



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DO SOLO SOBRE A GEOMEMBRANA DA
COBERTURA FINAL DE UM ATERRO DE RESÍDUOS PERIGOSOS

MARCOS PAULO TELES NUNES

BELO HORIZONTE

2019

MARCOS PAULO TELES NUNES

ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DO SOLO SOBRE A GEOMEMBRANA DA
COBERTURA FINAL DE UM ATERRO DE RESÍDUOS PERIGOSOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof.^a Dra. Gisele Vidal Vimieiro

BELO HORIZONTE

2019

MARCOS PAULO TELES NUNES

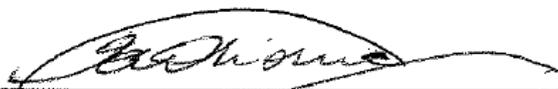
ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DO SOLO SOBRE A GEOMEMBRANA DA
COBERTURA FINAL DE UM ATERRO DE RESÍDUOS PERIGOSOS

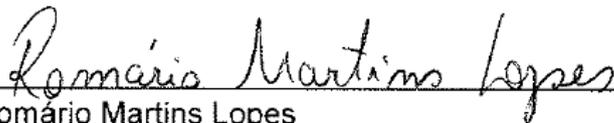
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Data de aprovação: 26 / 11 / 2019

Banca Examinadora:


Gisele Vidal Vimieiro – Presidente da Banca Examinadora
Prof.^a. Dra. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
(CEFET/MG) – Orientadora


Evandro Carrusca de Oliveira
Prof. Dr. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG)


Romário Martins Lopes
Eng.^o. Especializado

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela finalização da monografia, por ter me guiado nos caminhos que eu deveria tomar e por ter me ensinado tudo que precisei para realização do trabalho.

Aos meus pais, pelo apoio, ajuda, e ânimo para conclusão do meu trabalho e do curso de graduação.

À minha professora orientadora Gisele, que compreendeu as minhas dificuldades ao longo da pesquisa, sempre acreditando em mim e dando o suporte que me foi necessário.

Ao Eng.^o Romário, pela disponibilidade e pelos esclarecimentos que se fizeram necessários para o entendimento de assuntos relevantes deste tema.

À empresa responsável pelo aterro estudado, por terem sempre me recebido bem em suas instalações e terem fornecido as informações que precisei.

Ao CEFET/MG e a todos os professores que participaram de minha graduação, por terem contribuído, direta e indiretamente, para minha formação e conclusão da monografia.

Aos meus amigos, colegas, e todas as pessoas que estiveram comigo durante este período, por de alguma forma tornarem o desafio de concluir o trabalho mais leve e possível.

RESUMO

O aterro estudado apresenta dificuldades para o completo encerramento devido à instabilidade do solo de cobertura final sobre uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), colocada para o enclausuramento dos resíduos perigosos e uma menor geração de líquidos percolados. O objetivo do presente trabalho foi avaliar alternativas para a estabilização do solo sobre a geomembrana PEAD presente na cobertura final do aterro de resíduos perigosos encerrado, permitindo sua revegetação. Para realização do trabalho, levantaram-se as razões de instabilidade do solo de cobertura. Pesquisou-se possíveis soluções para o problema em estudos científicos e com três empresas. A alternativa prevista no Plano de Encerramento para o local também foi levada em consideração. As alternativas foram avaliadas destacando-se os pontos fortes e fracos de cada uma. As características de atrito do material da geomembrana e a inclinação íngreme dos taludes (30°) foram as razões encontradas para a instabilidade solo de cobertura. Foram encontradas sete alternativas para o problema e, na avaliação das técnicas, a manta com grampeamentos, os *biologs* com estacas de bambu e Capim-Vetiver, o geocomposto drenante sobre a geomembrana PVC, e a redução da declividade dos taludes com uso do solo local não foram indicadas. Dentre as técnicas indicadas, para execução em escala de teste, estão a geogrelha tridimensional, o confinamento celular de 20 cm, e as geocélulas preenchidas por brita com *biologs* e cabos de ancoragem, pois apresentaram chance de estabilizar o solo e sem ocasionar grandes furos na geomembrana. Com isso, percebeu-se que o uso dos geossintéticos exige certos cuidados, caso contrário ao invés das vantagens poder-se-á criar maiores desafios. Concluiu-se que das soluções apresentadas, apenas três foram indicadas. Notou-se que nenhuma das soluções fez uso da geomembrana texturizada e, caso o Plano de Encerramento tivesse sido executado, a solução para o problema poderia ser simplificada. Como propostas de continuidade do trabalho são citadas a execução de testes das técnicas indicadas, análises laboratoriais de atrito de interface entre a geomembrana e os materiais locais, a busca por outras soluções junto às empresas e profissionais do ramo, e a reunião das informações sobre o baixo atrito da geomembrana com materiais na cobertura de aterros.

Palavras-chave: Geomembrana PEAD. Solo de cobertura. Taludes. Geossintéticos.

ABSTRACT

The landfill studied presents difficulties for complete closure due to the instability of the final cover soil over a high density polyethylene geomembrane (HDPE), placed for the enclosure of hazardous waste and a lower generation of percolated liquids. The objective of the present work is evaluate alternatives for the soil stabilization over a HDPE geomembrane present in the final cover of the closed hazardous waste landfill, allowing its revegetation. For the accomplishment of the work, reasons of the cover soil instability were raised. Solutions to the problem were researched through scientific studies and three companies. The Closure Plan alternative was also considered. The solutions were evaluated by highlighting the strengths and weaknesses of each. The friction characteristics of the geomembrane and the steep of the slopes (30°) were the reasons for final cover instability. Seven alternatives were found for the problem and, in the evaluation of the techniques, the staped blanket, the biologs with bamboo stakes and Vetiver, the drainage geocomposite over a PVC geomembrane, and the reduction of slope inclination with local soil were not indicated. Among the indicated techniques, for execution in test scale, were the three-dimensional geogrid, the 20cm cell confinement, and the geocells filled with gravel and biologs with anchor lines, because they have a chance to stabilize the soil, without causing large holes in the geomembrane. Thus, it is noted that the use of geosynthetics requires some care, otherwise, instead of advantages, greater challenges could be created. The conclusion is that of the techniques presented, only three are indicated. It is seen that none of the solutions made use of textured geomembrane and, if the Closure Plan had been executed, the solution to the problem could be simplified. As work continuity proposals, are mentioned the execution of tests of the indicated techniques, the interface friction analises between the HDPE geomembrane and local materials, the search for other solutions with companies and professionals, and the reunion of information about the low friction of the geomembrane with landfill cover materials.

Key words: HDPE Geomembrane. Cover Soil. Slopes. Geossynthetics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mantas PEAD e posterior revegetação no aterro sanitário de Vall d'en Joan.	21
Figura 2 – Revegetação de talude em aterro de resíduos.	22
Figura 3 – Mecanismo de intertravamento entre a geogrelha e o material granular.	22
Figura 4 – Imagem de uma georrede.	23
Figura 5 – Comparação do aterro convencional x com uso de geossintéticos.	24
Figura 6 – Geotêxtil não tecido e tecido (vista ampliada).	24
Figura 7 – Diferentes funções do geotêxtil.	25
Figura 8 – Diferentes modelos de geomembranas PEAD.	26
Figura 9 – Colocação de geomembrana em talude.	27
Figura 10 – Geocomposto bentonítico, com argila bentonítica entre dois geotêxteis.	28
Figura 11 – Exemplo de aplicação do geocomposto bentonítico, juntamente com outras camadas de geossintéticos.	29
Figura 12 – Aplicação de geocélula em talude, com cabos de ancoragem entre as células.	30
Figura 13 – Diferentes tipos de retentor de sedimentos (<i>biologs</i>).	31
Figura 14 – Combinação de <i>biologs</i> com capim-Vetiver para retenção de sedimentos.	32
Figura 15 – Talude e elementos constituintes.	36
Figura 16 – Aterro completamente impermeabilizado, englobando também o muro de concreto.	41
Figura 17 – Aterro classe I encerrado, com novo muro de contenção composto por geogrelhas e geocélulas.	42
Figura 18– Área destinada ao aterro de resíduos perigosos antes da instalação.	43
Figura 19 – Área destinada ao aterro de resíduos perigosos antes da instalação, vista de cima.	44
Figura 20 – Processo de implantação do aterro de resíduos perigosos, já com a presença de uma geomembrana PEAD na camada inferior do aterro.	45
Figura 21 – Planta de encerramento do aterro de resíduos perigosos, contida no Plano de Controle Ambiental.	46

Figura 22 – Vista superior da área de estudo, com indicação dos pontos de perspectiva.....	47
Figura 23 – Vista em perspectiva da área, com indicação das cotas nas duas extremidades do aterro.	47
Figura 24 – Esquema das coberturas inferior e superior, previstas no Plano de Encerramento do aterro.	48
Figura 25 – Vista do ponto 1, onde observa-se a geomembrana PEAD e elevadas inclinações dos taludes.	49
Figura 26 – Vista através do Ponto 2: monitoramento de percolados.	50
Figura 27 – Vista do Ponto 3, onde o aterro se encontra mais plano.....	51
Figura 28 – Análise de estabilidade na interface solo-geomembrana, indicando um baixo Fator de Segurança.	54
Figura 29 – Conformação aproximada dos taludes no aterro atualmente.....	55
Figura 30 – Escorregamento do solo após aplicação da técnica de recobrimento por uma manta prendida a grampos.....	58
.....	60
Figura 31 – Técnica de revegetação utilizando retentores de sedimentos com solo vegetal.....	61
Figura 32 – Técnica de revegetação utilizando <i>biologs</i> , com o solo do próprio local.	61
.....	61
Figura 33 – Esquema da cobertura final prevista no Plano de Encerramento do aterro estudado.	62
Figura 34 – Geogrelha tridimensional, onde observam-se os relevos no material....	64
Figura 35 – Esquema da realização de ancoragem do geossintético, com destaque na cava realizada.	65
Figura 36 – Instalação de geocélula sobre geomembrana, protegida por geotêxtil, utilizando a mesma trincheira de ancoragem.	66
Figura 37 – Ancoragem de geocélula sobre geomembrana utilizando cabos de ancoragem fixados na crista do talude.....	67
Figura 38 – Instalação de geocélula sobre geomembrana, protegida por geotêxtil, com cabos de ancoragem, antes do recobrimento.....	68
Figura 39 – Análise da estabilidade de interface entre a camada de brita e a geomembrana.	69
Figura 40 – Análise da ruptura no interior da camada de solo (coesivo).....	71

Figura 41 – Ancoragem dos retentores de sedimentos por meio de cabos de aço...	73
Figura 42 – Aplicação e funcionamento das ancoragens em cabos de aço.....	73
Figura 43 – Estabilidade do solo por cima da geomembrana a partir da redução da declividade dos taludes, sem considerar os limites de base do aterro.....	74
Figura 44– Ampliação dos limites do aterro de resíduos perigosos em 12 metros. ..	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de peso específico, ângulo de atrito e coesão obtidos a partir de ensaios de cisalhamento em diversos tipos de solo.....	34
Tabela 2 – Faixas de variação de ângulos de atrito de interface (em graus) entre solos, geossintéticos e geomembranas.	38
Tabela 3 – Pontos fortes e fracos das soluções apresentadas.	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CEFET/MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

EMA – Entitat del Medi Ambient

EPI – Equipamento de Proteção Individual

ES – Espírito Santo

FS – Fator de Segurança

HDPE – High-density Polyethylene

NBR – Norma Brasileira

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PVC – Policloreto de Vinila

TCA – Tecnologia em Controle Ambiental

LISTA DE SÍMBOLOS

% – porcentagem

cm – centímetro

m/s – metros por segundo

cm/s – centímetros por segundo

mm – milímetros

m – metros

°C – graus Celsius

g/cm³ – gramas por centímetro cúbico

kg/cm³ – quilogramas por centímetro cúbico

τ_f – tensões de resistência ao cisalhamento

τ_{mob} – tensões cisalhantes mobilizadas

δ – ângulo de atrito

m² – metros quadrados

m³ – metros cúbicos

° – graus

kN/m – quilonewton por metro

kN/m³ – quilonewton por metro cúbico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. Aterro de resíduos perigosos	18
3.1.1. Plano de encerramento de aterros de resíduos	19
3.2. Geossintéticos	20
3.2.1. Geogrelhas.....	21
3.2.2. Georredes e Geocompostos Drenantes	23
3.2.3. Geotêxteis	24
3.2.4. Geomembrana	25
3.2.5. Geocomposto Bentonítico	27
3.2.6. Geocélulas	29
3.2.7. <i>Biologs</i>	30
3.3. Propriedades do solo e estabilidade de taludes	32
3.3.1. Peso Específico e Teor de Umidade	32
3.3.2. Coesão e Ângulo de Atrito	33
3.3.3. Análise de estabilidade do solo	34
3.4. Atrito de interface entre solos e geossintéticos.....	36
3.5. Estudo de caso: Fechamento de Aterro Classe 1 com utilização de geossintéticos	40
4. METODOLOGIA.....	43
4.1. Descrição da área de estudo	43
4.2. Levantamento das razões de instabilidade do solo de cobertura	51
4.3. Pesquisa por alternativas/soluções técnicas de estabilização do solo	52
4.4. Avaliação das alternativas/soluções encontradas	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1. Levantamento das razões de instabilidade do solo de cobertura	54
5.2. Pesquisa por alternativas/soluções técnicas de estabilização do solo	56
5.2.1. Manta com grampeamento	58
5.2.2. <i>Biologs</i> com estacas de bambu e Capim-Vetiver.....	59
5.2.3. Geocomposto drenante sobre Geomembrana de PVC.....	62
5.2.4. Geogrelha tridimensional	63

5.2.5. Confinamento celular de 20 cm de altura	65
5.2.6. Geocélulas com brita e uso de <i>biologs</i> com cabos de ancoragem	68
5.2.7. Redução da declividade dos taludes com uso do solo local	74
5.3. Avaliação das alternativas/soluções encontradas	76
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1. INTRODUÇÃO

Os aterros de resíduos sólidos urbanos (sanitários), de resíduos industriais perigosos ou de resíduos inertes são algumas das formas de disposição final adequada dos rejeitos. Além dos aterros como formas de disposição, pode ser citada também a incineração, que é uma necessidade em alguns países, como o Japão, devido à baixa disponibilidade de espaço físico. O gerenciamento e utilização destas técnicas, para seu adequado funcionamento, exige uma série de cuidados, inclusive após o encerramento de sua vida útil.

O correto encerramento dos aterros destinados à disposição de resíduos sólidos é muito importante para a proteção do meio ambiente e da população no entorno, evitando que os resíduos fiquem expostos, podendo vir a gerar impactos na água, no solo e no ar. Para os casos de resíduos perigosos, essa proteção faz-se ainda mais evidente, uma vez que a poluição devido à presença de tais resíduos apresenta maior gravidade.

As principais características dos resíduos perigosos são inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Exemplos de resíduos perigosos são apresentados nos anexos A e B da ABNT NBR 10.004. Alguns mais comuns são as lâmpadas de mercúrio, os fluidos e óleos usados, os diferentes tipos de lodos de tratamento de efluentes, os resíduos provenientes da produção de pesticidas, de explosivos, do refino de petróleo, as tintas e os resíduos da produção de baterias, assim como as embalagens destinadas a armazenar estes produtos.

Nos aterros de resíduos perigosos (Classe I), segundo a norma ABNT NBR 10.157, é necessário minimizar ou evitar a liberação de líquidos percolados e gases para as águas e a atmosfera. Uma maneira de fazer isso, após o encerramento das atividades do aterro, é impermeabilizando a cobertura final, com posterior revegetação. A impermeabilização faz com que o encerramento deste tipo de aterro seja diferente do encerramento de aterros sanitários (resíduos Classe II).

Sendo assim, uma alternativa que vem crescendo seu uso atualmente são os materiais geossintéticos. Estes podem ser utilizados para suprir diferentes necessidades nas obras de engenharia, como por exemplo a impermeabilização de áreas de disposição de resíduos sólidos. Mesmo apresentando muitas soluções, o uso destes materiais deve ser feito levando algumas considerações, uma vez que estão sujeitos também ao aparecimento de diferentes problemas envolvendo a sua

aplicação. Algumas referências na literatura abordam especificamente esta temática, indicando as inúmeras combinações e formas de uso dos materiais geossintéticos.

Diante disso, o presente trabalho possibilitou estudar um aterro de resíduos perigosos onde há dificuldades na estabilização do solo da cobertura final, devido à presença de uma geomembrana PEAD na camada superior, utilizada com função de impermeabilização, dificultando sua revegetação. Buscou-se contribuir para o encerramento adequado do aterro de resíduos perigosos em questão, proporcionando a estabilização da cobertura final e a revegetação da área.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar alternativas para a estabilização do solo sobre a geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) presente na cobertura final de um aterro de resíduos perigosos encerrado, permitindo sua revegetação.

2.2 Objetivos específicos

- Levantar as prováveis razões que dificultam a estabilização do solo na cobertura final do aterro estudado.
- Pesquisar e avaliar alternativas técnicas e modelos de estabilização do solo na cobertura final de aterros com presença de geomembrana PEAD na camada superior.
- Destacar as técnicas mais indicadas para a estabilização do solo na cobertura final.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aterro de resíduos perigosos

O aterro de resíduos perigosos é uma forma de destinação final para os diferentes resíduos de Classe I. Como apresentam características de periculosidade, diferentemente dos resíduos Classe II, é determinado por legislação/normatização que o aterramento destes resíduos seja realizado separadamente, pois exigem maiores cuidados ambientais e operacionais em sua gestão.

A norma ABNT NBR 10.157/87 tem o objetivo de fixar condições mínimas para os projetos, construções e operações de aterros de resíduos perigosos. Essas condições visam, principalmente, a proteção dos corpos hídricos, do solo, dos trabalhadores locais e de toda a população envolvida com o empreendimento.

Para a construção de qualquer tipo de aterro, seja este sanitário ou industrial, alguns fatores precisam ser observados. Um dos principais é a localização. Segundo a norma, a geologia e o tipo de solo do local são importantes para a instalação deste tipo de empreendimento, pois interferem em fatores como a velocidade de infiltração dos percolados. Ainda sobre a localização, é necessário que o aterro esteja a uma distância de no mínimo 200 metros de qualquer corpo d'água ou coleção hídrica. E também é solicitada uma distância mínima de 500 metros dos núcleos populacionais. Para uma maior proteção das águas subterrâneas, é necessário que a superfície inferior do aterro esteja distante pelo menos 1,50 metros do lençol freático, com medição do nível do lençol freático na época de maior precipitação pluviométrica da região.

Outro fator a ser observado na construção dos aterros, é o isolamento da área e presença de sinalização. Este tipo de empreendimento deve apresentar cercamento que impeça o acesso de pessoas estranhas e animais, portão para controle do acesso, além de sinalização nas entradas e no cercamento contendo dizeres como: "Perigo – Não entre" (ABNT, 1987).

