

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Ricardo Luís Lachouski

**APLICAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA: DA
ANÁLISE DE 32 CASOS DE OBRAS PARA SOLUÇÕES EM ENGENHARIA**

Florianópolis

2021

RICARDO LUÍS LACHOUSKI

**APLICAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA: DA
ANÁLISE DE 32 CASOS DE OBRAS PARA SOLUÇÕES EM ENGENHARIA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Naloan Coutinho Sampa, Dr.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra

Lachouski, Ricardo Luís

Aplicação de geossintéticos em engenharia geotécnica: da análise de 32 casos de obras para soluções em engenharia / Ricardo Luís Lachouski ; orientador, Naloan Coutinho Sampa, 2021.

124 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Geossintéticos. 3. Engenharia geotécnica. 4. Casos de obra. 5. Soluções em engenharia. I. Sampa, Naloan Coutinho. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Ricardo Luís Lachouski

**APLICAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA: DA
ANÁLISE DE 32 CASOS DE OBRAS PARA SOLUÇÕES EM ENGENHARIA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Civil” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 24 de setembro de 2021.

Prof^a. Liane Ramos da Silva, Dr^a.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
Naloan Coutinho Sampa
Data: 30/09/2021 15:28:21-0300
CPF: 011.389.929-76
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Naloan Coutinho Sampa, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Gracieli Dienstmann, Dr^a.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Bruna Spricigo, M.Sc.
Avaliadora
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha mãe, Rosangela Inês Otto Lachouski, por ser um exemplo de determinação e dedicação. Ao meu pai Lauro Lachouski por ser um exemplo de resiliência e humildade, valores esses que levo comigo. Obrigado por todo o apoio e por tornar possível a realização desse sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, meus pais Lauro e Rosangela por sempre me apoiarem dando todo o suporte necessário em todos os momentos. As minhas irmãs Leticia e Luciane por também me apoiarem nesse caminho, ajudando nas adversidades e compartilhando bons momentos.

Agradeço ao meu orientador Naloan Coutinho Sampa pela imensa compreensão em todo o processo da realização do trabalho, por todos os conhecimentos compartilhados e por todo o suporte apresentado ao longo dele.

Ao professor Rafael Augusto dos Reis Higashi por ter indicado o professor Naloan para a orientação e pelos ensinamentos ao longo da faculdade não só quanto a vida acadêmica, sendo um grande exemplo de professor e profissional.

Ao engenheiro Cássio Carmo da Huesker por ter disponibilizado o e-book com os diversos casos de obras servindo de objeto base de estudo do trabalho.

Agradeço aos professores do ensino fundamental e médio por todo o conhecimento e ensinamentos servindo de base ao ensino superior.

Aos colegas da engenharia civil da UFSC, do centro acadêmico, da empresa júnior, da civil em obras - projeto da reforma curricular pela convivência no dia a dia ao longo da graduação, proporcionando o aumento dos conhecimentos assim como na evolução como ser humano ao longo da jornada acadêmica.

Agradecer aos estimados amigos da faculdade Yan, Paulo Vitor e Eduardo pela amizade ao longo da faculdade, pela ajuda nas adversidades e pelas boas memórias. Aos meus queridos amigos de Florianópolis Matheus, Luiza, Giovana, Daniel, ao meu amigo Tiago e ao meu primo William por todo o apoio e momentos compartilhados ao longo dessa trajetória.

Por fim agradecer a UFSC, universidade pública, por proporcionar um ensino superior de qualidade. Assim como a todos os professores, servidores que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento no ensino superior.

RESUMO

Os geossintéticos, devido a sua versatilidade e inúmeras vantagens, vêm sendo aplicados intensamente em diversas obras da engenharia geotécnica no Brasil. Apesar dos grandes avanços alcançados pelas comunidades acadêmicas e profissionais com a divulgação dos produtos geossintéticos, das teorias de dimensionamento e das técnicas de execução, verifica-se ainda que o entendimento da interação geossintético e solo não acompanha a velocidade de aplicação desses produtos. Em consequência, há inúmeros relatos de mau dimensionamento em várias obras com geossintéticos, especificação e usos indevidos de geossintéticos, adoção de soluções repetidas em obras com características diferentes, entre outros. O objetivo do presente trabalho consiste em avaliar a realidade prática por meio de casos de obras no período de 1998 a 2018 com a aplicação de soluções HUESKER e compreender a interação solo-geossintético para distintas situações de engenharia geotécnica de modo a nortear futuros projetos com soluções em geossintéticos. Para isso, foi elaborada primeiramente uma detalhada revisão bibliográfica sobre principais aspectos relacionados aos geossintéticos, com especial atenção para as propriedades de interesse. As informações da revisão foram essenciais para busca, compilação, separação e codificação dos 32 casos de obras considerados. Os casos de obras foram separados em 4 categorias: aterro sobre solos moles, reforço de pavimentos, estabilização de taludes e obras hidráulicas. Como resultados, o trabalho apresenta uma análise crítica dos 32 casos de obras e soluções de engenharia em forma de desenhos comentados para as quatro categorias. Em obras de aterro sobre solos moles, observa-se o uso predominante de geogrelhas para função de reforço e geotêxteis para fins de separação, filtração, drenagem e proteção, assim como em obras de reforço de pavimentos. Para estabilização de taludes, geogrelhas também são usadas principalmente para função de reforço, geotêxteis para diversas funções e outros tipos de geossintéticos para funções de proteção da face e controle de erosão. Geofôrmas, geocélulas, colchões compostos por geotêxteis, geomembranas e geotêxteis são utilizados com frequência para funções de reforço, proteção, separação e barreiras em obras hidráulicas e de drenagem e filtração. Em todas essas obras, nota-se que o conhecimento e o entendimento das propriedades dos solos são tão importantes quanto os dos geossintéticos para o bom desempenho da obra. As soluções de engenharia apresentadas mostram um conjunto de informações relevantes e importantes para orientar pessoas interessadas na área de geossintéticos, projetistas, engenheiros nos primeiros contatos com produtos de geossintéticos. Por fim, ressalta-se a importância do uso consciente e crescente de geossintéticos em obras de engenharia geotécnica devido às suas vantagens, sendo essas maximizadas em obras que façam uso do adequado conhecimento das propriedades dos solos e das técnicas de dimensionamento e de execução.

Palavras-chave: Geossintéticos. Casos de Obras. Aterros sobre Solos Moles. Reforço de Pavimentos. Estabilidade de Taludes. Obras Hidráulicas.

ABSTRACT

Geosynthetics, due to their versatility and numerous advantages, have been intensively applied in several geotechnical engineering works in Brazil. Despite the great advances achieved by the academic and professional communities with the dissemination of geosynthetic products, design theories and implementation techniques, it is still verified that the understanding of geosynthetic-soil interaction does not keep up with the speed of application of these products. As a result, there are numerous reports of poor design in various works with geosynthetics, inappropriate specification and misuse of geosynthetics, adoption of repeated solutions in works with different characteristics, among others. The present work aims to evaluate the practical reality through cases of works in the period from 1998 to 2018 with the application of HUESKER solutions and to understand the soil-geosynthetic interaction for different geotechnical engineering situations in order to guide future projects with solutions in geosynthetics. To this end, a detailed literature review on main aspects related to geosynthetics was first developed, with special attention to the properties of interest. The information from the literature review was essential for searching, compiling, separating and coding the 32 cases considered. The cases were separated into 4 categories: embankment on soft soils, pavement reinforcement, slope stability and hydraulic works. As results, the work presents a critical analysis of 32 cases of works and engineering solutions in the form of commented drawings for the four categories. In embankment works on soft soils, the predominant use of geogrids for reinforcement function and geotextiles for separation, filtration, drainage and protection functions, as well as in pavement reinforcement works is observed. For slope stabilization, geogrids are also used primarily for reinforcement function, geotextiles for various functions and other types of geosynthetics for face protection and erosion control functions. Geofoms, geocells, geotextiles composite mattresses, geomembranes and geotextiles are often used for reinforcement, protection, separation and barrier functions in hydraulic, drainage and filtration work. In all these works, knowledge and understanding of the soils properties are just as important as those of the geosynthetics for the good performance of the work. The engineering solutions presented show a range of relevant and important information to guide people interested in the field of geosynthetics, designers, engineers in the first contacts with geosynthetic products. Finally, the importance of the conscious and increasing use of geosynthetics in geotechnical engineering area is emphasized due to their advantages, and these can be maximized if the knowledge of soil properties and design and execution techniques are considered.

Keywords: Geosynthetics. Work Cases. Embankment on Soft Soils. Pavement Reinforcement. Slope Stability. Hydraulic Works.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de geotêxtil. a) Geotêxtil não tecido; b) Geotêxtil tecido; c) Geotêxtil tricotado.	7
Figura 2 - Tipos de geogrelha. a) Geogrelha extrudada unidirecional; b) Geogrelha extrudada bidirecional; c) Geogrelha soldada; d) Geogrelha tecida.	8
Figura 3 - Georrede.....	8
Figura 4 - Geomembrana.....	9
Figura 5 - Tipos de geocomposto. a) Geocomposto argiloso; b) Geocomposto drenante.....	9
Figura 6 - Geotubo.....	10
Figura 7 - Geocélula.	10
Figura 8 - Geoexpandido.	11
Figura 9 - Separação.	12
Figura 10 - Filtração.	12
Figura 11 - Drenagem.....	13
Figura 12 - Reforço.	13
Figura 13 - Contenção de fluídos/gases (barreira).....	14
Figura 14 - Controle de processos erosivos.....	14
Figura 15 - Principais aplicações dos geossintéticos.....	19
Figura 16 - Geossintéticos em obras de aterro sobre solos moles.	20
Figura 17 - Mecanismos de instabilidade de aterros reforçados sobre solos moles. (a) Ruptura no material de aterro; (b) Expulsão do solo mole de fundação; (c) Ruptura generalizada.....	21
Figura 18 - Transferência de tensões em estradas com e sem reforço.	24
Figura 19 - Efeito Membrana.	25
Figura 20 - Seções típicas de muro de contenção e talude íngreme reforçados com geossintéticos.....	27
Figura 21 - Fluxograma da metodologia.	31
Figura 22 - Codificação das 32 obras analisadas.....	33
Figura 23 - Obra sobre aterro sobre solos moles.	37
Figura 24 - Via expressa Sul durante a obra.....	38
Figura 25 - Colocação dos megapainéis de geossintéticos.....	40
Figura 26 - Geossintéticos na espera durante a execução da obra.....	42
Figura 27 - Foto aérea do aterro piloto.	43

Figura 28 - Envolvimento da borda da geogrelha.....	45
Figura 29 – Colunas granulares encamisadas na execução da obra.....	46
Figura 30 - Aterro reforçado na base com geogrelhas.....	48
Figura 31 - Reaparecimento das trincas de reflexão.....	51
Figura 32 - Pista do aeroporto.....	52
Figura 33 - Aplicação da solução com geossintéticos.....	54
Figura 34 - Processo de execução do pavimento com geogrelha.....	55
Figura 35 - Compactação da camada de solo selecionado sobre o geotêxtil de reforço e separação.....	57
Figura 36 - Instalação da geogrelha.....	58
Figura 37 - Trinca no pavimento original após fresagem.....	59
Figura 38 - Vista da geogrelha instalada.....	60
Figura 39 - Muro Terrae no condomínio.....	63
Figura 40 - Muro Britador.....	64
Figura 41 - Muro Terrae como contenção.....	66
Figura 42 - Execução da obra de contenção.....	67
Figura 43 - Imagem do muro após o término da construção.....	69
Figura 44 - Geogrelha 3D.....	70
Figura 45 - Obra finalizada com a contenção.....	72
Figura 46 - Detalhe das geogrelhas em espera para realizar envolvimento invertido.....	73
Figura 47 - Revestimento do canal.....	76
Figura 48 - Vista do talude finalizado.....	78
Figura 49 - Confecção dos painéis.....	79
Figura 50 - Vista geral da obra pronta.....	80
Figura 51 - Sistema de proteção costeira em 3 níveis.....	82
Figura 52 - Proteção costeira.....	83
Figura 53 - Conformação dos diques de contenção com tubos para a construção da plataforma em aterro hidráulico.....	84
Figura 54 - Praia artificial El Salitre em Tocopilla, Chile.....	86
Figura 55 - Aplicação de GG e GT para reforço de aterros. a) camada única de reforço, b) multi-camadas de reforço. c) combinação de camada única de reforço com bermas de equilíbrio...	89
Figura 56 - Aplicação de GG e GT para reforço de aterros. a) camada única de reforço com ancoragem, b) multi-camadas de reforço com ancoragem.....	90

Figura 57 - Aplicação de GL para reforço de aterros.	90
Figura 58 – Geossintéticos e técnicas complementares. a) Aplicação de geossintéticos e estacas para reforço de aterros; b) Aplicação de geossintéticos e drenos verticais para reforço de aterros.	91
Figura 59 - Soluções em geossintéticos aplicadas entre recapeamento e revestimento.	93
Figura 60 - Soluções em geossintéticos para o enrijecimento do pavimento.	94
Figura 61- Soluções em geossintéticos para separação e filtração entre camadas de pavimento.	94
Figura 62 - Soluções em geossintéticos para separação, filtração e drenagem entre camadas de pavimento.	95
Figura 63 - Soluções em geossintéticos para diversas funções entre camadas de pavimento. .	95
Figura 64 - Envolvimento de solo expansivo com geossintéticos.	96
Figura 65 - Soluções em geossintéticos para reforço de aterros das vias não pavimentadas. a) Camada de reforço atuando nas extremidades; b) Ancoragem das extremidades por meio de envolvimento; c) Camada única de reforço.	97
Figura 66 - Soluções em engenharia com geossintéticos para estabilidade de taludes. a) Muro de contenção; b) Muro executado em blocos. c) Talude íngreme.	99
Figura 67- Aplicação de geossintéticos em talude com estrutura de contenção. a) Geossintéticos com função de filtração, separação e drenagem; b) Filtração e drenagem em talude com nível d'água elevado.	100
Figura 68 - Aplicação de geossintéticos na vala de drenagem.	101
Figura 69 - Canal com uso de geossintéticos para proteção, separação e barreira.	102
Figura 70 - Aplicação de geossintéticos em canais e reservatórios. a) Geossintéticos em canais preenchidos com concreto; b) Geossintéticos em canais preenchidos com gabiões.	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Matérias-primas mais utilizadas na fabricação de geossintéticos.	11
Quadro 2 - Tipos de geossintéticos e suas funções principais.....	15
Quadro 3 - Quadro síntese: Aterro sobre solos moles.	36
Quadro 4 - Quadro síntese: Reforço de pavimentos.....	50
Quadro 5 - Quadro síntese: Estabilidade de taludes.	62
Quadro 6 - Quadro síntese: Obras hidráulicas.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

APP – Área de Preservação Permanente;
ASM – Aterro sobre Solos Moles;
BGTC - Brita Graduada Tratada com Cimento;
CA – Concreto Asfáltico;
CBR – *California Bearing Ratio*;
CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado à Quente;
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
DVP's – Drenos Verticais Pré-Fabricados;
EST – Estabilidade de Taludes;
FCA – Ferrovia Centro Atlântica;
FIA – Federação Internacional de Automobilismo;
IGS – *International Geosynthetics Society*;
OBH – Obras Hidráulicas;
RPA – Reforço de Pavimentos;
UHOS – *Ultra Heavy Over Size*;

Siglas

C_c – Coeficiente de curvatura;
 C_u – Coeficiente de uniformidade;
EKG – Eletrocinético para drenagem;
EPS – Polietileno expandido;
GA – Geomanta;
GB – Geobarra;
GC – Geocomposto;
GCD – Geocomposto para drenagem;
GCL – Geocomposto argiloso;
GCR – Geocomposto para reforço;
GE - Geoexpandido;
GF – Geofibra, geofôrma;
GG – Geogrelha;

GGB – Geogrelha soldada;
GGE – Geogrelha extrudada;
GGW – Geogrelha tecida;
GI – Geotira;
GL – Geocélula;
GM – Geomembrana;
GN – Georrede;
GP – Geotubo;
GS – Geoespaçador;
GT – Geotêxtil;
GTK – Geotêxtil tricotado;
GTN – Geotêxtil não tecido;
GTW – Geotêxtil tecido;
 k_n – Coeficiente de permeabilidade normal ao plano;
 k_p – Coeficiente de permeabilidade ao longo do plano;
 M_A – Massa por unidade de área (gramatura);
 n_{GT} – Porosidade de um geotêxtil;
 θ – Transmissividade;
 O_{90} ou O_n – Abertura de filtração do geotêxtil;
PA – Poliamida;
PE – Polietileno;
PEAD – Polietileno de alta densidade;
PET – Poliéster;
PP – Polipropileno;
PVA – Álcool de Polivinila;
PVC – Policloreto de Vinila;
 s_u – Resistência não drenada;
 t_{GT} – Espessura do geotêxtil;
 ψ – Permissividade;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	3
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	Objetivo Geral.....	3
1.2.2	Objetivos Específicos	4
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	GEOSSINTÉTICOS	6
2.1.1	Breve histórico de aplicação de geossintéticos no Brasil.....	6
2.1.2	Classificação	7
2.1.3	Funções	11
2.1.4	Propriedades dos geossintéticos	15
2.1.4.1	<i>Físicas.....</i>	16
2.1.4.2	<i>Mecânicas</i>	16
2.1.4.3	<i>Hidráulicas</i>	17
2.1.4.4	<i>Durabilidade.....</i>	18
2.1.5	Aplicações de geossintéticos em obras de engenharia	18
2.1.5.1	<i>Geossintéticos em Aterros sobre Solos Moles</i>	19
2.1.5.2	<i>Geossintéticos em Reforço de Obras Viárias</i>	23
2.1.5.3	<i>Geossintéticos em Reforço de Estruturas de Contenção e Taludes Íngremes.....</i>	26
2.1.5.4	<i>Geossintéticos em Obras Hidráulicas e de Drenagem e Filtração.....</i>	28
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	LEVANTAMENTO DE CASOS DE OBRAS	32
3.2	COMPILAÇÃO DOS CASOS DE OBRAS	32
3.3	SEPARAÇÃO, SELEÇÃO E CODIFICAÇÃO DAS OBRAS	32

3.4	AGRUPAMENTO DAS INFORMAÇÕES	34
3.5	ANÁLISE CRÍTICA DOS CASOS DE OBRAS.....	34
4	RESULTADOS	35
4.1	ANÁLISE CRÍTICA DOS 32 CASOS DE OBRAS COM SOLUÇÕES EM GEOSSINTÉTICOS HUESKER	35
4.1.1	Casos de obras: Aterro sobre Solos Moles	35
4.1.2	Casos de obras: Reforço de Pavimentos	50
4.1.3	Casos de obras: Estabilidade de Taludes.....	62
4.1.4	Casos de obras: Obras Hidráulicas.....	75
4.2	SOLUÇÕES EM ENGENHARIA	88
4.2.1	Aterro sobre Solos Moles	88
4.2.2	Reforço de Pavimentos	92
4.2.3	Estabilidade de Taludes	98
4.2.4	Obras Hidráulicas e Obras de Drenagem e Filtração	102
5	CONCLUSÃO.....	104
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

Desde sempre, o homem tem inserido vários tipos de materiais no solo, visando o seu reforço ou melhoria a fim de atender as condições desejadas. Um histórico resumido da utilização de reforços no solo é apresentado por Palmeira (2018), onde são realçadas as experiências na Mesopotâmia com a utilização de raízes como elementos de reforço desde 1440 a.C. Mais recentemente, nas décadas de 1950 a 1970, os holandeses, americanos e o engenheiro Henri Vidal contribuíram significativamente para o desenvolvimento de técnicas e emprego de elementos sintéticos ou tiras metálicas no solo com finalidade de reforço.

Desde o início dos anos 1970 os geossintéticos vem sendo empregado no Brasil em diversas obras geotécnicas para atender não somente a finalidade de reforço de solos, mas também de drenagem e filtração. Porém o uso se tornou mais intenso na década de 1990. Atualmente, embora o emprego de geossintéticos no Brasil seja menor em comparação com países mais desenvolvidos, tem-se verificado um contínuo crescimento da sua utilização devido a sua versatilidade. Santos e Silva (2019) e Palmeira (2018) afirmam que o contínuo aprimoramento e melhoria da qualidade dos geossintéticos vêm tornando possível a redução de matéria-prima e a utilização de solos que normalmente seriam considerados inadequados para a construção. A redução de custos e do tempo de execução de obras frente a soluções convencionais, somada à melhoria das metodologias de projeto, facilidade de aplicação e transporte, questões ambientais e a sua fabricação em ambiente controlado também são vistos pelos autores como fatores relevantes para o crescimento do uso de geossintéticos.

Os geossintéticos, definidos como produtos poliméricos para uso em obras geotécnicas e de proteção ambiental, apresentam-se como uma solução inovadora, tanto no Brasil como no mundo, para diversas obras, proporcionando uma melhora no resultado final dessas com a sua combinação com materiais naturais. Tendo em conta a variedade dos produtos geossintéticos e a sua versatilidade, os mesmos são aplicados em situações cada vez mais recorrentes, como na: drenagem e filtração; reforço de solos em taludes íngremes; estruturas de contenção; aterros sobre solos moles; controle de erosão; barreira para fluidos e gases; proteção ambiental; reforço de pavimentos; barreira de sedimentos, entre outros.

O desempenho das obras de engenharia com o emprego de geossintéticos depende da interação entre o solo e os geossintéticos de modo a atender as funções de reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, controle de fluxo e controle superficial. Como em qualquer

outro material compósito, a inserção de geossintéticos no solo para diversas finalidades demanda o conhecimento das propriedades do solo, das propriedades do geossintético, das propriedades desejadas para a mistura, das condições climáticas e de outros fatores. Contudo, o domínio de conhecimento das propriedades dos geossintéticos pela parte do pessoal que lida diretamente com projetos de geossintéticos não acompanha a velocidade de inovação e de utilização dos geossintéticos. Essa defasagem entre a elevada taxa de emprego de geossintéticos e a falta de domínio técnico sobre esses produtos acarreta muitas vezes projetos conservadores, mau dimensionados e falhas nas obras.

Por outro lado, esta situação se torna ainda mais preocupante quando as variações das características dos solos - granulometria, permeabilidade, resistência ao cisalhamento, compressibilidade, etc. - são minimizadas de modo que soluções idênticas são adotadas em obras com solos de comportamentos diferentes por alegações de experiência e falta de projetos.

Para minimizar esses problemas e melhorar o custo-benefício dos insumos investidos, Bandeira e Silva (2019) ressaltam a importância de pesquisas em novas soluções geotécnicas. Neste sentido, várias associações, fabricantes e centros de pesquisas relacionados a geossintéticos têm contribuído para o desenvolvimento de pesquisas e disseminação de conhecimentos sobre esse material através de diferentes tipos de eventos. Como fruto desses trabalhos, as obras de médio e grande porte são projetadas cada vez mais com base nos conhecimentos científicos disponíveis, passando a considerar as propriedades do solo e dos geossintéticos.

Considerando as vantagens expostas acima, importantes para atender os requisitos de segurança, qualidade, sustentabilidade e durabilidade desejados em obras de engenharia, o presente trabalho analisa detalhadamente diversos tipos de obras de engenharia. Para esse estudo foram consideradas obras que utilizaram soluções em geossintéticos da empresa HUESKER, disponibilizadas online em 4 volumes de e-book no período entre 1998 e 2018. Adicionalmente, com base na revisão bibliográfica e na análise dos casos de obras, o presente trabalho apresenta um conjunto de soluções em geossintéticos para casos que envolvem aterros sobre solos moles, reforço de pavimentos, estabilidade de taludes e obras hidráulicas.

1.1 JUSTIFICATIVA

O processo de industrialização e os avanços verificados na área de engenharia dos materiais possibilitaram o desenvolvimento de diversos tipos de geossintéticos com melhores propriedades para atender várias funções em inúmeras áreas de engenharia. A engenharia civil, em particular, tem adotado cada vez mais as soluções em geossintéticos por questões ambientais, de custo, rapidez, versatilidade dos produtos geossintéticos, permitindo assim preservação dos recursos naturais e viabilidade técnica ou econômica de muitas obras.

Por outro lado, apesar de se passarem mais de 40 anos do início do uso dos geossintéticos no Brasil, nota-se que existe ainda uma grande lacuna e dificuldade quanto à seleção do material e aos procedimentos executivos e de dimensionamento. O preenchimento dessa lacuna exige por um lado o desenvolvimento de mais pesquisas, enquanto por outro são necessárias ações que visam divulgar, junto aos profissionais e técnicos, os conhecimentos acumulados ao longo desses anos. De forma paralela, é imperativo também divulgar o conhecimento da interação entre geossintéticos e solos, tendo em conta que as propriedades dos geossintéticos tendem a variar pouco durante a vida útil da obra, enquanto que as propriedades dos solos são muito variáveis em função da sua constituição, das condições climáticas, das características da obra e do carregamento externo.

Face aos expostos acima, a realização deste trabalho justifica-se por associar conhecimentos disponíveis na literatura com lições aprendidas nos casos de obras analisados para apresentar soluções em geossintéticos a serem utilizadas para nortear o desenvolvimento de projetos preliminares de vários tipos de obras de engenharia.

1.2 OBJETIVOS

Apresentam-se a seguir o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do presente trabalho consiste em avaliar a realidade prática por meio de casos de obras no período de 1998 a 2018 com a aplicação de soluções HUESKER e

compreender a interação solo-geossintético para distintas situações de engenharia geotécnica de modo a nortear futuros projetos com soluções em geossintéticos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar revisão bibliográfica detalhada sobre conceitos básicos de geossintéticos aplicados em engenharia geotécnica;
- Pesquisar casos de obras de engenharia com soluções em geossintéticos;
- Compilar, separar e selecionar os principais casos de obras levantados;
- Analisar detalhadamente os casos de obras selecionados para estabelecer padrões de comportamentos em termos de desafios, projetos e lições aprendidas;
- Apresentar soluções em geossintéticos para obras de aterros sobre solos moles, reforço de pavimentos, estabilidade de taludes e obras hidráulicas

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para atender os objetivos traçados, este trabalho está organizado em cinco capítulos.

No capítulo 1 é feita a introdução ao tema do trabalho, com destaque e apresentação das ideias que nortearam o desenvolvimento deste trabalho, justificativa, objetivo geral, objetivos específicos e organização do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os conceitos básicos relacionados aos geossintéticos. Assim, ele contém um breve histórico da utilização de geossintéticos no Brasil, classificação, funções, aplicações e propriedades relevantes de geossintéticos.

No capítulo 3, referente à metodologia, são explicados detalhadamente os principais passos seguidos para o desenvolvimento deste trabalho, mostrando como foram feitos os processos

de levantamento, compilação, separação e codificação, agrupamento e análise das informações dos casos de obras adotados.

O capítulo 4 expõe e discute os resultados do trabalho em duas partes. A primeira parte mostra uma análise crítica dos 32 casos de obras com soluções em geossintéticos HUESKER. A segunda parte apresenta as principais soluções em geossintéticos através de desenhos comentados para obras de aterros sobre solos moles, reforço de pavimentos, estabilidade de taludes e obras hidráulicas.

O capítulo 5 mostra as considerações finais e as principais conclusões obtidas nas análises efetuadas nos capítulos anteriores, e também expõe sugestões para trabalhos futuros.

Por último, apresentam-se as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta resumidamente os principais aspectos que permitem entender a evolução, classificação, funções, aplicações e funcionamento de geossintéticos utilizados nas obras de engenharia. De forma complementar, são apresentados alguns conceitos básicos relacionados ao dimensionamento de geossintéticos e necessários para o entendimento dos próximos capítulos.

2.1 GEOSSINTÉTICOS

Geossintéticos são definidos como produtos poliméricos para uso em obras geotécnicas e de proteção ambiental com a finalidade de atender vários tipos de problemas que envolvem reforço de solos e de pavimentos, drenagem e filtração, barreiras para fluidos e gases, controle de erosão, barreira de sedimentos, entre outros.

A seguir, são apresentados alguns aspectos relacionados aos geossintéticos.

2.1.1 Breve histórico de aplicação de geossintéticos no Brasil

No Brasil, os geossintéticos vêm sendo empregados desde o início da década de 1970, principalmente em sistemas de drenagem. Em 1984, foi realizada a primeira obra de solo reforçado com geotêxteis, no km 35 da rodovia SP-123 que liga Taubaté a Campos de Jordão. A partir da década de 1990, os geossintéticos vêm ganhando espaço entre as principais soluções para obras de engenharia, principalmente em aplicações ligadas a drenagem, infiltração e reforço (PALMEIRA, 2018).

Koerner (1998) destacou as principais razões que impulsionaram o progresso e a utilização dos geossintéticos no Brasil e no Mundo: maior controle tecnológico, apelo estético interessante, instalação rápida e eficiente, ampla aplicação devido à sua versatilidade, diminuição do consumo de recursos naturais, possibilidade de uso de estruturas com fácil dimensionamento, mais economia do que soluções tradicionais (em vários casos), viabilidade de construções em solos considerados inadequados e preços competitivos no mercado.

