, econômicos e de segurança. A partir disso um estudo de caso foi realizado no aterro sanitário de São Carlos, localizado no Estado de São Paulo, o qual foi executado com *liner* de argila compactada e suas características geométricas e executivas foram comparadas com as características provenientes de um redimensionamento para este mesmo aterro sanitário considerando um *liner* de geocomposto argiloso. Embora o *liner* geossintético apresente vantagens frente à impermeabilização com solo compactado, este estudo constatou que o tempo de execução e custos para sua implantação ainda são muito superiores ao *liner* de argila compactada e o aumento acarretado na vida útil do aterro não é capaz de suprir esse aumento de custo.

Palavras-chave: Geocomposto argiloso. Impermeabilização de fundo de aterro sanitário. *Liner* de argila compactada. *Liner* de geossintéticos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do delineamento do projeto de pesquisa.....	17
Figura 2 – Geração de RSU no Brasil em 2014 e 2015.....	22
Figura 3 – Disposição final de RSU no Brasil por tino de destinação (t/dia)	24
Figura 4 – Estrutura de um aterro sanitário	26
Figura 5 - Liner de argila compactada com trincas oriundas da contração	34
Figura 6 - Formação de caminhos preferenciais de fluxo na camada impermeabilizante.....	35
Figura 7 – Liner de argila compactada associado ao uso de geomembrana.....	36
Figura 8 – Aplicação de geotêxtil em talude	38
Figura 9 – Aplicação de geogrelha para reforço.....	38
Figura 10 – Geotubo aplicado em trincheira drenante	39
Figura 11 – Aplicação de geocélula para revestimento de canal.....	40
Figura 12 – Geocomposto drenante.....	41
Figura 13 – Diversas aplicações de geossintéticos em projetos de aterros sanitários	42
Figura 14 – Geocomposto argiloso.....	43
Figura 16 – Geocompostos argilosos reforçados e não reforçados	45
Figura 17 - Regularização da base para instalação do GCL.....	50
Figura 18- Abertura das bobinas do GCL	51
Figura 19 - Ancoragem no topo do talude.....	51
Figura 20 - Detalhe de sobreposição e emenda do GCL.....	52
Figura 21 – Vista superior do aterro sanitário	54
Figura 22 - Localização do aterro sanitário	55
Figura 23 – Planta de implantação do aterro sanitário e a locação das seções transversais A-A e B-B	57
Figura 24 - Seção transversal A-A	57
Figura 25 - Seção transversal B-B.....	58
Figura 26 – Configuração da disposição final dos resíduos sólidos no aterro sanitário.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Participação dos Principais Materiais no Total de RSU Coletado no Brasil em 2012	23
Tabela 2 - Limites máximos do excedente hídrico (em mm/ano) para a dispensa da impermeabilização, para fração orgânica dos resíduos $\leq 30\%$	28
Tabela 3 - Limites máximos do excedente hídrico (em mm/ano) para a dispensa da impermeabilização, para fração orgânica dos resíduos $> 30\%$	28
Tabela 4 - Valores mínimos para obtenção da condutividade hidráulica adequada.....	33
Tabela 5 - Vantagens e desvantagens do uso de GCLs	44
Tabela 6 - Principais características e diferenças entre solo compactado e geocomposto argiloso, quando utilizados como barreiras impermeáveis.....	53
Tabela 7 – Dimensões das células de corte	56
Tabela 8 - Quantidade mensal, em toneladas, de resíduos domiciliares dispostos no aterro sanitário, nos anos 2004 a 2007.....	59
Tabela 9 - Variação da disposição de resíduos domiciliares no aterro sanitário, nos anos 2004 a 2007	60
Tabela 10 - Estimativa da massa de resíduos a ser disposta no aterro, por ano de operação ...	61
Tabela 11 - Valores de produtividade para serviços de execução	63
Tabela 12 - Valores referentes ao tempo de execução da impermeabilização	63
Tabela 13 - Custo unitário por hora de serviço	64
Tabela 14 - Valores totais referentes ao custo da impermeabilização.....	64
Tabela 15 - Valores de produtividade para serviços de execução	65
Tabela 16 - Valores referentes ao tempo de execução da impermeabilização	65
Tabela 17 - Custo unitário da composição	66
Tabela 18 - Valores totais referentes ao custo da impermeabilização.....	66
Tabela 19 - Resultados referentes aos parâmetros analisados.....	67
Tabela 20 - Estimativa da massa de resíduos a ser disposta no aterro, por ano de operação ...	68

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE - Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CCL - *Compacted Clay Liner*

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

GCL - Geosynthetic Clay Liner

IGS-Brasil - Associação Brasileira de Geossintéticos

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISO - *International Organization for Standardization*

NBR - Norma Brasileira Registrada

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PNRS - Resíduos Sólidos Urbanos

SNVS - Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

SICRO - Sistema de Custos Rodoviários

Sisnama - Sistema Nacional do Meio Ambiente

Suasa - Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	DIRETRIZES DE PESQUISA.....	15
2.1	QUESTÃO DA PESQUISA.....	15
2.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	15
2.2.1	Objetivo Principal	15
2.2.2	Objetivo Secundário.....	15
2.3	PRESSUPOSTO	16
2.4	HIPÓTESE.....	16
2.5	PREMISSA.....	16
2.6	DELIMITAÇÕES.....	16
2.7	LIMITAÇÕES.....	17
2.8	DELINEAMENTO.....	17
3	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	19
3.1	DEFINIÇÃO.....	19
3.2	CLASSIFICAÇÃO.....	19
3.3	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	21
3.4	DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS	23
3.4.1	Lixão	25
3.4.2	Aterro controlado	25
3.4.3	Aterro sanitário	26
4	LINERS DE ARGILA COMPACTADA	30
4.1	DEFINIÇÃO.....	30
4.2	CLASSIFICAÇÃO.....	31
4.2.1	Materiais minerais naturais.....	31
4.2.2	Mistura de solo e bentonita.....	31

4.2.3	Outros materiais	31
4.3	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	31
4.3.1	Composição do solo	32
4.3.2	Compactação	33
4.3.3	Integridade da camada.....	34
5	GEOSSINTÉTICOS.....	37
5.1	DEFINIÇÃO	37
5.2	CLASSIFICAÇÃO	37
5.2.1	Geotêxteis	37
5.2.2	Geogrelhas	38
5.2.3	Georredes	38
5.2.4	Geotubos	39
5.2.5	Geocélulas.....	39
5.2.6	Geoexpandido	40
5.2.7	Geomembranas	40
5.2.8	Geocompostos	40
5.3	APLICAÇÕES.....	41
5.4	GEOCOMPOSTO ARGILOSO	42
5.4.1	Propriedades	45
5.4.2	Aplicação em aterro sanitário	48
5.4.3	Análise comparativa ao liner de argila compactada	52
6	ESTUDO DE CASO: REDIMENSIONAMENTO DE LINER DE FUNDO DE ATERRO SANITÁRIO	54
6.1	CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS - SP	54
6.1.1	Localização e acesso.....	55
6.1.2	Geometria	56
6.1.3	Vida útil	58

6.1.4	Liner de argila compactada	61
6.2	REDIMENSIONAMENTO DO MÉTODO DE IMPERMEABILIZAÇÃO	64
6.2.1	Volume	64
6.2.2	Parâmetros executivos	64
7	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	67
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
	REFERÊNCIAS	13

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, aliado ao aumento do consumo de bens industrializados, intensifica de maneira exponencial o problema de controle e disposição de resíduos, gerando, por fim, um dos principais desafios enfrentados pelo poder público e pela sociedade contemporânea (RODRIGUES, 2007).

Diante dessa situação, o Brasil enfrenta uma fase de transição frente à disposição de resíduos sólidos uma vez que, em 2010, foi aprovada a Lei 12.305/2010 que implementa a Política Nacional de Resíduos Sólidos determinando a extinção dos lixões existentes em território nacional substituindo-os por aterros sanitários, de forma a controlar e tratar adequadamente os resíduos gerados pela população visando evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e minimizar os impactos ambientais adversos.

Nesse contexto, o presente trabalho objetiva estudar o emprego do geocomposto argiloso em substituição da argila compactada para fins de impermeabilização de fundo de aterro sanitário visto que seu uso é capaz de aumentar a capacidade do mesmo prolongando a vida útil, assim como reduz os custos e tempo de implantação do mesmo.

O geocomposto argiloso consiste numa composição de geossintético e bentonita, material argiloso de baixa condutividade hidráulica que apresenta bom desempenho na impermeabilização de fundo de aterros sanitários, atendendo às preocupações e normativas relacionadas à contaminação do meio ambiente pelos resíduos neles depositados.

O *liner* de argila compactada apresenta alta resistência às influências químicas dos percolados e pode apresentar alto potencial de retenção do contaminante por um longo período de tempo. Entretanto, demanda maior tempo de execução, altos custos relacionados às movimentações de terra e pode apresentar trincas por contração que podem vir a comprometer a eficiência da impermeabilização.

Ambas as opções apresentam vantagens e desvantagens em função de sua resistência a solicitações de natureza química, física ou mecânica, durabilidade, facilidade de construção e custo (Vilar *et al.*, 2015).

Dessa forma, o presente trabalho objetiva realizar uma análise entre os dois métodos de impermeabilização através do estudo comparativo da implantação do geocomposto argiloso em um aterro sanitário situado no município de São Carlos no Estado de São Paulo, com o sistema de impermeabilização de argila compactada executado no mesmo.

Após o capítulo 1 de introdução e do capítulo 2 que determina as diretrizes da pesquisa, no capítulo 3 são apresentados os conceitos e classificação dos resíduos sólidos e resíduos sólidos urbanos. Um panorama acerca do tema no Brasil é apresentado em seguida, juntamente com as formas mais utilizadas para disposição final dos resíduos sólidos.

O capítulo 4 define e classifica o *liner* de argila compactada, método utilizado para a impermeabilização de fundo de aterros sanitários. Também versa sobre as principais propriedades que determinam o desempenho da condutividade hidráulica do *liner*.

O capítulo 5 apresenta, define e classifica os geossintéticos, assim como suas aplicações em aterros sanitários e detalha o geocomposto argiloso, principal objeto de estudo deste trabalho.

O capítulo 6 compreende o estudo de caso onde foram determinadas as características geométricas e executivas (custo e tempo de implantação) para o aterro sanitário de São Carlos/SP que apresenta um *liner* de argila compactada, e as mesmas características foram definidas para um redimensionamento desse *liner* para o uso de geocomposto argiloso.

O capítulo 7 descreve os resultados obtidos para os dois métodos de impermeabilização e como as diferenças entre eles afetam as propriedades do aterro sanitário como um todo.

Por fim, o capítulo 8 apresenta as conclusões desse trabalho, assim como são propostas sugestões para trabalhos futuros.

2 DIRETRIZES DE PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos itens a seguir.

2.1 QUESTÃO DA PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: quais as vantagens da substituição do *liner* de argila compactada pelo uso de geocomposto argiloso para fins de impermeabilização de fundo de aterro sanitário?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados como principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O presente trabalho tem por objetivo principal comparar dois métodos de impermeabilização de fundo de aterro sanitário, sendo eles o *liner* de argila compactada e o *liner* de geocomposto argiloso.

2.2.2 Objetivo Secundário

O objetivo secundário do trabalho consiste em dimensionar o sistema de impermeabilização de fundo do aterro sanitário de São Carlos, adotando o geocomposto argiloso e avaliar o possível aumento de sua vida útil, otimização na construção e redução de custos.

2.3 PRESSUPOSTO

A pesquisa pressupõe que o uso de geocompostos argilosos aumenta a capacidade e, portanto, a vida útil de aterros sanitários, assim como aumenta a segurança contra a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

2.4 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que o uso do geocomposto argiloso em *liners* é vantajoso em relação ao *liner* de argila compactada.

2.5 PREMISSA

Parte-se da premissa, para a realização da pesquisa, de que os geocompostos argilosos podem ser utilizados como alternativas aos tradicionais *liners* de argila compactada para execução da impermeabilização de fundo de aterros sanitários. São verdadeiras e válidas as informações contidas nas seguintes normas para elaboração do trabalho:

- a) NBR 8419:1992 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos;
- b) NBR 10004:2004 - Resíduos Sólidos – Classificação;
- c) NBR 10005:2004 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos;
- d) NBR 10006:2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos;
- e) NBR 10007:2004 - Amostragem de resíduos sólidos.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a realizar o estudo comparativo no aterro sanitário situado na cidade de Campinas, São Paulo.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

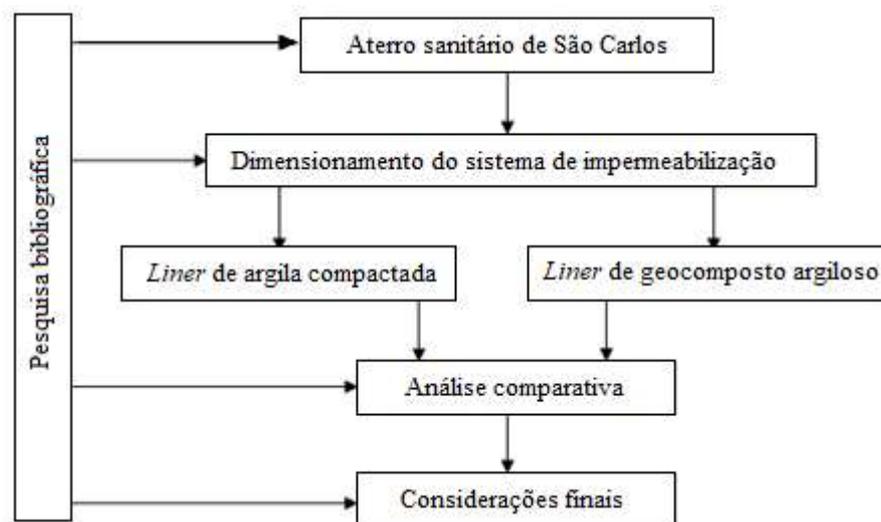
- a) Foram analisados os *liners* utilizados para fins de impermeabilização de fundo de aterro sanitário;
- b) Os *liners* estudados são apenas os escolhidos para fins comparativos.