Diferentemente dos aterros sanitários, no aterro de resíduos perigosos é necessário monitorar as características físicas e químicas dos resíduos recebidos porque, neste tipo de aterro, os resíduos podem apresentar incompatibilidades entre si, podendo ocorrer acidentes no interior da gleba. Para isso, cria-se um plano rotineiro de amostragem e análise dos resíduos, seguindo os padrões presentes na norma ABNT 10.007/2004. No plano estará descrito os parâmetros a serem analisados, com justificativa para cada um, os métodos de análise utilizados, a

frequência de análise, as características de periculosidade, entre outras informações que se fizerem necessárias.

De modo a aumentar a proteção dos corpos hídricos próximos, assim como a segurança dos trabalhadores na área do aterro, é necessário a criação de um plano de emergências. Este plano irá auxiliar os trabalhadores caso ocorram situações indesejáveis, como explosões, derramamento ou vazamento de substâncias perigosas no ar, no solo ou águas superficiais, que possam causar prejuízos ao meio ambiente ou à saúde humana. Conhecendo os possíveis acidentes, no plano será descrita a sequência de procedimentos a serem adotados em tais situações, indicando plano de ações, pessoas que atuarão como coordenadores, e equipamentos a serem utilizados (ABNT, 1987).

Na norma também é descrito que estes aterros não devem receber resíduos com menos de 15% de sólidos em células, por não suportarem cobertura, a menos que tal disposição seja estudada, com o objetivo de evitar o extravasamento do aterro ou a geração excessiva de líquidos percolados. Por isso, caso se intencione destinar líquidos perigosos a aterros Classe I, é necessário que esses passem por processos de “solidificação/encapsulamento”, ou similares.

3.1.1. Plano de encerramento de aterros de resíduos

O fechamento de aterros de resíduos perigosos deve ser previsto em um plano de encerramento, semelhantemente aos aterros sanitários, já durante o projeto inicial do aterro, de forma a direcionar a operação do empreendimento ao estado final desejado para a área.

Dessa forma, tanto a norma ABNT NBR 13.896/97 quanto a norma ABNT NBR 10.157/87, estabelecem as seguintes condições para o plano de encerramento:

- Definição dos métodos e das etapas a serem seguidas no fechamento total ou parcial do aterro;
- Projeto de construção da cobertura final, de forma a minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão e acomodar assentamento sem fratura;
- Indicação d data aproximada para o início das atividades de encerramento;
- Estimativa dos tipos e da quantidade de resíduos que estarão presentes no aterro, quando encerrado;

- Usos programados para a área do aterro após seu fechamento;
- Provisão dos recursos financeiros necessários para a execução das tarefas previstas no plano de encerramento.

É necessário, também, que o empreendedor saiba o que deve monitorar ao término das atividades do aterro. O monitoramento das águas subterrâneas deve ser realizado até o término da geração de líquido percolado. A cobertura final disposta, de modo a impermeabilizar toda a massa de resíduos, deve ser monitorada para prevenção de rachaduras ou erosões. E a manutenção do isolamento local também se faz necessária, de modo a evitar acidentes com pessoas e animais na área (ABNT, 1987).

3.2. Geossintéticos

Os geossintéticos tiveram maior uso após a década de 1970, com o surgimento de diferentes aplicações para estes materiais (DUARTE, 2009). O termo geossintético foi utilizado para dar uma definição mais genérica a estes materiais. Conforme informado por Koerner (2005), a palavra *Geo* faz referência à terra, e a palavra *sintético* vem devido à sua fabricação ser feita pelo homem.

Segundo Aguiar, Vertematti (2015), as classificações dos geossintéticos variam de acordo com cada país e alguns destes, por sua vez, não foram nem mesmo definidos ou classificados devido ao surgimento recente. Alguns autores que tratam do tema nem sempre separam os geossintéticos nas mesmas categorias. Neste trabalho, estes materiais serão divididos em: geogrelhas, georredes, geotêxteis, geomembranas, geocomposto bentonítico, geocélulas e *biologs*. Optou-se por esta forma de organização em função da relevância que cada tipo de geossintético se mostrou para o autor e para o trabalho em questão.

No fechamento do aterro, pode ser feito o uso de materiais geossintéticos para a impermeabilização da camada superior, especialmente as geomembranas. O uso das geomembranas é também comum na impermeabilização da base dos aterros.

A impermeabilização da camada superior pode ser observada não só em aterros de resíduos perigosos, mas também em aterros sanitários, quando for desejada sua aplicação. Um exemplo é o aterro sanitário de Vall d'en Joan, localizado próximo ao município de Barcelona, onde foram utilizadas na cobertura final, sequencialmente: 20 cm de solo compactado, 20 cm de brita de granito para

drenagem dos gases, lâmina geotêxtil, geomembrana PEAD, 20 cm de brita de calcário para escoamento da água pluvial, outra lâmina geotêxtil, solo sem compactação para realização do plantio (EMA, 2007). Como pode ser observado na Figura 1, o aterro de Vall d'en Joan não apresenta elevadas declividades, fator que pode ter contribuído para a aderência dos materiais posteriores à geomembrana PEAD.

Figura 1 – Mantas PEAD e posterior revegetação no aterro sanitário de Vall d'en Joan.



Fonte: EMA, 2007.

3.2.1. Geogrelhas

As geogrelhas são geossintéticos utilizados em obras de geotecnia e de proteção ambiental, muito comuns para a função de reforço, para aumentar a interação entre os materiais, proporcionando maiores ângulos de atrito entre os materiais. Estes materiais podem ser utilizados para conter o solo da cobertura de taludes inclinados, sendo aplicadas tanto por cima quanto por baixo da geomembrana (KOERNER, 2005; DUARTE, 2009).

Após a aplicação, os materiais são cobertos pelo solo da camada final, com o auxílio de equipamentos. Por isso, é importante prever acesso à área já no plano de encerramento do aterro. Como ilustração deste processo, ver a Figura 2 a seguir.

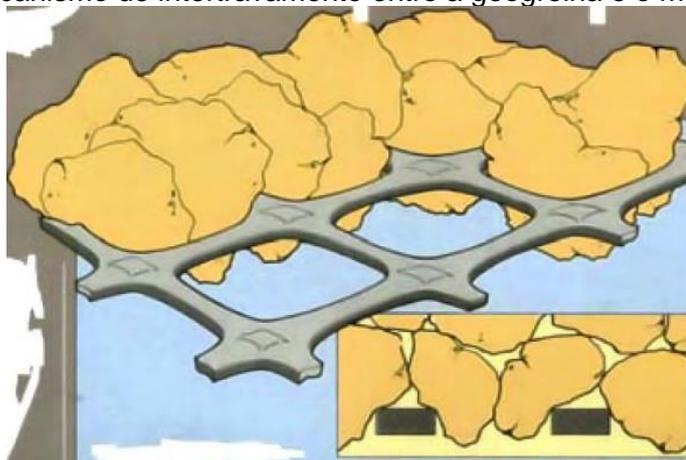
Figura 2 – Revegetação de talude em aterro de resíduos.



Fonte: Duarte, 2009.

O mecanismo de funcionamento da geogrelha se dá por meio das malhas longitudinais, das malhas transversais e dos nós. A abertura do material permite que as partículas de solo se fixem na malha, passando a tração para os elementos transversais, que transferem a carga para os elementos longitudinais, através dos nós. Esse mecanismo é denominado de intertravamento, segundo Duarte (2009), e seu funcionamento é ilustrado na Figura 3. As especificações técnicas da geogrelha podem ser observadas nas fichas técnicas dos fabricantes, permitindo assim a escolha do material mais adequado para as exigências do projeto.

Figura 3 – Mecanismo de intertravamento entre a geogrelha e o material granular.

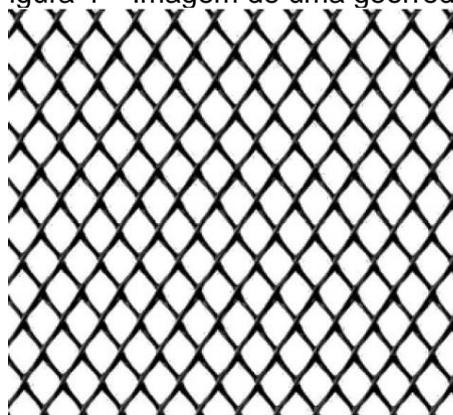


Fonte: Duarte, 2009.

3.2.2. Georredes e Geocompostos Drenantes

As georredes (Figura 4) são similares às geogrelhas em sua aparência, porém estas apresentam como finalidade principal, a drenagem. São compostas por material PEAD e podem substituir os drenos naturais compostos por brita ou areia. Já o geocomposto drenante é uma combinação de uma georrede com um geotêxtil. Esta combinação possibilita a junção de características de diferentes geossintéticos, proporcionando, além da drenagem, um aumento na resistência entre os geossintéticos quando aplicados em taludes. Embora sejam capazes de exercer diferentes finalidades, estes geossintéticos são mais indicados para drenagem de lixiviados, águas pluviais ou de gases (KOERNER, 2005; DUARTE, 2009).

Figura 4 – Imagem de uma georrede.



Fonte: Duarte, 2009.

Dentre as vantagens apresentadas pelo uso destes geossintéticos está o maior aproveitamento do espaço do aterro, uma vez que estes materiais possuem espessura muito menor que as camadas de drenos naturais. Este tipo de configuração de aterro apresenta menor tempo de execução da drenagem, e possui menores custos em relação aos drenos convencionais. Na Figura 5, são mostradas diferentes vantagens na aplicação destes geossintéticos, a destacar o ganho no espaço de armazenamento de resíduos. Na parte esquerda da figura, observa-se a utilização de cascalho para drenagem das águas pluviais, dos gases e dos lixiviados. Já na parte direita da figura, é mostrada a utilização de geogrelha juntamente com o geocomposto drenante para realização dos drenos.

Figura 5 – Comparação do aterro convencional x com uso de geossintéticos.

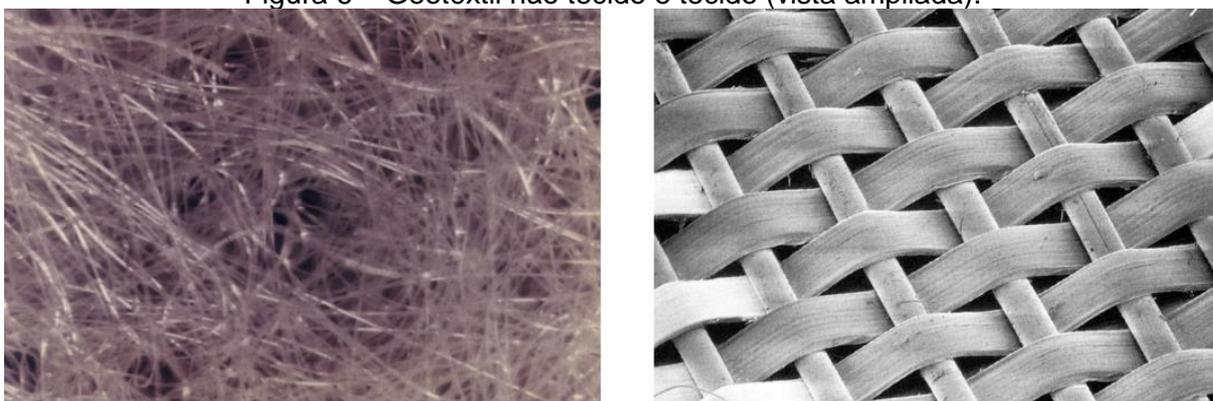


Fonte: Duarte, 2009.

3.2.3. Geotêxteis

Os geotêxteis diferem-se dos demais geossintéticos devido à sua estrutura. São constituídos por fibras e classificados em dois grandes grupos: os geotêxteis não tecidos e os geotêxteis tecidos (Figura 6). Os geotêxteis não tecidos possuem as fibras orientadas direcional ou aleatoriamente, ligadas a uma estrutura plana, já os tecidos possuem os filamentos entrelaçados geralmente em ângulo reto. (DUARTE, 2009).

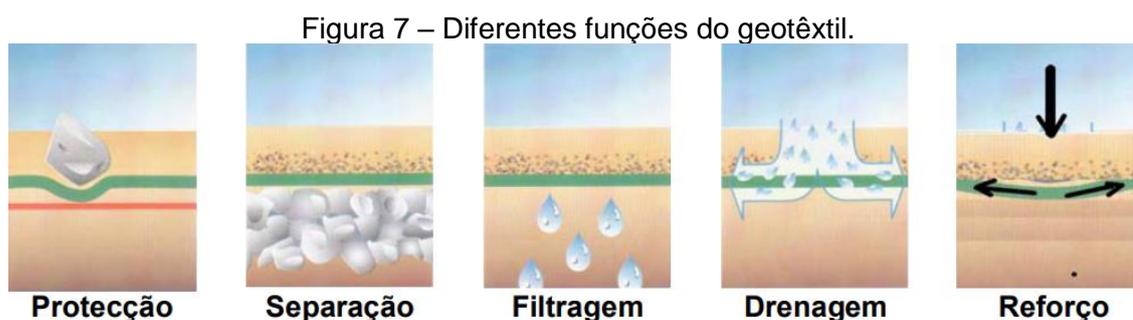
Figura 6 – Geotêxtil não tecido e tecido (vista ampliada).



Fonte: Gourc, Palmeira, 2019

Estes materiais apresentam uma variedade de aplicações, como, por exemplo, proteção para outro material, separação entre camadas, filtragem, drenagem ou reforço (Figura 7), sendo assim um material com aplicabilidade bastante ampla. Os geotêxteis podem exercer não somente proteção mecânica para outras camadas, mas também contra raios ultravioletas, protegendo outros materiais

da exposição prolongada aos raios solares. Uma vez respeitadas as características técnicas de projeto, o geotêxtil pode ser utilizado como reforço, melhorando as condições de estabilidade do sistema. Estas condições devem ser analisadas juntamente com a ficha técnica do material, fornecida pelo fabricante (KOERNER, 2005; DUARTE, 2009).



Fonte: Duarte, 2009.

3.2.4. Geomembrana

As geomembranas, que também recebem o nome de barreiras impermeabilizantes, porém o primeiro nome é mais conhecido, são um dos geossintéticos mais utilizados nas obras de aterros sanitários ou aterros de resíduos perigosos. A ampla utilização deste material está ligada à sua grande variedade de características. Existe mais de um tipo de geomembrana, como as de material PVC, mas a mais utilizada na impermeabilização é constituída de polietileno de alta densidade (PEAD) (VILAR; BUENO; BENVENUTO, 2015; DUARTE, 2009).

O PEAD possui algumas características como a baixa taxa de permeabilidade, resistência a raios ultravioletas, atoxicidade, e resistência a ataques de microorganismos, bactérias ou roedores. A geomembrana não é totalmente impermeável, mas devido à sua baixíssima permeabilidade (na ordem de 1×10^{-11} m/s a 1×10^{-14} cm/s), o material é tratado como impermeável. Além disso, o PEAD é insolúvel em todos os solventes orgânicos e inorgânicos, sendo apenas afetado por oxidantes muito fortes. O PEAD pode ser utilizado para revestimento ou isolamento, possui flexibilidade, resistência à corrosão e abrasão, resistência química, resistência mecânica, boa soldabilidade e longa vida útil, conseguindo destaque sobre outros tipos de geomembranas (KOERNER, 2005; DUARTE, 2009).

Como ilustrado pela Figura 8, a geomembrana PEAD pode apresentar diferentes espessuras e texturas, variando de 1,0 mm a 2,5 mm, com texturas lisas, ou rugosas, a depender da sua finalidade.

Figura 8 – Diferentes modelos de geomembranas PEAD.



Fonte: Duarte, 2009.

A superfície que recebe a geomembrana deve ser preparada previamente, para evitar problemas na funcionalidade da mesma. Alguns dos cuidados a serem tomados na preparação da superfície é o terreno estar liso e livre de objetos pontiagudos, pedras de diâmetros maiores que 10 mm devem ser evitadas nos últimos 15 cm de solo de apoio e evitar mudanças abruptas no nivelamento, principalmente se o sistema de cobertura for constituído também por argila (DUARTE, 2009).

A colocação da geomembrana no terreno também deve seguir as formas corretas de execução, evitando assim possíveis acidentes de trabalho ou prejuízos na funcionalidade da camada. A Figura 9 apresenta um método correto de colocação da geomembrana, com auxílio de equipamento. Após disposta no terreno, o material é ajustado, soldado e ancorado, de modo a formar uma contínua camada de proteção. A geomembrana é usualmente ancorada ao terreno por valas, cobertas por solo e sacos de areia.

Figura 9 – Colocação de geomembrana em talude.



Fonte: Adaptado de Duarte, 2009.

3.2.5. Geocomposto Bentonítico

O geocomposto bentonítico (Figura 10) é um geossintético que começou a ser utilizado no ano de 1988 nos Estados Unidos. A principal função deste material é servir como barreira hidráulica, auxiliando na impermeabilização. Sendo assim, este geocomposto é comumente utilizado em substituição à camada de argila compactada, que tem a finalidade de exercer a mesma função. A bentonite, quando em contato com a água, expande-se, formando uma camada de baixa permeabilidade. Para a escolha de um geocomposto bentonítico, é necessário a consideração de alguns fatores, como a resistência mecânica do material durante a colocação em obra, a estabilidade e as cargas que estarão sob os taludes, pois este geossintético não possui a finalidade de absorver tensões, podendo as mesmas prejudicarem o funcionamento da impermeabilização (KOERNER, 2005; DUARTE, 2009).

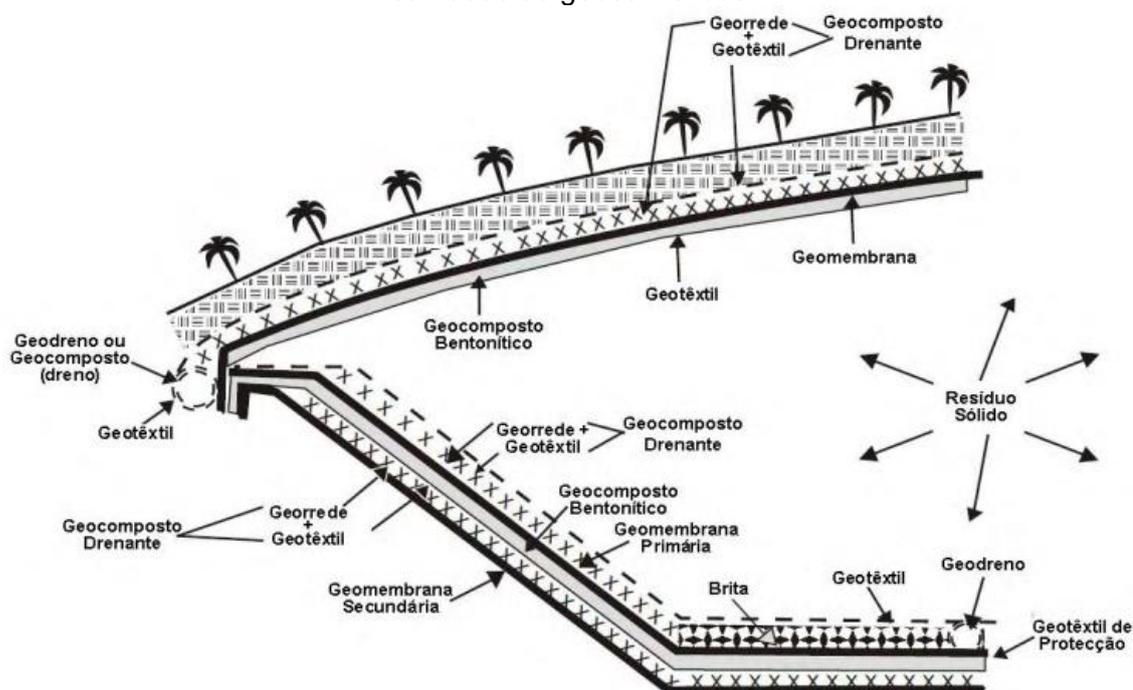
Figura 10 – Geocomposto bentonítico, com argila bentonítica entre dois geotêxteis.



