

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS MODERNAS COM FOCO EM GEOSSISTEMAS NAS
OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA: O CASO DE MATINHOS - PR**

JOÃO MARCOS SOARES

FLORIANÓPOLIS - SC

2023

JOÃO MARCOS SOARES

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS MODERNAS COM FOCO EM GEOSSISTEMAS NAS
OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA: O CASO DE MATINHOS - PR**

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 Engenheiro Civil.

Orientador: Marcos Aurélio
Marques Noronha

FLORIANÓPOLIS - SC

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da
UFSC.

Soares, João Marcos

Aplicação de técnicas modernas com foco em geossistemas nas
obras de proteção costeira : o caso de Matinhos-PR / João Marcos
Soares ; orientador, Marcos Aurélio Marques Noronha, 2023.
117 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Proteção. 3. Costeira. 4. Flexível.
5. Geossistemas. I. Noronha, Marcos Aurélio Marques. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

JOÃO MARCOS SOARES

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS MODERNAS COM FOCO EM GEOSSISTEMAS NAS
OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA: O CASO DE MATINHOS - PR**

Prof. Liane Ramos da Silva, Dra.
Coordenadora de Curso

Banca Examinadora



Documento assinado digitalmente
Marcos Aurelio Marques Noronha
Data: 05/07/2023 04:38:24-0300
CPF: ***,965.173-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Marcos Aurélio Marques Noronha, Dr.
Orientador

Prof. Naloan Coutinho Sampa
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Martin August Herwig
Avaliador
Engenheiro Civil

FLORIANÓPOLIS - SC

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar ânimo e sabedoria para alcançar os objetivos da minha vida.

Agradeço a toda minha família, especialmente aos meus pais João e Rosa Maria, pelo suporte e momentos felizes juntos.

Agradeço aos amigos da minha cidade e os que fiz na faculdade pelos conselhos e camaradagem.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina por ter me dado a oportunidade de buscar o desenvolvimento intelectual e profissional.

Agradeço a todos os professores do curso, especialmente ao professor Marcos Noronha pela conduta nas aulas, generosidade na transmissão do conhecimento e apoio para a realização deste trabalho.

Agradeço também ao professor Naloan por aceitar prontamente o convite para participar da banca examinadora e ao engenheiro civil Martin pela disponibilidade de contato e informações repassadas.

Agradeço às equipes do Corpo de Bombeiros de Santa Catarina e ao GTSIG pelas oportunidades de estágio e as lições aprendidas.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma nessa jornada.

*O que adquire entendimento ama a sua alma,
o que conserva a inteligência achará o bem.*

Provérbios 19:8

RESUMO

As estruturas de defesa costeira são pertinentes aos territórios litorâneos, que atualmente se configuram como regiões de alta concentração de habitantes, infraestruturas e atividades econômicas. O grande crescimento demográfico aliado a ações antrópicas deletérias expôs essas áreas a fenômenos extremos provocados pela dinâmica marinha. Com o intuito de mitigar os danos causados por tais eventos, é necessário a adoção de medidas técnicas que assegurem o bem estar dos residentes e resguardem as construções públicas e privadas localizadas nas faixas litorâneas, surgindo assim as soluções de engenharia civil para proteção costeira. Essas soluções podem ser descritas como quaisquer intervenções humanas em ambiente marinho que visam a recuperação dos sistemas naturais, prevenindo o recuo da faixa de areia e impedindo o fluxo descoordenado de sedimentos, sendo os tipos mais comuns as estruturas rígidas e flexíveis. No período recente, as soluções flexíveis como os geossintéticos vem se tornando uma alternativa viável em comparação às construções rígidas convencionais devido ao baixo custo financeiro, redução de impactos, facilidade de instalação, disponibilidade de matéria-prima e qualidade estética. Desse modo, o objetivo deste trabalho é estudar o uso de geossistemas em obras de proteção costeira, descrevendo suas propriedades técnicas, funções, vantagens, fragilidades e casos de sucesso em obras ao redor do mundo. Para corroborar com a pesquisa, será discutido um estudo de caso da aplicação conjunta de geossintéticos com outros sistemas protetivos nas obras de revitalização da orla do município de Matinhos-PR.

Palavras-chave: Erosão. Proteção. Rígidas. Flexíveis. Geossistemas.

ABSTRACT

Coastal defense structures are relevant to coastal territories, which are currently configured as regions of high concentration of inhabitants, infrastructure, and economic activities. The large demographic growth combined with deleterious anthropic actions have exposed these areas to extreme phenomena caused by marine dynamics. In order to mitigate the damage caused by such events, it is necessary to adopt technical measures that ensure the well being of the residents and protect the public and private constructions located on the coastal strips, thus arising the civil engineering solutions for coastal protection. These solutions can be described as any human interventions in a marine environment that aim to restore natural systems by preventing the retreat of the sand belt and preventing the uncoordinated flow of sediments, the most common types being rigid and flexible structures.. In recent times, flexible solutions such as geosynthetics have become a viable alternative to conventional rigid constructions due to their low financial cost, reduced impact, ease of installation, availability of raw materials, and aesthetic quality. Thus, the objective of this paper is to study the use of geosystems in coastal protection works, describing their technical properties, functions, advantages, weaknesses and success stories in works around the world. To corroborate the research, a case study of the joint application of geosynthetics with other protective systems in the works of revitalization of the coastline of the municipality of Matinhos-PR will be discussed.

Keywords: Erosion. Protection. Rigid. Flexible. Geosystems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Obra longitudinal aderente de enrocamento na orla de Natal, RN.....	23
Figura 2 - Paredão de revestimento para contenção em Salvaterra, PA.....	24
Figura 3 - Espigão Av. Desembargador Moreira em Fortaleza, CE.....	25
Figura 4 - Quebra-mar destacado na Barra do Douro, Portugal.....	26
Figura 5 - Molhe do Porto de Leixões, Portugal.....	27
Figura 6 - Engordamento artificial da praia de Balneário Camboriú, SC.....	28
Figura 7 - Mecanismos de ruptura em estruturas rígidas convencionais.....	29
Figura 8 - Curva tensão-deformação de polímeros constituintes de geossintéticos.	33
Figura 9 - Principais funções dos geossintéticos.....	41
Figura 10 - Tipos de juntas, características e limitações.....	45
Figura 11 - Geotubos.....	51
Figura 12 - Geocontentor.....	52
Figura 13 - Geobags.....	54
Figura 14 - Perfil do talude reforçado com geotubos na restinga de Ofir.....	56
Figura 15 - Reforço de restinga com geotubos.....	57
Figura 16 - Reforço de talude submerso com geossintéticos na Holanda.....	58
Figura 17 - Solução temporária com geobags no Sri Lanka.....	59
Figura 18 - Reforço de talude superficial com geobags na Austrália.....	60
Figura 19 - Espigão formado por geossintéticos em Maroochydore, Austrália.....	61
Figura 20 - Geossistema com Longard Tubes.....	62
Figura 21 - Fluxograma do trabalho.....	63
Figura 22 - Área de estudo no município de Matinhos-PR.....	65
Figura 23 - Litoral de Matinhos com as projeções das obras de proteção costeira..	67
Figura 24 - Processo avançado de erosão costeira na Praia Brava de Matinhos....	67
Figura 25 - Processo avançado de erosão costeira na Praia Brava de Matinhos....	67
Figura 26 - Perfil das estruturas semirrígidas com núcleo de geossintéticos.....	70
Figura 27 - Carapaça de enrocamento e tetrápodes.....	71
Figura 28 - Localização da jazida submarina escolhida para dragagem.....	72

Figura 29 - Perfil de talude com geobags.....	73
Figura 30 - Perfil longitudinal de geotubo.....	77
Figura 31 - Dimensionamento de protótipo por software.....	78
Figura 32 - Exemplo de dimensionamento de protótipos de geotubos.....	78
Figura 33 - Tapetes de ancoragem.....	79
Figura 34 - Parâmetros para cálculo dos esforços de tração nos geotubos.....	80
Figura 35 - Planta dos guias-correntes da Avenida Paraná.....	81
Figura 36 - Planta do espigão da Praia Brava.....	83
Figura 37 - Planta dos guias-correntes do canal de Matinhos.....	85
Figura 38 - Planta do headland balneário Riviera.....	87
Figura 39 - Planta do headland balneário Flórida.....	88
Figura 40 - Seção do perfil de engordamento da praia para trecho 1 de 100 metros...	90
Figura 41 - Seção do perfil de engordamento da praia para trecho 3 de 100 metros...	90
Figura 42 - Divisão de seções da praia de Matinhos.....	91
Figura 43 - Transporte anual positivo e negativo de sedimentos em Matinhos.....	94
Figura 44 - Processo final de construção da carapaça rígida em Matinhos.....	96
Figura 45 - Enchimento dos geotubos por bombeamento hidráulico.....	99
Figura 46 - Cobrimento dos geotubos com rochas.....	99
Figura 47 - Drega de sucção e recalque, Navio Galileo Galilei.....	100
Figura 48 - Bombeamento da areia dragada para a área de deposição.....	101
Figura 49 - Serviço de movimentação de sedimentos após alimentação artificial..	103
Figura 50 - Trechos atendidos pela obra de proteção costeira.....	104
Figura 51 - Instalação de geobags na faixa de areia em Matinhos.....	105
Figura 52 - Configuração final da orla da Av. Paraná após engordamento e implantação de geobags.....	106
Figura 53 - Modelagem final do projeto para a Avenida Paraná.....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de estruturas convencionais, objetivos e funcionalidades.....	21
Quadro 2 - Tipos de estruturas conforme orientação à linha de costa, suas vantagens e limitações.....	22
Quadro 3 - Principais mecanismos, ações causadoras e condicionantes do sistema..	
.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Projeção da taxa média de galgamento para as estruturas.....	75
Tabela 2 - Quantitativo estimado de materiais para estrutura do lado sul da Av. Paraná.....	82
Tabela 3 - Quantitativo estimado de materiais para estrutura do lado norte da Av. Paraná.....	82
Tabela 4 - Quantitativo estimado de materiais para a obra do espigão de Praia Brava.....	84
Tabela 5 - Quantitativo estimado de materiais para estrutura do lado sul do Canal de Matinhos.....	85
Tabela 6 - Quantitativo estimado de materiais para estrutura do lado norte do Canal de Matinhos.....	86
Tabela 7 - Quantitativo estimado de materiais para a obra do headland Riviera.....	87
Tabela 8 - Quantitativo estimado de materiais para a obra do headland Flórida.....	89
Tabela 9 - Diâmetros médios dos sedimentos por seção da praia.....	92
Tabela 10 - Quantitativo total de materiais usados nas estruturas semi rígidas até o momento.....	107

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo Geral.....	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	18
1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA.....	20
2.2 ESTRUTURAS CONVENCIONAIS DE PROTEÇÃO COSTEIRA.....	20
2.2.1 Tipos de estruturas convencionais.....	20
2.2.1.1 <i>Estrutura longitudinal aderente e revestimento.....</i>	22
2.2.1.2 <i>Espigões.....</i>	24
2.2.1.3 <i>Quebra-mares e molhes.....</i>	25
2.2.1.4 <i>Alimentação artificial de praias.....</i>	27
2.2.2 Mecanismos de falha nas estruturas convencionais.....	28
2.3 GEOSISTEMAS.....	31
2.3.1 Características gerais dos geossintéticos.....	32
2.3.2 Polímeros constituintes e suas implicações na qualidade do material....	32
2.3.3 Características exigidas dos materiais usados em engenharia costeira..	33
2.3.4 Propriedades dos geossintéticos.....	36
2.3.4.1 <i>Propriedades físicas.....</i>	36
2.3.4.2 <i>Propriedades hidráulicas.....</i>	36
2.3.4.3 <i>Propriedades mecânicas.....</i>	37
2.3.4.4 <i>Durabilidade.....</i>	37
2.3.4.4.1 <i>Degradação fotoquímica.....</i>	38
2.3.4.4.2 <i>Degradação térmica.....</i>	39
2.3.4.4.3 <i>Degradação química.....</i>	39
2.3.4.4.4 <i>Danos no processo de instalação.....</i>	39

2.3.4.4.5 Considerações finais sobre durabilidade.....	39
2.3.5 Funções dos geossintéticos.....	40
2.3.5.1 Filtragem.....	41
2.3.5.2 <i>Drenagem.....</i>	41
2.3.5.3 Proteção.....	42
2.3.5.4 <i>Reforço mecânico.....</i>	42
2.3.5.5 <i>Separação de materiais.....</i>	43
2.3.5.6 <i>Considerações sobre a escolha de geossintéticos para obras.....</i>	43
2.3.6 Manuseamento e aplicação dos geossintéticos em obras.....	45
2.3.7 Dimensionamento dos geossistemas.....	47
2.3.7.1 Equações básicas.....	48
2.3.8 Tipos de geossistemas.....	51
2.3.8.2 Geocontentores.....	52
2.3.8.3 Geobags.....	53
2.3.9 Exemplos de aplicação de geossistemas em obras pelo mundo.....	55
2.3.9.1 <i>Geossistemas como reforço em praias.....</i>	55
2.3.9.2 <i>Geossistemas em obras perpendiculares á costa.....</i>	61
3. METODOLOGIA DO TRABALHO.....	63
4. ESTUDO DE CASO: OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA NA RECUPERAÇÃO DA ORLA DE MATINHOS - PR.....	65
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	65
4.2 DESCRIÇÃO DAS OBRAS.....	66
4.3 JUSTIFICATIVA DAS INTERVENÇÕES.....	68
4.4 SERVIÇOS.....	69
4.4.1 Estruturas de proteção costeira e engordamento da faixa de areia.....	70
4.4.1.1 <i>Histórico e soluções.....</i>	70
4.4.1.2 <i>Estruturas semirrígidas: geotubos, maciços de rocha e concreto ciclópico..</i>	71
4.4.1.3 <i>Engordamento artificial da faixa de areia.....</i>	72
4.4.1.4 <i>Proteção costeira com geobags.....</i>	73

4.5 DADOS DE PROJETO: ESTRUTURAS SEMIRRÍGIDAS.....	74
4.5.1 Conceitos iniciais.....	74
4.5.2 Método de enrocamento.....	74
4.5.2.1 <i>Determinação do peso dos blocos.....</i>	75
4.5.2.2 <i>Blocos nas camadas de filtro.....</i>	75
4.5.3 Verificação de possibilidade de galgamentos.....	76
4.5.4 Núcleo da estrutura: geotubos têxteis de alta densidade.....	76
4.5.4.1 <i>Características gerais de projeto.....</i>	77
4.5.4.2 <i>Aspectos técnicos dos geotubos.....</i>	77
4.5.4.3 <i>Método de dimensionamento dos geotubos.....</i>	78
4.5.4.3.1 <i>Parâmetros geométricos.....</i>	78
4.5.4.3.2 <i>Parâmetros geotécnicos.....</i>	79
4.5.4.3.3 <i>Parâmetros mecânicos e hidráulicos.....</i>	80
4.6 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS ESTRUTURAS SEMI RÍGIDAS.....	82
4.6.1 Guias Correntes da Avenida Paraná.....	82
4.6.2 Espigão da Praia Brava.....	84
4.6.3 Guias Correntes da Praia de Matinhos.....	85
4.6.4 Headland Balneário Riviera.....	87
4.6.5 Headland Balneário Flórida.....	89
4.7 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ENGORDAMENTO ARTIFICIAL.....	90
4.7.1 Características gerais dos sedimentos e mecanismo de avanço da praia..	92
4.7.2 Mecanismo de transporte de sedimentos.....	94
4.8 METODOLOGIA CONSTRUTIVA DAS OBRAS SEMIRRÍGIDAS E FLEXÍVEIS	96
4.8.1 Construção dos enrocamentos.....	96
4.8.1.1 <i>Sequência de construção.....</i>	96
4.8.2 Instalação dos geotubos.....	97
4.8.2.1 <i>Sequência de instalação.....</i>	98
4.8.3 Engordamento artificial.....	100

4.8.3.1 Dados de batimetria e regime de ondas.....	100
4.8.3.2 Serviço de dragagem.....	101
4.8.3.3 Duração das atividades e ciclos de dragagem.....	102
4.8.4 Proteção costeira com geobags.....	104
4.8.4.1 Sequência de instalação das geobags.....	105
5. AVALIAÇÃO GERAL DAS PROPOSTAS.....	106
5.1 PANORAMA GERAL.....	106
5.2 CONFIGURAÇÃO FINAL DO PROJETO.....	107
5.3 IMPACTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DAS OBRAS.....	109
5.3.1 Impactos físicos.....	109
5.3.2 Impactos sociais e econômicos.....	109
5.3.3 Impactos à biota local.....	110
5.4 CRÍTICAS AO PROJETO.....	111
5.5 PONTOS DE DESTAQUE DAS PROPOSTAS.....	112
5.5.1 Estudos preliminares.....	112
5.5.2 Construção das estruturas semirrígidas.....	112
5.5.3 Dragagem, engordamento e instalação de geobags.....	113
5.6 SUGESTÕES PÓS OBRA.....	113
6. CONCLUSÃO.....	114
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
REFERÊNCIAS.....	116

1. INTRODUÇÃO

O litoral brasileiro possui em torno de 7500 km de extensão e é banhado completamente a leste pelo oceano Atlântico (FUVEST,2015). Essa robusta faixa litorânea confere ao país posição geopolítica privilegiada e juntamente com as condições climáticas favoráveis auxiliam no desenvolvimento de atividades socioeconômicas, como a pesca, turismo, extração de petróleo e serviços do setor imobiliário. Todavia, a prática dessas atividades está ameaçada, pois devido ao intenso regime hidrodinâmico das águas aliado às ações deletérias humanas, parte da costa brasileira sofre com o fenômeno da erosão, acarretando em graves problemas ambientais e sociais.

De forma sucinta, pode-se definir a erosão marítima, como um recuo contínuo da faixa de costa pela atividade progressiva das ondas, sendo que nos casos mais extremos o recuo pode chegar a centenas de metros por ano. Segundo dados publicados pelo Programa de Geologia e Geofísica, estima-se que 4500 km da costa brasileira são afetados pelo fenômeno da erosão (BBC,2019). Para resolver este problema crescente, faz-se necessário elaborar soluções de engenharia civil para controlar os fenômenos erosivos e proteger a infraestrutura costeira.

A nível geral, são construídas obras de defesa convencionais, como quebra-mares, espigões e paredões que utilizam materiais pesados como rochas e concreto, cujas funções são equilibrar o balanço no transporte de sedimentos para favorecer a estabilização do terreno da praia e/ou protegê-la de eventos graves causados pela ação das ondas (ALFREDINI et al. 2009). No entanto, essas estruturas são onerosas, pouco sustentáveis e muitas vezes desagradáveis esteticamente.

Todos estes fatores limitantes provocam uma demanda por tecnologias alternativas, culminando em estudos sobre a aplicação de sistemas com geossintéticos nas obras de proteção costeira. Por se tratar de uma solução inovadora, é necessário desenvolver investigações sobre o seu funcionamento e atestar sua viabilidade em casos extremos de erosão marinha.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é estudar a aplicação de técnicas modernas em obras de proteção costeira com foco nos geossistemas, descrevendo suas principais propriedades, funcionalidades, vantagens e limitações.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho consistem em:

- Identificar os principais problemas causados pela erosão costeira;
- Descrever tecnicamente as estruturas convencionais e os materiais geossintéticos;
- Demonstrar a eficiência do uso de geossistemas com exemplos de obras ao redor do mundo;
- Discutir o estudo de caso das recentes obras de proteção costeira em Matinhos - PR com o uso combinado de técnicas de geossistemas, enrocamentos com tetrápodes e engordamento artificial por dragagem.

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A delimitação da pesquisa está direcionada aos aspectos técnicos referentes à implantação de geossintéticos em obras de proteção costeira com aprofundamento no estudo das propriedades desses materiais, metodologias construtivas e o uso combinado com outros sistemas de proteção, levando-se em consideração os condicionantes sociais, econômicos e ambientais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 se introduz o tema da dissertação, bem como é apresentado a justificativa, o objetivo geral, os objetivos específicos e as delimitações da pesquisa.

No capítulo 2 se desenvolve o referencial teórico do trabalho. Neste item são descritos os problemas ocasionados pela erosão costeira, principais tipos de estruturas convencionais de proteção, propriedades técnicas dos geossintéticos e exemplos de sua aplicação em obras marítimas pelo mundo.

No capítulo 3 se apresenta a metodologia do trabalho com a descrição das fontes de dados usadas na revisão bibliográfica e no estudo de caso, bem como ilustra a sequência lógica das atividades via fluxograma.

No capítulo 4 se aborda o estudo de caso das obras de proteção costeira em Matinhos, discorrendo sobre a área de estudo, a justificativa para as intervenções, os tipos de serviços empregados e principalmente as informações técnicas de projeto.

No capítulo 5 é feita uma avaliação geral das propostas, apresentando pontos seus pontos de destaque, sugestões, críticas e os impactos positivos e negativos do empreendimento.

No capítulo 6 se sintetiza as conclusões do trabalho com uma breve recapitulação dos conteúdos abrangidos no corpo da dissertação, as considerações finais do autor e a sugestão de temas para trabalhos futuros a fim de se expandir o conhecimento na área de proteção costeira. No item seguinte constam as referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA

As obras de proteção costeira estão diretamente relacionadas com os territórios litorâneos, que concentram hoje boa parte da população global, redes de infraestrutura e atividades econômicas. O contínuo crescimento demográfico nessas áreas aumentou a exposição a eventos perigosos provocados pela ação marítima. Para mitigar esses problemas é necessário a adoção de medidas que promovam a segurança dos residentes, bem como dos bens públicos e privados localizados nessas regiões costeiras (PALMA, 2016).