2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) descrição do sistema de impermeabilização de fundo do aterro sanitário de São Carlos com argila compactada;
- c) dimensionamento do sistema de impermeabilização de fundo do aterro sanitário de São Carlos com geocomposto argiloso;
- d) análise comparativa entre os dois métodos;
- e) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama do delineamento do projeto de pesquisa



(fonte: elaborado pela autora)

A **pesquisa bibliográfica** teve como objetivo a obtenção de informações relativas à definição e classificação dos resíduos sólidos e resíduos sólidos urbanos, assim como suas formas de disposição final. Também compreende a coleta das informações necessárias para aprimorar o conhecimento sobre os materiais de impermeabilização de fundo de aterro sanitário a serem utilizados no estudo comparativo, sendo eles a argila compactada e o geocomposto argiloso.

A segunda etapa do trabalho consistiu no estudo de caso, onde se descreve o **sistema de impermeabilização de fundo do aterro sanitário de São Carlos** realizado com argila compactada apresentando suas propriedades geométricas, custo e tempo de execução.

Em seguida, o mesmo sistema de impermeabilização foi redimensionado para o uso de **geocomposto argiloso** e foram determinadas a sua geometria e parâmetros executivos.

Após essa etapa foi realizada a **análise comparativa** entre os dois métodos, com base nas características estabelecidas.

Por fim foram feitas as **considerações finais** onde foi verificado o melhor método a ser utilizado no estudo de caso e foram analisadas as possíveis circunstâncias que levaram a esse resultado.

3 RESÍDUOS SÓLIDOS

Este capítulo apresenta a definição e classificação dos resíduos sólidos, assim como descreve os resíduos sólidos urbanos, indicando os métodos de disposição final dos mesmos. É feita uma análise detalhada dos aterros sanitários e dos seus sistemas de proteção ambiental.

3.1 DEFINIÇÃO

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) define, por meio da NBR 10004, resíduos sólidos como resíduos nos estados sólido e semi-sólido, provenientes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição. Incluem-se, nesta definição, lodos originados de sistemas de tratamento de água, resíduos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição assim como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isto soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia possível.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305 (2010) caracteriza resíduo sólido como:

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

3.2 CLASSIFICAÇÃO

A NBR 10004 (2004) classifica os resíduos sólidos de acordo com sua periculosidade nas classes I e II.

Os resíduos sólidos pertencentes à classe I são considerados perigosos por apresentarem propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, oferecerem riscos à saúde pública provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento de mortalidade ou incidências de doenças e/ou riscos ao meio ambiente se manuseados ou destinados de forma inadequada, ou ainda apresentarem características patogênicas, de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade.

A classe II corresponde aos resíduos sólidos não perigosos e divide-se nas classes IIA e IIB. A classe IIA engloba os resíduos não inertes que não se enquadram nas classes I e IIB, podendo apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A classe IIB caracteriza os resíduos inertes, ou seja, àqueles que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor.

Para ser corretamente classificado, um resíduo sólido deve ser amostrado de acordo com a NBR 10007:2004 e submetido a ensaios de lixiviação e dissolução segundo as normas NBR 10005:2004 e NBR 10006:2004.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos determina, conforme a origem, as seguintes classificações:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas a e b;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas b, e, g, h e j;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea c;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais; Política Nacional de Resíduos Sólidos 2ª edição 17;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;

- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com a NBR 8419, os resíduos sólidos urbanos (RSU) são definidos como:

[...] gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos, [...].

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) define Resíduos Sólidos Urbanos como aqueles provenientes das atividades domésticas em residências urbanas (resíduos domiciliares) e os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (resíduos de limpeza urbana).

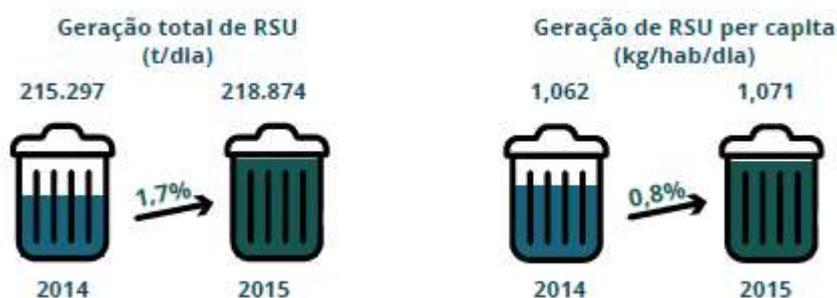
Segundo Dias e Moraes Filho (2006),

[...] o agravamento da situação ambiental teve seu início após a Revolução Industrial, uma vez que a tecnologia empregada melhorou as condições de vida na sociedade pré-moderna, contribuindo para o crescimento populacional, o qual gerou a necessidade de investimentos em novas técnicas de produção em massa, visando atender a demanda cada vez mais crescente de consumo. O aumento da população mundial e a mudança de seus hábitos consumistas, como a urbanização das comunidades e o aprimoramento de técnicas cada vez mais modernas de industrialização, resultaram num aumento significativo no volume dos resíduos gerados.

Há uma variação quantitativa e qualitativa nos resíduos provenientes de regiões com diferentes padrões sócio-econômicos. Em países com maior atividade industrial há uma predominância de materiais inorgânicos sobre os orgânicos em consequência do uso predominante de embalagens, enquanto que nos países mais pobres a presença de matéria orgânica na composição dos RSU é maior que a inorgânica (RODRIGUES, 2007).

No Brasil, o Panorama dos Resíduos Sólidos desenvolvido pela ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, revela um total anual de 79,9 milhões de toneladas de RSU gerados no país. Houve um crescimento de 0,8% na população brasileira entre 2014 e 2015 acarretando conjuntamente um aumento da geração per capita de RSU, enquanto que a geração total atingiu 218.874 t/dia, apresentando um crescimento de 1,7% em relação ao ano de 2014, conforme a figura 2.

Figura 2 – Geração de RSU no Brasil em 2014 e 2015



(fonte: ABRELPE, Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2015, p. 19)

A composição dos RSU é bastante variável. O local, época do ano, clima, hábitos da população e mudanças tecnológicas são fatores que influenciam nessa variabilidade. Segundo Marra (2016), caracterizar adequadamente os RSU é muito importante uma vez que permite estimar a quantidade de matéria potencialmente reciclável, a quantidade de matéria orgânica que deve ser encaminhada para tratamento e disposição final, assim como a quantidade de rejeitos que deve ir para aterro sanitário. A tabela 1 apresenta a composição média dos RSU coletados no Brasil em 2012.

Tabela 1 – Participação dos Principais Materiais no Total de RSU Coletado no Brasil em 2012

Material	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Metais	2,9	1.640.294
Papel, Papelão e TetraPak	13,1	7.409.603
Plástico	13,5	7.635.851
Vidro	2,4	1.357.484
Matéria Orgânica	51,4	29.072.794
Outros	16,7	9.445.830
Total	100,0	56.561.856

(fonte: ABRELPE, Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2012, p. 30)

Para tratar de políticas públicas voltadas para uma gestão ideal de RSU, o Brasil desenvolveu diretrizes legais acerca do tema. Em 02 de agosto de 2010 foi promulgada a Lei Federal nº 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), tendo como princípio a responsabilidade compartilhada entre governo, empresas e população pelo ciclo de vida dos produtos. Seu objetivo abrange a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

3.4 DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O meio ambiente é diariamente agredido pela disposição inadequada de resíduos sólidos através de uma conduta que se repete há décadas sem que medidas eficazes sejam tomadas de modo a impedi-la. Por consequência, a destinação inadequada inviabiliza a vida digna das pessoas comprometendo, inclusive, a qualidade de vida das futuras gerações e violando preceitos garantidos na Constituição Brasileira. (DIAS & MORAES FILHO, 2006).

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos:

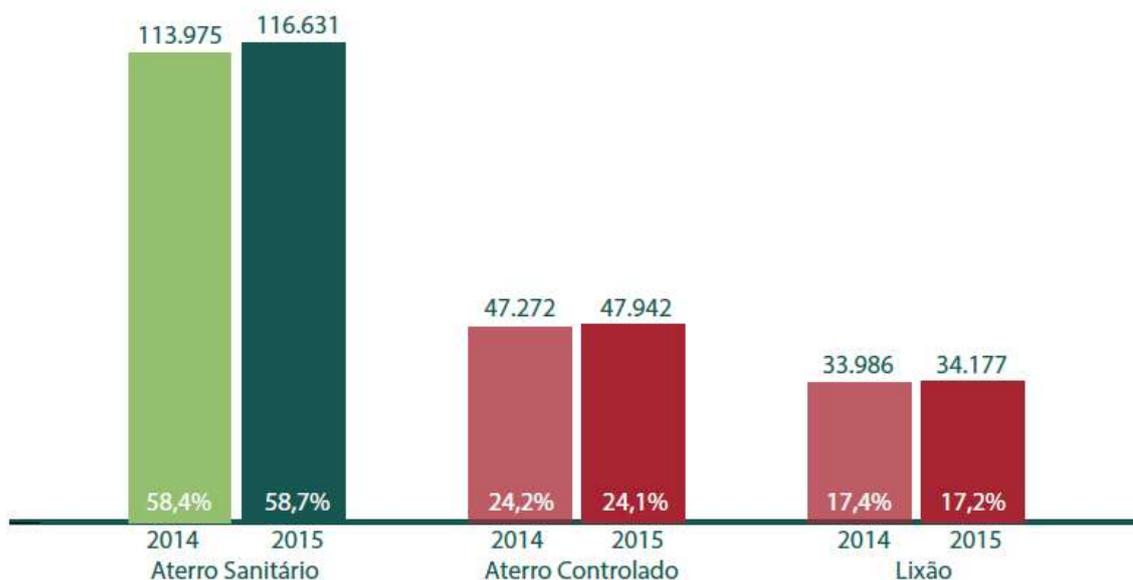
[...] destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

A PNRS ainda determina que a disposição final ambientalmente adequada consiste na distribuição ordenada de rejeitos em aterros, onde rejeitos são definidos como os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Dentre as formas de disposição final de resíduos sólidos, as práticas mais utilizadas consistem em aterros sanitários, lixões ou vazadouros e aterros controlados, sendo os últimos dois considerados inadequados.

Segundo a ABRELPE (2015), as unidades inadequadas ainda se fazem presentes em todas as regiões do país, recebendo mais de 82.000 toneladas de resíduos por dia e apresentando elevado potencial de poluição ambiental. Entretanto, a disposição final de RSU apresenta sinais de evolução e aprimoramento uma vez que o gráfico ilustrado na figura 3 apresenta um percentual de 58,7% dos resíduos coletados devidamente encaminhado para aterros sanitários.

Figura 3 – Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (t/dia)



(fonte: ABRELPE, Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2015, p. 23)

3.4.1 Lixão

Os lixões ou vazadouros são descargas a céu aberto, sem quaisquer medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (Boscov, 2008).

Consiste numa forma inadequada de disposição final caracterizada pela simples descarga sobre o solo, sem adoção de medidas estruturais para fins de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Os resíduos depositados no lixão acarretam problemas à saúde pública através da proliferação de vetores de doenças, tais como moscas, baratas e ratos, da geração de maus odores e, principalmente, poluição do solo e das águas subterrânea e superficial por meio da infiltração do chorume. Nesses locais também ocorre a disposição indevida de resíduos hospitalares e industriais, assim como há a presença de catadores no local (IPT, 2000).

3.4.2 Aterro controlado

Segundo Boscov (2008), aterros controlados constituem uma prática inadequada muito comum de disposição de RSU, onde os resíduos são cobertos com solo e eventualmente compactados sem apresentar sistemas de impermeabilização, drenagem ou tratamento de chorume e gases. Entretanto, mesmo sem prevenir os danos ambientais, os aterros controlados representam uma forma de disposição mais adequada do ponto de vista sanitário quando comparados aos lixões uma vez que restringem o acesso de catadores, a proliferação de vetores e o espalhamento do material no entorno.

Segundo Monteiro *et al.*, uma vez que o aterro controlado não possui um sistema de coleta de chorume, é conveniente evitar a entrada de águas pluviais no aterro de modo a minimizar a quantidade de chorume gerado. Para isso, é indicado o uso de uma camada de cobertura provisória de material argiloso durante a operação do aterro e a execução de uma camada de impermeabilização superior quando atingir sua cota máxima operacional. Também é importante atentar ao lençol freático de maneira que a área de implantação do aterro controlado tenha um lençol freático profundo, a mais de três metros do nível do terreno, de modo a diminuir a possibilidade de contaminação do lençol freático através do chorume.