Fonte: Duarte, 2009.

Para exemplificar a utilização deste geossintético, a Figura 11 traz um esquema da aplicação deste material juntamente com outras camadas de geossintéticos. Neste sistema de cobertura, o geotêxtil exerce a função de proteção e separação, seguida do geocomposto bentonítico, que substitui a camada de argila compactada, de modo a contribuir, juntamente com a geomembrana, para o processo de impermeabilização. Logo em seguida, é adicionado um geocomposto drenante para conduzir as águas pluviais. Em relação à argila compactada, o geocomposto bentonítico apresenta algumas vantagens, como não estar susceptível a trincas, conforme acontece com a argila na presença de recalques. Também não causa dano ambiental na extração de argila das jazidas e aumenta a capacidade de deposição de resíduos no aterro, uma vez que a camada com o geossintético ocupa um espaço inferior à da argila, devido sua espessura.

Figura 11 – Exemplo de aplicação do geocomposto bentonítico, juntamente com outras camadas de geossintéticos.



Fonte: Duarte, 2009.

3.2.6. Geocélulas

A geocélula é um geossintético tridimensional em forma de colmeia, feito de polietileno de alta densidade (PEAD), que pode ser tanto lisa quanto texturizada, e com ou sem perfuração nas paredes das células. No mercado são fornecidas com as células fechadas, ocupando pouco espaço, e no momento da instalação são expandidas na superfície (GEOACADEMY, 2019).

A geocélula pode ser utilizada para diferentes finalidades na engenharia, como por exemplo o revestimento de canais e a proteção e controle à erosão. Além disso, pode ser preenchida por mais de um tipo de material. Nos casos de proteção e controle à erosão, é comum preencher a geocélula com solo e vegetação, areia ou material granular, cascalho, brita ou concreto, a depender da finalidade e condições locais (GEOACADEMY, 2019).

No momento da instalação, este geossintético pode ser fixado de três formas diferentes: trincheiras de ancoragem, grampos de ancoragem e cabos de ancoragem, sendo possível a aplicação de apenas uma forma ou uma combinação de ancoragens, caso necessário. As trincheiras e os cabos de ancoragem apresentam vantagem em relação aos grampos em situações em que não é possível a perfuração, como nos apoios em rochas ou sobre geomembranas

impermeabilizantes. A Figura 12 ilustra um exemplo da aplicação de uma geocélula sobre um talude utilizando cabos de ancoragem.

Figura 12 – Aplicação de geocélula em talude, com cabos de ancoragem entre as células.



Fonte: Geoacademy, 2019.

Koerner (2005) acrescenta também que as geocélulas aumentam bastante a capacidade de força de cisalhamento do solo, o que pode ser muito útil em situações de escorregamento do solo. As geocélulas vêm sendo usadas para a construção de paredes vivas e solução de problemas na estabilidade de taludes. Ainda segundo o mesmo autor, as geocélulas, em sua maioria, apresentam altura de 10 cm, com espessura de 1,2 mm, e quando expandida adquirem tamanhos de 5 m de largura e 10 m em comprimento.

3.2.7. Biologs

Segundo Marques, Geroto (2015), os *biologs* são um tipo de geossintético temporário. Possuem forma cilíndrica, preenchidos por materiais degradáveis (palha ou fibras) e por isso são considerados temporários. Ao serem dispostos na horizontal e escorados por estacadas cravadas no terreno, formam diques de retenção.

Sua composição é geralmente de fibras vegetais prensadas e envolvidos por uma rede de polipropileno. Esta é uma técnica de retenção de sedimentos, já utilizada em diversos países. Devido à sua capacidade de reter o carreamento de sólidos, os *biologs* melhoram as condições de geometria do talude, possibilitando a suavização da inclinação no mesmo. Esta mudança de declividade também proporciona outras vantagens, como a diminuição da velocidade de escoamento e, com isso, maiores estabilidades (COUTO et al., 2010).

Este geossintético possui diferentes comprimentos e diâmetros, como pode ser verificado na Figura 13. É um material com boa resistência e alta capacidade de drenagem, sendo capaz de absorver uma quantidade de água equivalente a cinco vezes o seu peso. A aplicação desta técnica deve ser acompanhada por um profissional especializado, que indicará as posições mais adequadas para a colocação dos retentores de sedimentos. Embora seja uma técnica para contenção dos sedimentos, melhorando as condições para o crescimento de vegetação, Couto et al. (2010) indicam que sua aplicação deve ser feita em locais de menores declividades e baixo fluxo de sedimentos.

Figura 13 – Diferentes tipos de retentor de sedimentos (*biologs*).



Fonte: Couto et al., 2010.

A fixação do retentor de sedimentos é feita no sentido transversal à declividade do talude, sendo fixado por meio de estacas de madeira ou de aço. Como exposto por Couto et al., (2010), esta técnica pode ser aprimorada com a aplicação do capim Vetiver (*Vertivera zizanoides*), devido à grande vantagem que este vegetal apresenta no que tange à estabilidade de superfícies inclinadas (Figura 14).

Figura 14 – Combinação de *biologs* com capim-Vetiver para retenção de sedimentos.



Fonte: Couto et al., 2010.

3.3. Propriedades do solo e estabilidade de taludes

Segundo Caputo, Caputo e Rodrigues (2015, v. 1), o solo pode ser definido como “um material constituído por um conjunto de partículas sólidas, deixando entre si vazios que poderão estar parcial ou totalmente preenchidos pela água. É, pois, no caso mais geral, um sistema disperso formado por três fases: sólida, líquida e gasosa.”

Portanto, as relações entre os três constituintes do solo é que determinam as propriedades fundamentais deste material. Cada parte do solo terá um valor em peso e volume que fornecerão índices muito importantes para o estudo dos mesmos.

3.3.1. Peso Específico e Teor de Umidade

A relação entre o peso e o volume também fornece um parâmetro muito utilizado, o peso específico. Por definição, o peso específico é o peso da substância sólida por unidade de volume. Este parâmetro é muito utilizado na definição de outras propriedades do solo (CAPUTO; CAPUTO; RODRIGUES, 2015, v. 1). Como a determinação do peso específico pode ser realizada em campo, este parâmetro também é chamado peso específico aparente do solo, ou peso específico aparente do solo seco, caso o teor de umidade seja igual a zero.

O teor de umidade de um solo é o peso da água contida no solo sobre o peso do mesmo solo seco, geralmente expresso em porcentagem. Para a determinação

deste parâmetro no laboratório, basta pesar a amostra de solo úmida, procurando não perder umidade por evaporação. Depois seca-se a amostra em uma estufa a 105°C ou 110°C. O peso da água contida na amostra será a subtração do peso natural da amostra pelo peso da amostra seca (CAPUTO; CAPUTO; RODRIGUES, 2015, v. 1).

3.3.2. Coesão e Ângulo de Atrito

Outros dois parâmetros que interferem bastante na estabilidade de taludes são a coesão e o ângulo de atrito. O ângulo de atrito do solo é proveniente do atrito interno das partículas. No solo, o contato entre as partículas acontece devido a infinitos contatos pontuais. Estes pequenos contatos proporcionam o atrito físico e o entrosamento das partículas entre si (CAPUTO; CAPUTO; RODRIGUES, 2015, v. 1). Quanto maior esse atrito e entrosamento, maior será a capacidade do solo se manter estável.

A coesão, por sua vez, acontece devido à pressão da água contida no solo, que age como uma pressão externa, e também devido às atrações eletroquímicas das partículas que constituem o solo (CAPUTO; CAPUTO; RODRIGUES, 2015, v. 1). Portanto, quanto maior este parâmetro, maior também será a capacidade de manter o solo estável.

Segundo Caputo, Caputo e Rodrigues (2015, v. 2), a mistura do solo com cimento é uma das formas para melhorar a estabilização do solo. A mistura pode ocorrer com adição de outros tipos de solos (estabilização mecânica), ou com adição de substâncias químicas, como o cimento, a cal, ou produtos betuminosos (estabilização por adição de aglutinantes).

Em alguns casos pode acontecer da coesão ser igual a zero, como no caso de solos arenosos. Assim, a resistência ao cisalhamento dependerá apenas das condições de atrito do material. Nesses casos extremos, o deslizamento de uma massa pode acontecer tão logo o ângulo de inclinação do plano de apoio superar o ângulo de atrito. Porém, quando há coesão no material, seu estudo se faz muito importante, devido à grande influência nos cálculos de estabilidade e resultados do coeficiente de segurança (GUIDICINI E NIEBLE, 1983).

Ambos os parâmetros coesão e ângulo de atrito não se configuram como constantes de um material, uma vez que estes parâmetros dependem das particularidades de cada solo. Portanto, existe uma variação no valor dos

parâmetros para cada solo. Por isso é importante a determinação dos mesmos, de modo a representar as condições reais do solo estudado (CAPUTO; CAPUTO; RODRIGUES, 2015, v. 1).

Hoek e Bray (1981), citados por Guidicini e Nieble (1983), mostram uma tabela contendo os valores típicos para o peso específico, ângulo de atrito e coesão de alguns materiais, obtidos através de ensaios de cisalhamento. A variação nos valores desses parâmetros pode ser verificada pela Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Valores típicos de peso específico, ângulo de atrito e coesão obtidos a partir de ensaios de cisalhamento em diversos tipos de solo.

PROPRIEDADES TÍPICAS DE SOLOS							
			PESO ESPECÍFICO	ÂNGULO DE ATRITO			COESÃO
TIPO		MATERIAL	g/cm ³	MATERIAL	GRAU	MATERIAL	kg/cm ³
NÃO COESIVO	AREIA	Grossa seca	1,44	Compacto, bem graduado, uniforme	40-45		
		Fina seca	1,60				
		Úmida	1,84	Uniforme, graúda, areia fina ou solta	35-40		
		Muito úmida	1,92	Areia solta, bem graduada Areia fina seca	35-40 30-35		
COESIVO	ARGILA	Seca	1,76	Bloco de argila seca	30	Bloco de argila muito rijo	1,75
		Úmida	1,84	Bloco de argila úmida	40		
		Molhada	1,92	Argila rija	10-20		1,50
		Marga arenosa	1,60	Argila mole	5-7	Argilito rijo	1,00
		Marga	1,76	Preenchimento argiloso	10-20	Argila rija	0,50
		Com pedregulho	2,00	Material calcítico de zona de cisalhamento Material de falha em folhelho	20-27 14-22	Argila média	
	COBERTURA	Solo superficial	1,36	Solo de cobertura	30-35	Solo de cobertura	0,05
		Solo seco	1,44				0,50
		Solo úmido	1,60				
		Solo molhado	1,68				

Fonte: Adaptado de Guidicini e Nieble, 1983.

3.3.3. Análise de estabilidade do solo

A resistência ao cisalhamento está em função dos parâmetros coesão e ângulo de atrito, e por isso os mesmos exercem importante influência na estabilidade dos materiais. A resistência ao cisalhamento de um solo é a propriedade capaz de segurar as cargas exercidas no solo, proporcionando assim as

análises de estabilidade. Segundo Caputo, Caputo e Rodrigues (2015), este não é um parâmetro simples de se medir.

Para a análise de estabilidade, em geral, tanto em taludes naturais quanto construídos, a mesma se faz comparando as tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento. Assim é possível medir o fator de segurança (Equação 1). O Fator de Segurança (FS) maior que 1 significa uma obra estável, igual a 1 é o momento onde ocorre a ruptura, e o resultado menor que 1 não tem um significado físico (GERSCOVICH, 2012).

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo,

FS = Fator de Segurança

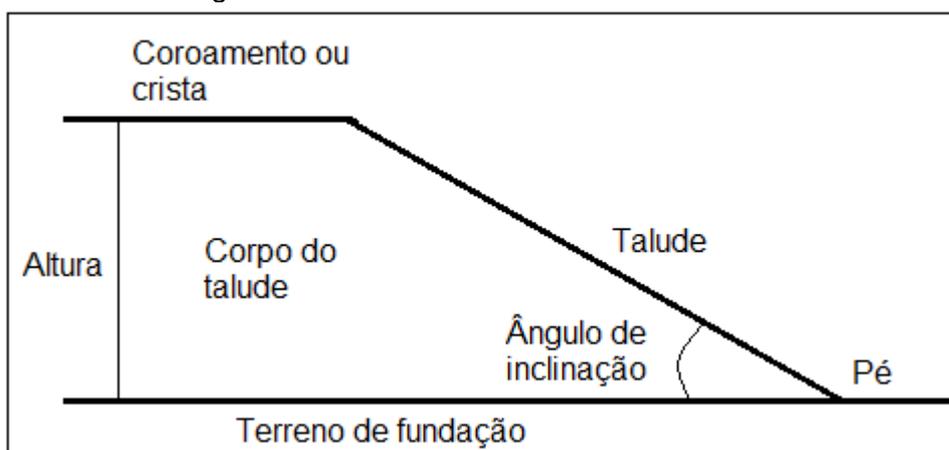
τ_f = resistência ao cisalhamento ou forças de resistência

τ_{mob} = tensões cisalhantes mobilizadas ou forças condutoras

As forças de resistência estarão em função basicamente do ângulo de atrito entre os materiais, já as forças condutoras para o escorregamento estão em função principalmente do ângulo do talude (KOERNER, 2005).

A análise de estabilidade possui grande aplicação para obras envolvendo taludes. Caputo, Caputo e Rodrigues (2015, v. 2) definem os taludes como “quaisquer superfícies inclinadas que limitam um maciço de terra, de rocha ou de terra e rocha. Podem ser naturais, caso das encostas, ou artificiais, como os taludes de corte e aterros.”. A Figura 15 apresenta uma ilustração de um talude com os principais termos usados.

Figura 15 – Talude e elementos constituintes.



Fonte: Adaptado de Caputo, Caputo, Rodrigues, 2015.

As causas do movimento nos taludes podem ser tanto devido ao aumento de cargas (causas externas), ou à diminuição da resistência ao cisalhamento (causas internas). Chuvas intensas, por exemplo, podem afetar a estabilidade dos taludes, uma vez que a água aumenta o peso específico do solo, aumentando a carga realizada sobre o talude, além do excesso de umidade reduzir a resistência ao cisalhamento. Outra causa destacada por Caputo, Caputo e Rodrigues (2015) é a realização de escavações próximas ao pé do talude.

O aumento da solicitação de cargas sobre o talude pode ainda vir por causa do acúmulo de material, do peso da vegetação ou construção de estruturas sobre o mesmo. O aumento também pode ser provocado devido a terremotos, explosões, tráfego ou sismos induzidos. Já a diminuição da resistência pode acontecer devido a características inerentes ao material presente no talude como a textura, ou como as propriedades geomecânicas do material. A redução na coesão, no ângulo de atrito dos materiais e o intemperismo também podem afetar negativamente a resistência (VARNES, 1978 apud CAPUTO; CAPUTO; RODRIGUES, 2015, v. 2).

3.4. Atrito de interface entre solos e geossintéticos

Para a vegetação ser disposta na cobertura final do aterro, primeiramente é necessário que este esteja preenchido pelo solo de cobertura. O solo é que irá fornecer à vegetação a base e os nutrientes para o desenvolvimento das espécies. Porém, determinados tipos de geossintéticos colocados na camada superior podem dificultar a estabilização do solo, devido à interação entre essas camadas.

A interação entre os solos e os geossintéticos já foi estudada por diferentes autores, buscando compreender os fatores que interferem nesta interação, assim como os possíveis ângulos de aplicação desses materiais em planos inclinados. Uma vez que os geossintéticos podem ser utilizados em condições adversas à estabilidade, como taludes íngremes, ou revestimento de canais, o estudo da interação destes materiais com outros, colocados sobre ou sob os geossintéticos, fez-se necessário ao longo do tempo.

Segundo Meggyes (2007), a estabilidade e o atrito entre a geomembrana e as camadas posteriores em taludes é um fator crucial. O autor aponta a importância do uso de geomembranas texturizadas na superfície nestes casos, uma vez que apresentam um bom comportamento de estabilidade.

A interação de diferentes materiais com a geomembrana é importante não só para os materiais colocados posteriormente. Alguns acidentes podem ocorrer também nas camadas anteriores à barreira impermeabilizante. Como os recalques dos resíduos depositados ou do solo de fundação. Porém este tipo de relação com o geossintético é diferente da ruptura pela interface. Os problemas envolvendo a ruptura da geomembrana devido aos recalques são geralmente analisados por análises de estabilidade de taludes, já os problemas envolvendo os atritos na interface podem também ser analisados por testes laboratoriais, como o ensaio de cisalhamento direto, o ensaio de plano inclinado, o ensaio de arrancamento e o ensaio de *ring shear* (VILAR; BUENO; BENVENUTO, 2015; REBELO, 2003). Alguns destes testes são padronizados pela ABNT NBR ISO 12.957.

Apesar de a geomembrana receber esforços tanto internos quanto externos, estes últimos precisam de certo destaque, uma vez que irão aparecer apenas nos casos de barreiras impermeabilizantes na cobertura. Alguns problemas envolvendo a geomembrana na cobertura de aterros são os ciclos de umedecimento e secagem, as pressões de gás resultantes da decomposição do resíduos (quando há presença de matéria orgânica), as erosões por ação da chuva e dos ventos, a ação de animais roedores, a ação de raízes e não menos importante os deslizamentos do solo de cobertura. Portanto, isso faz com que a aplicação da barreira impermeabilizante na cobertura seja mais complexa que sua aplicação nas bases dos aterros (VILAR; BUENO; BENVENUTO, 2015).

Como já citado, muitos estudos envolvendo o atrito de interface entre diferentes materiais e as geomembranas têm sido realizados, devido ao crescimento

do uso dos geossintéticos. Portanto, os resultados de parâmetros como o ângulo de atrito são diferentes de um trabalho para o outro. Isso acontece porque os equipamentos de laboratório podem variar, além dos tipos de solo e geomembranas também variarem entre si. Vilar, Bueno e Benvenuto (2015) apresentam uma tabela com a variação de ângulos de atrito na interface entre solos com geossintéticos e geossintéticos com outros tipos de geossintéticos, que pode ser visualizada na Tabela 2 a seguir. É importante notar que esta variação acontece devido à especificidade de cada material utilizado, portanto, é de grande importância a realização de testes que retratem o mais fielmente possível as condições reais de projeto.