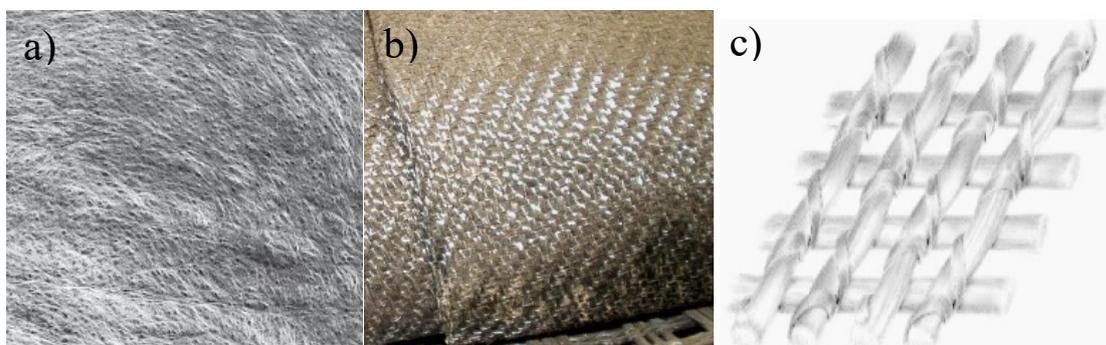
Os conceitos e definições apresentados nos próximos itens são encontrados da mesma forma em vários trabalhos consultados na literatura. Assim, citam-se Ehrlich e Becker (2009) Palmeira (2018), Amaral (2019), IGS Brasil (2020) como as principais referências utilizadas.

2.1.2 Classificação

A Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS – *International Geosynthetic Society*) classifica genericamente os geossintéticos em categorias, dependendo do processo de fabricação. As denominações usuais e breves descrições dos geossintéticos são apresentadas a seguir.

I) Geotêxtil (GT): é um produto (manta) flexível e permeável com funções de separação, proteção, filtração, drenagem e reforço. Geotêxteis são considerados os geossintéticos mais versáteis. Dependendo do processo de manufatura, geotêxtil pode ser classificado em tecido, não tecido ou tricotado. Geotêxtil não tecido (GTN) é um produto constituído de fibras ou filamentos distribuídos espacialmente de forma aleatória, sendo que a sua gramatura depende da taxa de lançamento dos filamentos. Geotêxtil tecido (GTW) é um produto feito pelo entrelaçamento de fios, filamentos únicos ou múltiplos ou laminetes segundo direções preferenciais de fabricação. Geotêxtil tricotado (GTK) é um produto cujos fios são entrelaçados por tricotamento.

Figura 1 - Tipos de geotêxtil. a) Geotêxtil não tecido; b) Geotêxtil tecido; c) Geotêxtil tricotado.

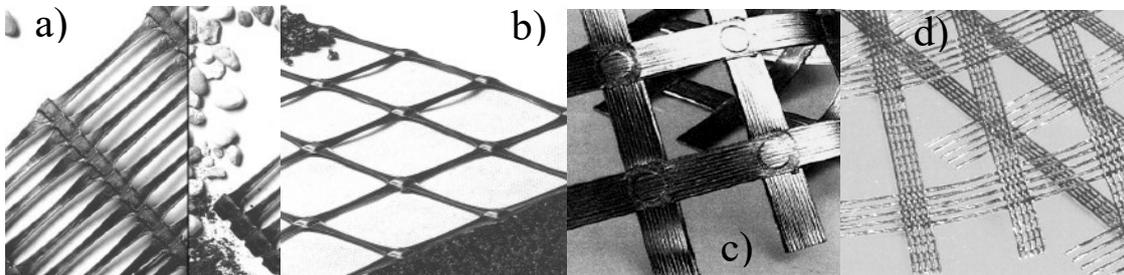


Fonte: a) Palmeira (2018); b) Antunes (2008); c) Vertematti (2001).

II) Geogrelha (GG): é uma estrutura plana em forma de grelha e tem principal função de resistência à tração (reforço de solos). É denominada de unidirecional, quando

apresenta elevada resistência à tração em apenas uma direção, e bidirecional, quando apresenta elevada resistência à tração em duas direções. Dependendo do processo de manufatura, a geogrelha pode ser classificada em extrudada, soldada e tecida. Geogrelha extrudada (GGE) é fabricada através do processo de extrusão e sucessivo estiramento. Geogrelha soldada (GGB) é uma geogrelha, cujos elementos de tração longitudinais e transversais são soldados nas juntas. Geogrelha tecida (GGW) é composta por elementos de tração longitudinais e transversais tricotados ou tecidos nas juntas.

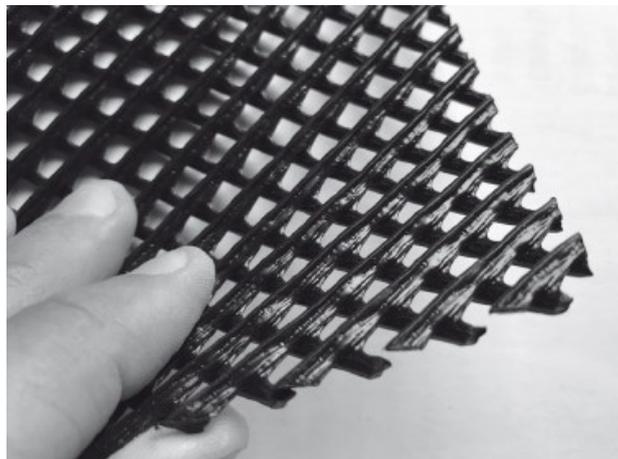
Figura 2 - Tipos de geogrelha. a) Geogrelha extrudada unidirecional; b) Geogrelha extrudada bidirecional; c) Geogrelha soldada; d) Geogrelha tecida.



Fonte: Sieira (2003).

III) Georrede (GN): é um produto com estrutura em forma de grelhas, formado por duas séries de membros extrudados não paralelos, que se interceptam em ângulo constante. É predominantemente utilizado como meio drenante por apresentar alta porosidade ao longo do plano.

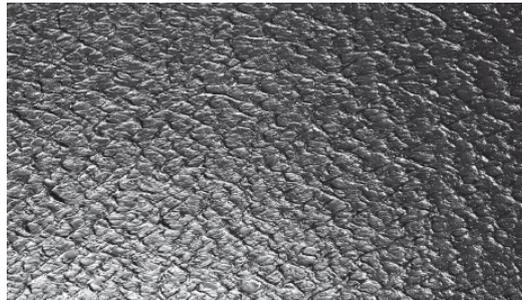
Figura 3 - Georrede.



Fonte: Palmeira (2018).

IV) Geomembrana (GM): é um material contínuo e flexível de baixíssima permeabilidade e produzido com superfícies lisas ou rugosas. É geralmente utilizada como barreira impermeável ou em separação para fluidos, gases ou vapores.

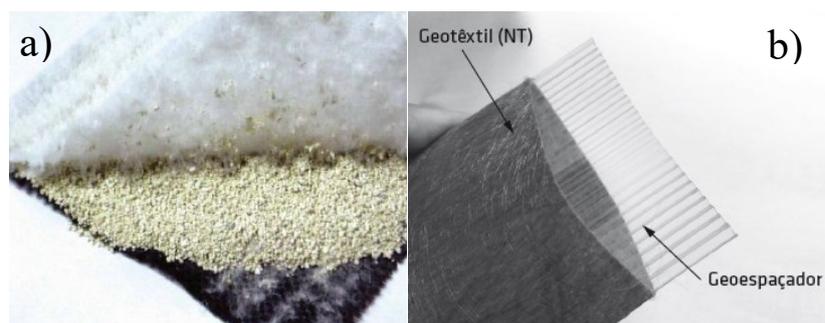
Figura 4 - Geomembrana.



Fonte: Palmeira (2018).

V) Geocomposto (GC): é um produto formado pela associação de dois ou mais tipos de geossintéticos para funções de drenagem, reforço, etc. Geocomposto argiloso (GCL) consiste na associação de geossintéticos a um material argiloso (bentonita) de baixa permeabilidade com o intuito de funcionar como barreira contra líquidos e gases. Quando hidratado, GCL atua efetivamente como barreira para líquido ou gás e é comumente usado em aterros sanitários. Geocomposto para drenagem (GCD) consiste na associação de um ou mais geossintéticos para fins de drenagem.

Figura 5 - Tipos de geocomposto. a) Geocomposto argiloso; b) Geocomposto drenante.



Fonte: a) Amaral (2019). b) Palmeira (2018).

VI) Geotubo (GP): é um tubo polimérico perfurado ou não usado para drenagem de líquidos ou gases (incluindo coleta de chorume ou gases em aplicações de aterros sanitários). Quando perfurado, o geotubo pode estar envolto por um geotêxtil. Possui

elevada resistência a ataques químicos e biológicos, favorecendo assim o seu emprego em obras de disposição de resíduos.

Figura 6 - Geotubo.



Fonte: Vertematti (2001).

VII) Geocélula (GL): é um produto com arranjos tridimensionais abertos e relativamente espessos, constituído por tiras poliméricas. As tiras são soldadas para formar células interconectadas que confinam mecanicamente os materiais nelas inseridas, desempenhando assim funções de reforço e controle de erosão.

Figura 7 - Geocélula.



Fonte: Sieira (2003).

VIII) Geoexpandido (GE): é um material formado por blocos ou placas produzidos por meio da expansão de espuma de poliestireno visando formar uma estrutura de baixa densidade e adequada para substituir materiais de aterros granulares convencionais.

Figura 8 - Geoexpandido.



Fonte: Palmeira (2018).

Para além dos geossintéticos apresentados acima, existem ainda geobarra (GB), geotira (GI), geoespaçador (GS), geofibra, geofôrma (GF), geomanta (GA), geossintético electrocinético para drenagem (EKG), entre outros.

O quadro 1 apresenta as principais matérias-primas utilizadas para fabricação desses geossintéticos.

Quadro 1 - Matérias-primas mais utilizadas na fabricação de geossintéticos.

Matérias-primas	Siglas dos geossintéticos
PA – Poliamida	GT, GI, GB, GCD, GCL
PVC – Policloreto de Vinila	GM, GG, GP
PET – Poliéster	GT, GG, GCL, GCD, GB
PE – Polietileno	GG, GC, GS
EPS – Polietileno Expandido	GE, GCD, GS
PEAD – Polietileno de Alta Densidade	GM, GC, GP
PP – Polipropileno	GT, GG, GCL, GCD, GCR, GP, GM

Fonte: Adaptado Vertematti (2001)

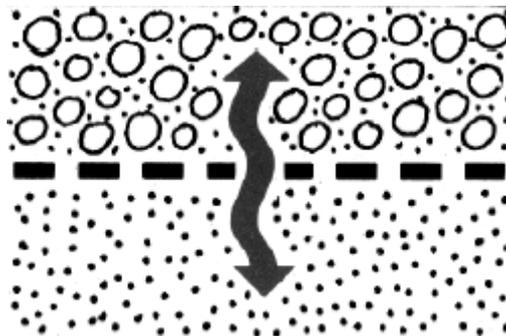
2.1.3 Funções

Como sendo produtos versáteis, é conveniente identificar as funções primárias do geossintéticos como: separação, filtração, drenagem, reforço, contenção de fluidos/gases, ou controle de processos erosivos. Sendo que os mesmos podem desempenhar uma ou

mais funções quando aplicados em obras. São apresentadas a seguir as principais funções dos geossintéticos.

I) Separação: duas camadas de solo com distribuições de partículas muito diferentes podem ser separadas por geossintéticos. Separação de materiais com geotêxteis são frequentes em aterros sobre solos moles e em pavimentos para prevenir o “bombeamento” de finos da camada de subleito para o interior da camada granular permeável e também para evitar que os materiais da base penetrem no solo mole de camadas subjacentes. Essa solução permite a conservação da espessura da camada de projeto e a integridade da via.

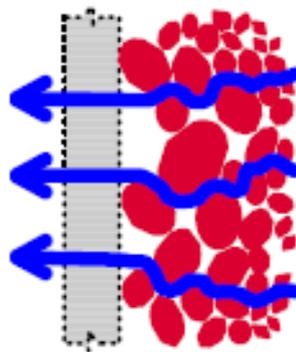
Figura 9 - Separação.



Fonte: Vertematti (2001).

II) Filtração: geossintéticos são empregados para funcionar como filtro de um sistema drenante (filtro granulares convencionais), permitindo a livre passagem de água através do solo, enquanto retém as partículas sólidas.

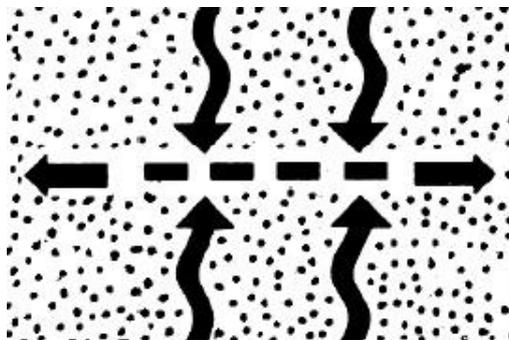
Figura 10 - Filtração.



Fonte: IGS Brasil (2020).

III) Drenagem: geossintéticos são utilizados para drenar fluídos ou gases para lugares predefinidos. Bastante utilizados em solos menos permeáveis e servem também para dissipar excesso de poropressão na base de aterros rodoviários. Os produtos geossintéticos com funções de drenagem podem ser aplicados para fluxos mais elevados, drenos laterais de pavimentos, drenos de taludes e drenos de aterros e muros de contenção. Para aceleração de recalques em solos moles, são geralmente empregados os drenos verticais pré-fabricados (DVP's).

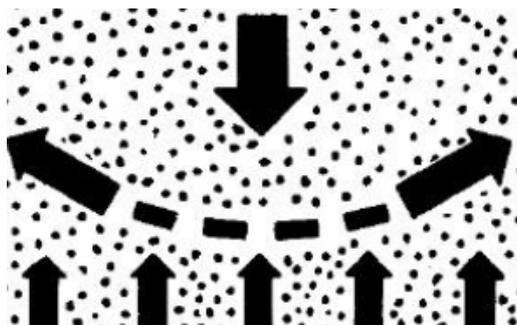
Figura 11 - Drenagem.



Fonte: Vertematti (2020).

IV) Reforço: neste caso, o uso de geossintéticos visa reforçar o solo natural, conferindo-lhe maior resistência mecânica e menor deformabilidade. Para esta finalidade, geotêxtil e/ou geogrelha, produtos com elevada resistência à tração, são geralmente utilizados em aterros estaqueados e estradas sobre solos moles, pavimentos rodoviários e ferroviários, estruturas de contenção e taludes íngremes, entre outros. Maiores cuidados devem ser tomados em solos com alta agressividade química, uma vez que as geogrelhas têm melhor desempenho neste tipo de solo em relação aos geotêxteis.

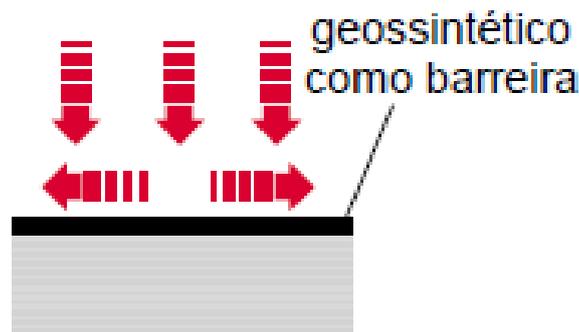
Figura 12 - Reforço.



Fonte: Vertematti (2001).

V) Barreira: geossintéticos são empregados nesse caso como uma barreira relativamente impermeável para minimizar a passagem de fluídos ou gases. Diversos tipos de geomembranas são utilizados com esta finalidade em obras de proteção ambiental e em obras hidráulicas. Além disso, podem ser utilizados na capa asfáltica de pavimentos, no envelopamento de solos expansivos e na contenção de resíduos.

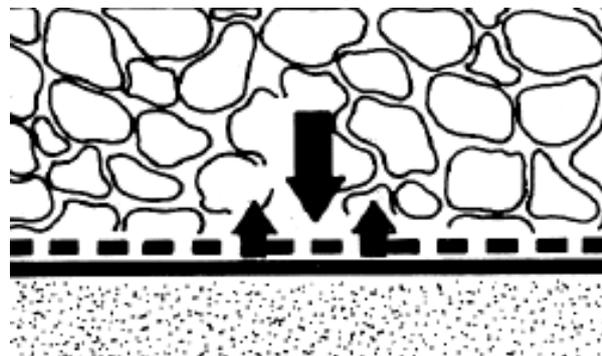
Figura 13 - Contenção de fluídos/gases (barreira).



Fonte: IGS Brasil (2020).

VI) Proteção e controle de erosão: geossintéticos são utilizados para reduzir os efeitos da erosão do solo causados pelo impacto da chuva e pelo escoamento superficial da água. A proteção se aplica também quando um geossintético é utilizado para proteger outro tipo de geossintético contra danos mecânicos. Casos frequentes são os usos de mantas ou colchões de geossintéticos ao longo do talude, usos de geotêxteis para retenção de sedimentos carregados durante o escoamento superficial e usos de geocélulas para proteção de taludes.

Figura 14 - Controle de processos erosivos.



Fonte: Vertematti (2001).

De forma resumida, O quadro 2 relaciona diversos tipos de geossintéticos com as suas funções.

Quadro 2 - Tipos de geossintéticos e suas funções principais.

Tipo	Função						
	Reforço	Filtração	Drenagem	Proteção	Separação	Barreira	Controle de erosão
Geotêxtil	√	√	√	√	√		√
Geogrelhas	√						
Geomembranas				√	√	√	
Geocompostos	√	√	√	√	√	√	√
Geobarras	√						
Geoespaçadores			√				
Geotiras	√						
Georredes			√				
Geotubos			√				
Geomantas						√	√
Geocélula	√						√

Fonte: Palmeira (2018) e Koerner (1998) (adaptado pelo autor).

2.1.4 Propriedades dos geossintéticos

Devido ao alto controle de qualidade na fabricação dos geossintéticos, os mesmos devem atender as características hidráulicas, físicas, mecânicas e de durabilidade requeridas na especificação dos projetos. Segundo Bueno e Vilar (2004), a seleção dos geossintéticos deve-se basear em propriedades de engenharia que traduzam as condições técnicas a que serão submetidos quando em serviço.

Palmeira (2018) ressalta que a utilização de geossintéticos pressupõe o conhecimento de suas propriedades relevantes para aplicação. O tipo de aplicação torna algumas propriedades mais relevantes que outras, em face das condições a que o geossintético estará submetido e de sua finalidade na obra. Os valores de índices de propriedades em projetos são obtidos geralmente através de ensaios normalizados por

normas nacionais e internacionais. Em projetos, são aplicáveis os valores de algumas propriedades físicas, hidráulicas, mecânicas e de durabilidade que devem estar enquadradas dentro de faixas especificadas pelas normas. A seguir são apresentadas as principais propriedades de geossintéticos levadas em conta durante a seleção dos para atender às exigências das obras.

2.1.4.1 Físicas

As propriedades físicas são utilizadas na maioria das vezes para controle rápido checando se as propriedades estão de acordo com o especificado, análise de heterogeneidade ou estimativa de peso, por isso referem-se a qualquer característica física que influencia o comportamento do geossintético. As principais propriedades físicas são a massa por unidade de área (gramatura), a espessura, a porosidade, o diâmetro das fibras ou dos filamentos, a densidade relativa dos polímeros que os compõem.

A massa por unidade de área (gramatura), M_A (g/m^2), é um indicador da uniformidade e da qualidade dos geossintéticos e é definida como massa do geossintético dividida por sua área. A espessura do geossintético, t_{GT} (mm), é definida como a distância entre as superfícies inferior e superior do geotêxtil. A porosidade, n_{GT} , é definida como o volume de vazios dividido por volume total.

De acordo com Amaral (2019), a importância dessas propriedades está diretamente ligada ao fato de poder identificar de forma rápida se o produto está de acordo com o que foi especificado para o projeto em que será aplicado. Por outro lado, Palmeira (2018) afirma que a espessura e a porosidade de geossintéticos são influenciadas pelo nível de tensões submetido. As suas variações com o nível de tensões podem influenciar outras propriedades, tais como: capacidade de retenção de partícula, permeabilidade e capacidade de descarga de líquidos e gases.

2.1.4.2 Mecânicas

Sieira (2003) e Palmeira (2018) reiteram que o conhecimento das propriedades mecânicas é essencial em praticamente todas as aplicações dos geossintéticos. Os geossintéticos estão sujeitos às solicitações mecânicas, em praticamente todos os tipos de

aplicações geotécnicas e em todas as fases da obra. As principais propriedades mecânicas são resistência à tração, resistência de deformação na ruptura, módulo de rigidez, resistência à propagação do rasgo, resistência ao puncionamento, resistência ao estouro entre outras. Essas propriedades se tornam mais importantes quando os geossintéticos são utilizados como materiais de reforço e de impermeabilização.

Durante a fase de instalação e compactação, as principais propriedades mecânicas são resistência à tração, resistência à penetração e à perfuração, resistência aos danos de instalação e resistência à abrasão. Durante a vida útil da obra, as principais propriedades mecânicas são resistência à tração, resistência à penetração e à perfuração, resistência ao deslizamento na interface, resistência ao arrancamento e resistência à fluência.

2.1.4.3 Hidráulicas

As propriedades hidráulicas são relevantes nos casos em que geossintéticos desempenham funções de filtração, drenagem ou barreira. Nessas funções, enquadram-se os geotêxteis, geocompostos argilosos e geomembranas. As principais propriedades hidráulicas são permeabilidade normal e planar, permissividade, transmissividade e abertura de filtração.

Dependendo da direção do fluxo em relação ao plano do geotêxtil, tem-se o coeficiente de permeabilidade normal ao plano (k_n) quando as condições do fluxo são normais ao plano e coeficiente de permeabilidade ao longo do plano (k_p) quando as condições do fluxo ocorrem ao longo do plano. Estudos de Gourc et. al. (1982) e Palmeira e Gardoni (2002) mostram que $k_p > k_n$.

Segundo Palmeira (2018), a transmissividade (θ) fornece uma medida da capacidade desse material de permitir a passagem de fluido ao longo do seu plano e é calculada como sendo o produto de espessura de geotêxtil (t_{GT}) pelo coeficiente de permeabilidade ao longo do plano (k_p). A permissividade (ψ) corresponde a razão entre o coeficiente de permeabilidade normal ao plano (k_n) e a espessura (t_{GT}). A abertura de filtração (O_{90} ou O_n) é uma das principais propriedades consideradas na especificação de geotêxtil como filtro e corresponde à dimensão máxima da partícula de 90% em massa do solo passando através do geotêxtil. Em outras palavras, corresponde o tamanho

máximo da partícula do solo capaz de atravessar o geotêxtil. Essas propriedades hidráulicas também são influenciadas pelo nível de tensões que os geossintéticos estão submetidos.

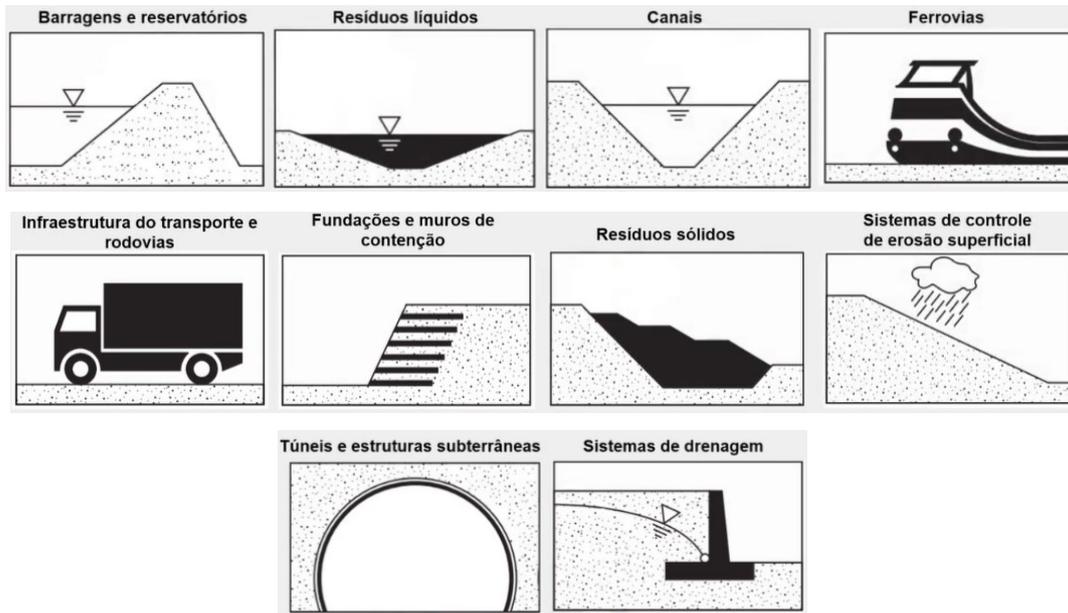
2.1.4.4 Durabilidade

Muitos dos geossintéticos estão sujeitos às diversas condições ambientais ao longo da vida útil da obra. Assim, faz-se necessário investigar a variação dos seus comportamentos ao longo do tempo, principalmente quando expostos à radiação solar, aos agentes químicos e biológicos. As principais propriedades de durabilidade são resistência a agentes químicos, resistência ao ozônio, resistência a agentes biológicos, resistência ao inchamento, resistência aos raios ultravioletas e ao calor, resistência ao fissuramento, resistência à abrasão, entre outras.

2.1.5 Aplicações de geossintéticos em obras de engenharia

Os geossintéticos podem ser aplicados em diversas áreas para atender as funções apresentadas no item 2.1.2. As principais aplicações de geossintéticos (Figura 15), segundo ISO 10318:2005, são sistemas drenantes, fundações em obras de terra e muros de contenção, canais, barragens e reservatórios, rodovias e ferrovias, túneis e estruturas subterrâneas, reforço de asfalto, resíduos e sistemas de controle de erosão superficial e costeira, entre outras.

Figura 15 - Principais aplicações dos geossintéticos.



Fonte: ISO 10318 (2005).

Os itens seguintes apresentam aplicações de geossintéticos em algumas áreas de interesse deste estudo para auxiliar posteriormente na análise e interpretação dos resultados.

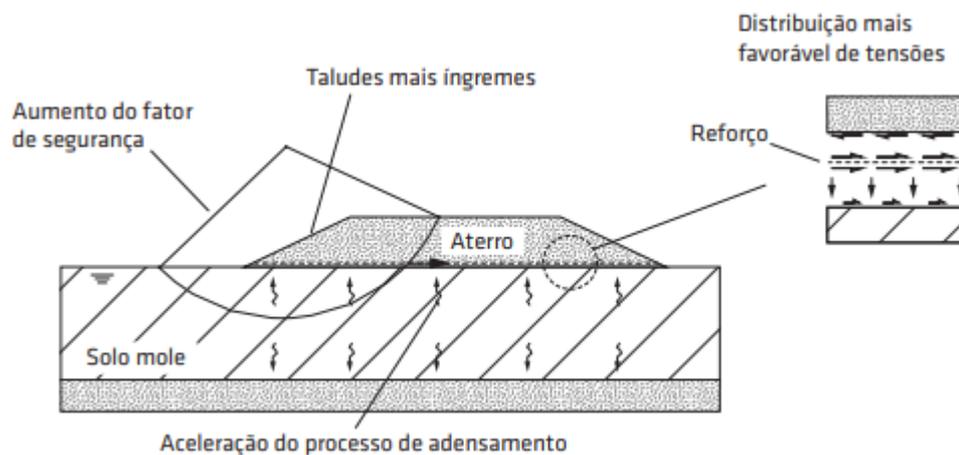
2.1.5.1 Geossintéticos em Aterros sobre Solos Moles

O processo de formação da maioria dos depósitos de solos moles se deve ao carregamento de partículas através das águas de rios, lagoas e mares e posterior sedimentação dessas partículas em suspensão. Por isso, solos moles distribuídos ao longo da costa brasileira consistem predominantemente em partículas de argilas e siltes, com pouca a muita presença de matéria orgânica. Geralmente, esses solos encontram-se no estado normalmente adensado ou ligeiramente pré-adensado na camada superficial. Do ponto de vista geotécnico, são extremamente problemáticos por apresentarem elevado teor de umidade, elevada compressibilidade e plasticidade, baixa permeabilidade e baixa resistência não drenada ($s_u < 50$ kPa) (ALMEIDA E MARQUES, 2014).

Segundo Palmeira (2018), as condições de estabilidade de solos moles podem ser melhoradas com a utilização de geossintéticos (Figura 16), onde estes podem desempenhar função de reforço ou meio drenante para aceleração de recalques por

adensamento. Almeida e Marques (2014) acrescentam que o recurso aos geossintéticos para reforço de solos se faz necessário quando altura admissível é inferior à altura necessária do aterro. Como principais vantagens do uso de geossintéticos em solos moles, pode-se citar: aumento do fator de segurança da obra, construção de aterros de forma rápida com maiores alturas e inclinação de taludes, distribuição de tensões mais favorável no solo mole. Essas contribuições são mais significativas em situações em que a razão entre espessura de solo mole e a largura de base do aterro é menor que 0,7.

Figura 16 - Geossintéticos em obras de aterro sobre solos moles.