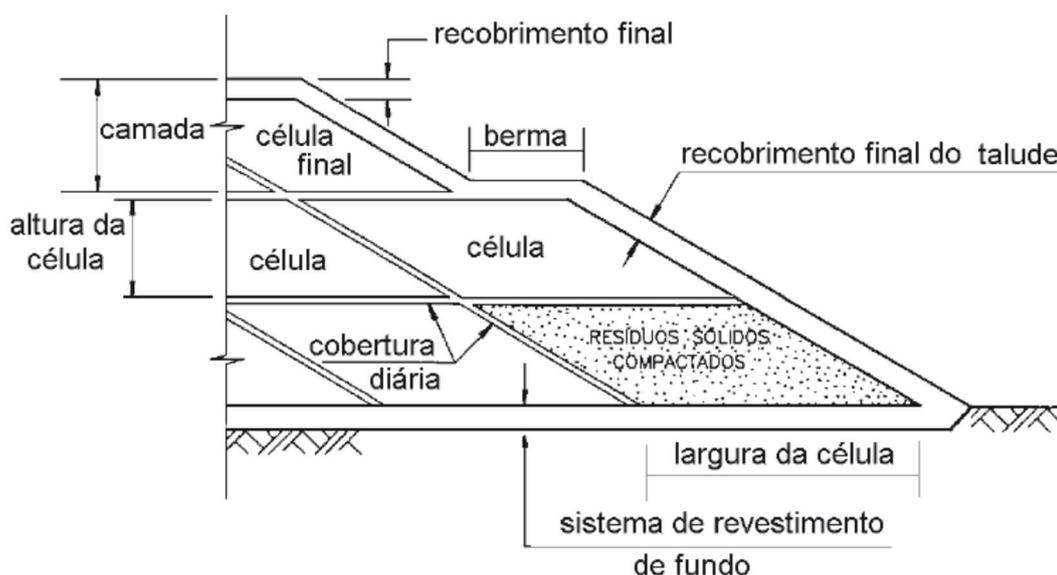
3.4.3 Aterro sanitário

Principal método de disposição final de resíduos sólidos urbanos e o mais adequado ambientalmente, o aterro sanitário é definido pela NBR 8419 (ABNT, 1992) da seguinte forma:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

Os elementos estruturais básicos de um aterro sanitário podem ser observados na figura 4.

Figura 4 – Estrutura de um aterro sanitário



(fonte: ENGEORPS, 1996)

A escassez cada vez maior de áreas para disposição de resíduos sólidos tem motivado o desenvolvimento de processos e tecnologias que permitam reduzir o volume lançado nos aterros aumentando, assim, a vida útil desses. A compactação convencional dos resíduos no aterro, adoção de tecnologias como trituração e enfardamento dos RSU são exemplos de processos redutores de volume. Após a ocupação total da capacidade do aterro, uma camada final de recobrimento de argila compactada de no mínimo 60 cm, deve ser executada de modo a diminuir a taxa de formação de percolato através da impermeabilização e controlar a saída de

gases. Essa cobertura também viabiliza a construção de empreendimentos no local (CARVALHO, 1999).

As etapas de projeto e operação devem ser realizadas de modo a controlar a emissão de contaminantes para o meio ambiente, reduzindo a possibilidade de poluição das águas superficiais e subterrâneas, do solo e do ar, assim como minimizar impactos adversos na cadeia alimentar (BOSCOV, 2008).

A disposição dos resíduos em aterros sanitários baseia-se em normas específicas, cuja finalidade é permitir o confinamento seguro dos resíduos e efluentes no solo de modo a minimizar impactos ambientais (Bueno, Zornberg & Lodi, 2009). As proteções ambientais ocorrem através de diversos sistemas implantados no aterro, tais como os sistemas de recobrimento de células, drenagem de gás e de líquido percolado, tratamento dos líquidos percolados, drenagem de águas superficiais e nascentes, *liner* de fundo entre outros.

Segundo Bueno *et al.* (2009), um componente responsável por assegurar o confinamento dos líquidos percolados é a barreira impermeável, também denominada *liner*, que consiste em uma camada de elementos com baixa condutividade hidráulica. Pode ser aplicada no sistema de cobertura para proteger as células de resíduos e diminuir a taxa de infiltração para o interior do maciço ou no sistema de impermeabilização de fundo a fim de reter os líquidos percolados de tal maneira que não atinjam o subsolo e as águas subterrâneas e superficiais.

Os *liners* utilizados em impermeabilização de fundo são adotados quando se deseja reter o máximo possível a percolação de um líquido a fim de evitar que o mesmo atinja as águas e solo natural. Dessa forma, esses sistemas devem apresentar estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica, resistência a intempéries e compatibilidade com os resíduos a serem aterrados (CARVALHO, 1999).

A NBR 15849 (2010) determina que a adoção de um sistema de impermeabilização complementar, realizada através de solo compactado ou com aplicação de geossintético impermeabilizante, deve ser considerada quando houver risco de contaminação das águas subterrâneas. O risco é determinado a partir das seguintes situações:

- a) o solo local não apresente a permeabilidade mínima, dados o excedente hídrico e a profundidade do freático, conforme estabelecido na tabela 2 e tabela 3;

- b) a profundidade do freático não atinja a mínima requerida, dados a permeabilidade e o excedente hídrico, conforme estabelecido na tabela 2 e tabela 3;
- c) o excedente hídrico local supere os especificados na tabela 2 e tabela 3, dadas a permeabilidade e a profundidade do freático;
- d) seja significativa a fração orgânica presente nos resíduos a serem dispostos.

O excedente hídrico consiste na quantidade de água, expressa em mm/ano, capaz de percolar pela camada de cobertura do aterro sanitário, percorrendo a massa de resíduos e atingindo a base do aterro. É calculado através das séries anuais de precipitações médias de temperaturas e do coeficiente de escoamento superficial. A tabela 2 e a tabela 3 apresentam os limites máximos do excedente hídrico admissível para o qual não é exigida a impermeabilização complementar através da análise da presença de resíduos orgânicos, profundidade do lençol freático e permeabilidade natural do solo local.

Tabela 2 - Limites máximos do excedente hídrico (em mm/ano) para a dispensa da impermeabilização, para fração orgânica dos resíduos $\leq 30\%$

Coeficiente de permeabilidade do solo local k (cm/s)	Fração orgânica dos resíduos $\leq 30\%$			
	Profundidade do freático (m)			
	$1,50 < n \leq 3$	$3 < n < 6$	$6 \leq n < 9$	$n \geq 9$
$k \leq 1 \times 10^{-6}$	250	500	1000	1500
$1 \times 10^{-6} < k \leq 1 \times 10^{-5}$	200	400	800	1200
$1 \times 10^{-5} < k \leq 1 \times 10^{-4}$	150	300	600	900

(fonte: adaptado de NBR 15849, 2010, p. 7)

Tabela 3 - Limites máximos do excedente hídrico (em mm/ano) para a dispensa da impermeabilização, para fração orgânica dos resíduos $> 30\%$

Coeficiente de permeabilidade do solo local k (cm/s)	Fração orgânica dos resíduos $> 30\%$			
	Profundidade do freático (m)			
	$1,50 < n \leq 3$	$3 < n < 6$	$6 \leq n < 9$	$n \geq 9$
$k \leq 1 \times 10^{-6}$	188	375	750	1125
$1 \times 10^{-6} < k \leq 1 \times 10^{-5}$	150	300	600	900
$1 \times 10^{-5} < k \leq 1 \times 10^{-4}$	113	225	450	675

(fonte: adaptado de NBR 15849, 2010, p. 7)

Caso a impermeabilização complementar seja dispensada, o solo de base do aterro deve ser preparado através de revolvimento e recompactação de um horizonte mínimo de 60 cm executado em três etapas, mantendo, ao menos, o coeficiente de permeabilidade do solo natural.

É necessário que a barreira contenha e direcione o líquido resultante da decomposição dos resíduos de modo a impedir o acúmulo deste sobre a camada impermeável evitando o aumento da carga hidráulica sobre a mesma assegurando a integridade da camada. (Manassero *et al.*, 2000).

As barreiras impermeáveis podem ser compostas por solos naturais de baixa condutividade hidráulica, por sobreposição de solos compactados e materiais sintéticos, tais como geomembranas e geocompostos argilosos para barreiras, ou pela combinação de solos argilosos compactados e materiais sintéticos formando uma barreira composta (Bueno *et al.*, 2009).

Segundo Daniel (1993), quando apresentam argila em sua composição, os *liners* se dividem em três grupos principais tais como *liners* naturais de argila, *liners* de argila compactada e *liners* de argila com geossintéticos.

Liners naturais de argila são formações naturais de solos argilosos que apresentam baixa condutividade hidráulica, em torno de 10^{-6} e 10^{-7} cm/s. Atualmente esse tipo de *liner* serve como uma alternativa em caso de algum imprevisto com o *liner* de projeto, sendo mais encontrado em aterros antigos ou em casos onde essa é a única solução possível (DANIEL, 1993).

Os *liners* de argila compactada têm sua condutividade hidráulica definida a partir de sua compactação. São altamente resistentes às influências químicas dos percolados e podem apresentar alto potencial de retenção do contaminante por um longo período de tempo. Por outro lado, a contração das camadas de argila pode resultar em trincas de contração que pode diminuir a eficiência da barreira (DANIEL, 1998 apud CARVALHO, 1999). Um estudo mais detalhado dos *liners* de argila compactada é realizado no capítulo 4 deste trabalho.

Para Rowe (2010, apud Locastro & Angelis, 2016) os geocompostos argilosos apresentam permeabilidade de 10^{-9} cm/s e podem ser uma alternativa à argila compactada oferecendo vantagens técnicas. São constituídos basicamente por uma camada de bentonita confinada entre duas camadas de geotêxtil ou fixada a uma camada de geomembrana. Um estudo mais detalhado dos geocompostos argilosos é realizado no capítulo 5 deste trabalho.

4 LINERS DE ARGILA COMPACTADA

Este capítulo apresenta o método de impermeabilização realizado através da compactação da argila, assim como descreve sua classificação e as propriedades que conferem um bom desempenho ao *liner*.

4.1 DEFINIÇÃO

O solo compactado é amplamente utilizado em *liners* de aterros sanitários a fim de confinar resíduos através de barreiras de impermeabilização ou para encerrar aterros totalmente ocupados por meio de barreiras de cobertura. Uma vez que seu principal objetivo é impedir o fluxo de fluidos, a propriedade mais significativa que determina o seu desempenho é a condutividade hidráulica. Solos ricos em argila são os mais utilizados em *liners* de solo compactado por apresentarem baixa condutividade hidráulica, impedindo a contaminação do solo (Benson & Daniel, 1990).

Os *liners* de impermeabilização de fundo de aterros mais tradicionalmente empregados consistem em argila compactada por apresentarem baixo custo de execução e abundância de material, sendo muitas vezes utilizado solo disponível no local do aterro. Os *liners* podem ser constituídos apenas de solo argiloso ou podem ser empregados em conjunto com geossintéticos. Em ambos os casos a argila é o principal responsável pela integridade da barreira, apresentando características que variam de acordo com a exigência de condutividade hidráulica (Daniel & Koerner, 1995).

Para garantir um bom desempenho, as agências reguladoras determinam que o solo compactado seja projetado para ter uma condutividade hidráulica inferior ou igual a 10^{-7} cm/s quando utilizados em locais de descarte de resíduos perigosos, industriais e resíduos sólidos urbanos. (Benson & Daniel, 1990).

Segundo Bueno, Zornberg e Lodi (2009), apesar da eficiência dos *liners* de argila compactada e de sua resistência adequada em longo prazo, estes podem apresentar contração das camadas argilosas, resultando em trincas e, conseqüentemente, diminuição de sua eficiência.

4.2 CLASSIFICAÇÃO

Segundo Daniel e Koerner (1995), os *liners* de argila compactada, também chamados de CCL (*compacted clay liner*), podem ser divididos em três grupos, materiais minerais naturais, mistura de solo e bentonita e outros materiais.

4.2.1 Materiais minerais naturais

O tipo mais comum de *liner* de argila compactada apresenta em sua composição solos minerais naturais que apresentam uma quantidade significativa de argila, sendo esses escavados de áreas de empréstimo situadas próximas ao local de implantação do aterro. A origem do solo pode ser residual, sedimentar, depósitos sedimentares fluviais ou lacustres ou outros tipos de depósito de solo.

4.2.2 Mistura de solo e bentonita

A mistura de solo e bentonita é adotada em casos onde o solo disponível na área de construção do aterro não apresenta uma quantidade adequada de argila em sua composição. Para que esse solo possa ser utilizado de modo a apresentar um bom desempenho, o mesmo é misturado com bentonita, material argiloso composto por minerais do grupo esmectita que conferem baixa permeabilidade ao solo devido a sua expansibilidade.

4.2.3 Outros materiais

O *liner* de argila compactada também pode conter outros materiais em sua constituição a fim de melhorar o seu desempenho tais como cinza volante, polímeros, resíduos industriais, entre outros.

4.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Rowe (2011) afirma que os *liners* de argila compactada devem apresentar desempenho hidráulico de modo a evitar a migração dos líquidos originados no aterro impedindo a contaminação das águas subterrâneas locais. No entanto, esse desempenho hidráulico do CCL

pode variar de acordo com diversos fatores, entre eles o método de instalação e compactação do *liner*, a composição da argila e o tipo do líquido percolado.

Boynton e Daniel (1985) acrescentam que a condutividade hidráulica também sofre interferência do teor de umidade, grau de saturação, gradiente hidráulico, tamanho dos aglomerados de partículas de solo, porosidade e do índice de vazios. Mitchell (1976) ainda cita a concentração eletrolítica, composição e natureza de cátions adsorvidos e as tensões atuantes.