Desse modo, as soluções de engenharia civil e geotecnia para proteção costeira surgem para amenizar os efeitos nocivos da erosão marítima e assegurar a integridade da faixa de costa. Segundo Morais (2010), uma estrutura de proteção costeira pode ser caracterizada como qualquer intervenção humana realizada em ambiente marinho que visa a manutenção ou recuperação de sistemas naturais e a preservação das construções adjacentes.

Nos próximos tópicos são abordadas as características das estruturas convencionais e dos geossistemas.

2.2 ESTRUTURAS CONVENCIONAIS DE PROTEÇÃO COSTEIRA

A seguir, serão apresentados os principais tipos de estruturas de proteção costeira convencionais com a descrição de seus objetivos, funções principais, vantagens e limitações.

2.2.1 Tipos de estruturas convencionais

Nesta seção são abordados os dois principais tipos de proteção costeira: rígidas e flexíveis.

Segundo Palma (2016), as estruturas rígidas são concebidas para prevenir o recuo da linha costeira e impedir o transporte desordenado de sedimentos. Adicionalmente podem auxiliar no uso recreativo das praias e se caracterizam por terem um alto custo de construção e manutenção.

Os efeitos adversos da implantação desse tipo de estrutura, tanto na contenção da erosão como no fenômeno de sedimentação, conduziram a uma maior utilização de soluções flexíveis.

Os principais tipos de estruturas convencionais, seus objetivos e principais funcionalidades estão ilustrados no Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 - Tipos de estruturas convencionais, objetivos e funcionalidades

	<i>Tipo</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Função Principal</i>
Rígidas	Obra longitudinal aderente	Proteção das frentes marítimas contra o avanço e galgamento do mar	Reforço estrutural do alinhamento longitudinal
	Revestimento	Proteção de um talude contra a erosão	Reforço estrutural do alinhamento longitudinal
	Esporão	Conter a erosão de uma praia	Interceção do transporte sedimentar pela corrente de deriva litoral
	Quebra-mar destacado	Conter a erosão de uma praia ou aumentar a sua largura pela formação de um tómbolo	Redução das alturas de onda e do volume de sedimentos transportados pela corrente de deriva litoral
	Quebra-mar destacado submerso	Conter a erosão de uma praia	Redução das alturas de onda que atingem a costa
	Quebra-mar	Abrigo de bacias portuárias e entradas de portos contra ondas e correntes	Dissipação de energia da onda e/ou sua reflexão para o mar
	Molhes	Estabilização dos canais de navegação em embocaduras de rios	Confinamento e controle de correntes e marés
Flexíveis	Alimentação artificial de praias	Conter a erosão de uma praia	Enchimento artificial de praias e dunas com sedimentos

Fonte: Palma, 2016

Outra forma de classificação que diferencia estas estruturas, refere-se a sua orientação na linha da costa, podendo ser divididas em dois tipos: estruturas paralelas à linha da costa e estruturas perpendiculares à linha da costa (MARINHO,2013). Elas se diferenciam pelo objetivo de sua construção, isto é, as

estruturas paralelas à linha da costa são concebidas para dissipar a energia das ondas, enquanto as estruturas perpendiculares à linha da costa tem como função reter os sedimentos transportados pela corrente litorânea. No Quadro 2 são descritas as vantagens técnicas e as suscetibilidades de cada estrutura:

Quadro 2 - Tipos de estruturas conforme orientação à linha de costa, suas vantagens e limitações

		<i>Estrutura</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Limitações</i>
Rígidas	Paralelas à linha de costa	Obra longitudinal aderente	Dissipação de energia das ondas; Proteção de zonas edificadas	Necessidade de manutenção regular e dispendiosa; Degradação do valor natural e recreativo da praia/ impacto visual negativo
		Revestimento		
		Quebramar destacado	Dissipação de energia das ondas; Acumulação de sedimentos em zona abrigada	Sujeitos a agitação marítima forte; Necessidade de manutenção regular e dispendiosa;
		Quebramar destacado submerso		
	Perpendiculares à linha de costa	Espigão	Reconstrução de praias erodidas; Acumulação de areia a barlar;	Déficit sedimentar na praia a sotomar; Degradação; Necessidade de manutenção regular e dispendiosa; Degradação do valor natural e recreativo da praia/ impacto visual negativo
		Quebramar	Acumulação de areia a barlar; Estabilização de canais de navegação de acesso a portos	Alteração das condições de agitação marítima; Interrupção de deriva litoral – déficit sedimentar a sotomar; Necessidade de manutenção regular e dispendiosa.
Molhes				
Flexíveis	Alimentação artificial de praias	Formação/reconstrução de praias; Fontes sedimentar adicionais	Necessidade de manutenção regular e dispendiosa; Carácter temporário.	

Fonte: Robrini e Silva, 2014

2.2.1.1 *Estrutura longitudinal aderente e revestimento*

Segundo Palma (2016), as obras longitudinais aderentes e os revestimentos são muito semelhantes no que se refere a funcionalidades e objetivos, sendo muitas vezes, designadas da mesma maneira pela bibliografia especializada. Portanto, ambas serão apresentadas de forma conjunta no trabalho.

As estruturas longitudinais aderentes são construídas paralelas à linha da costa, seguindo um alinhamento projetado e cuja principal função é impedir a

inundação de edificações adjacentes à praia pela agitação das ondas, constituindo assim, uma proteção adicional para calçadas, estradas, prédios e outros tipos de infraestrutura.

Em contrapartida, o efeito adverso deste tipo de estrutura é o aumento da erosão na praia causado pelo fenômeno de reflexão das ondas no mar, resultando no aprofundamento das cotas batimétricas do perfil de fundo pela deposição de sedimentos próximo a obra, que origina a formação de ondas maiores que podem colidir fortemente com a estrutura. Pode-se aferir, portanto, que as obras longitudinais aderentes são frágeis diante das instabilidades causadas por escavações inferiores junto ao terreno (MORAIS, 2010).

A Figura 1 apresenta obra longitudinal aderente de enrocamento na orla de Natal - RN:

Figura 1 - Obra longitudinal aderente de enrocamento na orla de Natal, RN



Fonte: Joana Lima, 2022

De forma semelhante às obras aderentes, os revestimentos são estruturas construídas paralelamente à costa e possui como principal função, reforçar uma parte do perfil da praia para coibir os efeitos da erosão. A maior diferença entre os dois tipos de obras mencionados refere-se à inclinação do talude, visto que a

estrutura aderente apresenta inclinação acentuada, enquanto a obra de revestimento é construída na posição vertical (PALMA, 2016).

A Figura 2 mostra obra de revestimento de paredão para contenção em praia no município de Salvaterra, Pará:

Figura 2 - Paredão de revestimento para contenção em Salvaterra, PA



Fonte: Agência Pará, 2019

2.2.1.2 Espigões

Os espigões são obras de proteção costeira, construídas perpendicularmente à linha da costa e que possuem como principal função interceptar o transporte litoral de sedimentos, preservando assim, a faixa de areia da praia e inibindo os efeitos adversos da erosão.

Os espigões podem ser posicionados individualmente ou em grupos, formando neste caso um campo de espigões, ou também podem ser associados com outros tipos de obras, como por exemplo, obras longitudinais aderentes, destacadas ou alimentação artificial de praias (PALMA, 2016).

A Figura 3 mostra exemplo de espigão na praia da Avenida Desembargador Moreira em Fortaleza, Ceará:

Figura 3 - Espigão Av. Desembargador Moreira em Fortaleza, CE



Fonte: Sistema Verdes Mares, 2019

Sua geometria pode ser bastante variada, sendo geralmente retilíneos e assumindo formatos em zig-zag ou nas letras Y, T e Z. Os espigões podem também ser permeáveis ou impermeáveis dependendo do tipo de núcleo que o constitui (NEVES, 2003).

O bom funcionamento de um espigão como obra de proteção costeira depende da sua capacidade de interferência na corrente de deriva litoral e no fluxo de sedimentos transportados por essa mesma corrente. O efeito da construção de um único espigão isolado na costa é a sedimentação da praia a barlar e a erosão da praia a sotamar (PALMA, 2016). Todavia, quando a opção de defesa passa pela construção de um campo de espigões, deve-se avaliar o posicionamento dessas estruturas para propiciar o enchimento equilibrado das praias de acordo com a direção dominante do transporte litoral.

2.2.1.3 Quebra-mares e molhes

O primeiro tipo de quebra-mar são estruturas destacadas, desligadas da terra e paralelas à linha da costa cujas principais funções são proteger a praia da intensa agitação de ondas, deslocar a região de deposição de areia do caminho dos canais

de navegação e criar uma zona de águas tranquilas para a estadia de embarcações (NEVES, 2003).

Podem ser construídos em posição emersa ou submersa, sendo que os quebra-mares submersos são mais convencionais devido ao efeito estético, porém exige-se cuidados relacionados à altura de navegação. A eficácia dessa obra deve-se à dissipação de energia das ondas incidentes que gera uma zona de abrigo e a formação de correntes de difração da zona de maior agitação para a zona de menor agitação. Estas correntes transportam o material sedimentar e promovem a deposição de areia em uma configuração chamada de tómbolo, isto é, com a acumulação de sedimentos nas extremidades do obstáculo. (TAVEIRA PINTO, 2001).

O segundo tipo é o quebra-mar aderente à costa que se alonga até o mar. Essa estrutura é comumente utilizada em portos para conter a ação das ondas e criar uma zona segura para o fluxo de embarcações, sendo que sua disposição geométrica permite desviar os sedimentos transportados pela corrente de deriva, assegurando uma cota de navegação segura na entrada do canal (PALMA, 2016).

A Figura 4 apresenta exemplo de quebra-mar destacado na Barra do Douro em Portugal:

Figura 4 - Quebra-mar destacado na Barra do Douro, Portugal



Fonte: ICOSA, 2008

Já os molhes são estruturas fisicamente semelhantes aos quebra-mares, porém com algumas distinções entre suas funções, uma vez que os molhes servem para modificar a dinâmica marítima local, tornando a entrada de embarcações no

porto mais segura e estabilizando os canais de navegação nas embocaduras dos rios através da condução da corrente litorânea (NEVES, 2003). A Figura 5 mostra o molhe do Porto de Leixões em Portugal:

Figura 5 - Molhe do Porto de Leixões, Portugal



Fonte: CMJORNAL, 2018

2.2.1.4 Alimentação artificial de praias

Esse tipo de tecnologia se apresenta como uma solução flexível de proteção costeira usada para coibir a erosão na linha da costa. De acordo com Robrini e Silva (2014), a técnica de engordamento consiste no enchimento por meios artificiais das faixas de areia das praias para preservação e alargamento do espaço. Essa operação requer uma fonte disponível de sedimentos que possuam características físicas semelhantes ao material natural presente na praia, sendo geralmente usados sedimentos imersos capturados por dragagens.

A Figura 6 mostra operação de engordamento artificial na praia de Balneário Camboriú em Santa Catarina:

Figura 6 - Engordamento artificial da praia de Balneário Camboriú, SC



Fonte: PMBC, 2022

A sua aplicação corresponde a soluções temporárias a serem complementadas por outros métodos de defesa costeira (NEVES, 2003). Todas as variáveis que devem ser consideradas nessa operação, como local de empréstimo, características físicas do material sedimentar, controle de qualidade, impactos ambientais e durabilidade da intervenção tornam essa atividade complexa e onerosa.

2.2.2 Mecanismos de falha nas estruturas convencionais

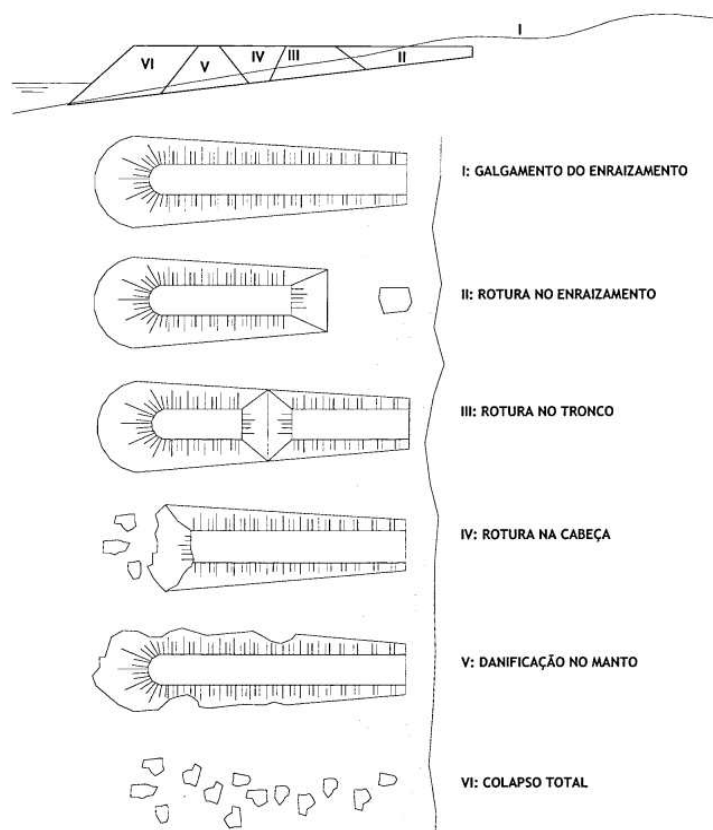
Para efetuar a análise dos mecanismos de colapso das estruturas costeiras é necessário diferenciar os conceitos de dano, falha e colapso. De acordo com Neves (2003), o dano se caracteriza pela mudança no estado da estrutura, que pode ocorrer nas faces externas e nas bordas, decorrentes da desintegração dos materiais constituintes. A falha é descrita como um dano extremo advindo de danos sucessivos de menor intensidade que diminui o desempenho da estrutura, devendo ser inferior ao limite estipulado na fase de dimensionamento.

Segundo Palma (2016), a falha em si não ocasiona o colapso da estrutura, somente subtrai parte de sua capacidade estrutural, podendo-se conservar algum nível de resistência. Geralmente, as falhas têm origem na degradação da estrutura, manutenções mal feitas, excesso de carregamentos, erros de projeto e aplicação incorreta de materiais. As rupturas podem ser decorrentes do dimensionamento, técnica de construção empregada, falta de controle de qualidade e principalmente da ação de carregamentos que não foram contemplados durante a etapa de projeto.

De fato, a causa primordial das rupturas está ligada aos carregamentos que a estrutura suporta durante sua vida útil, dessas quais pode-se citar a ação cíclica das ondas, assentamento do terreno e infra escavações na base da obra. Nestes cenários, a ruptura é consequência das tensões e deslocamentos acentuados que provocam deformações superiores à resistência estrutural (NEVES,2003).

A Figura 7 mostra os mecanismos de ruptura em estruturas rígidas:

Figura 7 - Mecanismos de ruptura em estruturas rígidas convencionais



Fonte: Veloso Gomes e Taveira Pinto, 1999

De acordo com Pilarczyk (2000), dentre os mecanismos de falha mais recorrentes nas estruturas costeiras e suas principais causas pode-se citar os assentamentos, movimento das camadas de cobertura, migração de partículas da subcamada, erosão do solo, erosão interna, deslizamentos e liquefação. Os assentamentos diminuem a altura da estrutura e a torna suscetível a galgamentos que podem suplantar totalmente a obra com água. O tipo mais crítico é o assentamento diferencial que causa desníveis nas partes da estrutura, tornando-a frágil à ação marítima. No caso de obras submersas, o assentamento uniforme do solo pode melhorar a estabilidade e segurança da estrutura costeira. Um fenômeno preocupante é a erosão interna que provoca a movimentação e arrastamento de partículas finas da estrutura, formando frestas que podem causar deformações consideráveis na superfície e conseqüentemente reduzir a sua capacidade de resistência.

Pelo fato das estruturas costeiras geralmente serem construídas em cima de solos arenosos que sofrem intensa sedimentação, é muito comum que a obra esteja vulnerável à erosão por infra escavações no pé do terreno, representando uma das principais causas de colapso em estruturas costeiras. As ações sísmicas também representam um fator de risco para a segurança das obras de contenção marítima, visto que podem provocar a liquefação do solo de assentamento e desfazer sua microestrutura granular mediante ao aumento abrupto das pressões internas.

No Quadro 3 abaixo é apresentado os principais mecanismos de falha nas estruturas convencionais, as ações causadoras e os aspectos condicionantes do sistema:

Quadro 3 - Principais mecanismos, ações causadoras e condicionantes do sistema

<i>Mecanismo</i>	<i>Ação</i>	<i>Parâmetros de carregamento</i>	<i>Condicionantes do sistema</i>
Assentamento	Peso próprio	Peso volúmico dos materiais Grau de saturação Pressão intersticial Tempo	Compressibilidade do solo Permeabilidade do solo Espessura da camada
Movimento das camadas de cobertura	Agitação marítima Correntes (Gelo)	Altura e período da onda Ângulo de incidência Velocidades Turbulência Resistência	Dimensão dos blocos Permeabilidade Embricamento
Migração de partículas das subcamadas e filtros	Marés Oscilações devidas a embarcações Outras oscilações	Gradientes hidráulicos Percolação	Permeabilidade e espessura das camadas Granulometria
Erosão Interna	Gradiente hidráulico	Velocidades	Comprimento dos canais interiores Resistência hidráulica Granulometria
Deslizamento	Peso próprio da estrutura e elementos	Peso próprio Pressão intersticiais Inclinação do Talude	Ângulo de atrito interno Coesão Permeabilidade do solo e das camadas
Erosão	Agitação marítima Correntes Défice sedimentar	Velocidades Turbulência Profundidades	Granulometria Inclinação do Talude Permeabilidade
Liquefação	Agitação marítima Sismos	Altura e período da onda Pressão intersticial Tensão de corte Amplitude Aceleração Frequência Ciclos de carregamento	Permeabilidade Compactação Espessura das camadas Ângulos de atrito

Fonte: Pilarczyk, 2000

Por fim, a deterioração ao longo do tempo é uma das principais causas de colapso das estruturas rígidas, uma vez que a resistência decresce de forma progressiva. Para evitar danos graves é necessário gerir um programa de inspeções e manutenções periódicas na obra já que o desempenho eficiente da estrutura não depende apenas dos cálculos de dimensionamento, mas também do controle de qualidade durante toda sua vida útil.

2.3 GEOSISTEMAS

No período recente, estruturas de proteção costeira executadas com geossintéticos vem se tornando uma alternativa viável em comparação às obras convencionais rígidas. O desenvolvimento tecnológico na área de sintéticos e produtos relacionados representa uma nova perspectiva racional dentro da engenharia civil.

Nos itens seguintes, são apresentadas as características gerais dos geossintéticos, os tipos de geossistemas empregados em engenharia costeira,

exemplos de aplicação em obras pelo mundo e dados referentes ao dimensionamento.

2.3.1 Características gerais dos geossintéticos

O geossintético é um produto polimérico usado em contato com materiais naturais, como solos e rochas ou qualquer outro componente geotécnico em aplicações de engenharia civil (BATHURST,2015). Embora sejam recentes, o desenvolvimento tecnológico gerou uma gama desses produtos com propriedades para resolver problemas complexos, tornando-se assim, uma solução alternativa às opções convencionais utilizadas nas obras de proteção costeira.

A possibilidade de uso dos geossintéticos dentro da engenharia civil é vasto, podendo ser aplicados individualmente ou em conjunto com outros sistemas para desempenhar funções de drenagem, proteção, reforço e estanqueidade. Em relação aos materiais que compõem estruturas convencionais, possuem importantes vantagens, como o baixo custo, facilidade de manuseio, disponibilidade de matéria prima, impacto ambiental reduzido e garantia da preservação estética das paisagens naturais (PALMA,2016).

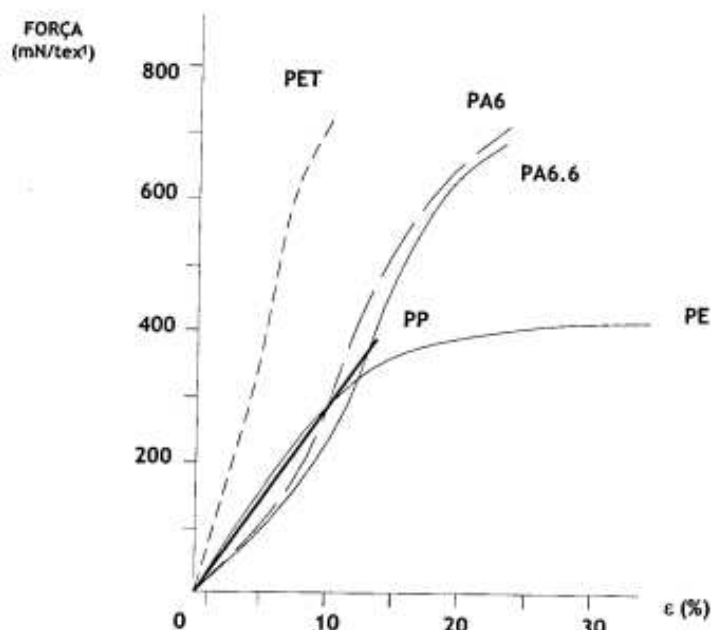
2.3.2 Polímeros constituintes e suas implicações na qualidade do material

Segundo Neves (2003), é necessário compreender que os geossintéticos apresentam características próprias que podem torná-los aptos ou inaptos para desempenhar determinada função. Essas propriedades dependem dos polímeros e aditivos que constituem o material, bem como do processo de fabricação. A qualidade dos geossintéticos pode ser afetada ao longo do tempo pela ação de cargas cíclicas, radiação solar, ataques bioquímicos, contato com a água e má alocação na obra. Neste sentido, é imprescindível estudar as propriedades dos polímeros que compõem os geossintéticos e os métodos de fabricação para prever o comportamento do material a curto e longo prazo.