Tabela 2 – Faixas de variação de ângulos de atrito de interface (em graus) entre solos, geossintéticos e geomembranas.

Material	Areais	Argilas	PVC	PEAD lisa	PEAD texturizada	Georrede
Geomembrana PVC	20 – 30	6 – 15	-	-	-	-
Geomembrana lisa PEAD	17 – 25	5 – 10	-	-	-	-
Geomembrana texturizada PEAD	30 – 40	9 – 15	-	-	-	-
Geotêxtil tecido	23 – 42	16 – 26	10 – 28	7 – 11	9 – 17	9 – 18
Geotêxtil não tecido agulhado	25 – 44	15 – 28	16 – 26	8 – 12	15 – 33	10 – 27
Georrede	-	-	11 – 24	5 – 19	7 – 25	-

Fonte: Adaptado de Vilar, Bueno e Benvenuto, 2015.

Na Tabela 2, chama-se a atenção os valores superiores entre a geomembrana PVC para a geomembrana lisa, mostrando um melhor desempenho deste tipo de barreira sobre o PEAD liso. Já o PEAD texturizado também apresenta destaque com bons ângulos de atrito com a areia. Os geotêxteis chamam a atenção pelos altos intervalos apresentados, e baixa aderência com o PEAD liso.

Rebelo (2003) explica que os maiores ângulos de atrito da geomembrana texturizada com materiais de granulometria fina acontece porque os grãos de areia

interagem melhor com a face texturizada da geomembrana, devido à altura texturizada e o tamanho dos grãos. Esse entrosamento já não acontece tão bem com partículas maiores, de granulometria grossa, apresentando características similares com geomembranas lisas e rugosas, pois estes tendem a deslizar sobre a textura.

Segundo Vilar, Bueno e Benvenuto (2015), apesar dos possíveis problemas envolvendo a utilização das geomembranas, estas também têm casos de sucesso, e os fabricantes destes materiais podem ajudar a elaborar soluções, quando estes problemas se fizerem presente, como nos casos de deslizamento do solo de cobertura.

A instabilidade do solo sobre a geomembrana também é discutida por Koerner (2005). Segundo o autor, o solo de cobertura tem a tendência de escorregar para o pé do talude, deixando parte da barreira impermeabilizante exposta. Uma forma de análise nestes casos é pelas condições de equilíbrio-limite, isto é, a análise do Fator de Segurança (FS).

Como o cálculo do Fator de Segurança depende, principalmente, da inclinação do talude e do ângulo de atrito (δ) entre o solo e o geossintético, percebe-se que a variável a ser descoberta será o δ . Pois o FS é previamente selecionado e a inclinação do talude normalmente já é conhecida. Uma vez que o ângulo de atrito depende do geossintético e do solo e, geralmente, o tipo de geomembrana já se encontra selecionada, sobram apenas a qualidade do solo a ser utilizado ou a possibilidade de texturizar a geomembrana como últimas variáveis (KOERNER, 2005).

Segundo o mesmo autor, o parâmetro mais crítico da análise é, portanto, o ângulo de atrito (δ) entre os materiais, que precisa ser definido da forma mais próxima da realidade, isto é, das condições reais do projeto, através de um ensaio de cisalhamento, por exemplo.

Para aumentar os valores de FS na análise existem duas formas bastante comuns, que é a colocação de uma geogrelha ou de um geotêxtil como reforço para o solo. Para tanto, a geogrelha é colocada sobre a geomembrana e o preenchimento do solo é feito do pé para a crista do talude. Assim que o solo é colocado, a geogrelha ou geotêxtil serão tensionados e, a depender do reforço realizado, a força do solo devido à ação da gravidade é segurada. O preenchimento do solo precisa

ser feito por um equipamento leve, para evitar sobrecargas na geomembrana (KOERNER, 2005).

Uma outra forma de adquirir a estabilidade no talude, segundo Koerner (2005), é o preenchimento do solo de modo que este fique com a camada mais grossa no pé do talude e diminua a espessura gradualmente até o topo, adquirindo uma forma cônica. Porém, esta alternativa só é possível caso haja espaço para a ampliação no pé do talude. Em muitos casos isto não acontece, ou não é vantajoso a perda de espaço. Para tanto, restam apenas os reforços por geossintéticos como uma alternativa de solução.

3.5. Estudo de caso: Fechamento de Aterro Classe 1 com utilização de geossintéticos

Na cidade de Cariacica (ES), foi encerrado um aterro classe I, que era utilizado para o aterramento de pó de aciaria e resíduos de processos de alto forno. A área do aterro era de aproximadamente 4.800 m².

De modo a aumentar a vida útil do aterro, foi construído um muro perimetral de concreto armado, aumentando a capacidade do aterro para 26.000 m³. Quando atingido o limite de capacidade, era necessário o retorno da área ao meio ambiente. Um dos desafios enfrentados durante o fechamento foi o muro de concreto construído, que interferia na estética do local. Para a solução deste problema, a empresa apresentou duas alternativas. Uma era a retirada do muro e conseqüentemente a retirada de parte do material aterrado, para realização da revegetação. A outra solução incluía o muro de concreto no completo fechamento com solo e vegetação. Porém, para esta segunda alternativa, seria necessária a utilização de uma segunda contenção para o solo de cobertura, com uso de geossintéticos.

Este projeto de encerramento de aterro, apresentado pela empresa TDM Brasil, consistia em duas partes: enclausurar a área onde se encontravam os resíduos classe I, e de construir uma segunda contenção por meio de geossintéticos, para segurar o solo que recobriria o muro.

O enclausuramento da área onde se encontravam os resíduos foi feito com a utilização de diferentes geossintéticos. Primeiramente, colocou-se acima dos resíduos uma camada de geotêxtil não tecido, de modo a proteger as outras camadas de possíveis resíduos pontiagudos. Acima do geotêxtil não tecido foi

colocada a geomembrana PEAD e, logo após, uma camada de geocomposto drenante. Acima dos geossintéticos colocou-se uma camada de 40 cm de solo, para proteção e estabelecimento da vegetação (CARESSATO JUNIOR; PANTA, 2018).

Para o recobrimento total da área aterrada com solo, incluindo o muro, foi feita uma segunda contenção perimetral, por meio de geogrelhas unidirecionais poliméricas. Essa segunda contenção, também chamada pelos autores de 'novo muro', permitiu uma estrutura de arrimo capaz de suportar as tensões geradas pelo solo de cobertura. Além da geogrelha, a segunda contenção ainda contava com uso de geocélulas, que permitiam o armazenamento de solo e sementes, facilitando o processo revegetativo (CARESSATO JUNIOR; PANTA, 2018).

A impermeabilização da área aterrada foi realizada apenas no local onde se encontravam os resíduos perigosos, de modo a impedir possíveis contaminações. Para tanto, utilizou-se uma geomembrana com espessura 2,0 mm e texturizada nas duas faces. A face texturizada possibilitaria um melhor atrito entre a geomembrana e a superfície de contato. A Figura 16, mostra o aterro já completamente impermeabilizado, sendo possível notar que o muro de concreto também foi recoberto pela geomembrana.

Figura 16 – Aterro completamente impermeabilizado, englobando também o muro de concreto.

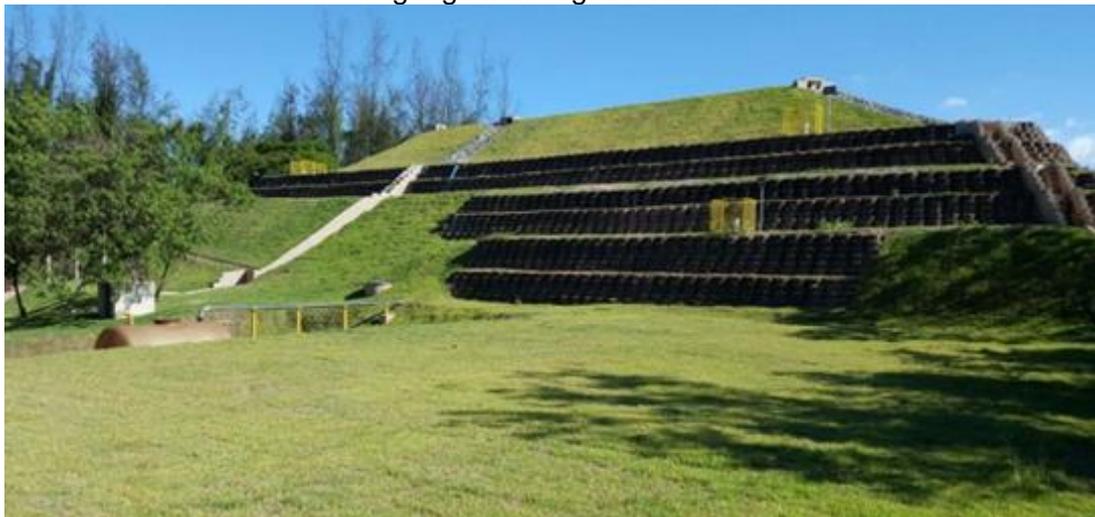


Fonte: Caressato Junior, Panta, 2018.

Neste caso, não houve problemas quanto à estabilização do solo sobre a geomembrana no talude, talvez pela presença do geocomposto entre as camadas e texturização da geomembrana. O maior problema enfrentado foi a falta de estabilidade devido à presença do muro de concreto.

Caressato Junior e Panta (2018) também apresentaram fotos do aterro após a finalização das obras e crescimento da vegetação. A Figura 17 apresenta uma vista do novo muro de contenção composto por geocélulas e geogrelhas. Segundo os autores, a longo prazo as geocélulas também ficarão cobertas por vegetação.

Figura 17 – Aterro classe I encerrado, com novo muro de contenção composto por geogrelhas e geocélulas.



Fonte: Caressato Junior, Panta, 2018.

4. METODOLOGIA

4.1. Descrição da área de estudo

O aterro estudado encontra-se no estado de Minas Gerais e é propriedade de uma empresa cuja atividade principal é a destinação final de resíduos. As Figuras 18 e 19 ilustram o local do empreendimento antes de ser realizada a instalação do aterro de resíduos perigosos classe I.

Figura 18– Área destinada ao aterro de resíduos perigosos antes da instalação.



Fonte: TCA, 2008.

Figura 19 – Área destinada ao aterro de resíduos perigosos antes da instalação, vista de cima.



Fonte: TCA, 2008.

O processo de instalação pode ser visto pelo relatório fotográfico realizado por Ambiental Petroclean Ltda. (2008). Na Figura 20 percebe-se as escavações e a instalação da camada de impermeabilização inferior, composta por uma geomembrana PEAD. A camada de impermeabilização inferior é imprescindível para a operação de qualquer tipo de aterro, uma vez que protege o solo e as águas subterrâneas de possíveis contaminações provenientes dos resíduos e percolados. Para os casos de aterros para resíduos Classe II, esta camada de impermeabilização não necessariamente é composta pela geomembrana, desde que o solo da base seja compatível às exigências da Norma ABNT NBR 13.896/97, que considera desejável um coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s e uma zona não saturada com espessura superior a 3,0 metros (ABNT, 1997).

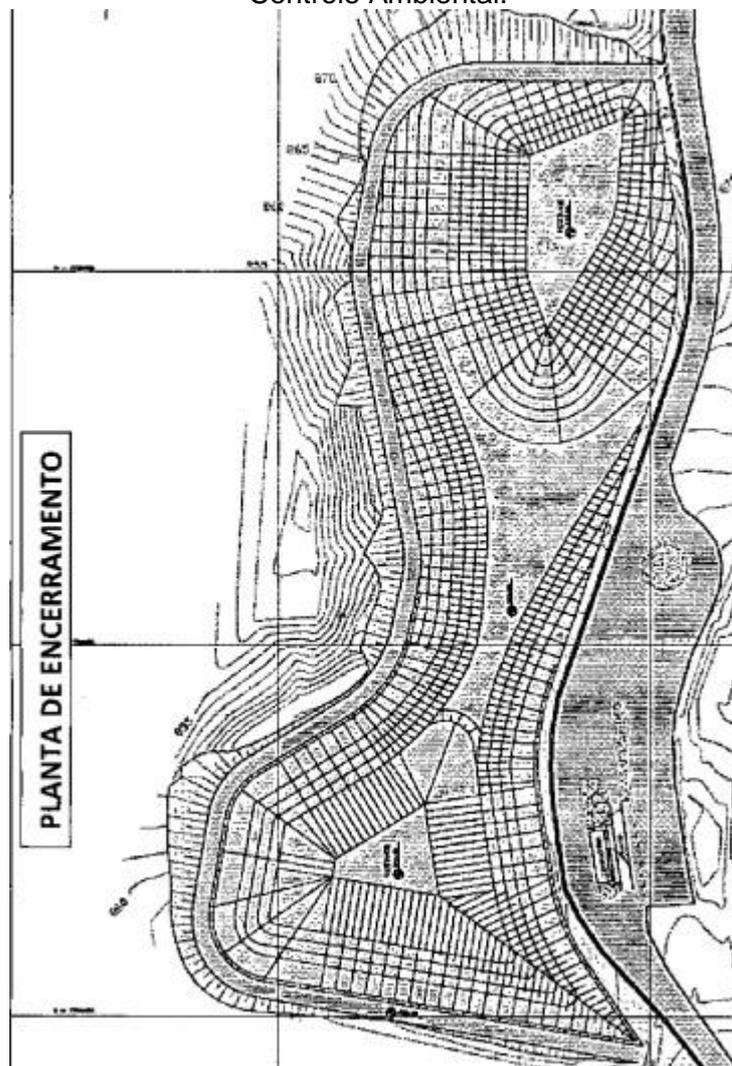
Figura 20 – Processo de implantação do aterro de resíduos perigosos, já com a presença de uma geomembrana PEAD na camada inferior do aterro.



Fonte: Ambiental Petroclean Ltda., 2008.

O empreendedor iniciou as atividades no aterro de resíduos perigosos no ano de 2010, com a obtenção da Licença de Operação. Foi apresentado, no interior do Plano de Controle Ambiental do empreendimento (TCA, 2010), um Plano de Encerramento para a área aterrada, a ser implantado na ocasião da finalização das atividades. A planta de encerramento para o local buscou representar o formato, a altimetria e a disposição final em camadas do aterro (Figura 21).

Figura 21 – Planta de encerramento do aterro de resíduos perigosos, contida no Plano de Controle Ambiental.



Fonte: Ambconsult Estudos e Projetos Ambientais, 2010.

O Plano também previa uma capacidade volumétrica de resíduos aterrados de 287.100 m³, com vida útil de doze anos de operação. O pós uso previsto no projeto inicial era de contemplação paisagística, integrando a área à paisagem local. Já a cobertura final, seria composta por solo compactado, geomembrana de PVC (1,5 mm de espessura), geocomposto drenante, solo de proteção, solo vegetal e gramíneas (AMBCONSULT ESTUDOS E PROJETOS AMBIENTAIS, 2010).

O aterro foi encerrado no ano de 2015, com a sua capacidade preenchida. Nas Figuras 22 e 23, é possível perceber que o formato e as camadas se encontram similares ao proposto no Plano. Os pontos 1, 2 e 3, destacados na Figura 22, são mostrados em detalhe nas Figuras 25, 26 e 27. As cotas na Figura 23 foram obtidas de um dos relatórios de monitoramento geotécnico do empreendimento (SIMÕES, 2019), realizado para o cumprimento de condicionantes da Licença de Operação.

Figura 22 – Vista superior da área de estudo, com indicação dos pontos de perspectiva.



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2019.

Figura 23 – Vista em perspectiva da área, com indicação das cotas nas duas extremidades do aterro.

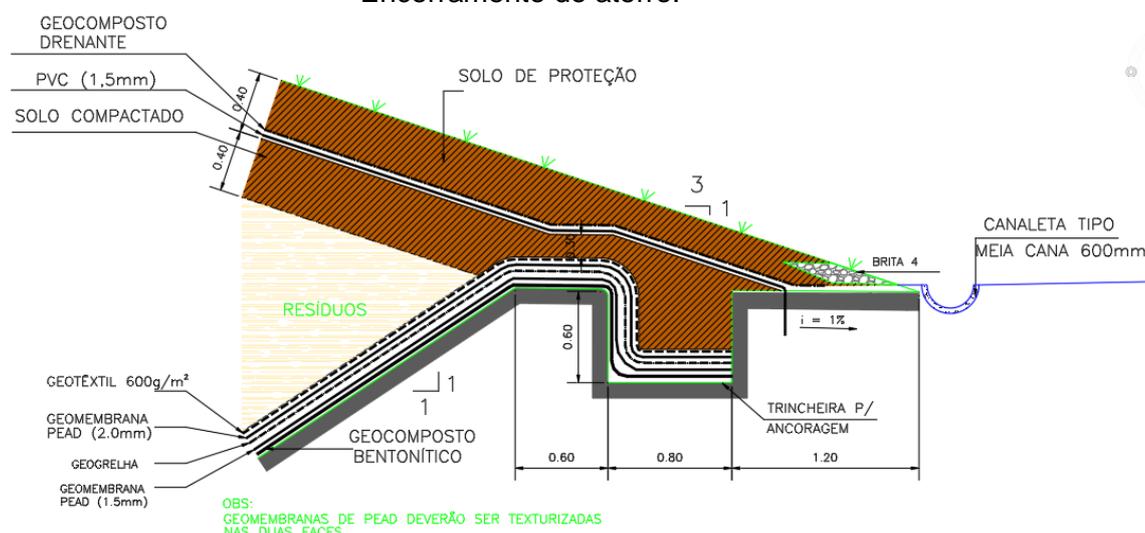


Fonte: Adaptado da empresa responsável pelo aterro, 2019.

Nota-se que o aterro finalizado apresenta três camadas bem definidas, com alturas de aproximadamente 5 metros cada uma, conforme observado em visita a campo. A área de aterramento, no fim do projeto, foi de aproximadamente 20.000 m².

Uma vez que o aterro se encontra encerrado, foi colocado por cima da cobertura de solo uma camada de geomembrana PEAD lisa. Conforme o Plano de Controle Ambiental do empreendimento, para a impermeabilização superior foi prevista uma camada de PVC 1,5mm. A Figura 24 ilustra as camadas inferiores e superiores do aterro, conforme previsto inicialmente em projeto. A camada de impermeabilização superior é fundamental para o aterro classe I, uma vez que esta terá a função de enclausurar totalmente os resíduos ali depositados. Segundo a norma ABNT 10.157/87, é necessária a minimização na geração de líquidos percolados, uma vez que os resíduos perigosos apresentam alto grau de periculosidade e contaminação.

Figura 24 – Esquema das coberturas inferior e superior, previstas no Plano de Encerramento do aterro.



Fonte: TCA, 2010.

A geomembrana PEAD disposta no aterro em questão é de textura lisa, o que pode acarretar em instabilidade nas coberturas colocadas posteriormente. Além disso, a mesma se encontra exposta ao meio ambiente, sofrendo assim com intempéries como chuvas, raios solares e vento, o que pode ocasionar em rompimentos na estrutura da mesma. Tudo isso pode refletir em prejuízos para a empresa, já que a manutenção e reconstituição da geomembrana geram custos.

