



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA**



Maria Laura Rolim Gonçalves

Aplicação de Geossintéticos no Gerenciamento de Resíduos Sólidos

Limeira
2022



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA**



Maria Laura Rolim Gonçalves

Aplicação de Geossintéticos no Gerenciamento de Resíduos Sólidos

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Ambiental à Faculdade
de Tecnologia da Universidade Estadual
de Campinas

Orientadora: Profa. Dra. Carmenlucia Santos Giordano Penteado

Limeira
2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Luiz Felipe Galeffi - CRB 8/10385

G586a Gonçalves, Maria Laura Rolim, 1996-
Aplicação de geossintéticos no gerenciamento de resíduos sólidos / Maria
Laura Rolim Gonçalves. – Limeira, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Carmenlucia Santos Giordano Penteado.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Geossintéticos. 2. Gestão integrada de resíduos sólidos. 3.
Impermeabilização. I. Penteado, Carmenlucia Santos Giordano, 1972-. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Palavras-chave em inglês:

Geosynthetics

Integrated solid waste management

Waterproofing

Titulação: Bacharel

Banca examinadora:

Carmenlucia Santos Giordano Penteado [Orientador]

Felippe Benavente Canteras

Marco Aurélio Soares de Castro

Data de entrega do trabalho definitivo: 06-07-2022

AGRADECIMENTOS

Ao meu companheiro Leonardo, pelo cuidado, carinho, amor e companhia nas inúmeras horas de escrita, e por não medir esforços para me apoiar e me ajudar a concluir a graduação.

À minha mãe, Renata, e à minha sogra, Cristine, por todo apoio, carinho e cuidado de mãe.

Aos colegas de graduação que foram um apoio necessário no dia a dia ao longo desses anos.

À indispensável Prof. Dra. Carmenlucia Santos Giordano Penteado, pela orientação neste trabalho e em tantos outros assuntos. Ter sua orientação ao longo da graduação foi e sempre será um privilégio.

Aos colegas de trabalho da OBER S/A Indústria e Comércio, através da figura do engenheiro Silvio Luis Palma, pelos conhecimentos compartilhados e apoio diário.

Por fim, à toda a comunidade acadêmica que, de alguma forma, contribuiu para que esse momento chegasse. A semente do conhecimento e generosidade plantada por vocês nunca será esquecida.

RESUMO

Com o crescente aumento da população e do consumo de bens manufaturados, técnicas para o tratamento dos resíduos sólidos gerados nas diversas atividades humanas em sociedade tiveram que ser projetadas. Sabendo do potencial poluidor dos resíduos, essas técnicas devem prever a minimização de impactos ambientais e contaminação de maneira efetiva, diminuindo os riscos à saúde humana e os eventuais danos ao meio ambiente. Considerando as demandas técnicas, e o aumento do rigor por parte da legislação e dos órgãos de controle ambiental, os geossintéticos têm sido implantados nas infraestruturas de gerenciamento de resíduos sólidos com o intuito de minimizar os impactos ambientais, e aumentar a vida útil dos empreendimentos, visto que são materiais produzidos com rigoroso controle de qualidade e instalação. Cada uma das infraestruturas, independente do processo construtivo, está apta ao uso de geossintéticos, mas isso não quer dizer que todos os geossintéticos estarão presentes em todas elas. O geossintético é instalado onde sua função primária é solicitada – impermeabilização, drenagem, reforço, entre outros. Nenhuma etapa do processo de fabricação ou de instalação fica descoberta por regulamentação; para cada propriedade, parâmetro de fabricação ou etapa de instalação, há uma norma regente. Dessa forma, os geossintéticos têm se mostrado materiais de excelente qualidade para empreendimentos desse porte; onde é necessária extrema confiabilidade técnica, materiais seguros, certificados e de excelente qualidade. Neste sentido, este trabalho de conclusão de curso apresenta e discute os aspectos técnicos das aplicações dos diferentes geossintéticos que podem ser utilizadas no âmbito do gerenciamento dos resíduos sólidos, a partir de uma extensa revisão da literatura técnica especializada.

Palavras-chave: geossintéticos; resíduos; aterros; impermeabilização.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amostras de geomembranas com acabamentos diferentes; (a) geomembrana texturizada e (b) geomembrana lisa.....	9
Figura 2 - Vista ampliada de diferentes tipos de geotêxtil.	10
Figura 3 - (a) Esquema da composição do GCL; (b) Amostra de GCL.....	11
Figura 4 - Comportamento do geocomposto bentonítico frente a perfurações.	12
Figura 5 - (a) Amostra do geocomposto; (b) vista lateral de geocomposto drenante.....	12
Figura 6 - Amostras de geogrelhas.....	13
Figura 7 - (a) Geocélula de geotêxtil de PP; (b) Geocélula perfurada e texturizada produzida em PEAD.....	14
Figura 8 - Geocélula disposta em talude.....	14
Figura 9 - Tubo dreno liso.....	15
Figura 10 - Amostra de Georrede.	16
Figura 11 - Métodos Construtivos para Aterros Sanitários – (a) método de rampa; (b) método da área; (c) método de valas ou trincheiras	18
Figura 12 - Fissuras apresentadas em camadas de argila compactada em aterro sanitário.....	20
Figura 13 - Esquema de diferença de espessuras e coeficiente de permeabilidade entre camada de argila compactada e GCL.....	21
Figura 14 – (a) Vala de ancoragem; (b) Esquema de disposição em vala de ancoragem. ...	22
Figura 15 - Instalação e espalhamento de argila bentonítica em pó pela extensão do GCL.....	22
Figura 16 - Modelo de “as built” com modulação dos painéis, possíveis interferência e reparos.	23
Figura 17 - Geomembranas dispostas em campo com ancoragens temporárias.	24
Figura 18 - Colchão drenante.	26
Figura 19 - Exemplos de configuração de sistema espinha de peixe.	26
Figura 20 - Sistema de espinha de peixe na célula de um aterro sanitário.....	27
Figura 21 - Esquema de montagem de drenos verticais para gases.....	28
Figura 22 - Canaletas de drenagem de águas superficiais.....	29
Figura 23 - Esquema comparativo de sistema de aterros (a) Classe IIA e (b) Classe I.	31
Figura 24 - Geomembrana disposta sob talude e geotêxtil sobreposto para proteção mecânica, com indicação dos ângulos de atrito de interfaces.....	34

LISTA DE SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CQC – Construction Quality Control

GBR-C – Barreira geossintética argilosa

GBR-P – Barreira geossintética polimérica

GCL – *Geocomposite Clay Liner*

GDP – Tubos dreno geossintéticos

GEE – Gases de Efeito Estufa

GRI – *Geosynthetic Research Institute*

GTX – Geotêxtil

ISO – International Organization for Standardization

MQC – Manufacturing Quality Control

PE – Polietileno

PEAD – Polietileno de alta densidade

PEBDL – Polietileno de baixa densidade linear

PES – Poliéster

PP - Polipropileno

PVC – Policloreto de vinila

RCC – Resíduos de Construção Civil

RSS – Resíduos de Serviços de Saúde

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

UV – Ultravioleta

SRF - Sistema de revestimento de fundo

Sumário

1. Introdução	6
2. Fundamentação Teórica: Os Geossintéticos	8
2.1. Definição, Tipos e Aspectos Técnicos	8
2.1.1. <i>Geomembrana</i>	8
2.1.2. <i>Geotêxtil</i>	10
2.1.3. <i>Geocomposto bentonítico</i>	11
2.1.4. <i>Geocomposto drenante</i>	12
2.1.5. <i>Geogrelha</i>	13
2.1.6. <i>Geocélula</i>	14
2.1.7. <i>Geotubo</i>	15
2.1.8. <i>Georrede</i>	16
3. Aplicação dos Geossintéticos nas Infraestruturas de Gerenciamento de Resíduos	17
3.1. Aterros para Resíduos Não Perigosos	17
3.1.1.1. <i>Sistema de impermeabilização</i>	19
3.1.2. <i>Sistema de detecção de vazamentos através da impermeabilização</i>	25
3.1.3. <i>Sistema de drenagem e coleta de lixiviado</i>	25
3.1.4. <i>Sistema de drenagem de gases</i>	27
3.1.5. <i>Sistema de drenagem de águas pluviais</i>	28
3.1.6. <i>Cobertura diária e cobertura final</i>	29
3.1.7. <i>Poços de monitoramento do aquífero</i>	30
3.2. Aterros para Resíduos Perigosos	30
3.3. Aterros Controlados e Valas Sépticas	31
3.4. Lagoas de chorume	32
3.5. Pátios de compostagem	33
4. Especificação de Projeto	34
4.1. Estudo de caso	34
4.2. Estimativa de Custo	36
5. Considerações Finais	38
6. Referências	39

1. Introdução

A produção em demasia nos últimos anos, somada ao crescimento desenfreado da população humana e do consumo, gera como consequência, um volume em demasia de resíduos sólidos. Além disso, ao longo dos últimos anos, várias mudanças importantes na composição e especificidades dos resíduos ocorreram. Alterações decorrentes, principalmente, pelas alterações de consumo, onde o excessivo e supérfluo convém, além da obsolescência programada, o que favorece a geração de resíduos eletrônicos, por exemplo (COSTA et al, 2016).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), qualquer material, substância ou objeto que, após o uso e consumo humano, dadas as suas características, não podem ser reutilizados ou reciclados, são considerados resíduos. Tendo em vista suas particularidades, são materiais que não podem ser lançados livremente nas redes de esgotos ou corpos d'água, ou ainda, exigem soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Nestes casos, a disposição final é considerada a destinação adequada do resíduo (BRASIL, 2010).

Conforme ABRELPE (2021), segundo disposições previstas na PNRS, a disposição final em aterros de quaisquer periculosidades, são destinações finais ambientalmente adequadas, uma vez que todas as normas de operação sejam cumpridas. Essas normas são responsáveis por controlar e regulamentar processos e operações que possam causar efeitos nocivos ao meio ambiente ou à saúde humana (BRASIL, 2010).

Segundo o SINIR (Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos), atualmente, ainda existem 1807 municípios no país que não dispõem seus resíduos adequadamente. Em 2020, 60% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) foram enviados para disposição final em aterros sanitários, com o restante sendo destinado em lixões e aterros controlados.

Nesse sentido, inúmeras técnicas têm sido desenvolvidas para promover a melhor solução técnica viável para cada uma das especificidades desses resíduos, levando em consideração as demandas e particularidades municipais e de gestão. Tais características também se refletem na escolha dos métodos construtivos e dos materiais empregados nessas estruturas, a fim de impactar positivamente no controle e monitoramento ambiental desses empreendimentos (BRASIL, 2020).

Os geossintéticos são exemplos de materiais que podem garantir que os aspectos de controle e monitoramento ambiental dos empreendimentos sejam cumpridos. São materiais com ampla variedade no mercado e quando instalados em obras de disposição de resíduos sólidos podem desempenhar diversas funções. São materiais produzidos com

rigoroso controle de qualidade e, por isso, podem desempenhar suas funções primárias com a segurança e precisão necessárias que infraestruturas deste tipo exigem (PALMEIRA, 2018).