As principais características a serem observadas de modo a garantir uma eficiente condutividade hidráulica do *liner* consistem na composição do solo argiloso, processo de compactação e a integridade da camada ao longo do tempo.

4.3.1 Composição do solo

Segundo Daniel e Koerner (1995), o tipo de argila selecionado para compor o *liner* deve ser escolhido de modo que apresente baixa condutividade hidráulica depois de compactado. Entretanto, outras propriedades do solo também influenciam no desempenho da camada como, por exemplo, o limite de plasticidade e de liquidez, a porcentagem de finos e a porcentagem de pedregulho.

A fim de garantir uma escolha adequada do material, muitas vezes o processo abrange o estudo das áreas de empréstimo próximas ao local de implantação do aterro, analisando amostras das mesmas com o intuito de encontrar o solo com os melhores índices de plasticidade, liquidez e porcentagem de finos. Com a evolução da obra são realizadas novas análises no local de empréstimo para confirmar os dados obtidos anteriormente, assim como uma verificação final das propriedades é feita após a instalação do *liner* (Daniel & Koerner, 1995).

Segundo Daniel (1993), os valores mínimos necessários para que um *liner* apresente condutividade hidráulica igual a 10^{-7} cm/s podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4 - Valores mínimos para obtenção da condutividade hidráulica adequada

Propriedade	Valor mínimo
Porcentagem de finos	$\geq 20-30\%$
Índice de plasticidade	$\geq 7-10\%$
Porcentagem de pedregulho	$\leq 30\%$
Tamanho máximo das partículas	25-50 mm

(fonte: DANIEL, Geotechnical practice for waste disposal, 1993, p. 140)

Segundo Benson, Zhai e Wang (1994), os solos mais plásticos, com maior limite de liquidez ou índice de plasticidade, ou aqueles que contêm uma maior quantidade de finos apresentam menor condutividade hidráulica.

Benson *et al.* (1994) também afirmam que a granulometria da argila compactada afeta a condutividade hidráulica uma vez que os vazios são responsáveis pela condução do fluxo e sofrem influência da proporção entre partículas grandes e pequenas. Se o solo for bem graduado tendo a argila como determinante do comportamento hidráulico o mesmo apresentará baixa condutividade.

4.3.2 Compactação

O objetivo da compactação consiste em ajustar as partículas do solo a fim de obter uma camada homogênea sem grandes continuidades de vazios. Daniel (1993) afirma que há influência do teor de umidade do solo, do método e da energia de compactação na condutividade hidráulica dos *liners* de solo compactados.

Estudos de laboratório realizados por Mitchell, Hooper e Campanella (1965, apud Daniel, 1993, p.139) demonstraram que a baixa condutividade hidráulica é obtida mais facilmente quando o solo é compactado com um teor de umidade ótimo e uma alta energia de compactação. Segundo Daniel (1993), o solo deve ser suficientemente úmido para que as camadas de solo argiloso sejam moldadas pela compactação eliminando grandes vazios entre grandes massas de solo.

As camadas de compactação devem apresentar boa aderência em sua interface de modo a evitar zonas altamente permeáveis e para que seja possível obter uma baixa condutividade hidráulica global do *liner* (DANIEL, 1993).

Para determinar a influência do peso do compactador, Benson *et al.* (1994) realizaram uma ampla quantidade de análises de desempenho hidráulico para um determinado peso, de modo a evitar a influência simultânea dos vários outros fatores que também afetam a condutividade hidráulica. Foi constatada uma tendência de diminuição da condutividade hidráulica com o aumento do peso, fato que já era esperado uma vez que, quanto maior o peso do compactador, maior a tendência de gerar um esforço superior de compactação, resultando em poros menores e mais uniformes assim como em uma menor condutividade hidráulica.

4.3.3 Integridade da camada

Segundo Bueno, Zornberg e Lodi (2009), apesar da eficiência dos *liners* de argila compactada e de sua resistência adequada em longo prazo, estes podem apresentar contração das camadas argilosas, resultando em trincas e, conseqüentemente, diminuição de sua eficiência. Daniel (1993) relata que essas fissuras são oriundas de efeitos de dessecação ou expansão, dependendo a temperatura a qual a camada está submetida. Um exemplo de solo com trincas de contração pode ser observado na figura 5.

Figura 5 - Liner de argila compactada com trincas oriundas da contração



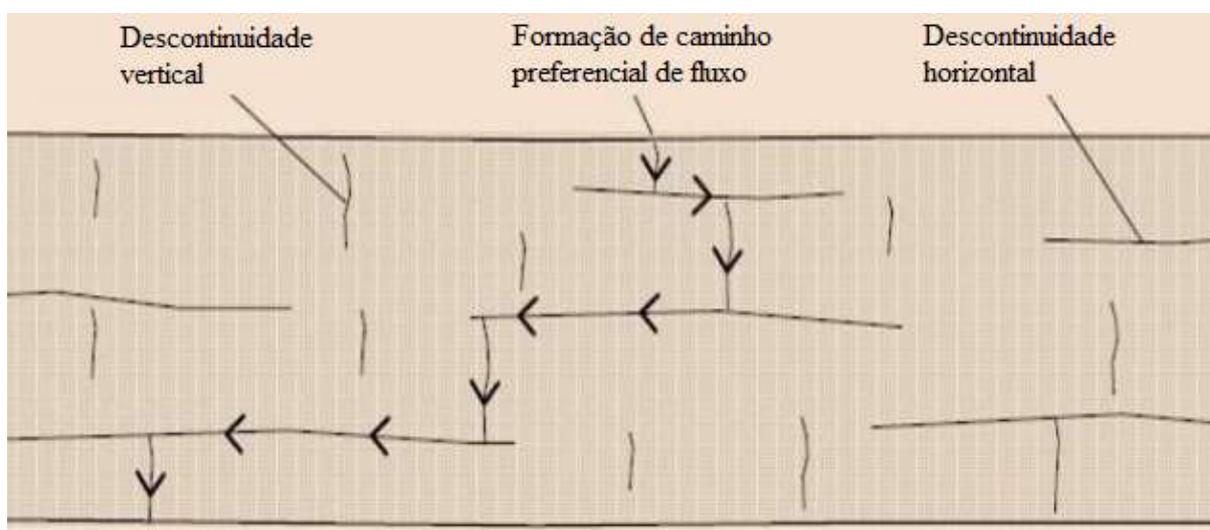
(fonte: OBER GEOSINTETICOS)

Segundo Boynton e Daniel (1985), as rachaduras por dessecação podem adentrar vários centímetros na camada de argila compactada em poucas horas e, quando umedecer novamente,

as rachaduras tendem a fechar devido à redistribuição das partículas, entretanto a condutividade hidráulica não apresentará o mesmo valor.

Por isso, Alonso (2005) afirma que, após a compactação, a superfície deve ser protegida contra o ressecamento uma vez que a formação de trincas na camada origina caminhos preferenciais de fluxo, como demonstra a figura 6, prejudicando a estanqueidade e eficiência da barreira. Esta proteção pode ser realizada com lona plástica ou através do umedecimento periódico do solo.

Figura 6 - Formação de caminhos preferenciais de fluxo na camada impermeabilizante



(fonte: adaptado de OBER GEOSINTETICOS)

Bowders e Daniel (1987) concluíram que os líquidos produzidos no aterro sanitário também podem afetar a integridade da camada devido às baixas constantes dielétricas. Quando o líquido orgânico substitui a água dos poros do solo, a camada dupla da partícula de solo encolhe podendo gerar macroporos ou trincas que causam o aumento da condutividade hidráulica.

A fim de evitar possíveis danos ao aterro relacionados à integridade da camada, os sistemas de impermeabilização de CCL comumente são adotados associados a uma geomembrana, conforme a figura 7, formando estruturas compostas que aumentam a segurança contra a contaminação das águas subterrâneas (Bueno, Zornberg & Lodi 2009).

Figura 7 – *Liner* de argila compactada associado ao uso de geomembrana



(fonte: OBER GEOSINTETICOS)

5 GEOSINTÉTICOS

Este capítulo consiste no estudo dos geossintéticos. É apresentada sua definição, classificação e aplicações, assim como aborda sua aplicação em aterros sanitários. O capítulo também apresenta a definição, propriedades e a aplicação do geocomposto argiloso, objeto principal do estudo.

5.1 DEFINIÇÃO

Geossintéticos são produtos poliméricos, sintéticos ou naturais, industrializados, que podem ser utilizados em diversas aplicações, sobre variados tipos de solo ou em combinações de solo e rocha como parte de projetos e soluções de engenharia geotécnica (Vilar *et al.*, 2015).

Apresentam-se na forma de manta, tira, ou estrutura tridimensional, e são utilizados em contato com o solo ou com outros materiais em aplicações da engenharia civil, geotécnica e ambiental. A confiabilidade de um produto com controle de qualidade industrial permite aos projetistas não apenas realizar obras com menor custo, mas também com muito maior segurança, tanto em termos da proteção do meio ambiente, quanto em termos de carregamentos aplicados. (IGS-Brasil, 2012).

5.2 CLASSIFICAÇÃO

Bathurst (2007) classifica os geossintéticos de acordo com o seu processo de fabricação conforme os itens a seguir.

5.2.1 Geotêxteis

Consistem em mantas contínuas, flexíveis e permeáveis de fibras ou filamentos esses sendo tecidos, não tecidos, tricotados ou costurados. São adotados para fins de separação, proteção, filtração, drenagem, reforço e controle de erosão. Uma aplicação do geotêxtil pode ser observada na figura 8.

Figura 8 – Aplicação de geotêxtil em talude



(fonte: MACCAFERRI DO BRASIL)

5.2.2 Geogrelhas

Consistem em materiais geossintéticos com forma de grelha. Principalmente utilizados em reforço de solos, conforme ilustra a figura 9.

Figura 9 – Aplicação de geogrelha para reforço



(fonte: GEOFOCO)

5.2.3 Georredes

Materiais com aparência semelhante à das grelhas, sendo a drenagem sua principal aplicação. São utilizados para conduzir elevadas vazões de fluidos ou gases uma vez que possuem alta porosidade ao longo do plano. Seu uso é frequentemente associado a um geotêxtil de modo a impedir sua colmatação.

Geocomposto argiloso: estudo comparativo ao *liner* de argila compactada em impermeabilização de fundo de aterro sanitário.

5.2.4 Geotubos

Tubos poliméricos, perfurados ou não, usados para drenagem de líquidos ou gases. Pode ser envolvido por um filtro geotêxtil para evitar sua obstrução. Na figura 10 é possível observar a aplicação do geotubo em trincheira drenante.

Figura 10 – Geotubo aplicado em trincheira drenante



(fonte: GEOFOCO)

5.2.5 Geocélulas

Equivalem a arranjos tridimensionais espessos constituídos por tiras poliméricas. A união das tiras forma células interconectadas que posteriormente serão preenchidas com solo ou concreto conforme a figura 11.

Figura 11 – Aplicação de geocélula para revestimento de canal



(fonte: BIDIM, 2007)

5.2.6 Geoexpandido

Consistem em blocos ou placas oriundos da expansão de espuma de poliestireno a fim de formar uma estrutura de baixa densidade. É utilizado para isolamento térmico, substituição a aterros de solo devido a sua leveza ou como uma camada vertical compressível para reduzir pressões de solo sobre muros rígidos.

5.2.7 Geomembranas

Mantas contínuas e flexíveis constituídas de um ou mais materiais sintéticos. Possuem baixíssima permeabilidade e atuam como barreiras para fluidos, gases ou vapores.

5.2.8 Geocompostos

São geossintéticos formados pela associação de dois ou mais tipos de geossintéticos a fim de desempenhar uma função específica. O geocomposto drenante, ilustrado na figura 12, resulta da associação de geotêxtil e georrede, assim como o geocomposto argiloso, combinação entre dois geotêxteis e uma camada de bentonita, representam exemplos de geocompostos.

Geocomposto argiloso: estudo comparativo ao *liner* de argila compactada em impermeabilização de fundo de aterro sanitário.