A vista do Ponto 1, representada pela Figura 25, mostra uma perspectiva de quase todo o aterro estudado. É possível observar a textura lisa da geomembrana, além das elevadas inclinações dos taludes executados. Segundo a empresa, a inclinação de alguns taludes é de até 30°.

Figura 25 – Vista do ponto 1, onde observa-se a geomembrana PEAD e elevadas inclinações dos taludes.



Fonte: Próprio autor.

Portanto, nem todos os aspectos respeitaram o Plano de Controle Ambiental do empreendimento, pois a declividade prevista inicialmente em projeto era de taludes de relação 1V:3H, resultando em inclinações de aproximadamente 18°.

A Figura 26, apresentada a seguir, é a perspectiva em campo a partir do Ponto 2, localizado na estrada de terra presente na lateral do aterro, sendo esta a única via de acesso à gleba. Por esta perspectiva, é possível observar um ponto de monitoramento de percolados do aterro. Apesar dos aterros classe I necessitarem de maiores cuidados e minimização na geração de percolados, conforme citado anteriormente, é importante lembrar que os resíduos depositados podem já apresentar líquidos em seu interior, o que acarreta também na geração dos

efluentes nesse tipo de aterro. Os pontos de monitoramento das cotas inferiores é onde ocorre a sucção do efluente gerado diariamente.

Figura 26 – Vista através do Ponto 2: monitoramento de percolados.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 27 mostra a vista do Ponto 3, onde é possível notar uma região mais plana do aterro. Essa conformação plana pode contribuir para a estabilidade do aterro e uma posterior revegetação.

Figura 27 – Vista do Ponto 3, onde o aterro se encontra mais plano.



Fonte: Próprio autor.

4.2. Levantamento das razões de instabilidade do solo de cobertura

Para realizar a investigação dos fatores que dificultaram a estabilização e posterior revegetação do solo de cobertura, foram feitas duas visitas a campo para melhor visualizar a situação do local. Após a visualização da área, as possíveis razões levantadas foram confrontadas com os fatos e problemas já relatados em outras bibliografias sobre o tema. O confronto de informações foi feito com o intuito de associar o problema observado com possíveis causas já relatadas em outros locais.

Ambas as visitas foram acompanhadas por um colaborador da empresa responsável pelo aterro, de modo que guiasse e apresentasse a área recoberta pela geomembrana. Nas visitas a campo, buscou-se visualizar o maior nível de detalhes da área, visando identificar os principais fatores que levaram à instabilidade da cobertura.

Mesmo sendo um aterro já encerrado, foi necessário o uso de EPI's, como botas e colete, devido à forma de acesso para o local ser por meio de uma única

estrada de terra, na qual ainda passam alguns veículos para manutenção do aterro, garantindo a precaução no ambiente de trabalho.

Nas pesquisas bibliográficas relacionadas ao tema, buscou-se relatos sobre problemas relacionados ao uso de geossintéticos, em especial as geomembranas, objetivando relacionar os fatos observados em campo com informações previamente discutidas sobre o uso dos geossintéticos. Sabendo-se se as causas observadas já não vêm sendo relatadas por outros estudos, seria possível buscar possíveis soluções já propostas nestes trabalhos.

4.3. Pesquisa por alternativas/soluções técnicas de estabilização do solo

A avaliação das alternativas encontradas foi feita em duas etapas. Primeiramente, buscou-se por soluções que pudessem ser realizadas e, posteriormente, cada uma foi analisada, levantando-se os pontos fortes e fracos.

Durante a pesquisa por soluções para a estabilização do solo sobre a geomembrana, procurou-se artigos, monografias, dissertações, teses e livros que tratassem sobre aterros que também fizeram uso de impermeabilização na camada superior, ou a respeito de problemas na estabilidade devido ao uso de geomembranas.

Além disso, consultou-se também a opinião de mais de uma empresa do ramo. As empresas que já realizam projetos neste campo puderam contribuir com ideias e sugestões. Além das empresas, buscou-se também conversar com alguns acadêmicos do campo de geossintéticos, de modo a obter um maior número de opiniões sobre o caso.

Ao procurar a opinião dos profissionais, sabia-se do risco de não apresentarem uma solução satisfatória, ou não darem prosseguimento a uma negociação com a empresa responsável pelo aterro. A continuidade para uma possível negociação era importante para a realização de um teste piloto da técnica. Assim os resultados poderiam ser melhor avaliados.

Realizou-se reuniões com mais de um profissional/empresa, de modo a levantar diferentes técnicas e pontos de vistas. Além disso, ter mais de uma possibilidade significaria também ter diferentes orçamentos para o fechamento total do aterro.

O Plano de Encerramento do aterro em questão também foi analisado, levando-se em consideração a alternativa planejada para o encerramento da área.

As visitas a campo realizadas no aterro de resíduos perigosos também propiciaram a visualização das tentativas já realizadas pela empresa responsável pelo empreendimento para estabilização do solo e recobrimento do aterro, sendo também essas somadas ao elenco de possibilidades.

4.4. Avaliação das alternativas/soluções encontradas

Após obtidas as alternativas técnicas, foram levantados os pontos fortes e fracos de cada uma, para que se pudesse ter uma opinião crítica a respeito das técnicas. A avaliação qualitativa teve o intuito de mostrar os fatores importantes das soluções, e também aquilo que poderia vir a acontecer com a aplicação das mesmas, especialmente com base na literatura técnica, uma vez que não foi possível realizar testes piloto com as propostas obtidas.

A partir da análise das diferentes técnicas sugeridas, foi possível indicar as que mais apresentam chance de solucionar definitivamente o problema apresentado no aterro em questão. A escolha das técnicas mais indicadas foi pautada nos pontos levantados para cada uma e analisando a viabilidade técnica, ambiental e econômica presente em cada.

Espera-se que as técnicas escolhidas apresentem uma característica consistente, que possa perdurar durante muito tempo. Pois, embora o encerramento do aterro necessite ainda de um período de monitoramento após as atividades, a solução precisará ser capaz de enfrentar as mudanças de tempo e exposição às diferentes intempéries possíveis. Isso é necessário para que a área retorne ao meio ambiente com o melhor aspecto e características parecidas com as de antes da implantação do empreendimento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

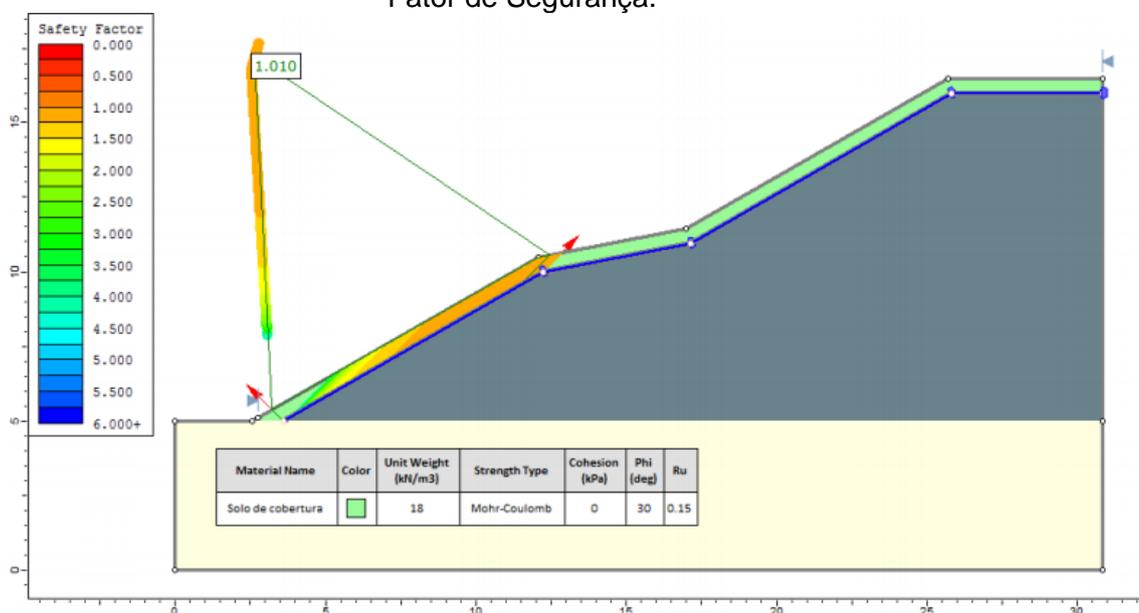
5.1. Levantamento das razões de instabilidade do solo de cobertura

O estudo do aterro de resíduos perigosos em questão possibilitou a compreensão de alguns fatores que contribuem para a dificuldade de recobrimento final do empreendimento. O primeiro fator é o que está mais à vista, é a presença da geomembrana lisa na cobertura final.

Conforme Varnes (1978) citado por Caputo, Caputo e Rodrigues (2015, v. 2), as características inerentes ao material podem afetar negativamente a resistência ao escorregamento. Devido às características de baixo atrito com outros componentes, a geomembrana lisa apresenta pouca resistência de interface com o material colocado em cima, gerando uma instabilidade nas camadas acima dela.

A Figura 28 ilustra a análise de estabilidade do solo do aterro em estudo colocado sobre a geomembrana (interface solo-geomembrana), elaborada por uma das empresas consultadas e indica a instabilidade do solo sobre a manta impermeável.

Figura 28 – Análise de estabilidade na interface solo-geomembrana, indicando um baixo Fator de Segurança.



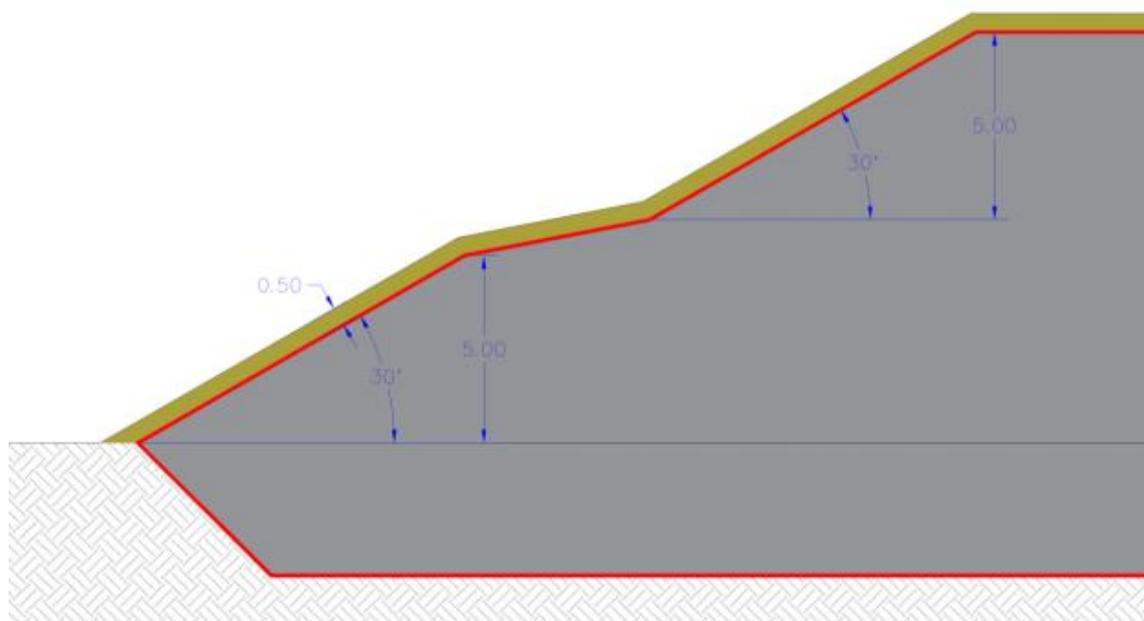
Fonte: Empresa C, 2019.

Conforme apontado por Gerscovich (2012), esse não é um valor considerado estável. O ideal é que o fator de segurança esteja sempre igual ou maior a 1,5, o que significa uma sobra de 50% na resistência sobre o escorregamento do material.

Outro fator observado, que também chama a atenção apenas por meio de uma análise visual, porém não tão diretamente quanto a geomembrana, é a inclinação dos taludes. Após uma visita a campo, e também pelas fotografias do local, percebe-se que os taludes apresentam uma inclinação elevada. Conforme visto em Caputo, Caputo e Rodrigues (2015) e Guidicini e Nieble (1983), quanto maior o ângulo entre as superfícies, mais próximo estará de um processo erosivo, os elevados ângulos nos taludes contribuem de forma negativa para a estabilidade da cobertura final.

Como já mencionado, o projeto inicial para o fechamento do aterro previa inclinações na ordem de 18° , com a relação dos taludes de 1V:3H (AMBCONSULT ESTUDOS E PROJETOS AMBIENTAIS, 2010). Com a presente conformação, o talude apresenta uma relação de aproximadamente 1V:1,7H, isto é, próximo a 30° de inclinação, o que é significativamente diferente do planejado. A Figura 29, elaborada por uma das empresas consultadas, mostra esta conformação atual.

Figura 29 – Conformação aproximada dos taludes no aterro atualmente.



Fonte: Empresa C, 2019.

A disponibilidade da área destinada ao aterro também afetou a realização da cobertura final. Em conversa com a empresa responsável, foi possível compreender que o licenciamento ambiental para a disposição de resíduos perigosos somente possibilitou a operação em uma área restrita, devido à existência de uma Área de Preservação no entorno do aterro. Com isso, a operação ao longo da vida útil do

aterro fez com que o mesmo atingisse maiores alturas e inclinações que o esperado. Devido à restrição da área disponível pelo licenciamento, não é possível a expansão dos limites do aterro, impossibilitando uma suavização dos taludes e dificultando o recobrimento. Além disso, a estrada de terra presente no local é a única forma de acesso às áreas internas do aterro, portanto o espaço da estrada de terra também não pode ser aproveitado. Já a estrada asfaltada, no lado oposto da estrada de terra, é utilizada para o tráfego de caminhões, inviabilizando também uma expansão para este lado.

Mesmo com as dificuldades apresentadas, é necessário o completo recobrimento do aterro para que o mesmo possa ser retornado ao meio ambiente com uma paisagem mais harmônica, além de proporcionar a proteção à geomembrana. Portanto, este trabalho procurou levantar algumas formas possíveis de estabilização do solo de cobertura final, possibilitando a posterior revegetação da área.

5.2. Pesquisa por alternativas/soluções técnicas de estabilização do solo

Apesar das informações obtidas, a situação para o aterro em questão mostrou uma certa peculiaridade, uma vez que não foram encontrados muitos exemplos de outros aterros na mesma situação. Fato que pode ser justificado devido ao raro uso deste material para o recobrimento final dos aterros no Brasil.

A necessidade de manter a integridade da geomembrana, isto é, evitar a perfuração da mesma, restringiu o número de técnicas a serem executadas para estabilização dos taludes. Talvez seria necessário a elaboração de uma nova técnica, diferente das atualmente conhecidas, ou usar um conjunto de técnicas que se encaixassem nos requisitos necessários para a solução do problema, o que daria maior particularidade para solução a ser apresentada. O *know-how* das empresas foi importante, pois nem todas as informações são disponibilizadas na bibliografia, sendo que a experiência em projetos anteriores possibilita a criatividade de novas soluções.

No que tange às empresas e aos profissionais consultados, foi possível comunicar com três empresas distintas que atuam com obras de estabilização do solo. As empresas serão aqui referidas como 'Empresa A', 'Empresa B' e 'Empresa

C', para que o foco das discussões seja voltado para as técnicas propostas, e não para uma possível divulgação das empresas em si.

Com a 'Empresa A', que atua no mercado de geossintéticos, realizou-se uma reunião juntamente com representantes do empreendimento responsável pelo aterro, onde foi discutida a proposta de estudo a ser realizada. Posteriormente, conversou-se via e-mail com a 'Empresa B', que possuía um profissional do ramo. Não foi possível a realização de uma reunião presencial com o mesmo, devido à falta de disponibilidade da empresa. Porém, a técnica sugerida foi levada em consideração, de modo a contribuir como uma outra possibilidade encontrada. Com a 'Empresa C', foi possível participar de duas reuniões juntamente com representantes do empreendimento responsável pelo aterro.

Apesar das reuniões que ocorreram terem sido também direcionadas para a negociação entre as empresas, foram momentos que auxiliaram no levantamento de alternativas para estabilização do solo de cobertura e no processo investigativo dos fatores contribuintes para a instabilidade do solo, especialmente porque foi possível realizar questionamentos sobre a situação atual da área.

A 'Empresa C' apresentou um estudo geotécnico da situação atual do aterro, de modo a descrever em detalhe a técnica de recobrimento e estabilização do solo sugerida. Realizou-se uma segunda reunião com um dos engenheiros responsáveis pelo projeto, visando o esclarecimento de dúvidas relacionadas à proposta elaborada pela 'Empresa C', sendo possível compreender melhor a análise realizada pela mesma. Os questionamentos versaram sobre a análise de estabilidade realizada e os resultados por ela apresentados, assim como sobre as escolhas de materiais e métodos construtivos propostos pela empresa.

Algumas técnicas de estabilização e revegetação já foram experimentadas pela empresa responsável, na tentativa de finalizar o aterro e cumprir com o Plano de Encerramento. Porém, até o presente momento, as tentativas de revegetação experimentadas não apresentaram resultados satisfatórios.

Dentre os resultados obtidos no trabalho, foram levantadas sete alternativas para o recobrimento do local com a finalidade de estabilização do solo. Duas alternativas foram encontradas nas visitas a campo, uma foi a considerada no Plano de Encerramento do aterro, outras três alternativas foram obtidas por meio das empresas consultadas, e uma foi pensada pelos autores. As soluções encontradas foram as seguintes, que são descritas nos tópicos a seguir:

- Manta com grampeamento;
- *Biologs* com estacas de bambu e Capim-Vetiver;
- Geocomposto Drenante sobre Geomembrana de PVC;
- Geogrelha tridimensional;
- Confinamento celular de 20 cm de altura;
- Geocélulas com brita e uso de *biologs* com cabos de ancoragem;
- Redução da declividade dos taludes, com uso do solo local.

Apesar de se ter sido buscado um teste real em uma parcela do aterro para análise dos resultados de estabilidade, conforme planejado inicialmente, esta forma de teste não foi possível, devido ao andamento das negociações entre as empresas proponentes e a empresa responsável pelo aterro.

5.2.1. Manta com grampeamento

Uma das técnicas experimentadas em uma parcela do aterro foi o recobrimento da geomembrana PEAD por um outro material mais aderente ao solo, cuja especificação não foi obtida junto à empresa responsável pelo aterro em estudo. A manta foi prendida a grampos, de modo a formar uma nova camada, servindo de suporte para a estabilização do solo no talude. Porém, com o passar do tempo, a exposição da técnica à chuva juntamente com o peso do solo, fizeram o material se desprender dos grampos, não sendo possível conter a erosão e o escorregamento do solo. A técnica pode ser visualizada na Figura 30 a seguir.

Figura 30 – Escorregamento do solo após aplicação da técnica de recobrimento por uma manta prendida a grampos.



Fonte: Próprio autor.