Dessa forma, o presente trabalho de conclusão de curso tem por objetivo apresentar e discutir os diferentes tipos de Geossintéticos, bem como suas características, especificidades, e suas aplicações na área de Gerenciamento de Resíduos Sólidos.

2. Fundamentação Teórica: Os Geossintéticos

Considerando o objetivo deste trabalho, e de forma a subsidiar as discussões sobre as aplicações dos geossintéticos na área de gerenciamento de resíduos sólidos, neste capítulo são apresentados os aspectos gerais destes materiais, bem como seus tipos e características. Ainda, apresenta-se a fundamentação teórica sobre as tecnologias e instalações compreendidas no gerenciamento de resíduos sólidos na atualidade e que utilizam geossintéticos, a saber: aterros de resíduos perigosos e não perigosos, lagoas de chorume e usinas de compostagem.

2.1. Definição, Tipos e Aspectos Técnicos

Os geossintéticos podem ser definidos como uma categoria de produtos manufaturados a partir de polímeros sintéticos, os quais podem ser aplicados em obras civis, ambientais e geotecnia. Conforme Koerner (2005), o prefixo 'Geo' faz alusão à terra, e o termo 'sintéticos', relaciona-se com a matéria-prima e o processo produtivo, que é totalmente industrial e antrópico. De maneira complementar, conforme dispõe a norma NBR 10318-1:2021, os Geossintéticos podem ser definidos como:

“produtos em que ao menos um de seus componentes é produzido a partir de um polímero sintético ou natural, sob a forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações da engenharia geotécnica e civil” (ABNT, 2021, p. 2).

Atualmente os geossintéticos têm se mostrado como a melhor tecnologia para impermeabilização do solo, senão a mais avançada, tendo em vista as constantes revisões normativas e o contínuo processo de melhoria de fabricação, qualidade e desempenho, conforme recomendações da *International Geosynthetic Society* - IGS (MAIA, 2016).

Os geossintéticos são divididos em geomembranas, geotêxteis, geocompostos drenantes e bentonítico, geogrelhas, geocélulas, geotubos e georrede e tem seus principais aspectos técnicos e funcionalidades detalhados na sequência.

2.1.1. Geomembrana

A barreira geossintética polimérica (GBR-P), também conhecida como geomembrana polimérica, ou somente geomembrana, é um dos principais, senão o mais importante dos geossintéticos utilizados na área ambiental e no gerenciamento de resíduos sólidos. Tendo em vista que é um material com baixa permeabilidade, cujo coeficiente pode variar entre 10^{-11} cm/s e 10^{-13} cm/s (PALMEIRA, 2018), sua principal função é a de impermeabilizar ou limitar

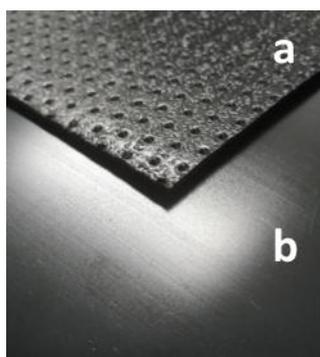
a circulação de fluidos no local, sejam líquidos, gases e/ou vapores, o que é primordial para a construção e eficiência de um aterro sanitário.

As geomembranas podem ser fabricadas através de dois processos distintos; matriz plana, também chamada de '*flat-die*', ou matriz '*balão*'. Em ambos os casos são usados polímeros termoplásticos, como o policloreto de vinila (PVC) e o polietileno de alta densidade (PEAD) e baixa densidade linear (PEBDL) (VERTEMATTI, 2015). Algumas matérias primas podem ser submetidas a variados processos produtivos; esse é o caso do polietileno (PE), que pode ser fabricado através do processo de matriz plana e matriz balão, independentemente da densidade. Já o PVC, em função de suas características físico-químicas, só pode ser produzido em matriz plana.

Quando produzidas com resinas sintéticas de polietileno, as geomembranas apresentam alta resistência mecânica, flexibilidade e resistência ao impacto e abrasão, além de resistência a ataques químicos, tanto de ácidos, como de bases. Isso porque o PE é estabilizado com a ação de aditivos antioxidantes e termoestabilizantes. O negro de fumo, por exemplo, além de conferir a cor negra ao material – tendo em vista que o PE é altamente cristalino, fornece proteção aos raios ultravioletas, intempéries e oxidação. Quando do acréscimo do aditivo, a densidade do material aumenta e acaba sendo maior que a do polímero-base. Todas as características e especificações são regidas pela norma internacional GM 13, do GRI, *Geosynthetic Research Institute* (DUARTE, 2009).

Independente das matérias-primas utilizadas, a geomembrana é comercializada em três tipos de textura – ambas as faces lisas, texturizada em uma das faces e texturizada em ambas as faces; e, pelo menos, quatro tipos de espessuras – 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm e 2,5 mm. Tanto a escolha da matéria-prima, como do acabamento e da espessura, dependerão das características da superfície em que ela será aplicada e se o atrito provocado pela interface *textura/solo* será necessário. A espessura é fator determinante a depender da classificação do resíduo que se deseja dispor (PALMEIRA, 2018). A Figura 1 ilustra diferentes acabamentos que uma geomembrana pode apresentar.

Figura 1 - Amostras de geomembranas com acabamentos diferentes; (a) geomembrana texturizada e (b) geomembrana lisa.



Fonte: Arquivo pessoal, 2021.

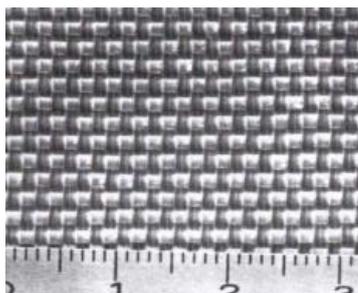
2.1.2. Geotêxtil

Os geotêxteis são produtos têxteis bidimensionais confeccionados a partir de fibras sintéticas, permeáveis e que podem desempenhar a função de separação, reforço, drenagem, filtração e proteção (VERTEMATTI, 2015).

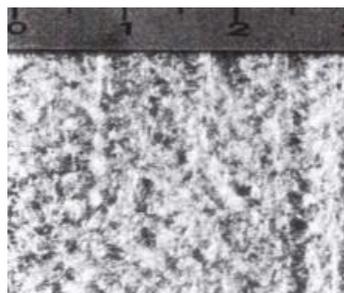
Todas as matérias primas utilizadas na confecção de geotêxteis são termoplásticas, isto é, dada uma determinada temperatura se tornam maleáveis e capazes de serem moldadas ou conformadas (KOERNER, 1998). Existem duas matérias primas principais para a fabricação desses produtos: o poliéster (PES) e o polipropileno (PP).

Estas matérias primas são transformadas em fibras que, quando consolidadas, darão origem ao geotêxtil. Os processos produtivos variam entre os fabricantes, bem como a disposição e característica das fibras, que podem ser cortadas, em filamento contínuo, em laminetes, fios ou monofilamentos. Todas estas podem ser consolidadas através do processo de agulhamento, termoligação, resinadas, tricotadas ou tecidas, conforme Figura 2 (ABINT, 2001). Geotêxteis em poliéster são mais resistentes quimicamente que geotêxteis de polipropileno e, dessa forma, podem ser aplicados em ambientes mais agressivos. Esse é somente um dos exemplos de diferença de característica que as matérias primas podem apresentar de um material para outro (SOUZA et. al., 2011).

Figura 2 - Vista ampliada de diferentes tipos de geotêxtil.



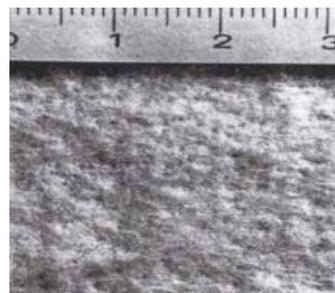
a. Geotêxtil tecido



b. Geotêxtil não tecido ligado quimicamente



c. Geotêxtil não tecido ligado termicamente



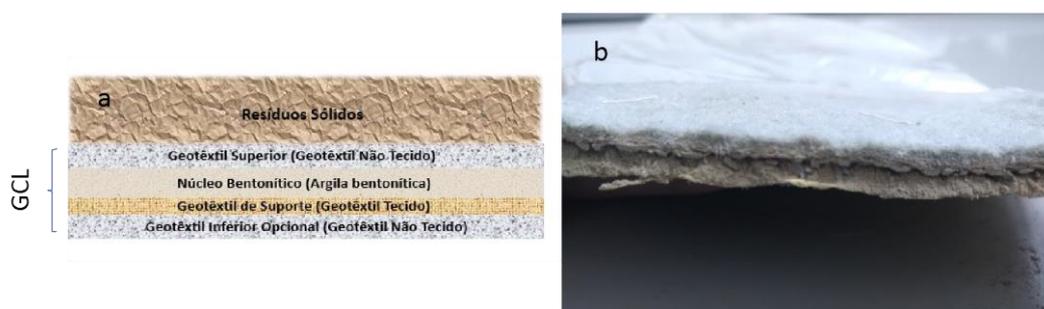
d. Geotêxtil não tecido ligado mecanicamente

Fonte: Duarte, 2009.

2.1.3. Geocomposto bentonítico

A barreira geossintética argilosa (GBR-C), geocomposto bentonítico, ou simplesmente GCL, sigla de ‘*geocomposite clay liner*’, é um geocomposto resultante do confinamento de argila bentonítica por agulhamento entre dois geotêxteis; um tecido¹ (por baixo) e um não tecido² (por cima). Em algumas situações, a depender da aplicação, pode-se adicionar mais uma camada de geotêxtil não tecido por baixo. Estes são os chamados geocompostos argilosos reforçados (VERTEMATTI, 2015). Esse processo produtivo confere ao material a seguinte composição (figura 3).

Figura 3 - (a) Esquema da composição do GCL; (b) Amostra de GCL.



Fonte: Arquivo pessoal, 2021.

Em função do baixo coeficiente de permeabilidade, 10^{-9} cm/s, sua principal função é a de barreira hidráulica. Tendo em vista a baixa permeabilidade e baixa espessura, entre 6,5 e 8 mm, o GCL é uma alternativa às camadas de argila compactada (CCL) que são utilizadas até hoje em aterros sanitários, cuja permeabilidade é de 10^{-7} cm/s e espessura de pelo menos 100 cm. Essa diferença de espessura confere grande ganho no aumento da capacidade volumétrica e conseqüente aumento da vida útil do aterro (VERTEMATTI, 2015).

A principal característica da argila bentonítica é expandir-se quando confinada e em contato com líquidos, como no caso do percolado de aterro, por exemplo. O inchamento da argila causa o efeito de auto cicatrização; ao receber umidade, a argila expande de modo a estancar quaisquer furos que tenham surgido na operação do aterro (figura 4). A camada de argila compactada não possui esse tipo de propriedade, o que pode deixar a célula do aterro sanitário suscetível a vazamentos de líquido lixiviado (PREVITI et. al., 2018).

¹ Material confeccionado através de fios, filamentos ou laminetes seguindo direções pré-determinadas de entrelaçamento, denominadas urdume (sentido longitudinal) e trama (sentido transversal).

² Produto confeccionado através de fibras ou filamentos, dispostos espacialmente de maneira desarranjada, podendo ser consolidados por agulhamento, termoligação ou resinagem.