Figura 12 – Geocomposto drenante



(fonte: MACCAFERRI DO BRASIL)

5.3 APLICAÇÕES

Os geossintéticos podem exercer uma ou mais funções simultaneamente durante sua utilização. Suas principais aplicações são definidas, através da normativa internacional ISO 10318-1:2015 conforme:

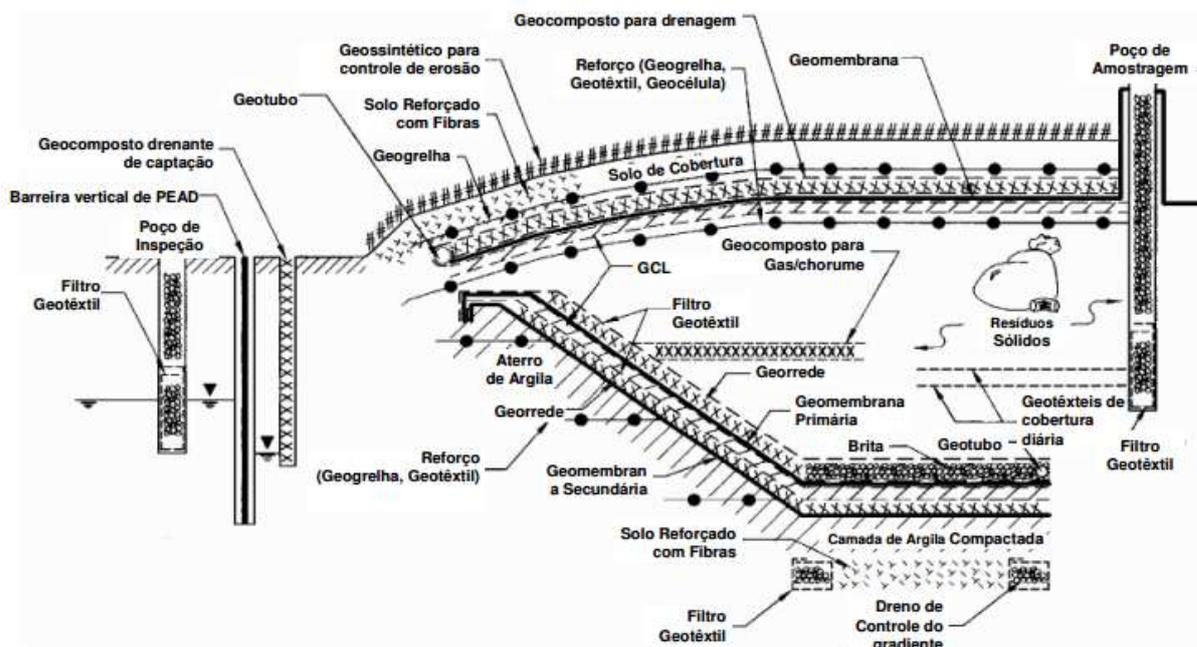
- a) drenagem: coletar e transportar águas pluviais, subterrâneas ou outros fluidos no plano do geossintético;
- b) filtração: reter o solo ou outras partículas submetidas a forças hidrodinâmicas, permitindo a passagem do fluido em movimento no interior ou através do geossintético;
- c) proteção: limitar e prevenir danos localizados em um elemento ou material;
- d) reforço: melhorar o comportamento mecânico do solo ou de outro material de construção através do comportamento tensão-deformação do geossintético;
- e) separação: prevenir a mistura de dois materiais adjacentes de naturezas diferentes, solos ou material de aterro;
- f) barreira: prevenir ou limitar a migração de fluidos;
- g) controle de erosão superficial: evitar ou limitar os movimentos de solo ou de outras partículas na superfície, por exemplo, de um talude.

Em aterros sanitários, os geossintéticos podem ser empregados com funções diversas, conforme ilustra a figura 13. As geogrelhas podem ser utilizadas como reforço dos taludes, enquanto que

os geotêxteis são usados para filtração de percolados ou para proteção da geomembrana. As georredes e geotubos atuam como materiais drenantes do chorume e os geocompostos bentoníticos juntamente com as geomembranas têm a função de impermeabilização do fundo e na cobertura de aterros sanitários, impedindo a propagação dos líquidos e gases oriundos da decomposição dos resíduos.

Segundo Rowe (1998), as principais preocupações ao adotar materiais geossintéticos no projeto de barreiras de aterros sanitários consistem no transporte de contaminantes, a vida útil dos materiais empregados, problemas geotécnicos, tais como estabilidade de taludes e recalques diferenciais, e a atenuação de contaminantes (sorção, biodegradação e diluição).

Figura 13 – Diversas aplicações de geossintéticos em projetos de aterros sanitários



(fonte: IGS-Brasil)

5.4 GEOCOMPOSTO ARGILOSO

Bathurst (2007) define os geocompostos argilosos como aqueles fabricados com uma camada de bentonita usualmente disposta entre dois geotêxteis, de topo e de base, ou incorporada a uma geomembrana ou a uma única manta de geotêxtil. Os geotêxteis que compõem os geocompostos argilosos geralmente são costurados ou agulhados através do núcleo argiloso a fim de aumentar

a resistência interna ao cisalhamento. Devido à baixa permeabilidade da bentonita, quando hidratados apresentam eficiência como barreira para líquidos ou gases. (BATHURST, 2007).

Em virtude da presença da bentonita em sua constituição, os geocompostos argilosos também são chamados de geocompostos bentoníticos e costumam ser conhecidos como GCL, acrônimo da denominação em inglês correspondente a *geosynthetic clay liner*. (Vilar *et al.*, 2015). Um exemplo de geocomposto argiloso pode ser observado na figura 14.

Figura 14 – Geocomposto argiloso



(fonte: INOVAGEO, 2017)

Devido à flexibilidade de produção e rápidas inovações, o desempenho dos GCLs varia conforme sua composição. Diferenças como a mineralogia da bentonita utilizada (fina ou granular, sódica ou cálcica, etc.), o tipo de geotêxtil (tecido ou não-tecido), a presença ou não de geomembrana e os diferentes métodos de colagem e costura favorecem comportamentos singulares entre os GCLs (VIANA, 2007).

As principais vantagens e desvantagens da utilização de geocompostos argilosos em *liners* podem ser observadas na tabela 5.

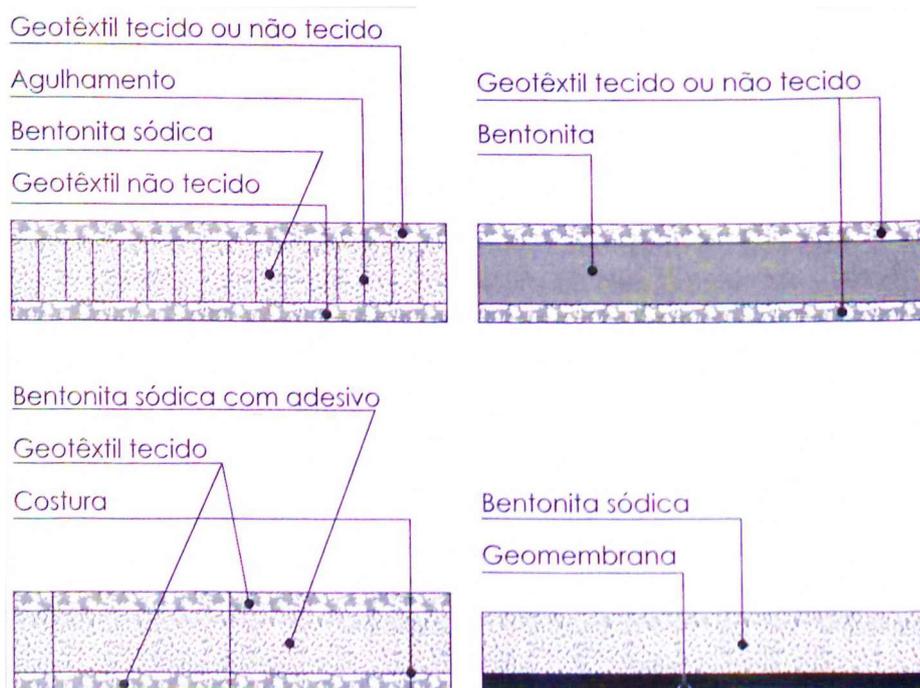
Tabela 5 - Vantagens e desvantagens do uso de GCLs

Vantagens	Desvantagens
Rápida instalação / Menor necessidade de especialização / menor custo	Baixa resistência ao cisalhamento da bentonita (no caso de GCLs sem reforço)
Condutividade hidráulica muito baixa quando instalado adequadamente	GCLs podem ser perfurados durante ou após a sua instalação
Pode resistir a grandes recalques diferenciais	Possível perda de bentonita durante a instalação
Excelentes características de autocicatrização	Bentonita com baixo teor de umidade é permeável ao gás
Independente de disponibilidade de materiais naturais no local da obra	Problemas de resistência ao cisalhamento na interface com outros materiais
Fácil reparação	Pequena capacidade de atenuação de chorume
Resistência aos efeitos de congelamento e degelo	Possível perda de resistência pós pico
Maior volume de operação do aterro devido à pequena espessura do material	Possível aumento da permeabilidade a longo prazo
Dispensa de ensaios de condutividade hidráulica no campo	Maior fluxo de contaminantes por difusão em comparação com CCLs
GCLs hidratados apresentam eficiência como barreira de gases	Troca de cátions (GCLs com bentonita sódica)
Reduz a sobre pressão no substrato compressível	Risco de dessecação se não coberto adequadamente (no mínimo 0,6 m de solo)

(fonte: adaptado de Bouazza, 2002)

As classes dos geocompostos argilosos dividem-se em reforçados e não reforçados. Quando reforçados, suas camadas externas de geossintéticos são unidas mecanicamente através de costura ou agulhamento. No caso dos não reforçados, os mesmos são fabricados com o uso de adesivos. (VILAR *et al.*, 2015). A figura 15 ilustra as variações dos geocompostos argilosos.

Figura 15 – Geocompostos argilosos reforçados e não reforçados



(fonte: VERTEMATTI, Manual Brasileiro de Geossintéticos, 2015, p. 460)

5.4.1 Propriedades

As propriedades pertinentes aos geocompostos argilosos estão descritas nos itens a seguir.

5.4.1.1 Bentonita

Principal componente de um geocomposto argiloso, a bentonita consiste em um material composto por minerais do grupo esmectita, também denominada montmorilonita, caracterizada pela elevada capacidade de troca catiônica, ampla área ou superfície específica, alto potencial de expansão e baixa condutividade hidráulica. O cátion adsorvido dominante é o sódio ou o cálcio, definindo a bentonita como sódica ou cálcica. Para fins de selagem e impermeabilização, a bentonita sódica é mais utilizada por apresentar um poder muito maior de expansão. Em contrapartida, a bentonita cálcica apresenta maior estabilidade quimicamente quando exposta a certos compostos químicos (HEINECK, 2002). Segundo Bouazza (2002), bentonitas sódicas podem expandir de 10 a 15 vezes o seu volume quando hidratadas, enquanto que bentonitas cálcicas expandem de 2 a 4 vezes o volume inicial.

A camada de bentonita constituinte do geocomposto argiloso apresenta espessura em torno de um centímetro e umidade entre 10 e 20%, da ordem de 3 a 5 kg/m² (VILAR *et al.*, 2015).

A expansibilidade da bentonita e sua afinidade com a água constituem as características que conferem baixa permeabilidade. Quando hidratada em confinamento, condição assumida ao ser utilizada em *liners*, a expansão das partículas da bentonita preenche os vazios presentes no solo impedindo a passagem do líquido. Se conservada em estado úmido, a bentonita mantém sua maleabilidade, assim como sua condição impermeável (KOZICKI *et al.*, 1994).

5.4.1.2 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica de um GCL depende altamente das condições de hidratação e da tensão efetiva aplicada durante a infiltração do líquido. Esses fatores, juntamente com o método de fabricação do geocomposto, teor de umidade antes da hidratação e quantidade de bentonita, influenciam significativamente na espessura do geocomposto argiloso (ROWE, 1998). O desempenho hidráulico de um GCL também está relacionado à condutividade hidráulica da bentonita uma vez que sua expansibilidade e quantidade de vazios variam conforme a tensão confinante aplicada. As condutividades hidráulicas de diferentes tipos de GCL obtidas em laboratório variam aproximadamente entre 10⁻¹⁰ a 10⁻¹² cm/s (VIANA, 2007).

Segundo Rowe (1998), análises feitas em amostras permeadas com água da torneira e água destilada exprimem resultados muito semelhantes, enquanto amostras permeadas com lixiviado de aterro real ou sintético podem ter uma condutividade hidráulica de ordem de grandeza maior que a da água, demonstrando que o tipo de fluido influencia a condutividade hidráulica do *liner*. Também foi observada a variação da condutividade hidráulica conforme a tensão de confinamento aplicada no momento da hidratação. Portanto, há uma necessidade de analisar as condições hidratantes e a tensão confinante às quais o geocomposto será submetido no aterro sanitário para que a condutividade hidráulica do GCL seja adotada corretamente no projeto de impermeabilização.

O desempenho hidráulico do GCL também é afetado devido ao processo de erosão interna que envolve o movimento das partículas finas devido à existência de altos gradientes hidráulicos. As partículas erodidas podem atravessar o geotêxtil não-tecido e contaminar o solo de base ou colmatar o sistema de drenagem (VIANA, 2007).

5.4.1.3 Resistência ao cisalhamento

A resistência do geocomposto bentonítico pode ocorrer devido à resistência interna (ruptura da bentonita) ou devido à resistência de interface dada pelo contato do geocomposto com o material adjacente. Quanto à resistência interna, a baixa capacidade é conferida pela variabilidade da resistência da bentonita em diferentes níveis de hidratação. Em condições secas apresentam ângulos de atrito satisfatórios, por vezes superiores a 30°. Entretanto, quando hidratadas, seu ângulo de atrito fica muito baixo sendo registrados valores inferiores a 10°, o que gera situações de instabilidade e favorecendo rupturas (VILAR *et al.*, 2015).

Ainda segundo Vilar *et al.* (2015), a resistência externa fica condicionada ao comportamento da interface entre o geocomposto e o material em contato, assim como pela possibilidade do vazamento de bentonita em caso de defeitos no geotêxtil podendo causar a lubrificação da interface. Viana (2007) também define como condicionante da resistência externa o uso do GCL em taludes de aterros sanitários uma vez que a deposição de resíduos favorece um complexo estado de tensões atuantes no geocomposto, demandando um bom atrito de interface entre o geocomposto e solo de modo a resistir aos esforços.

5.4.1.4 Autocicatrização

Durante o período de instalação e operação do aterro sanitário, as atividades realizadas sem cautela sobre a camada impermeabilizante podem acarretar furos no geocomposto bentonítico de modo a danificar o sistema. Entretanto, uma de suas principais características consiste na capacidade de autocicatrização, decorrente da expansibilidade da bentonita, que impede a avaria da estrutura. Segundo Vilar *et al.* (2015), experimentos realizados em laboratório com GCL do tipo colado, seco e com furos monitorados constataram que furos com diâmetros menores que 25 mm provocam alterações desconsideráveis na condutividade hidráulica da barreira quando esta se encontra hidratada e confinada, condições às quais está submetida em campo.