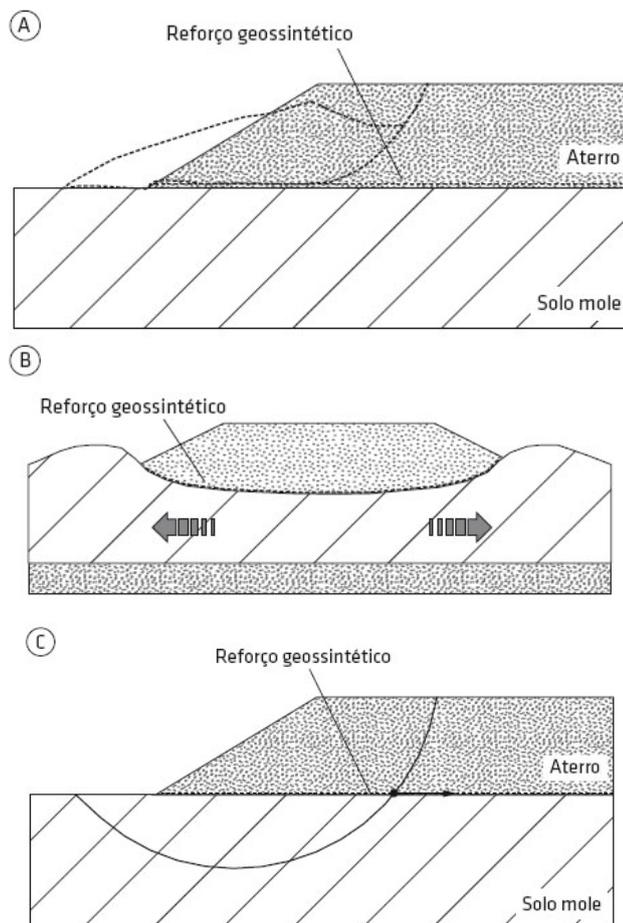


Fonte: Palmeira (2018).

Rowe e Soderman (1985), Hinchberger e Rowe (2003) e Palmeira (2018) chamam atenção sobre alturas de aterros excessivas em solos moles reforçados. Alturas máximas devem ser consideradas uma vez que o nível de deformações necessário para provocar a ruptura do conjunto aterro-fundação não é o mesmo que vai permitir a mobilização da força máxima no reforço. Figura 17 mostra três mecanismos típicos de instabilidade de um aterro reforçado sobre solo mole. O primeiro consiste na ruptura do próprio material de aterro, situação difícil de acontecer, considerando que o aterro é compactado e o solo mole é o material mais fraco. No segundo mecanismo, o solo mole é deslocado lateralmente devido à sobrecarga do aterro. Essa é a situação mais comum em camadas de solos moles pouco espessas. Por fim, o terceiro mecanismo consiste na instabilidade global do conjunto, com uma superfície de ruptura bem definida, cortando aterro, reforço e o solo da fundação. De modo geral, Almeida e Marques (2014) afirmam

que os de modos de ruptura que governam o problema de aterro sobre solos moles são os de ruptura da fundação e ruptura global.

Figura 17 - Mecanismos de instabilidade de aterros reforçados sobre solos moles. (a) Ruptura no material de aterro; (b) Expulsão do solo mole de fundação; (c) Ruptura generalizada.



Fonte: Palmeira (2018).

Para o bom desempenho do conjunto, é de suma importância a especificação correta das propriedades dos reforços de geossintéticos. Essa especificação depende das características do aterro, limites de deformações, requisitos para a operação do aterro e consequências de uma ruptura. Para os reforços, devem ser consideradas a resistência e a rigidez à tração, aderência entre o reforço e os solos, características de fluência, resistência a danos mecânicos e durabilidade (ALMEIDA E MARQUES, 2014; PALMEIRA, 2018). A relevância dessas características vai depender da vida útil da obra. Contudo, são empregados geralmente os reforços geossintéticos com elevada resistência

e rigidez à tração, tais como geotêxteis tecidos, geogrelhas e geocompostos para reforço. Para obras menores, que requerem baixa resistência à tração e não apresentam elevada deformação, recomenda-se a utilização de geotêxteis tecidos. Na base de aterros sobre solos moles, pode-se empregar também geocélula para funcionar como reforço e placa de modo a aumentar a rigidez da base e favorecer a redução de recalques diferenciais (PALMEIRA, 2018).

Almeida e Marques (2014) afirmam que geossintéticos atuam em aterros como um reforço passivo. Ou seja, os solos de fundação e de aterro, ao se deslocarem horizontalmente, induzem deformações no geossintético, que reage e mobiliza um esforço de tração resistente, restringindo o deslocamento das camadas de solo (Figura 16). A mobilização da força necessária no reforço para a estabilização do aterro demanda uma adequada ancoragem das suas extremidades. O comprimento de ancoragem depende dos parâmetros de resistência do solo e da interface solo-reforço (ALMEIDA E MARQUES, 2014; PALMEIRA, 2018). Assim, os materiais de reforço são instalados na base do aterro sobre solos moles de modo a maximizar a contribuição do reforço na estabilização do aterro contra um processo de ruptura generalizada (PALMEIRA, 2018). Almeida e Marques (2014) acrescentam que o reforço colocado na base do aterro tem duas funções: resistir ao empuxo de terra e resistir à deformação lateral da fundação. Por outro lado, Palmeira (2018) ressalta que, caso forem instalados colchões drenantes na base do aterro para trabalhar de forma associada com drenos verticais, os geossintéticos são colocados acima da superfície do solo mole. Dependendo da condição da obra, faz-se necessário em alguns casos a instalação de várias camadas de geossintéticos menos resistentes do que uma única camada com material mais resistente.

Quando aplicados como drenos verticais para aceleração de recalques por adensamento e ganho de resistência, os geossintéticos apresentam algumas vantagens em relação às soluções que envolvem materiais granulares. Muitas vezes, geossintéticos são empregados em aterro sobre solos moles de forma associada com outras soluções, tais como: estacas e colunas granulares.

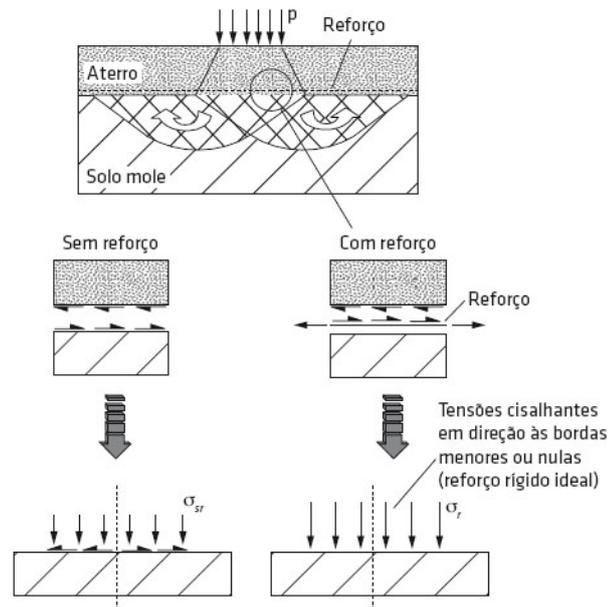
2.1.5.2 Geossintéticos em Reforço de Obras Viárias

Aplicação de geossintéticos em obras viárias envolvem estradas pavimentadas e não pavimentadas e estradas em aterros sobre solos com baixa capacidade de suporte.

Em estradas não pavimentadas e plataformas de serviço, é comum encontrar interrupções em épocas chuvosas, provocando enormes prejuízos econômicos e sociais. O afundamento provocado pelas rodas de veículos pesados é um dos problemas típicos encontrados também nessas estradas sem reforço. De acordo com Palmeira (2018), os principais benefícios do uso de geossintéticos como elemento de reforço em estradas não pavimentadas são: aumento da capacidade de carga do conjunto devido à fronteira rugosa criada entre o aterro e a fundação; melhoria das condições de trafegabilidade por causa da redução das deformações laterais do aterro; diminuição das deformações superficiais da estrada e do solo de fundação; redução da impregnação do aterro pelos finos do solo de fundação, aceleração de recalque por adensamento e ganho de resistência quando for utilizado geotêxtil; menor tempo de construção e aumento da vida útil da estrada e redução de intervenções futuras quando a via for pavimentada.

No que se refere ao mecanismo de transferência de cargas e tensões, Palmeira (2018) afirma que em estradas não pavimentadas nem reforçadas, as tensões cisalhantes na interface aterro-solo de fundação provocadas pelo carregamento superficial são transmitidas para o solo de fundação em direção às bordas do trecho carregado. Por outro lado, em estradas não pavimentadas reforçadas como mostrado na Figura 18, o elemento de reforço absorve parte dessas tensões, sendo mobilizado à tração, reduzindo assim a parcela de carga aplicada no solo.

Figura 18 - Transferência de tensões em estradas com e sem reforço para o caso de solos moles.

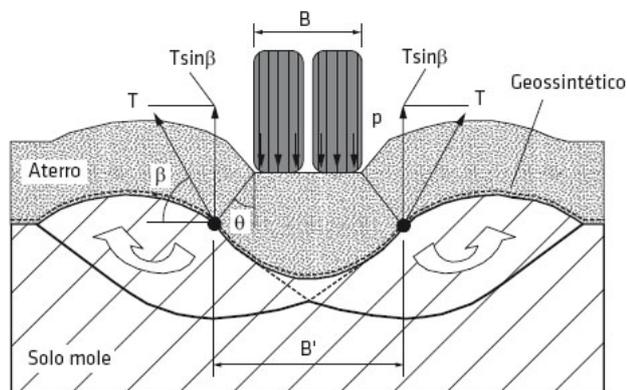


Fonte: Palmeira (2018).

A solicitação do solo da fundação acaba sendo reduzida devido à redução das tensões cisalhantes na superfície do solo. De acordo com Borges (2012), a aderência solo-geogrelha se dá pelo atrito entre a superfície da geogrelha e o solo e pela resistência passiva nos membros transversais, os quais são dependentes do tipo e da geometria do reforço. Também dessa forma, Palmeira (2018) acrescenta que, quando se usa geogrelha, uma boa interação entre ela e o material de aterro também promove um confinamento lateral do aterro que por sua vez diminui as deformações laterais e aumenta a capacidade de carga da estrada. Estradas reforçadas com geogrelhas apresentam melhores desempenhos que as reforçadas com geotêxteis que possuem mesma rigidez à tração.

Góngora (2011) ressalta que os geossintéticos apresentam três mecanismos potenciais de reforço: efeito membrana (Figura 19), restrição à movimentação lateral do solo e aumento da capacidade de carga.

Figura 19 - Efeito Membrana.



Fonte: Palmeira (2018).

O efeito membrana, segundo Palmeira (2018), é de grande relevância em estradas não pavimentadas que toleram trilhas de rodas mais profundas. Os principais benefícios causados por esse efeito são: confinamento do material do subleito e distribuição de tensões verticais ao longo da massa de aterro mais favorável, reduzindo assim tensões e aumentando ângulo de espraio de carregamento. Em função dos benefícios desse efeito, o mecanismo de ruptura típico em estradas reforçadas sobre solos moles é do tipo generalizada, ao passo que a ruptura por puncionamento do material de aterro é o mais típico em estradas não reforçadas. Para Góngora (2015), tal efeito é função da deformação do geossintético e da sua rigidez à tração e tende a reduzir as tensões normais transmitidas ao subleito, aumentando a capacidade de carga do conjunto.

Uma vez instalado, as extremidades do material de reforço devem ser ancoradas para evitar o arrancamento do reforço e diminuir a necessidade de utilização de aterros mais altos. Segundo Afonso *et al.* (2018), ao instalar as camadas de geossintético no maciço, cada região do reforço sofrerá um tipo de sollicitação diferente. O comprimento inserido na zona ativa deve estar preso e aderido nessa região, tendo a função de confinar o solo e transferir os esforços da zona ativa para a zona resistente. O comprimento inserido na zona resistente tem como função a ancoragem da zona ativa, impedindo que haja ruptura no maciço.

Em estradas pavimentadas, quando forem empregados geossintéticos, os mesmos podem desempenhar funções de reforço, separação, drenagem e barreira. Sabe-se que trincas podem surgir em capas de asfalto por causa da ação de sollicitações

decorrentes do tráfego e/ou da variação de temperatura. Nessas situações, geossintéticos podem ser também utilizados abaixo da nova capa asfáltica, quando se faz recapeamento, para minimizar a reflexão de trincas da camada antiga inferior. Como barreiras para evitar bombeamento de finos através de trincas, impregnam-se geotêxteis não tecidos com asfaltos. Também, os geossintéticos podem ser instalados debaixo da capa asfáltica ou da base do pavimento para redução da espessura ou aumento de vida útil dessas camadas.

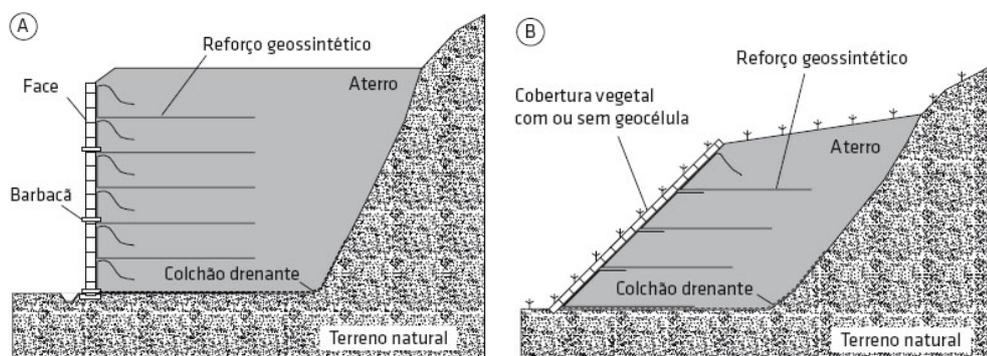
De forma semelhante ao funcionamento de geossintéticos em estradas não pavimentadas, geossintéticos podem oferecer as seguintes vantagens quando aplicados em estradas pavimentadas: restrição à movimentação lateral do material de base, aumento da capacidade de carga do conjunto, dissipação de poropressões quando geossintéticos forem associados a camada drenante, etc. A utilização de geossintéticos como elementos de reforço na base de pavimentos é vantajosa para subleitos com CBR menores que 8%. Nesse caso, recomenda-se o uso de geogrelhas com elevada rigidez à tração (PALMEIRA, 2018).

Por fim, Palmeira (2018) também realça a aplicação de geotêxteis em pavimentação com a finalidade de separar o material nobre do pavimento do material de baixa qualidade do subleito. Essa aplicação é indicada quando CBR do subleito é inferior a 4% e preserva as características mecânicas da base do pavimento por um longo período. Os principais requisitos dos geotêxteis nesse caso, são capacidade de reter os finos do subleito e de resistir aos esforços de instalação, construção e operação da via.

2.1.5.3 Geossintéticos em Reforço de Estruturas de Contenção e Taludes Íngremes

A inserção de materiais com elevada resistência à tração no solo para fins de reforço é uma prática antiga que vem evoluindo com o surgimento de novos materiais industrializados com melhores propriedades mecânicas e maior durabilidade. Assim, uma das aplicações mais comum de geossintéticos na engenharia geotécnica é no reforço de estruturas de contenção (paredes verticais com placas ou blocos nas faces) e taludes íngremes (inclinação das faces), como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Seções típicas de muro de contenção e talude íngreme reforçados com geossintéticos.



Fonte: Palmeira (2018).

Com relação aos espaçamentos entre reforços (< 1 m) e os deslocamentos máximos admissíveis, os limites tolerados em muros são mais rigorosos que os tolerados em taludes íngremes. Métodos construtivos e aspectos de dimensionamento de muros e taludes reforçados são apresentados e amplamente discutidos em Palmeira (2018).

Segundo Sieira (2003), as inclusões de geossintéticos reduzem as deformações no interior da massa reforçada, conferindo ao solo um efeito similar ao do aumento do confinamento. Este confinamento faz com que o material reforçado apresente um melhor comportamento mecânico.

De forma geral, as principais vantagens de muros e taludes íngremes reforçados com geossintéticos consistem no reforço, segurança adicional, na simplicidade e rapidez de execução. O processo construtivo compreende basicamente as seguintes etapas: lançamento e compactação do aterro e instalação dos materiais de reforço nas posições definidas no projeto. Vários estudos chamam atenção a respeito dos cuidados especiais que devem ser tomados durante a compactação próximo à face dos muros para evitar que tensões horizontais geradas por compactação provoquem desalinhamentos, desaprumos e outros problemas nos elementos da face. Palmeira (2018) e Ehrlich e Becker (2009) afirmam que a extremidade da camada de reforço junto à face pode ser fixada por meio de envelopamento e ancoragem, sendo que ancoragem envolve fixação da extremidade de reforço em faces de concreto ou entre blocos.

Geogrelhas e geotêxteis são utilizadas geralmente para fins de reforço, enquanto geomantas podem ser utilizadas em alguns casos para implantação de vegetação na face. Como materiais de face, podem ser adotados placas, blocos, sacos preenchidos com solo

ou solo cimento, gabiões, alvenaria, concreto projetado, etc. Em todos esses casos, deve-se ter cuidado com a integridade e ligação (com presilha) dos geossintéticos. De acordo com Palmeira (2018), para garantir a integridade, é recomendado regularização da base com retirada de elementos que possam danificar o reforço. O comprimento mínimo usualmente recomendado na sobreposição de camadas de reforço é de 0,3 m.

Com relação aos materiais de aterro para muros e aterros íngremes reforçados, são recomendados materiais granulares altamente drenantes, com porcentagem de finos entre 5% a 15% em massa. Não são recomendados materiais que podem provocar danos ou degradação dos elementos de reforços. Em todos os casos, devem ser considerados sistemas de drenagem para garantir estabilidade e bom desempenho das estruturas reforçadas. Por fim, análises de estabilidade dos muros reforçados com geossintéticos devem atender as condições de estabilidade interna, estabilidade externa e estabilidade global.

2.1.5.4 Geossintéticos em Obras Hidráulicas e de Drenagem e Filtração

Em obras hidráulicas, produtos de geossintéticos podem ser aplicados em canais, reservatórios, barragens e túneis hidráulicos para desempenharem funções de impermeabilização e proteção. Em canais, são empregados geralmente geocompostos argilosos para evitar perda de água por infiltração e geomembranas para evitar perda de água por infiltração e por evaporação. Geocélulas preenchidas com concreto também são utilizadas para revestimento de canais, ao passo que geotêxteis não tecidos podem ser aplicados para diversas finalidades.

Em barragens de terra, de enrocamento e outras, podem ser utilizados geotêxteis para proteção de geomembranas, para finalidades de impermeabilização e geocompostos drenantes. A durabilidade desses materiais é muito importante quando são empregados em barragens. Outras aplicações hidráulicas para evitar ou reduzir o potencial erosivo do impacto de ondas envolvem o uso de geofôrmas e tubos geotêxteis.

Segundo Palmeira (2018), o projeto de um sistema de drenagem com geossintéticos requer basicamente o conhecimento teórico de mecânica dos solos necessário para quantificar a vazão que atinge o sistema de drenagem por meio de rede de fluxos, e o conhecimento de propriedades geotécnicas dos solos e das condições de

fronteira. Com relação aos geossintéticos, é preciso conhecer a permissividade, transmissividade e a variação dessas propriedades sob as condições do projeto.

Uma das utilizações mais frequentes do geotêxtil é como camada de filtro em obras geotécnicas e de proteção ao meio ambiente. Nessa função, os geotêxteis devem atender certos requisitos de modo a garantir retenção de grãos de solo, sem colmatação do filtro e sem redução significativa de permeabilidade e maior sobrevivência. O critério de retenção busca garantir que o geotêxtil reterá as partículas de solo, enquanto o critério de permeabilidade busca garantir que o filtro geotêxtil manterá um valor de coeficiente de permeabilidade suficientemente maior que o do solo em contato e compatível com as necessidades do regime de fluxo e as características da obra.

De forma geral, Palmeira (2018) cita tipo e características do solo e aspectos construtivos deletérios como sendo aspectos importantes a serem considerados em obras de drenagem e filtração. Com relação ao tipo e características do solo, atenção especial deve ser dada aos solos com curvas granulométricas descontínuas ou com concavidade voltada para cima e aos solos em ambientes propensos a atividade biológica significativa por causa da possibilidade da colmatação prematura de filtros. Assim, alguns autores definiram critérios para verificação do potencial de instabilidade interna de solos: solos com $C_c > 7$ (Bathia e Huang, 1995), solos com $C_u > 20$ e curva granulométrica com concavidade para cima (Christopher e Holtz, 1985), e $C_u > 6$ e curva granulométrica com concavidade para cima (Lafleur, 1999).

Com relação aos aspectos construtivos deletérios, cuidados devem ser tomados durante a instalação de geossintéticos para não comprometer o seu desempenho como elemento de filtro e/ou drenagem. Dentre esses cuidados, citam-se: a) não passagem de veículos sobre o filtro de geotêxtil, b) não contaminação da camada de filtro por corrida de lama, acúmulo de poeira ou contaminação de núcleo drenante granular, c) evitar materiais de aterro do tipo graúdo, com elementos perfurantes que possam danificar o geotêxtil.

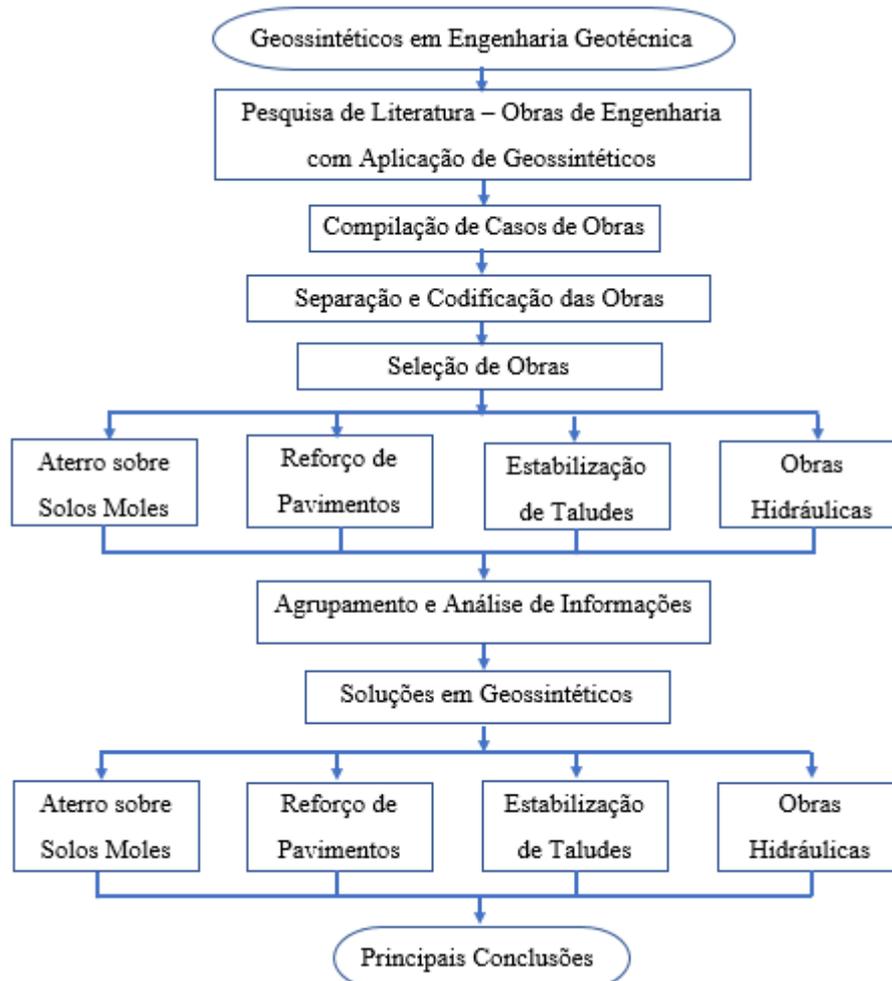
Ainda nos aspectos construtivos, é desejável que o geotêxtil esteja perfeitamente em contato com as paredes das valas drenantes, sem espaços vazios que facilitam migração de finos do solo e podem provocar colmatação por cegamento. Por outro lado, geotêxtil não deve fechar totalmente colchões drenantes nem tubos perfurados imersos para evitar inversão de sequência de camadas de filtro, o que pode provocar o cegamento

do mesmo. Por fim, não é recomendado o uso de produtos geotêxteis diferentes, a menos que possuam as mesmas propriedades hidráulicas e de filtração desejadas para os solos em contato.

3 METODOLOGIA

Com o intuito de analisar casos de obras com utilização de geossintéticos para posterior elaboração e apresentação de um quadro síntese com geossintéticos para diversas aplicações, a metodologia do presente trabalho foi estruturada de acordo com a Figura 21. O fluxograma mostrado contempla os seguintes passos: levantamento de informações na literatura, compilação dos dados, separação e codificação das informações, seleção de obras, agrupamento e análise de informações. Por fim, as etapas anteriores permitiram a elaboração e apresentação do quadro síntese de soluções em geossintéticos e conclusões.

Figura 21 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.1 LEVANTAMENTO DE CASOS DE OBRAS

Esta etapa iniciou-se com busca de casos de obras em artigos científicos, trabalhos de conclusões de curso, dissertação e teses. Na dificuldade de conseguir informações necessárias por meio de literatura, recorreu-se a três (3) empresas fornecedoras de geossintéticos no Brasil, solicitando casos de obras com utilização de geossintéticos. Uma dessas empresas, a HUESKER, forneceu quatro (4) volumes de e-book que reúnem relatos técnicos sobre as mais importantes obras do Brasil e de demais países na América do Sul que contaram com a aplicação de soluções HUESKER num período de 20 anos (1998-2018). Assim, os casos de obras utilizados neste trabalho foram extraídos nos quatro volumes da HUESKER.

De acordo com a HUESKER (2021), a empresa foi fundada em dezembro de 1861 em Gescher/Alemanha e é atualmente líder mundial na fabricação de geogrelhas e geotêxteis de alta resistência. A empresa atua desde 1998 através de seu escritório em São José dos Campos (SP), atendendo a todos os países da América do Sul. A HUESKER tem fornecido soluções para reforço, melhoramento e estabilização de solos e de pavimentos, controle de erosão, tratamento de efluentes, impermeabilização de solos, revestimentos de canais e proteção costeira, entre outros.

3.2 COMPILAÇÃO DOS CASOS DE OBRAS

Para a compilação dos casos de obras foi criada uma planilha no programa Microsoft Excel com as principais informações das 72 obras disponíveis nos e-books da HUESKER. As informações extraídas foram organizadas em seguintes categorias: nome da obra, local da obra, período da obra, produtos geossintéticos utilizados, propriedades do solo, problemas existentes, soluções propostas, solução adotada e observações.

3.3 SEPARAÇÃO, SELEÇÃO E CODIFICAÇÃO DAS OBRAS

Após a compilação das principais informações de todas as obras, foi feita a separação das mesmas em cinco (5) categorias: aterro sobre solos moles, reforço de pavimentos, estabilização de taludes, obras hidráulicas e obras ambientais. A separação resultou num total

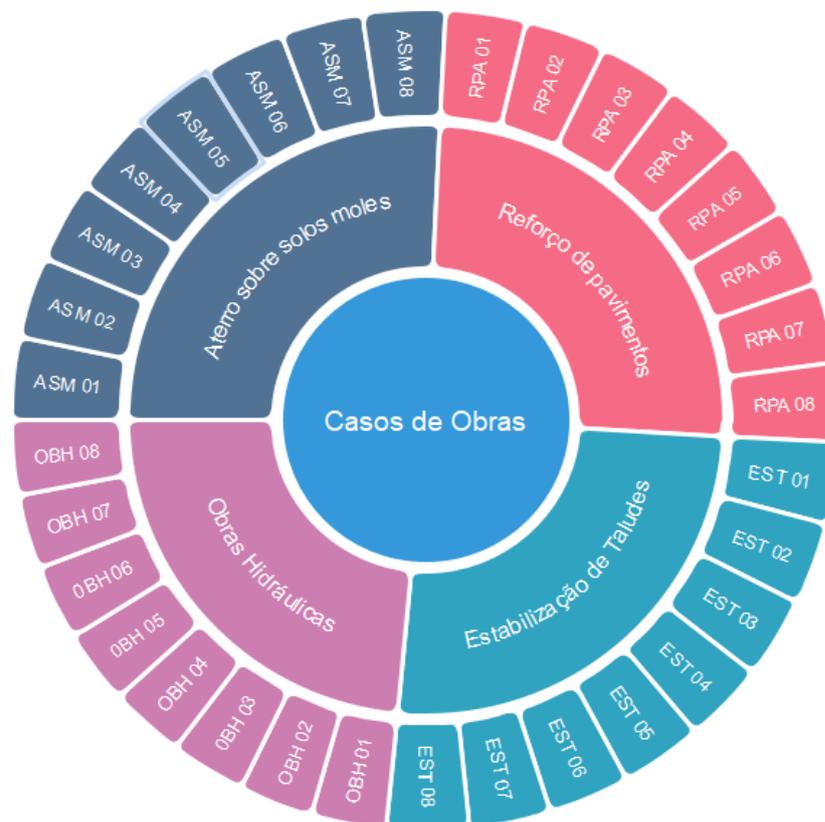
de 16 obras de aterro sobre solos moles, 19 obras de reforço de pavimentos, 20 obras de estabilização de taludes, 8 obras hidráulicas e 8 obras ambientais.

As obras ambientais foram descartadas depois da compilação por consistirem principalmente nas obras que tratam do tratamento de efluentes, não sendo foco desse trabalho. Contudo, ressalta-se que geofôrmas foram bastante utilizadas nessas obras.

Das obras restantes, foram descartadas também as que tinham poucas informações necessárias. Sobre essas obras descartadas, observa-se que a maioria utilizou geogrelhas e geotêxteis como soluções para aterros sobre solos moles e reforço de pavimentos e geogrelhas para estabilidade de taludes. Depois desse descarte, ficaram 8 obras de aterro sobre solos moles, 8 obras de reforço de pavimentos, 8 obras de estabilização de taludes e 8 obras hidráulicas, totalizando 32 casos de obras para análise neste trabalho.

Para facilitar a identificação dessas obras, as 32 obras das 4 categorias foram codificadas da seguinte forma (Figura 22): ASM - aterro sobre solos moles; RPA - reforço de pavimentos; EST - estabilização de taludes e OBH - obras hidráulicas.