Figura 4 - Comportamento do geocomposto bentonítico frente a perfurações.



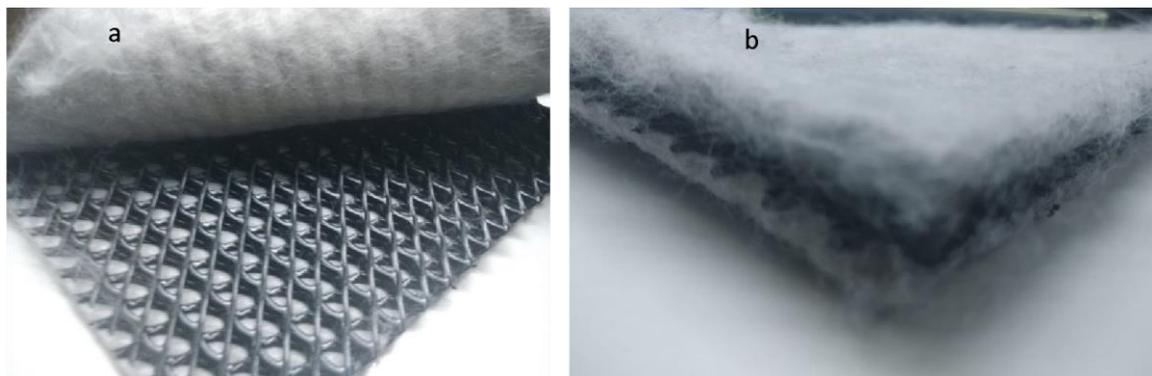
Fonte: Palma et. al., 2018.

2.1.4. Geocomposto drenante

O geocomposto drenante é formado por um geotêxtil, agindo como elemento filtrante, e uma georrede em PEAD, atuando como elemento drenante. Esse geotêxtil envolve uma georrede de PEAD por cima e por baixo, formando um sanduíche, ou em alguns casos, o geotêxtil é adicionado somente por cima e, por baixo, é colocado um filme impermeável de PE (Figura 5).

A principal função do geocomposto drenante é a filtração, na qual o geotêxtil retém as partículas sólidas e o fluido escoar livremente através dos poros do geotêxtil e do núcleo. Essa composição pode ser adquirida através de termoligação entre o núcleo e os geotêxteis, que podem ser não tecidos agulhados ou calandrados, ou laminados com filme impermeável, ou ainda, podem ser manufacturados no próprio canteiro de obras. Essa configuração confere ao material elevada propriedade drenante, superior ao uso do sistema de brita e geotêxtil, com enormes vantagens do ponto de vista construtivo e ambiental (VERTEMATTI, 2015).

Figura 5 - (a) Amostra do geocomposto; (b) vista lateral de geocomposto drenante.



Fonte: Arquivo pessoal, 2022.

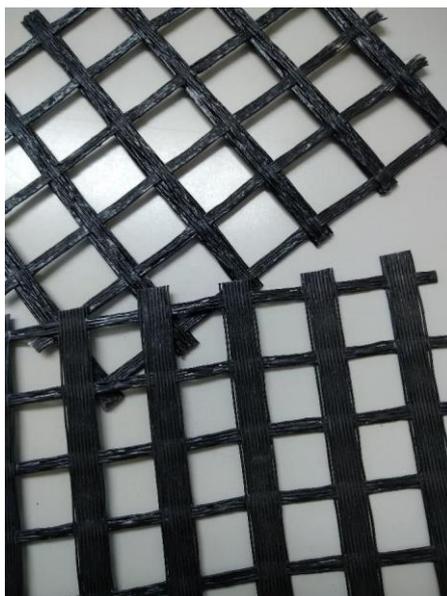
2.1.5. Geogrelha

As geogrelhas são estruturas de malha aberta, planas, em formato de grelha, produzidas a partir de polímeros, como o PEAD, ou o poliéster, e neste caso recebe um 'banho' de resina de PVC. Podem ser produzidas a partir de ligação por solda, extrusão ou entrelaçamento (SANTOS et. al., 2019). Atualmente podem ser encontradas geogrelhas com resistência à tração uni (em somente uma das direções, ou transversal ou longitudinal) ou biaxiais (em ambas as direções, transversal e longitudinal) (Figura 6).

Sua principal função é fornecer reforço à estrutura onde está inserida. A resistência é conferida através do chamado 'imbricamento', que é o entrosamento das partículas do solo com as superfícies de contato do material tanto pela face superior, como pela inferior, e através das aberturas, promovendo o intertravamento desse sistema. Esse fenômeno é capaz de promover a tração necessária ao maciço de solo, bem como redistribuir as tensões ao longo de toda a malha, através dos entrelaçamentos (MAIA, 2016).

As geogrelhas são consideradas materiais de alto desempenho, pois não necessitam de mão de obra especializada para instalação, diminuem o tempo de execução da obra e, por serem materiais maleáveis, possuem restrições de instalação diminuída, podendo ser aplicadas em locais de difícil acesso (NUNES, 2019).

Figura 6 - Amostras de geogrelhas



Fonte: Arquivo pessoal, 2021.

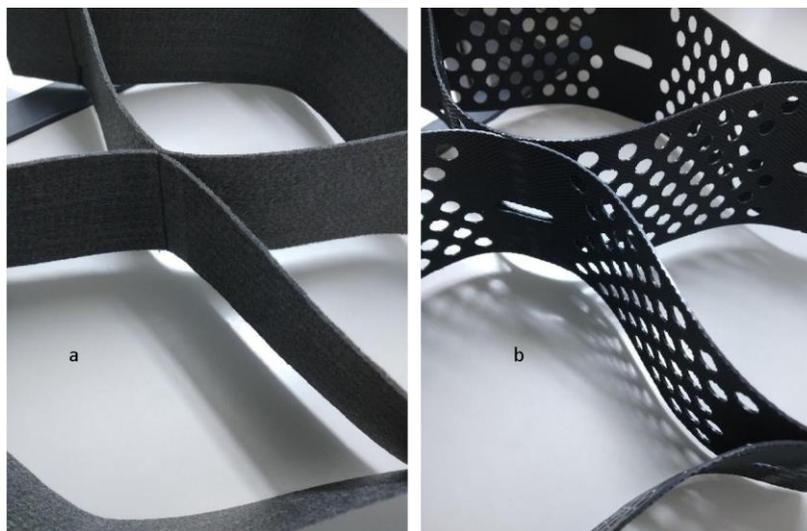
No caso dos aterros sanitários, podem ser aplicadas nos taludes da cobertura que possuam inclinação acentuada, tanto por cima da geomembrana de cobertura, quanto por baixo. Depois de aplicada, o solo de cobertura é colocado para revegetação (KOERNER, 1999).

2.1.6. Geocélula

Em alguns casos, as características do solo local exigem o uso de geocélulas para reforço de base e/ou taludes da célula de disposição de resíduos. As geocélulas são estruturas poliméricas tridimensionais, produzidas a partir de tiras de geossintéticos unidas entre si, com formato semelhante à uma colmeia, permeáveis, e que desempenham o papel de reforço, proteção e controle de erosão, através de confinamento mecânico (Figura 7), podendo ser fabricadas em PEAD e geotêxtil não tecido de polipropileno (VERTEMATTI, 2015). Quando produzidas a partir de PEAD, recebem texturas e perfurações, a fim de promover o atrito necessário com o material de preenchimento, o que é inerente às geocélulas produzidas a partir de geotêxtil não tecido, em função da própria rugosidade do material.

São comumente preenchidas com material granular, cascalho, brita ou concreto. A escolha do material de preenchimento dependerá diretamente da aplicação e das condições locais. Além da aplicação na base e talude das células do aterro, podem ser aplicadas como cobertura e receber vegetação, protegendo contra processos erosivos (NUNES, 2019).

Figura 7 - (a) Geocélula de geotêxtil de PP; (b) Geocélula perfurada e texturizada produzida em PEAD.



Fonte: Arquivo pessoal, 2021.

Normalmente, as geocélulas são aplicadas em aterros sanitários para fornecer maior resistência ao cisalhamento do solo e podem ser aplicadas tanto na base da célula, quanto nos taludes (figura 8). Podem ainda, ser aplicadas na cobertura do aterro, quando o solo de cobertura, por exemplo, não possuir estabilidade suficiente contra processos erosivos. Nesse último caso, após a selagem da célula, as geocélulas recebem vegetação como material de enchimento (NUNES, 2019).

Figura 8 - Geocélula disposta em talude.



Fonte: Palma et. al., 2018.

2.1.7. Geotubo

Os tubos dreno geossintéticos (GDP), também conhecidos como geotubos, são tubos poliméricos, produzidos a partir de polietileno de alta densidade (PEAD) e policloreto de vinila (PVC). Podem ser comercializados perfurados, ranhurados, lisos ou corrugados, rígidos ou flexíveis (Figura 9) (VERTEMATTI, 2015). Tem sido amplamente utilizado em obras ambientais de disposição de resíduos dada a fácil instalação e alta resistência química e biológica do material.

São usados como elemento drenante de líquidos ou gases. No caso dos aterros sanitários, são utilizados em drenos subterrâneos, na drenagem de lixiviado e verticais, para drenagem de gases. Em alguns casos, quando o geotubo é perfurado, é necessário envolvê-lo com um geotêxtil para evitar que sólidos de alta granulometria infiltrem-se no tubo ou provoquem entupimentos (VERTEMATTI, 2015).

São alternativas aos tubos convencionais perfurados de cerâmica, de concreto perfurado e concreto poroso. Os mais utilizados são os geotubos planares e drenos de fita, popularmente conhecidos como drenos verticais.

Os drenos verticais apresentam larguras pequenas, da ordem de 100 mm, e são utilizados principalmente na consolidação de aterros em solos moles. Já os drenos planares possuem largura muito maiores, utilizados em drenos subterrâneos profundos ou subsuperficiais (VERTEMATTI, 2015).

Figura 9 - Tubo dreno liso.



Fonte: Kanaflex, 2021.

2.1.8. Georrede

As georredes podem ser definidas como uma malha geossintética, com aparência similar à de grelha, confeccionadas com grande número de vazios, para atuar predominantemente como elemento de drenagem (PALMEIRA, 2018). Podem ser comercializadas de duas formas; bi ou tri planares (Figura 10).

São fabricadas em PEAD através de extrusão, e assim como a geomembrana, recebem adição de negro de fumo, adquirindo propriedades anti UV e tornam-se inertes aos agentes químicos que podem entrar em contato através das aplicações, como no caso dos aterros sanitários, onde o material estará em contato com o chorume, através do geocomposto drenante em que estará inserida (VERTEMATTI, 2015). Justamente pela alta porosidade e abertura dos poros, a georede é usada em substituição aos filtros granulares e é uma alternativa em casos em que há necessidade de conduzir elevada vazão de líquidos ou gases. De forma análoga aos colchões drenantes, é instalada em toda a extensão da célula e deve estar no meio de duas camadas de geotêxtil não tecido, de forma a evitar o entupimento dos vazios por sólidos de granulometrias maiores.

Figura 10 - Amostra de Georrede.



Fonte: Arquivo pessoal, 2022.