Vilar *et al.* (2015) também afirmam que a autocicatrização representa um diferencial para o GCL quando está submetido a ciclos de umedecimento e secagem, onde a umidade causa a expansão da camada de bentonita enquanto a secagem provoca a contração da mesma, resultando no aparecimento de trincas e aumento de permeabilidade. Ensaios de laboratório

concluíram que a autocicatrização permite a recuperação das propriedades hidráulicas da barreira assim que esta for novamente hidratada, com alterações desprezíveis de condutividade.

5.4.2 Aplicação em aterro sanitário

O geocomposto argiloso é utilizado em aterros sanitários como barreira de cobertura ou para fins de impermeabilização de fundo, sistema comumente chamado de *liner*.

Vilar *et al.* (2015) definem a função impermeabilizante exercida pelo geocomposto como a capacidade de prevenir ou bloquear a migração de líquidos e gases para fora ou para dentro de um determinado sistema. Segundo os autores, os geocompostos argilosos têm sido adotados em aterros sanitários associados a solos ou em substituição dos mesmos em sistemas impermeabilizantes. Apresentam uma solução inovadora através de suas propriedades como flexibilidade, autocicatrização em caso de perfuração e relativa facilidade de instalação e de emenda.

Segundo Bouazza (2002) é crescente o interesse no uso de GCLs associados a um segundo material na cobertura de aterros sanitários ou como parte da barreira de impermeabilização de fundo por causa da sua baixíssima condutividade hidráulica e baixo custo relativo.

Quando a camada impermeabilizante consiste apenas no uso do geocomposto bentonítico, denomina-se como camada simples. Do contrário, quando associado ao uso de outros materiais geossintéticos ou de solo compactado, configura-se uma camada composta (BENJAMIN, 2013).

O uso do GCL em aterros sanitários tem se mostrado cada vez mais apropriado e eficiente para a proteção do meio ambiente. No entanto, para que esta eficiência seja garantida, é necessário que o GCL seja especificado de acordo com as condições de solicitação de operação e que seja fabricado com controle de qualidade adequado (REVISTA ENGENHARIA, 2013).

Conforme Koerner (2005), a escolha do GCL deve ser feita com base nas principais propriedades da especificação do mesmo, ou seja, a partir das características de seus elementos constituintes. A bentonita deve ser analisada em relação à sua expansividade e condutividade hidráulica enquanto os geotêxteis são adotados conforme sua gramatura. O geocomposto como

um todo deve ser escolhido com base na massa e teor de umidade da bentonita que o compõe juntamente com a resistência à tração e ao descolamento do material como um todo.

5.4.2.1 Dimensionamento

O dimensionamento do *liner* de geocomposto bentonítico baseia-se na definição do tipo da camada impermeabilizante (simples ou composta) das propriedades de desempenho desejadas e da área da superfície a ser impermeabilizada, considerando também a área necessária para emendas. Durante o processo de execução é imprescindível atentar aos detalhes construtivos descritos a seguir, segundo a Ober Geossintéticos, de modo a garantir a eficiência da camada especificada em projeto.

5.4.2.2 Manuseio

Ao receber o produto na obra é necessário que o descarregamento seja realizado com equipamentos adequados e cuidados de manuseio como, por exemplo, o içamento da bobina em dois pontos de sustentação a fim de evitar deformações. Devido ao peso considerável dos materiais, o transporte e instalação do GCL devem ser realizados mecanicamente.

Em seguida realiza-se uma verificação do material recebido com o intuito de identificar possíveis danos ocorridos durante o transporte e para que os mesmos sejam reparados antes da instalação. As bobinas que apresentarem água em seu interior devem receber uma inspeção minuciosa para certificar a ausência de danos.

O armazenamento deve ser realizado por no máximo 30 dias, em superfície seca, limpa, plana e nivelada, não excedendo o empilhamento de cinco bobinas. As mesmas devem ser cobertas de modo a protegê-las da umidade. A bentonita em pó deve ser armazenada em local próximo, afastadas do solo para que não haja alterações significativas de sua umidade. Os produtos devem ser mantidos em suas embalagens originais até o momento da instalação.

5.4.2.3 Superfície de apoio

O solo onde o geocomposto bentonítico será posicionado deve ser regularizado, conforme a figura 16, a fim de torná-lo plano, firme, sem elevações superiores a 12 mm, isentos de buracos, fendas e água parada, assim como deve apresentar granulometria de forma que 80% das

partículas apresentem diâmetro menor que 0,25 mm. Se constatada a presença de vegetação, raízes, pedregulhos ou outros objetos pontiagudos, os mesmos devem ser removidos.

Figura 16 - Regularização da base para instalação do GCL



(fonte: OBER GEOSSINTÉTICOS)

5.4.2.4 Instalação

Após a regularização do terreno, o GCL deve ser posicionado cuidadosamente, impedindo a formação de rugas e dobras em sua superfície, a fim de evitar danos no terreno e no próprio material. Em caso de período chuvoso ou superfície molhada, é recomendado suspender temporariamente a instalação.

O sentido de abertura das bobinas deve coincidir com a direção da inclinação do talude, tanto na superfície plana quanto no próprio talude, conforme ilustra a figura 17 e figura 18, que também indica a necessidade de ancoragem no topo do talude.

Figura 17- Abertura das bobinas do GCL



(fonte: OBER GEOSINTÉTICOS)

Figura 18 - Ancoragem no topo do talude



(fonte: OBER GEOSINTÉTICOS)

5.4.2.5 Emendas

Ao associar o uso de duas ou mais mantas, é preciso atender às especificações construtivas do produto com o intuito de assegurar a estanqueidade da barreira. As sobreposições laterais de bobinas devem apresentar ao menos 15 centímetros enquanto as de início ou fim de bobina deverão corresponder a 60 centímetros. Cada emenda deve ser selada através da aplicação de bentonita em pó na proporção 0,4 kg/m, conforme demonstra a figura 19. O sentido da

sobreposição deve corresponder ao caimento do terreno a fim de impedir a entrada de água ou lama embaixo da barreira.

Figura 19 - Detalhe de sobreposição e emenda do GCL



(fonte: OBER GEOSSINTÉTICOS)

Quando utilizado em conjunto com geomembranas, as emendas do GCL devem estar afastadas ao menos 1,5 m das soldas da geomembrana de modo a garantir a estanqueidade da barreira.

5.4.2.6 Interferências e reparos

Na presença de interferências com tubos ou outros sistemas, a manta deve ser cortada com faca ou estilete e o preenchimento com bentonita em pó para vedação deve ser realizado na quantidade de 3 kg/m.

Caso haja necessidade de reparo de perfurações ou rasgos, um fragmento da manta com dimensões 30 cm maiores que o dano deve ser posicionado sobre o mesmo e fixado com bentonita em pó na mesma proporção adotada para as emendas.

5.4.3 Análise comparativa ao liner de argila compactada

Segundo Vilar *et al.* (2015), *liners* de geocomposto argiloso têm sido frequentemente adotados em substituição ou associados a solos para fins de impermeabilização de fundo de aterro sanitário. Isso ocorre uma vez que o GCL possui propriedades intrínsecas como sua

flexibilidade, propriedade de autocicatrização em caso de perfuração, assim como praticidade de instalação. Na tabela 6 é possível observar as principais características de cada sistema.

Tabela 6 - Principais características e diferenças entre solo compactado e geocomposto argiloso, quando utilizados como barreiras impermeáveis

Característica	Geocomposto argiloso	Solo compactado
Materiais constituintes	Bentonita, adesivos e geotêxteis	Solos locais ou misturas de solo e bentonita
Espessura	$\cong 10$ mm	Em torno de 30 e 60 cm
Condutividade hidráulica	10^{-11} m/s $\leq k \leq 5 \times 10^{-11}$ m/s	$k \leq 10^{-9}$ m/s
Velocidade e facilidade de construção	Rápida, instalação simples	Lenta, execução complicada
Facilidade de garantia de qualidade	Relativamente simples e direta, procedimentos intuitivos	Complicada, requer pessoal habilitado e com bom conhecimento
Vulnerabilidade a ressecamento durante a construção	Pouco resseca durante a construção	Pode ressecar durante a construção
Vulnerabilidade a punção	Vulnerável quando apresentar pequena espessura	Barreiras espessas não podem ser punçoadas acidentalmente
Vulnerabilidade a danos por recalques diferenciais	Resiste a recalques diferenciais devido à flexibilidade da barreira	Vulnerável a fissuras devido à rigidez da barreira
Disponibilidade de materiais	Facilmente transportável a qualquer local	Materiais apropriados não disponíveis em qualquer local
Custo	Bastante previsível pois não varia muito entre projetos	Muito variável, depende das características dos solos disponíveis
Facilidade de reparo	Fácil, uso de remendo sobre a área danificada	Difícil, exige deslocamento de equipamentos
Experiência	Relativamente novo no mercado	Utilizado há muitos anos

(fonte: adaptado de VILAR et al., Manual Brasileiro de Geossintéticos, 2015, p. 461)

6 ESTUDO DE CASO: REDIMENSIONAMENTO DE *LINER* DE FUNDO DE ATERRO SANITÁRIO

Com a finalidade de exemplificar a análise comparativa entre os métodos descritos nos capítulos anteriores, escolheu-se um aterro sanitário previamente dimensionado com solução de *liner* de fundo de argila compactada e o mesmo foi redimensionado para o *liner* de geocomposto bentonítico. A caracterização do aterro sanitário estudado, assim como o dimensionamento e a análise comparativa estão descritos neste capítulo.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS - SP

O estudo de caso consiste no aterro sanitário de São Carlos, situado no Estado de São Paulo, próximo ao município de São Carlos. A vista superior do aterro pode ser observada na figura 20.

Figura 20 – Vista superior do aterro sanitário



(fonte: Google Earth, 2017)

Durante os anos 1999 e 2011 São Carlos teve seus resíduos recebidos pelo antigo aterro sanitário municipal, localizado na Fazenda Guaporé, a 15 km do centro da cidade de São Carlos. Quando teve sua capacidade esgotada em dezembro de 2011, São Carlos não apresentava destinação local para seus resíduos devido à falta do licenciamento ambiental do novo aterro. Dessa forma, durante o período de dezembro de 2011 até junho de 2013, ano de inauguração do novo aterro, os resíduos sólidos gerados pelo município eram transportados para um aterro sanitário privado em Guatapará, visando dar a destinação ambientalmente adequada para os mesmos e em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Entretanto, Guatapará localiza-se a 68,7 Km de São Carlos, o que gerou um custo de transbordo de R\$ 400 mil mensais, além dos impactos ambientais provenientes do deslocamento desses resíduos.

6.1.1 Localização e acesso

O aterro sanitário localiza-se na área rural de São Carlos, a cerca de 10 km do centro da cidade. O principal acesso ao aterro é dado através do Km 162+500m da Rodovia Luiz Augusto de Oliveira (SP – 215) que liga os municípios de São Carlos e Ribeirão Bonito, conforme a figura 21.

Figura 21 - Localização do aterro sanitário



(fonte: Google Earth, 2017)

6.1.2 Geometria

Para definições de projeto determinou-se uma previsão de disposição diária inicial de 160 toneladas, com base no período final do ano de 2010, atingindo 320 t/dia em seu encerramento, previsto para ocorrer em 2032.

De modo a suprir a demanda estimada durante a vida útil do aterro, a área utilizada para a disposição de resíduos equivale a 219.234,48 m². A área total de implantação do empreendimento é de 565.685,33 m², abrangendo a área de disposição, lagoas de contenção de líquidos percolados, lagoas de contenção e drenagem de águas pluviais, depósito de solo e materiais de construção, acessos internos e infraestrutura.

Para possibilitar a disposição dos resíduos, foi preciso realizar um processo de escavação no terreno natural, dado através de nove células de corte segundo as dimensões da tabela 7, totalizando um volume de movimentação de terra equivalente a 511.577 m³.