Figura 22 - Codificação das 32 obras analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.4 AGRUPAMENTO DAS INFORMAÇÕES

Após a seleção, as obras foram agrupadas em sequência nas suas respectivas categorias, colocando as seguintes informações: dados gerais, problema, soluções proposta e adotada e observações.

3.5 ANÁLISE CRÍTICA DOS CASOS DE OBRAS

Considerando que os problemas e as soluções adotadas em obras não são os mesmos, divergindo assim em função das particularidades das obras, análises críticas foram feitas nas obras de todas as categorias com o objetivo de investigar padrões de comportamento e realçar aspectos relevantes que possam servir de lições para futuras obras. Essas análises constituem a primeira parte do capítulo dos resultados e são essenciais para a elaboração e apresentação de soluções em geossintéticos referentes à segunda parte do capítulo dos resultados.

4 RESULTADOS

O capítulo dos resultados apresenta, analisa e discute brevemente os principais resultados obtidos neste trabalho. A primeira parte consiste na análise crítica dos 32 casos de obras, ao passo que a segunda parte apresenta soluções em engenharia com geossintéticos para diversas aplicações através de desenhos (croquis) comentados.

4.1 ANÁLISE CRÍTICA DOS 32 CASOS DE OBRAS COM SOLUÇÕES EM GEOSSINTÉTICOS HUESKER

Este item apresenta primeiramente os detalhes dos 32 casos de obras selecionados, que envolvem aterros sobre solos moles, reforço de pavimentos, estabilidade de taludes e obras hidráulicas. Essas obras foram executadas no período de 1998 a 2018 em 5 países da América do Sul, 9 estados e 30 cidades brasileiras. No final de apresentação de cada obra, são efetuadas análises críticas sobre os aspectos mais relevantes da obra.

4.1.1 Casos de obras: Aterro sobre Solos Moles

Primeiramente é apresentado abaixo um quadro síntese das 8 obras que envolvem aterros sobre solos moles. Depois é feita a descrição de cada obra com a sua análise crítica.

Quadro 3 - Quadro síntese: Aterro sobre solos moles.

Nome da Obra	Local	Período de Execução	Tipo de Geossintético Usado	Problema Principal
ASM 01 - Aterro sobre solos moles - Interligação Via Dutra - Rod. Carvalho Pinto - São José dos Campos/SP	São José dos Campos, São Paulo, Brasil	Mai/2000-Dez/2000	Geogrelha	O solo local consiste no solo saturado de baixíssima capacidade de suporte e com presença de matéria orgânica na camada superficial.
ASM 02 - Reforço - Aterro Sobre solos moles -Via Expressa Sul - Florianópolis/SC	Florianópolis, Santa Catarina, Brasil	Ago/2001-Dez/2004	Geotêxtil	A implementação do traçado da Via Expressa Sul necessitou da expansão da área em direção ao mar, ocupando assim parcialmente uma região de mangue.
ASM 03 - Aterro sobre solos moles - Beira-Mar Continental - Florianópolis/SC	Florianópolis, Santa Catarina, Brasil	2004/2006-2011	Geotêxtil e Geogrelha	O terreno é alagado e apresenta lâmina d'água de até 2 m de altura e com influência de maré.
ASM 04 - Melhoramento de solos moles CSA - Companhia Siderúrgica do Atlântico - Bacia de Sepetiba/RJ	Bacia de Sepetiba, Rio de Janeiro, Brasil	2006-2010	Geogrelha	O solo local apresenta baixa capacidade de suporte em espessura de até 20 m, sendo que o nível d'água encontra-se na superfície.
ASM 05 - Porto/Aterro sobre solos moles Terminal portuário Embraport Santos/SP	Santos, São Paulo, Brasil	2007-2008/2009-2013	Geotêxtil e Geogrelha	As condições geotécnicas adversas e o trabalho em áreas alagadas com lâminas de água de até 5 m de alturas, atingindo a faixa de terraplenagem durante a obra.
ASM 06 - Aterro estaqueado - BR-364 - Jataí/GO	Jataí, Goiás, Brasil	2010	Geogrelha	A área onde foi executada a obra é constituída de solos moles de baixa capacidade de suporte e sujeitos a recalques expressivos.
ASM 07 - Aterro sobre solos moles - BR-448	Rio Grande do Sul, Brasil	2014	Geotêxtil e Geogrelha	O traçado da obra engloba extensos trechos de aterros sobre solos moles, junto às áreas de proteção ambiental.
ASM 08 - Estrada de Acesso ao Polo Petroquímico Itaboraí/RJ	Itaboraí, Rio de Janeiro, Brasil	2013	Geotêxtil e Geogrelha	O traçado de quase 8 km da rodovia passa numa região com geologia e topografia desfavoráveis, compostas de profundas camadas de solos muito moles.

Obra ASM 01

Esta obra foi executada entre maio e dezembro de 2000 e consiste num aterro sobre solos moles em uma interligação da Via Dutra na rodovia Carvalho Pinto em São José dos Campos, São Paulo.

Problema: a região da obra possui alto volume de tráfego, requerendo assim uma ligação direta e rápida entre as duas vias para desafogar o tráfego. A interligação foi planejada num trecho de 8 km em pista dupla, atravessando perímetro urbano às margens do Córrego do Vidoca. O solo local consiste no solo saturado de baixíssima capacidade de suporte e com presença de matéria orgânica na camada superficial (Figura 23).

Soluções proposta e adotada: a solução proposta inicialmente foi a remoção de uma parte da camada do solo mole até a profundidade média de 5 m para implantação dos aterros rodoviários com alturas variando de 2 m a 4 m. Posteriormente, verificou-se a necessidade de remoção de um volume de solo muito superior ao previsto. A solução adotada, considerada a mais viável, para grande parte do trecho, foi a de aterro reforçado por geogrelhas para garantir a estabilidade global da estrutura. Em alguns subtrechos foram utilizados drenos verticais com sobrealtura de aterro para aceleração de recalques. No total, foram utilizados cerca de 50.000 m de geogrelhas com resistências à tração na direção longitudinal de 110 kN/m, 200 kN/m, 300 kN/m e 400 kN/m e de 30 kN/m na direção transversal. A solução adotada permitiu minimizar o volume do material removido e o impacto ambiental à região, bem como foi possível cumprir o cronograma da obra.

Figura 23 - Obra sobre aterro sobre solos moles.



Fonte: Huesker (2020).

Análise crítica: A solução adotada nesta obra é uma das soluções tradicionais em aterros sobre solos moles. A utilização de geogrelhas com alta resistência à tração em aterros em conjunto com drenos verticais para aceleração de recalques viabiliza execução de obras em menor tempo e com menos impacto ambiental. Embora não foram fornecidos detalhes sobre custos, é de esperar que a solução adotada seja também mais econômica por não precisar de escavação, transporte e descarga do material que seria escavado. Por fim, vale a pena pontuar que não foram identificados os critérios em relação a separação de camadas nesta obra para separação dos materiais das camadas uma vez que nada foi comentado a respeito do uso de geotêxteis.

Obra ASM 02

Esta obra - Via Expressa Sul com quatro faixas de tráfego em cada sentido (Figura 24) - foi executada em Florianópolis entre agosto de 2001 e dezembro de 2004 devido a necessidade de interligar o aeroporto ao centro da cidade de forma rápida e direta.

Figura 24 - Via expressa Sul durante a obra.



Fonte: Huesker (2020).

Problema: a implementação do traçado da Via Expressa Sul necessitou da expansão da área em direção ao mar, ocupando assim parcialmente uma região de mangue. Os primeiros 22 m do solo dessa região consistiram numa argila muito mole de alta compressibilidade e com resistência não drenada na ordem de 4 kPa nas camadas mais superficiais e não ultrapassou 18 kPa no fundo da camada mole.

Soluções proposta e adotada: devido às características do solo mole foi proposta a utilização de geossintéticos para reforçar o aterro. Duas camadas de geotêxteis (inferior e superior) de alta

resistência foram utilizadas como reforço para possibilitar plataformas adequadas de trabalho e garantir a estabilidade de aterro de aproximadamente 5 m de altura a longo prazo, durante a fase de adensamento. Para além das duas camadas de geotêxteis, foram também utilizadas bermas de equilíbrio para garantir a condição de estabilidade do aterro e drenos verticais na área de ocupação do corpo principal para acelerar recalques. Outras soluções especiais foram utilizadas para instalação de geotêxteis abaixo do nível d'água ao longo de 400 m de extensão. Por fim, foram instrumentadas diversas seções com inclinômetros e placas de recalque para garantir a execução com segurança e monitorar o desempenho da obra. O recalque máximo previsto foi de 2,5 m, porém foi medido cerca de 2 m de recalque após três meses do início da execução, possibilitando assim a colocação da via em serviço com pavimentação provisória. O pavimento definitivo foi executado 10 meses após a liberação do tráfego.

Análise crítica: apesar de ser uma obra grande e complexa, adoção de soluções em geossintéticos associadas às outras técnicas possibilitou a execução da obra em um solo muito mole em curto espaço de tempo. É de ressaltar também a utilização de geotêxtil em substituição de geogrelhas, favorecendo a homogeneidade e minimizando os recalques diferenciais. Em aterros maiores, faz-se necessário a disposição de mais de uma camada de geossintéticos, das bermas de equilíbrio e de drenos verticais, como foi realçado no capítulo 2. Um outro aspecto importante em obras maiores é a instalação de instrumentações para monitorar o desempenho durante e após a execução de obras, permitindo tomadas de decisões com maior agilidade.

Obra ASM 03

Esta obra consiste na implantação da Avenida Beira-Mar Continental na cidade de Florianópolis. Um aterro foi executado para ganho de aproximadamente 60 m em direção ao mar, já que a área é formada por edificações do bairro Estreito. A obra aconteceu entre 2004 e 2006, tendo uma paralisação e sendo finalizada em 2011.

Problema: a área onde foi construído o aterro é caracterizada superficialmente por argila marinha de baixa resistência e elevada compressibilidade. O terreno é alagado e apresenta lâmina d'água de até 2 m de altura e com influência de maré. O principal desafio dessa obra foi justamente a definição do processo construtivo mais adequado, dadas as dificuldades naturais de se realizar uma obra sobre terreno alagado.

Soluções proposta e adotada: a solução proposta foi a execução de aterro hidráulico sobre terreno melhorado e estruturado. Para isso, foram utilizados geogrelhas para estabilização do aterro, colunas granulares para melhoramento do solo e drenos verticais para aceleração de recalques. Como elementos de contenção do aterro hidráulico, foi proposta a utilização de geotêxteis de modo a executar a obra em um bom ritmo e sem prejuízos ambientais.

No processo executivo, foram utilizados “megapainéis” compostos por 3 camadas de geotêxteis e 2 de geogrelhas de diferentes comprimentos e larguras de 15 m (Figura 25). Para instalação dos geossintéticos, tubos com 15 m desses materiais eram movimentados para a posição de colocação e deixados flutuar através de tamponamento das suas extremidades. Através de cabos de aço, os geossintéticos eram desenrolados até o *offset* do aterro hidráulico e, depois, sacos de areia eram lançados sobre os painéis para acelerar sua submersão.

Figura 25 - Colocação dos megapainéis de geossintéticos.



Fonte: Huesker (2020).

Diversas técnicas foram utilizadas para auxiliar no envelopamento em três (3) níveis do material do aterro hidráulico com geotêxteis à medida que avançava a altura do aterro hidráulico. O reforço estrutural do aterro foi feito com duas camadas de geogrelha para possibilitar posteriormente a cravação de drenos verticais. A instalação de drenos verticais se deu a partir da cota de aterro, acima do nível d'água. Em seguida, o aterro foi finalizado de forma normal com mais 3 m de espessura, totalizando 5 m de espessura típica de alteamento. Ao todo, a obra de terraplenagem durou aproximadamente 2 anos. Por fim foi executado um enrocamento de proteção do talude submerso do aterro. A paralisação da obra em 2006 e a sua retomada em 2011 foi benéfica para o processo de adensamento.

Análise crítica: essa obra apresenta um alto nível de complexidade em termos executivos, por envolver solos moles em áreas alagadas com lâmina d'água em torno de 2 m e com influência da maré. As soluções adotadas fogem das tradicionais e mostram um certo nível de inovação. As técnicas adotadas para instalação de geogrelhas visando a estabilização e de geotêxteis visando a contenção (envelopamento) do aterro hidráulico foram essenciais para construção do aterro até o nível d'água, e possibilitaram também o uso de técnicas complementares como colunas granulares para melhoramento do solo e drenos verticais para a aceleração dos recalques. Em obras dessa magnitude, é importante ter um bom planejamento na montagem dos geossintéticos antes da instalação visando a agilidade e o aproveitamento do período com maré baixa. O período de 5 anos de paralisação foi favorável no processo de adensamento, porém é algo que nem sempre é possível dentro de uma obra.

Obra ASM 04

Esta obra foi executada entre 2006 e 2010 na área litorânea da Baía de Sepetiba, no Rio de Janeiro, onde se encontra a Companhia Siderúrgica do Atlântico. Na época, a planta construída foi considerada o maior investimento privado do Brasil e um marco na engenharia com aplicação de geossintéticos para reforço de solos.

Problema: o solo local apresenta baixa capacidade de suporte em espessura de até 20 m, sendo que o nível d'água encontra-se na superfície. A camada de solo mole saturado mais superficial com 8 a 10 m de espessura, considerada a mais crítica, apresenta resistência não-drenada entre 5 e 15 kPa. Devido às características do solo local, o terreno fica sempre alagado após chuvas intensas e prolongadas. As análises de estabilidade feitas nos locais das pilhas de estocagem e dos trilhos de movimentação resultaram em baixos fatores de segurança. Além disso, os recalques e deslocamentos horizontais calculados eram muito superiores aos limites aceitáveis para a operação dos pátios. A solução desejada para esse problema considerou não somente os aspectos técnicos, mas também a redução de custos, e a execução da obra em uma área de 380.000 m² num prazo de dois anos.

Soluções proposta e adotada: a solução adotada consistiu na instalação de 270.000 m lineares de colunas granulares encamisadas em toda a área de implantação dos aterros de infraestrutura

para as *runways* para melhorar a capacidade de suporte do terreno e limitar recalques produzidos pelo carregamento dos equipamentos, especialmente os de longo prazo.

Sobre colunas granulares, na base do aterro, foi instalada uma camada de geotêxtil tecido (Figura 26) de resistências de 200, 250 e 275 kN/m por toda extensão. Em seguida, colocou-se uma camada intermediária de areia compactada com 15 cm de espessura e uma camada superior de geogrelha de PVA com resistências de 500 a 1600 kN/m. Ao todo, foram consumidos mais 1 milhão de metros quadrados de geotêxteis e geogrelhas.

O encamisamento das colunas com geossintético permitiu estimar com maior precisão o consumo de material granular, evitou a formação de bulbos no solo mole e a contaminação do material drenante, garantindo a integridade das colunas.

Figura 26 - Geossintéticos na espera durante a execução da obra.



Fonte: Huesker (2020).

Análise crítica: aterro reforçado sobre colunas granulares é comumente utilizado em camadas espessas de solos muito moles. Nessa obra, para além da grande área de trabalho, as exigências de menor custo e rápida execução foram satisfatoriamente atendidas por meio de soluções em geossintéticos. Ressalta-se a importância do encamisamento de coluna granular para manter não só as condições de permeabilidade, mas também a capacidade portante, verticalidade e diâmetro das colunas. Por outro lado, o custo com o encamisamento pode ser compensado pela redução do volume do material uma vez que os materiais não misturam com o solo natural. O emprego de geossintético na base no aterro desempenha principalmente a função de separação, mas também ajuda no reforço.

Obra ASM 05

Nesta obra, foi executada um porto/aterro sobre solos moles na margem esquerda do porto de Santos, na ilha de Barnabé. O aterro piloto foi realizado parcialmente entre os anos de 2007 e 2008. A obra foi retomada e finalizada entre 2009 e 2013.

Problema: o terreno da área de implantação do Terminal Emraport é constituído essencialmente de solos moles da baixada santista com até 40 m de espessura. Este solo é conhecido por apresentar elevada compressibilidade e baixa resistência não-drenada - inferior a 25 kPa a 20 m de profundidade. Dois dos grandes desafios presentes na realização do projeto eram as condições geotécnicas adversas e o trabalho em áreas alagadas com lâminas de água de até 5 m de alturas, atingindo a faixa de terraplenagem durante a obra.

Soluções proposta e adotada: a primeira etapa, iniciada em 2007 e concluída em 2008, consistiu na implantação do empreendimento através da construção de um aterro piloto de 20.000 m² para estudo do solo e balizamento do projeto geotécnico (Figura 27). O aterro na cota + 3 m possui aproximadamente 200 m de extensão dividida em três segmentos. Em cada um dos segmentos, foram instalados drenos verticais para acelerar recalques. Em toda área, foi colocado o aterro reforçado na base com uma geogrelha de poliéster, sem revestimento, de 800 kN/m de resistência nominal na direção longitudinal e malha de grande abertura de 30 × 30 cm. Esse tipo de geogrelha foi utilizado devido à necessidade de facilitar a sua instalação sob água e a possibilidade de cravação posterior de mais drenos verticais.

Figura 27 - Foto aérea do aterro piloto.



Fonte: Huesker (2020).

A primeira fase do projeto executivo iniciou em 2009 após análise dos resultados de monitoramento do aterro piloto e da reavaliação do projeto geotécnico. Essa construção foi concluída em 2013. Os resultados de instrumentação nas três áreas do aterro piloto não mostraram diferenças substanciais quanto à magnitude dos recalques ocorridos, por isso foi excluída a possibilidade de uso drenos verticais na fase do projeto executivo final. O aterro construído nesta fase foi reforçado com geogrelhas instaladas na base e com bermas de equilíbrio. Geotêxteis tecidos também foram colocados para reforçar aterro de conquista da área e fechamento e contenção das bordas do aterro, executado hidraulicamente até a cota de nível d'água. No total, 650.000 m² de geotêxteis e mais de 1.000.000 m² de geogrelha foram consumidos na obra. A instalação de geogrelhas foi um desafio e demandou o uso de rebocadores para transportar os painéis e mergulhadores para submersão e posicionamento.

Análise crítica: esta obra apresenta complexidade executiva, por envolver grandes áreas em regiões submersas e aterro hidráulico. Ressalta-se a importância de um bom planejamento antes do início de instalação dos geossintéticos, considerando o grande volume de material consumido e a necessidade de rebocadores e mergulhadores. Foi inteligente a seleção e instalação de geogrelhas, pensando na facilidade futura de aplicação dos drenos verticais, um fator de otimização executiva ainda mais em uma região alagada, com lâmina d'água de 5 metros. A execução do aterro piloto foi uma estratégia também bem pensada, permitindo o uso de resultados de instrumentação para planejamento do projeto executivo, reduzindo custos e tempo de execução. Observa-se novamente o uso de geotêxteis e geogrelhas para atender os requisitos de projeto executivo.

Obra ASM 06

Esta obra, realizada em 2010, consiste na reforma e adequação de um trecho da BR-364 em Jataí, Goiás com um aterro estaqueado.

Problema: a área onde foi executada a obra é constituída de solos moles de baixa capacidade de suporte e sujeitos a recalques expressivos. O principal problema reside na seleção de técnicas adequadas para execução da obra de forma segura.

Soluções proposta e adotada: uma das soluções propostas foi o estaqueamento do aterro reforçado. Estacas pré-moldadas com diâmetro de 33 cm foram cravadas em malha quadrada com espaçamento de 2,30 m × 2,30 m. Capitéis com bordas chanfradas foram posicionados em cima das estacas. Os chanfros nas bordas e a colocação de uma camada de areia com espessura de 20 cm sobre os capitéis vem com a função de proteger a geogrelha contra a abrasão do capitel. Como reforço, geogrelhas bidirecionais de PVA com resistência à tração nominal de 200 kN/m foram posicionadas no topo dos capitéis. As geogrelhas foram devidamente ancoradas através do envelopamento nas extremidades dos painéis (Figura 28).

Figura 28 - Envelopamento da borda da geogrelha.



Fonte: Huesker (2020).

Para limitar recalques diferenciais na superfície do aterro e para também garantir a transferência de carga para estacas, cuidados foram tomados com relação à máxima deformação permitida no reforço.

Análise crítica: a técnica construtiva adotada nesta obra reduz significativamente os recalques diferenciais no aterro devido à instalação de estacas com capitéis. Vale ressaltar a importância do uso de capitéis chanfrados e ancoragem de reforços por envelopamento, permitindo assim bom desempenho do aterro reforçado. Por outro lado, a utilização de geogrelhas bidirecionais é necessária em situações em que há esforços de tração nos dois sentidos. Por fim, ressalta-se que a adoção de estacas pré-moldadas deve levar em consideração a resistência do solo local para prever aterros de conquistas que facilitam a circulação e operação de maquinários necessários para instalação de estacas.

Obra ASM 07

Esta obra executada na BR-448, em 2014, foi uma alternativa adotada para desafogar parte do trânsito da BR-116 entre Canoas e Porto Alegre, no Rio Grande do Sul.

Problema: o traçado da obra engloba extensos trechos de aterros sobre solos moles, junto às áreas de proteção ambiental, exigindo assim construção de diversas passagens de fauna em túneis sob a rodovia e 4.500 m em pontes e viadutos.

Soluções proposta e adotada: tendo em conta a presença de solos moles em quase todos os trechos dos lotes 1 e 2 do projeto e da necessidade de construção de obras de arte, a solução adotada foi o uso de geogrelhas de alta resistência para reforço de aterros altos sobre colunas granulares. Os aterros apresentavam 11 m de altura em alguns casos, principalmente nos encontros de pontes e viadutos. A aceleração dos recalques na camada do solo mole foi feita por meio de instalação de drenos verticais. Ao todo, foram utilizados 170.000m² de geogrelha com resistências nominais que chegaram aos 1.400kN/m.

Antes da execução das obras de arte em cima dos aterros reforçados, foram executadas colunas granulares encamisadas no entorno das pontes e viadutos de ambos os lotes. O encamisamento das colunas garantiu estabilidade e a capacidade de carga necessária. Espaçamentos adequados entre as colunas foram definidos para evitar empuxos laterais excessivos nas fundações das estruturas. A profundidade das colunas acompanhava a espessura da argila mole, que em algumas áreas chegava a 9 m (Figura 29).

Figura 29 – Colunas granulares encamisadas na execução da obra.



Fonte: Huesker (2020).

O monitoramento de uma das áreas reforçadas demonstrou a eficácia da solução utilizada, que gerou uma redução da ordem de 50% dos empuxos sobre as fundações da estrutura. Os recalques ocorridos na área reforçada foram reduzidos a um terço dos recalques medidos na área não reforçada.

Análise crítica: para além de envolver solos moles, essa obra também contém a execução de várias obras de arte. Um aspecto interessante nesta obra foi a preocupação em definir corretamente o espaçamento entre colunas granulares de modo a manter a integridade e bom desempenho dos elementos de fundações de obras de arte. Por outro lado, devido a quantidade de obras de arte em lugares diferentes, é imperativo analisar o processo executivo de cada caso levando em consideração as características do solo e da obra de arte e a dinâmica dos trabalhos devido ao fluxo contínuo de veículos e pedestres no entorno da obra. De novo, verifica-se a importância de combinar mais de uma solução – geogrelhas, drenos verticais e colunas granulares encamisadas para atender os requisitos do projeto.

Obra ASM 08

Esta obra faz parte da estrutura *off-site* do polo petroquímico em Itaboraí no Rio de Janeiro, permitindo seu acesso através da rodovia BR-493. A estrada em cima do aterro sobre solos moles foi construída em 2013 como parte do sistema viário necessário para a construção e operação da refinaria.

Problema: o traçado de quase 8 km da rodovia passa numa região com geologia e topografia desfavoráveis – compostas de profundas camadas de solos muito moles, com até 18m de espessura. Ao longo do traçado foram construídas quatro obras de arte especiais de transposição de rios com áreas propensas a alagamentos e o cruzamento em nível com a Ferrovia Centro Atlântica (FCA). Além de questões de prazo da obra, as dimensões elevadas e o peso dos equipamentos UHOS (Ultra Heavy Over Size) são outras condicionantes para o planejamento e execução da obra.

Soluções proposta e adotada: a primeira solução adotada foi a utilização de geotêxtil tecido com resistência à tração nominal de 50 kN/m para reforço da camada de areia com espessura mínima de 50 cm, formando a plataforma de trabalho para o acesso inicial dos equipamentos

de terraplenagem e outros. O geotêxtil tecido também atuou como separador entre os solos moles da fundação e o colchão de areia, evitando sua contaminação.

Para estabilização dos aterros com altura entre 2,5 m e 5,5m e controle dos recalques na fase operacional do acesso, foram determinadas três soluções distintas com geossintéticos para a fundação em solos moles. A primeira solução consistiu na utilização de aterros estaqueados nos encontros de pontes para reduzir significativamente os recalques diferenciais e totais. Estacas foram instaladas em malhas quadradas, sendo que capitéis de concreto são posicionados em cima das estacas. O aterro foi reforçado por meio de duas camadas de geogrelhas de PVA, posicionadas perpendicularmente entre si, com a ancoragem por valas ou envelopamentos nas extremidades.

Na segunda solução, foi considerada a utilização de aterros reforçados sobre colunas granulares encamisadas em zonas de transição. As áreas com colunas fazem a transição entre uma solução rígida (aterros estaqueados) para uma solução flexível (aterros reforçados na base). Por fim, a terceira solução consistiu em aterros de pré-carga reforçados na base com geogrelhas (Figura 30), com o objetivo de compensar e antecipar os recalques para o tempo de execução da obra, dessa forma as deformações remanescentes durante a fase de operação seriam mínimas.

Figura 30 - Aterro reforçado na base com geogrelhas.



Fonte: Huesker (2020).

Análise crítica: esta obra representa um caso típico de aplicação de geossintéticos em projetos complexos. As três (3) soluções adotadas em trechos diferentes da obra trabalharam juntas, embora com rigidezes diferentes. Aterros reforçados estaqueados, aterros de pré-carga e aterros reforçados sobre colunas granulares encamisadas, fazendo uma transição da primeira mais rígida para a última mais flexível. Como referido anteriormente, o encamisamento de colunas granulares tende a apresentar muitas vantagens, por isso não é prudente analisar somente o custo

da camisa de geossintéticos sem se preocupar com o desempenho final da coluna. Como reforços, são aplicadas geogrelhas, enquanto outros geossintéticos desempenham função de separação.

COMENTÁRIOS GERAIS: praticamente todas as obras utilizaram em conjunto geotêxteis e geogrelhas em aterros sobre solos moles. Dependendo da complexidade e das condições da obra e da magnitude dos recalques tolerados, é possível combinar diversas soluções na mesma obra, tais como: reforços do aterro, bermas de equilíbrio, drenos verticais, colunas granulares encamisadas, estacas com capitéis, etc. Muitas situações envolvem obras abaixo do nível d'água e terrenos totalmente alagados. Assim, é importante ter um bom planejamento antes da montagem dos geossintéticos e da construção dos aterros para prever equipamentos e profissionais necessários, bem como o monitoramento da obra através de instrumentação.

4.1.2 Casos de obras: Reforço de Pavimentos

Primeiro é mostrado abaixo um quadro síntese das 8 obras que envolvem reforço de pavimentos. Depois é realizada a descrição de cada obra com a sua análise crítica.

Quadro 4 - Quadro síntese: Reforço de pavimentos.

Nome da Obra	Local	Período de Execução	Tipo de Geossintético Usado	Problema Principal
RPA 01 - Sistema antirreflexão de trincas de bases cimentadas - Anel Viário de Campinas/SP	Campinas, São Paulo, Brasil	Ago/00	Geogrelha	Foram verificadas trincas na camada de revestimento devido às trincas refletidas da base cimentada.
RPA 02 - Reforço de Pavimento de Pista Aeroporto Salgado Filho - Porto Alegre/RS	Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil	Jan/02	Geogrelha	O pavimento apresentava muitas placas quebradas e em elevado estágio de desagregação.
RPA 03 - Aeroporto/ Restauração de Pavimento Aeroporto de Congonhas - São Paulo/SP	Santos, São Paulo, Brasil	2007	Geogrelha	Foi observado que todas as juntas da camada rígida do concreto foram refletidas na camada asfáltica superficial.
RPA 04 - Reforço de Base de Piso Industrial Centro de Distribuição Translövato - São José dos Pinhais/PR	São José dos Pinhais, Paraná, Brasil	2008	Geogrelha	Reduzida capacidade de suporte do solo para atender as cargas do tráfego e dos materiais armazenados no piso industrial.
RPA 05 - Centro de Distribuição Cervejaria Quilmes - Buenos Aires, Argentina	Buenos Aires, Argentina	2012	Geotêxtil	A camada superior do aterro não é adequada para receber cargas estruturais da obra.
RPA 06 - Aeroporto Afonso Pena - São José dos Pinhais/PR	São José dos Pinhais, Paraná, Brasil	2012	Geogrelha	Durante a execução do pavimento, cerca de 40.000 m ² da área apresentaram problemas de trincamento prematuro.
RPA 07 - Restauração de Pavimento Autódromo de Goiânia/GO	Goiânia, Goiás, Brasil	2013	Geogrelha	Elevada concentração de trincas na superfície do pavimento.
RPA 08 - Restauração da 3ª faixa da BR-227 - Trecho Irati-Palmeira/PR	Palmeira, Paraná, Brasil	2016	Geogrelha	Inúmeras intervenções foram realizadas na pista, durante vários períodos, sempre com o intento de controlar propagação de trincas.