A maior parte dos geossintéticos são formados por termoplásticos, cuja principal propriedade é a sensibilidade à temperatura, tanto ao atingir o ponto de amolecimento em contato com o calor quanto o endurecimento pela ação do frio. Esses materiais plásticos são derivados do carvão e do petróleo, sendo que os

polímeros mais comuns na fabricação de geossintéticos são: poliésteres (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE), polivinílico de cloro (PVC) e poliamida (PA). A Figura 8 ilustra as curvas de tensão-deformação para os diferentes tipos de polímeros constituintes de geossintéticos:

Figura 8 - Curva tensão-deformação de polímeros constituintes de geossintéticos



Fonte: Neves, 2003

É possível verificar que o polímero PET apresenta um comportamento rígido e frágil, o polímero PP apresenta uma deformação estável, enquanto o polímero PE se configura como um material dúctil.

2.3.3 Características exigidas dos materiais usados em engenharia costeira

De acordo com Neves (2003), a vida útil de uma estrutura de proteção costeira está diretamente relacionada com a qualidade dos materiais usados na construção e o seu comportamento. O ambiente marítimo é reconhecido pela agressividade química, bem como pelas ações de cargas cíclicas e de alta magnitude que testam a capacidade de resistência das estruturas, exigindo assim características específicas aos materiais empregados.

Os primeiros critérios de escolha de um material para a obra se referem às suas propriedades físicas de resistência, durabilidade, flexibilidade e maneabilidade, bem como disponibilidade, custo, facilidade de manutenção e impactos gerados. É válido também conferir o desempenho do material em estruturas de projetos semelhantes para se ter um parâmetro de conferência.

Quando se trata de propriedades físicas e capacidade de resistência é fundamental analisar a densidade do produto, resistência a esforços de tração, compressão e torção, comportamento à fadiga, adaptabilidade ao meio aquático e compatibilidade com outros materiais.

A densidade é uma das propriedades primordiais nos materiais de engenharia costeira, pois a maior parte das estruturas resistem aos carregamentos através do próprio peso. A importância dessa grandeza é evidenciada pela variedade de materiais com densidades diferentes, desde os mais leves como as madeiras aos mais pesados como os enrocamentos.

Dependendo do tipo da estrutura costeira, os materiais podem estar sujeitos a esforços de tração, compressão ou torção, então espera-se que os mesmos possuam capacidade de resistência. Esses carregamentos influenciam no tamanho, forma e arranjo dos materiais, dependendo da solicitação principal, pois estes não conseguem resistir igualmente a todos esses esforços. Assim, é importante o agrupamento de diversos elementos para aumentar a resistência da obra.

Ainda em relação às propriedades de resistência cabe ressaltar que os materiais sofrem alterações que diminuem seu desempenho devido a deformações, variações de temperatura e ataques bioquímicos, que devem ser levados em consideração na etapa de projeto.

As cargas cíclicas provocadas pela agitação do mar são ações significativas que devem ser analisadas com cuidado na etapa de projeto das obras costeiras. Depreende-se que a estabilidade dessas estruturas a esse conjunto de cargas implica na necessidade de construir zonas mais robustas que tem por finalidade absorver esses carregamentos sem a desintegração dos materiais. Já a propriedade de flexibilidade caracteriza a capacidade da estrutura se deformar sem sofrer ruptura, isto é, suportar as cargas cíclicas aplicadas e garantir a longevidade do material.

A durabilidade é a capacidade do material resistir a nocividade do ambiente circundante, o que mantém sua integridade e reduz os custos futuros com

manutenção e substituição de componentes. A durabilidade dos elementos construtivos torna o projeto funcional e garante uma estrutura operando em nível satisfatório mesmo com a degradação parcial de seus materiais constituintes. Dentre os agentes principais de degradação nos ambientes marítimos podem ser citados a corrosão, ataques bioquímicos, variação de temperatura e ciclos de imersão e emersão da estrutura.

Nas obras de proteção costeira, o custo do empreendimento pode variar de modo excessivo de acordo com as complexidades logísticas, visto que estruturas construídas em locais próximos a jazidas e áreas industriais são menos onerosas do que obras feitas em condições distintas. Os custos de transporte e manutenção dos materiais representam um fator crucial no orçamento final, dado que esses custos envolvem não só o transporte de matéria prima do ponto de origem até o destinatário, mas também o deslocamento desses elementos dentro do canteiro e sua instalação.

Em regiões de difícil acesso deve-se atentar para as rotas de viagem e a disponibilidade de equipamentos tecnológicos de movimentação de cargas. Isto implica que a escolha dos materiais empregados na obra deve estar associada a facilidade de manuseamento já que nem toda construção terá um investimento para arcar com os custos elevados de maquinários modernos. Cabe ressaltar que a disponibilidade de materiais afeta também as condições de dimensionamento e o prazo de entrega da obra.

Por último, os impactos ambientais gerados durante a construção de uma estrutura de proteção costeira é fator determinante na escolha de seus materiais constituintes, de modo que componentes sustentáveis devem ser prioritários na etapa de seleção e implicam na eficiência da obra a longo prazo. Os principais efeitos negativos advém da fase de construção com a perda significativa da limpidez da água, destruição da mata nativa e desaparecimento de espécies de animais no habitat. No estudo preliminar dos impactos ambientais gerados pela estrutura costeira deve-se considerar os subprodutos gerados pela degradação da obra durante a fase de uso, possibilidade de atos de vandalismo, reparos técnicos e as consequências estéticas do empreendimento na paisagem.

Logo, percebe-se que a escolha de materiais para uma obra de engenharia costeira é uma tarefa abrangente, visto que deve-se conciliar os aspectos técnicos, econômicos, logísticos e ambientais nas suas aplicações. Nos próximos tópicos

serão abordados os aspectos relativos ao uso de geossistemas nas obras de defesa costeira, evidenciando suas principais propriedades, funções e exemplos de execução.

2.3.4 Propriedades dos geossintéticos

Para desempenhar a função requerida, os geossintéticos devem apresentar propriedades qualitativas, que são definidas pela funcionalidade do material ao longo de sua vida útil e pelo conjunto de ações a que estará sujeito durante as fases operacionais de transporte, manuseio, armazenamento e aplicação em obra (NEVES, 2003).

2.3.4.1 Propriedades físicas

As principais propriedades físicas dos geossintéticos se referem à razão entre massa e área, a espessura do revestimento e a densidade dos polímeros constituintes do material (PALMA, 2016).

A gramatura, também descrita como a massa por unidade de área, indica a uniformidade e a qualidade do material. A espessura de um geossintético expressa a distância entre a camada superior e inferior medida com aplicação de pressão. A relação entre a espessura do material e a pressão aplicada permite verificar a capacidade de compressibilidade do geossintético. Já a densidade relativa dos polímeros constituintes é caracterizada pela densidade destas partículas comparadas à água e está atrelada a capacidade de resistência do geossintético (NEVES, 2003).

2.3.4.2 Propriedades hidráulicas

As principais propriedades hidráulicas dos geossintéticos estão associadas às dimensões das aberturas nas malhas e sua permeabilidade ao longo da extensão do material, portanto essas propriedades são mais dependentes do processo de fabricação e não do comportamento dos polímeros constituintes em si (NEVES, 2003). O arranjo e as dimensões das aberturas influenciam diretamente na capacidade de filtragem dos geossintéticos. Para a caracterização de um

geossintético como filtro, é necessário analisar o comportamento do fluxo de água dentro do material e determinar a permeabilidade ao longo do seu plano longitudinal. A propriedade do material em realizar filtragem no sentido unifluxo, aumenta a eficiência do escoamento de água e impede a saída de partículas sólidas.

2.3.4.3 *Propriedades mecânicas*

Ao decorrer de sua vida útil na obra, os geossintéticos estão sujeitos a esforços mecânicos, compreendidos por forças de tração, compressão e cargas de punçoamento. Esses tipos de esforços podem ser provocados por picos de energia dinâmica ou por esforços constantes aplicados à estrutura costeira. O comportamento do material à tração e compressão depende principalmente de sua estrutura interna e dos polímeros constituintes. Os geossintéticos podem também estar sujeitos a punçoamento, desta forma, sua resistência a esse tipo de esforço é determinada por ensaios de medição de compressão estática e choques repentinos provocados por queda ou impacto com outros materiais (NEVES, 2003).

2.3.4.4 *Durabilidade*

O fator crítico da utilização de geossintéticos em sistemas de proteção costeira refere-se à questão da durabilidade. De fato, sabe-se que o emprego desse material pode reduzir os custos de obra, porém há forte resistência no uso dessa tecnologia por parte de projetistas e construtoras devido à mutabilidade das características dos geossintéticos ao longo do tempo (LOPES, 1992).

Segundo Neves (2003), a alteração na qualidade do material pode ser resultado da degradação durante as etapas de transporte e manuseio na obra, matéria prima pobre ou ações externas relacionadas a esforços mecânicos, choques físicos, reações químicas com outros elementos e ataques de microorganismos.

Os danos causados na fase de instalação do material na obra podem ser evitados com a realização de ensaios laboratoriais de corpos de prova e correto treinamento da mão de obra. Em relação a degradação da matéria prima, deve-se vistoriar o processo de fabricação do material e se atentar às mudanças em sua

estrutura química que podem, no decorrer do tempo, levar a um decréscimo na qualidade do produto.

No que se refere às ações externas, a fluência é o fator primordial na análise dos esforços mecânicos e no comportamento do material ao longo da sua vida útil, visto que é um fenômeno que conduz a um aumento de deformação sob tensão constante. A fluência no geossintético depende principalmente do tipo de polímero e sua estrutura microscópica. Pode-se citar também o relaxamento como um fator de risco para a durabilidade do material quando há a ação de esforços alternados.

Uma grande preocupação no comportamento dos geossintéticos ao longo do tempo diz respeito à possibilidade de colmatção no material, visto que pode prejudicar sua capacidade hidráulica. Esse fenômeno ocorre através da entrada de partículas de solo no geossintético e obstrução das aberturas da malha, impedindo a passagem livre de água. Em relação às patologias ocasionadas no material por agentes físicos e químicos, destacam-se a degradação fotoquímica, térmica e química.

2.3.4.4.1 Degradação fotoquímica

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é capaz de desintegrar as macromoléculas dos polímeros. Os fatores preponderantes nesse fenômeno são a intensidade da energia e a duração de tempo em que o geossintético está exposto à radiação, sendo que a concentração de oxigênio, temperaturas elevadas e umidade também podem facilitar o processo de degradação.

De acordo com ensaios feitos por Lopes (2001), sobre a influência negativa dos agentes atmosféricos na durabilidade dos geossintéticos concluiu-se que a resistência do material depende do tipo de polímero constituinte, presença de aditivos anti-radiação e da ligação das malhas. Portanto, para evitar danos causados no material pela radiação solar na fase de pré-obra recomenda-se revestir os geossintéticos com capas opacas, armazená-los em ambiente fechado e aplicá-los rapidamente na estrutura costeira.

2.3.4.4.2 Degradação térmica

O aumento de temperatura combinado com a presença de oxigênio resulta em reações químicas no interior do geossintético favorecendo o fenômeno químico

da degradação. A intensidade deste tipo de degradação é proporcional à concentração de oxigênio no meio, sendo portanto mitigada quando o geossintético está submerso inteiramente na água.

2.3.4.4.3 Degradação química

É provocada pela ação do oxigênio, íons, ácidos, bases e outros agentes químicos presentes na água. Esses elementos são responsáveis por alterar as estruturas moleculares dos polímeros, incluindo a quebra das ligações químicas e diminuição de comprimento das cadeias, bem como, podem incorporar agentes estranhos e quimicamente ativos na estrutura molecular. Conseqüentemente, essas alterações podem acarretar danos ao material durante sua vida útil.

2.3.4.4.4 Danos no processo de instalação

A má instalação dos geossintéticos em um sistema de proteção costeira pode acarretar em modificações de suas propriedades e prejuízos no desempenho do material a curto e longo prazo. Os possíveis danos referentes a essa etapa dependem primariamente da resistência do polímero constituinte, mas também de fatores externos, como as características do solo de assentamento e a energia de compactação.

Para inibir esse problema é necessário a utilização de procedimentos de segurança durante a etapa de instalação, de modo que a resistência do material in loco seja compatível com o valor calculado no projeto.

2.3.4.4.5 Considerações finais sobre durabilidade

Como foi exposto nessa seção, a durabilidade dos geossintéticos é dependente do tipo de polímero constituinte e sua estrutura molecular, havendo no entanto, outros fatores que influenciam de maneira secundária nesta propriedade.

O comportamento dos geossintéticos a longo prazo é intensamente debatido na área técnica e há muito conhecimento a ser explorado neste quesito. Para a maior parte das obras costeiras é desejável que a durabilidade do produto perdure ao longo do tempo, todavia em algumas construções envolvendo geotêxteis do tipo

bolsa e colcha, a função das geofomas é moldar o material de enchimento até a cura e se desintegrar. Portanto, a utilização deste material em obras de proteção costeira deve ser feita de forma cuidadosa, atestando a qualidade dos polímeros constituintes através de ensaios laboratoriais, bem como se atentando para as características do meio onde serão aplicados. Essa metodologia é essencial para garantir a segurança das obras de engenharia e evitar transtornos graves decorrentes de possíveis degradações do material.

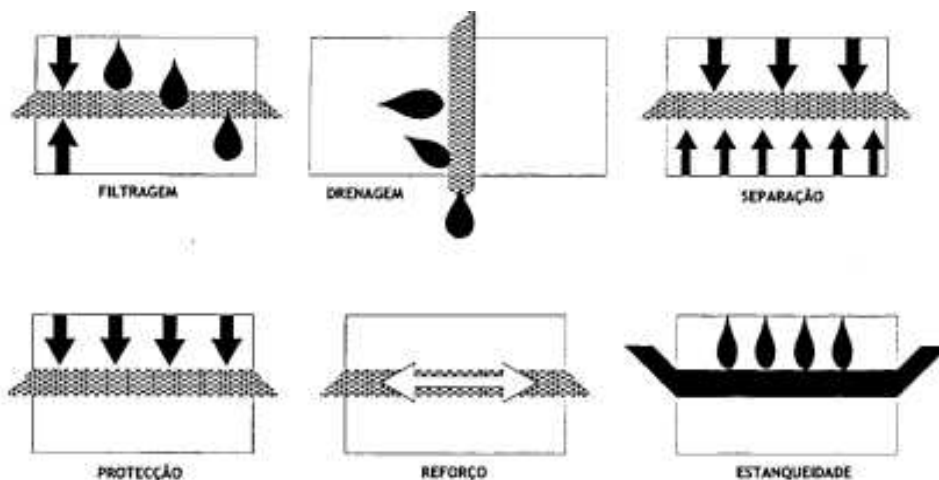
2.3.5 Funções dos geossintéticos

Os geossintéticos aplicados em obras de proteção costeira podem desempenhar diversas funções simultaneamente. Portanto, para otimizar o máximo do seu uso é necessário definir essas funções requeridas e classificá-las em ordem de importância no sistema. Essa metodologia ajuda a determinar as características que o material deve possuir para cumprir as funções a que foi atribuído (NEVES, 2003). A correta funcionalidade de um geossintético compreende as ações que o produto deve desempenhar para alcançar os objetivos descritos em projeto através do desempenho eficiente de suas propriedades.

Dentre as funções mais exigidas para os geossintéticos pode-se listar a filtragem, drenagem, proteção superficial, resistência mecânica e separação de materiais.

A Figura 9 ilustra as principais funções requeridas dos geossintéticos:

Figura 9 - Principais funções dos geossintéticos



Fonte: Neves, 2003

2.3.5.1 Filtragem

A filtragem nos geossintéticos se caracteriza pela capacidade de passagem de água através do material no plano ortogonal à superfície, assim como, no trabalho de retenção de partículas sólidas no sentido do fluxo. Portanto, a filtragem determina o estado de equilíbrio entre solo e geossintético, permitindo o fluxo livre de água e evitando a transposição de partículas sólidas ao longo da vida útil do geossistema.

As propriedades que mais impactam nesta função são a permissividade e a porosidade do material, além disso, o geossintético deve apresentar uma flexibilidade eficaz contra as deformações do terreno de assentamento para impedir a migração de partículas sólidas para os vazios do tecido.

Por último, deve-se analisar o nível de compatibilidade entre solo e geossintético para fluxos de longo prazo, de forma a evitar o fenômeno da colmatação em idades avançadas do sistema.

2.3.5.2 Drenagem

Os geossintéticos podem desempenhar o papel de dreno quando são instalados para permitir a passagem de água através do plano normal à superfície.

Essa função consiste no equilíbrio entre solo e geossintético, promovendo a circulação livre de água e a retenção de solo ao longo do tempo. Portanto, o sistema de drenagem deve permitir a evacuação rápida da água, cuja eficácia dependerá da

capacidade de transmissividade do material, bem como, deve evitar a migração de partículas sólidas para o interior do dreno, o que dependerá das propriedades de permissividade e porosidade do geossintético.

Um fator primordial para o funcionamento do sistema drenante é a análise do seu comportamento a longo prazo, em que deve-se atentar para a espessura, dimensões das aberturas das malhas e compressibilidade do material a fim de evitar a obstrução por partículas sólidas.

2.3.5.3 *Proteção*

O geossintético pode desempenhar a função de proteção quando é instalado na posição intermediária entre dois materiais, cujo intento é absorver e dissipar as tensões transmitidas pelos esforços atuantes no sistema.

No que se refere a essa função específica, o geossintético pode atuar de diferentes maneiras: na proteção superficial, o geossintético envolve o maciço de solo, protegendo-o dos danos causados pelo intemperismo e tráfego de objetos. Na proteção interfacial de diferentes materiais, o geossintético forma uma camada resistente a cargas concentradas e impede a propagação de deformações de um objeto sobre o outro.

A correta aplicação dessa função depende principalmente da resistência mecânica do geossintético, como também de uma espessura satisfatória e continuidade das malhas, sem apresentar pontos de falha em sua extensão.

2.3.5.4 *Reforço mecânico*

Os geossintéticos apresentam boa resistência aos esforços de tração e podem ser usados como complemento a materiais que não possuem esta propriedade. A função de reforço pode ser exercida instalando-se o geossintético como uma membrana que separa materiais sujeitos a pressões distintas, uma vez que o produto promove um equilíbrio de tensões e estabelece um reforço geral da estrutura. Já para o reforço interno, o geossintético é colocado dentro de maciços de solo para suportar as tensões oriundas das movimentações de partículas.

Esta função dos geossintéticos ajuda a aumentar a resistência mecânica do solo, auxiliando-o a suportar esforços cortantes que poderiam levar ao colapso do

maciço. A inclusão do reforço otimiza a segurança da obra, podendo-se modificar variáveis importantes de projeto como a inclinação do terreno e a magnitude das cargas aplicadas.

Portanto, o desempenho do geossintético como material de reforço depende de sua resistência à tração e deformações causadas por cargas cíclicas. Além disso, é imprescindível que se apresente uma resistência satisfatória nas interfaces do conjunto solo-reforço.

2.3.5.5 Separação de materiais

Essa função se caracteriza pela criação de uma camada flexível entre materiais de granulometrias diferentes de forma que se mantenha a integridade das partículas sólidas e seja otimizado o desempenho do sistema, assim a barreira tem como intuito coibir a mistura e o intertravamento de solos finos e grossos no momento que o geossintético sofre solicitação de esforços.

A dinâmica entre os diferentes materiais podem acarretar em dois fenômenos indesejáveis ao longo do tempo, o primeiro é a entrada de partículas finas nos vazios do solo grosso, que inibe a permeabilidade e prejudica a capacidade de drenagem do sistema. O outro se refere a penetração de partículas grossas no solo fino que debilita a resistência do terreno. A introdução da camada geotêxtil de separação evita a ocorrência dessas patologias e preserva as propriedades de cada tipo de solo.

Em termos qualitativos, o funcionamento correto dessa barreira depende das características mecânicas do geossintético que englobam fatores como deformação e resistência a cargas concentradas, bem como, depende das propriedades hidráulicas dos solos utilizados na obra.

2.3.5.6 Considerações sobre a escolha de geossintéticos para obras

Para selecionar o geossintético mais adequado para o cumprimento de funções específicas em um sistema de proteção costeira deve-se analisar o tipo de obra, o meio a que estará submetido, propriedades do material e o modo de instalação. De acordo com Neves (2003), o processo de escolha conta com as seguintes etapas:

- Identificação das funções primárias e secundárias desempenhadas pelo geossintético;
- Atestar as principais propriedades do material;
- Determinação dos valores de resistência requeridos para o geossintético através de ensaios de campo e em laboratório;
- Seleção do método de instalação e determinação das propriedades necessárias para suportar as tensões nessa etapa;
- Escolha do geossintético a partir do cumprimento das proposições anteriores.

Portanto, os geossintéticos devem possuir propriedades que os permitam desempenhar as funções determinadas, que mitigue os danos no período de instalação e seja durável para assegurar a integridade da obra por um longo tempo.

Durante a definição das propriedades é necessário estipular os valores de resistência do material através de ensaios que quantificam essas grandezas, sendo que geralmente esses ensaios são custosos, demorados e complexos. Por meio destes é possível simular o comportamento do sistema solo-geossintético sob efeito de tensões nas condições ambientais que se encontrará a obra costeira. Devido aos obstáculos já descritos em relação aos ensaios, via de regra, eles são feitos em número reduzido.

Em paralelo, também existe o ensaio de identificação e controle de qualidade do geossintético, que se caracteriza pela inspeção do polímero constituinte, processo de fabricação, características físicas e acabamento final, bem como, é verificado a integridade do produto após as etapas de transporte, armazenamento, manuseio e instalação. Neste ensaio são testados os valores das propriedades mais importantes do geossintético que devem estar em conformidade com os limites estabelecidos no projeto.