3. Aplicação dos Geossintéticos nas Infraestruturas de Gerenciamento de Resíduos

São consideradas infraestruturas para o gerenciamento de resíduos sólidos aquelas que são projetadas para armazenar, recuperar, tratar e dispor de maneira ambientalmente correta os mais diversos tipos de resíduos de acordo com suas especificidades, considerando suas características físicas, químicas e biológicas. Toda e qualquer infraestrutura pensada para esse fim deve atender com o mais alto nível e rigor as normas vigentes de projeto, implantação, operação, controle e monitoramento ambiental.

Neste caso, estão incluídos os aterros sanitários, aterros de resíduos perigosos e industriais, aterros de resíduos inertes, usinas de compostagem e lagoas de chorume. Todos os empreendimentos acima são majoritariamente geridos pela iniciativa privada, tendo a gestão municipal como contratante, através de terceirização, que paga uma determinada quantia por quantidade de resíduo a dispor, em toneladas (JUCÁ, 2003).

Atualmente, os aterros sanitários continuam representando a principal opção de destinação de resíduos sólidos, muito embora esse tipo de infraestrutura ainda seja inexistente em algumas regiões do país. Qualquer que seja a classificação do aterro ou especificação do resíduo a dispor e os sistemas que o compõem, estes devem ser projetados e dimensionados de maneira adequada, principalmente no que tange aos sistemas de impermeabilização, tanto de fundo, como a cobertura final. Nesse sentido, a aplicação dos geossintéticos na construção de aterros e em demais infraestruturas de gerenciamento de resíduos sólidos tem crescido exponencialmente dado o rigoroso controle de fabricação e qualidade a que são submetidos, além da fiscalização ambiental, tanto nacional quanto internacionalmente, dos possíveis impactos causados por um empreendimento deste porte no que tange a qualidade do solo, da água e do ar (SANTOS et. al., 2019).

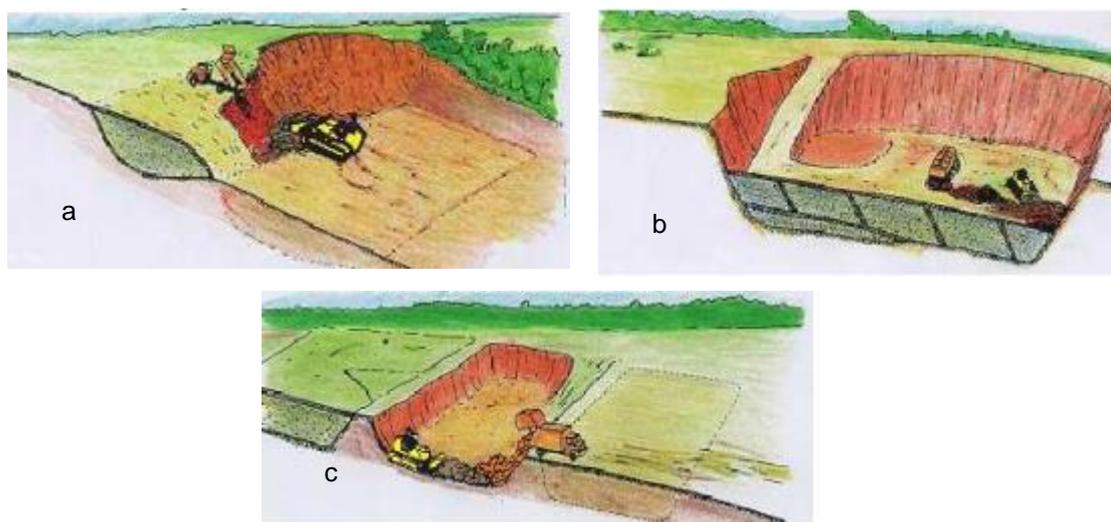
É preciso dizer que nem todos os geossintéticos apresentados neste trabalho estarão presentes em todos os empreendimentos, entretanto, a aplicação destes tem sido cada vez mais comum nos sistemas projetados para o gerenciamento de resíduos sólidos atuais (LODI et. al., 2009).

3.1. Aterros para Resíduos Não Perigosos

Aterros são infraestruturas projetadas com fundamentos de engenharia para a disposição adequada de resíduos sólidos, de acordo com suas especificidades, sem que estas causem malefícios à saúde humana e ao meio ambiente, através da minimização de seus impactos ambientais. Apesar de todos partirem da mesma técnica de aterramento dos resíduos sólidos, seus aspectos construtivos podem diferir de acordo com as características do local escolhido para o projeto (ABNT, 1992).

Existem três métodos construtivos principais para um aterro. São eles: método de rampa, da área e método de valas ou trincheiras (Figura 11a, 11b e 11c). Os métodos de rampa e área, são conhecidos como os “aterros convencionais”, porque são os mais comumente praticados. São majoritariamente utilizados em aterros sanitários e em ambos os métodos o resíduo é depositado acima do nível solo e compactado posteriormente. O método de valas ou trincheiras é utilizado em aterros controlados e quando se tem espaços abaixo do nível original do terreno. Nesse caso, aproveita-se escavações pré-existentes e faz-se a disposição dos resíduos preenchendo as valas ou trincheiras.

Figura 11 - Métodos Construtivos para Aterros Sanitários – (a) método de rampa; (b) método da área; (c) método de valas ou trincheiras



Fonte: Unesp (2008) Apud Faria, 2010.

Qualquer que seja o método construtivo, outros sistemas específicos devem ser dimensionados de forma complementar. Com isso, conforme norma ABNT NBR 8419:1992, todos os sistemas devem ser dimensionados e os materiais geossintéticos utilizados devem estar de acordo com o objetivo do sistema e de acordo com a principal função do material. O que irá determinar se o empreendimento terá ou não um sistema específico, será o tipo de resíduo a dispor. Diferentemente dos RSU, os resíduos inertes, por exemplo, não liberam lixiviado ao longo de sua disposição pois não possuem fração orgânica, entretanto, há percolação de água da chuva. (ABNT, 1992).

Os aterros de classe IIA são aqueles que estão aptos a receberem resíduos não perigosos e não inertes. De acordo com a ABNT NBR 10004/2004, são classificados como resíduos não perigosos os resíduos que apresentam ausência das características enquadradas na classificação dos resíduos Classe I – Resíduos Perigosos, mas que em

contrapartida, possuam características de combustibilidade, biodegradabilidade e solubilidade (ABNT, 2004).

Além dos aterros sanitários, que atendem à disposição de resíduos Classe IIA, tem-se os aterros de Classe IIB ou Aterros de Inertes. São considerados inertes os resíduos que não apresentam características de periculosidade, conforme ABNT NBR 10004/2004, e que, além disso, não sofrerão transformações químicas, físicas e biológicas por muito tempo e que, quando em contato com o solo ou água, não causarão impactos negativos ao meio ambiente. São exemplos os resíduos de construção civil (RCC) (entulho, resíduos de demolição etc.), sucatas e pedras (ABNT, 2004). Tendo em vista que os resíduos inertes não liberam nenhuma substância em níveis tais que possam causar algum dano ambiental, os aterros de inertes são dispensados da obrigatoriedade de projeto de sistemas de drenagem de lixiviados e impermeabilização.

Os aterros sanitários recebem exclusivamente resíduos sólidos urbanos (RSU), e do ponto de vista técnico podem receber qualquer resíduo não perigoso e não inerte de diversas origens, inclusive industrial, desde que não apresentem líquidos livres. Cabe uma ressalva quanto aos resíduos de serviços de saúde (RSS), pois conforme a Resolução CONAMA 358/2004, os resíduos do Grupo A – Infectantes, devem passar por processo de desinfecção para eliminação de qualquer risco biológico, e uma vez desinfetados, podem ser dispostos em aterro sanitário.

Sendo assim, a implantação de um aterro sanitário deve partir de um projeto muito bem elaborado e meticuloso, a fim de garantir a segurança e eficiência de cada sistema dimensionado. Quaisquer que sejam os elementos de cada um dos sistemas – de impermeabilização, drenagem subterrânea, vertical ou superficial, cobertura - estes devem promover a adequação do aterro sanitário para disposição de resíduos sólidos (LODI et. al., 2009).

3.1.1.1. Sistema de impermeabilização

O sistema de impermeabilização é extremamente, se não o mais importante em um aterro sanitário, tendo em vista que deve impedir que o lixiviado percole no solo e contamine lençóis freáticos e águas subterrâneas, podendo causar um grande passivo ambiental. Nesse sistema, os materiais utilizados devem possuir coeficiente de permeabilidade baixíssimos (da ordem de 10^{-12} cm/s), a fim de cumprir sua principal função, que é a de barreira hidráulica. As geomembranas e geocompostos bentoníticos são os materiais indicados para esse fim. As espessuras e acabamentos da geomembrana, bem como a massa de argila bentonítica necessária em cada projeto deve ser definida pelo projetista, de acordo com as especificidades do resíduo e do solo local, como a necessidade de atrito, por exemplo.

Esse sistema pode ser iniciado com uma camada espessa de argila compactada como sistema de revestimento de fundo (SRF). Entretanto, essa prática já tem sido debatida fortemente, tendo em vista três variáveis principais que podem interferir diretamente na sua funcionalidade e eficiência. São elas: o volume exigido, alta complexidade operacional e controle de permeabilidade, que é diretamente variável de acordo com as condições climáticas e de compactação. Sabendo que para esse sistema não existe nenhuma regulamentação e controle de qualidade até hoje, torna-se difícil controlar a execução e monitorar, quando da operação do aterro (SANTOS et. al., 2019).

Quando a compactação não ocorre nas condições ideais (umidade, compactação, cobertura imediata da camada, existência de recalques diferenciais), podem ocorrer fissuras (figura 12), que comprometerão diretamente a impermeabilização do solo, que é o principal objetivo da camada de argila compactada, bem como favorecerá o surgimento de *piping*³ no decorrer da operação do aterro. A presença de fissuras ocasiona descontinuidades horizontais e verticais. Essas descontinuidades formam 'caminhos' no solo, por onde os fluidos escoarão. Juntamente com um bom processo de compactação, o ideal é cobrir essa camada em até 48 horas após a compactação.

Figura 12 - Fissuras apresentadas em camadas de argila compactada em aterro sanitário.



Fonte: Carlos Vinícius Benjamim, 2013.

Outro ponto que deve ser questionado quando do projeto de um aterro, deve ser a complexidade operacional que a compactação de argila exige. E isso se dá pois somente o fundo das células consegue receber a compactação de forma apropriada, além de exigir mão de obra especializada para este serviço em específico, aumentando não só o tempo de execução como o custo operacional.

Além disso, a camada de argila compactada como barreira impermeabilizante acaba diminuindo a capacidade volumétrica do aterro e, conseqüentemente, a vida útil da célula.

³ Infiltração no terreno causado através das fissuras, com posterior fenômeno de bombeamento ascendente de fluidos causado pela movimentação acima da camada impermeabilizante.

Têm-se na literatura que, a fim de garantir a impermeabilização necessária, o ideal seria compactar cerca de 100 cm de argila em toda a célula.