Obra RPA 01

A obra da rodovia José Roberto Magalhães Teixeira em Campinas, São Paulo, foi executada em agosto de 2000. A estrutura da rodovia é constituída de uma camada de BGTC (Brita Graduada Tratada com Cimento) e de uma de revestimento asfáltico em CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado à Quente) aplicado em 3 camadas.

Problema: alguns meses após a aplicação da primeira camada de CBUQ (Faixa “B”, DNER), foram verificadas trincas na camada de revestimento devido às trincas refletidas da base cimentada. Essas trincas transversais de origem térmica, com grande potencial de propagação (aberturas entre 5 a 50mm), foram observadas ao longo do trecho, com intervalos regulares entre 8 a 10m (Figura 31). A causa provável desse trincamento foi relacionada à elevada rigidez da mistura cimentada, devido à retração da camada de base por causa de altos teores de cimento. Um sistema antirreflexão de trincas de bases cimentadas foi necessário no anel viário.

Figura 31 - Reaparecimento das trincas de reflexão.



Fonte: Huesker (2020).

Soluções proposta e adotada: algumas soluções foram tentadas inicialmente, sempre buscando reduzir o impacto no cronograma e nos custos da obra. A medida corretiva inicial foi a fresagem, seguida da reposição em CBUQ convencional. Essa medida, porém, não impediu o ressurgimento de novas trincas no mesmo local onde havia sido executada a fresagem. A solução definitiva foi a aplicação de uma faixa de geogrelha de poliéster de alto módulo com 1

m de largura sobre as trincas transversais. Nas regiões de trincamento com aberturas menores que 6 mm, a geogrelha foi aplicada diretamente sobre a trinca. Onde existiam trincas com maiores aberturas, se realizou uma fresagem na largura de 30 cm, com reposição de concreto asfáltico convencional, antes da aplicação da geogrelha. Após a colocação da geogrelha, foram colocadas as camadas de CBUQ especificadas no projeto.

Os resultados finais mostraram excelente desempenho da geogrelha como sistema antirreflexão de trincas vindas das camadas subjacentes.

Análise crítica: é comum o aparecimento de trincas em capas novas de asfalto devido às solicitações do tráfego e/ou da variação de temperatura. As soluções tradicionais de fresagem seguida de reposicionamento de CBUQ não evitam geralmente o ressurgimento de trincas. Assim, o recurso a utilização de geossintéticos parece ser uma solução, uma vez que geossintéticos podem ser utilizados abaixo da nova capa asfáltica, quando se faz recapeamento, para atenuar a reflexão de trincas da camada antiga inferior.

Obra RPA 02

Esta obra consiste na manutenção de uma via chamada Táxi Golf de acesso ao hangar de manutenção de aeronaves de uma companhia aérea comercial, em 2002 no Aeroporto Salgado Filho – Porto Alegre/RS (Figura 32).

Figura 32 - Pista do aeroporto.



Fonte: Huesker (2020).

Problema: o pavimento de acesso, cuja implantação iniciou na década de 1940, era composto de base de solo granular (saibro de granito com CBR de 30%) e de uma camada de revestimento em placas de concreto de 25 cm de espessura. Após seguidas intervenções paliativas para

manter a trafegabilidade desta pista, no final de 2001, o pavimento apresentava muitas placas quebradas e em elevado estágio de desagregação, devido às movimentações das placas de concreto (contração e retração térmicas) e do carregamento das aeronaves. O aparecimento de trincas, aliado a falta de manutenção das juntas de trabalho favoreceu a entrada de água, acelerando o processo de bombeamento de finos da base de solo não estabilizada, criando “vazios” sob as placas de concreto.

Soluções proposta e adotada: a solução inicial adotada para restauração da pista foi a injeção de nata de cimento para expulsão da água e preenchimento de vazios, seguida de reperfilagem com CBUQ, sobrepostos a um recapeamento asfáltico em CBUQ de 5 cm de espessura. Abaixo do recapeamento foi colocada uma geogrelha, como sistema antirreflexão de trincas.

Devido à impossibilidade de interromper a operação das aeronaves, a execução da obra era possível somente no período noturno, compreendido entre 1 e 5 horas na madrugada. Com isso, decidiu-se por instalar a geogrelha somente na faixa central da pista, na largura de utilização de tráfego, deixando-se os acostamentos sem reforço. Por fim, devido ao atraso para o início da instalação, apenas a faixa esquerda a partir do eixo foi de fato reforçada com geogrelha. Em toda a área, 5 cm de concreto asfáltico foram executados em uma única etapa.

Foi observada que a utilização de geogrelha não só atrasou significativamente o surgimento de trincas na camada de rolamento, mas ainda manteve a estrutura com resistência residual na área trincada por restringir a tendência da fissura se abrir.

Análise crítica: esta obra destaca claramente o impacto da falta de manutenção das juntas de trabalho na estrutura de pavimentos, gerando bombeamento dos finos da base do solo e espaços vazios sob as placas de concreto. Como é recomendado, é necessário prever o custo de manutenção rotineira para evitar enormes transtornos futuros. Por outro lado, é possível observar novamente o efeito positivo da aplicação de geossintéticos para reforço de pavimento, comparando o desempenho do pavimento sem e com o uso da geogrelha. Um aspecto importante que merece ser realçado nesta obra é o reduzido horário disponível para execução da obra devido às particularidades de aeroportos com grande volume de tráfego aéreo.

Obra RPA 03

Esta obra se refere a restauração, em 2007, do pavimento do Aeroporto de Congonhas situado na região central de São Paulo/SP.

Problema: a camada de revestimento consistia em placas de $3,50 \times 7,0$ m de concreto, com 25 cm de espessura e barras de transferência de cargas nas juntas. Essa camada está sob uma capa de concreto asfáltico (CA) de 8 cm de espessura. Em 2008, foi observado que todas as juntas da camada rígida do concreto foram refletidas na camada asfáltica superficial devido às movimentações horizontais e empenamento de caráter térmico das placas de concreto.

Soluções proposta e adotada: após várias intervenções, a pista auxiliar com 1435 m foi reabilitada em 2008. Nesta intervenção, foi empregada geogrelha de alto módulo com revestimento betuminoso de elevada aderência para impedir a propagação das trincas existentes para a nova camada asfáltica. O processo construtivo consiste na fresagem da camada asfáltica, nivelamento da pista, selagem de trincas, pintura de ligação, instalação de geogrelhas, aplicação de camada de binder de 3 cm de espessura e aplicação da camada de CBUQ de 5 cm de espessura (Figura 33). O monitoramento feito desde início da obra através de “*Crack Activity Meter*” mostrou baixa movimentação horizontal e vertical entre as juntas, realçando o funcionamento da solução adotada.

Figura 33 - Aplicação da solução com geossintéticos.



Fonte: Huesker (2020).

Análise crítica: como estruturas multicamadas de diferentes rigidezes sujeitas aos diversos tipos de solicitações, é comum encontrar a propagação de fissuras de uma camada para outra. Os projetos de dimensionamento e executivo devem levar em consideração essa possibilidade,

principalmente quando uma camada de revestimento asfáltico é colocada em cima da camada de revestimento de concreto ou da base cimentada. Novamente, essa preocupação e manutenção periódica não tiveram muita atenção antes da execução da obra, provocando patologias na camada de revestimento asfáltico. A utilização posterior de geossintéticos como sistema antirreflexão de trincas, dentro de um processo executivo bem planejado, permitiu controlar a propagação de reflexão das juntas na camada de revestimento. Sobre o processo construtivo, é importante ter cuidado com a sequência executiva e com a seleção dos materiais necessários para impregnar os geossintéticos na pista.

Obra RPA 04

Esta obra foi executada no início de 2008 com o intuito de reforçar o piso do galpão e o pavimento de acesso externo de caminhões às docas do centro de distribuição de uma transportadora situada em São Jose dos Pinhais, região metropolitana de Curitiba/PR. O centro de distribuições tem capacidade de movimentação de 2.500 toneladas de carga/dia.

Problema: o principal problema encontrado nessa obra é a reduzida capacidade de suporte do solo para atender as cargas do tráfego e dos materiais armazenados no piso industrial.

Soluções proposta e adotada: a solução adotada para ambos os casos consistiu no reforço do solo com geogrelhas bidirecionais de filamentos de polipropileno de alto módulo inicial, com 400 kN/m de módulo de rigidez (Figura 34). A solução adotada, por sua simplicidade e facilidade construtiva, viabilizou a execução da obra em um curto prazo, o que era uma das exigências do empreendedor. O resultado foi muito positivo.

Figura 34 - Processo de execução do pavimento com geogrelha.



Fonte: Huesker (2020).

Análise crítica: embora esta obra esteja enquadrada dentro da categoria reforço de pavimentos, ela também contempla reforço do solo do piso de um galpão. Somente a utilização de geogrelhas foi necessária para aumentar a capacidade de carga da pista e do piso de forma rápida. Neste caso, a aderência solo-geogrelha se dá pelo atrito entre a sua superfície e o solo e pela resistência passiva nos membros transversais.

Obra RPA 05

A obra foi executada em 2012 em novos galpões e praia de estacionamento de caminhões do centro de distribuição da cervejaria Quilmes em Buenos Aires/Argentina.

Problema: a área local onde foi construída a obra fica ao lado das margens do Rio Matanza - Riachuelo, fazendo parte de uma antiga área de meandros e pântanos, a qual foi continuamente aterrada em décadas anteriores com solo, entulho e resíduos de origem diversa. Em função da heterogeneidade desses materiais, a camada superior do aterro não é adequada para receber cargas estruturais da obra, requerendo assim alguma intervenção para melhoria do comportamento do solo local.

Soluções proposta e adotada: o projeto original propunha a substituição de 0,70 m do material da camada superior do aterro por solos de melhor qualidade. O novo material funcionaria com sub-base adequada para o conjunto de estruturas de pavimentos. Para subleito, o projeto original também previa o tratamento do solo do aterro com cal, e depois a colocação de um geotêxtil não tecido com função de separação, preservando a integridade das novas camadas de solo e contribuindo na sua compactação.

Depois, visando a otimização estrutural do pavimento, foi proposta a utilização de geotêxteis tecidos de maior módulo de rigidez para reforço de base e separação entre o subleito e as novas camadas de solo a ser compactado como sub-base. Por fim, a solução adotada não considerou o reforço original nem melhoramento do solo com cal, porém utilizou geotêxtil para separação. A espessura de sub-base foi reduzida de 0,70 para 0,35 m. Um total de 80.000 m² de geotêxteis tecidos foram aplicados diretamente sobre o aterro heterogêneo (Figura 35).

Figura 35 - Compactação da camada de solo selecionado sobre o geotêxtil de reforço e separação.



Fonte: Huesker (2020).

Análise crítica: a realização de análises mais detalhadas antes do início da obra possibilitou adoção de uma solução mais econômica e rápida do que as duas propostas anteriormente. A utilização de geotêxtil para fins de separação permitiu a redução da espessura da camada de sub-base pela metade, sem necessidade de melhorar o solo do subleito. Neste caso, o geotêxtil atuando como separador entre o subleito e as novas camadas de solo, previne o “bombeamento” de finos da camada de subleito para o interior da camada de sub-base e evita a penetração dos materiais da base no solo de subleito. Com isso, é de esperar a conservação da espessura da camada de projeto e a integridade da via.

Obra RPA 06

Esta obra faz parte do projeto de ampliação do terminal aeroportuário Afonso Pena em São José dos Pinhais (Aeroporto Internacional de Curitiba) em 2012. A ampliação consistiu essencialmente na implantação de 100.000 m² de novas áreas de táxi, e pátio de estacionamento de aeronaves, em frente às novas instalações do terminal.

Problema: no final de 2012, durante a execução do pavimento, cerca de 40.000 m² da área apresentaram problemas de trincamento prematuro por causa da retração térmica da camada cimentada utilizada como base. O trincamento ficou aparente já na camada de binder, antes do início da execução da camada superfície de concreto asfáltico.

Soluções proposta e adotada: a solução adotada consistiu na utilização da geogrelha como elemento de reforço asfáltico para bloquear a reflexão das trincas para a camada asfáltica a ser executada. As principais vantagens desta solução foram: criação de um sistema antirreflexão

de trincas; facilidade na instalação; custo competitivo e mínimo impacto na espessura final do pavimento. A instalação aconteceu com grande agilidade, conforme previsto (Figura 36). Em seguida, o concreto asfáltico foi executado em duas camadas de 5 cm cada.

Figura 36 - Instalação da geogrelha.



Fonte: Huesker (2020).

Análise crítica: as vantagens destacadas na aplicação desta solução são fundamentais para divulgação e adoção massiva dessa técnica nas futuras obras. Um dos aspectos importantes que merece ser realçado é a manutenção do greide original com o uso de geossintéticos, sem prejuízo no projeto executivo da obra. O acompanhamento permanente da obra durante a fase construtiva permitiu a adoção desta medida para conter a propagação das trincas antes de terminar o revestimento, reduzindo assim de forma significativa os eventuais custos para a manutenção após a finalização da obra.

Obra RPA 07

Esta obra é da reformulação do Autódromo de Goiânia fundado há mais de 40 anos. Ela foi feita em 2013 e a pista, que já tinha um dos melhores traçados do mundo, foi totalmente recuperada, com o objetivo de cumprir todas as normas da FIA – Federação Internacional de Automobilismo.

Problema: foi constatada durante a fase de reconhecimento inicial elevada concentração de trincas na superfície do pavimento pela fadiga da camada asfáltica devido à solicitação de tráfego e de agentes climáticos (Figura 37). Existia assim grande potencial de surgimento de trincas na camada de recapeamento, colocando em risco milhões de reais investidos nesta obra.

Figura 37 - Trinca no pavimento original após fresagem.



Fonte: Huesker (2020).

Soluções proposta e adotada: aplicação de geogrelha foi escolhida como solução para a restauração da pista. O trabalho de restauração foi realizado em 4 etapas: a) fresagem de 8,0 cm de profundidade para chegar a uma cota do pavimento com trincas mais fechadas; b) aplicação do reforço geossintético diretamente sobre a superfície fresada, depois da execução da pintura de ligação; c) execução da camada de binder com 4,5 cm de espessura; d) execução da camada porosa de atrito com 3,5 cm de espessura como camada superficial de rolamento.

Análise crítica: por questões de segurança, conforto e alto desempenho, as pistas de autódromos devem possuir alto padrão e atender um conjunto de requisitos internacionais mais rigorosos. Mais uma vez, a solução escolhida para satisfazer um conjunto de requisitos, incluindo o controle da propagação de trincas e redução de reflexões das mesmas na camada de recapeamento foi a aplicação de geogrelha dentro de um processo executivo bem planejado. A geometria da pista com curvas abertas e fechadas exige um bom planejamento antes do início de obra de modo a economizar materiais e tempo.

Obra RPA 08

Esta obra foi executada em 2016 durante a restauração da rodovia BR-227, trecho de Irati/Palmeira, no estado do Paraná. A obra consistiu na restauração do pavimento asfáltico da 3ª faixa no cruzamento em desnível para a cidade de Lapa.

Problema: a estrutura do pavimento era formada por uma camada de sub-base de 15 cm de macadame seco, uma de base de 15 cm de brita graduada simples e uma de revestimento asfáltico composta de 14 cm de CBUQ mais 2 cm de asfalto com polímero. Inúmeras intervenções foram realizadas na pista, durante vários períodos, sempre com o intento de controlar propagação de trincas e reestabelecer as condições funcionais de rolamento para manter a segurança viária da rodovia. Para evitar intervenções recorrentes devido ao ressurgimento de trincas, uma solução alternativa deve ser tomada ou uma camada asfáltica espessa deveria ser construída para combater as deflexões do pavimento que eram elevadas.

Soluções proposta e adotada: o primeiro passo para a análise e dimensionamento do pavimento restaurado foi calcular os módulos de resiliência das camadas constituintes do pavimento. As análises posteriores permitiram adoção de uma solução com geogrelhas, seguindo os seguintes passos construtivos: a) fresagem de 6,0 cm de espessura da camada asfáltica; b) pintura de ligação com emulsão asfáltica sobre superfície fresada; c) instalação da geogrelha, na largura da 3ª faixa de rolamento, que é de 4,20m, de forma manual; d) aplicação da nova camada asfáltica com espessura de 6,0 cm (Figura 38).

Figura 38 - Vista da geogrelha instalada.



Fonte: Huesker (2021).

Análise crítica: em um pavimento trincado, as extremidades das trincas são as regiões de maior concentração de tensões de tração, principais responsáveis pelo fenômeno de propagação ou “reflexão” das trincas. Como explicado anteriormente, geogrelhas posicionadas sobre extremidade da trinca absorvem as tensões de tração, reduzindo o potencial de propagação. Nessa obra em particular, adoção da solução com geogrelha permitiu a economia de tempo de

execução da obra e evitou a necessidade de espessuras maiores de concreto asfáltico o que afetaria o gabarito das obras de arte da rodovia, caso a solução tradicional fosse adotada.

COMENTÁRIOS GERAIS: a maioria dos problemas apresentados nas obras de reforço de pavimento está ligado a propagação de trincas na camada de revestimento asfáltica. Soluções geralmente adotadas para controlar propagação de fissuras consistem na aplicação de geogrelhas em um processo executivo bem planejado. Cuidados especiais devem ser tomados durante esse processo executivo para garantir um bom funcionamento do geossintético instalado. Por fim, essa solução tende a oferecer um conjunto de vantagens em termos de custo, rapidez, menor espessura de pavimentos, reduzida intervenção, maiores segurança e conforto na pista.

4.1.3 Casos de obras: Estabilidade de Taludes

Primeiro é exposto abaixo um quadro síntese das 8 obras que envolvem estabilidade de taludes. Por segundo é descrita cada obra com a sua análise crítica.

Quadro 5 - Quadro síntese: Estabilidade de taludes.

Nome da Obra	Local	Período de Execução	Tipo de Geossintético Usado	Problema Principal
EST 01 - Muro Terrae Condomínio Alto do Itaipara - Salvador/BA	Salvador, Bahia, Brasil	2005	Geogrelha	Limitação da área disponível e alta densidade da região à jusante do talude.
EST 02 - Muro de Britador Mineração Maracá – Alto Horizonte/GO	Alto Horizonte, Goiás, Brasil	Set/2005- Nov/2005	Geogrelha	Execução de uma contenção sujeita a uma sobrecarga devido ao peso dos caminhões fora de estrada.
EST 03 - Muro Terrae BR 101/RS	BR 101, Rio Grande do Sul, Brasil	Jan/2010- Jun/2010	Geogrelha	Definição da estrutura de contenção e método construtivo para garantir a estabilidade dos aterros onde foram construídas as obras de arte.
EST 04 - Muro Terrae Rebaixamento da Linha Férrea de Maringá - Maringá/PR	Maringá, Paraná, Brasil	2007	Geogrelha	Definição de um sistema de contenção e do método executivo para efetuar o rebaixamento em um longo trecho, sem grandes prejuízos para vizinhanças.
EST 05 - Muro verde Santana de Parnaíba/SP	Santana de Parnaíba, São Paulo, Brasil	2010	Geogrelha	Selecionar sistemas de contenção econômicos e que atendam as condições ambientais de modo a ter o aproveitamento máximo do loteamento.
EST 06 - Reforço de Taludes e Controle de Erosão Condomínio San Jose II - Cotia/SP	Cotia, São Paulo, Brasil	Out/2013- Nov/2013	Geogrelha	Necessidade de construir taludes de corte íngremes com o objetivo de se ganhar o maior espaço possível do terreno.
EST 07 - Obras de Terra e Fundações Praça de Pedágio na Rodovia dos Tamoios/Paraibuna/SP	Paraibuna, São Paulo, Brasil	Dez/2015- Mai/2016	Geogrelha	Presença de APP, relevo acidentado e de uma camada superficial de colúvio de baixa capacidade de suporte no local de implantação do muro.
EST 08 - Obras de Terra e Fundações Muro Verde Biancogres - Serra/ES	Serra, Espírito Santo, Brasil	2011	Geogrelha	Escolha de um sistema de contenção viável economicamente e que atendesse à configuração do terreno natural e levasse em consideração a presença de uma APP.

Obra EST 01

A obra foi executada em 2005 e consiste numa estrutura de contenção para garantir o acesso viário ao condomínio Alto do Itaigara em Salvador, Bahia.

Problema: elaborar e executar um projeto que garanta a estabilidade de uma estrutura de contenção construída para suportar um aterro no acesso viário ao bairro do Itaigara, na cidade de Salvador/BA. Como entraves à obra, têm-se limitação da área disponível e alta densidade da região à jusante do talude.

Soluções proposta e adotada: Várias opções foram levantadas e a alternativa escolhida foi a execução de um muro com face aproximadamente vertical e altura de até 13,5 m (Figura 39). Foram utilizados na obra cinco tipos de geogrelhas em função da magnitude de esforços atuantes na obra. Conexão dupla foi utilizada entre os blocos e as geogrelhas para garantir a estabilidade local de face. Solo areno-siltoso, disponível no local, foi utilizado como material de aterro. Os cálculos feitos no dimensionamento estimaram deformação máxima na camada de geogrelha de 3,34% e deslocamentos relativos médios de face de 1,4% da altura total durante toda a vida de projeto.

Figura 39 - Muro no condomínio.



Fonte: Huesker (2020).

Análise crítica: esta obra retrata a realidade de muitas cidades densamente ocupadas e de relevo acidentado, onde é verificada cada vez mais a ocupação de regiões altiplanas que exigem diversas técnicas para estabilização de taludes. O interessante da técnica adotada (bloco e geogrelhas) como estrutura de contenção é a possibilidade de construir facilmente muros verticais em formatos curvos, tolerando um certo nível de deslocamento. Para execução desse tipo de estrutura, é importante prestar atenção à compactação, responsável pela indução das

deformações imediatas, escolhendo assim corretamente os rolos compactadores em função do tipo de solo e dos materiais da face.

Obra EST 02

A obra da construção de um muro de Britador foi realizada em 2005 no complexo de exploração e beneficiamento de cobre e ouro da Mineração Maracá. A mineração fica situada na cidade de Alto Horizonte, em Goiás.

Problema: o problema desta obra consiste no dimensionamento e execução de uma contenção de 15 m de altura, em face vertical e sujeita a uma sobrecarga de até 10 kN/m² devido ao peso dos caminhões fora de estrada. Os deslocamentos da face devem ser no máximo 0,6% altura do muro.

Soluções proposta e adotada: a solução adotada para a contenção foi a execução de um muro de contenção, recorrendo a técnica de solo reforçado com cinco tipos diferentes de geogrelhas de alto módulo e envelopamento de face (Figura 40).

Figura 40 - Muro Britador.



Fonte: Huesker (2020).

Ao longo dos 15 m de altura, geogrelhas foram distribuídas em 25 camadas, com espaçamento entre 40 a 60 cm, em uma extensão de 40 metros. Solo de jazida local foi utilizado como material do aterro que está sobre uma fundação em reaterro compactado. Para evitar a fuga de material pelas aberturas da geogrelha, foram utilizados geotêxteis não-tecido como elementos de retenção do solo na face, cujo revestimento foi feito em painéis de concreto e

concreto projetado. A drenagem de águas pluviais foi assegurada pelo “envelopamento” do aterro reforçado com material granular e calhas de captação e escoamento de água.

Análise crítica: para uma boa execução da solução adotada é necessário que haja um acompanhamento regular de um profissional durante a realização da obra. Contudo, vale ressaltar que esta solução é inovadora e possibilita obtenção de um maciço em aterro compactado, reforçado, sólido, auto estabilizado, com face vertical, capaz de suportar elevadas cargas de utilização sob baixos níveis de deformação de trabalho. Nota-se que as geogrelhas atuam como reforço e aumentam o confinamento do material. Nesse tipo de obra, cuidados especiais devem ser tomados para proteger os materiais dos geossintéticos contra ações de intempéries e dos vândalos, além dos necessários durante a compactação e para drenagem das águas pluviais.

Obra EST 03

As estruturas de contenção executadas nesta obra foram requeridas durante a implantação dos viadutos da duplicação e revitalização da BR-101 realizada em 2010, no trecho do Rio Grande do Sul.

Problema: a duplicação e revitalização da rodovia demandou construção de várias obras de arte. O problema particular desta obra consistiu na definição do tipo de estrutura de contenção e método construtivo para garantir a estabilidade dos aterros onde foram construídas as obras de arte.

Soluções proposta e adotada: as soluções adotadas em todas as estruturas de contenção solicitadas para implantação das obras de arte consistiram em muros (Figura 41), com diversas geometrias e condições construtivas, sempre utilizando geogrelhas como elemento de reforço e estruturação dos maciços. Os blocos escolhidos seguiram o padrão do modelo MW com resistência mínima à compressão de 8 MPa, enquanto que a resistência nominal das geogrelhas variaram entre 35 e 110 kN/m. No total, foram implantados 25 muros com alturas de até 10 m, contendo 7 encabeçamentos de viadutos, 5 de passagens inferiores e outros 2 trechos não vinculados a obras de arte.

Figura 41 - Muro como contenção.



Fonte: Huesker (2020).

As principais vantagens citadas para adoção desta técnica de contenção são: flexibilidade logística, compatibilidade com o material de aterro disponível nas jazidas, boa estética, possibilidade de executar obras em áreas de trabalho apertadas, sem atrapalhar o tráfego das vias próximas e a elevada produtividade na execução.

Análise crítica: uma obra complexa na execução por causa de quantidades de obras de artes em diferentes lugares e com características diferentes. Nesta situação, é fundamental um bom planejamento, independente do sistema de contenção escolhido. Como foi citada anteriormente, a combinação de blocos com geogrelhas oferece inúmeras vantagens e possibilita a execução de obras de forma rápida. Alguns cuidados logísticos são necessários para uma boa distribuição, estocagem e controle de qualidade dos materiais, considerando várias frentes de trabalho. Por fim, ressalta-se novamente a importância de drenagem, compactação e uma de boa ancoragem por envelopamento ou fixação das extremidades de geogrelhas em faces de concreto ou entre blocos.

Obra EST 04

Esta obra, executada em 2017, faz parte do projeto de rebaixamento da linha ferroviária no trecho que corta a região central da cidade de Maringá, no Paraná.

Problema: para o rebaixamento da linha ferroviária na região central de Maringá, há uma certa dificuldade para execução da obra devido à intensa movimentação de pedestres e veículos nessa região. Assim, o principal problema foi a definição de um sistema de contenção e do método

executivo para efetuar o rebaixamento em um longo trecho, sem grandes prejuízos para vizinhanças.

Soluções proposta e adotada: a solução adotada foi a execução de estruturas de contenção nas duas laterais para conter a vala de 9 m de profundidade em média. Como sistema de contenção, foram executados muros em solo reforçado com 4 tipos de geogrelhas e blocos segmentais de face – W, sendo que os muros têm até 10 m de altura com face 1H:10V em ambas as laterais de até 2 km de extensão.

Para reduzir o custo total da obra, foram utilizadas geogrelhas com 4 valores de rigidez distintas, enquanto os blocos - W intertravados foram de grandes dimensões e com 12 MPa de resistência à compressão (Figura 42). De um total de 7 viadutos, 5 foram apoiados na crista do muro, que nestes trechos foram dimensionados como estrutura portante para uma sobrecarga de 200 kN/m².

Figura 42 - Execução da obra de contenção.



Fonte: Huesker (2020).

A solução adotada possibilitou a implantação de vias expressas paralelas à linha, para os quais as estruturas de contenção fazem o arrimo. Como algumas vantagens, citam-se: rápida execução da obra; não necessidade de grandes equipamentos; possibilidade de trabalhar no interior da vala; uso do solo local como material de aterro e pouca interferência na dinâmica das vizinhanças.

Análise crítica: os benefícios e os cuidados citados na obra anterior valem para essa obra que utiliza o mesmo sistema de contenção. O sistema de muro associado à geogrelha atendeu de forma satisfatória as preocupações iniciais do projeto. Entretanto, vale destacar novamente que esta técnica possibilita a execução de taludes íngremes reforçados com simplicidade e rapidez de execução, usando o solo local sem a necessidade de um grande volume de bota-fora. Um outro aspecto relevante é a utilização de geogrelhas com diferentes características em função das solicitações reais de modo a evitar superdimensionamento e reduzir o custo da obra.

Obra EST 05

A obra de um muro verde, dentro de um loteamento em Santana de Parnaíba/SP, foi executada em 2010 devido a grande preocupação da cidade em realizar obras que possibilitam o máximo de aproveitamento do espaço útil disponível.

Problema: o principal problema desta obra consistiu em selecionar sistemas de contenção econômicos e que atendam as condições ambientais de modo a ter o aproveitamento máximo do loteamento. Para isso, foi necessário ter em conta também o alto grau de alteração do solo residual da fundação.

Soluções proposta e adotada: a solução inicial proposta foi a execução de um talude com inclinação 1V:1,5H. Essa alternativa, para além de respeitar os 50 m de afastamento referente à Área de Preservação Permanente (APP), precisaria de um afastamento adicional de quase 40m para vencer o desnível entre a cota do pé do talude e a cota do loteamento. Por fim, a solução adotada foi a execução de uma estrutura de contenção de 25 a 30 m de altura, em solo reforçado com geogrelhas e com face mais íngreme em relação à solução inicialmente proposta (Figura 43).

Figura 43 - Imagem do muro após o término da construção.



Fonte: Huesker (2020).

A estrutura de solo reforçado tinha altura total de 27,6 m, crista de 70 m e inclinação de 3V:1 H. Para minimizar o consumo de geogrelhas muito pesadas e otimizar a solução, dois tipos de camadas de reforço foram considerados. O primeiro, chamado reforço principal, utilizou-se geogrelhas de PVA espaçadas de 1,80 m, com resistência nominal à tração entre 55 kN/m a 400 kN/m e comprimento entre 12,0 m a 17,4 m. O segundo tipo, colocado entre os reforços principais, utilizou-se reforços secundários de poliéster nas camadas com o objetivo de garantir a estabilidade local de faceamento. As camadas eram espaçadas 60 cm entre si, sendo que os reforços possuem resistência nominal à tração de 35 kN/m e comprimento de 5,0 m.