A manta colocada por cima teria a função de aumentar a aderência do solo, mas foi necessária a realização de grampeamentos para segurá-la. Os grampeamentos, como já apontado em Geoacademy (2019), não são vantajosos nos casos em que há geomembrana, pois os mesmos interferem na impermeabilização, a partir da abertura de orifícios. Outro fator importante a ser observado, é que o atrito entre o solo poderia aumentar, mas ainda seria necessário avaliar o atrito entre as duas mantas, pois as mesmas podem apresentar também uma baixa aderência entre si. Portanto, uma análise da interface manta-geomembrana poderia contribuir para saber se a técnica seria mesmo viável para as inclinações de taludes presentes.

5.2.2. *Biologs* com estacas de bambu e Capim-Vetiver

A outra técnica experimentada pela empresa foi o uso de retentores de sedimentos, com aplicação de hidrossemeadura. Os retentores de sedimentos reduzem o transporte de sedimentos e auxiliam na filtração e no retardamento de vazões de água pluvial. Também funcionam como reguladores do carreamento de sedimentos, fornecendo a estabilização do talude e o desenvolvimento da vegetação, conforme citado por Couto et. al (2010).

O Capim-Vetiver foi utilizado de forma a tornar a técnica mais efetiva, já que é uma espécie muito utilizada contra erosões por possuir raízes profundas, que contribuem para a estabilização do solo, pois as raízes profundas firmam o solo, além do capim contribuir na barreira contra a erosão, juntamente com os *biologs*. Na técnica experimentada no aterro, o plantio do capim-Vetiver foi realizado por meio de hidrossemeadura, que consiste na aplicação das sementes utilizando uma bomba hidráulica, por via aquosa (COUTO et. al, 2010). Mas para o aterro em questão, a utilização do Vetiver é ineficiente, uma vez que o Vetiver não cumpriria seu papel de estabilização, devido à falta de crescimento das raízes.

O talude onde os retentores de sedimentos foram colocados para teste foi dividido em duas metades. Em uma metade, utilizou-se solo vegetal, adquirido de uma empresa terceirizada, e na outra metade, utilizou-se o solo do próprio local, de características argilo-arenosas. Embora a coloração do solo adquirido não seja similar à de solos vegetais, essa classificação foi confirmada pela empresa responsável pelo aterro estudado. Esta divisão teve o intuito de verificar a capacidade de crescimento da vegetação em ambos os solos, assim como averiguar

a possibilidade de revegetação dos taludes utilizando apenas o solo do próprio local. Os retentores foram fixados através de estacas de bambu, diferentemente da fixação por meio de estacas de madeira ou de aço, citadas por Couto et al. (2010). Nesta técnica, as estacas de bambu perfuram a manta PEAD, interferindo na impermeabilização da cobertura, por abrirem orifícios.

A Figura 31 mostra os resultados da aplicação da técnica na parte onde foi utilizado solo vegetal. Durante o processo construtivo, os retentores foram fixados na geomembrana PEAD com estacas de bambu, e posteriormente, colocado o solo para o plantio. Nesta metade do talude, não houve crescimento da vegetação. Já na metade que foi recoberta com solo local (Figura 32), houve maior crescimento da vegetação, mostrando que o solo argilo-arenoso local pode ser utilizado para a revegetação dos taludes. Porém, o resultado não foi suficiente para revegetar todo o talude, e não alcançou os resultados estéticos desejados pela empresa, pois, nas duas metades do talude em que foi realizado o teste, parte dos materiais da técnica continuaram expostos, mesmo com o crescimento de algumas espécies, como observa-se nas Figuras 31 e 32. Além disso, a aplicação de hidrossemeadura com mistura de diferentes sementes não foi favorável para o crescimento do Capim-Vetiver, pois a competição com outras espécies vegetativas inviabilizou o desenvolvimento de todas as mudas do capim plantadas.

Figura 31 – Técnica de revegetação utilizando retentores de sedimentos com solo vegetal.



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 – Técnica de revegetação utilizando *biologs*, com o solo do próprio local.



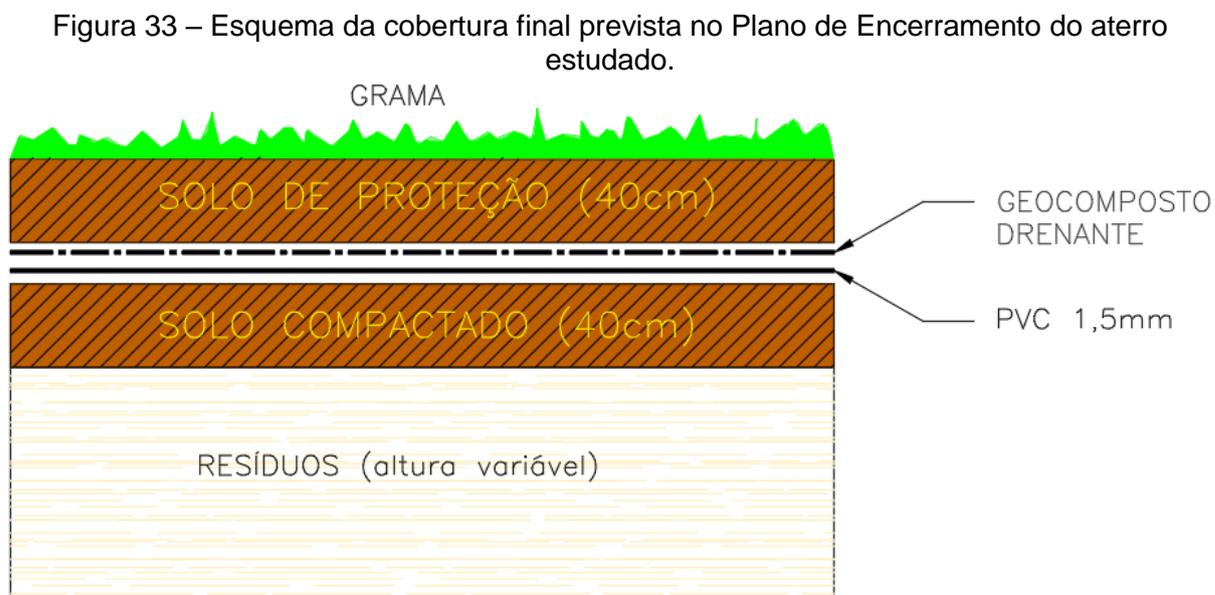
Fonte: Próprio autor.

Tanto o projeto para recobrimento elaborado pela Empresa C, a ser descrito no item 5.2.6, quanto este teste já realizado, apresentaram os retentores de

sedimentos como parte da solução. O estudo realizado por Couto et al. (2010) também apresenta o uso dos retentores de sedimentos em uma das técnicas, o que mostra uma certa similaridade entre algumas soluções apresentadas. Mesmo que cada técnica apresente materiais que as diferem umas das outras, os retentores de sedimentos se mostraram materiais muito importantes para mais de uma destas soluções.

5.2.3. Geocomposto drenante sobre Geomembrana de PVC

O Plano de Encerramento do aterro previa o uso de geossintéticos, sendo do fundo para o topo, uma cobertura sobre os resíduos composta por uma camada de 40 cm de solo compactado, uma geomembrana de PVC 1,5 mm, um geocomposto drenante, constituído de um núcleo drenante e geotêxtil filtrante em ambas as faces, uma outra camada de solo de proteção de 40 cm de espessura, uma camada de solo orgânico de 10 cm e a cobertura vegetal composta por grama. Todo esse sistema de cobertura final seria implantado com uma declividade de relação 1V:3H, do perímetro do aterro para a crista do talude (AMBCONSULT ESTUDOS E PROJETOS AMBIENTAIS, 2010). Esse esquema é ilustrado na Figura 33 a seguir.



Fonte: Ambconsult Estudos e Projetos Ambientais, 2010.

A primeira camada de solo compactado teria a função de tornar a superfície de cobertura final mais uniforme e com a geometria e declividades necessárias para

a aplicação das camadas posteriores. Para a impermeabilização superior, foi prevista uma camada de PVC 1,5mm, que por sua vez foi substituída pela geomembrana PEAD de 2,0mm. Segundo o Plano de Controle Ambiental, o PVC poderia ser utilizado uma vez que na cobertura final não haveria o contato da manta com os resíduos e/ou percolados. Porém, após a aplicação da mesma, a empresa responsável pelo aterro verificou que a manta em PVC não possuía a mesma resistência mecânica que o PEAD, preferindo portanto a substituição da mesma.

O geocomposto drenante teria a função de drenar a água infiltrada na cobertura final para as canaletas de drenagem pluvial. A segunda camada de solo seria para proteção dos materiais geossintéticos e para sustentar a camada de cobertura vegetal. O solo orgânico viria para permitir a fixação e desenvolvimento da cobertura vegetal, que por sua vez seria composta por grama, de forma a minimizar os processos erosivos e potencializar a evapotranspiração. A vegetação seria composta por grama-batatais (*Paspalum notatum*) ou grama-São-Carlos (*Axonopus compressus*). A espessura do solo de cobertura poderia ser aumentada para possibilitar o plantio de espécies com raízes mais profundas (AMBCONSULT ESTUDOS E PROJETOS AMBIENTAIS, 2010).

A solução prevista no Plano de Encerramento, apesar de parecer uma solução simples e bem planejada, não foi executada pela empresa do aterro. Segundo a empresa responsável pelo aterro, uma vez que as condições do aterro mudaram, a conformação da cobertura final também poderia ser alterada. Por isso o geocomposto drenante, presente no Plano de Controle Ambiental, não foi aplicado. O Plano de Encerramento tem uma relevância significativa, pois contém a maneira como inicialmente foi prevista a cobertura final, foi planejado e pensado por diferentes profissionais, além de ser a forma de encerramento aprovada pelo órgão ambiental durante o processo de licenciamento. Por outro lado, os profissionais que pensaram esta concepção de cobertura não poderiam ter conhecimento da situação do aterro após implantação, apenas fizeram uma suposição de como ele ficaria, a partir do que foi previsto em projeto. Portanto, a aplicação destas camadas pode ser inviável para a realidade atual do aterro.

5.2.4. Geogrelha tridimensional

A primeira empresa com a qual se realizou reunião sugeriu como solução o uso de um tipo de geogrelha sobre a camada de geomembrana, que apresentava

característica tridimensional, favorecendo uma maior interação com o solo de cobertura. A Figura 34 a seguir ilustra o geossintético tridimensional, onde é possível observar alguns relevos no material da geogrelha.

Figura 34 – Geogrelha tridimensional, onde observam-se os relevos no material.

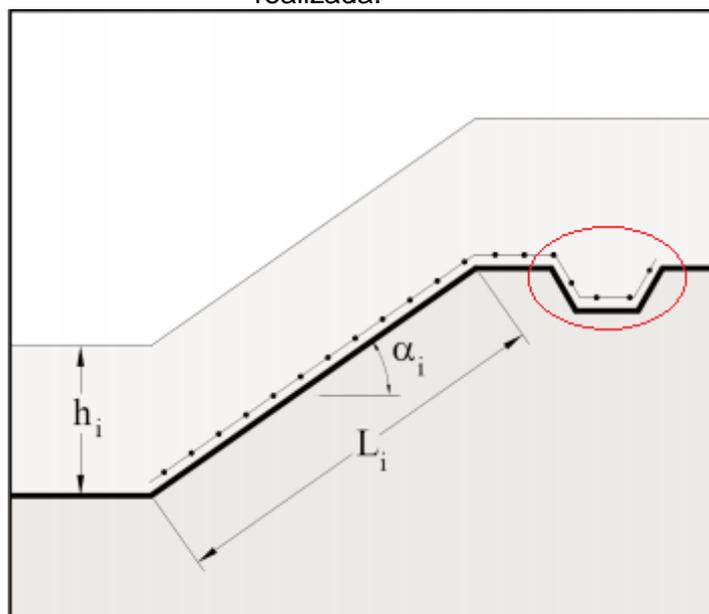


Fonte: Huesker, 2019.

A geogrelha seria colocada por cima da geomembrana e fixada por meio de ancoragem nas bermas dos taludes. O fato de ser um geossintético tridimensional, fornece uma maior interação com o solo disposto por cima da geogrelha, dando uma maior estabilidade, segundo a Empresa A.

A ancoragem é uma técnica para alocação dos geossintéticos já bastante utilizada, porém quando precisa ser realizada sobre uma geomembrana, a situação é um pouco mais peculiar. Isso porque a ancoragem ocasionaria um corte na camada impermeabilizante para ser realizada. A ancoragem necessita de uma cava para que o peso do solo seja responsável pela fixação do material (Figura 35). Portanto, seria necessário transpassar a geomembrana para a realização da cava.

Figura 35 – Esquema da realização de ancoragem do geossintético, com destaque na cava realizada.



Fonte: Adaptado de Russo,2018.

Um fato que poderia amenizar os rasgos na camada impermeabilizante é que esta poderia receber remendos nos locais onde for ancorada. Porém é questionável a impermeabilização após esse tipo de alteração, podendo ocasionar o aumento de líquidos percolados, o que não é desejável nos aterros para resíduos perigosos.

Segundo Russo (2018), há a possibilidade de diminuir a quantidade de ancoragens em aterros com taludes sobrepostos, aplicando uma única geogrelha, sem interrupções. Isso seria interessante, pois diminuiria o número de cortes na camada impermeabilizante e, conseqüentemente, o número de emendas necessárias. Porém, não impediria a necessidade de pelo menos uma trincheira de ancoragem ao longo de uma berma, o que por si só já é uma grande interferência na camada de impermeabilização.

Para essa proposta, não foram disponibilizadas as análises técnicas da estabilidade do conjunto, apenas foi informado que a capacidade de carga mínima da geogrelha, para não ocorrer a ruptura nos taludes mais íngremes seria de 60 kN/m.

5.2.5. Confinamento celular de 20 cm de altura

Em contato, via e-mail, com o segundo profissional do ramo, foi informado que, para este tipo de caso, a cobertura com vegetação só é possível a partir da instalação de algum sistema de confinamento celular, como as geocélulas, com pelo

menos 20 cm de altura, para a retenção do solo. Foi informado também que a escolha da vegetação é muito importante, já que não seria vantajoso um sistema radicular muito profundo.

A maior dificuldade seria, segundo o profissional, a fixação da geocélula, que necessitaria de grampeamentos, perfurando a geomembrana. Porém este tipo de instalação já tinha sido discutida em outras obras, que também necessitavam proteger a integridade da camada de impermeabilização.

Nos casos em que for necessário recobrir a geomembrana com geocélula, para proteção da camada de impermeabilização, ao invés de utilizarem grampos para fixação da geocélula, esta pode ser fixada na mesma trincheira de ancoragem usada para a geomembrana (GEOACADEMY, 2019; PANTA, CAMPOS, 2016). A ilustração da técnica encontra-se na Figura 36 a seguir.

Figura 36 – Instalação de geocélula sobre geomembrana, protegida por geotêxtil, utilizando a mesma trincheira de ancoragem.

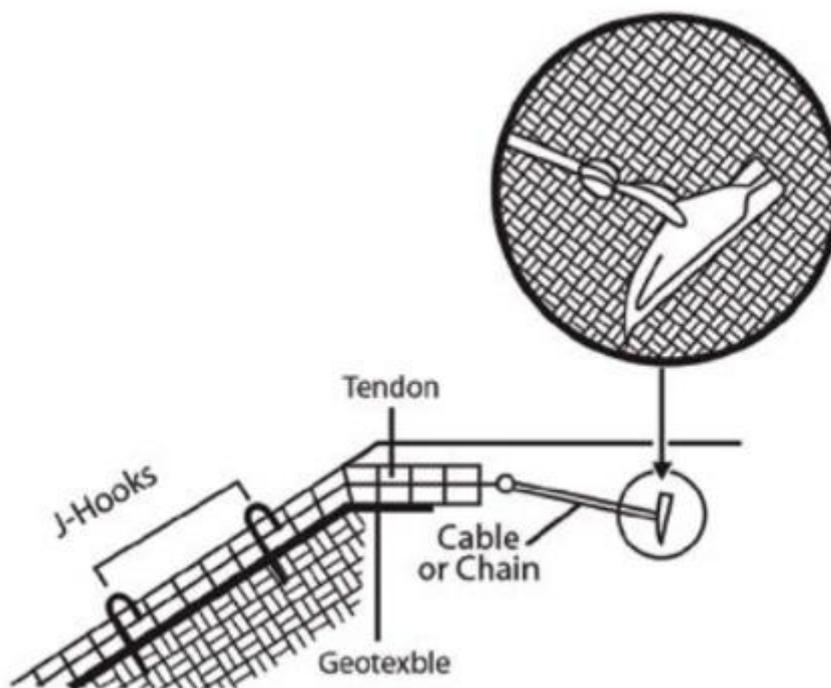


Fonte: Panta e Campos, 2016.

Uma outra forma de realizar a ancoragem das geocélulas, sem o uso de grampeamento, é por meio dos cabos de ancoragem esta ancoragem é realizada também na crista do talude, proporcionando um acréscimo na resistência juntamente com a ancoragem da trincheira. A ancoragem com o cabo, apesar de pouco invasiva, também precisa passar pela barreira impermeabilizante para ser feita a fixada. Na Figura 37 é exemplificado a utilização dos cabos juntamente com os

grampos. Porém, caso sejam retirados os grampos na ancoragem, como sugerido, é necessário certificar-se que os cabos seriam capazes de suportar sozinhos a tensão do solo de cobertura. Caso contrário, a ancoragem pode vir a ceder.

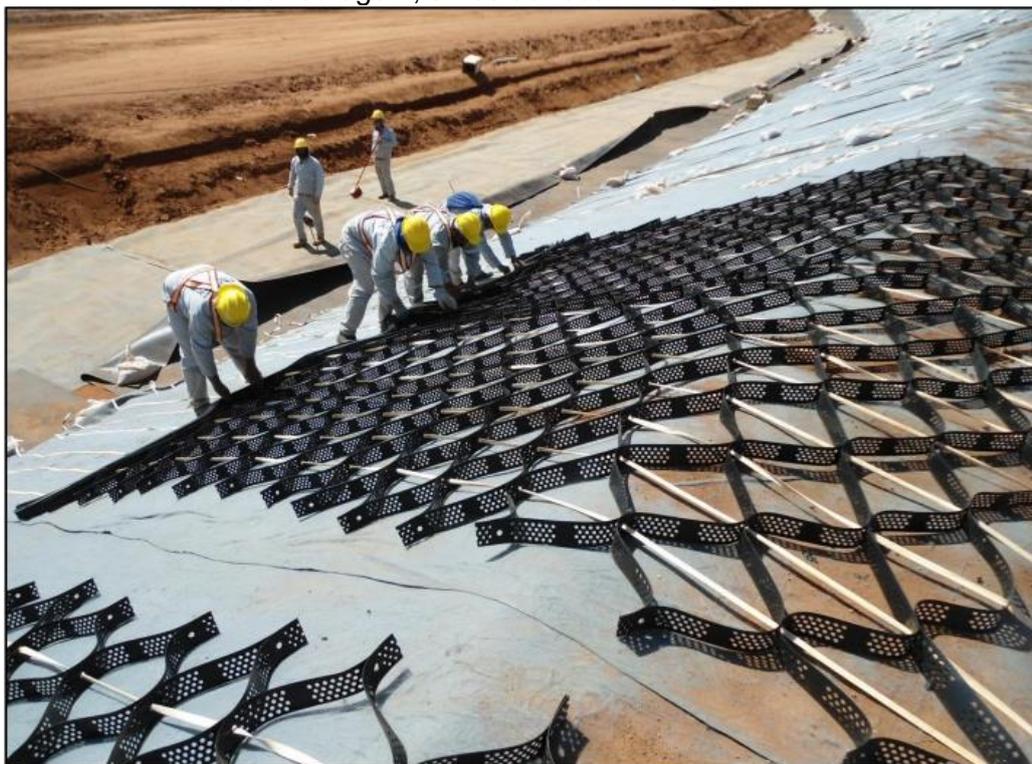
Figura 37 – Ancoragem de geocélula sobre geomembrana utilizando cabos de ancoragem fixados na crista do talude.