Enquanto isso, o geocomposto bentonítico possui permeabilidade entre 10^{-10} e 10^{-8} cm/s, menor à da camada de argila compactada (10^{-6} e 10^{-9} cm/s para camadas de 0,6 a 2,0 m) e, sendo um item manufaturado, possui rigoroso controle de fabricação, controle de qualidade e instalação, através da norma internacional GRI-GCL 5, do TRI. A capacidade volumétrica também é um diferencial desse produto, que possui espessura de no máximo 1,0 cm, quando hidratado. Isso oferece um ganho de 100% na capacidade volumétrica do aterro, se comparado à instalação de camada de argila compactada. Tem-se como camada hidratada, o GCL quando em contato com o lixiviado.

Figura 13 - Esquema de diferença de espessuras e coeficiente de permeabilidade entre camada de argila compactada e GCL.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Ainda nesse sentido, é possível comparar a taxa de vazão entre ambos, onde estabelece-se alguns parâmetros, como o diâmetro do furo e carga hidráulica. Tratando-se de um comparativo, esses parâmetros devem ser os mesmos para os dois métodos. Dessa forma, adota-se carga hidráulica (h_w) de 0,5 m, diâmetro (d) de 2 mm e as espessuras (t) e permeabilidades (k_s) representadas no esquema da figura 13. Sendo assim, aplica-se as variáveis à equação 1, que é dada por:

$$q = \frac{\pi * k_s * (h_w + t) * d}{(1 - 0,5 * d/t)} \quad (1)$$

$$q_{argila\ compactada} = 3,7 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s} \quad (2a)$$

$$q_{GCL} = 9,4 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s} \quad (2b)$$

Com esse comparativo, é possível verificar que a argila compactada tem taxa de vazão 25 vezes maior que o GCL, ou seja, pode ser 25 vezes mais permeável. Isso só comprova quão vantajosa pode ser a utilização do GCL em substituição à argila.

Nos casos das duplas barreiras composta, nas quais há a dupla combinação de elementos impermeabilizantes, após a compactação argila ao longo de toda a célula, devem ser aplicados o GCL e a geomembrana, quimicamente compatível com esse tipo de resíduo, para compor o sistema de impermeabilização. Ambos os materiais devem estar ancorados em vala de ancoragem (figura 14a e 14b), previamente escavada, na crista dos taludes.

Figura 14 – (a) Vala de ancoragem; (b) Esquema de disposição em vala de ancoragem.



Fonte: (a) Faria, 2008; (b) Elaborada pela autora, 2022.

O material deve ser desenrolado no sentido descendente do talude, com sobreposição mínima de 15 cm longitudinalmente, e 40 cm, transversalmente. Entre as sobreposições, o instalador deve espalhar de argila bentonítica em pó para atuar como uma espécie de 'cola' (figura 15). A proporção é de 400 g por metro linear. Normalmente, no mercado, a argila bentonítica em pó é fornecida juntamente com o GCL pelo fabricante (PALMA et al, 2018).

Figura 15 - Instalação e espalhamento de argila bentonítica em pó pela extensão do GCL.

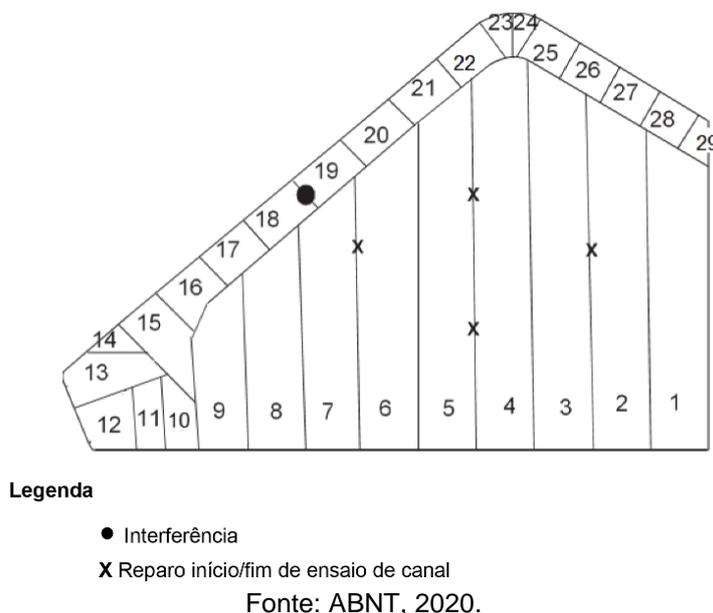


Fonte: Benjamim, 2013.

Após a instalação do GCL, a camada de geomembrana já pode começar a ser disposta. De acordo com a ABNT NBR 16199:2020, nenhuma emenda deve ser feita ao longo do comprimento do talude, sob o risco de ocorrência de rasgos e rupturas de solda, tendo em vista as solicitações que o montante de resíduos pode exigir ao material (ABNT, 2020). Igualmente ao GCL, a geomembrana deve passar por toda a superfície da valeta de ancoragem para, só então, ser desenrolada ao longo do talude.

É importante salientar que nenhum geossintético deve ser instalado sob a presença de água parada na superfície, sob forte ventania ou chuva. Ainda, quando da instalação, a temperatura superficial da geomembrana não deve exceder 75° C. A modulação dos painéis deve ser feita pelo profissional ou empresa instaladora através de um documento chamado “*as built*” (figura 16). Nele devem conter informação sobre o posicionamento das bobinas, número e localização dos painéis, bem como data de instalação. Esse documento deve ser atualizado diariamente. Além disso, um sistema de controle de soldas e ensaios deve ser elaborado para a realização de reparos e interferências, se necessário (ABNT, 2020).

Figura 16 - Modelo de “*as built*” com modulação dos painéis, possíveis interferência e reparos.



Recomenda-se a utilização de sacos de areia para evitar o deslocamento dos painéis por ação do vento, até que as soldas definitivas sejam realizadas (Figura 17).

Figura 17 - Geomembranas dispostas em campo com ancoragens temporárias.



Fonte: OBER/GEOSCOM, 2022.

As soldas definitivas podem ser realizadas de acordo com o previsto em projeto, levando em consideração a matéria prima da geomembrana. Alguns métodos podem ou não ser aplicados a depender da matéria prima (tabela 1).

Tabela 1 – Tipos de soldas recomendadas para cada matéria prima.

Tipos de Emenda	Matérias Primas		
	PEAD	PEBDL	PVC
Extrusão ¹	X	X	X*
Fusão Térmica ²	X	X	X
Solda química ³			X
Solda adesiva ⁴			X

1 – Filete e plano

2 – Cunha quente e ar quente

3 – Química e química encorpada

4 – Química e de contato

* somente para acabamentos

Fonte: Elaborada pela autora, baseado em Vertematti (2015) apud Koerner, 1998.

É importante salientar que, de acordo com norma ABNT NBR 16199:2020, as sobreposições devem ser feitas com 75mm ou mais para soldas por extrusão em geomembranas de PE, e 100mm ou mais, para soldas químicas nas geomembranas de PVC, de forma a não gerar solicitações e recalques diferenciais muito acentuados (ABNT, 2020).

Após a finalização das soldas, o sistema de drenagem deve ser executado. Dessa forma, a depender do método de drenagem constante em projeto, dois geossintéticos distintos deverão ser instalados.

Tendo em vista que acima ainda teremos a disposição do geotêxtil, seja sozinho, para colchão drenante, seja a face do geocomposto drenante, recomenda-se que, pelo menos a superfície superior da geomembrana – que estará em contato com o geotêxtil ou geocomposto drenante – seja texturizada, a fim de gerar o atrito necessário para não haver o escorregamento do geotêxtil.

3.1.2. Sistema de detecção de vazamentos através da impermeabilização

Levando em conta que a principal função da camada impermeabilizante é evitar o fluxo de líquidos e gases, é de extrema importância verificar a existência de furos, rasgos e fissuras que possam causar o vazamento do lixiviado. Isso se dá através de camada drenante subjacente à camada impermeabilizante. Assim que detectada a presença de líquidos nesse sistema, pode-se concluir a presença de vazamentos no sistema de impermeabilização.

Para evitar que isso ocorra, devem ser realizados testes de estanqueidade ainda na etapa de instalação da geomembrana. Esses testes conferem a resistência da solda contra descolamento e cisalhamento, de acordo com os procedimentos e valores previstos na GM19. O mapeamento de vazamentos e micro furos é realizado através das orientações contidas nas normas ASTM D 4437 e 5641, com os testes de caixa de vácuo em superfícies planas, ou com o Spark Test, regido pela ASTM D 8265, em superfícies inclinadas (ABNT, 2020).

3.1.3. Sistema de drenagem e coleta de lixiviado

O sistema de drenagem é tão importante quanto a impermeabilização porque evita o acúmulo de líquidos na massa de sólidos e eventuais problemas de instabilidade. Para isso, um sistema de drenagem eficiente deve ser dimensionado de acordo com a topografia do terreno, bem como a geometria a que o aterro sanitário foi projetado, e podem ser desenvolvidos através de dois métodos distintos: o método de colchão drenante e o método de 'espinha de peixe'.

O método de colchão drenante (figura 18) é menos utilizado pois, apesar de se mostrar mais eficiente, é consideravelmente mais caro. Isso porque toda a área da célula deve atuar como leito de drenagem e, para isso, uma camada composta de geossintéticos – geomembrana, GCL e geocomposto drenante - deve ser instalada, além do filtro granular (ReCESA, 2008).

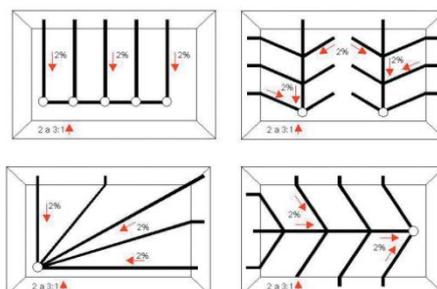
Figura 18 - Colchão drenante.



Fonte: OHSWA, 2005.

O método de drenagem e coleta de lixiviado mais utilizado é o de ‘espinha de peixe’. Esse método consiste na passagem de tubos de drenagem por toda a área da célula do aterro, de modo similar à espinha de um peixe. A configuração dessa rede dependerá da topografia do terreno e da geometria que o projeto estabelece (figura 19). Nesse caso são usados os geotubos de PEAD, podendo ter ou não filtro granular em seu entorno e geotêxtil, com a finalidade de encapsular o filtro granular junto ao tubo e separá-lo do meio, ou servir de proteção para a geomembrana, na qual a tubulação estará acomodada (ReCESA, 2008).

Figura 19 - Exemplos de configuração de sistema espinha de peixe.



Fonte: ReCESA, 2008.

Na figura 19, os círculos brancos representados são identificados como pontos de saída ou áreas de acúmulo. O ideal é que o lixiviado flua por gravidade. Entretanto, nessas

áreas, uma bomba pode ser instalada para remover o lixiviado (ReCESA, 2008). A Figura 20 ilustra um sistema de espinha de peixe instalado no fundo de uma célula de aterro sanitário. Nesses casos, podem ser os geotubos de PEAD ou PVC, com encapsulamento por geotêxtil. Essas infraestruturas também devem ser impermeabilizadas adequadamente com o auxílio das geomembranas.

Figura 20 - Sistema de espinha de peixe na célula de um aterro sanitário.