O solo local foi utilizado como material de aterro e a face da contenção foi por meio de sacarias, envelopamento com geotêxtil não-tecido e vegetação (face verde). O geotêxtil não tecido de gramatura de 56.150 g/m² foi colocado entre a geogrelha envelopada e a sacaria para impedir a perda de material.

Como o solo residual da fundação estava muito comprometido e considerando que o carregamento a ser aplicado no terreno é da ordem de 600 kN/m², decidiu-se por remover a camada de solo residual e apoiar o muro diretamente sobre a rocha mencionada. Para auxiliar na drenagem, executaram-se camadas drenantes na base e no tardo doz da massa de solo reforçado.

Análise crítica: as questões ambientais e as necessidades de reduzir o custo da obra e de otimização da área do loteamento foram atendidas com a adoção do muro com geogrelhas. É importante também destacar que essa solução permitiu muros com faces mais íngremes e proporcionou um bom aspecto estético, com redução de erosão e integração da região verde composta por natureza ao redor com a vegetação na face do muro. Uma boa interpretação dos

resultados da investigação geotécnica evitou futuros problemas, uma vez que o solo residual da fundação foi removido para que o muro fosse apoiado na camada mais resistente.

Obra EST 06

A obra foi construída em 2013, na área de implantação do condomínio Industrial San Jose II em Cotia/SP, para reforço de taludes e controle de erosão.

Problema: para a implantação de um condomínio Industrial, houve necessidade de construir taludes de corte íngremes com o objetivo de se ganhar o maior espaço possível do terreno. A estabilidade do talude deve ser garantida, bem como o recobrimento do terreno para controle de erosão.

Soluções proposta e adotada: para atender as exigências do projeto, a solução adotada foi o reforço de cobertura do talude com geogrelha 3D (Figura 44), facilitando a aplicação de hidrossemeadura para o recobrimento e controle de erosão. O talude de corte tinha altura de 10 m e inclinação em torno de 70°. A geogrelha tridimensional 3D função de reforço da capa vegetal instalada através da colocação de Flexterra. Flexterra funciona como uma hidromanta de alto desempenho que controla a erosão e possibilita a revegetação, garantindo a proteção do talude até que a vegetação se estabeleça.

Figura 44 - Geogrelha 3D.



Fonte: Huesker (2020).

Uma vala de ancoragem executada na crista dos taludes foi suficiente para ancoragem de geogrelha, não necessitando da instalação de grampos ou tirantes em níveis intermediários na face do corte. Após a colocação da geogrelha 3D, o Flexterra foi aplicado hidraulicamente em um único dia numa área de face de 2.500 m².

Análise Crítica: a estabilização do talude deste caso não envolve essencialmente a inserção de camadas de geossintéticos no solo. Nota-se que ausência de soluções para cobertura geraria problemas de instabilidade devido a infiltração e erosão da face por causa do impacto da chuva e o escoamento superficial da água. A solução adotada é eficiente para esta situação e permite executar taludes de corte íngremes, porém o processo executivo deve ser bem realizado para garantir ancoragem de geogrelhas 3D e fixação de Flexterra para o crescimento de vegetação, que é a outra vantagem dessa técnica.

Obra EST 07

Esta obra de contenção foi realizada no período de 2015 a 2016 na Rodovia dos Tamoios (Rodovia SP-099) que dá acesso ao litoral norte de SP, a partir de São José dos Campos. Devido à envergadura da rodovia, foram realizadas obras de terra e fundações na praça de pedágio.

Problema: Duas praças de pedágio foram aprovadas na Rodovia dos Tamoios, porém só a localizada no km 59,3 precisou-se de uma grande obra de corte e aterro em área de proteção ambiental, a montante da rodovia no sentido interior. O grande desafio técnico da obra era a presença de APP, relevo acidentado e de uma camada superficial de colúvio de baixa capacidade de suporte no local de implantação do muro.

Soluções proposta e adotada: para compatibilizar o relevo acidentado com a limitação de ocupação da área até o limite da APP, a solução adotada foi a construção de uma contenção em muro com 25 m de altura e aproximadamente 4.900 m² de área de face. O desnível mais crítico de 25 m foi superado em dois lances de muro, o primeiro, de maior altura, com 17 m no ponto máximo e o segundo, recuado de 8m da crista do primeiro, de 8m de altura (Figura 45).

Figura 45 - Obra finalizada com a contenção.



Fonte: Huesker (2021).

Para a construção do muro foi utilizando blocos de face MW de até 18MPa e geogrelhas de PVA com módulo de rigidez à tração de até 4.000 kN/m. As principais razões para escolha desse sistema são menor custo de implantação, maior facilidade e agilidade de execução, e possibilidade de uso do solo local.

A fundação do muro foi uma combinação de colunas de brita e um colchão de pedra reforçado com geogrelhas, resultando depois recalques mínimos durante e após a execução do aterro.

Análise crítica: a presença de APP restringiu muito a possibilidade de adotar várias alternativas, considerando a necessidade de talude íngreme e sistema construtivo mais econômico e rápido. De novo, observa-se que a solução adotada foi a do muro com geogrelhas devido às vantagens já mencionadas noutras obras. O processo executivo adotado para vencer altura do muro foi bem pensado, sendo que a conexão dupla das geogrelhas nos blocos facilitou ancoragem. Especial atenção foi dada à compactação e à execução dos dispositivos de drenagem interna e superficial do muro, também para o acabamento e dispositivos de segurança na crista da estrutura. Um outro aspecto relevante nesse tipo de obra é o planejamento, neste caso foi utilizada uma tenda inflável nos primeiros meses da obra para reduzir a perda de produtividade em função das chuvas frequentes de verão.

Obra EST 08

Esta obra de contenção foi construída em 2011 durante a ampliação do pátio de estocagem de uma fábrica de pisos e revestimentos cerâmicos situada no município de Serra no Espírito Santo.

Problema: o problema principal foi na escolha de um sistema de contenção viável economicamente e que atendessem à configuração do terreno natural e levasse em consideração a presença de uma APP.

Soluções proposta e adotada: a solução adotada, considerada a mais adequada técnica e economicamente, foi o reforço de solo com geogrelhas e face vegetada (verde). A extensão do muro é de aproximadamente 65 m e altura variando de zero a 18 m, totalizando uma área de face de 800 m² (Figura 46). O solo de aterro utilizado era originário de jazidas próximas, sendo ele constituído de argilas arenosas residuais.

Figura 46 - Detalhe das geogrelhas em espera para realizar envelopamento invertido.



Fonte: Huesker (2021).

As geogrelhas utilizadas foram do tipo PVA com rigidezes 1100 kN/m e 4000 kN/m e resistências nominais entre 55 kN/m e 200 kN/m. O espaçamento entre as camadas de geogrelhas foram posicionadas de 0,60 m, sendo que o comprimento das geogrelhas variavam entre 8 m e 13 m.

A face verde do muro foi executada com envelopamento da geogrelha em torno de sacos de juta e geotêxtil de malha aberta para permitir o desenvolvimento da vegetação. Para auxiliar

a drenagem da estrutura, optou-se também por utilizar os próprios resíduos cerâmicos existentes na fábrica.

Análise crítica: as restrições ambientais condicionaram novamente a escolha do tipo de estrutura de contenção desta obra. A solução adotada garantiu a verticalidade da obra, sem invadir a APP. A união dos elementos de reforço (geogrelhas) e drenagem com a cautelosa concepção e execução dessa estrutura, levou ao sucesso da implantação dessa obra. Além da adequabilidade técnica das geogrelhas e do material preparado para a confecção do aterro, a solução mostrou-se uma alternativa econômica e esteticamente atraente, unindo técnica e beleza a um só espaço.

COMENTÁRIOS GERAIS: os casos de obras analisados nesta categoria apresentaram diversos tipos de soluções, das mais simples às mais complexas. De modo geral, percebe-se que solução de muro com geogrelhas é bastante utilizada por questões de custo, rapidez executiva, verticalidade e altura da face, etc. Outras soluções que envolvem geogrelhas e geotêxteis com painéis de concreto, Flexterra, jateamento de concreto são também comuns. Em todas essas soluções, atenções especiais devem ser dadas ao processo de ancoragem de geogrelhas, compactação do aterro e sistemas de drenagens profundas e superficiais.

4.1.4 Casos de obras: Obras Hidráulicas

Primeiro é exibido abaixo um quadro síntese das 8 obras que envolvem obras hidráulicas. Depois é feita a descrição de cada obra com a sua análise crítica.

Quadro 6 - Quadro síntese: Obras hidráulicas.

Nome da Obra	Local	Período de Execução	Tipo de Geossintético Usado	Problema Principal
OBH 01 - Revestimento de Canal - Canal de Irrigação do Jaíba/MG	Jaíba, Minas Gerais, Brasil	2008	Geotêxtil	Alguns pontos exibiram problemas de vazamentos em consequência do trincamento das placas de concreto.
OBH 02 - Proteção de Dutos e Margens Rio Atibaia - Itatiba/SP	Itatiba, São Paulo, Brasil	Jul/2011- Ago/2011	Geofôrma	A correnteza do Rio Atibaia erodiu de forma progressiva o leito do rio, deixando as tubulações em balanço.
OBH 03 - Atracadouro Saipem do Brasil Guarujá/SP	Guarujá, São Paulo, Brasil	2012	Geofôrma	Durante os procedimentos de chegada e partida das embarcações, os propulsores geram turbulência que podem induzir erosão.
OBH 04 - Revestimento dos taludes do cruzamento do Contorno de Florianópolis e o Rio Forquilha - São José/SC	São José, Santa Catarina, Brasil	2016	Colchão formado por geotêxtil	Seleção de um sistema para proteção das margens que leva em consideração à presença da ponte que cruza o rio.
OBH 05 - Proteção costeira praia La Esmeralda Distrito de Colán, Província de Paita, Piura/Peru	Piura/Peru	2016	Módulos Geotêxteis	Degradação hidráulica e erosão costeira progressiva que esta praia vem sofrendo ao longo de várias décadas.
OBH 06 - Proteção Costeira Recreio dos Bandeirantes - Rio de Janeiro/RJ	Rio de Janeiro/RJ	Out/2017- Mar/2018	Geofôrma	Grande ressaca na região, que levou a erosão costeira e desmoronamento das edificações ao longo da orla da praia.
OBH 07 - Ponte Nanay Iquitos-Bellavista, Peru	Iquitos-Bellavista, Peru	2017	Geotubos	Construção onde acontecem mudanças estacionais extremas do nível d'água e há presença de depósitos de solos muito moles.
OBH 08 - Engenharia Costeira, Diques e Barragens Tocopilla, Chile	Tocopilla, Chile	2019	Geotubos	Devido ao carvão mineral, a areia da praia apresentava uma coloração escura, imprópria para o uso da população local.

Obra OBH 01

Esta obra foi realizada em 2008 e consiste no revestimento de um canal de irrigação localizado na região denominada Mata da Jaíba, entre os rios São Francisco e Verde Grande, no Norte de Minas Gerais, o Projeto Jaíba. O canal foi construído na década de 70 e revestido totalmente em concreto, com 248km de extensão e aproximadamente 55.000 ha. O canal tem seção trapezoidal, com 7 metros de largura de fundo, 8,5 metros de altura, perímetro de 31 metros e lâmina d'água de 7 metros (Figura 47).

Figura 47 - Revestimento do canal.



Fonte: Huesker (2020).

Problema: Após vários anos de operação desse canal, alguns pontos exibiram problemas de vazamentos em consequência do trincamento das placas de concreto em um trecho de aproximadamente 65 m.

Soluções proposta e adotada: dentre várias alternativas propostas, a opção escolhida foi a vedação das trincas com material à base de epóxi e a utilização da geofôrma têxtil com 10 cm de espessura, revestindo toda a área atingida. Considerando que o canal não pode ser esvaziado, todo o procedimento de reparo foi feito por mergulhadores, com o canal em operação.

O geotêxtil escolhido na fabricação de geofôrma tem 45 kN/m de resistência à tração no sentido longitudinal e 25 kN/m no sentido transversal. Painéis de 31 m foram feitos para revestir a superfície do canal e eram dispostos primeiro no fundo do canal e posteriormente nos dois taludes, por mergulhadores. Após este procedimento, os painéis de geofôrma eram ancorados para receber o preenchimento de argamassa de cimento Portland. O preenchimento foi realizado através de bombeamento, começando pelo fundo do canal e depois estendendo-se aos taludes.

Análise crítica: revestimento de canais exige um cuidado especial, principalmente quando é feito de concreto. Para evitar trincas por fadigas em placas longas de concreto, pode-se recorrer ao uso de juntas, porém as juntas são caminhos preferencias de infiltração. A solução adotada nesta obra apesar de ser a mais adequada, demandou mão de obra especializada, tendo em conta que uma parte da execução precisa ser feita debaixo d'água. Nos aspectos construtivos, é desejável que o geotêxtil da geofôrma esteja perfeitamente em contato com as paredes das valas drenantes.

Obra OBH 02

Esta obra foi realizada em 2011 para proteção de margens e três oleodutos e um gasoduto que cruzam transversalmente o leito do Rio Atibaia/SP numa extensão de cerca de 30m.

Problema: durante os anos de vida desta travessia, a correnteza do Rio Atibaia erodiu de forma progressiva o leito do rio, deixando as tubulações em balanço e colocando em risco as suas integridades.

Soluções proposta e adotada: para solucionar o problema, foi pensado um projeto de calçamento e proteção dos dutos, assim como a proteção de ambas as margens do Rio Atibaia. A proposta inicial foi o calçamento das estruturas de proteção dos dutos e taludes em concreto de modo a obter uma efetiva e duradoura proteção. Essa proposta motivou o surgimento de algumas questões práticas quanto à execução da concretagem subaquática na presença de correnteza e praticamente sem visibilidade.

Outras alternativas foram avaliadas e, devido às vantagens econômicas e práticas, escolheu-se a utilização de geofôrmas para o calçamento e a utilização dos colchões para as proteções superficiais (Figura 48).

Figura 48 - Vista do talude finalizado.



Fonte: Huesker (2020).

Para facilitar o trabalho dos mergulhadores, as geofôrmas foram preenchidas no canteiro de obras com argamassa seca, sem a água de amassamento, e depois fechadas. Em seguida, elas foram transportadas manualmente, através de mergulhadores, para a posição de calçamento dos dutos, onde acontecia a hidratação da argamassa. Após o calçamento inferior e lateral dos dutos, foram lançados e preenchidos os painéis colchões sobre os dutos.

Análise crítica: a utilização das geofôrmas e colchões permitiram uma execução rápida, segura, sem necessidade de execução de enscadeiras. Mesmo com a ação da correnteza do rio, as geofôrmas possibilitaram uma concretagem sem perda de finos e com total controle do volume de projeto. O processo executivo com o uso de geofôrmas e dos colchões é algo relevante devido às condições do rio com a sua correnteza ativa e sem grande visibilidade. A possibilidade da hidratação da argamassa após a instalação das geofôrmas e dos colchões garante o controle e qualidade da execução.

Obra OBH 03

A obra foi realizada em 2012 para proteção do atracadouro do empreendimento da Saipem do Brasil no Guarujá/SP. O empreendimento consiste em uma planta de fabricação de dutos e tubos para exploração de petróleo em águas profundas.

Problema: a empresa enfrentou inúmeras dificuldades para transportar os seus produtos até o local, já que o município impõe restrições à circulação de veículos pesados. Para solucionar o problema, a empresa implantou um terminal para atracação de balsas. O problema é que durante os procedimentos de chegada e partida das embarcações, os propulsores geram turbulência que pode induzir erosão e desproteger as estacas-prancha do atracadouro, implicando em riscos à segurança da estrutura.

Soluções proposta e adotada: para proteger o atracadouro, a solução adotada foi projetar um sistema de proteção contra erosão que consiste em colchões de concreto posicionados ao longo da estrutura de atracação. O material escolhido para conformar os colchões de concreto foi uma forma geotêxtil que apresenta espessura máxima de 20 cm com pontos filtrantes para alívio das pressões hidráulicas (Figura 49).

Figura 49 - Confeccção dos painéis.



Fonte: Huesker (2020).

Uma vez que a instalação e o preenchimento da forma têxtil eram submersos, foram realizados testes de preenchimento com concreto acima do nível do mar.

Análise crítica: novamente, esta obra mostra a aplicação de geossintético submerso. A utilização da forma geossintética plana tornou possível, de forma fácil e econômica, a concretagem submersa; possibilitando com isto a execução segura de um revestimento que impeça a erosão induzida pelos propulsores das embarcações.

Obra OBH 04

A obra foi executada em 2016 para proteção de margens. Ela consiste essencialmente no revestimento dos taludes do cruzamento do contorno do Rio Forquilha com o contorno rodoviário de Florianópolis/SC.

Problema: o principal problema desta obra consiste em selecionar um sistema para proteção das margens que leva em consideração à presença da ponte que cruza o rio.

Soluções proposta e adotada: a proposta inicial para a proteção das margens considerou a utilização de colchões metálicos preenchidos de pedra. Esta solução foi considerada inviável uma vez que seria necessário o desvio do rio Forquilha para a sua execução, sabendo que a ponte que cruza o rio já estava pronta. Em função disso, a solução de colchão com duas camadas de geotêxtil foi adotada, sem precisar desviar o rio Forquilha.

O colchão com geotêxtil foi preenchido com argamassa de concreto que devido aos pontos de filtração/drenagem fizeram o revestimento de concreto permeável. O desenho deste colchão permitiu fácil adaptação a topografia do terreno e dissipou consideravelmente a energia de onda e velocidade que entram no sistema (Figura 50).

Figura 50 - Vista geral da obra pronta.



Fonte: Huesker (2021).

Algumas das vantagens desta solução são: adequabilidade dos painéis em áreas ambientais e esteticamente sensíveis; modelos diferentes para diversas aplicações; possibilidade de resistir fortes ventos; proteção contra a erosão; simplicidade de instalação; facilidade de preenchimento; entre outros.

Análise crítica: apesar da solução adotada apresentar várias vantagens, alguns cuidados devem ser tomados com relação aos aspectos construtivos prejudiciais, principalmente durante a instalação de geossintéticos para não atrapalhar o seu desempenho como elemento de filtro e/ou drenagem. Dentre esses cuidados, citam-se: não passagem de veículos sobre o filtro de geotêxtil; não contaminação da camada de filtro por corrida de lama, acúmulo de poeira ou contaminação de núcleo drenante granular; evitar materiais de aterro do tipo graúdo, com elementos perfurantes que possam danificar o geotêxtil. Por fim, ressalta-se que revestimento de canais traz grandes desafios de execução, que podem ser resolvidos com as diversas técnicas disponíveis na engenharia civil. Contudo, essa solução foi adequada por não demandar o desvio do rio, sendo possível a sua utilização mesmo com o nível de água variável.

Obra OBH 05

Esta obra foi realizada em 2016 para proteção costeira da praia La Esmeralda. A praia La Esmeralda está localizada no centro turístico Costa Bonita, distrito de Colán, Peru.

Problema: os principais problemas consistem na degradação hidráulica e erosão costeira progressiva que esta praia vem sofrendo ao longo de várias décadas, principalmente nos últimos anos, o que diminuiu em vários metros a faixa de areia disponível e prejudicou não só a segurança das áreas de banho, mas também a integridade de outros elementos da infraestrutura adjacente do resort e das zonas próximas.

Soluções proposta e adotada: a alternativa de defesas costeiras em concreto ou rocha vem sendo adotada várias vezes para solucionar o problema desta praia, mas não tem mostrado resultados suficientes do ponto de vista de integração ambiental, flexibilidade sobre solicitações dinâmicas variáveis, e de interação ‘amigável’ com usuários e residentes da praia. Após várias análises, a solução adotada foi um sistema de módulos geotêxteis prismáticos retangulares com capacidade de 12,5 m³, preenchidos com material arenoso disponível próximo da praia. As dimensões aproximadas de cada módulo depois do preenchimento foram de 1 m de altura, 2,45 m de largura e 5 m de comprimento, resultando em elementos de aproximadamente 22 t de peso (Figura 51).

Figura 51 - Sistema de proteção costeira em 3 níveis.



Fonte: Huesker (2021).

Três níveis de bolsas foram dispostos em formato semipiramidal em um arranjo paralelo à linha de costa. O primeiro nível tem dois módulos de geotêxtil tecido de poliéster, enquanto os demais níveis possuem um módulo único para absorver o impacto direto das ondas. Em seguida, foi colocado um manto de proteção e filtro de geotêxtil não tecido para evitar a lavagem de partículas finas no talude posterior.

Análise crítica: é recorrente encontrar inúmeras praias com problemas de degradação hidráulica e erosão marítima, cujas soluções nem sempre são triviais e duradouras. A solução adotada nesta praia baseada nos módulos geotêxteis apresentou eficiência e possibilitou a integração com o meio ambiente. Uma particularidade interessante dessa solução é a possibilidade do uso da estrutura logo após o seu posicionamento dos módulos, mostrando-se assim muito mais prático, rápido e harmonioso que as soluções tradicionais em concreto ou rocha. É importante também levar em consideração a durabilidade do material do módulo durante o planejamento de obras emergenciais e/ou definitivas.

Obra OBH 06

Esta obra foi realizada em carácter de urgência entre 2017 e 2018 para proteção costeira na praia da Macumba, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro/RJ.

Problema: o problema foi ocasionado por uma grande ressaca na região, que levou a erosão costeira e desmoronamento das edificações ao longo da orla da praia.

Soluções proposta e adotada: a solução imediata adotada foi a colocação de fôrmas tubulares feitas com geotêxtil tecido e preenchidas com argamassa coloidal e fôrmas planas confeccionadas com geotêxtil tecido e geotêxtil não tecido preenchidas com argamassa coloidal ou areia, na estrutura de proteção e controle de erosão (Figura 52).

Figura 52 - Proteção costeira.



Fonte: Huesker (2021).

A estabilidade dos muros de contenção existentes foi garantida por meio de Jet Grouting. A obra foi dividida em três (3) trechos ao longo da extensão da praia, e ao término da implantação da estrutura de enrocamento foi executado um aterro/reaterro que devolve à praia a estética solicitada no projeto.

Análise crítica: novamente tem-se um caso em que geofôrmas e tubos geotêxteis foram aplicados para evitar ou reduzir o potencial erosivo do impacto de ondas. Esse problema é o reflexo do avanço de construções nas zonas que têm incidência de fortes ressacas. A solução mais adequada neste caso foi por meio de geossintético devido a sua praticidade, custo atrativo e adequação ao ambiente menor tempo de execução da obra; concretagem à distância; acomodação de possíveis movimentações da fôrma plana flexível; menor impacto na população vizinha, entre outros.

Obra OBH 07

Esta obra realizada em 2017 e mostra como geossintéticos foram aplicados na construção da ponte Nanay que liga a cidade de Bellavista-Nanay-Iquitos (ao norte) com a área de Santo Tomás (ao sul) - Peru.

Problema: a ponte Nanay foi construída em uma grande área de inundação do rio Nanay, onde acontecem mudanças estacionais extremas do nível d'água e há presença de depósitos de solos muito moles. Essas condições hidráulicas e geotécnicas críticas trouxeram uma série de desafios técnicos e demandaram um procedimento de construção particular, em condições submersas, para as fundações da ponte de aproximadamente 2 km de extensão.

Soluções proposta e adotada: a primeira ação adotada foi a execução de uma plataforma provisória através de aterro hidráulico reforçado com geotêxtil tecido de poliéster de alta resistência à tração. Essa plataforma possibilitou a execução das fundações em condições 'secas'. Os taludes da plataforma foram compostos por até três níveis de tubos geotêxteis preenchidos com areia dragada como diques de contenção temporários possibilitando a construção dos aterros (Figura 53).

Figura 53 - Conformação dos diques de contenção com tubos para a construção da plataforma em aterro hidráulico.



Fonte: Huesker (2021).

A geometria dos tubos de geotêxtil foi dimensionada de acordo com o grau de estabilidade frente às solicitações hidráulicas extremas dessa zona do rio Nanay. A instalação do reforço basal e dos níveis inferiores dos tubos geotêxteis foi totalmente executada de forma submersa nas zonas alagadas (> 90% da plataforma). Para áreas 'secas' (condições emersas) foi construída uma plataforma arenosa também reforçada por um geotêxtil tecido na base dos aterros.

Análise crítica: a obra foi bem planejada e o processo executivo, começando pela plataforma construtiva provisória, foi importante para o desenvolvimento da execução da obra da ponte. Os reforços geossintéticos garantiram não só a estabilidade geotécnica global da plataforma, dentro de condições de carregamento elevado (peso operacional de guindastes e outros equipamentos especiais de fundações), mas também a estabilidade local dos taludes nas áreas emersas. De novo, ressalta-se a versatilidade de tubos de geotêxtil em obras que envolvem áreas submersa. A alta resistência à tração das costuras desses tubos permitiu o preenchimento dos módulos mesmo sob elevadas pressões de bombeamento

Obra OBH 08

A obra se refere à construção da praia artificial “El Salitre” no ano de 2019 em Tocopilla, a 1.532 km de Santiago - capital do Chile.

Problema: a praia El Salitre é próxima a uma região portuária onde foi instalada uma usina termelétrica. Devido ao carregamento e descarregamento de carvão mineral, a areia da praia apresentava uma coloração escura com contaminação variada, imprópria para o uso da população local. Em consequência, houve necessidade de construir uma nova praia numa região com intensa ação de ondas e correntezas do oceano Pacífico.

Soluções proposta e adotada: para proteger a nova praia artificial da ação de ondas e correntezas, foram construídos dois molhes e um dique submerso, proporcionando 250 m lineares de praia através da dragagem e encapsulamento de 29.000 m³ de areia contaminada, além da reposição de 26.000 m³ de areia branca importada limpa para a área.

O encapsulamento da areia contaminada foi possível graças ao uso de tubos geotêxteis que funcionaram como núcleos dos molhes norte e sul de proteção costeira. O molhe norte tem 120 m de comprimento, enquanto o molhe sul tem 199 m de comprimento (Figura 54). Para reduzir a erosão de base junto à estrutura dos molhes, mantos anti-socavantes com ancoragem foram dimensionados e colocados anteriormente a colocação dos tubos geotêxteis.

Figura 54 - Praia artificial El Salitre em Tocopilla, Chile.



Fonte: Huesker (2021).

O núcleo do molhe sul foi constituído com 40 tubos geotêxteis sobre 6 mantos anti-socavação e o núcleo do molhe norte com 12 tubos geotêxteis sobre 9 mantos anti-socavação. Esses núcleos possuem configurações de um a três níveis de sobreposição de tubos geotêxteis, garantindo a altura necessária aos molhes conforme o aumento da profundidade, decididos em projeto. Após o enchimento, elementos de proteção mecânica (geotêxtil não-tecido de 500 g/m²) foram fixados sobre o núcleo do molhe, para que então a cobertura de rochas para filtração e depois cobertura de rochas para dispersão de energia hidráulica fossem feitas.

Análise crítica: a aplicação dos tubos geotêxteis nesta obra possibilitou o uso de material contaminado como material de preenchimento o que é uma grande vantagem ambiental e econômica. Para além dessa vantagem, outras podem ser destacadas, tais como: rapidez executiva e menor custo devido à economia de rochas. Por outro lado, ressalta-se que esses tubos devem ser duráveis e resistir ao desgaste devido ao sol e ao potencial erosivo do impacto do mar ao longo do tempo. Por meio de utilização de produtos geossintéticos, a construção da obra proporcionou mais qualidade de vida à população local, valorizando a região e trazendo crescimento econômico local.

COMENTÁRIOS GERAIS: os casos de obras apresentados na categoria de obras hidráulicas envolvem somente obras com uso de geofôrmas e colchões compostos por geotêxteis, deixando de lado as obras mais simples que envolvem somente geocompostos drenantes e geotubos. As obras apresentam grandes desafios construtivos por serem realizadas em canais, praias, mar ou

regiões submersas com ou sem incidência de erosão progressiva e de ondas e correntezas. As soluções em geossintéticos são eficientes nesses casos, sem criar grandes prejuízos para o meio ambiente e garantindo rapidez e economia. Tendo em conta as condições ambientais a que esses produtos geossintéticos estão submetidos ao longo da vida útil, é importante assim o controle das suas propriedades de modo a garantir segurança e eficiência durante toda a vida útil da obra.

4.2 SOLUÇÕES EM ENGENHARIA

Com base nos trabalhos disponíveis na literatura e nos casos de obras analisados, este item apresenta um conjunto de soluções mais comuns em engenharia com uso de geossintéticos para aterros sobre solos moles, reforço de pavimentos, estabilidade de taludes e obras hidráulicas (filtro e drenagem). Essas soluções são apresentadas em forma de desenhos (croquis) e acompanhadas de comentários que realçam o tipo e função de geossintéticos utilizados. Ressalta-se que a apresentação destas soluções visa facilitar o entendimento dos usuários ou interessados em geossintéticos sobre a integração desses em vários problemas de engenharia geotécnica. Em outras palavras, o foco deste item não é padronizar os procedimentos mas sim expor as soluções mais correntes em obras geotécnicas, uma vez que cada obra tem as suas particularidades, em termos de variabilidade de solo e carga, e essas particularidades vão orientar a escolha do tipo de geossintético e procedimentos executivos.