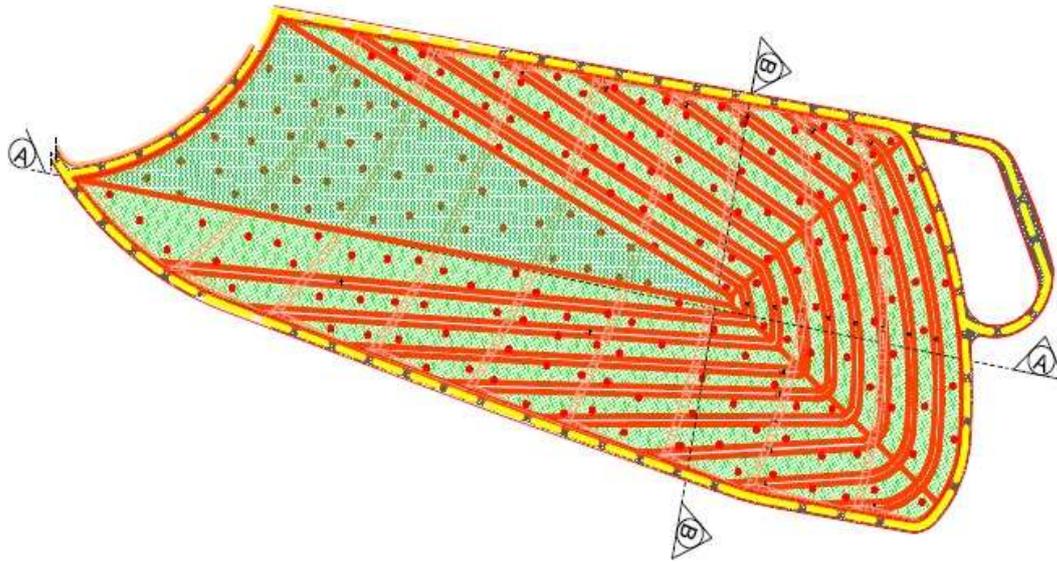
Tabela 7 – Dimensões das células de corte

Célula de corte	Área Superior (m ²)	Altura (m)	Volume (m ³)
I	17.102,42	4,50	43.844
II	26.462,41	4,30	53.985
III	27.558,20	4,40	57.813
IV	25.643,27	4,40	53.642
V	26.605,59	5,20	65.883
VI	26.182,07	5,20	64.882
VII	24.918,93	5,20	61.639
VIII	22.136,27	5,20	54.318
IX	22.625,32	5,20	55.571

(fonte: adaptado de Prefeitura Municipal de São Carlos, Aterro Sanitário para disposição final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP - Estudo de Impacto Ambiental, 2009, p. 130)

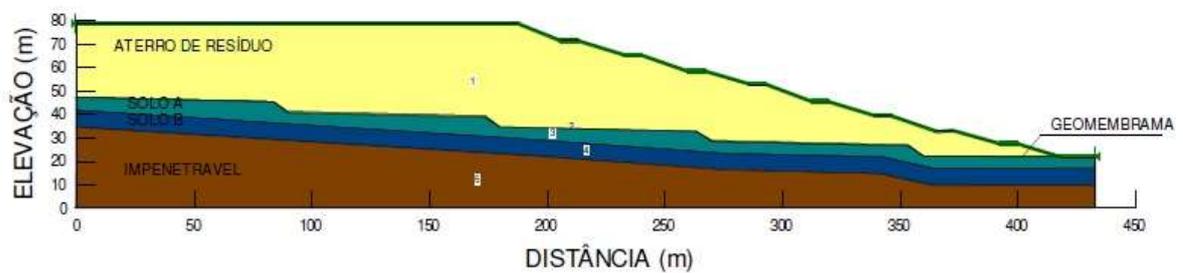
A configuração projetada do aterro, com a disposição prevista dos resíduos sólidos urbanos, pode ser observada na figura 22. As seções transversais A-A e B-B indicados podem ser verificados na figura 23 e figura 24, respectivamente.

Figura 22 – Planta de implantação do aterro sanitário e a localização das seções transversais A-A e B-B



(fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos, Aterro Sanitário para disposição final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP - Estudo de Impacto Ambiental, 2009, p. 140)

Figura 23 - Seção transversal A-A



(fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos, Aterro Sanitário para disposição final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP - Estudo de Impacto Ambiental, 2009, p. 143)

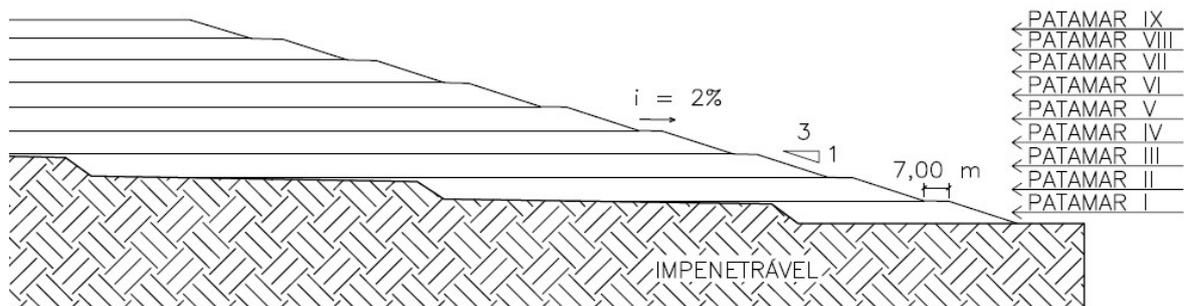
Figura 24 - Seção transversal B-B



(fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos, Aterro Sanitário para disposição final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP - Estudo de Impacto Ambiental, 2009, p. 143)

O método de disposição dos resíduos sólidos urbanos no aterro de São Carlos consiste no método de rampa, devido à existência de inclinação do terreno natural. O projeto é composto por nove patamares de resíduos apresentando alturas variáveis, onde cada patamar contém uma berma de equilíbrio com 7 metros de largura e inclinação equivalente a 2% de modo a impedir o acúmulo de água, assim como taludes com inclinação de 3:1 (H:V). A configuração dos patamares de resíduos pode ser observada na figura 25.

Figura 25 – Configuração da disposição final dos resíduos sólidos no aterro sanitário



(fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Aterro Sanitário para disposição final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP - Estudo de Impacto Ambiental, 2009, p. 143)

6.1.3 Vida útil

Para determinar a vida útil do aterro sanitário adotou-se, inicialmente, um período de operação de 20 anos. Com isso, calculou-se a projeção de geração de resíduos nesse período e verificou-se a disponibilidade da área escolhida para receber o montante estimado. Uma vez que o local

de implantação do aterro é capaz de atender à demanda prevista, a vida útil do aterro sanitário de São Carlos foi determinada em 20 anos.

Uma vez que o projeto foi desenvolvido em 2008, a taxa de geração de resíduos foi obtida a partir dos 4 anos antecedentes, de modo a obter um crescimento representativo da geração *per capita* assim como crescimento populacional. Tais valores considerados na análise referem-se ao antigo aterro sanitário, que viria a finalizar suas atividades em 2011. Não foi considerada a redução na quantidade de resíduos em virtude do crescimento da coleta seletiva a fim de favorecer a segurança. O período de 2004 a 2007 foi adotado em função de sua taxa de crescimento elevada.

A quantidade de resíduos dispostos no aterro sanitário nesse período, assim como a taxa de variação da disposição de resíduos podem ser observados na tabela 8 e tabela 9 respectivamente.

Tabela 8 - Quantidade mensal, em toneladas, de resíduos domiciliares dispostos no aterro sanitário, nos anos 2004 a 2007.

Mês	2004	2005	2006	2007
Janeiro	4.383,53	4.571,45	4.793,99	5.178,02
Fevereiro	3.812,20	3.917,72	4.158,80	4.302,78
Março	4.141,39	4.214,75	4.604,47	4.537,63
Abril	3.862,43	3.970,63	4.086,85	4.137,01
Maiο	3.793,97	3.963,71	4.334,26	4.271,52
Junho	3.901,33	3.812,62	4.049,65	4.135,13
Julho	3.937,89	3.779,71	4.066,35	4.170,98
Agosto	3.916,28	4.066,42	4.301,68	4.211,66
Setembro	3.889,57	3.929,89	4.114,54	4.108,99
Outubro	3.800,44	4.170,64	4.363,85	4.442,55
Novembro	3.913,14	4.170,81	4.408,21	4.343,39
Dezembro	4.465,93	4.711,77	5.106,53	4.718,98
Total	47.818,10	49.280,12	52.389,18	52.558,64
Média	3.984,84	4.106,68	4.365,77	4.379,89

(fonte: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Sustentável, Ciência e Tecnologia)

Tabela 9 - Variação da disposição de resíduos domiciliares no aterro sanitário, nos anos 2004 a 2007

Mês	Variação da geração de resíduos no período (%)		
	2004/2005	2005/2006	2006/2007
Janeiro	4,29	4,87	8,01
Fevereiro	2,77	6,15	3,46
Março	1,77	9,25	0,99
Abril	2,8	2,93	1,01
Maio	4,47	9,35	0,99
Junho	-2,27	6,22	1,02
Julho	-4,02	7,58	1,03
Agosto	3,83	5,79	0,98
Setembro	1,04	4,7	1
Outubro	9,74	4,63	1,02
Novembro	6,58	5,69	0,99
Dezembro	5,5	8,38	0,92
Média anual	3,06	6,31	1,78
Média no período		3,72	

(fonte: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Sustentável, Ciência e Tecnologia)

A partir desses dados foi possível, então, estimar a quantidade de resíduos a ser disposta no novo aterro sanitário. A taxa de geração de resíduos adotada foi a média no período, equivalente a 3,72% de modo a favorecer a segurança considerando também o crescimento populacional e o aumento da geração *per capita*. A tabela 10 apresenta os valores estimados a partir do ano 2010, ano previsto para o início das operações do aterro sanitário, considerando uma taxa de compactação de resíduos de 0,7 t/m³. O volume estimado total de resíduos a ser depositado no aterro sanitário corresponde a 2.777.860 m³.

Tabela 10 - Estimativa da massa de resíduos a ser disposta no aterro, por ano de operação

Ano	Quantidade estimada de resíduos a serem dispostos no aterro			
	t/dia	t/ano	m ³ /ano	Volume acumulado (m ³)
1	161	58.645	83.779	83.779
2	167	60.827	86.895	170.674
3	173	63.089	90.128	260.802
4	179	65.436	93.481	354.282
5	186	67.871	96.958	451.240
6	193	70.395	100.565	551.805
7	200	73.014	104.306	656.111
8	207	75.730	108.186	764.297
9	215	78.547	112.211	876.507
10	223	81.469	116.385	992.892
11	232	84.500	120.714	1.113.607
12	240	87.643	125.205	1.238.811
13	249	90.904	129.862	1.368.674
14	258	94.285	134.693	1.503.367
15	268	97.793	139.704	1.643.071
16	278	101.431	144.901	1.787.972
17	288	105.204	150.291	1.938.263
18	299	109.117	155.882	2.094.146
19	310	113.177	161.681	2.255.826
20	322	117.387	167.695	2.423.522
21	334	121.754	173.934	2.597.456
22	346	126.283	180.404	2.777.860

(fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos, Aterro Sanitário para disposição final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP - Estudo de Impacto Ambiental, 2009, p. 134)

6.1.4 *Liner* de argila compactada

Uma vez que o solo local consiste em solo argiloso e dispensa o uso de impermeabilização complementar, conforme as condições impostas pela NBR 15849 (2010) explicitadas no item 3.4.3 deste trabalho, o método de impermeabilização de base do aterro sanitário de São Carlos caracteriza-se como *liner* de argila compactada e o mesmo foi executado através da compactação do leito natural do terreno escavado de modo a atingir um coeficiente de impermeabilização mínimo equivalente a 10^{-7} cm/s.

O processo de impermeabilização é composto pela regularização do fundo da escavação, seguido da escarificação do terreno, umedecimento ou secagem do mesmo e compactação com

rolo pé de carneiro, realizada no ramo úmido, dentro de um intervalo de 2% da umidade ótima. O grau de compactação equivale a 95% do Ensaio Normal de Compactação de Solos (Proctor Normal) a fim de obter a condutividade hidráulica pré-determinada. Com a finalidade de proteger mecanicamente a camada impermeável, foi utilizada uma manta de PEAD (polietileno de alta densidade) com 2 mm de espessura, assentada e ancorada sobre o solo compactado.

O *liner* devidamente executado, desconsiderando a manta protetora de PEAD, apresenta uma espessura igual a 60 centímetros, conforme o mínimo exigido pela NBR 15849 (2010), executados em três camadas com 20 centímetros de espessura.

6.1.4.1 Volume

A partir da planta de implantação fornecida não é possível calcular a área exata de impermeabilização devido à irregularidade da geometria do aterro e à existência de apenas um corte representativo da impermeabilização de fundo. Sendo assim, a mesma foi calculada a partir de uma estimativa de aumento no valor da área superficial em virtude da inclinação e dos taludes presentes na superfície de impermeabilização, que é equivalente a 10% da área de implantação. Portanto, a área de impermeabilização equivale a 1,1 vezes a área de implantação, totalizando 209604,5 m².

O volume total ocupado pela impermeabilização equivale a 125762,71 m³.

6.1.4.2 Parâmetros executivos

A estimativa de tempo e custo de execução da impermeabilização com argila compactada foi obtida através do Sistema de Custos Rodoviários – SICRO, desenvolvido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT) a fim de determinar um valor referencial tanto para insumos quanto para serviços a serem contabilizados em orçamentos de obras licitadas.

O SICRO consiste em um levantamento realizado através de uma metodologia de formação de preços que engloba a grande variação regional e temporal em função da disponibilidade desses insumos e das distâncias dos centros de produção. Também são considerados os fatores econômicos de cada região, tais como a demanda gerada pelo nível de investimento e desenvolvimento de obras locais.

Os serviços considerados na execução do *liner* de argila compactada consistem em escavação e compactação do solo local. O SICRO fornece a composição referente a esses serviços incluindo equipamentos e mão-de-obra, informando a produtividade da equipe assim como o custo por hora de trabalho.

A partir da produtividade e do volume de movimentação de terra é possível obter o tempo necessário para realizar o serviço. Por se tratarem de serviços que não podem ser realizados simultaneamente, o tempo de execução total resulta da soma do tempo de execução de cada serviço.

O tempo total para a execução da camada de impermeabilização de argila compactada equivale a 169 dias, considerando a carga de trabalho diária igual a 8 horas/dia. Os valores de produtividade e tempo de execução podem ser observados na tabela 11 e tabela 12, respectivamente.