Fonte: Penteadó, 2021.

Em ambos os métodos e composições, o lixiviado é conduzido aos reservatórios ou às chamadas lagoas de chorume para armazenamento e tratamento, antes de devolvê-lo ao meio ambiente.

3.1.4. Sistema de drenagem de gases

Esse sistema é executado com o auxílio de drenos verticais e deve estar acomodado abaixo da coluna de resíduos. Similarmente ao sistema de coleta e tratamento de lixiviado, precisa ser executado com elementos altamente permeáveis como os geotubos de PEAD ou PVC perfurados, com filtro granular (rachão) em seu entorno (figura 21), com o encapsulamento por gradeamento ou geotêxteis.

Figura 21 - Esquema de montagem de drenos verticais para gases.



Fonte: Faria, 2010.

Nos aterros com recuperação de energia, o geotubo de PEAD e geotêxteis não são indicados. Nestes casos, deve-se adotar tubos de concreto, filtro granular e gradeamento somente. Para a adoção de um novo sistema de captura de gases, é necessário que chamadas ocasionais sejam cessadas. Isso pode ocorrer por água ou abafamento. É recomendável que se faça por abafamento, pois o jato de água pode causar choque térmico na tubulação e desencadear rupturas e desmoronamentos no sistema de drenagem.

Normalmente, a coleta de gases é feita depois que uma parte da célula é aterrada. Cada dreno vertical deve estar conectado a uma tubulação horizontal, que transportará o gás para um coletor principal, o qual, posteriormente, será encaminhado para os flares⁴, onde ocorre a queima, que nos aterros sanitários, transforma o metano em dióxido de carbono, reduzindo significativamente as emissões de GEE. Esse sistema deve estar apto aos monitoramentos posteriores (FIGUEIREDO, 2011).

3.1.5. Sistema de drenagem de águas pluviais

A drenagem de águas superficiais objetiva minimizar o volume de água infiltrada no montante de resíduos, de forma a reduzir, conseqüentemente, o volume de lixiviado e evitar processos erosivos que possam ocorrer nos taludes e comprometer o processo de cobertura (ReCESA, 2008).

O sistema é configurado por elementos de condução e coleta como canaletas, escadas hidráulicas (figura 22), dispositivos de dissipação de energia, entre outros. Por se tratar de uma estrutura que pode sofrer grandes deformações com o tempo, é recomendável que as infraestruturas hidráulicas sejam feitas de materiais flexíveis, que absorvam a

⁴ Equipamento de controle de poluição do ar, cujo funcionamento consiste na queima de gases.

deformação ao longo tempo. Esses sistemas podem ser desenvolvidos em escadas hidráulicas ou com o auxílio de geomembranas ou argila compactada, quando formatadas em canaletas (REICHERT, 2007).

Figura 22 - Canaletas de drenagem de águas superficiais.



Fonte: Penteado, 2021.

3.1.6. Cobertura diária e cobertura final

Com o objetivo de inibir a presença de animais e evitar maus odores, e de modo a evitar o espalhamento dos resíduos, diariamente os aterros sanitários fazem a compactação da camada de resíduos, efetuam o aterramento, lançando uma camada de solo de pelo menos 50 cm, e finalizam com cobertura por geotêxtil. Esse processo pode ser repetido diariamente ao final das atividades, até o fim das operações da célula, quando esta já puder receber a cobertura final.

Após o encerramento das operações, a cobertura final deve ser executada. Esta deve receber uma camada de regularização para prosseguir com o sistema de impermeabilização – para evitar a percolação de águas superficiais no maciço de solo/resíduos e o escape de gases para a atmosfera. Isso porque, uma coluna de líquidos em demasia pode gerar instabilidades no maciço. Para isso, o ideal é a combinação de GCL e geomembrana.

Também no sentido de evitar quaisquer riscos de deslizamentos e desabamentos do maciço, é interessante que também haja, no mínimo, um elemento de reforço como a geogrelha, por exemplo, incorporada em uma camada de solo granular. Ou ainda, com uma camada de geocélula, que tanto pode atuar como elemento de reforço, como elemento de proteção contra erosão e revestimento, com o preenchimento com solo e vegetação (ZORNBERG, 2013).

3.1.7. Poços de monitoramento do aquífero

Os poços de monitoramento de aquífero são desenvolvidos com o objetivo de determinar a presença e concentração de agentes poluentes e contaminantes em águas subterrâneas, executados com prévio estudo geológico e hidrológico. Essas estruturas são dispostas estrategicamente, próximas às áreas de um aterro sanitário e devem ser construídas de acordo com o previsto em ABNT NBR 15495 – Partes 1 e 2 e devem contar com barreira sanitária em seu entorno, que pode ser realizada com a geomembrana. A coleta e análise dos dados dos poços fornece condições mais robustas de argumentação para diagnóstico de impactos ambientais (ABNT, 2007).

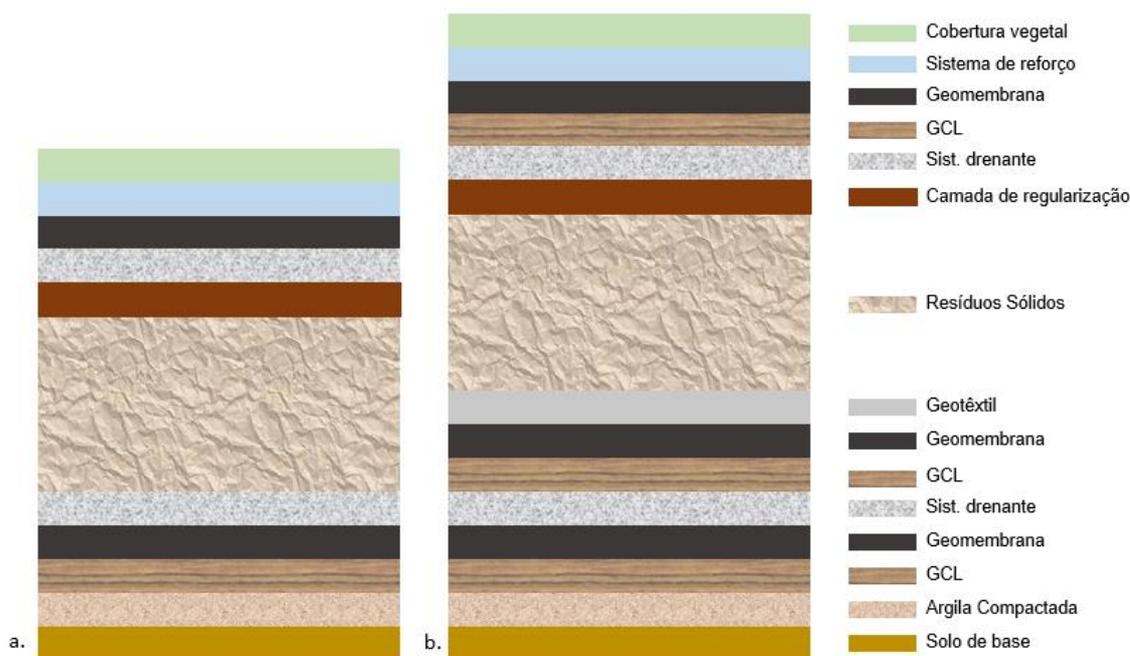
3.2. Aterros para Resíduos Perigosos

Estes aterros são projetados para receber resíduos perigosos, os quais de acordo com a NBR 10004/2004, possuem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade e que, através destas características possam oferecer riscos à saúde pública ou ainda, provocar impactos negativos ao meio ambiente se dispostos de maneira incorreta. Esse tipo de aterro está apto a receber resíduos sólidos industriais (RSI), químicos, fármacos, e todo aquele que se enquadre nas características de periculosidade supramencionadas (ABNT, 2004).

Todo produto geossintético deve ter sua instalação justificada e realizada segundo normas e instruções específicas para desempenhar a função de acordo com o que foi projetado. Conforme Koerner (1998), a instalação deve contar com a completa escavação da célula e seus respectivos reforços, se necessário. Em aterros no geral, não somente de resíduos perigosos, a parte mais importante do processo construtivo é a impermeabilização de toda a célula, tendo em vista o potencial poluidor de um aterro. Nesse caso, após toda a limpeza da célula, que deve consistir na remoção de todo e qualquer material que possa causar furos nos materiais subjacentes, a impermeabilização do fundo e dos taludes pode ser executada.

A figura 23 ilustra de forma esquemática a diferença no sistema de impermeabilização de um aterro Classe IIA e Classe I, bem como o sistema de impermeabilização superior. De acordo com Lodi et. al (2009), segundo recomendações da USEPA, na figura 23b, vê-se o esquema de dupla barreira composta, recomendados em geral, para aterros de resíduos perigosos. De igual forma, o esquema contido em 23a representa sistemas de barreiras simples, recomendados para aterros sanitários, cujos resíduos são considerados não perigosos e não inertes.

Figura 23 - Esquema comparativo de sistema de aterros (a) Classe IIA e (b) Classe I.



As recomendações da USEPA refletem o que deveriam ser as condições ideais de campo. Entretanto, no Brasil, visando a redução dos custos, a execução das camadas de cobertura, quase sempre, não é considerada prioridade, mesmo essa camada sendo tão importante quanto a impermeabilização. É a camada de cobertura que impedirá a infiltração de águas pluviais, por exemplo, impedindo o aumento do lixiviado no maciço de resíduos (VERTEMATTI, 2015).

3.3. Aterros Controlados e Valas Sépticas

Os aterros controlados, ou os chamados aterros não sanitários, fazem parte de uma categoria intermediária; não são considerados lixões, mas ao mesmo tempo, também não são aterros sanitários.

De acordo com a ANVISA (Agência Nacional da Vigilância Sanitária), as valas sépticas são consideradas as melhores técnicas para dispor resíduos biológicos dos serviços de saúde. Esses aterros são recomendados para municípios de pequeno porte, nos quais a quantidade de RSS a dispor é diminuta, e há maior controle na separação pelas fontes geradoras. Nestes casos, deve haver uma camada impermeabilizante

Práticas como controle operacional, aterramento diário, sistemas drenantes e de coleta e tratamento do lixiviado, não são realizadas nesse tipo de infraestrutura e, portanto, são considerados inadequados no que tange a disposição de resíduos.

Esse tipo de infraestrutura advém da necessidade de se remediar células de lixões. Dessa forma, faz-se o aterramento do montante de resíduos pré-existentes e posterior cobertura com terra e vegetação, que objetiva minimizar o impacto visual do resíduo a céu aberto, bem como os odores oriundos do processo de decomposição do resíduo, de forma a evitar também o aparecimento de animais.

3.4. Lagoas de chorume

As lagoas de chorume ou lixiviado são grandes reservatórios escavados nas dependências do aterro para receber e acondicionar o lixiviado gerado nas células, para posterior tratamento. São as estruturas que devem demandar maior atenção, maior confiabilidade técnica e maior custo, se necessário. Isso porque um simples furo na camada de impermeabilização, sob a carga hidráulica constante própria da lagoa, pode gerar um passivo ambiental ainda maior que o aterro sanitário em si (BENJAMIM, 2020).