4.2.1 Aterro sobre Solos Moles

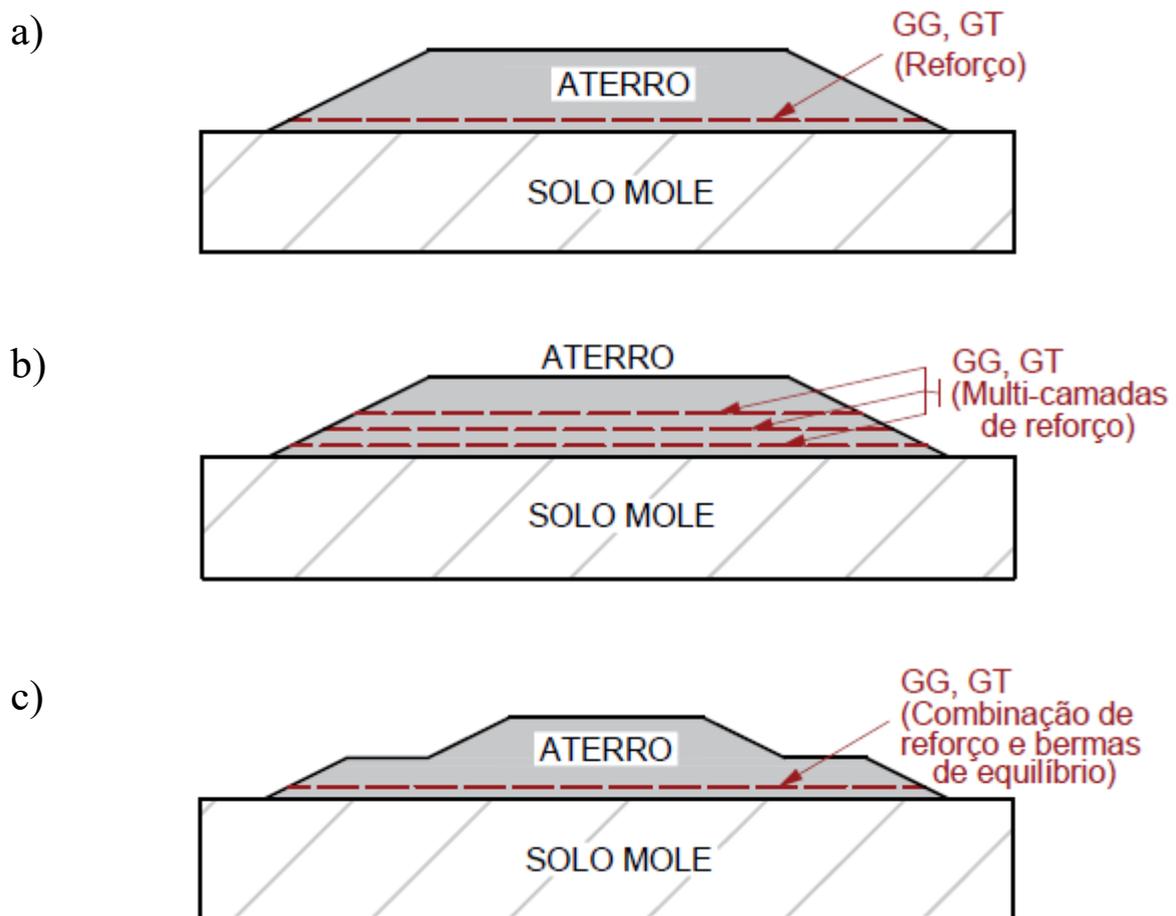
Diversos tipos de geossintéticos são utilizados em aterros sobre solos moles, devido à baixa capacidade de suporte destes solos, com objetivo de garantir a estabilidade dos aterros, por meio de reforço, aumento de rigidez e aceleração do processo de adensamento. Os principais tipos de geossintéticos empregados são geotêxteis (GT), geogrelhas (GG), geocompostos (GC) e geocélulas (GL) por razões já explicadas no capítulo de revisão bibliográfica. Em termo geral, geogrelha e geotêxtil são os geossintéticos mais utilizados em aterros sobre solos moles, geogrelha devido a sua alta resistência à tração na função de reforço e o geotêxtil devido a sua versatilidade nas funções de reforço, separação, filtração, drenagem e proteção. Geotêxteis Não-Tecidos são pouco aplicados para função de reforço devido à baixa resistência e rigidez à tração.

Como soluções em engenharia, são apresentadas a seguir as figuras que destacam o tipo e função de geossintéticos mais utilizados. Vale ressaltar que esses geossintéticos devem apresentar resistência e rigidez à tração, boa interação com solo, durabilidade, entre outros.

A figura 55 mostra três soluções para reforço de aterro sobre solos moles por meio de geotêxteis e geogrelhas. Nesse caso, os geossintéticos são projetados para resistir ao empuxo

de terra e a deformação lateral da fundação. A figura 55a ilustra a utilização somente de uma camada de geossintéticos mais resistentes, ao passo que a figura 55b mostra uma condição em que foi necessária a instalação de várias camadas de geossintéticos menos resistentes ao invés de uma única camada com material mais resistente. A figura 55c apresenta um caso em que o reforço do aterro foi realizado por meio da combinação de uma camada de geossintéticos e bermas laterais de equilíbrio. Com relação ao uso de geotêxteis, vale comentar que, para além de funções de reforço, também podem desempenhar funções de separação quando se encontram posicionados entre camadas de aterro e solos moles.

Figura 55 - Aplicação de GG e GT para reforço de aterros. a) camada única de reforço, b) multi-camadas de reforço. c) combinação de camada única de reforço com bermas de equilíbrio.

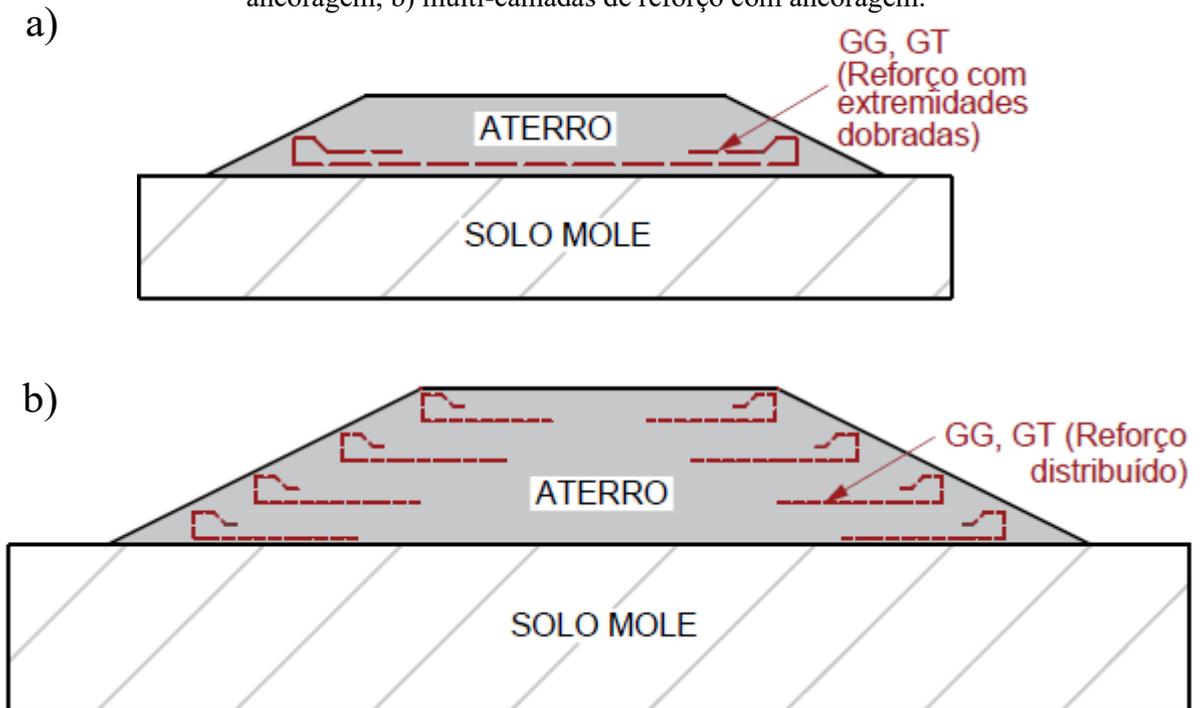


Fonte: Palmeira (2020) (adaptado pelo autor).

Em situações onde a mobilização da força necessária no reforço para a estabilização do aterro é grande, recorre-se a ancoragem das extremidades dos geossintéticos por meio de envelopamento, como mostrado na Figura 56. A disposição de uma camada de geossintéticos

com extremidades ancoradas no corpo do aterro é ilustrada na Figura 56a, enquanto que a Figura 56b mostra várias camadas de geossintéticos menos resistentes com extremidades ancoradas. Este caso mostra também a otimização do processo construtivo, com a economia dos geossintéticos concentrados nos taludes do aterro.

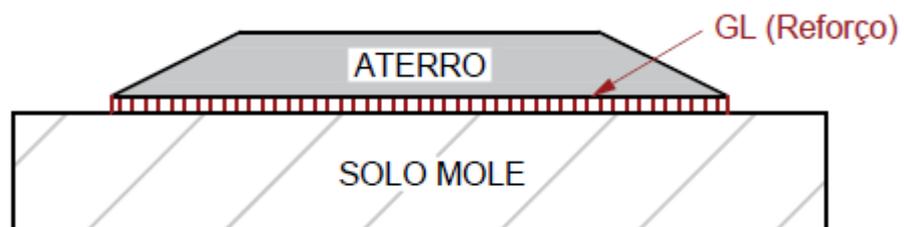
Figura 56 - Aplicação de GG e GT para reforço de aterros. a) camada única de reforço com ancoragem, b) multi-camadas de reforço com ancoragem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A figura 57 mostra uma solução alternativa com o uso de geocélula para funcionar como reforço e placa na base do aterro de modo a aumentar a rigidez da base do aterro e favorecer a redução de recalques diferenciais.

Figura 57 - Aplicação de GL para reforço de aterros.

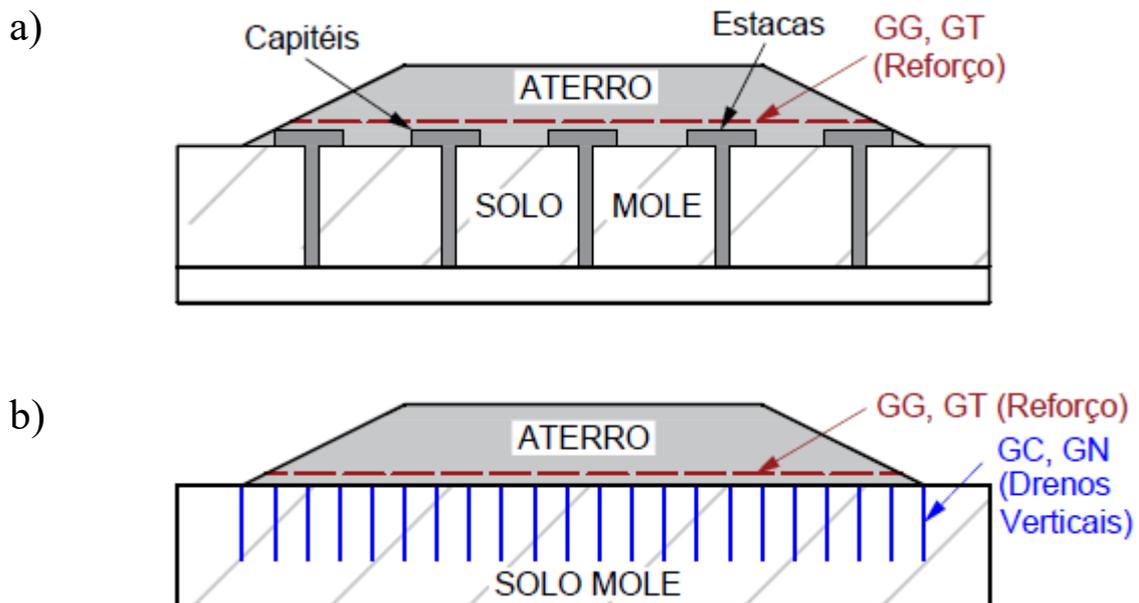


Fonte: Palmeira (2020) (adaptado pelo autor).

A combinação de geossintéticos e outras técnicas complementares é apresentada na Figura 58. A figura 58a mostra a combinação de geossintético com estacas e capitéis para compor um aterro reforçado e estaqueado. Salienta-se que outras possibilidades, tais como: colunas granulares encamisadas com geossintéticos e aterros leves podem ser também utilizadas. Essas soluções são frequentes quando se deseja reduzir magnitude de recalques e de movimentação lateral do solo mole.

Por fim, a Figura 58b apresenta uma solução onde geossintéticos com função de reforço atuam em conjunto com os drenos verticais que têm função de acelerar o processo de adensamento. Como drenos verticais, os geocompostos drenantes vêm sendo utilizado cada vez mais em substituição aos drenos de areia em função de inúmeras vantagens, tais como: maior controle tecnológico, economia, rapidez e facilidade de instalação, facilidade de transporte, entre outros.

Figura 58 – Geossintéticos e técnicas complementares. a) Aplicação de geossintéticos e estacas para reforço de aterros; b) Aplicação de geossintéticos e drenos verticais para reforço de aterros.



4.2.2 Reforço de Pavimentos

Em pavimentos, diversos tipos de geossintéticos (GG, GT, GC, GL e produtos para controle de erosão) podem ser utilizados para desempenhar diversas funções. Contudo, geogrelhas são utilizadas principalmente para função de reforço, enquanto geotêxteis podem ser empregados para funções de reforço, filtração, separação, drenagem e proteção. Aplicabilidade vai depender dos objetivos desejados. Segundo Zornberg (2020), a camada de revestimento é composta por um material fabricado e caro, sendo que ela deve ser durável, muito resistente e impermeável. A camada de base é composta por materiais fabricados ou naturais e devem ser resistentes e bem drenados, enquanto a camada de sub-base é constituída de material natural e bem drenado, com resistência moderada. Por fim, o subleito é a camada mais frágil constituída por solo local e é sensível à variação de umidade.

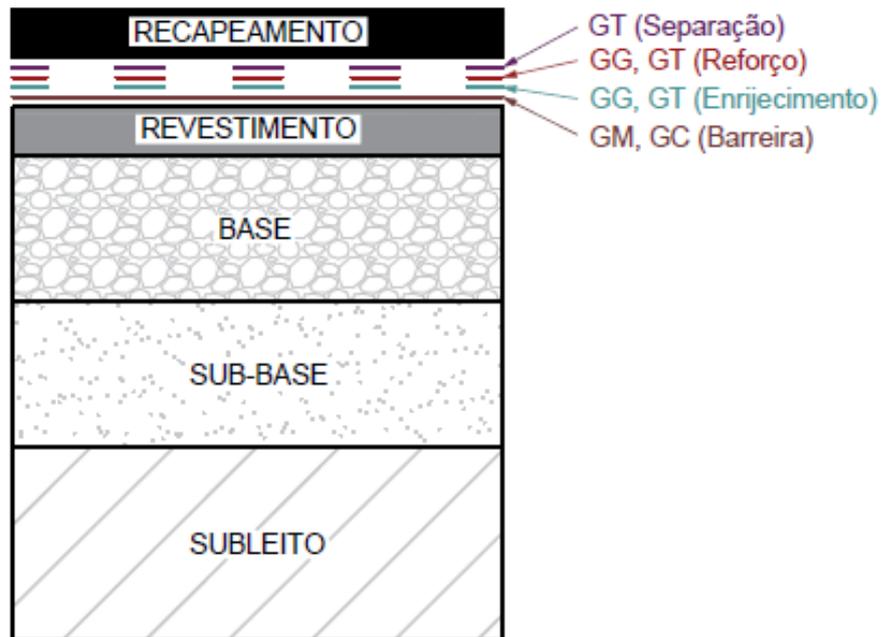
Geogrelhas são aplicadas geralmente nas primeiras camadas do pavimento – revestimento e/ou base – com o intuito de reforçar essas camadas e evitar a propagação de trincas provocadas pelas solicitações decorrentes do tráfego e/ou da variação de temperatura. Como foi citado anteriormente, para uma mesma resistência à tração, as geogrelhas apresentam um desempenho melhor como reforço em relação aos geotêxteis. Considerado geossintético polivalente, o geotêxtil pode ser utilizado em todas as camadas de pavimento, como mostram algumas figuras seguintes propostas por Zornberg (2020).

A figura 59 mostra uma solução onde vários tipos de geossintéticos podem ser utilizados entre o recapeamento novo e o revestimento deteriorado.

Os geossintéticos utilizados para funções de reforço e rigidez visam essencialmente diminuir ou eliminar trincas de reflexão provenientes do pavimento antigo, aumentar a capacidade do pavimento e diminuir a deformação lateral das camadas, mantendo assim a integridade do recapeamento.

Quando se deseja separar materiais das duas camadas utilizam-se geotêxteis, e quando o objetivo é diminuir a degradação do pavimento causada pela infiltração de água através das trincas para outras camadas, recorre-se ao uso de geomembranas e geocompostos drenantes que desempenham função de barreira.

Figura 59 - Soluções em geossintéticos aplicadas entre recapeamento e revestimento.



Fonte: Zornberg (2020) (adaptado pelo autor).

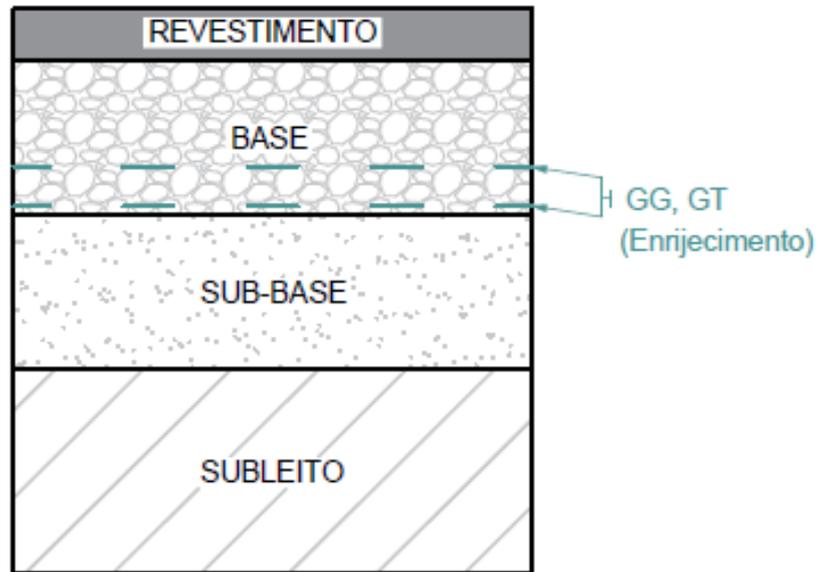
A figura 60 ilustra a aplicação de geossintéticos na parte inferior da base para confinar agregados livres e minimizar a tendência dos mesmos se deslocarem lateralmente. Neste caso, uma ou mais camadas de geossintéticos são aplicados para enrijecer o pavimento, de modo a minimizar a degradação do módulo da camada de agregado livre.

De modo geral, as soluções em geossintéticos adotadas dependem dos objetivos desejados. As Figuras 60, 61, 62 e 63 ilustram várias situações onde geossintéticos podem ser utilizados entre camadas de base e sub-base e entre camadas de sub-base e subleito para funções de separação, filtração, drenagem, reforço e enrijecimento.

Nessas situações, geotêxteis são aplicados como elementos separador e filtrante entre as camadas com o objetivo de reduzir a mistura de materiais no pavimento, evitando assim a redução da camada dos agregados livres, bombeamento dos finos e contaminação das camadas de agregado livre com solos finos do subleito.

Geotêxtil, geocomposto ou georrede podem ser utilizados entre base e sub-base e sub-base e subleito com o intuito de melhorar a drenagem horizontal e lateral nas camadas do pavimento, reduzir poropressões causadas pelo tráfego e reduzir umidade nos solos não saturados das camadas estruturais.

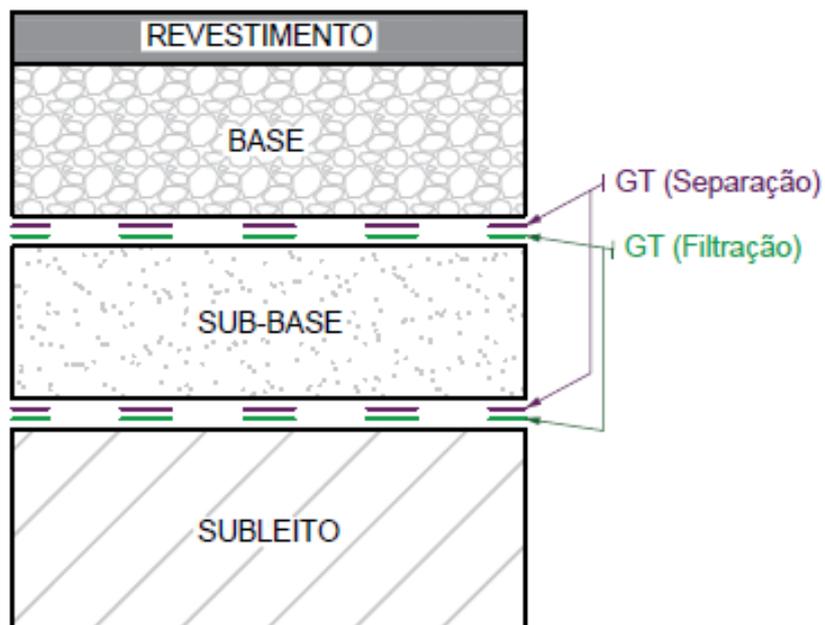
Figura 60 - Soluções em geossintéticos para o enrijecimento do pavimento.



Fonte: Zornberg (2020) (adaptado pelo autor).

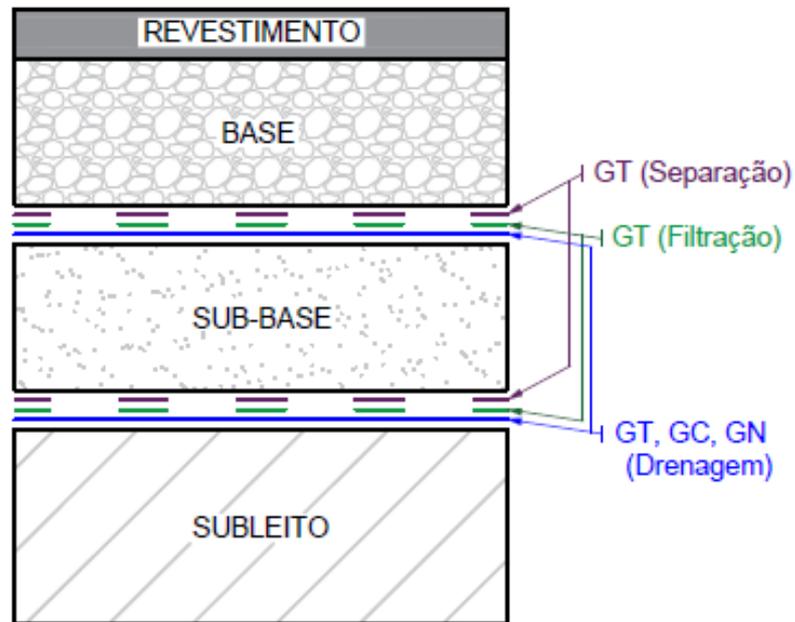
Os geossintéticos com função de reforço podem ser utilizados para enrijecer e estabilizar subleitos. Neste caso, é possível diminuir o desenvolvimento da trilha de roda ao longo do tempo através de redução de tensões verticais e de cisalhamento no subleito e de redistribuição das tensões verticais e de cisalhamento no subleito além do caminho da roda.

Figura 61- Soluções em geossintéticos para separação e filtração entre camadas de pavimento.



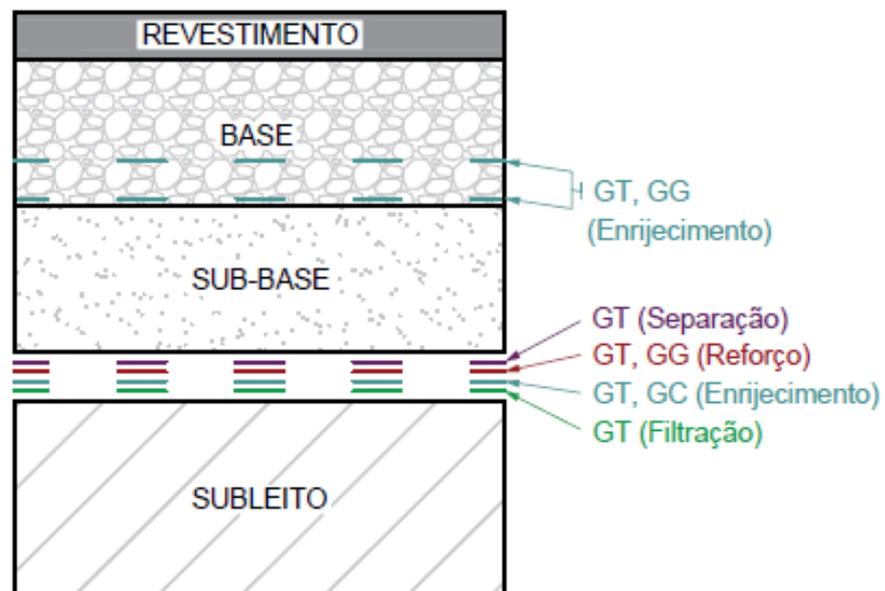
Fonte: Zornberg (2020) (adaptado pelo autor).

Figura 62 - Soluções em geossintéticos para separação, filtração e drenagem entre camadas de pavimento.



Fonte: Zornberg (2020) (adaptado pelo autor).

Figura 63 - Soluções em geossintéticos para diversas funções entre camadas de pavimento.

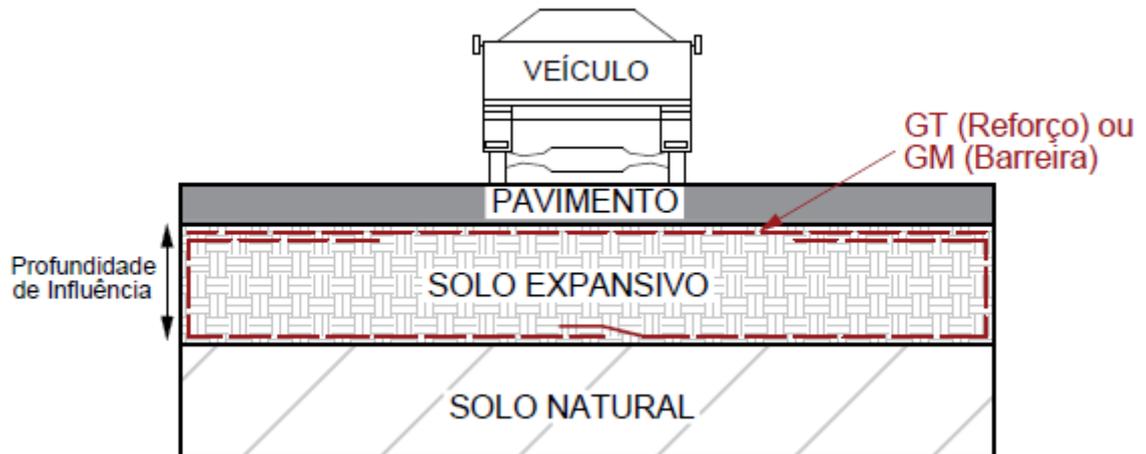


Fonte: Zornberg (2020) (adaptado pelo autor).

A figura 64 mostra uma solução utilizada para envelopamento de solos expansivos por geossintéticos. Pode ser utilizado o geotêxtil para reforço ou a geomembrana com função de barreira, evitando a variação da umidade do material em diferentes épocas do ano. É possível

observar a profundidade de influência na área de região com solo expansivo em relação ao pavimento.