2.3.6 Manuseamento e aplicação dos geossintéticos em obras

O processo de instalação dos geossintéticos nas obras de proteção costeira é uma etapa crítica para a eficiência do projeto. O mau manuseamento do material durante as fases de transporte, armazenamento e colocação pode degradar a qualidade das propriedades do geossintético, como também pode ocasionar danos





físicos relacionados a cortes e perfurações, que podem levar à perda de resistência do material e o tornar inapto para o desempenho de sua função, portanto é conivente estabelecer regras relativas ao manejo do produto no local de obra (NEVES, 2003).

É válido ressaltar que as características específicas de cada aplicação e a gama de técnicas de construção empregadas torna essa etapa mais desafiadora, pois a imprevisibilidade dos processos costeiros durante a construção pode causar incertezas nas decisões e dificultar o estabelecimento de regras genéricas.

Um fator primordial na aplicação dos geossistemas em obras é a disposição das juntas e sobreposições no tecido de revestimento, visto que a presença de ambas são inevitáveis. O geossintético é um material de comprimento longo e largura limitada, logo para cobrir áreas extensas é necessário a junção de vários painéis sobrepostos. Essas zonas de ligação estabelecem pontos de falha no sistema de proteção costeira e por consequência devem ser feitas com destreza (PALMA, 2016). Geralmente os fornecedores enviam um manual para a execução apropriada das juntas, estando contido um conjunto de indicações relacionados aos tipos de junta, suas posições e os cuidados referentes ao acabamento.

Na Figura 10 abaixo, estão demonstrados os tipos mais comuns de juntas e suas principais deficiências.

Figura 10 - Tipos de juntas, resistências características e limitações

<i>Característica da junta</i>	<i>Com agrafos</i>		<i>Por sobreposição</i>	
	Simple	Com dobra	Simple	Com dobra
Forma				
Resistência da junta em % da resistência do geossintético	25 – 50	30 – 60	60 – 80	60 – 80
Resistência à passagem de partículas de solo	Incerta para solos finos	Garantida	Incerta	Garantida

Fonte: Palma, 2016

Como pode se aferir, a presença das juntas causam um decréscimo na resistência do material, sendo assim, é possível atestar que os geossintéticos que

estão sob a ação de esforços críticos devem ter um cuidado redobrado com a orientação das juntas em relação ao plano de solicitação e a eficácia do reforço, de modo a preservar a estabilidade global da estrutura.

Em relação à etapa de aplicação dos geossintéticos em obra é preciso elencar a sequência de construção. Segundo Neves (2003), a metodologia empregada deve seguir esses passos:

- Os geotêxteis devem ser instalados de forma desafogada, de modo a permitir a acomodação do material sob as irregularidades do terreno;
- A permeabilidade do terreno não deve conduzir a uma redução do escoamento de água através do geossintético;
- A instalação de geossintéticos em taludes deve-se iniciar no pé em direção a crista de tal forma que os painéis superiores se sobreponham aos inferiores;
- Quando o prolongamento do talude ultrapassa o manto de proteção, os geossintéticos devem estar ligados ao topo da estrutura;
- Na instalação de tapetes de proteção, estes devem começar na linha da costa e progredir para o mar;
- A colocação de materiais sobrejacentes aos geossintéticos deve-se iniciar da base para o topo da estrutura;
- É necessário a realização de amarração dos geossintéticos a fim de prevenir escorregamentos e colapso da estrutura.

2.3.7 Dimensionamento dos geossistemas

De acordo com Recio (2008), o processo de dimensionamento dos geossistemas é específico para cada obra, não havendo equações genéricas que possam ser universalizáveis. Na realidade existe um vácuo de conhecimento sobre determinados fenômenos que impactam no comportamento destes sistemas, principalmente quando são posicionadas em solos profundos e taludes móveis, sujeitos às solicitações das ondas e forças de arrasto.

No entanto, a necessidade de proteção das orlas marítimas, que se desenvolvem em ritmo acelerado pelo crescimento urbano, bem como as condições naturais adversas requerem padrões de execução cuidadosos e metodologias de dimensionamento precisas. Atualmente os processos de dimensionamento dos

geossistemas são mais seguros devido ao conhecimento acumulado de experiências passadas que hoje permitem uma melhor análise da viabilidade técnica da obra e do processo executivo em si.

Geralmente, o dimensionamento é feito pelo modelo semi-empírico através de ensaios com protótipos de menor escala, porém pode haver problemas construtivos durante a fase de instalação e exploração do terreno. O aspecto mais importante do dimensionamento é garantir a estabilidade da estrutura e as funções desempenhadas pelo geossintético, além desses critérios é válido citar o planejamento do método de construção e as manutenções durante todas as fases da obra.

A instabilidade das estruturas de proteção costeira decorre principalmente do mau assentamento do material no solo de fundação, visto que habitualmente a obra está situada em leitos de areia que são vulneráveis à erosão por infra escavação, dando origem a recalques e deslizamentos que constituem formas comuns de colapso neste tipo de estrutura. Logo é conveniente garantir a segurança nos pontos críticos do geossistema, principalmente na proteção do pé do talude e na adoção de outras medidas de reforço.

Prover a estabilidade da camada superior da estrutura é primordial para conter os esforços solicitantes das agitações de ondas, bem como ajuda na consolidação da estabilidade global do geossistema, constituindo assim, um fator importante a se considerar na etapa de dimensionamento.

Deve-se salientar que além da estabilidade global, existem outras variáveis que impactam no desempenho mecânico dos geossistemas e devem ser analisadas na fase de cálculo do projeto, das quais pode-se citar a flexibilidade da estrutura, que constitui na capacidade da obra de amortecer as tensões e a durabilidade da estrutura, que caracteriza a capacidade do geossistema manter suas funções originais ao longo do tempo.

De forma adicional, o monitoramento da estrutura na fase de uso ajuda a detectar problemas técnicos que podem ser reparados em eventuais manutenções, o que contribui para a conservação e longevidade da obra costeira.

2.3.7.1 *Equações básicas*

Segundo Palma (2016), nos primórdios do uso de geossistemas em engenharia costeira, o dimensionamento era feito por uma equação proposta por Hudson em 1956, que adaptava o cálculo de armaduras em quebra-mares para os geossintéticos.

Anos adiante, por meio desta fórmula, Bouyze e Schram propuseram uma nova equação através de ensaios em escala reduzida para a estabilidade global dos geossistemas. A formulação era de fácil aplicação, porém os valores empíricos extraídos em laboratório possuíam defasagens por não considerar o impacto das ondas, bem como a equação era válida apenas para geotubos, não sendo utilizável para outros tipos de geossintéticos com comprimentos mais alongados (Recio,2008).

Em 1998, Wouters propôs uma equação otimizada em que considerava as forças e momentos decorrentes da ação das ondas, já que impactam no desempenho dos geossintéticos (Polis Litoral Norte, S.A., 2013).

A fórmula proposta por Wouters é apresentada na Equação 1 abaixo:

$$\frac{H_s}{\Delta \cdot D_n} = \frac{2,0}{\sqrt{\xi_{op}}} \quad (1)$$

Em que:

- H_s é a altura de onda significativa;
- Δ é dado por $\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$, sendo $\rho_s = (1-n) \cdot (\rho_s - \rho_w) + n \cdot \rho_w$, onde n é a porosidade do material de enchimento, ρ_s é a densidade da areia e ρ_w é a densidade da água;
- $\xi_{op} = \tan \alpha \cdot l \cdot (H_s / L_{op})$, em que α é o declive da estrutura, L_{op} é o comprimento da onda em águas profundas, e D_n é o diâmetro característico do elemento dado por $l \cdot \sin \alpha$, em que l são as dimensões do elemento na direção de propagação da onda;
- O valor de 2,0 é um parâmetro empírico determinado com base em ensaios.

No ano de 2002, Oumeraci propôs uma nova equação semelhante a formulação de Wouters extraída de testes de grande escala. Nesse modelo matemático, o autor difere as condições de atuação entre talude e coroamento,

como também introduz um parâmetro empírico mais preciso do que 2,0 (Polis Litoral Norte, S.A., 2013). A fórmula proposta é apresentada na Equação 2 abaixo:

$$\frac{H}{\Delta.Dn} = \frac{2,75}{\sqrt{\xi_{op}}} \quad (2)$$

Em que:

- As variáveis Δ , ξ_{op} e Dn são idênticas às apresentadas para a equação de estabilidade de Wouters;
- H é a altura de onda crítica no início da colisão, valor idêntico a H_s .

Com a formulação de Oumeraci é possível dimensionar os taludes e coroamentos de forma separada ao identificar as diferenças entre as forças atuantes nos dois casos.

Recio (2008) estudou as consequências das deformações nos geocontentores e a condição de estabilidade desse tipo de sistema. Desta pesquisa, o autor propôs um conjunto de equações de estabilidade para os geossistemas que abrange os casos mais comuns de colapso nesse tipo de obra, levando-se em consideração os esforços atuantes no geocontentor.

As Equações 3 e 4 derivadas da análise de Recio (2008) para o dimensionamento do comprimento e do peso dos geossistemas estão dispostas abaixo, separadas para as situações de deslizamento e tombamento:

Deslizamento

$$l \geq u^2 \frac{[0.5KS_{CD}C_D + 2.5KS_{CL}C_L\mu]}{[\mu KS_R \Delta g - KS_{CM}C_M \frac{\partial u}{\partial t}]}$$

$$W \geq \frac{\rho_s \left(u^2 \frac{[0.5KS_{CD}C_D + 2.5KS_{CL}C_L\mu]}{[\mu KS_R \Delta g - KS_{CM}C_M \frac{\partial u}{\partial t}]} \right)^3}{10} \quad (3)$$

Tombamento

$$l \geq u^2 \frac{[0.05KO_{CD}C_D + 1025KO_{CL}C_L]}{[0.5KO_R\Delta g - 0.1KO_{CM}C_M \frac{\partial u}{\partial t}]}$$

$$W \geq \frac{\rho_s \left(u^2 \frac{[0.5KS_{CD}C_D + 2.5KS_{CL}C_L\mu]}{[\mu KS_R\Delta g - KS_{CM}C_M \frac{\partial u}{\partial t}]} \right)^3}{10}$$
(4)

Em que:

- l é o comprimento do geocontentor;
- W é a massa do geocontentor;
- u é a velocidade horizontal das partículas;
- $\frac{\partial u}{\partial t}$ é a aceleração horizontal;
- μ é a força de atrito entre os geotêxteis;
- g é a aceleração da gravidade;
- Δ é também obtido por $\rho_s - \rho_w / \rho_w$;
- KS, KO e C são fatores de deformação.

Essas equações são importantes, pois estabelecem uma relação entre deformação e estabilidade para os geossistemas, porém apresentam certas lacunas. Primeiramente, elas foram obtidas por ensaios com geocontentores, um tipo específico de geossintético que possui malhas e geometrias próprias. Todavia é permitida adaptações a outros modelos desde que o enchimento pré determinado dentro do material seja igual a 80% da capacidade total e que sejam consideradas apenas as situações de deslizamento e tombamento (PALMA, 2016).

2.3.8 Tipos de geossistemas

Os geossistemas utilizados em obras de proteção costeira consistem em componentes que confinam sedimentos dentro de si, podendo ser aplicados como substitutos de obras robustas convencionais. A seguir são apresentados os três tipos de geossistemas mais comuns em engenharia costeira: geotubos, geocontentores e geobags.

2.3.8.1 Geotubos

São caracterizados por elementos tubulares constituídos por uma capa polimérica de alta resistência e preenchidos com sedimentos por bombeamento hidráulico. Esse sistema é montado e preenchido no próprio local de funcionamento, sendo suas dimensões limitadas às diretrizes de projeto.

O revestimento sintético retém o sedimento interno, porém possui permeabilidade adequada que permite a saída de água usada na fase de bombeamento (PALMA,2016). A capa envoltória apresenta alta resistência para suportar os esforços nas fases de enchimento e operação para manter seu formato padrão. A aplicação destes tubos é ideal para terrenos superficiais ou em casos de submersão máxima com 5 metros de profundidade (MORAIS, 2010).

A Figura 11 mostra exemplo de aplicação de geotubos em terreno superficial:

Figura 11 - Geotubos



Fonte: Morais, 2010

2.3.8.2 Geocontentores

São elementos de grandes dimensões capazes de abarcar um alto volume de agregados. Seu uso é comum em obras submersas com mais de 5 metros de profundidade, sendo que seu enchimento pode ser feito por bombeamento hidráulico ou por equipamentos mecânicos (PALMA, 2016).

Devido às suas dimensões imponentes, o transporte e posicionamento desses elementos requerem cuidados especiais, sendo recomendado o uso de embarcações de pequeno calado. O tecido sintético envoltório deve resistir aos carregamentos solicitados nos momentos de preenchimento, instalação e operação.

De acordo com Koffler (2008), a etapa de instalação é crítica e deve ser dividida por etapas, onde o invólucro é colocado vazio no porão do barco, em seguida o batelão é enchido com material sedimentar e então transferido para o geocontentor até o momento que ele é fechado e imerso em água na posição estabelecida em projeto.

A Figura 12 mostra operação de enchimento de um geocontentor:

Figura 12 - Geocontentor



Fonte: Baarsbv

2.3.8.3 Geobags

Se constituem de elementos geossintéticos preenchidos com areia ou mistura pobre de solocimento e dimensionados para cumprir os requisitos de projeto no local de implantação, sendo que são permeáveis a água e capazes de reter o material interno através de seu revestimento espesso (PALMA, 2016). São os geossistemas de menores dimensões com cada unidade contendo em média de 1 a 10 m³ de solo (MORAIS, 2010).

O enchimento das geobags é feito no local de aplicação por bombeamento hidráulico ou trabalho mecânico. Sua instalação é realizada com equipamentos de elevação, podendo estas, serem posicionadas abaixo da água ou na superfície para contenção de taludes. Os sacos podem ser dispostos com ou sem sobreposição, fator que interfere na quantidade de componentes implementados na obra e na estabilidade geral do sistema. Na etapa de sobreposição das geobags nos taludes, deve-se construir uma camada de fundo no terreno e deixar uma folga livre na crista.

Os principais fatores relacionados ao dimensionamento dessas bolsas incluem a escolha de geotêxtil resistente para suportar as pressões internas do enchimento e das forças externas ocasionadas pela turbulência das ondas e que podem levar ao tombamento e deslizamento do terreno (NEVES, 2003).

A Figura 13 mostra exemplo de aplicação de geobags como reforço de terreno:

Figura 13 - Geobags



Fonte: SIGMA Geosynthetics

2.3.9 Exemplos de aplicação de geossistemas em obras pelo mundo

Para reforçar a argumentação escrita no referencial teórico, neste módulo são apresentados casos de sucesso da aplicação de geossintéticos em obras de proteção costeira, tanto atuando como elementos de reforço nas praias como também em estruturas perpendiculares à costa.

2.3.9.1 Geossistemas como reforço em praias

Os barrancos de areia que exercem a função de barreira nas praias podem sofrer desgastes devido a ação agressiva das ondas e atividades humanas. Por se tratar de elementos essenciais na contenção dos avanços erosivos é necessário a adoção de medidas para preservar a integralidade desses ambientes. Algumas preocupações se referem ao plantio de vegetação sob esses maciços, aplicação de materiais de vedação e o engordamento artificial das praias com o acúmulo de sedimentos.

Porém em trechos altamente degradados, somente estas soluções básicas não apresentam resultados satisfatórios, portanto é primordial a instalação de sistemas de reforço eficientes que garantem a estabilidade do terreno em decorrência dos esforços incidentes, sem descaracterizar a paisagem e implicar danos severos ao ecossistema local (NEVES, 2003).

Nesse cenário, um dos tipos de sistemas recomendados é a aplicação de bolsas geossintéticas preenchidas com areia para a contenção dos taludes, cujo uso pode ser feito em obras temporárias, emergenciais ou permanentes.

Nos itens a seguir são exemplificados casos bem sucedidos do uso de geossintéticos como materiais de reforço em praias ao redor do mundo, demonstrando os aspectos comportamentais desse sistema passivo de proteção costeira e as particularidades em cada construção.

- Reforço da restinga de Ofir com geotubos, Portugal

A ação conjunta das ondas e marés estava potencializando o fenômeno da erosão no corpo da restinga de Ofir. Em frente a esse problema foram feitas uma série de intervenções de engordamento artificial no extremo norte da praia, que apesar de ser um conjunto de soluções de baixa impacto, elas não apresentaram resultados consistentes ao longo do tempo. Como os problemas de instabilidade na região persistiam, foi proposto a construção de um sistema de caráter permanente que retivesse os sedimentos incorporados na fase de alimentação artificial (PALMA, 2016).

Então, a empresa responsável pela obra optou pela aplicação de geotubos na frente marítima com o objetivo de estender o tempo de vida da intervenção sem construir uma estrutura rígida permanente em uma área com variabilidade de eventos hidrodinâmicos.

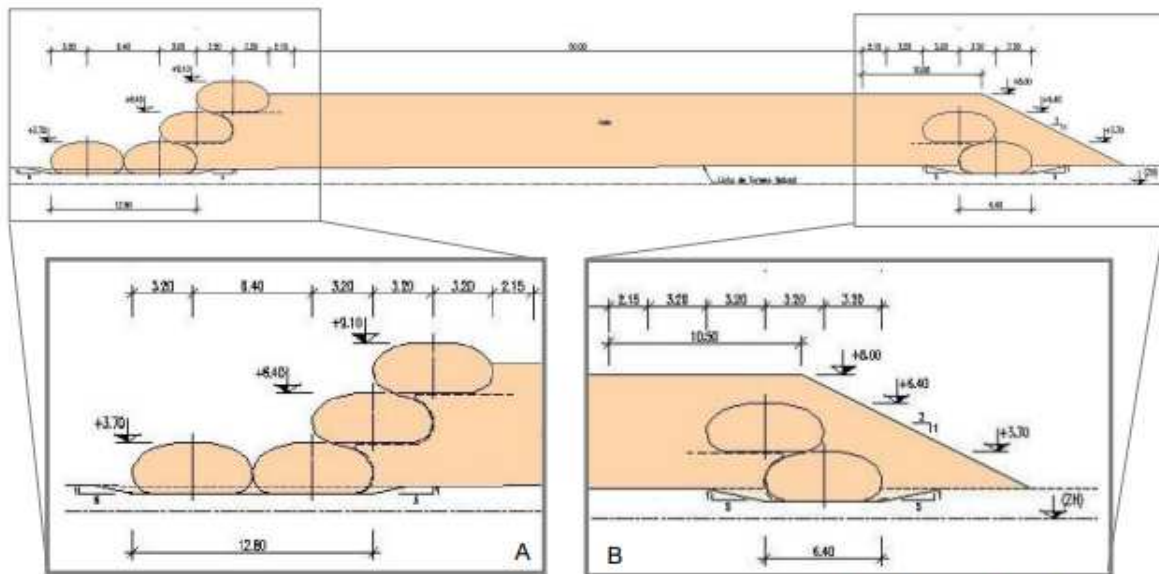
Os geotubos escolhidos para a obra possuíam tecido especial de polipropileno com as juntas dobradas e sobrepostas, e com alta resistência à degradação por luz solar e ataques bioquímicos. Na fase de instalação, os colchetes vazios foram dispostos na região de assentamento e preenchidos com emulsão de água e areia por meio de bombeamento hidráulico.

A instalação dos geotubos foi efetuada para estabilizar o terreno costeiro, ligando o corpo da restinga e o banco de areia situado no norte. Deste modo, os

responsáveis pela obra visavam aumentar o gradiente de velocidade da água na entrada do rio e amenizar o processo de assoreamento.

Portanto, foi definido uma largura de 50 metros e uma cota de 8 metros para o geossistema a fim de reduzir o impacto estético e ambiental no local. A estrutura construída conta com 49 geotubos e o perfil do talude está ilustrado na Figura 14 logo abaixo:

Figura 14 - Perfil do talude reforçado com geotubos na restinga de Ofir



Fonte: Polis Litoral Norte, 2013

A construção do geossistema de reforço da restinga de Ofir foi iniciada em Junho de 2013 e foi concluída em Novembro do mesmo ano. Durante a etapa de execução foram realizados monitoramentos para analisar o desempenho da obra e atestar os resultados em relatórios, sendo que uma das complicações principais se deu pela rotação de geotubos da fiada de base devido a baixa adesão com o solo de assentamento e ação agressiva das marés (POLIS LITORAL NORTE, 2013).

A Figura 15 apresenta a vista dos geotubos instalados para proteção da restinga:

Figura 15 - Reforço de restinga com geotubos



Fonte: Proman, 2015

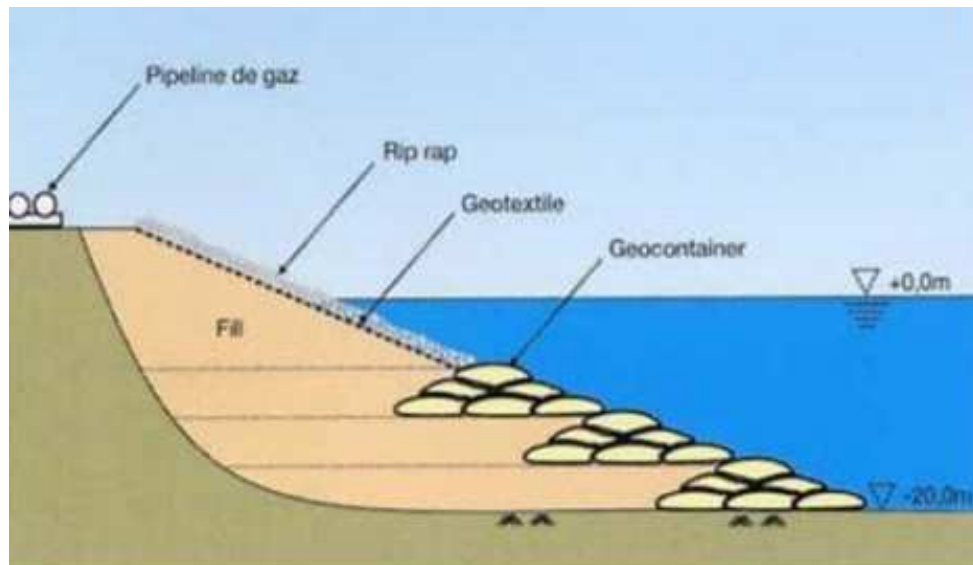
Na estação do inverno verificou-se o galgamento de trechos da estrutura pelo mar, o que comprometeu a estabilidade e a permeabilidade dos materiais. Esses problemas foram intensificados ao longo do tempo, causando a ruptura de alguns geotubos e sua dispersão da posição original.