Fonte: Geoacademy, 2019.

Além da verificação da ancoragem, seria necessário saber se o solo não se desprenderia da geocélula, deixando o geossintético exposto, pois um dos problemas possíveis seria o desprendimento do material colocado no interior das geocélulas (PANTA, CAMPOS, 2016). Porém, é provável que a altura de 20 cm, como sugerido pela empresa B, evitaria este tipo de ocorrência, por ser a maior altura disponível para este tipo de geossintético. Outro fator a ser destacado é a fácil instalação do sistema, que pode ser feito manualmente, sem a utilização de máquinas que prejudiquem a integridade da geomembrana (PANTA, CAMPOS, 2016). A instalação da geocélula sobre geomembrana antes da cobertura final pode ser vista na Figura 38 a seguir.

Figura 38 – Instalação de geocélula sobre geomembrana, protegida por geotêxtil, com cabos de ancoragem, antes do recobrimento.



Fonte: Panta e Campos, 2016.

5.2.6. Geocélulas com brita e uso de *biologs* com cabos de ancoragem

Nos contatos realizados com os profissionais, o uso dos geossintéticos estava sempre presente nas soluções, mostrando sua diversidade de aplicações como relatado por Duarte (2009). E o mesmo aconteceu na técnica sugerida pela Empresa C.

A Empresa C elaborou um projeto que buscou a estabilidade necessária, preservando a integridade da geomembrana e os limites geográficos do aterro. O projeto foi elaborado a partir dos conhecimentos práticos da empresa e das análises de estabilidade no *software Slide V.8.0 da Rocscience*.

5.2.6.1. Análise de estabilidade na interface brita-geomembrana

Uma vez que foi constatada a impossibilidade de se alcançar a estabilidade da cobertura somente com uso do solo, conforme análise prévia realizada pela Empresa C e vista anteriormente na Figura 28, a solução proposta procurou alterar a superfície de contato solo-geomembrana para solo-brita-geomembrana. Assim, a brita proporcionaria uma maior estabilidade com o solo do que a geomembrana lisa.

Mesmo com o aumento da resistência de contato para a camada de solo, seria ainda necessária uma análise do contato entre a brita e a geomembrana. Para isso, foi realizada uma simulação onde a estabilidade na interface entre a camada de brita e a geomembrana foi estudada. Para a simulação, também foi levado em consideração o peso do solo colocado por cima da brita, como pode ser observado na Figura 39 a seguir.

Figura 39 – Análise da estabilidade de interface entre a camada de brita e a geomembrana.



Fonte: Empresa C, 2019.

O material com o nome 'Filtro' é referente à camada de brita. Na figura, a camada de brita ficou posicionada abaixo da geomembrana, que por sua vez é representada pela linha azul ao longo do talude. Segundo informações da empresa proponente, o valor de entrada de 14 kN/m³ para o peso específico da brita foi obtido de um fornecedor do material. Já o ângulo de atrito (Phi) utilizado para a brita foi de 45°, que é um valor com base na literatura.

Dessa forma, o FS resultante de 1,93 indica que o filtro utilizado é um material com estabilidade adequada, a tensão de resistência é quase o dobro da tensão provocada pelo escorregamento. A camada intermediária de brita teria não só a função de aumentar o atrito entre as camadas, mas também hidráulica, drenando as águas pluviais presentes acima da geomembrana. Isso evitaria uma possível saturação do solo de cobertura.

Esta análise levou em consideração o peso do solo de cobertura, portanto o fator de segurança somente com a camada de brita, durante o processo construtivo, seria menor. Isto é, a simulação realizada indica um cenário já totalmente construído, porém, a camada de brita somente não teria a estabilidade construtiva necessária para chegar a esta situação. Dessa forma, a Empresa C pensou no uso de geocélulas, para que sirvam de suporte construtivo à camada intermediária de brita.

A geocélula não entrou na análise de estabilidade realizada, porém a interferência deste material para o conjunto é um acréscimo na estabilidade, uma vez que a geocélula dificilmente romperia devido à erosão. Isto porque a resistência da geocélula será baseada na sua ancoragem e capacidade de carga, diferentemente das outras camadas, que têm a estabilidade de interface como base para a análise. Portanto, a simulação realizada, sem levar em consideração a geocélula, é um cenário mais crítico do que o real.

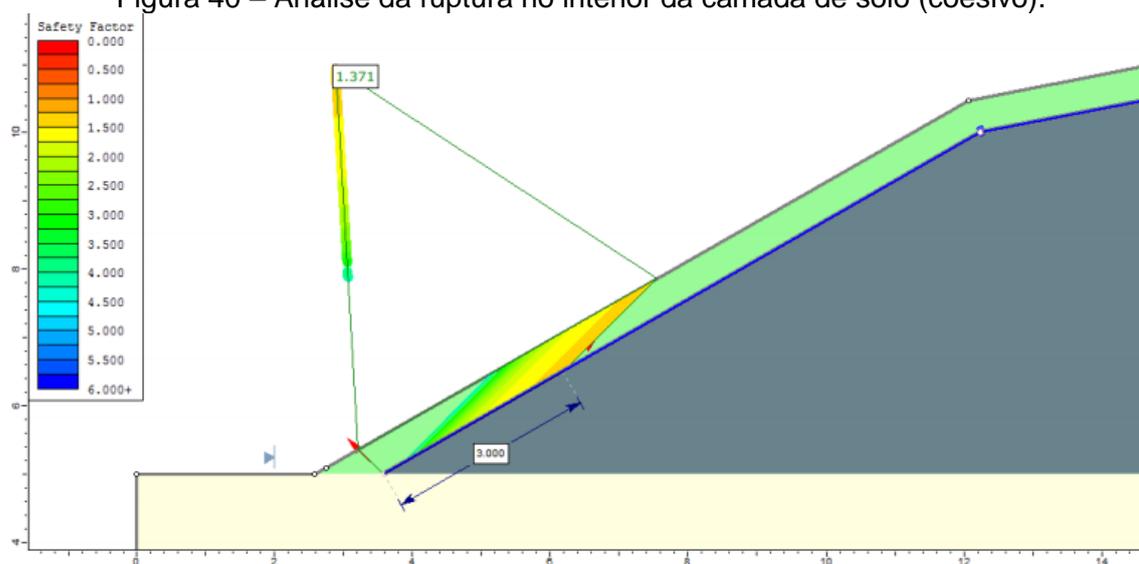
Segundo a Empresa C, a geocélula a ser utilizada no processo construtivo da camada de brita não necessitaria de uma altura elevada do geossintético, como no caso da alternativa 5.2.5. A empresa relata que esta altura pode ser a mínima possível, na ordem de 7 cm. Isto porque a geocélula teria a função apenas de fornecer um suporte à camada de brita no talude, que seria recoberta por solo posteriormente.

5.2.6.2. Análise de estabilidade na interface solo-solo da camada de cobertura

A análise realizada até então foi das camadas de interface entre os diferentes materiais. Porém, é necessário também uma verificação de estabilidade da camada de solo somente, pois a ruptura pode acontecer não só na interface dos materiais, mas também no interior da camada de solo. A camada de solo prevista no Plano de Encerramento do aterro possui 50cm de espessura. Portanto, a interação entre o solo e a brita acontecerá apenas nos primeiros milímetros de contato (interface).

Para esta nova simulação, a Empresa C já considerou o uso de um solo mais coeso que o local, pois mesmo com um solo mais coeso já seria improvável alcançar a estabilidade, devido à elevada inclinação dos taludes. A análise é representada na Figura 40.

Figura 40 – Análise da ruptura no interior da camada de solo (coesivo).



Fonte: Empresa C, 2019.

A simulação da ruptura na camada de solo indica que a distância máxima que se pode considerar estável para um solo coeso é de 3 metros. Apesar do valor para o Fator de Segurança considerado seguro ser de 1,5, o valor obtido de 1.371 foi considerado seguro de modo a arredondar a distância ao longo do talude (3 metros), facilitando a execução da obra. Esse arredondamento ocorreu para que facilitasse a instalação de um outro material, os retentores de sedimentos, que exerceriam a função de seccionar o talude em trechos de 3 metros, possibilitando a estabilização do solo, pela análise de estabilidade.

É importante notar que esta análise de estabilidade já infere a estabilidade na interface solo-brita que, por sua vez, não foi simulada. Essa inferência ocorre pois o ângulo de atrito, parâmetro diretamente proporcional ao FS, na análise solo-solo é de 30°, que é um valor inferior ao da análise solo-brita, o que resulta em um menor Fator de Segurança. Portanto, caso a técnica alcance uma estabilidade para a camada de solo nesta simulação, já subentenderá uma estabilidade na interface solo-brita, não necessitando uma simulação para esta interface.

5.2.6.3. Função dos biologs na técnica

Como afirmado anteriormente, para o alcance de um adequado Fator de Segurança em uma distância de 3 metros ao longo do talude, seria necessário a utilização de um solo mais coeso que o local. Para tal, a Empresa C cita duas

possibilidades: a obtenção de solo argiloso ou, na impossibilidade desta, a mistura do solo local com cimento.

Sendo assim, os retentores de sedimentos teriam duas funções básicas nesta técnica: primeiramente a de seccionar o talude em trechos de 3 metros e também servir de molde para o solo-cimento, caso este viesse a ser usado.

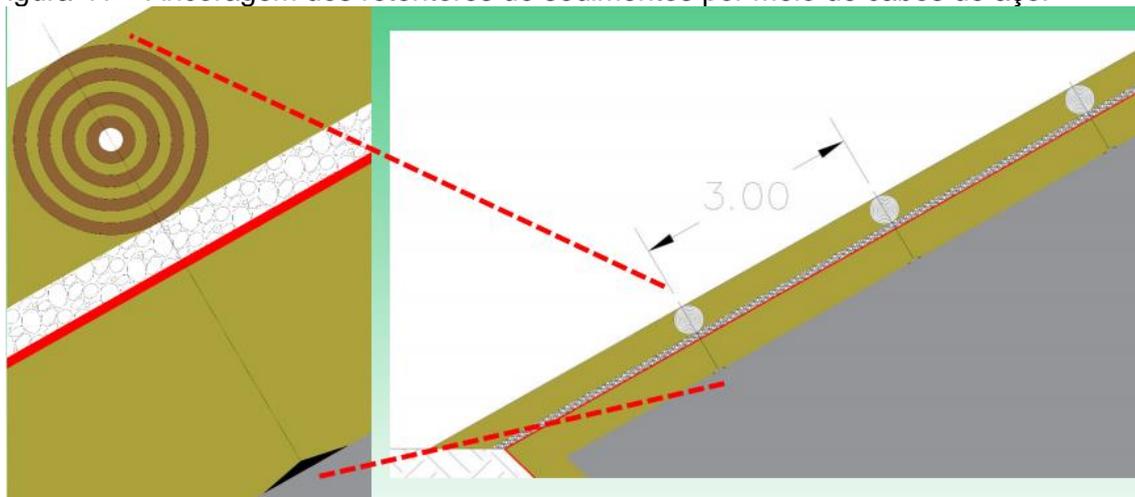
A mistura de solo local com cimento teria a função de melhorar as características de coesão do material, conforme indicado por Caputo, Caputo e Rodrigues (2015, vol. 2).

Segundo a Empresa C, para o processo de revegetação, a mistura de solo-cimento poderia afetar o crescimento das espécies, porém isto poderia ser amenizado com a utilização de uma pequena camada de solo vegetal por cima de todo o conjunto.

Além disso, o cimento necessita de um tempo de vinte e quatro horas para uma completa reação. Antes deste período, seria necessário a utilização de um molde para a contenção da mistura. Sendo assim, os retentores de sedimentos teriam também a função de dar ao solo-cimento este molde para o acabamento.

Nesta técnica de recobrimento, os retentores de sedimentos, utilizados para segmentação e diminuição da extensão dos taludes, precisariam ser fixados de algum modo no talude, de modo que não escorreguem devido ao peso exercido pelo solo. Para a fixação dos retentores, a Empresa C propôs a utilização de ancoragens capazes de transferir o peso por meio de cabos de aço. O peso do volume de solo presente nos 3 metros de comprimento foi estimado em 8 kN/m, sendo este o valor utilizado como referência para escolha da ancoragem a ser utilizada. Uma ilustração do conjunto é representada na Figura 41.

Figura 41 – Ancoragem dos retentores de sedimentos por meio de cabos de aço.



Fonte: Empresa C, 2019.

Apesar das ancoragens em cabos de aço resolverem a questão da fixação dos retentores de sedimentos e fornecerem a resistência necessária para a estabilidade do conjunto, este é um material importado, que aumenta o custo da implantação da técnica. Além disso, a fixação da ancoragem ocasionaria furos na geomembrana, mesmo que pequenos e passíveis de emenda. É importante lembrar que se procura evitar ao máximo causar danos à geomembrana, para que esta não perca a função de impermeabilização. Destaca-se que esta não seria a única interferência a ser realizada na manta, já que haveria ancoragens também para fixar a geocélula a ser colocada. Um exemplo da aplicação destas ancoragens pode ser visualizado na Figura 42.

Figura 42 – Aplicação e funcionamento das ancoragens em cabos de aço.

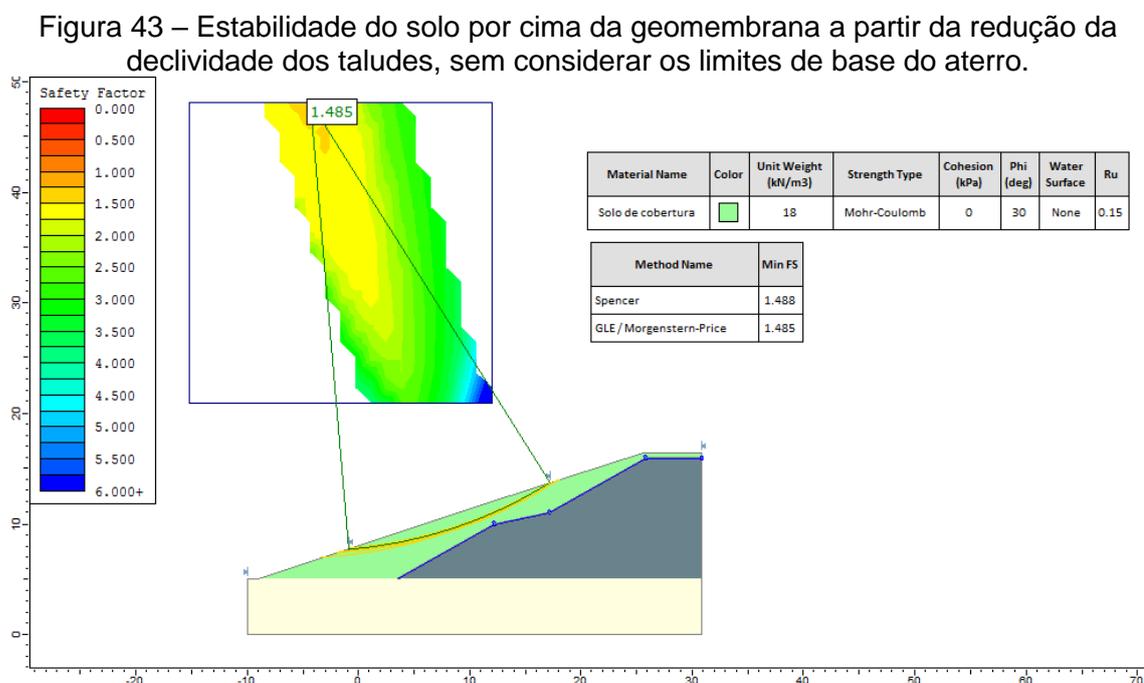


Fonte: Empresa C, 2019.

Por mais que as informações básicas para projeto e implantação desta técnica sejam o Fator de Segurança para a estabilidade dos taludes e o método construtivo de todo o conjunto, ela apresenta diferentes etapas em sua execução. Portanto, isso indica que a mesma deve ser bem executada para propiciar os resultados desejados. Mesmo assim, ainda não significaria que a solução estaria isenta de riscos, uma vez que não se conhece uma execução semelhante em outros locais. Caputo, Caputo e Rodrigues (2015, v. 2) relatam as causas externas e internas que podem afetar a estabilidade dos taludes. Fatores climáticos, como chuvas intensas, por exemplo, não foram considerados na realização do modelo.

5.2.7. Redução da declividade dos taludes com uso do solo local

A Empresa C realizou ainda uma outra análise de estabilidade, na qual foi utilizado apenas o solo de cobertura por cima da geomembrana, numa camada de espessura não constante, buscando reduzir a inclinação dos taludes, para verificar se seria possível atingir a estabilidade apenas com este material, nessa condição. A análise é representada na Figura 43 a seguir.



Fonte: Empresa C, 2019.

A análise indica que utilizando o solo local, considerado predominantemente arenoso (situação mais crítica), seria possível atingir um adequado Fator de Segurança (1,485), caso o aterro tivesse uma área maior em seu entorno. Esta é uma análise considerando apenas o solo local, sem uso de qualquer material que pudesse auxiliar na estabilização, porém, para que a mesma fosse possível de ser executada, seria necessária uma ampliação dos limites do aterro em 12 metros (Figura 44). Observou-se também, com auxílio da Empresa C, que a inclinação dos taludes nessa conformação seria de aproximadamente 18° (1V:3H), conforme indicado no Plano de Encerramento do aterro, mencionado no item 5.2.3., mostrando a importância deste valor de declividade para a estabilidade do talude. Portanto, caso as conformações dos taludes no projeto inicial estivessem presentes no aterro executado, a solução do recobrimento poderia ser simplificada.

Figura 44– Ampliação dos limites do aterro de resíduos perigosos em 12 metros.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

É importante notar que a expansão em 12 metros no perímetro do aterro foi considerada nos maiores ângulos de inclinação dos taludes, isto é, aqueles com declividade próxima a 30° . Portanto, nos pontos em que a declividade é menor, provavelmente a necessidade de expansão também diminuiria. Porém o intuito da

Figura 44 foi apresentar uma noção espacial da necessidade de ampliação na área como um todo.