No caso da lagoa, recomenda-se a utilização de uma camada de argila compactada, GCL e geomembrana – nesse caso, o acabamento pode ser liso, tendo em vista que, por não haver necessidade do uso de geotêxtil de proteção, não será necessário nenhum atrito. De igual forma, tendo em vista que os materiais ficarão dispostos em uma estrutura escavada, estes devem ser fixados por valeta de ancoragem na crista dos taludes, que deve ser previamente dimensionada e escavada (BENJAMIM, 2020).

Do ponto de vista técnico, nenhum material é totalmente impermeável; existem aqueles cuja permeabilidade é extremamente baixa, podendo atuar como barreira. Sendo assim, mesmo com o material mais impermeável possível, como no caso das geomembranas, nenhuma instalação está completamente livre de furos e vazamentos.

Estatisticamente, de acordo com Beck (2013), podem ocorrer 46 furos/hectare com a má a qualidade da instalação de uma geomembrana e se o material de cobertura for lançado de forma inadequada. Em contrapartida, a alta qualidade de instalação pode diminuir esses números para 19 furos/hectare. E, apesar desse número não parecer tão alarmante, os dados da Tabela 2 mostram as taxas de vazamentos que podem ocorrer mesmo com micro furos, enquanto uma especificação típica, traz 75,8 litros/dia/hectare como aceitável.

Tabela 2 – Taxa de vazamentos detectados por micro furos de acordo com carga hidráulica.

Diâmetro do furo (em mm)	Vazamentos detectados (l/dia)	
	Carga hidráulica = 30 cm	Carga hidráulica = 300 cm
0,3	49,30	493,00
2,0	379,00	3.790,00
11,3	11.370,00	113.700,00

Fonte: Elaborado pela autora (2022), baseado em dados de Giroud e Bonaparte, 2015.

Essa, portanto, é uma das razões da necessidade de se empregar bons materiais em campo; materiais que possuam controle de qualidade de fabricação (MQC – do inglês *manufacturing quality control*), que sejam certificados e homologados de acordo com norma vigente, e contar com boa instalação; equipamentos adequados, mão de obra especializada, testes de qualidade e controle de qualidade de instalação (CQC – do inglês *construction quality control*).

O MQC e o CQC são documentos emitidos pelas partes envolvidas na fabricação e instalação das geomembranas. O MQC é emitido pelo fabricante, com o objetivo de atestar que o material é produzido, testado e controlado internamente de acordo com o que é previsto em norma vigente, bem como certificado por órgão competente. O CQC é emitido pelo instalador responsável e garante o controle, bem como a qualidade da instalação de acordo com os parâmetros e testes exigidos por norma (MADEAR, 2019).

3.5. Pátios de compostagem

Os pátios de compostagem são estruturas projetadas para o gerenciamento de resíduos orgânicos. Juntamente com o pátio em si, um aterro sanitário complementar deve ser projetado para dispor resíduos não compostáveis e como tratamento de emergência nos casos de parada ou manutenção do processo. O objetivo dessas estruturas é neutralizar a altíssima carga orgânica presente nesses resíduos, o que é responsável por gerar elevada quantidade de gases e lixiviado. Esse processo de neutralização transforma o material em húmus, um composto sem potencial patogênico, deixando-os aptos a utilização na agricultura, como fertilizantes (BIDONE et al, 1999).

Recomenda-se que toda a área dos pátios seja impermeabilizada com, pelo menos, 30 cm de argila compactada. Entretanto, tendo em vista a baixíssima permeabilidade do GCL, somente o uso deste substitui integralmente a argila compactada e cumpre essa função. Além do GCL, devem ser usados elementos de drenagem, como no caso dos aterros, os geocompostos drenantes, geotêxteis e georredes, a fim de coletar todo o lixiviado produzido ao longo do processo de compostagem. De igual forma, o lixiviado deve ser drenado e tratado.

4. Especificação de Projeto

Além de características geotécnicas do local e solicitações a que o material estará submetido, todo produto geossintético empregado deve ser especificado levando em consideração que este material estará submetido a esforços de tração, recalques e afundamentos, ação do vento e intempéries, rasgos e perfurações por elementos contundentes, bem como em contato com outros geossintéticos, com o resíduo e com o próprio solo, seja de base ou cobertura. Por isso, uma análise rigorosa desse sistema deve ser elaborada (VERTEMATTI, 2015).

O dimensionamento deve partir de uma análise complexa acerca do tipo e nível de periculosidade do resíduo a dispor – que influenciará na composição do sistema de impermeabilização; e dos fatores de atrito gerados das interfaces entre os geossintéticos ou dos geossintéticos com o solo; um parâmetro importante no projeto e definição dos materiais, os quais as solicitações do sistema e o fator de segurança podem ser determinados (PALMEIRA, 2018).

Tal fato pode ser elucidado em 5.1, através do estudo de caso proposto por Palmeira (2018), cujos dados são empíricos.

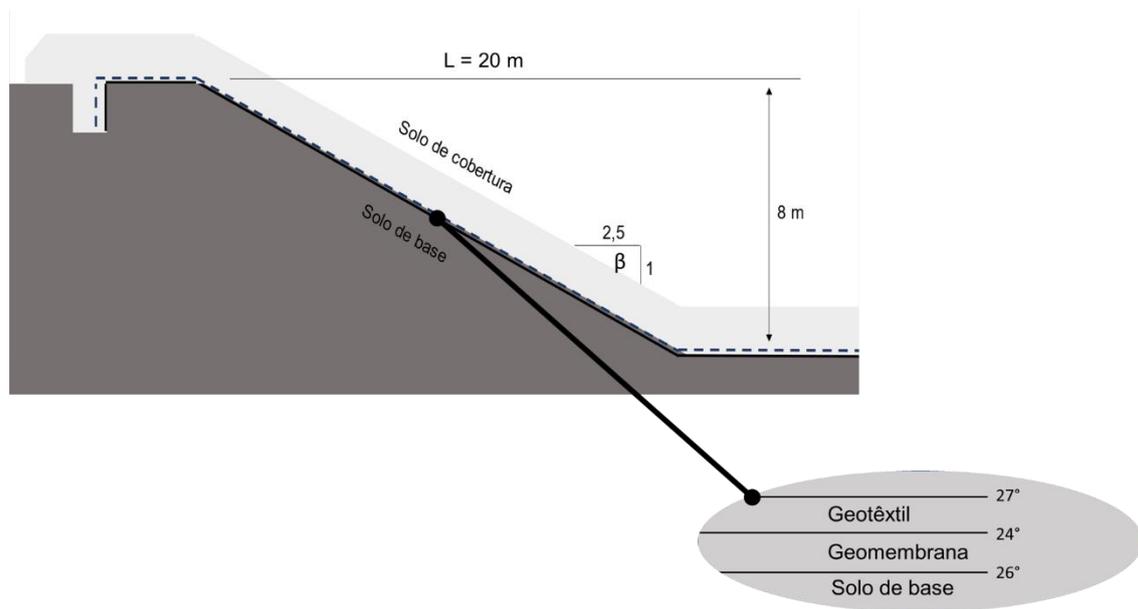
4.1. Estudo de caso

O estudo de caso proposto tem o objetivo ilustrar os cálculos e considerações necessárias na determinação do fator de segurança para evitar o deslizamento do solo de cobertura e a tração requerida pelo geotêxtil para proteção mecânica de uma geomembrana.

Nesses casos, onde há a interação entre dois geossintéticos entre si e entre o geossintético e o solo de base, uma das variáveis necessárias será o ângulo de atrito de interface entre cada uma dessas interações, que é fornecido pelo estudo dos atritos de interface, fornecerá informações mais assertivas e mais próximas às condições de campo.

Na figura 24, estão esquematizadas algumas dimensões e parâmetros a serem aplicados na equação 1, além de espessura (t) de 1m, adesão do solo (a) que deve ser considerada nula, ângulo de atrito (ϕ) de 32° e peso específico, de 18 kN/m^3 .

Figura 24 - Geomembrana disposta sob talude e geotêxtil sobreposto para proteção mecânica, com indicação dos ângulos de atrito de interfaces.



Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Palmeira, 2018.

De acordo com Palmeira (2018) *apud* Koerner e Hwu (1991), o fator de segurança (FS) pode ser calculado pela equação 1:

$$FS = \frac{-B \pm \sqrt{(B^2 - 4AC)}}{2A} \quad (1)$$

Onde:

$$A = 0,5 * \gamma * L * t * \sin^2(2\beta) \quad (2)$$

$$A = 85,60$$

$$B = -[\gamma * L * t * \cos^2\beta * \tan\phi_{sg-s} * \sin \sin(2\beta) + a_s * L * \cos\beta * \sin \sin(2\beta) + \gamma * L * t * \sin^2(2\beta) * \tan\phi * \sin \sin(2\beta) + 2c * t * \cos\beta + \gamma * t^2 * \tan\phi] \quad (3)$$

$$B = -141,69$$

$$C = (\gamma * L * t * \cos\beta * \tan\phi_{sg-s} + a_s * t)(\tan\phi * \sin\beta * \sin(2\beta)) \quad (4)$$

$$C = 27,26$$

O fator de segurança, portanto, será:

$$FS = \frac{-(-141,69) + \sqrt{((-141,69)^2 - 4 * 85,60 * 27,26)}}{2 * 85,60}$$

$$FS = 1,43$$

Com o fator de segurança encontrado, a resistência à tração requerida pelo geotêxtil pode ser determinada pela equação 5. Nesse caso, admite-se que a adesão entre geotêxtil e geomembrana é nula e o ângulo de atrito de interface geomembrana-geotêxtil (Φ_{sg-i}) é igual a 24°. Nesse caso:

$$T = \left[\left((a_s - a_i) + \gamma * t * \cos\beta (\tan\phi_{sg-s} - \tan\phi_{sg-i}) \right) \right] * L \quad (5)$$

$$T = \left[\left((0 - 0) + 18 * 1 * \cos 21,8^\circ (\tan 27 - \tan 24) \right) \right] * 20$$

$$T = 21,5 \text{ kN/m}$$

Tendo em vista que essa é a sollicitação mínima de tração a que o geotêxtil estará submetido, ou seja, qualquer sollicitação maior que essa pode gerar ruptura do sistema. Por isso a importância do dimensionamento adequado e de se aplicar o fator de segurança, prevenindo instabilidades. Dessa forma, a tração requerida pelo geotêxtil passa a ser de, no mínimo:

$$T_{GTx} = T * FS \quad (6)$$

$$T_{GTx} = 21,5 * 1,43$$

$$T_{GTx} = 30,74 \text{ kN/m}$$

Neste exemplo, onde há somente o geotêxtil em contato com a geomembrana, a tração mínima requerida pelo geotêxtil seria de, no mínimo, 30,74 kN/m. Na prática, com a presença de mais geossintéticos; mais interfaces e, conseqüentemente, mais valores de atrito para cada uma dessas interfaces. Com isso, a tração requerida de projeto vai se subdividindo entre os materiais.