- Geossistema submerso em Zoutkamp na Holanda

Nesta obra foram utilizados geocontentores na reconstrução de um talude submerso, cuja instabilidade estava colocando em risco as linhas de tubulação de gás instaladas na crista do terreno, situada fora da água.

Na Figura 16 é possível verificar a configuração do talude reforçado com geocontentores:

Figura 16 - Reforço de talude submerso com geossintéticos na Holanda



Fonte: Koffler, 2008

Para estabilizar esse talude submerso, foram instalados vários geocontentores preenchidos com areia e posicionados até a base do terreno em uma cota de - 20 metros. No estudo de caso, Koffler (2008) concluiu que a obra foi bem sucedida e economicamente viável, visto que o talude ficou estável e o custo da obra foi razoável.

- Geossistema de proteção temporária no Sri Lanka

Em 1992 no Sri Lanka, vários edifícios situados no litoral estavam correndo risco de colapso devido ao intenso fenômeno de erosão costeira. O país se encontrava em uma curva de desenvolvimento, impulsionado especialmente pelo setor turístico praiano, porém a ação da erosão estava prejudicando a estabilidade das zonas costeiras.

O litoral oeste do país carecia de estruturas de proteção costeira devido ao baixo investimento do governo, o que colocava em risco a segurança dos habitantes e da infraestrutura local. Com poucos recursos financeiros, foi proposto a construção de obras de defesa costeira temporárias, que podiam ser instaladas rapidamente e constituíam uma proteção eficaz nas áreas de risco, enquanto se projetavam soluções mais robustas para resolver definitivamente o problema (NEVES, 2003).

A Figura 17 mostra a solução temporária com geobags no Sri Lanka:

Figura 17 - Solução temporária com geobags no Sri Lanka



Fonte: Neves, 2003

A solução imediata encontrada consistiu na colocação de 2400 sacos de geossintéticos (PET), pesando cerca de 800 kg no total e com capacidade de enchimento na faixa de 60 a 70%. No processo de instalação, as geobags foram enterradas na areia e a estrutura apresentou uma estabilidade satisfatória contra a ação das marés, e por conseguinte, a área residencial ficou devidamente protegida. Os procedimentos técnicos simples e ágeis adotados nesta obra temporária, impulsionou a construção de novas estruturas de proteção por toda a costa do Sri Lanka.

- Geossistema de proteção contra a erosão, Baía de Byron, Austrália Oriental.

O processo acelerado de erosão que decorreu na Baía de Byron, Austrália Oriental, deu início a uma série de estudos sobre os fenômenos costeiros e propulsionou a implantação de medidas para controlar a erosão nesta área, visto que as fortes tempestades aliadas com a dinâmica do mar revoltado ameaçavam a infraestrutura costeira, o que demandava urgência para resolver o problema (HEERTEN, 2000).

A Figura 18 mostra o terreno de dunas da praia reforçado com geobags:

Figura 18 - Reforço de talude superficial com geobags na Austrália



Fonte: Heerten, 2000

No primeiro momento foi testada a solução com sacos de areia, porém esta técnica não apresentou estabilidade satisfatória ao talude da praia. Visando um sistema de proteção prático, econômico e com baixo impacto ambiental, foi proposto a instalação de 1500 geobags na base do terreno para conter a ação das ondas.

2.3.9.2 Geossistemas em obras perpendiculares á costa

Nesta seção serão abordados casos de sistemas de proteção costeira construídos para fora da costa, sendo constituídos por geossintéticos que desempenham um papel ativo de defesa. Essas estruturas podem funcionar isoladamente ou de forma conjunta com as obras de reforço para otimizar o transporte e acúmulo de sedimentos, bem como, mitigar a energia das ondas que atingem a faixa litorânea (NEVES,2003).

- Espigão com núcleo de geossintéticos, Praia de Maroochydore, Austrália.

A praia de Maroochydore vinha sofrendo com os efeitos graves da erosão marinha. Com o intuito de resolver a situação, a prefeitura do município encomendou um estudo para determinar as causas do problema e apontar soluções (BBG,2002 em NEVES,2003). Os ensaios feitos na área de hidráulica da universidade de Queensland instruiu a implementação de um sistema híbrido de proteção costeira, composto por um espigão de geossintéticos localizado no norte da praia e engordamento artificial da faixa de areia para assegurar a estabilidade da região.

A Figura 19 mostra o espigão formado por geobags na Praia de Maroochydore:

Figura 19 - Espigão formado por geossintéticos em Maroochydore, Austrália



Fonte: BBG,2002

O espigão foi construído mar à dentro com 650 geobags com volume de 2,5 m³ por unidade, possui mais de 100 metros de extensão e cota profunda de 2,5 metros, podendo resistir ao impacto de ondas com 3 metros de altura. Esse geossistema foi projetado para não alterar agressivamente a paisagem da área e fornecer segurança aos frequentadores.

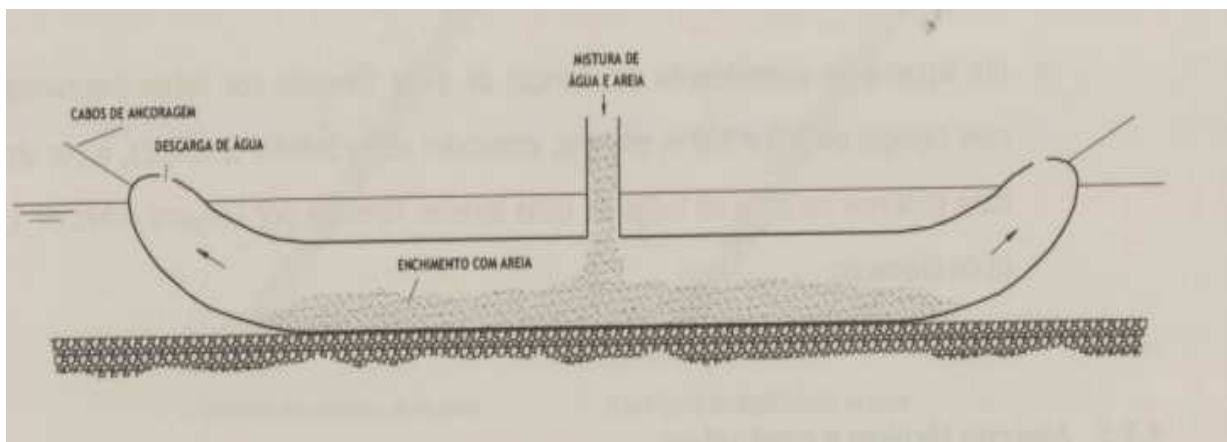
- Geossistema de proteção com Longard Tubes, Sacca degli Scardovari, Itália.

A extinção dos grandes terrenos de areia em volta da cidade estava agravando os efeitos da erosão que já afetava a mata de restinga local. Para solucionar o problema, foi necessário a escolha de uma solução que abrangesse os fatores técnicos e ambientais para não alterar de forma agressiva o ecossistema presente (Pilarczyk, 2000).

Os dados retirados de campo, indicavam que os bancos de areia emergentes à água tinham pouca capacidade de carga e baixa profundidade, tornando inviável a construção de uma estrutura costeira rígida convencional.

Nesse cenário, foi proposto uma solução composta por elementos longilíneos denominados Longard Tubes, que foram encheidos com areia dragada de jazidas submarinas do próprio local. A Figura 20 mostra o perfil lateral do geossistema constituído:

Figura 20 - Geossistema com Longard Tubes



Fonte: Pilarczyk, 2000

Esse geossistema é patenteado e constituído por um tubo com revestimento de polietileno impermeável em que é bombeado emulsão de água e areia por uma comporta no topo do material. Em relação às medidas geométricas, os tubos instalados chegavam a 2,20 metros de diâmetro e seus comprimentos ficavam entre 100 e 150 metros (Pilarczyk, 2000).

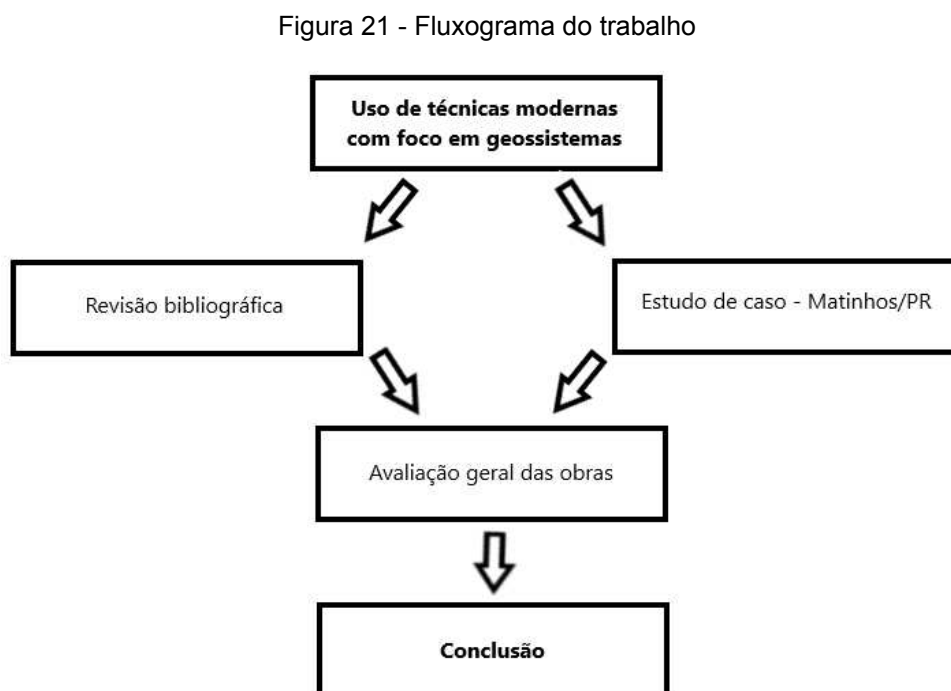
3. METODOLOGIA DO TRABALHO

O objetivo deste capítulo é detalhar a estrutura lógica seguida para a realização da dissertação. Inicialmente, a metodologia do trabalho consistiu em pesquisas em fontes bibliográficas, tais como monografias, artigos, livros, documentos governamentais, dados de obras e sites de empresas que confeccionam geossistemas.

Na etapa do estudo de caso, foram explorados dados nos relatórios técnicos do órgão Instituto Água e Terra e memoriais descritivos da empresa Aquamodelo, desenvolvedora do projeto executivo de revitalização da orla de Matinhos - PR . Em paralelo foram feitas reuniões com engenheiros civis envolvidos nas obras de proteção costeira, que atuam tanto no setor de comercialização dos materiais geossintéticos como na execução das estruturas.

Por fim, foi feita uma avaliação geral do empreendimento, utilizando as informações obtidas no projeto, na etapa construtiva e em notas técnicas de grupos de pesquisa, contemplando a configuração final da obra, pontos de destaque das propostas implantadas, sugestões, impactos gerados e críticas.

Na Figura 21 é apresentado o fluxograma da metodologia adotada para este trabalho:



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

4. ESTUDO DE CASO: OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA NA RECUPERAÇÃO DA ORLA DE MATINHOS - PR

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é referente ao município de Matinhos no estado do Paraná, o qual vem sofrendo há décadas com processos avançados de erosão costeira, cuja ocorrência foi acentuada pelo mau planejamento urbano da cidade, falta de infraestrutura de drenagem e ocupação desordenada de edificações na faixa litorânea.

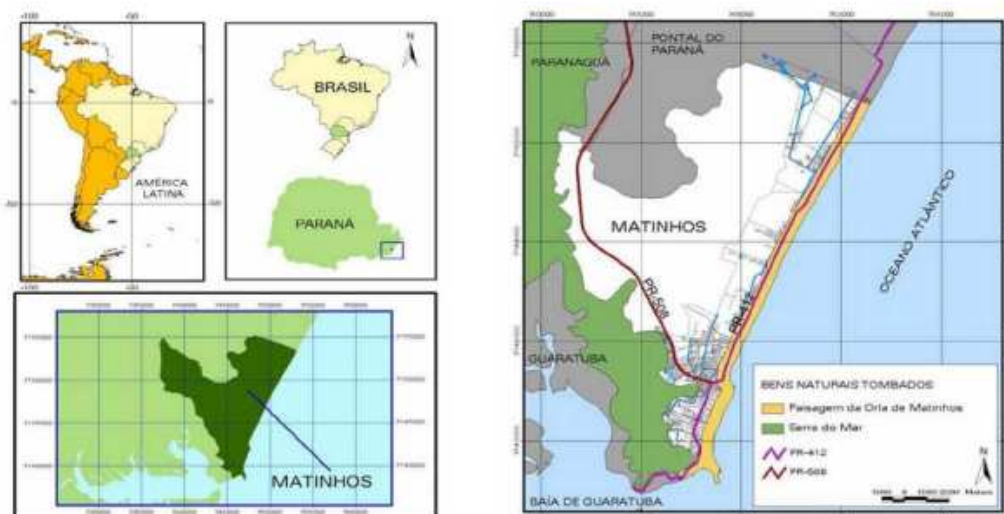
A cidade possui 117 km² de área, fica localizada na região sul do litoral paranaense e é limitada ao leste pelo Oceano Atlântico, ao norte pelo município de Paranaguá e ao sul e oeste por Guaratuba (FREIRE, 2011). Segundo o IBGE (2021), a população residente na cidade é de 35.705 habitantes, mas por se tratar de um local com alta demanda turística, o boom populacional nos balneários do município durante o verão é exponencial. Assim, a orla marítima se configura como a área mais nobre da cidade e seu catalisador econômico, contudo os efeitos da erosão costeira constituem um ponto de fraqueza ao território.

No passado recente, muitos trechos da orla foram modificados, degradados e ocupados ilegalmente. Todos esses fatores relacionados com o movimento das correntes litorâneas ao longo da costa causaram um desbalanceamento no aporte de sedimentos na praia (INSTITUTO ÁGUA E TERRA, 2021a).

Neste contexto, as obras de proteção costeira descritas no programa de Projeto Integrado de Revitalização da Orla de Matinhos visam sanar esse problema histórico que assola a região.

A Figura 22 apresenta a localização da área de estudo no município de Matinhos:

Figura 22 - Área de estudo no município de Matinhos-PR



Fonte: Conselho do Litoral, 2005

4.2 DESCRIÇÃO DAS OBRAS

Segundo Instituto Água e Terra (2021a), as obras de proteção costeira da orla de Matinhos consistem nos serviços de engordamento da faixa de areia por aterro hidráulico, proteção de taludes, instalação de estruturas mistas compostas por elementos de rocha, concreto e geossintéticos, bem como reformas nas redes de drenagem e desenvolvimento urbanístico da orla.

As intervenções de defesa costeira são separadas em dois grupos distintos: as estruturas flexíveis correspondem ao engordamento da faixa de areia com aplicação de geobags para sustentação de taludes e as estruturas semi rígidas consistem na construção de headlands, guias correntes e espigão isolado.

O alargamento da faixa de areia foi executado em três trechos do litoral, totalizando um volume superior a 2,7 milhões de m³ de sedimentos que percorrem uma extensão de 5,7 km.

Em relação às estruturas semi rígidas, foi previsto a construção de guias correntes próximo à Avenida Paraná e ao canal do Rio Matinhos, espigão localizado na Praia Brava e headlands nos balneários Flórida e Riviera.

A Figura 23 apresenta as projeções das obras de proteção costeira planejadas para o litoral de Matinhos:

Figura 23 - Litoral de Matinhos com as projeções das obras de proteção costeira



Fonte: Instituto Água e Terra, 2021

4.3 JUSTIFICATIVA DAS INTERVENÇÕES

De acordo com Instituto Água e Terra (2021a), o litoral paranaense possui uma extensão aproximada de 90 km, dos quais 50 km são preenchidos por praias. A cidade de Matinhos fica a 100 km da capital Curitiba, tem cerca de 22 km de costa e é dividida em 36 balneários frequentados por um grande volume de banhistas durante a temporada. Durante este período, o município pode receber milhares de visitantes vindos da capital, cidades do interior do Paraná, de outros estados e até mesmo de países estrangeiros, evidenciando o potencial turístico da região.

A praia central de Matinhos passou por processos de desenvolvimento urbanístico desde 1920 e nas últimas décadas vem sofrendo com o fenômeno da erosão, que avança à costa a cada ano, atingindo quilômetros de extensão litorânea nos balneários da cidade. As Figuras 24 e 25 mostram os efeitos da erosão em Matinhos:

Figuras 24 e 25 - Processo avançado de erosão costeira na Praia Brava de Matinhos



Fonte: Freire, 2011

Essas áreas urbanas sofrem com problemas graves referentes à falhas de planejamento urbano e má execução das construções, dos quais pode-se citar:

- Contaminação marinha devido ao mau planejamento dos sistemas de drenagem que descarregam a água pluvial altamente poluída na praia, como também a presença de instalações clandestinas de esgoto que desembocam na costa;
- Ocorrência de inundações e alagamentos devido aos problemas descritos no item anterior;
- Ocorrência de erosão marinha na praia em função de fortes ressacas, que colocam em risco a segurança dos habitantes e da infraestrutura costeira.

Diante dos infortúnios abordados e dos anseios da população, o governo do Estado elaborou uma solução integrada para resolver os problemas da erosão costeira e dos sistemas de saneamento e drenagem da orla de Matinhos através da execução de um plano de obras denominado Projeto Integrado de Revitalização da Orla de Matinhos no ano de 2022.

Este programa de obras visa melhorar a balneabilidade da região, minimizar a ocorrência de enchentes e desenvolver o aspecto estético da orla através da revitalização paisagística e reformas viárias.

Os projetos executivos foram feitos pela empresa carioca Aquamodelo Engenharia em 2008, que é especialista em serviços nas áreas de recursos hídricos, engenharia costeira e saneamento, em que foram utilizados dados hidrodinâmicos da região de Matinhos.

4.4 SERVIÇOS

Os serviços projetados para a proteção costeira de Matinhos incluem:

- 2 Guias-Corrente na Av. Paraná;
- 1 Espigão na Praia Brava;
- 2 Guias-Corrente no Rio Matinhos;

- 1 Headland no Balneário Riviera;
- 1 Headland no Balneário Flórida;
- Proteção dos taludes costeiros;
- Engordamento artificial da faixa de areia por aterro hidráulico;

Nos capítulos subsequentes serão descritas as atividades desempenhadas nas obras de defesa costeira através de estruturas semirrígidas e flexíveis.

4.4.1 Estruturas de proteção costeira e engordamento da faixa de areia

A construção das estruturas semirrígidas de proteção costeira e a alimentação artificial de areia na praia de Matinhos combinada com o reforço de taludes por geobags têm como intuito mitigar o fenômeno da erosão marítima decorrente dos processos hidrodinâmicos ativos na região.

4.4.1.1 Histórico e soluções

A orla local vem sendo assolada pelo movimento descontínuo de sedimentos nas últimas décadas, provocando um recuo da linha de costa em Matinhos, como também, um acúmulo desordenado de areia em localidades próximas. O recuo da faixa de areia está atrelado ao baixo aporte de sedimentos vindos de Santa Catarina, à ocupação residencial irrestrita na costa e à dinâmica acentuada do sistema deltaico na baía de Guaratuba que afeta o ciclo de ondas em Matinhos.

A praia central de Matinhos passou por reformas na infraestrutura costeira durante a década de 1930, onde foram construídos enrocamentos para proteger as edificações localizadas à beira mar. Nos anos seguintes, a faixa de areia cresceu e decresceu de forma intermitente, até que na década de 1980 o processo de erosão atingiu seu ápice devido aos intensos fenômenos hidrodinâmicos. As praias dos balneários Flórida e Riviera também vinham sofrendo as mazelas da erosão, porém nestes locais as causas do problema situavam na construção de infraestrutura pública próximo a linha costeira e o transporte deficitário de sedimentos no sentido

sul-norte que provocou o esvaziamento de areia das praias (INSTITUTO ÁGUA E TERRA, 2021a).

Para remediar esse processo erosivo histórico, decorrente da combinação das ações das ondas e do desequilíbrio no fluxo de sedimentos rente à costa foram implantados os serviços descritos adiante.

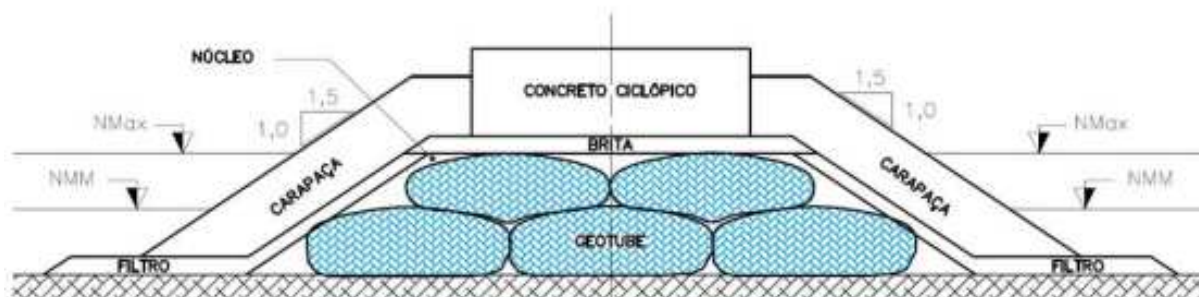
4.4.1.2 Estruturas semirrígidas: geotubos, maciços de rocha e concreto ciclópico

Esses são os modelos de estruturas implementados nos headlands dos balneários Flórida e Riviera, nos guias correntes da Avenida Paraná e Rio Matinhos, como também no espigão construído na Praia Brava.