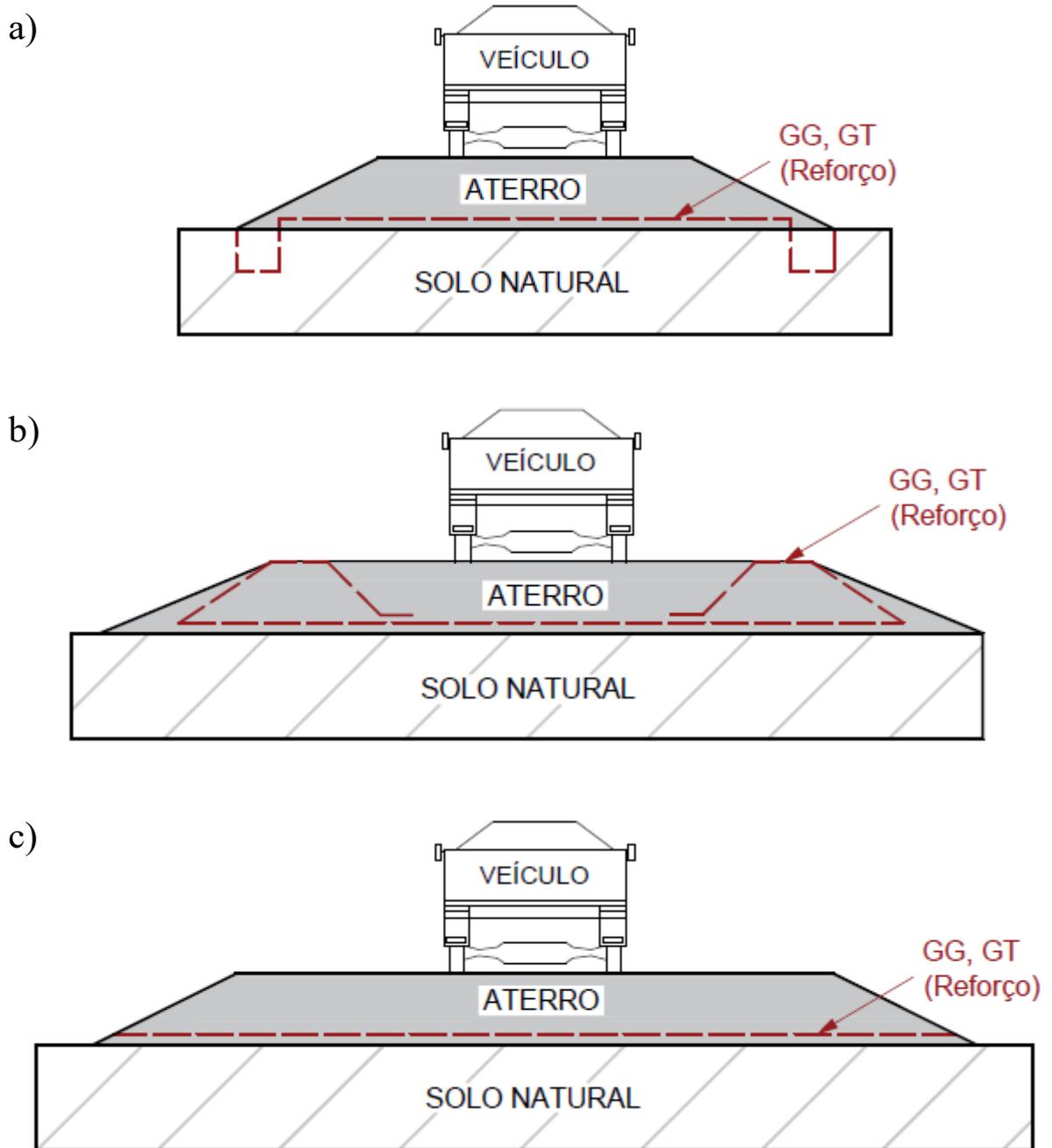
Figura 64 - Envolvimento de solo expansivo com geossintéticos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para estradas não pavimentadas, a Figura 65 mostra três possíveis soluções em geossintéticos utilizados para função de reforço. Essas soluções reduzem o afundamento provocado pelas rodas de veículos pesados, principalmente em épocas chuvosas. Geogrelhas e geotêxteis utilizados nestes casos atuam como elemento de reforço, proporcionando os seguintes benefícios: aumento da capacidade de carga, melhoria das condições de trafegabilidade, diminuição das deformações superficiais, aumento da vida útil da estrada, redução de manutenções, etc.

Figura 65 - Soluções em geossintéticos para reforço de aterros das vias não pavimentadas. a) Camada de reforço atuando nas extremidades; b) Ancoragem das extremidades por meio de envolvimento; c) Camada única de reforço.



Fonte: Adaptado pelo autor (2021).

4.2.3 Estabilidade de Taludes

Uma das aplicações mais frequentes de geossintéticos é na estabilização de taludes naturais e artificiais. Geogrelhas e geotêxteis são utilizadas geralmente para fins de reforço, principalmente a geogrelha devido a sua resistência. Geotêxteis podem ser aplicados também para filtração e separação, enquanto os geocompostos drenantes, geomantas e outros produtos podem ser utilizados em alguns casos para drenagem e proteção das faces por meio de implantação de vegetação. As inclusões de geossintéticos para fins de reforço reduzem as deformações no interior da massa reforçada, conferindo ao solo um efeito similar ao do aumento do confinamento, conseqüentemente melhorando o comportamento mecânico.

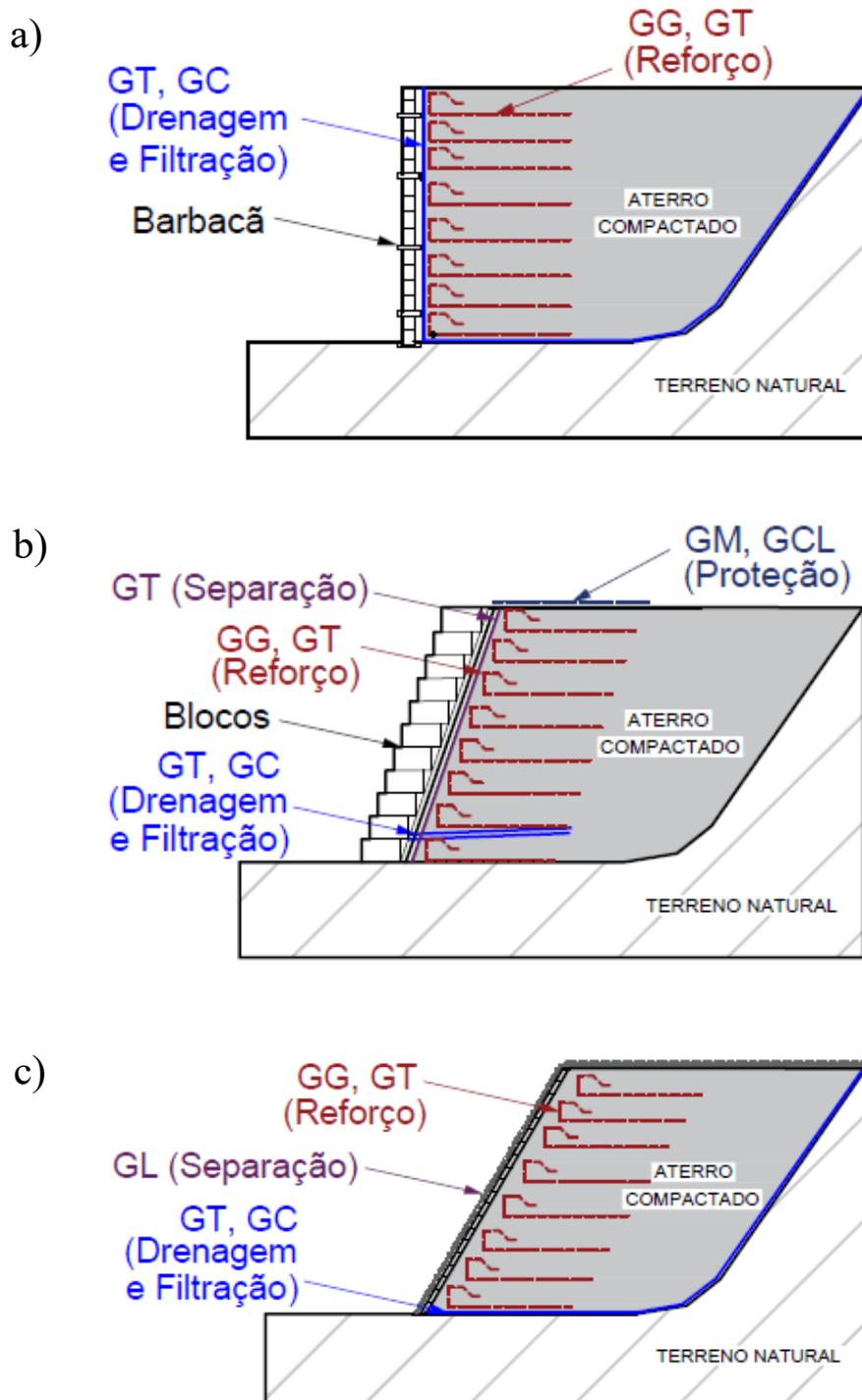
A ancoragem de geossintéticos pode ser por meio de envelopamento ou fixação nos elementos de face. Exceto esta diferença na técnica de ancoragem, o procedimento executivo não apresenta muita divergência, consistindo principalmente na seqüência entre colocação de forma, lançamento de camadas de geossintéticos, compactação do aterro compactado e ancoragem do geossintético até atingir a altura do talude. Como acabamento, podem ser utilizados como materiais de faces: placas, blocos, sacos preenchidos com solo ou solo cimento, gabiões, alvenaria, concreto projetado, etc. Em função disso, as figuras mostradas a seguir focam somente na técnica de envelopamento.

A figura 66 compila as possíveis soluções que podem ser adotados para estabilização de taludes. As figuras 66a e 66b mostram muros de contenção reforçados com camadas de geogrelha ou geotêxtil e aterro compactado. Para funções de separação e filtração podem ser empregados geotêxteis, para função de drenagem são aplicados geocompostos drenantes. Esses geossintéticos são associados aos barbacãs e drenagens superficiais para melhorar as condições de drenagens na face do muro ou na base e no topo do aterro compactado.

A figura 66c ilustra um talude íngreme reforçado com camadas de geossintéticos dentro do aterro compactado. Neste caso, pode-se utilizar diferentes soluções para proteção contra a erosão devido os efeitos diretos do vento e do impacto da chuva, e também para restabelecimento da vegetação na encosta. Tipos de produtos utilizados variam de acordo com o fornecedor, porém podem ser aplicados para essa finalidade geomantas, geocélulas, geogrelha 3D, etc. É recomendável sempre a combinação de técnicas, tendo em conta que não há garantia de crescimento da vegetação em toda área e em todo o período do ano. Em alguns casos, é

possível recorrer à geomembrana ou ao geocomposto argiloso para proteger faces do talude sujeitas ao processo erosivo.

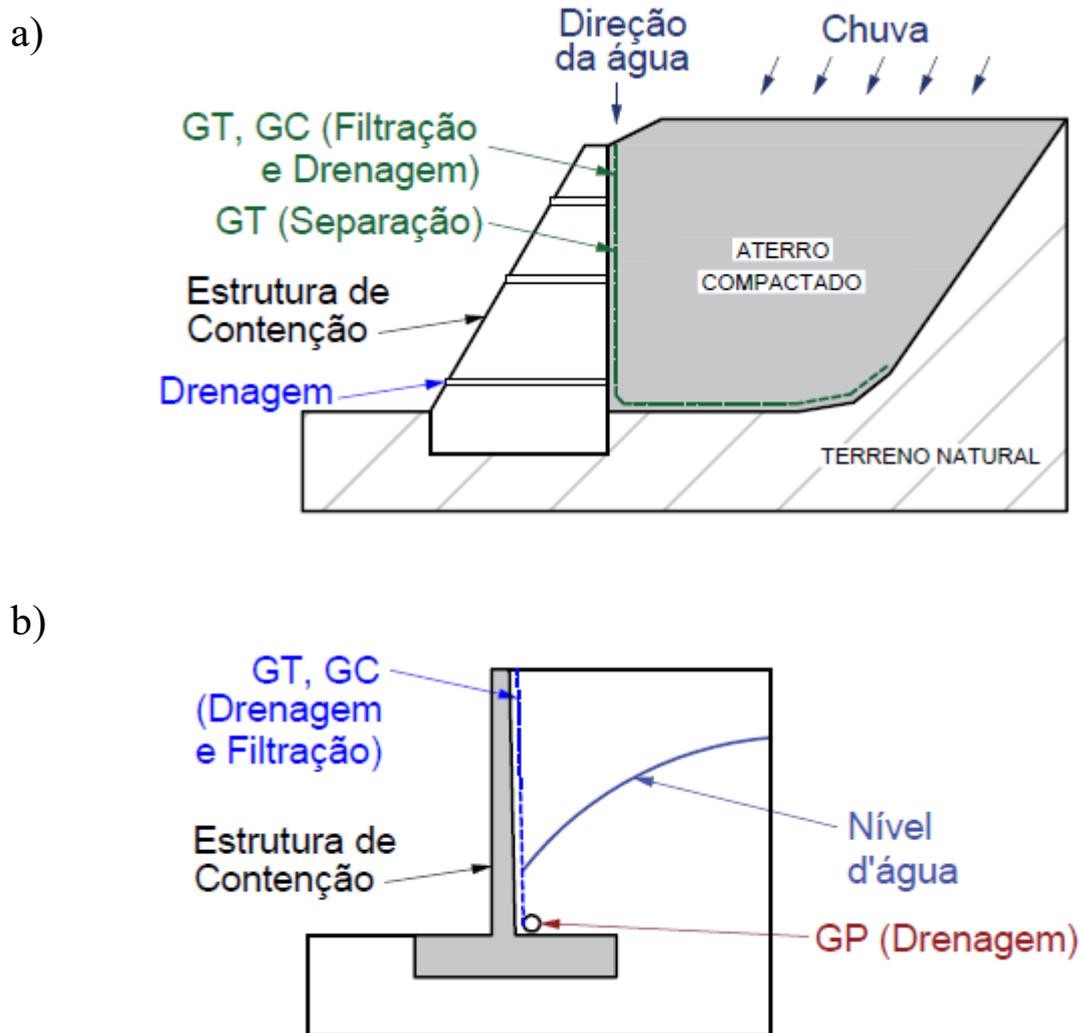
Figura 66 - Soluções em engenharia com geossintéticos para estabilidade de taludes. a) Muro de contenção; b) Muro executado em blocos. c) Talude íngreme.



Fonte: Palmeira (2018) (adaptado pelo autor).

A figura 67 apresenta um caso onde geossintéticos desempenham somente funções de filtração, separação e drenagem, deixando a estabilização do talude para a estrutura de contenção.

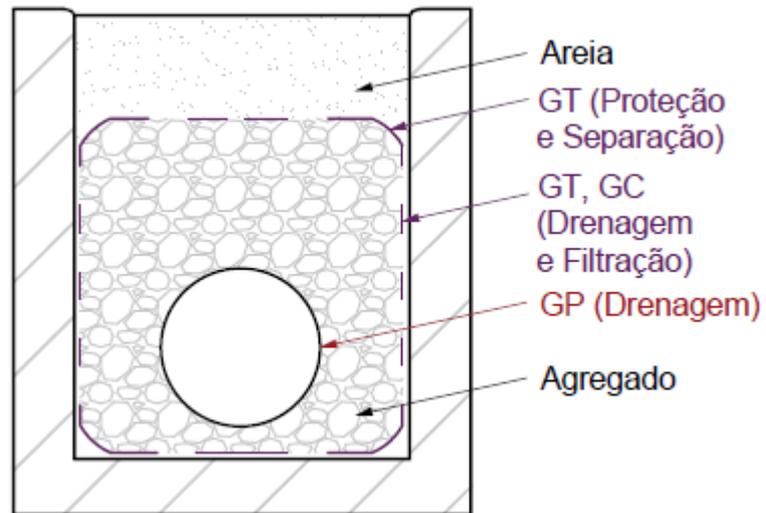
Figura 67- Aplicação de geossintéticos em talude com estrutura de contenção. a) Geossintéticos com função de filtração, separação e drenagem; b) Filtração e drenagem em talude com nível d'água elevado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Por fim, a figura 68 apresenta detalhes de um geotubo drenante dentro de uma camada de agregados envelopada por geotêxteis. Essa solução pode ser utilizada nas laterais dos aterros de pavimento e nos taludes para drenar água captada.

Figura 68 - Aplicação de geossintéticos na vala de drenagem.



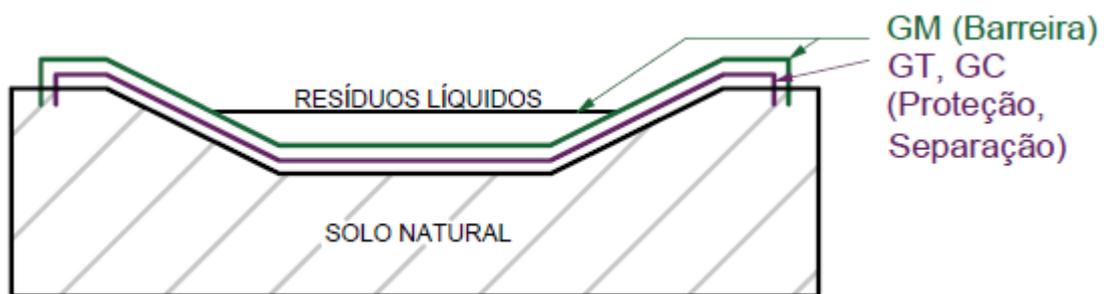
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2.4 Obras Hidráulicas e Obras de Drenagem e Filtração

As obras hidráulicas com possibilidade de uso de geossintéticos são canais e reservatórios, proteção de margens e leitos de corpos d'água, barragens e diques, contenção de partículas carregadas por fluxo hidráulico, etc. Casos de obras pertencentes a algumas dessas aplicações já foram apresentados no item 4.1 relacionado à análise crítica de casos de obras. Entretanto, a maioria das aplicações de obras hidráulicas não faz parte do dia a dia dos estudantes de engenharia civil nem dos escritórios pequenos de engenharia geotécnica. Contudo, ressalta-se que os geossintéticos mais utilizados nessas obras são geofôrmas, colchões compostos por geotêxteis, geocélulas, geomembras e geocompostos bentônicos e geossintéticos. Em função disso, são apresentadas, neste item, somente algumas soluções de obras hidráulicas e obras que envolvem canais e reservatórios.

A figura 69 mostra um canal com a utilização de geomembrana para função de barreira para evitar perda de água por infiltração, enquanto o geotêxtil (ou geocomposto drenante) é utilizado para função primária de proteção de geomembrana e função secundária de separação. Caso for necessário, a geomembrana pode ser utilizada como barreira para evitar evaporação do líquido armazenado.

Figura 69 - Canal com uso de geossintéticos para proteção, separação e barreira.

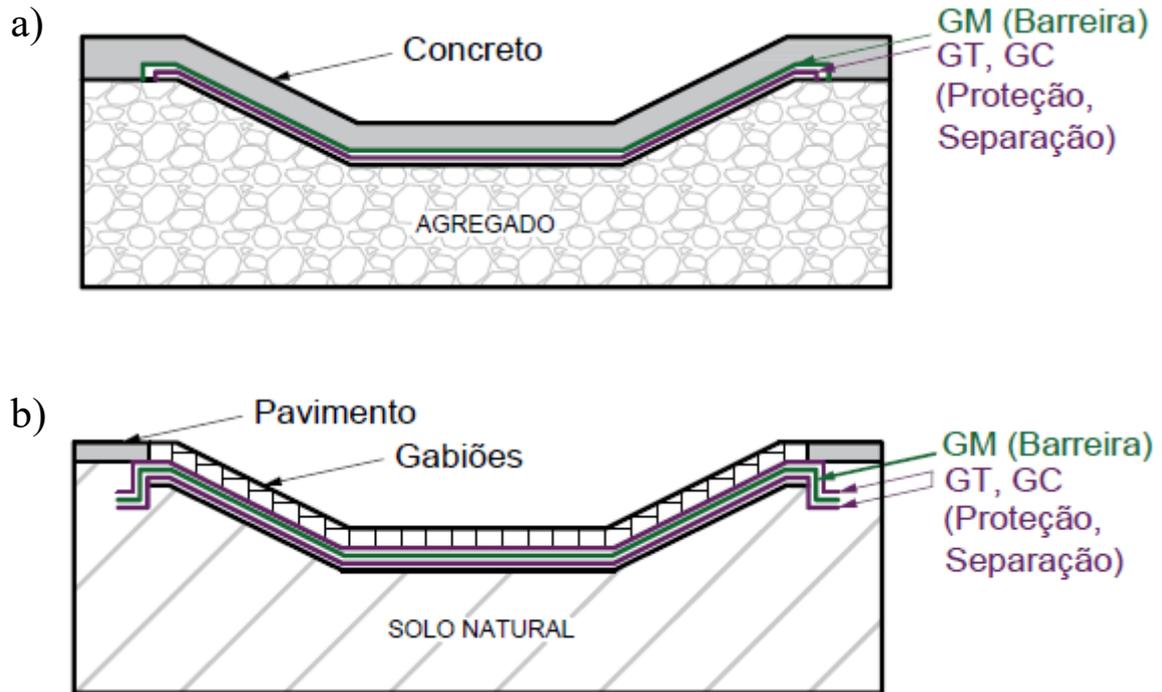


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para garantir a durabilidade em canais e reservatórios com longo período de vida útil, não é adequado deixar geomembranas expostas ao ar livre. Como medidas de proteção, os canais e reservatórios podem ser revestidos com geocélulas preenchidas com concreto ou gabiões, como mostram as Figuras 70a e 70b. Abaixo dessas camadas de revestimento, são aplicados nessa ordem: geotêxteis para funções de proteção e separação, geomembranas para função de barreira e geotêxteis para funções de separação e barreira. Quando existir ação de

ondas, outras soluções em geossintéticos podem ser aplicadas para evitar ou reduzir o potencial erosivo do impacto.

Figura 70 - Aplicação de geossintéticos em canais e reservatórios. a) Geossintéticos em canais preenchidos com concreto; b) Geossintéticos em canais preenchidos com gabiões.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou detalhadamente 32 casos de obras de engenharia no período de 1998 a 2018 com a aplicação de soluções HUESKER e apresentou diversas soluções em geossintéticos. Os objetivos específicos e geral foram satisfatoriamente atendidos. Foram apresentados no trabalho os conceitos básicos sobre os geossintéticos aplicados em engenharia geotécnica na revisão bibliográfica, assim como a metodologia estabelecida para busca, compilação, separação dos casos de obras em 4 categorias: aterro sobre solos moles, reforço de pavimentos, estabilidade de taludes e obras hidráulicas. Por fim, as análises críticas dos 32 casos de obras foram apresentadas com destaques de padrões de comportamentos em termos de execução das obras e do uso de geossintéticos, para depois apresentar soluções em geossintéticos para as 4 categorias, em forma de desenhos comentados. A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento deste trabalho.

Há uma tendência crescente da aplicação de diversos tipos de geossintéticos em obras de engenharia geotécnica, tendo em conta as seguintes vantagens: versatilidade, rapidez executiva, facilidade de aplicação e transporte, custo competitivo, maior controle tecnológico, redução do impacto ambiental, possibilidade de viabilizar construção em solos que não seriam considerados adequados. Para a consolidação dessa tendência e para o sucesso das obras, é preciso ter um bom entendimento tanto das propriedades dos geossintéticos, como das do solo, das características da obra e dos métodos de dimensionamento.

Apesar de vários tipos de geossintéticos serem capazes de atender mais de uma função, existem alguns que são mais selecionados e utilizados nas 4 categorias analisadas. De modo geral, geogrelhas e geotêxteis são os mais frequentes em obras de aterro sobre solos moles, reforços de pavimentos e estabilidade de taludes. Obras hidráulicas e de drenagem e filtração englobam uma gama maior de geossintéticos. As soluções em geossintéticos podem ser associadas às outras soluções para conseguir melhor desempenho na obra. Os fatores como tipo de solo, vida útil da obra, disponibilidade de materiais, localização e tipo de obra, domínio da técnica construtiva, custo, entre outros condicionam a escolha do tipo de geossintéticos e as soluções adotadas. Ou seja, cada obra requer uma análise individual.

As soluções em geossintéticos, apresentadas para as 4 categorias, destacam vários aspectos importantes para orientar os iniciantes em geossintéticos sobre as possíveis soluções e técnicas construtivas a serem adotadas em problemas de engenharia geotécnica.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para futuros trabalhos, enumera-se os seguintes:

- Analisar aspectos de dimensionamento para as 4 categorias de obras com soluções em geossintéticos;
- Comparar as diversas técnicas complementares - aterros estaqueados, colunas granulares, drenos verticais, bermas de equilíbrio, entre outros - com o uso de geossintéticos, destacando suas vantagens e desvantagens;
- Analisar custos envolvidos em obras com geossintéticos, considerando situações de curto, médio e longo prazo.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, Arthur Cardillo et al. **Avaliação de Metodologias de Dimensionamento de Solo Reforçado com Geossintéticos: Estudo de Caso**. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19, 2018, Salvador. Artigo. Salvador: Abms, 2018. p. 1-11.
- ALMEIDA, M.S.S.; MARQUES, M.E.S. **Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho**. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- ALVES, Maria Bernardete Martins et al. **Minicurso de referência e citação**. Florianópolis, 2018. 67 slides, color. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/194316>. Acesso em: 11 mai. 2021.
- AMARAL, Nara Brasil do. **Geossintéticos aplicados a geotecnia ambiental**. 2019. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- ANTUNES, Luiz Gustavo de Souza e. **Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos**. 2008. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 10318:2005: Geosynthetics - Terms and definitions**. [S. L.]: Abnt, 2005. 34 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6024**: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento escrito: apresentação. Rio de Janeiro, 2012.
- BANDEIRA, Matheus Dantas de Oliveira; SILVA, Leonete Cristina de Araújo Ferreira Medeiros. **Evolução do emprego de geossintéticos em obras rodoviárias nos últimos 20 anos**. 2019. 13 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Multidisciplinar de Caraúbas, Universidade Federal Rural do Semiárido - Ufersa, Caraúbas, 2019.
- BATHIA, S.K.; HUANG, Q. **Geotextile filters for internally stable/unstable soils**. Geosynthetics International, v. 2, n. 3, p. 537-565, 1995.
- BORGES, Bruno da Silva. **Estudo da Interação Solo - Geogrelha pelo Método dos Elementos Discretos**. 2012. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- BUENO, B. S.; VILAR, O. M. - "Propriedades, ensaios e normas", in: **Manual Brasileiro de Geossintéticos**, cap. 3, Vertematti (ed.), Edgard Blücher (2004).
- CHRISTOPHER, B.R.; HOLTZ, R.D. **Geotextile engineering manual**. Report n. FHWA-TS-86/203. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1985.

EHRlich, M, BECKER, L.B., “**Muros e Taludes de Solo Reforçado**”, 1ª ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2009.

GÓNGORA, I.A.G. **Utilização de geossintéticos como reforço de estradas não pavimentadas: influência do tipo de reforço e do material de aterro**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011.

GÓNGORA, I.A.G. **Estradas não pavimentadas reforçadas com geossintéticos: Influência de propriedades físicas e mecânicas do reforço**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

GOURC, J.P.; ROLLIN, A.; LAFLEUR, J. **Structural permeability law of geotextiles**. In **International Conference on Geotextiles**, Las Vegas, USA. Proceedings...v.1, p. 149-153, 1982.

HINCHBERGER, S.D.; ROWE, R.K. **Geosynthetic reinforced embankments on soft clay foundations: predicting reinforcement strains at failure**. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 21, p. 151-175, 2003.

HUESKER (Brasil) (org.). **Huesker**. 2021. Disponível em: <https://www.huesker.com.br/>. Acesso em: 05 set. 2021.

HUESKER BRASIL. **Huesker Report - Casos de Obras Volume 1** - Brasil: Huesker, 2020. 52 p. 4 v. (Vol. I). Disponível em: <https://conteudo.huesker.com.br/hreport1>. Acesso em: 14 jul. 2021.

HUESKER BRASIL. **Huesker Report - Casos de Obras Volume 2** - Brasil: Huesker, 2020. 125 p. 4 v. (Vol. II). Disponível em: <https://conteudo.huesker.com.br/hreport2>. Acesso em: 14 jul. 2021.

HUESKER BRASIL. **Huesker Report - Casos de Obras Volume 3** - Brasil: Huesker, 2020. 180 p. 4 v. (Vol. III). Disponível em: <https://huesker-1.rds.land/hreport3>. Acesso em: 14 jul. 2021.

HUESKER BRASIL. **Huesker Report - Casos de Obras Volume 4** - Brasil: Huesker, 2021. 100 p. 4 v. (Vol. IV). Disponível em: <https://conteudo.huesker.com.br/e-book-huesker-report-volume-4>. Acesso em: 14 jul. 2021.

IGS BRASIL (Brasil). International Geosynthetics Society (IGS) (org.). **Classificação dos Geossintéticos**. [S. L.], 2021. 2 p. Marianna J.A. Mendes. Disponível em: <https://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/2020/04/1.pdf>. Acesso em: 20 maio 2021.

IGS BRASIL (Brasil). International Geosynthetics Society (IGS) (org.). **Funções dos Geossintéticos**. [S. L.], 2021. 2 p. Karla C.A.P. Maia. Disponível em: <https://igsbrasil.org.br/wp-content/uploads/2020/04/2.pdf>. Acesso em: 20 maio 2021.

LAFLEUR, J. **Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils**. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 17, n. 5-6, p. 299-312, 1999.

KOERNER, Robert M. 1998. “**Designing with Geosynthetics**”. Editado por Pearson Prentice Hall. 5ª ed. Estados Unidos da América.

PALMEIRA, Ennio Marques. **Educando Educadores EAD 2020: geossintéticos para reforço de solos com baixa capacidade de suporte**. Centro-Oeste: Igs Brasil, 2020. 54 p.

PALMEIRA, Ennio Marques. **Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente**. Sp: Oficina de Textos, 2018. 277 p.

PALMEIRA, E.M.; GARDONI, M.G. **Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques**. Geotextiles and Geomembranes, v.20, n. 2, p. 97-115, 2002.

ROWE, R.K.; SODERMAN, K.L. **An approximate method for estimating the stability of geotextile-reinforced embankments**. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 22, n. 3, p. 392-398, 1985.

VERTEMATTI, J.C. **Curso Básico De Geotêxteis**. Comitê Técnico Geotêxtil – CTG, 1ª. Edição, 2001

SANTOS, Lígia Raquel Rodrigues; SILVA, Leonete Cristina Araújo Ferreira Medeiros. **Aplicações de Geossintéticos na Geotecnia Ambiental: Análise de Publicações Brasileiras nos Últimos 20 Anos (1999 a 2018)**. 2019. 16 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Multidisciplinar de Caraúbas, Universidade Federal Rural do Semiárido - Ufersa, Caraúbas, 2019.

SIEIRA, Ana Cristina Castro Fontenla. **Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha**. 2003. 353 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2003. Cap. 2.

ZORNBERG, Jorge G. **Educando Educadores EAD 2020: tipos e funções dos geossintéticos**. Centro-Oeste: IGS Brasil, 2020. 26 p.