De forma análoga, os outros materiais constantes da camada de impermeabilização podem ser dimensionados, bem como os das demais camadas, sempre considerando as especificidades e capacidade de cada um deles. A geomembrana, por exemplo, não pode estar sob tração sob hipótese alguma, sob o risco de ocorrência de *stress cracking*, assim como os elementos de reforço, se for o caso, devem levar em consideração mais fatores sobre as propriedades do solo (PALMEIRA, 2018). O estudo de caso proposto é somente uma exemplificação do que é considerado efetivamente pelos projetistas ao longo dos cálculos de dimensionamento e especificação técnica.

4.2. Estimativa de Custo

Um fator determinante na utilização de geossintéticos pode ser o custo atrelado à sua utilização e instalação e isso pode variar se o mesmo produto for utilizado para mais de uma função, por exemplo. A tabela 3 traz, de forma resumida, as funções de cada um dos materiais tratados no presente trabalho bem como o custo médio individual de aquisição, descontados a instalação, impostos e demais serviços construtivos.

Tabela 3 – Esquematização de materiais por função e custo médio individual.

Produto	Função						Preço médio (R\$)
	Barreira	Separação	Drenagem	Reforço	Proteção	Controle de erosão	
Geomembrana ¹	✓						19,50/m ²
Geotêxtil ²		✓	✓	✓	✓	✓	11,90/m ²
GCL ³	✓						29,50/m ²
Geocomposto drenante ⁴			✓				27,80/m ²
Geogrelha ⁵				✓			29,60/m ²
Geocélula ⁶				✓		✓	51,70/m ²
Geotubo ⁷			✓				8,90/m
Georrede ⁸			✓				8,50/m ²

1 – Preço referente a geomembrana com acabamento liso e espessura de 1,0mm;

2 – Preço referente a geotêxtil de poliéster com 600 g/m²;

3 – Preço referente a GCL com 3,6 kg/m² de argila bentonítica;

4 – Preço referente a geocomposto drenante com dois geotêxteis de 130 g/m²;

5 – Preço referente a geogrelha de 110 x 30 kN/m;

6 – Preço referente a geocélula de geotêxtil em PP, com altura de 10 cm e módulo de abertura interna de 20 x 20 cm;

7 – Preço referente a geotubo/tubo dreno em PEAD, corrugado, de 4 polegadas;

8 – Preço referente a georrede triplanar de 5 mm.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

5. Considerações Finais

Nas últimas décadas, o uso de geossintéticos tem sido cada vez maior e mais frequente em infraestruturas como aterros sanitários, por exemplo, pois são materiais manufaturados, com rigoroso controle de qualidade, capazes de promover maior confiabilidade técnica, controle operacional, aumento da vida útil e maior capacidade de monitoramento dos aspectos ambientais envolvidos.

O presente trabalho apresentou uma revisão técnica da literatura acerca dos tipos e especificidades de cada infraestrutura envolvida no gerenciamento de resíduos sólidos. Bem como as características de cada etapa construtiva e dos materiais geossintéticos empregados em cada uma delas, um estudo de caso acerca das primeiras etapas de dimensionamento e uma breve estimativa de custo individual de cada produto.

Neste sentido, espera-se que este trabalho possa servir como um referencial básico das principais aplicações e especificidades destes materiais.

6. Referências

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10318-1**: Geossintéticos Parte 1: Termos e definições, 2021.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419:1992**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15495:2007**: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados - Parte 1: Projeto e construção. Rio de Janeiro, 2007.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:2004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- BENJAMIM, C. V. Bate Papo com Vinicius Benjamin sobre Barreiras e Drenagem de Base em Aterros Sanitários. **Youtube**, 09/04/2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LI26Alh_Cq0>. Acesso em: 20 de maio de 2022.
- BIDONE, F. R. A., POVINELLI, J. **Conceito básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: EESC-USP, 1999.
- Boardman, B. T., DANIEL, D. E. (1996). “**Hydraulic Conductivity of Desiccated Geosynthetic Clay Liners**” J. Geotechnical Eng., ASCE, Vol. 122, No. 3, pp. 204-208.
- COSTA, A. M. C. D.; CONSTANTE, A. M. G.; RIBEIRO, M. M.; SILVA, N. S. H.; OLIVEIRA, N. M. **Dimensionamento de Diferentes Cenários na Destinação de Resíduos Sólidos no Aterro Sanitário – CPGRS**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 5, n. 3, p. 343-355, set. 2016. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/48129>>. Acesso em: 17 de junho de 2022.
- DUARTE, A. F. S. **Aplicação de Geossintéticos na Impermeabilização e Selagem de Aterros**. 2009. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Ambiente, Universidade de Aveiro, 2009.
- FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso**. 2011. 147P. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.
- GRI – Geosynthetic Research Institute (2006). “GRI Test Method GM 13” – Standard Specification for “**Test Properties, Testing Frequency and Recommended Warranty for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes**”, Drexel University – PA – USA, Revision 7. Disponível em: < <https://geosynthetic-institute.org/grispeccs/gm13.pdf>>. Acesso em: 25 de setembro de 2021.
- GRI – Geosynthetic Research Institute (2016). “GRI-GCL 3” – Standard Specification for “**Test Methods, Required Properties, and Testing Frequencies of Geosynthetic Clay Liners (GCLs)**”, Drexel University – PA – USA, Revision 4. Disponível em: < <https://geosynthetic-institute.org/grispeccs/gcl3.pdf>>. Acesso em 23 de setembro de 2021.
- KANAFLEX. **Tubos PEAD para Aterros Sanitários**. 3. ed. Cotia - SP, 2021. Disponível em: < http://www.kanaflex.com.br/novosite/arquivos/mt_70.pdf>. Acesso em 30 de abril de 2022.
- KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics** – Fourth Edition. 1999. Prentice Hall, N.J. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/docs/ML0527/ML052720145.pdf>>. Acesso em 30 de setembro de 2021.
- JUCÁ, J. F. T. **Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil**. In: 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/profile/Jose-Fernando>>

- [Juca/publication/260084353 Destinacao Final de Residuos Solidos Urbanos no Brasil/links/543bc26b0cf2d6698be325cf/Destinacao-Final-de-Residuos-Solidos-Urbanos-no-Brasil.pdf](https://www.repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/10133/10000/1/Juca/publication/260084353_Destinacao_Final_de_Residuos_Solidos_Urbanos_no_Brasil/links/543bc26b0cf2d6698be325cf/Destinacao-Final-de-Residuos-Solidos-Urbanos-no-Brasil.pdf)>. Acesso em: 09 de dezembro de 2021.
- LODI, P. C.; ZORNBERG, J. G.; BUENO, B. S. **Uma breve visão sobre geossintéticos aplicados a aterros sanitários**. Revista Tecnol. Fortaleza, v. 30, n. 2, p. 188-197, dez. 2009. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1Hnb6DRWbOw81xudpLtpYE_p_r2qiiNpqq>. Acesso em: 06 de novembro de 2021.
- MADEAR, C.; MADEAR, G.; RADU, S. M. **Construction quality assurance and quality control at landfills**. jan. 2019. Disponível em: <<https://www.proquest.com/openview/875c44eab7b8e427f0f472b9ca7fa187/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1046413>>. Acesso em: 08 de junho de 2022.
- MAIA, N. P. **O USO DE MATERIAIS GEOSSINTÉTICOS EM ATERROS SANITÁRIOS**. 2016. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba – Ufpb, João Pessoa, 2016. Disponível em: <http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documentos/tccs/2015.2/o-uso-de-materiais-geossinteticos-em-aterros-sanitarios.pdf>. Acesso em: 21 de outubro de 2021.
- NASCIMENTO, M. T. Avaliação de Dano Mecânico em Geossintéticos em Obras de Disposição de Resíduos. 2002. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Publicação G. DM-093A/02, 102p.
- NUNES, M. P. T. **Estudo de Estabilização do Solo sobre a Geomembrana da Cobertura Final de um Aterro de Resíduos Perigosos**. 2019. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Geras, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: < https://www.dcta.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/21/2020/02/201412080380_Marcos-Paulo.pdf>. Acesso em: 22 de setembro de 2021.
- OTHMAN, M. A., BONAPARTE, R., GROSS, B. A. (1997). **“Preliminary Results of Study of Composite Liner Field Performance”** – J. Geotextiles and Geomembranes. Manual de Geossintéticos – 3ª edição.
- PALMA, S. L.; SOUZA, S. T. **Manual Técnica - FortLiner GCL**. Nova Odessa - SP, 2018. Disponível em: < <https://www.obergeo.com.br/linha-de-produtos>>. Acesso em: 20 de setembro de 2021.
- PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 294 p.
- PENTEADO, C. S.G. Disposição Final de Resíduos Sólidos. [Powerpoint de apoio à disciplina EB606 Gerenciamento de Resíduos Sólidos, lecionada na Faculdade de Tecnologia da UNICAMP]. 2021.
- PREVITI, L. S.; LAVOIE, F. L.; ZANON, T. V. B. **Estudo do Comportamento da Bentonita Utilizada em GCL's (Geosynthetic Clay Liners) para Aplicação em Base de Aterros de Resíduos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. Disponível em: <[https://maua.br/files/122017/estudo-do-comportamento-bentonita-utilizada-gcls-\(geosynthetic-clay-liners\)-para-aplicacao-bases-aterros-residuos-261743.pdf](https://maua.br/files/122017/estudo-do-comportamento-bentonita-utilizada-gcls-(geosynthetic-clay-liners)-para-aplicacao-bases-aterros-residuos-261743.pdf)>. Acesso em: 04 de outubro de 2021.
- ReCESA - Rede Nacional de Capacitação e Extensão Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. **Resíduos Sólidos - Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários**: guia do profissional em desenvolvimento - nível 2. Belo Horizonte, 2008. Disponível em:

- <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/recesa/planode_gestaointegradaderesiduossolidosurbanos-nivel2.pdf>. Acesso em: 20 de abril de 2022.
- REICHERT, G. A. **Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários**. 2007. Disponível em: <https://vdocuments.com.br/manual-aterro-sanitario-2007-geraldo-reichertpdf.html?page=1>. Acesso em: 02 de junho de 2022.
- SANTOS, L. R. R.; SILVA, L. C. A. F. M. **Aplicações de Geossintéticos na Geotecnia Ambiental: Análise de Publicações Brasileiras nos Últimos 20 anos (1999 a 2018)**. 2019. 17 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semiárido, Caraúbas, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/2968/2/LIGIARRS_ART.pdf>. Acesso em: 13 de outubro de 2021.
- SOUZA, C. R.; CRUZ, M. F.; TOMINAGA, E.; ANDRADE JÚNIOR, O. M. **Potencialidade dos Geotêxteis Não-Tecidos**. In: XV INIC/XI EPG, 2011. São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2011/anais/arquivos/RE_0152_0464_01.pdf>. Acesso em: 02 de outubro de 2021.
- SPINA, M. I. A. P. **Características do gerenciamento dos resíduos sólidos dos serviços**. RAEGA, Curitiba, n. 9, p. 95-106, 2005. Editora UFPR. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/3450>>. Acesso em: 08 de junho de 2022.
- VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 570 p.
- YARAHMADI, N.; GRATCHEV, I.; JENG, D. S. **The Effect of Structural Configuration on Hydraulic Capacity of Geonet Drains Used in Landfills**. Electronic Journal Of Geotechnical Engineering. Queensland, p. 31-40. 2018.