Esse tipo de estrutura é formado por geotubos preenchidos com areia, posicionados no núcleo central e a armadura superior é constituída de brita, enrocamento, concreto ciclópico, tetrápodes e camadas de filtro.

A Figura 26 apresenta o perfil das estruturas semirrígidas com núcleo de geossintéticos:

Figura 26 - Perfil das estruturas semirrígidas com núcleo de geossintéticos



Fonte: Instituto Água e Terra, 2021

A Figura 27 mostra exemplo da construção de uma carapaça de enrocamento conjugada com tetrápodes:

Figura 27 - Carapaça de enrocamento e tetrápodes



Fonte: Instituto Água e Terra, 2021

Via de regra, as estruturas semirrígidas são construídas antecipadamente ao engordamento da praia para assegurar a eficiência do serviço de alimentação artificial e evitar que as obras fiquem assentadas em camadas de areia pouco resistentes e suscetíveis à erosão, diminuindo assim, a chance de recalques e possível colapso das estruturas (INSTITUTO ÁGUA E TERRA, 2021a).

4.4.1.3 Engordamento artificial da faixa de areia

Segundo relatório do Instituto Água e Terra, essa técnica foi utilizada para recuperar a extensão da faixa costeira através da reposição de um grande volume de sedimentos extraídos de uma jazida submersa próxima à costa. O cálculo de projeto previu o aporte de 2,7 milhões m³ de areia para o engordamento, no intuito de estender a largura da praia em mais de 100 metros ao longo de 5,75 km de costa, com a exceção de um pequeno trecho que conta com um avanço de 30 metros.

A Figura 28 apresenta a localização da jazida submarina para a dragagem de areia:

Figura 28 - Localização da jazida submarina escolhida para dragagem



Fonte: Aquamodelo, 2021

4.4.1.4 *Proteção costeira com geobags*

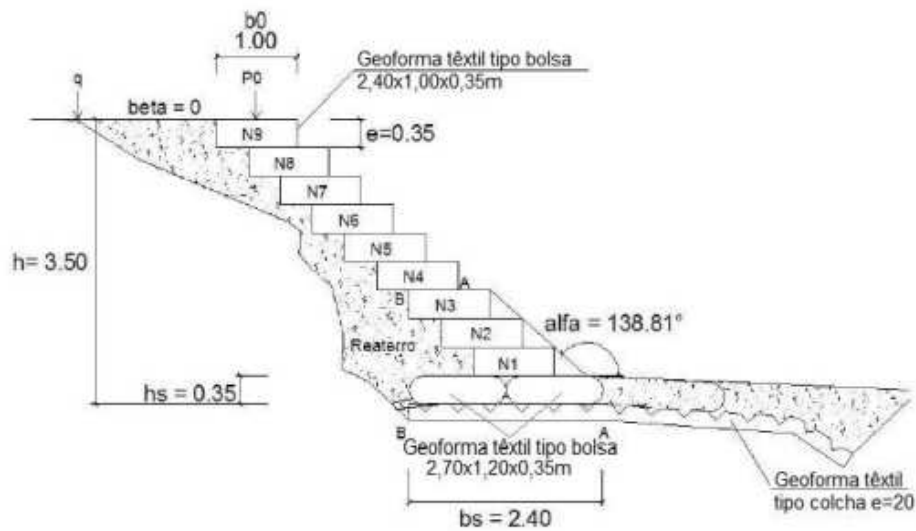
A utilização de geobags para proteção costeira foi a solução ideal para os trechos da orla de Matinhos que eram suscetíveis à ação severa das ressacas, que provocavam danos à infraestrutura urbana e colocavam em risco a segurança dos pedestres.

Essas bolsas foram instaladas em segmentos específicos da orla, visto que em certas regiões já existia a presença de vegetação nativa e enrocamento que formavam sistemas de proteção

Os trechos protegidos pelas geobags situam-se na Praia Brava, Avenida Paraná e ao redor da foz do Rio Matinhos (INSTITUTO ÁGUA E TERRA, 2021a).

A Figura 29 mostra o perfil dos taludes costeiros após a fase de engorda e implantação das geobags:

Figura 29 - Perfil de talude com geobags



Fonte: Aquamodelo, 2021

4.5 DADOS DE PROJETO: ESTRUTURAS SEMIRRÍGIDAS

4.5.1 Conceitos iniciais

Para a implementação das estruturas semi rígidas na orla de Matinhos foi necessário a determinação da onda de projeto, cotas de coroamento, seleção dos materiais construtivos e dimensionamento dos blocos de rocha e geotubos.

4.5.2 Método de enrocamento

O espigão, os guias correntes e os headlands projetados para a costa de Matinhos são estruturas submetidas ao impacto das ondas, logo é necessário a escolha de materiais resistentes para constituir sua carapaça rígida. Os componentes mais comuns neste tipo de obra são os blocos de rocha, já que possuem baixo custo, boa resistência mecânica e grande disponibilidade visto que são extraídos de pedreiras próximas ao local da obra. Pelo prisma técnico, a escolha de rochas para o enrocamento deve estar atrelada ao peso dos maciços e suas dimensões, já que estas grandezas influenciam na metodologia construtiva empregada e nas espessuras das camadas da estrutura semirrígida (AQUAMODELO, 2021).

4.5.2.1 Determinação do peso dos blocos

A determinação do peso dos blocos de rochas usados na carapaça das estruturas foi feita pela fórmula do SPM - Shore Protection Manual, como mostra a Equação 5:

$$W = \frac{\gamma.Hs^3}{KD.\left(\frac{\rho_r}{\rho_a}-1\right)^3.\cot g a} \quad (5)$$

Em que:

- W é o peso dos blocos da carapaça;
- Hs é a altura da onda de projeto;
- γ é o peso específico do bloco de rocha;
- ρ_r é a massa específica do bloco de rocha;
- ρ_a é a massa específica da água do mar;
- KD é o coeficiente de intertravamento da carapaça;
- $\cot g a$, onde a é a inclinação do talude.

As alturas das ondas de projeto foram obtidas de um banco de dados com uma série temporal de 60 anos, que representam de forma fidedigna o regime hidrodinâmico do litoral de Matinhos. As alturas de onda adotadas foram diferentes para cada estrutura, sendo que o valor máximo de 5,3 metros se deu na porção sul do Canal de Matinhos onde o guia-corrente é assentado em uma profundidade mais elevada (AQUAMODELO, 2021).

Nas regiões das estruturas onde o peso dos blocos se mostrou exorbitante, optou-se pelo uso de uma solução alternativa com tetrápodes, que se caracterizam por serem peças de concreto simples com quatro pontas e alta capacidade de intertravamento, cuja função é diminuir o peso da carapaça e estabilizar as rochas.

4.5.2.2 Blocos nas camadas de filtro

Segundo Aquamodelo (2021), para a determinação do peso dos blocos de rocha utilizados nos segmentos de filtragem, se estipulou que estes deveriam ter

10% do peso dos blocos constituintes da carapaça de enrocamento. Em relação às espessuras das camadas de filtro, deve haver espaço para inserir dois blocos de rocha no segmento mais distante da praia e na porção mais próxima ao mar, a espessura deve ser de um bloco apenas.

4.5.3 Verificação de possibilidade de galgamentos

Para atestar a possibilidade de sobreposição das águas às estruturas semi rígidas foram calculadas as taxas médias de galgamento para cada obra utilizando parâmetros como altura significativa de ondas, ângulo de ataque, nível d' água máximo, cota de coroamento das estruturas, coeficientes de rugosidade dos materiais constituintes e ação da gravidade (AQUAMODELO, 2021).

Os valores previstos de taxa média de galgamento para as estruturas semi rígidas estão apresentados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Projeção da taxa média de galgamento para as estruturas

Galgamento	Estrutura						
	Avenida Paraná		Praia Brava	Canal Matinhos		Riviera	Flórida
	Norte	Sul		Norte	Sul		
q (l/s/m)	0,00	0,85	0,37	6,15	6,15	0,24	0,24

Fonte: Adaptado de Aquamodelo, 2021

É possível aferir que os galgamentos mais acentuados tendem a acontecer nas estruturas dos guias correntes no Canal de Matinhos, com a possibilidade de solapamento da carapaça por ondas em situações de mar revolto.

4.5.4 Núcleo da estrutura: geotubos têxteis de alta densidade

Os geotubos têxteis de alta densidade incorporam o núcleo flexível das estruturas construídas em Matinhos. Nos capítulos seguintes são mencionadas as características gerais de projeto, com a descrição dos aspectos técnicos dos geossintéticos, especificações do polímero constituinte e o método de dimensionamento.

4.5.4.1 Características gerais de projeto

O projeto das estruturas semi rígidas utiliza a combinação de elementos flexíveis e rígidos. Este modelo híbrido propicia uma redução no tempo de execução da obra, otimização na logística dos equipamentos e materiais, economia no custo final, mitigação dos danos ambientais e viabilidade técnica ao empreendimento.

Na fase de implantação, foram utilizados geotubos com alturas máximas de 2 metros, estocados de baixo para cima em formato piramidal. Esses materiais foram posicionados na cota mais rasa correspondente ao fundo do mar e escalonados até a cota máxima especificada no projeto. Sendo assim, a altura da seção transversal de cada obra variou conforme a profundidade de assentamento (AQUAMODELO, 2021).

4.5.4.2 Aspectos técnicos dos geotubos

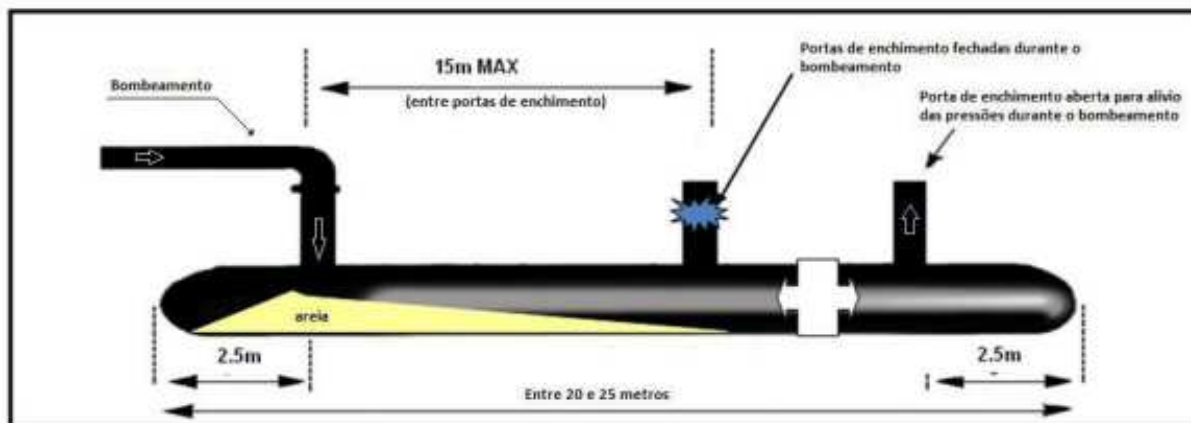
Os geotêxteis que constituem o núcleo dessas estruturas marítimas são tubos de grande comprimento com revestimento a base de polipropileno de alta resistência e fabricados de forma personalizada para atender a esse tipo de obra, sendo que as costuras do tecido e as junções foram desenvolvidas sob cuidados especiais para permitir o desempenho máximo do material e evitar infiltrações (AQUAMODELO, 2021).

O funcionamento desse material acontece pelo enchimento de água e areia pela tubulação de bombeamento. A água então atinge o revestimento poroso e é expelida para fora do sistema, permanecendo apenas o sedimento arenoso confinado dentro do tubo.

Os Titan Tubes, modelos de geotubos instalados nas obras de Matinhos, possuem circunferências de 13,7 metros, comprimentos práticos de 10 á 20 metros e volumes unitários que podem ultrapassar 200 m³.

A Figura 30 mostra a seção longitudinal padrão dos geotubos com seus componentes e dimensões:

Figura 30 - Perfil longitudinal de geotubo



Fonte: Aquamodelo, 2021

4.5.4.3 Método de dimensionamento dos geotubos

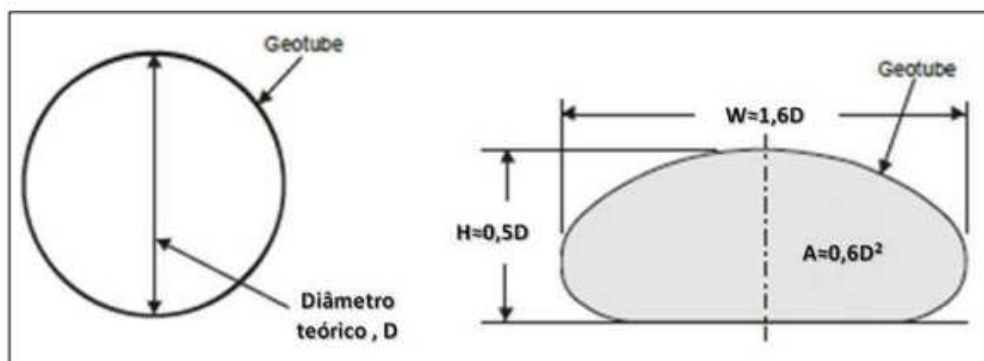
O processo de dimensionamento dos geotubos para as obras semi rígidas em Matinhos considerou parâmetros geométricos, geotécnicos, mecânicos e hidráulicos para sua aplicabilidade:

4.5.4.3.1 Parâmetros geométricos

De acordo com Aquamodelo (2021), o formato dos geotubos está atrelado aos esforços internos e externos aos quais estão submetidos, grau de deformação do revestimento sintético, velocidade de enchimento, características do material sedimentar bombeado e processo de adensamento. O uso de software específico de modelagem simplificou todas essas variáveis com a criação de protótipos de geotubos achatados através de um elemento genérico de seção circular.

A Figura 31 apresenta as dimensões obtidas para os geotubos a partir do diâmetro teórico no software Simulator:

Figura 31 - Dimensionamento de protótipo por software



Fonte: Aquamodelo,2021

Através desses dados de entrada foi possível dimensionar os geotubos volumes satisfatórios para atender os problemas de erosão marinha em Matinhos.

A Figura 32 mostra o dimensionamento de protótipo feito por um fabricante de geotêxtil que utiliza formulações próprias para o cálculo de volumes:

Figura 32 - Exemplo de dimensionamento de protótipos de geotubos

Units:	Metric		Circumferential Tensile Force (T) =	17,72	kN/m
Water Level:	Fully Emerged		Geotube® Base Contact Width (B) =	4,78	m
Geotube® Height (H) =	2	m	Geotube® Filled Width (W) =	5,86	m
Geotube® Circumference (C) =	13,7	m	Geotube® Cross Section Area (A) =	10,10	sq m
Specific Gravity of Fill Material (SGint) =	1,6	sg	Geotube® Volume Per Unit of Length (V) =	10,10	cu m/m
Geotube® Fabric Type:	GT500		FS of Circumferential Failure =	5,0	FS
Geotube® Fabric Type:	Rigid Mechanical		Axial Direction FS (AFS) =	5,0	FS
			FS of Fill Port Failure =	4,5	FS

Fonte: Aquamodelo,2021

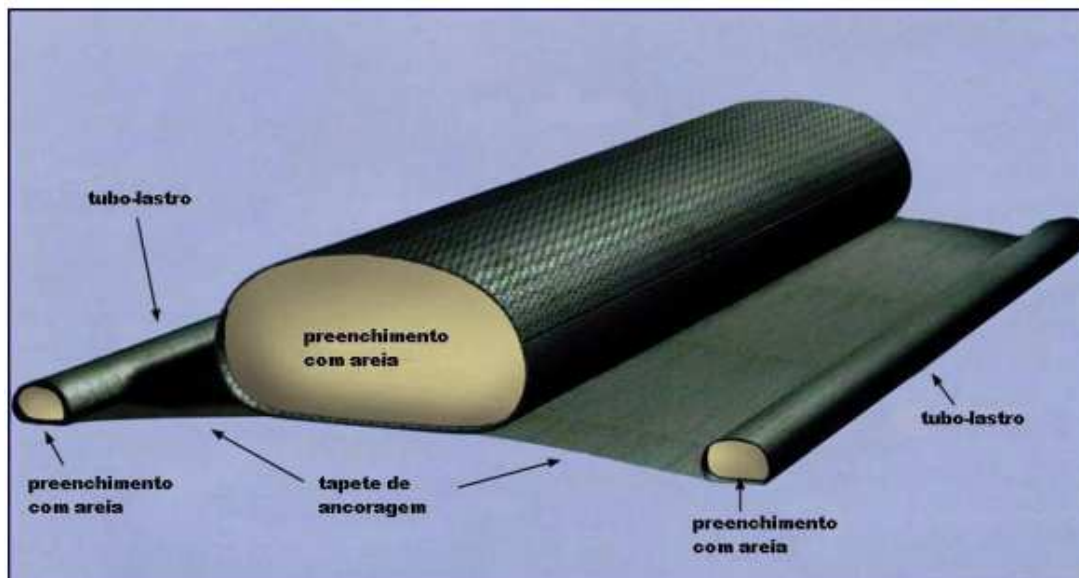
4.5.4.3.2 Parâmetros geotécnicos

Os geotubos de alta densidade são preenchidos com areia, um sedimento que fornece coesão interna e capacidade estrutural ao geossistema. Esse sistema submerso possui uma carga menor comparada às estruturas rígidas de concreto e são assentadas de modo mais distribuído no terreno de fundação.

No dimensionamento dos geotubos em Matinhos optou-se por um cálculo conservador, em que a estrutura é considerada emersa e com fator de segurança de 4,5 (AQUAMODELO, 2021). Para evitar fenômenos de solapamento do geossistema, perda de sedimentos devido a infra escavações e deslocamento

lateral dos geotubos durante o funcionamento, foram instalados tapetes de ancoragem nas regiões adjacentes, conforme representação ilustrada na Figura 33:

Figura 33 - Tapetes de ancoragem



Fonte: Aquamodelo, 2021

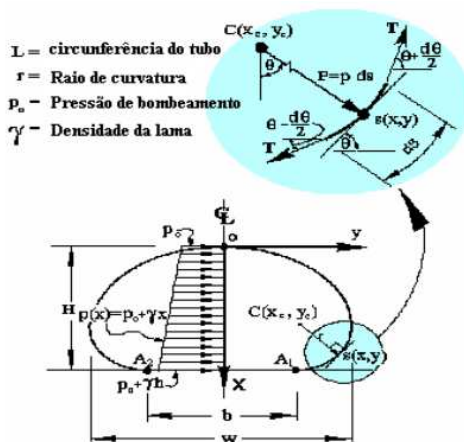
4.5.4.3.3 Parâmetros mecânicos e hidráulicos

Os geotubos instalados nas obras de Matinhos são constituídos por um tecido resistente de polipropileno desenvolvido pela empresa Flint. Esse revestimento é especificamente produzido para obras deste tipo, devendo suportar os esforços mecânicos durante a fase de bombeamento, degradação a longo prazo e aos impactos de ondas. No momento em que a água bombeada é drenada para fora do geotêxtil, as tensões internas no tubo se dissipam e a areia compacta serve como um alicerce de suporte para a sobreposição dos outros geotubos.

As elevadas resistências longitudinal e transversal do tecido garantem o dimensionamento com boa margem de segurança. A resistência à tração foi obtida por cálculo diferencial em software, cujo valor de output é comparado com as propriedades do tecido para se atestar a compatibilidade. O cálculo de resistência a tração no geotubo é feito levando-se em consideração grandezas como pressão de bombeamento, raio de curvatura e diâmetro dos elementos (AQUAMODELO, 2021).

A Figura 34 apresenta os parâmetros considerados no cálculo de tração:

Figura 34 - Parâmetros para cálculo dos esforços de tração nos geotubos



Fonte: Aquamodelo, 2021

Para evitar danos por puncionamento no núcleo flexível, instalou-se geotêxteis de proteção no momento anterior ao posicionamento das rochas. No que se refere a capacidade hidráulica, os geotubos foram projetados para reter os sedimentos de areia no seu interior e possibilitar a drenagem rápida de água através dos poros (AQUAMODELO, 2021).

Cabe ressaltar que o tecido de propileno especial é formado por camadas poliméricas entrelaçadas capazes de resistir ao ataque de agentes químicos, degradação biológica e solicitações mecânicas.