Tabela 11 - Valores de produtividade para serviços de execução

Serviço	Unidade	Produtividade
Escavação	m ³ /h	208,38
Compactação	m ³ /h	168,20

(fonte: DNIT, Sistemas de Custos Referenciais de Obras, maio 2017, p. 5216 e 5482)

Tabela 12 - Valores referentes ao tempo de execução da impermeabilização

Serviço	Unidade	Tempo de execução
Escavação	h	603,53
Compactação	h	747,70
Total	dias	169

(fonte: Elaborado pela autora, adaptado de DNIT, Sistemas de Custos Referenciais de Obras, maio 2017, p. 5216 e 5482)

O custo total para a execução da camada de impermeabilização de argila compactada equivale a R\$ 4260,21. Os valores unitários e totais correspondentes a cada serviço podem ser observados na tabela 13 e tabela 14, respectivamente.

Tabela 13 - Custo unitário por hora de serviço

Serviço	Unidade	Custo Unitário
Escavação	R\$/h	3,59
Compactação	R\$/h	2,80

(fonte: DNIT, Sistemas de Custos Referenciais de Obras, maio 2017, p. 5216 e 5482)

Tabela 14 - Valores totais referentes ao custo da impermeabilização

Serviço	Unidade	Custo Total
Escavação	R\$	2166,66
Compactação	R\$	2093,55
Total	R\$	4260,21

(fonte: Elaborado pela autora, adaptado de DNIT, Sistemas de Custos Referenciais de Obras, maio 2017, p. 5216 e 5482)

6.2 REDIMENSIONAMENTO DO MÉTODO DE IMPERMEABILIZAÇÃO

De modo a possibilitar a análise comparativa entre os dois métodos de impermeabilização de fundo, o sistema de proteção do aterro sanitário de São Carlos foi dimensionado para o uso do geocomposto argiloso e seu volume e parâmetros executivos foram obtidos conforme os itens a seguir.

6.2.1 Volume

De forma análoga ao item 6.1.4.1, a área de impermeabilização equivale a 209604,5 m². Para obter o volume ocupado pela impermeabilização, essa área foi multiplicada pela espessura do geocomposto equivalente a 6,5 mm conforme sua especificação, resultando em um volume igual a 1362,43 m³.

6.2.2 Parâmetros executivos

Os serviços inclusos na execução do *liner* de geocomposto argiloso consistem na regularização do terreno e instalação das bobinas de GCL. O SICRO fornece a composição referente ao serviço de regularização de subleito, incluindo equipamentos e mão-de-obra, que pode ser utilizado como parâmetro de regularização do terreno. Para a instalação do geocomposto, utilizou-se dos itens mão-de-obra, tempo fixo e momento de transporte referentes à composição

Geocomposto argiloso: estudo comparativo ao *liner* de argila compactada em impermeabilização de fundo de aterro sanitário.

de aplicação de geotêxtil uma vez que ambos apresentam o mesmo sistema de instalação. O valor referente ao material de geocomposto bentonítico foi cotado com a empresa Maccaferri do Brasil.

De forma análoga ao item 6.1.4.2, foi obtida a produtividade referente a cada serviço, assim como o tempo de execução da impermeabilização. Estes podem ser observados na tabela 15 e tabela 16, respectivamente.

Tabela 15 - Valores de produtividade para serviços de execução

Serviço	Unidade	Produtividade
Regularização do terreno	m ² /h	841,00
Mão de obra de instalação	m ² /h	180,00

(fonte: DNIT, Sistemas de Custos Referenciais de Obras, maio 2017, p. 2504 e 4199)

Tabela 16 - Valores referentes ao tempo de execução da impermeabilização

Serviço	Unidade	Tempo De Execução
Regularização do terreno	h	249,23
Mão de obra de instalação	h	1280,92
Total	dias	192

(fonte: Elaborado pela autora, adaptado de DNIT, Sistemas de Custos Referenciais de Obras, maio 2017, p. 2504 e 4199)

Para o cálculo do custo total de execução da camada de impermeabilização é necessário considerar uma porcentagem de perda de geocomposto, equivalente a 10% da área de impermeabilização. Essa perda ocorre devido às emendas, ancoragens e possíveis fragmentos inutilizáveis da manta, tais como os retalhos.

O geocomposto bentonítico é comercializado em forma de bobinas com área equivalente a 250 m². Portanto, foi preciso determinar o número de bobinas, obtido através da razão entre a área necessária de geocomposto, considerando as perdas, e a área da bobina. A quantidade de bobinas a ser utilizada na impermeabilização equivale a 923.

Os valores unitários e totais correspondentes aos serviço podem ser observados na tabela 17 e tabela 18, respectivamente.

Tabela 17 - Custo unitário da composição

Serviço	Unidade	Custo Unitário
Regularização do terreno ¹	R\$/h	0,70
Material ²	R\$/bobina	4500,00
Mão de obra de instalação ¹	R\$/h	0,33

(fonte: ¹DNIT, Sistemas de Custos Referenciais de Obras, maio 2017, p. 2504 e 4199. ²Maccaferri do Brasil)

Tabela 18 - Valores totais referentes ao custo da impermeabilização

Serviço	Unidade	Custo Total
Regularização do terreno [R\$] ¹	R\$	174,46
Material [R\$] ²	R\$	3433500,00
Mão de obra de instalação [R\$] ¹	R\$	422,70
Custo total	R\$	3434097,17

(fonte: Elaborado pela autora, adaptado de ¹DNIT, Sistemas de Custos Referenciais de Obras, maio 2017, p. 2504 e 4199. ²Maccaferri do Brasil)

7 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

De modo a realizar uma análise comparativa dos resultados, os mesmos foram reunidos na tabela 19.

Tabela 19 - Resultados referentes aos parâmetros analisados

Método de impermeabilização	CCL	GCL
Volume ocupado (m ³)	125762,71	1362,43
Tempo de execução (h)	169	192
Custo de execução (R\$)	4260,21	3434097,17

(fonte: Elaborado pela autora)

Por apresentar menor volume ocupado, a adoção do *liner* de geocomposto argiloso no aterro sanitário de São Carlos possibilita um aumento de 124400,28 m³ na deposição de resíduos sólidos urbanos, totalizando um volume equivalente a 2.902.260,28 m³, o que prolonga sua vida útil.

Para determinar esse acréscimo no tempo de operação do aterro, inicialmente foi estimado o volume de resíduos a ser disposto no aterro nos 5 anos seguintes ao fim de sua operação prevista. Para isso, aplicou-se a taxa de variação de geração de resíduos de 5,72%, conforme a tabela 9, sobre o volume acumulado do ano 22. Os resultados podem ser verificados na tabela 20.

Tabela 20 - Estimativa da massa de resíduos a ser disposta no aterro, por ano de operação

Ano	Quantidade estimada de resíduos a serem dispostos no aterro	
	m ³ /ano	Volume acumulado (m ³)
22	180.404	2.777.860
23	190.723	2.968.583
24	201.632	3.170.216
25	213.166	3.383.381
26	225.359	3.608.740
27	238.249	3.846.990

(fonte: Elaborado pela autora)

A partir da tabela 20 é possível verificar que o novo volume, possibilitado pela substituição do método de impermeabilização, não supre a demanda estimada para o final do ano 23, indicando que o aumento da vida útil do aterro é inferior a um ano.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *liner* de geocomposto argiloso mostrou-se inviável economicamente para o estudo de caso desse trabalho. Um dos motivos dessa inviabilidade consiste no fato do aterro sanitário dispensar a necessidade de impermeabilização complementar, sendo necessária apenas uma espessura mínima de 60 cm de solo local escavado e recompatado. Um fator que encarece os serviços de terraplenagem consiste no transporte do solo da jazida de empréstimo para o local de compactação, situação que não se faz presente no estudo realizado.

Quanto aos parâmetros executivos, é possível inferir que, por se tratar de um método recentemente desenvolvido e por ser industrializado, o geocomposto argiloso apresenta um maior custo de execução. E, embora sua instalação seja mais simples de ser executada, o tempo de implantação é maior pois é realizado através de trabalho manual.

Algumas sugestões para ampliação do conhecimento e desenvolvimento de novos estudos de *liners* de geocomposto argiloso aplicados a aterros sanitários são dadas a seguir:

- a) análise da variação da espessura do *liner* de argila compactada frente a viabilidade da aplicação de geocomposto argiloso;
 - b) análise de um estudo de caso com jazida distante do aterro sanitário;
- análise da aplicação do GCL nos diferentes tipos de aterro sanitário (vala, trincheira e rampa).

REFERÊNCIAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2012**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/panorama/panorama2012.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2015**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/panorama/panorama2015.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

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

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15849**: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010.

BATHURST, R. J. **Classificação dos geossintéticos**. Associação Brasileira de Geossintéticos, IGS-Brasil. 2007. Disponível em <<http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/1.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2017.

BENJAMIN, C. V.; **Geossintéticos em aterros sanitários: barreiras de fluxo**. IV Seminário Internacional de Engenharia de Saúde Pública, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/uploads/2013/05/Carlos_Vinicius-.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2017.

BENSON, C. H.; DANIEL, D. E. *Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners. Journal of Geotechnical Engineering*, New York: ASCE. v. 116. N. 12. p. 1811-1830. 1990.

BENSON, C. H.; ZHAI, H.; WANG X. *Estimating the hydraulic conductivity of compacted clay liners. Journal of Geotechnical Engineering*, New York: ASCE. N. 120. p. 366-387. 1994.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

BOUAZZA, A. *Geosynthetic Clay Liners. Geotextiles and Geomembranes*, v. 20, p. 3-17. 2002.

BOUAZZA, A.; ZORNBERG, J. **Geossintéticos em Aterros Sanitários**. Associação Brasileira de Geossintéticos, IGS-Brasil. 2007. Disponível em <<http://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/geossinteticos/4.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2017.

BOWDERS, J. J.; DANIEL, D. E. *Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals. Journal of Geotechnical Engineering*, New York: ASCE. v. 113. n. 12. p. 1432-1448. 1987.

BOYNTON, S. S.; DANIEL, D. E. *Hydraulic conductivity tests on compacted clay. Journal of Geotechnical Engineering*, New York: ASCE. v. 111. N. 4. p. 465-478. 1985.

BRASIL, 2010. Presidência da República. **Lei Federal nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 19 maio 2017.

BUENO, B. S.; ZORNBERG, J. G.; LODI, P. C. Uma breve visão sobre geossintéticos aplicados a aterros sanitários, **Revista Tecnologia**. v. 30. N. 2. p. 188-197. 2009.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 1999. 300 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

DANIEL, D. E. *Geotechnical practice for waste disposal*. 1. ed. London: Chapman & Hall, 1993.

DANIEL, D.E.; KOERNER, R.M. *Waste Containment Facilities: Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems*. 2. ed. New York: ASCE, 1995.

DIAS, J. A.; MORAES FILHO, A. M. **Os resíduos sólidos e a responsabilidade ambiental pós-consumo**. 1. ed. São Paulo, 2006.

DNIT. **Sistema de Custos Rodoviários**. Maio 2017. Ministério dos transportes. Departamento nacional de infra-estrutura de transportes, Instituto de pesquisas rodoviárias. São Paulo. 2017.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 251 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10318: Geosynthetics — Part 1: Terms and definitions. 2015

IPT; CEMPRE. **Lixo municipal: Manual de gerenciamento integrado**. 2. ed. São Paulo: Páginas & Letras, 2000.

KOERNER, R. M. *Designing with geosynthetics*. 5. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005.

KOZICKI, P.; HARTY, S.; KOZICKI, J. P. *Design and construction of soil-bentonite liners and two case histories*. *1st International Congress on Environmental Geotechnics*, v.1. p. 713-719. 1994

LOCASTRO, J. K.; ANGELIS, B. L. D. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários, **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 20. N. 1. p. 200-210. 2016.

MANASSERO, M.; BENSON, C.; BOUAZZA, A. *Solid waste containment systems*. *Proceedings of the International Conference on Geological and Geotechnical Engineering*, v.1, p. 520-642, 2000.

MARRA, A. B. **Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil e em Portugal : análise dos planos de resíduos sólidos e da disposição ambientalmente adequada**. 2016. 129 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MITCHELL, J.K. *Fundamentals of Soil Behavior*. 1. ed. New York: Wiley, 1976.

MONTEIRO *et al.* **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM. 2001.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. **Estudo de Impacto Ambiental do Aterro Sanitário para Disposição Final de Resíduos Sólidos Domiciliares do Município de São Carlos/SP**. 2009. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/meio-ambiente/155943-estudo-de-impacto-ambiental-relatorio-de-impacto-ambiental-do-novo-aterro-sanitario.html>>. Acesso em: 16 nov. 2017

RODRIGUES, M. C. **Tratamento eletrolítico de lixiviado de aterro sanitário**. 2007. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

ROWE, R. K. *Proceedings of 6th international conference on geosynthetics: Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste*. 1. ed. Atlanta: Industrial Fabrics Association International, 1998.

ROWE, R. K. *Systems engineering: the design and operation of municipal solid waste landfills to minimize contamination of groundwater*. *Geosynthetics International*, v. 18. N. 6. p. 391–404. 2011.

USO do geocomposto bentonítico GCL em aterros sanitários. **Revista Engenharia**, São Paulo, n. 614, p. 27-28, jan. 2012. Disponível em: <http://www.brasilengenharia.com/portal/images/stories/revistas/edicao614/614_divisoes_uso.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2017.

VIANA, H.N.L. **Estudo da estabilidade e condutividade hidráulica de sistemas de revestimento convencionais e alternativos para obras de disposição de resíduos**. 2007. 259 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

VILAR, O. M.; BUENO, B. S.; BENVENUTO, C. **Manual brasileiro de geossintéticos: Aplicações em barreiras impermeabilizantes**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2015.