O recobrimento apenas por solo local seria a solução mais simples possível, e provavelmente a menos onerosa. Porém ainda assim seria necessário tomar os cuidados contra processos erosivos devido às chuvas e ventos, que poderia carrear o solo para os pontos baixos do terreno, vindo a descobrir novamente a geomembrana. Além disso, a área vegetada no entorno do aterro configura-se como uma encosta, o que não foi levado em consideração na análise de estabilidade realizada na Figura 48. Portanto em alguns pontos não seria simples a expansão dos 12 metros, devido à presença das encostas. O licenciamento para disposição de resíduos perigosos também não levou em conta esta expansão, a qual teria de ser averiguada juntamente ao órgão ambiental.

5.3. Avaliação das alternativas/soluções encontradas

A avaliação das técnicas é apresentada no Tabela 3 a seguir, onde são destacados os pontos fortes e fracos de cada uma. Mesmo com a impossibilidade da realização de teste com as novas técnicas para averiguação dos resultados, as alternativas foram avaliadas qualitativamente. A intenção da avaliação qualitativa foi compilar todos os pontos relevantes discutidos.

Tabela 3 – Pontos fortes e fracos das soluções apresentadas.

SOLUÇÃO	PONTOS FORTES	PONTOS FRACOS
Manta com grampeamento	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais: Simplicidade de materiais para a técnica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeabilização: Interfere na barreira impermeável. • Análise de Estabilidade: Não realizada análise de estabilidade para os diferentes escorregamentos na técnica. • Órgão ambiental: Maneira não prevista para o encerramento e cobertura final do aterro e necessita aprovação pelo órgão ambiental. • Bibliografia: Técnica não conhecida de estabilização do solo e não encontrada na bibliografia. • Instalação: Instalação do sistema desconhecida pelo autor.
Biologs com estacas de bambu e Capim-Vetiver	<ul style="list-style-type: none"> • Bibliografia: Técnica conhecida para estabilização do solo e encontrada na bibliografia. • Materiais: Simplicidade de materiais para a técnica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeabilização: Interfere na barreira impermeável. • Análise de Estabilidade: Não realizada análise de estabilidade para os diferentes escorregamentos na técnica, não indicando um valor de FS. • Órgão ambiental: Maneira não prevista para o encerramento e cobertura final do aterro e necessita aprovação pelo órgão ambiental. • Instalação: Instalação do sistema não é tão simples, pois utilizam diferentes materiais.
Geocomposto drenante sobre Geomembrana PVC	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeabilização: Barreira impermeável tem a integridade protegida. • Órgão ambiental: Maneira inicialmente prevista para o encerramento e cobertura final do aterro e aprovada pelo órgão ambiental no processo de licenciamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análise de Estabilidade: Não realizada análise de estabilidade para os diferentes escorregamentos na técnica. • Bibliografia: Técnica não conhecida para estabilização do solo. • Instalação: o Plano de Encerramento propõe uma concepção da cobertura distante da realidade atual do aterro, o que talvez inviabilize sua implantação. • Materiais: Materiais para a técnica não são simples.
Geogrelha tridimensional	<ul style="list-style-type: none"> • Bibliografia: Técnica conhecida para estabilização do solo e encontrada na bibliografia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeabilização: Interfere na barreira impermeável. • Análise de Estabilidade: Não realizada análise de estabilidade para os diferentes escorregamentos na técnica e as análises para a capacidade de carga da geogrelha não foram disponibilizadas. • Órgão ambiental: Maneira não prevista para o encerramento e cobertura final do aterro e necessita aprovação pelo órgão ambiental. • Instalação: Instalação do sistema não é simples, devido à trincheira de ancoragem. • Materiais: Material para a técnica não é simples.
Confinamento celular 20 cm	<ul style="list-style-type: none"> • Bibliografia: Técnica conhecida para estabilização do solo e encontrada na bibliografia. • Instalação: Fácil instalação do sistema, podendo ser realizada manualmente e sem a utilização de máquinas pesadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeabilização: Interfere na barreira impermeável. • Análise de Estabilidade: Não realizada análise de estabilidade para os diferentes escorregamentos na técnica, não indicando um valor de FS. • Órgão ambiental: Maneira não prevista para o encerramento e cobertura final do aterro e necessita aprovação pelo órgão ambiental. • Materiais: Materiais para a técnica não são simples.
Geocélulas e brita	<ul style="list-style-type: none"> • Análise de Estabilidade: Realização de análise de estabilidade para diferentes escorregamentos, em que indicaram Fator de 	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeabilização: Necessidade de pequenos furos na geomembrana, devido à fixação dos retentores de sedimentos.

com <i>biologs</i> e cabos de ancoragem	Segurança adequado.	<ul style="list-style-type: none"> • Órgão ambiental: Maneira não prevista para o encerramento e cobertura final do aterro e necessita aprovação pelo órgão ambiental. • Bibliografia: Técnica não conhecida de estabilização do solo e não encontrada na bibliografia. • Instalação: Instalação do sistema não é simples, devido ao uso de diferentes materiais. • Materiais: Materiais para a técnica não são simples.
Redução da declividade com solo local	<ul style="list-style-type: none"> • Impermeabilização: Barreira impermeável tem a integridade protegida. • Análise de Estabilidade: Realização de análise de estabilidade, em que indicaram Fator de Segurança adequado. • Bibliografia: Técnica conhecida para estabilização do solo e encontrada na bibliografia. • Instalação: Fácil instalação do sistema, mas pode ser que necessite uso de máquinas. • Materiais: Seria utilizado apenas solo local, sem qualquer outro material para auxiliar na estabilização. 	<ul style="list-style-type: none"> • Órgão ambiental: Maneira não prevista para o encerramento e cobertura final do aterro e há ampliação dos limites do aterro em 12 metros, necessitando aprovação pelo órgão ambiental.

Fonte: Próprio autor.

As técnicas foram analisadas segundo os pontos destacados na Tabela 3, e considerando os aspectos técnicos, ambientais e econômicos de cada uma. Portanto, algumas técnicas apresentaram pontos positivos importantes, porém buscou-se confrontá-los com os pontos negativos e, quando estes se apresentaram mais pertinentes, a solução pode não ter sido considerada viável.

A técnica da manta com grampeamentos apresentou dois pontos fracos em relação à viabilidade técnica e ambiental. Uma vez que não foram apresentados nenhum estudo da estabilidade do material sobre a geomembrana e nem do estudo da capacidade de carga dos grampos colocados, faz da aplicabilidade desta técnica muito duvidosa. Além do mais, o fato do grampeamento perfurar a geomembrana reflete de forma negativa no aspecto ambiental, pois iria interferir na barreira impermeabilizante e no enclausuramento dos resíduos perigosos depositados.

Os *biologs*, fixados com estacas de bambu, e plantio de Capim-Vetiver apresentaram uma viabilidade técnica positiva, já que é uma solução já conhecida e aplicada em diferentes situações envolvendo processos erosivos. Além disso, a solução foi executada em uma escala de teste, em que resistiu a diferentes períodos do ano, uma vez que se encontra estável mesmo depois de meses da execução. Porém, do mesmo modo que a técnica anterior, a fixação dos biologs perfuram a barreira impermeabilizante, prejudicando o total isolamento dos resíduos. A interferência na impermeabilização desta técnica é ainda maior que dos grampeamentos, uma vez que as estacas de bambu causam maiores danos à geomembrana. Portanto esta técnica não é aconselhável devido à sua baixa viabilidade ambiental.

O geocomposto drenante sobre a geomembrana PVC, proposto no Plano de Encerramento, é uma solução com boa viabilidade ambiental, uma vez que foi avaliada junto ao órgão ambiental e, na sua elaboração, foram considerados fatores como a proteção da geomembrana e a drenagem de águas pluviais pelo geocomposto drenante. Portanto, é uma solução que teria chances de apresentar resultados satisfatórios. Porém sua viabilidade técnica é de baixo conhecimento, pois a concepção elaborada no Plano de Encerramento apresentava taludes na ordem de 18° (1V:3H). Tal concepção não se encontra presente nos taludes atuais do aterro, o que poderia interferir na estabilidade do geocomposto drenante sobre a geomembrana. Devido à baixa chance da estabilidade do sistema de cobertura, esta solução não foi considerada indicada. A viabilidade econômica também é um pouco

desfavorável, uma vez que a técnica exige o recobrimento de todo o aterro por um outro tipo de geossintético.

A técnica utilizando a geogrelha tridimensional apresentou, em certo ponto, uma boa viabilidade técnica, por ser uma das técnicas destacadas por Koerner (2005). Porém, o fato de ser necessária a realização de pelo menos uma trincheira de ancoragem para a geogrelha e, posteriormente, remendos na geomembrana, faz da viabilidade técnica ser questionada. Além do mais, caso os remendos não fossem capazes de impermeabilizar novamente a cobertura, a viabilidade ambiental da solução seria afetada. Esta técnica também não apresentou uma forma de drenagem e escoamento para as águas pluviais sobre a barreira impermeabilizante, o que poderia interferir na estabilidade do solo colocado sobre a geogrelha. O custo da técnica poderia ficar elevado, uma vez que seria necessária a aplicação da geogrelha em toda extensão dos taludes. Uma aplicação em escala de teste seria indicada, para verificação dos remendos na trincheira e também da estabilidade do solos nos períodos de chuva.

O confinamento celular com 20 cm de altura também é uma solução indicada na literatura (PANTA, CAMPOS, 2016). E, por já ter sido executada em outro local, traz credibilidade à técnica. Apesar da fixação das geocélulas por meio dos cabos de ancoragem na crista dos taludes interferir pouco na barreira impermeabilizante, o que aumenta a viabilidade ambiental da solução, a estabilidade do sistema pode ser um fator questionável, uma vez que não foram realizados testes para saber a quantidade de ancoragens necessárias para a estabilidade do sistema. Também para essa técnica, a drenagem das águas pluviais sobre a geomembrana não foi concebida, aumentando ainda mais a dúvida em relação à estabilidade da ancoragem da geocélula. O custo da técnica, assim como da geogrelha tridimensional, pode ser alto, devido à necessidade de preenchimento dos taludes pelas geocélulas e pela presença dos cabos de ancoragem. Seria indicado a execução em escala de teste, para verificação da capacidade de suporte dos cabos de ancoragem, principalmente em períodos chuvosos, e da estanqueidade do sistema após a interferência na impermeabilização devido às ancoragens na crista do talude.

A alternativa envolvendo o uso de geocélulas, com preenchimento por brita, e *biologs* ancorados por cabos de ancoragem, tem um ponto forte na viabilidade técnica, uma vez que foram feitas diferentes análises de estabilidade em que

apresentaram bom Fator de Segurança. Porém, ainda em relação à viabilidade técnica, esta solução não foi encontrada em outras referências, o que gera um pouco de dúvida em relação a este tipo de viabilidade. Do ponto de vista ambiental, a solução apresenta pontos fortes na questão da drenagem das águas pluviais, uma vez que a brita exerceria esta função na camada. Por outro lado, a brita poderia vir a danificar a geomembrana, o que diminui relativamente a viabilidade ambiental. O uso dos cabos de ancoragem nos *biologs*, para estabilidade do solo argiloso, também afeta negativamente a viabilidade ambiental da solução, pois interfere na estanqueidade da cobertura (perfura a geomembrana), mesmo que com pequenos orifícios. Uma vez que foram realizadas análises de estabilidade, a permanência da técnica ao longo do tempo foi levada em consideração. O custo para a técnica poderia ser maior que das outras soluções, por apresentar maior uso de materiais, como a combinação das geocélulas, brita, *biologs* e cabos de ancoragem. Assim como as duas últimas, é indicado a execução em escala de teste para verificação da viabilidade como um todo, principalmente em períodos chuvosos.

A solução utilizando apenas o solo local para redução da declividade dos taludes, também abordada em Koerner (2005), a princípio parecia a mais indicada, ou a mais simples de ser executada. Porém, a viabilidade técnica da solução é bastante questionável. A princípio seria necessário a consulta ao órgão ambiental para expansão do aterro na área indicada na análise de estabilidade. Esta análise não levou em conta a presença das encostas no entorno, que estão presentes justamente no local onde os taludes são mais íngremes, isto é, na ordem de 30°. Nas outras áreas do aterro, onde não há presença de encostas, mesmo assim a aplicação da técnica é questionável, uma vez que interferiria nas pistas destinadas ao tráfego de caminhões. A simples disposição do solo, sem uso de qualquer técnica para controle dos processos erosivos, também gera dúvidas em relação à durabilidade da solução após fortes intempéries.

Sendo assim, as técnicas apresentaram seguinte classificação quanto à sua indicação:

- Não indicadas:
 - Manta com grampeamento;
 - Biologs fixados por estacadas de bambu e Capim-Vetiver;
 - Geocomposto drenante sobre geomembrana PVC;
 - Redução da declividade dos taludes com solo local.

- Indicadas, sob realização de teste em escala piloto:
 - Geogrelha tridimensional;
 - Confinamento celular de 20 cm;
 - Geocélulas e brita com *biologs* e cabos de ancoragem.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A pesquisa realizada forneceu uma maior compreensão sobre os geossintéticos e os diferentes usos possíveis para estes materiais. É possível notar que estes materiais apresentam uma tendência de uso nas obras envolvendo problemas ambientais, devido às inúmeras vantagens que podem apresentar. Apesar disso, é necessário tomar certos cuidados para utilização correta dos mesmos, como a utilização em taludes com suave inclinação. Caso contrário, ao invés de obter-se vantagens com seu uso, poder-se-á criar maiores desafios, como a desestabilização da camada de solo de cobertura.

Dessa forma conclui-se, com o presente trabalho, que, dentre as sete soluções apresentadas, apenas três são possivelmente ou potencialmente indicadas para a estabilização do solo sobre a geomembrana na cobertura do aterro. Reitera-se a necessidade da execução em escala de teste para averiguação das técnicas. Nota-se que em nenhuma das soluções propostas fez-se o uso da geomembrana texturizada, alternativa discutida em mais de uma das referências consultadas, para aumentar o atrito na interface dos materiais.

Destaca-se também que a solução para o problema em questão poderia ter sido simplificada, caso o Plano de Encerramento do aterro tivesse sido executado conforme previsto. Isso evitaria os taludamentos excessivamente íngremes, fator importante para os casos onde a impermeabilização da camada superior for realizada com a utilização de geomembrana lisa.

Para a continuidade deste trabalho, sugere-se a execução em escala de teste de uma ou mais de uma das técnicas indicadas, analisando-se o comportamento da cobertura, tanto em períodos de seca quanto chuvosos. Assim será possível verificar a estabilidade do solo antes da aplicação da técnica em toda a extensão do aterro. Aconselha-se a realização de um teste laboratorial para o atrito de interface entre a geomembrana e os materiais a serem colocados posteriormente, para avaliação de parâmetros como os ângulos de atrito presentes no projeto.

Além do mais, a busca por outras soluções, elaboradas por empresas ou profissionais da área, que sirvam de comparação para as propostas indicadas, também acrescentam para a continuidade da discussão. Outrossim, a reunião das diferentes informações a respeito do baixo atrito da geomembrana com outros materiais na cobertura de aterros, como já apontado em algumas das literaturas consultadas, faz-se de grande pertinência para o assunto abordado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. Introdução. In: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. Cap. 1. p. 17-30.
- AMBCONSULT ESTUDOS E PROJETOS AMBIENTAIS. **Projeto Básico de Aterro Para Resíduos Classe I**. São Paulo, 2010. 85 p.
- AMBIENTAL PETROCLEAN LTDA. **Perfuração e Descrição do Perfil Litológico**. 2008. 19 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10157: Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997.
- CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 1: fundamentos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 2: mecânica das rochas, fundações e obras de terra**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- CARESSATO JUNIOR, W.; PANTA, C. A. C. **Fechamento de Aterro Classe 1 com utilização de geossintéticos e muros reforçados com face em geocélulas de PEAD**. Campinas, 2018.
- COUTO, L.; GONÇALVES, W.; COELHO, A. T.; PAULA, C. C.; GARCIA, R.; AZEVEDO, R. F.; LOCATELLI, M. V.; ADVÍNCULA, T. G. L.; BRUNETTA, J. M. F. C.; COSTA, C. A. B.; GOMIDE, L. C.; MOTTA, P. H.. **Técnicas de Bioengenharia para Revegetação de taludes no Brasil**. Viçosa: CBCN, 2010.
- DUARTE, A. F. S. **Aplicação de Geossintéticos na Impermeabilização e Selagem de Aterros**. 2009. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.
- ENTITATDEL MEDI AMBIENT – EMA. **El dipòsit controlat de la Vall d'en Joan: Tres dècades de gestió dels residus municipals a l'àrea metropolitana de Barcelona 1974-2006**. Barcelona: Entitat del Medi Ambient de L'Àrea Metropolitana de Barcelona (EMA), 2007.
- GEOACADEMY. **Uso de Geocélulas em Obras de Engenharia: Informações sobre a aplicação de geocélulas em obras de engenharia e seus benefícios, características**

e desempenho. Disponível em: <<https://geoacademy.com.br/p/uso-de-geocelulas-em-obras-de-engenharia>>. Acesso em: 14 set. 2019.

GERSCOVICH, Denise. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GOURC, J. P.; PALMEIRA, E. M.. **Geossintéticos em Drenagem e Filtração**. Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), 2019.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

HOEK, E.; BRAY, J. **Rock Slope Engineering**. New York: Taylor&francis, 1981 apud GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Op. cit.

HUESKER. **Fortrac 3D Geogrid: High-Tensile Anti-Slip Reinforcement with Soil Retention Function**. Gescher, 2019.

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. 5. ed. Pearson Prentice Hall, 2005.

MARQUES, A. C. M.; GEROTO, R. E. Aplicações em Controle de Erosão Superficial. In: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. Cap. 13. p. 421-456.

MEGGYES, T. Landfill applications. In: SARSBY, R. W. **Geosynthetics in civil engineering**. Cambridge: Woodhead Publishing In Textiles, 2007. Cap. 8. p. 163-180.

PANTA, C. A. C.; CAMPOS, M. V. W. de. **Uso de geocélulas de PEAD para proteção mecânica de geomembrana em barragem de usina hidroelétrica em Mato Grosso do Sul**. Campinas, São Paulo, 2016.

REBELO, K. M. W.. **Resistência de Interface entre Geomembranas e Solos através do ensaio de Ring Shear**. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

RUSSO, L. E. **Design method for cover soil stability of lined multi slope/berm systems using continuous geogrid reinforcement**. Trieste, Italy, 2018. 10 p.

SIMÕES, G. F. **Monitoramento Geotécnico dos Aterros de Disposição de Resíduos Sólidos**. Belo Horizonte, 2019. 78 p.

TECNOLOGIA EM CONTROLE AMBIENTAL LTDA - TCA. **Plano de Controle Ambiental - PCA**. 2010. 33 p.

TECNOLOGIA EM CONTROLE AMBIENTAL LTDA– TCA. **Relatório de Controle Ambiental – RCA**. 2008. 110 p.

VARNES. **Slope Movement Types and Processes**, 1978 apud CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 2**. Op. cit.

VILAR, O. M.; BUENO, B. S.; BENVENUTO, C. Aplicações em Barreiras Impermeabilizantes. In: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. Cap. 14. p. 457-504.