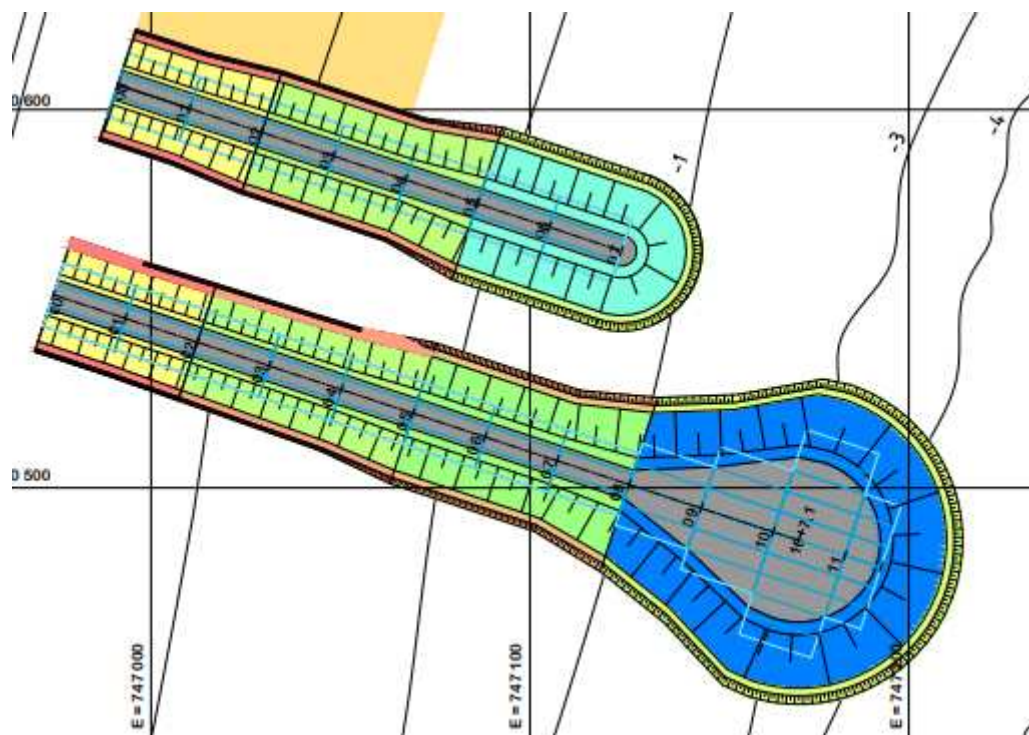
4.6 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS ESTRUTURAS SEMI RÍGIDAS

4.6.1 Guias Correntes da Avenida Paraná

Esses guias correntes representam as estruturas construídas nas regiões norte e sul da Avenida Paraná. A obra da porção sul apresenta 207 metros de extensão de corpo com o segmento final em formato de promontório. Já a obra da zona norte tem 161 metros de tronco e o trecho final é levemente arredondado. As cotas de coroamento das estruturas são de 8,00 e 6,20 metros respectivamente. Os guias correntes foram projetados para auxiliar na estabilidade do canal da Avenida Paraná com o intuito de evitar assoreamentos na área de desembocadura do rio (AQUAMODELO, 2021).

A Figura 35 mostra a planta baixa dos guias correntes da Avenida Paraná:

Figura 35 - Planta dos guias-correntes da Avenida Paraná



Fonte: Aquamodelo, 2020

Os volumes de rocha, concreto, tetrápodes e geotubos previstos nesta construção são apresentados nas Tabelas 2 e 3 logo abaixo. As designações com letras simbolizam rochas de pesos diferentes.

Tabela 2 - Quantitativo estimado de materiais para estrutura do lado sul da Av. Paraná

Tipo	Total (m³)
A	726
B	2.073
C	3.935
D	1.796
E	10.653
G	3.220
H	4.726
K	1.723
L	9.491
Concreto Ciclópico	9.862
Tetrápode tipo 2	11.318
Geoforma Têxtil	26.620

Fonte: Aquamodelo, 2021

Tabela 3 - Quantitativo estimado de materiais para estrutura do lado norte da Av. Paraná

Tipo	Total (m³)
A	629
B	1860
C	1084
F	3391
G	3223
J	5176
K	926
L	2350
Concreto Ciclópico	2.273
Geoforma Têxtil	10.070

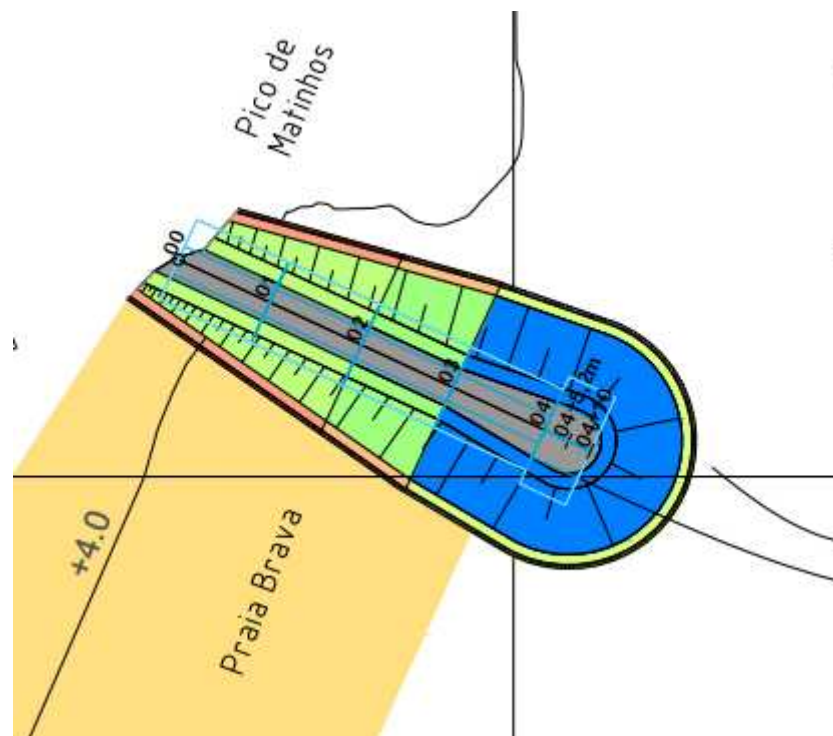
Fonte: Aquamodelo, 2021

4.6.2 Espigão da Praia Brava

Para assegurar a eficiência da alimentação artificial realizada no trecho norte da Praia Brava, foi construído um espigão de pequeno porte. Essa estrutura tem como função manter a extensão da faixa de areia após a engorda. O corpo da obra possui 85 metros de comprimento, o trecho final apresenta diâmetro de 50 metros em formato de cabeça e a cota de coroamento da estrutura é de 5,85 metros (AQUAMODELO, 2021).

A Figura 36 mostra a planta baixa do espigão da Praia Brava:

Figura 36 - Planta do espigão da Praia Brava



Fonte: Aquamodelo, 2020

Os volumes de rocha, concreto, tetrápodes e geotubos previstos nesta construção são apresentados na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 - Quantitativo estimado de materiais para a obra do espigão de Praia Brava

Tipo	Total (m³)
B	1.159
C	931
D	788
E	1.749
F	1.624
G	2.014
H	1.668
K	674
L	2.406
Concreto Ciclópico	2.252
Tetrápode tipo 1	4.158
Geoforma Têxtil	7.513

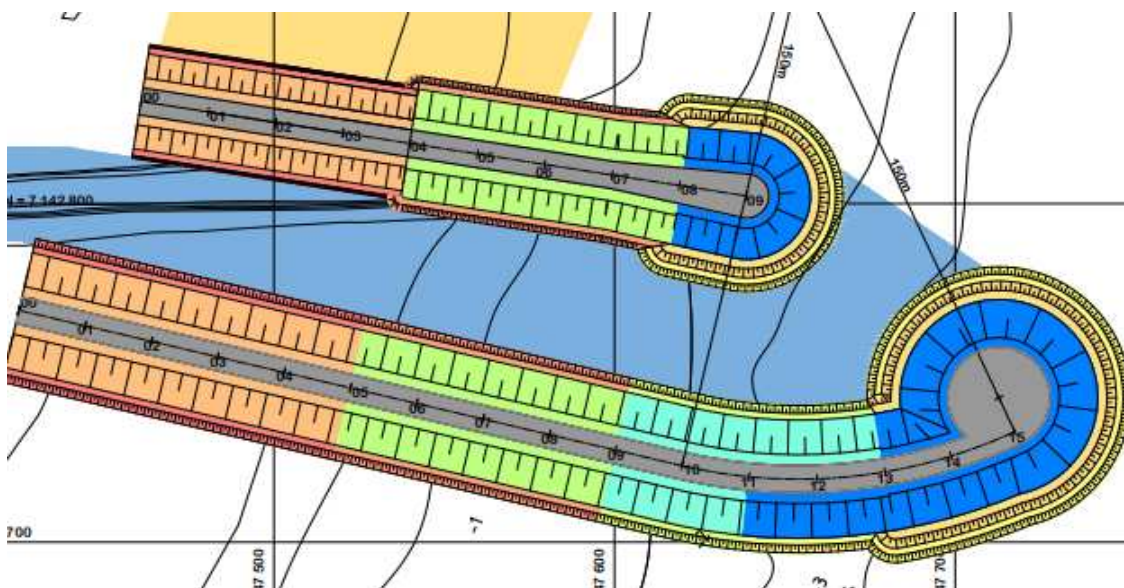
Fonte: Aquamodelo, 2021

4.6.3 Guias Correntes da Praia de Matinhos

Para proteger a linha costeira da Praia de Matinhos foram projetados um par de guias correntes. A obra da porção sul foi construída na direção perpendicular à praia e conta com um trecho reto de 200 metros, um trecho curvo de 100 metros e termina com uma região circular de 77 metros de raio. O guia corrente da região norte conta apenas com um trecho reto de 180 metros e termina com um cabeço de 26 metros de raio, sendo que a cota de coroamento das duas obras são iguais a 6,40 metros. Estas estruturas marítimas têm por finalidade assegurar a estabilidade costeira em volta da área de desembocadura do Rio Matinhos, mitigando o processo de erosão na área e otimizando o sistema de drenagem (AQUAMODELO, 2021).

A Figura 37 mostra a planta baixa dos guias correntes do Canal de Matinhos:

Figura 37 - Planta dos guias-correntes do canal de Matinhos



Fonte: Aquamodelo, 2020

Os volumes de rocha, concreto, tetrápodes e geotubos previstos nestas construções são apresentados nas Tabela 5 e 6 logo abaixo:

Tabela 5 - Quantitativo estimado de materiais para estrutura do lado sul do Canal de Matinhos

Tipo	Total (m³)
A	1536
B	2482
C	3118
D	983
E	9479
F	3465
G	4615
L	5867
Concreto Ciclópico	7276
Tetrápode tipo 1	2134
Tetrápode tipo 3	9606
Geoforma Têxtil	21.131

Fonte: Aquamodelo, 2021

Tabela 6 - Quantitativo estimado de materiais para estrutura do lado norte do Canal de Matinhos

Tipo	Total (m³)
A	922
B	2481
C	1871
D	219
E	3158
F	0
G	4617
J	0
K	0
L	0
Concreto Ciclópico	3.216
Tetrápode tipo 1	3074
Geoforma Têxtil	21.335

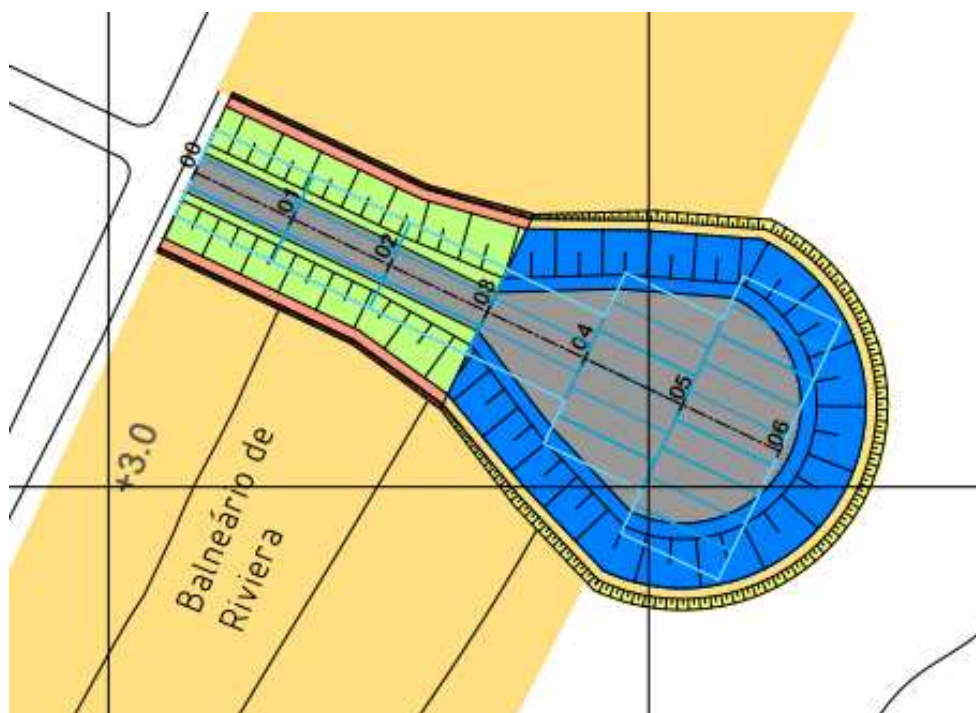
Fonte: Aquamodelo, 2021

4.6.4 Headland Balneário Riviera

A estrutura costeira construída no balneário Riviera possui trecho principal de 100 metros e termina com o headland em formato circular com 38 metros de raio, sendo que a cota de coroamento da obra é de 5,50 metros. A obra tem por finalidade auxiliar na estabilidade de sedimentos na praia, a fim de evitar danos severos em caso de erosão da praia. Este headland foi projetado após o engordamento da faixa de areia para permitir o fluxo livre de sedimentos no litoral, todavia se ocorrer um recuo na extensão da linha de praia, o headland deve servir como uma estrutura fixa para conservar a areia no local (AQUAMODELO,2021).

A Figura 38 mostra a planta baixa do headland balneário Riviera:

Figura 38 - Planta do headland balneário Riviera



Fonte: Aquamodelo, 2020

Os volumes de rocha, concreto, tetrápodes e geotubos previstos nesta construção são apresentados na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7 - Quantitativo estimado de materiais para a obra do headland Riviera

Tipo	Total (m ³)
B	1729
G	3020
K	1633
L	3584
Tetrápode tipo 1	7314
Concreto Ciclópico	6620
Geoforma Têxtil	16.535

Fonte: Aquamodelo, 2021

4.6.5 Headland Balneário Flórida

A construção do headland no balneário Flórida foi projetada para conter o volume de areia no local e auxiliar na estabilidade costeira caso haja um fenômeno grave de erosão (AQUAMODELO, 2021).

Esta obra possui dimensões e consumo de materiais idênticos ao headland construído no balneário Riviera.

A Figura 39 mostra a planta baixa do headland balneário Flórida:

Figura 39 - Planta do headland balneário Flórida



Fonte: Aquamodelo, 2020

Os volumes de rocha, concreto, tetrápodes e geotubos previstos nesta construção são apresentados na Tabela 8 a seguir:

Tabela 8 - Quantitativo estimado de materiais para a obra do headland Flórida

Tipo	Total (m³)
B	1729
G	3020
K	1633
L	3584
Tetrápode tipo I	7314
Concreto Ciclópico	6620
Geoforma Têxtil	16.535

Fonte: Aquamodelo,2021

Em termos absolutos, a estimativa do consumo total de geotubos nas estruturas semirrígidas é próximo a 120.000 m³, com mais de 500 unidades instaladas.

4.7 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ENGORDAMENTO ARTIFICIAL

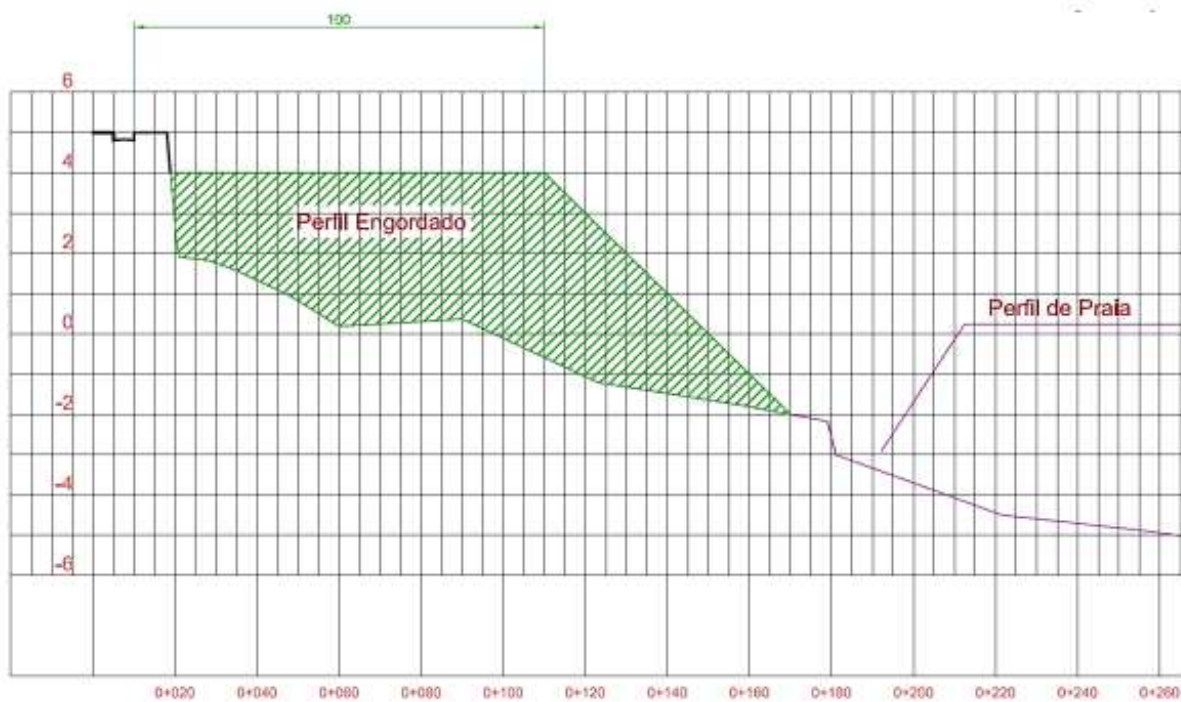
Para realizar a alimentação artificial de areia da faixa costeira em Matinhos foi previsto um grande aporte de sedimentos, que aumentou o trecho inicial da praia em 100 metros ao longo de toda costa, exceto em uma região intermediária situada entre o pontal e os guias-correntes da praia de Matinhos, que teve um avanço de 30 metros. Essa redução se deve ao pequeno comprimento da área e visa garantir condições de prática de atividades recreativas no local.

O trecho que compreende o começo da Praia Brava até os guias-correntes da Avenida Paraná foi o único que não recebeu alimentação artificial de areia, pois a faixa de costa possui uma extensão satisfatória.

A eficácia do engordamento requer tempo de estudo, pois depende de fatores oscilantes como os ciclos de ondas atuantes e a taxa de transporte de sedimentos no litoral (AQUAMODELO, 2021).

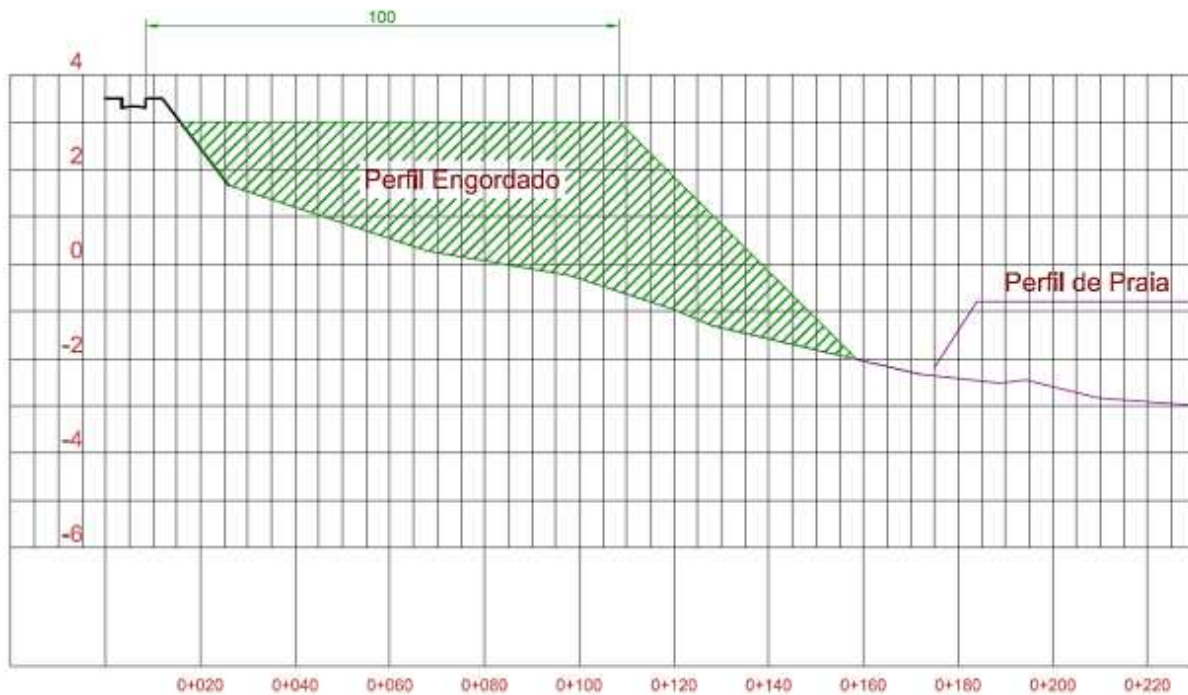
As Figuras 40 e 41 mostram as projeções dos perfis dos trechos 1 e 3 da praia após a engorda:

Figura 40 - Seção do perfil de engordamento da praia para trecho 1 de 100 metros



Fonte: Aquamodelo,2021

Figura 41 - Seção do perfil de engordamento da praia para trecho 3 de 100 metros



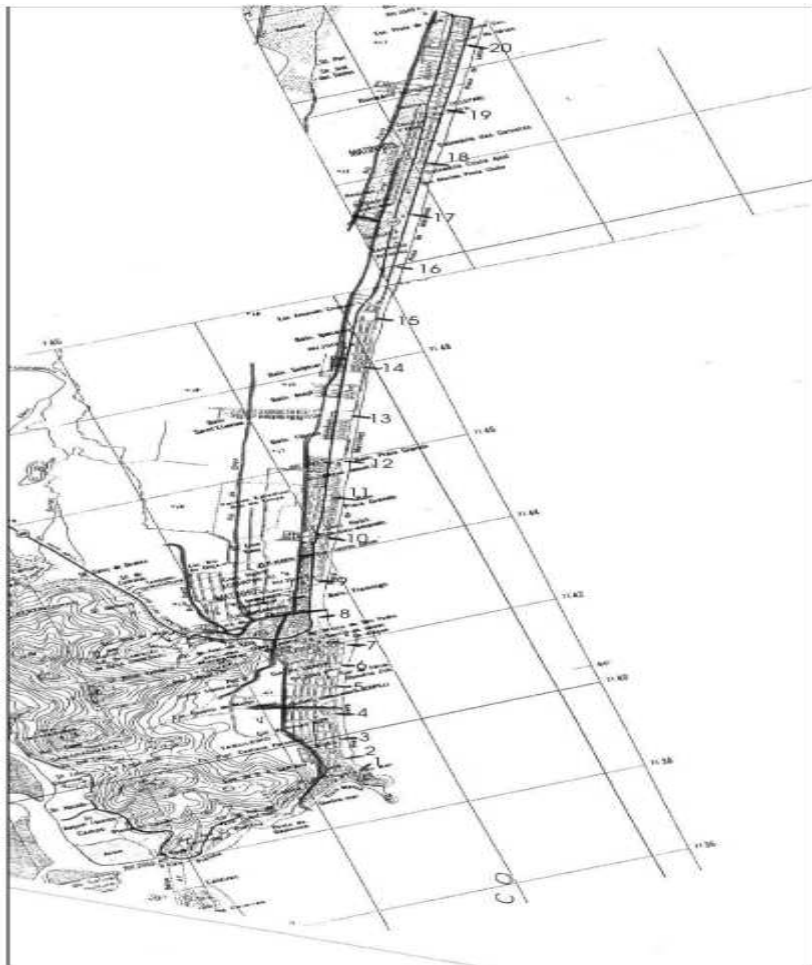
Fonte: Aquamodelo,2021

4.7.1 Características gerais dos sedimentos e mecanismo de avanço da praia

De acordo com Aquamodelo (2021), para caracterizar os sedimentos que compõem as praias de Matinhos foi feito um levantamento qualitativo da área, separando-a em 20 seções ao decorrer de toda a costa. De maneira genérica, os resultados indicaram que as praias de Matinhos são formadas por areia média com granulometrias que variam entre 0,2 a 0,3 mm.

Para efetuar o engordamento da praia, foi proposto a captura de material de empréstimo de uma jazida submarina localizada em frente às praias, com uma distância próxima a 4 km da costa terrestre. Na etapa seguinte, foram coletadas 220 amostras de sedimentos das camadas da jazida, com boa predominância de areia média e diâmetros compatíveis com a areia natural exposta na faixa costeira. A Figura 42 mostra a divisão de seções para o estudo das amostras:

Figura 42 - Divisão de seções da praia de Matinhos



Fonte: Aquamodelo, 2021

A Tabela 9 apresenta os diâmetros médios dos sedimentos encontrados para cada seção de costa:

Tabela 9 - Diâmetros médios dos sedimentos por seção da praia

Seção	Diâmetro médio (mm)	Seção	Diâmetro médio (mm)
1	0,211	11	0,186
2	0,211	12	0,230
3	0,197	13	0,240
4	0,202	14	0,243
5	0,197	15	0,244
6	0,277	16	0,260
7	0,210	17	0,321
8	0,174	18	0,276
9	0,197	19	0,275
10	0,188	20	0,290

Fonte: Aquamodelo, 2021

Os sedimentos dragados foram depositados nos trechos da praia para a prática do engordamento, cuja efetividade depende das ações conjuntas e deletérias das ondas e marés, assim espera-se que o avanço residual da faixa de areia após o término do serviço fique inferior a extensão deixada pelo engordamento.

Para prever o comportamento do avanço da praia após a execução do engordamento considerou-se variáveis como o ataque frontal das ondas, transporte transversal de sedimentos, volume de areia depositado, granulometria do material, zonas de arrebenção e altura da berma de praia (AQUAMODELO, 2021).

4.7.2 Mecanismo de transporte de sedimentos

As ondas que atingem a praia têm boa parte de sua energia dissipada através do transporte de sedimentos, que pode ocorrer na direção perpendicular e paralela à linha costeira. O transporte perpendicular é vinculado à mudança de perfil de terreno na praia, onde é possível observar uma faixa de areia mais larga em períodos de estabilidade climática e uma faixa de areia mais fina na ocorrência de intempéries. Já o transporte paralelo de sedimentos é resultado da arrebentação de ondas que formam correntes longitudinais à praia, causando o deslocamento acentuado de sedimentos nessa direção.

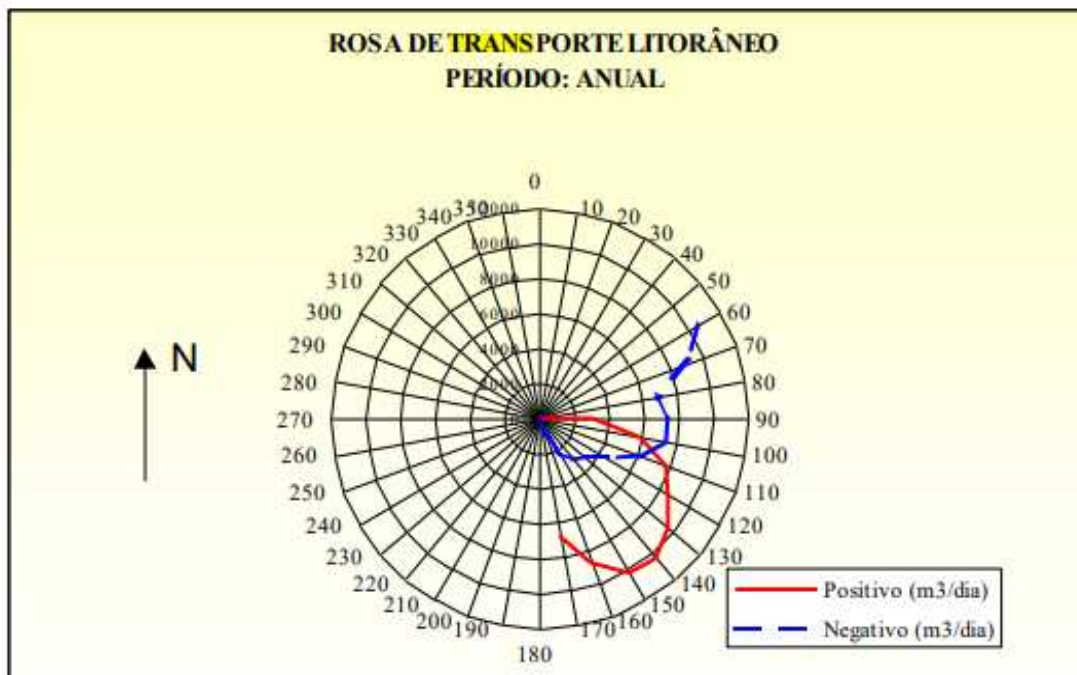
No caso de Matinhos, onde foram construídas estruturas perpendiculares e feito engordamento para retenção de sedimentos, o transporte paralelo à costa é o modelo de interesse. O sentido de deslocamento dos sedimentos é determinado pela direção de incidência das ondas e a estimativa da capacidade de transporte pode ser obtida relacionando as características geológicas da praia, altura das ondas e seu ângulo de impacto (AQUAMODELO, 2021).

Os dados do transporte de sedimentos ao longo do ano são demonstrados pelas Rosas de Transporte Litorâneo, uma ferramenta ilustrativa e de fácil visualização que apresenta a direção e a intensidade do transporte de areia. O deslocamento positivo representa o transporte à direita de um observador situado de frente à praia e o deslocamento negativo traduz o transporte à esquerda.

Tal separação é importante para prever fenômenos de assoreamento em canais de acesso e a possível necessidade de transpasse artificial de sedimentos. Este método pode ser utilizado para atestar a estabilidade de uma praia após a fase de engordamento artificial através da capacidade de regeneração da linha de costa.

A Figura 43 mostra dados dos deslocamentos anuais de sedimentos no litoral de Matinhos:

Figura 43 - Transporte anual positivo e negativo de sedimentos em Matinhos



Fonte: Aquamodelo, 2021

De acordo com os estudos preliminares, verificou-se uma tendência de transporte residual de sedimentos da direção sul para o norte que promove acúmulos e defasagens de areia em regiões da praia de Matinhos (AQUAMODELO, 2021).

Para evitar o problema de assoreamento nos canais, é previsto intervenções de transpasse artificial de sedimentos com equipamentos mecânicos após a engorda. Esse método de serviço é o mais indicado para movimentação de volumes pequenos de sedimentos por ser simples e de baixo custo.

4.8 METODOLOGIA CONSTRUTIVA DAS OBRAS SEMIRRÍGIDAS E FLEXÍVEIS

4.8.1 Construção dos enrocamentos

Os blocos de rocha selecionados para a construção dos enrocamentos tiveram que passar por um controle de qualidade, onde foi verificada as propriedades mecânicas, o formato e as dimensões das pedras para atender as demandas do projeto. Os blocos de rocha deveriam apresentar baixo índice de vazios e não conter fissuras, já que poderia resultar na fratura do material durante as fases de transporte, manuseamento na obra ou funcionamento. Os pesos específicos das rochas foram definidos com tolerância máxima de 15% para cima ou para baixo e o índice de absorção de água ficou menor que 4% .

Os tetrápodes foram fabricados a partir de concreto simples com resistência à compressão mínima de 40 MPa e com três pesos específicos diferentes. Para realizar o içamento dos tetrápodes e evitar danos provenientes de queda e corrosão, foram usados guindastes acoplados com barras de aço inseridas em furos nas pernas das peças (AQUAMODELO, 2021).

4.8.1.1 Sequência de construção

Antes de construir o enrocamento, foram instalados os geotubos de alta densidade para a formação do núcleo das estruturas e somente depois os blocos de rocha foram posicionados, intercalando pedras de dimensões diferentes conforme a proporção descrita no projeto.

Para preservar a segurança do núcleo de geossintéticos contra o impacto das ondas, foram colocadas camadas de filtro na face superior do sistema após sua imersão parcial. A sobreposição dos geotubos foi feita com guindastes de esteiras e supervisionado por mergulhadores posicionados no fundo do mar.

Os blocos de rocha foram transportados das pedreiras para a obra através de caminhões basculantes e a carapaça de enrocamento foi assentada sobre a camada filtrante para formar a armadura rígida do geossistema.

Os tetrápodes foram feitos em canteiros de obra situados próximo a praia e estocados no próprio terreno para realizar o processo de cura e atingir a resistência requerida no projeto. No processo de instalação, essas peças foram dispostas sobre

o corpo do talude de enrocamento com auxílio de operadores. A Figura 44 mostra o processo final de construção de uma estrutura semi rígida em Matinhos:

Figura 44 - Processo final de construção da carapaça rígida em Matinhos



Fonte: Dang Construtora,2023

A lista de equipamentos utilizados nessas operações incluiu guindastes sobre esteira, guindaste sobre rodas, pá carregadeira e caminhões basculantes para o transporte dos blocos de rocha.

4.8.2 Instalação dos geotubos

Para construir os núcleos de geotubos das estruturas costeiras foram analisadas condições do ambiente circundante à obra, magnitude do vento, vias de acessos, declividade do terreno, tamanho das ondas incidentes e seus intervalos de frequência (AQUAMODELO, 2021).

4.8.2.1 Sequência de instalação

Conforme especificado no projeto, os geotubos foram içados através de guindastes e instalados com o auxílio de treliça metálica submergida em água. O processo de construção dos núcleos com unidades de geotubos se iniciou com a seguinte sequência de atividades:

- Verificação das condições climáticas locais e da incidência de ondas;
- Inspeção do terreno de assentamento por mergulhadores;
- Determinação da cota de assentamento dos geotubos;
- Remoção de elementos indesejáveis no terreno;
- Instalação de equipamento de dragagem de areia e água para o bombeamento dos geotubos;
- Posicionamento dos guindastes para o içamento dos geotubos;
- Instalação dos tapetes de ancoragem e unidades de geotubos com treliça metálica até completar a seção transversal de projeto;
- Cobrimento da superfície do núcleo com geotêxtil especial e implantação de camadas de brita e concreto ciclópico.

Na etapa anterior à instalação, os geotubos foram armazenados em local seco e protegido dos raios solares. No que se refere ao setor logístico, o transporte dos geotubos para o local de obra é uma tarefa que requer cuidados e a quantidade de unidades transportadas precisou ser feita sob demanda diária para evitar o acúmulo de objetos no canteiro e obstrução da área livre de trabalho.

Na fase de instalação, as unidades de geotubos foram içadas e depois submersas no mar, onde o bombeamento de água e areia pelas aberturas geoports foi feito por equipamento de dragagem posicionado próximo a linha do mar. No início da operação de bombeamento, a razão areia/água começou extremamente baixa e à medida que os geotubos eram preenchidos, a proporção foi aumentada para garantir a produtividade do sistema. Após o enchimento completo e a fuga da água pelos poros, os geotubos ganharam solidez para formar um núcleo robusto e servir de sustentação às estruturas costeiras.

A Figura 45 mostra a operação de enchimento dos geotubos com material sedimentar e água:

Figura 45 - Enchimento dos geotubos por bombeamento hidráulico



Fonte: Dang Construtora,2023

Os equipamentos utilizados na instalação dos geotubos incluem pá carregadeira para o transporte das unidades geossintéticas, treliça metálica para o posicionamento dos geotubos, guindaste de longo alcance para o içamento da treliça metálica, máquina de dragagem, mangotes para bombeamento e embarcação de apoio.

Em relação à mão de obra empreendida, essa atividade foi composta por engenheiro responsável, supervisor geral, operadores, ajudantes de operação e equipe de mergulho e condutor de embarcação.

A Figura 46 mostra a operação de cobrimento do núcleo geossintético com camadas de britas e rochas:

Figura 46 - Cobrimento dos geotubos com rochas



Fonte: Dang Construtora,2023

4.8.3 Engordamento artificial

O processo de engordamento artificial das praias de Matinhos foi baseado em estudos dos perfis costeiros através da medição de cotas do terreno, dados batimétricos sobre a profundidade máxima da praia e levantamentos estatísticos sobre a incidência de ondas em alto mar e na zona rasa (AQUAMODELO, 2021).

4.8.3.1 Dados de batimetria e regime de ondas

Enquanto os dados batimétricos revelam o posicionamento adequado para a atracagem do maquinário de dragagem e minimizam as chances de encalhamento, os dados sobre as ondas fornecem sua mudança de comportamento quando passam de águas profundas para águas rasas.

Segundo relatório técnico Aquamodelo (2021), a batimetria adotada para o serviço de engordamento em Matinhos inclui dados de referência da carta náutica B1820 proposta por (DHN,1976) e do mapa batimétrico elaborado por (Lima,2008). Já as informações sobre ondas foram extraídas da agência americana

Environmental Modeling Center durante um período de 15 anos a uma cota marítima de 70 metros.

4.8.3.2 Serviço de dragagem

Para extrair o volume de areia estipulado em projeto foi solicitada a contratação de uma draga tecnologicamente moderna, autotransportadora e que opera por sucção e recalque. Esse equipamento é instalado em navios de carga com capacidade de armazenar os sedimentos em seus porões e que apresentam estabilidade à movimentação marítima. Em razão do relevo costeiro em Matinhos, foi preferível adotar draga do tipo hopper acoplada à embarcação. A Figura 47 mostra o modelo da draga usada na operação:

Figura 47 - Draga de sucção e recalque, Navio Galileo Galilei



Fonte: Saibajaneews, 2022

A draga posicionada acima da jazida submersa bombeia a areia para a faixa terrestre através de tubos flexíveis. O transporte de peças e mantimentos para o sistema de dragagem foi feito com embarcação de apoio dotada de mão de obra para cumprir as funções de manutenção, reboque, empurro e içamento dos tubos para engate e desengate.

Portanto, o serviço de alimentação artificial da praia de Matinhos foi projetado com as seguintes etapas: posicionamento do equipamento de dragagem acima da jazida submarina designada, extração de areia por meio de draga tipo hopper, armazenamento da areia no porão da embarcação até atingir o calado máximo, bombeamento da areia para o local de deposição e espalhamento final dos sedimentos na praia (AQUAMODELO, 2021).

A Figura 48 ilustra o processo de bombeamento dos sedimentos em Matinhos:

Figura 48 - Bombeamento da areia dragada para a área de deposição



Fonte: AEN,2022

Os equipamentos utilizados para o manejo da areia dragada na praia incluem escavadeiras, carregadeiras e tratores sobre esteira.

4.8.3.3 Duração das atividades e ciclos de dragagem

Conforme referido em projeto, a draga escolhida para a execução do trabalho possui capacidade de carregamento de 6000 m³ de areia por operação. Por se tratar de uma extração em jazida de sedimentos finos, foi aconselhado a draga atuar abaixo da sua capacidade máxima para evitar problemas com o transbordo de água.

A eficiência do serviço dependeu de fatores próprios dos sedimentos como o fator de empolamento dentro do porão de armazenamento, tal qual condicionantes naturais e antrópicos que incluem a perda de material devido a oscilação marítima, regime de ondas, manutenções nos equipamentos e o tempo gasto no acoplamento e desacoplamento da bomba de sucção na linha de recalque.

Na listagem abaixo são apresentados dados referentes às características do equipamento de dragagem, volume de areia captado, produtividade do serviço e estimativa do tempo total de trabalho (AQUAMODELO, 2021):

- Nome da draga: Galileo Galilei
- Capacidade por operação: 6000 m³
- Volume bruto a ser captado: 3.310.507 m³
- Estimativa de perdas locais: 20%
- Volume líquido a ser captado: 2.758.756 m³
- Fator de empolamento: 20%
- Tempo total do ciclo de dragagem: 332 minutos
- Volume de areia descarregado: 4845 m³
- Produtividade da dragagem: 875 m³/h
- Tempo de dragagem por semana: 134 horas
- Produtividade de dragagem por semana: 117.568 m³/semana
- Estimativa do tempo total de dragagem em dias: 223,5 dias
- Estimativa do tempo total de dragagem em meses: 7,5 meses

É importante ressaltar que houveram alterações no cronograma de atividades para os serviços de dragagem a fim de se otimizar tempo. O projeto executivo previa a construção de todas as estruturas semi rígidas de forma antecipada ao engordamento da praia para evitar a perda precoce de sedimentos e problemas com recalques.

Porém, esse processo foi flexibilizado e a engorda pôde ser feita depois da construção do espigão da Praia Brava e anteriormente às obras de guias correntes e headlands.

A decisão técnica fundamentou que a construção do espigão era o elemento condicional para um engordamento eficiente sem perdas consideráveis de sedimentos pela ação das marés e do vento.

A Figura 49 mostra o serviço de movimentação dos sedimentos depositados na praia:

Figura 49 - Serviço de movimentação de sedimentos após alimentação artificial



Fonte: Dang Construtora,2022

Após a fase de movimentação de sedimentos, parte da areia sobressalente depositada na praia foi usada no reaterro de taludes para proteção costeira com geobags.

4.8.4 Proteção costeira com geobags

Segundo relatório do Instituto Água e Terra (2021b), a proteção costeira com geobags foi executada em três trechos da orla de Matinhos, cobrindo uma extensão de 2,5 km em território. O primeiro trecho compreende a Avenida Paraná, o segundo trecho fica situado entre a Ponta das Pedras e o Canal do Rio Matinhos e o terceiro se estende pela Avenida Brasil.

O cálculo de estabilidade dos taludes protegidos com geobags foram condicionados aos parâmetros geotécnicos do solo, resistência da argamassa de enchimento e verificação de segurança a escorregamento e tombamento.

A Figura 50 mostra os trechos da orla de Matinhos atendidos pelas obras de proteção costeira em linhas tracejadas:

Figura 50 - Trechos atendidos pela obra de proteção costeira



Fonte: Instituto Água e Terra, 2021

4.8.4.1 Sequência de instalação das geobags

O primeiro serviço a ser executado foi a limpeza do terreno com a remoção de vegetação nativa que dificultava o andamento da obra e seu correto descarte em áreas de bota-fora. Para atestar o posicionamento das geobags na faixa de areia foi efetuado serviço de locação conforme as diretrizes do projeto e em seguida foi executada escavação mecânica no terreno até atingir a cota de assentamento determinada.

O revestimento de fundo foi feito com material geotêxtil do tipo colcha e o sistema de contenção foi executado empregando-se bolsas geossintéticas com dimensões variadas, sendo que todos esses componentes foram preenchidos com argamassa específica através de bombeamento por mangotes. O tecido das geobags é formado por polipropileno drenante com tecnologia unifluxo, isto significa que a água presente no interior é expelida para o ambiente externo sem a fuga de componentes da argamassa.

As geobags foram moldadas e sobrepostas no terreno de modo a permitir uma amarração justa de todo o sistema e logo depois foi efetuado o reaterro dos taludes com areia compactada.

A Figura 51 mostra a disposição de geobags na faixa de areia em Matinhos:

Figura 51 - Instalação de geobags na faixa de areia em Matinhos



Fonte: Dang Construtora,2022

5. AVALIAÇÃO GERAL DAS PROPOSTAS

5.1 PANORAMA GERAL

Conforme demonstrado nos capítulos anteriores, a erosão costeira é um fenômeno crítico capaz de gerar desequilíbrios no fluxo de deposição e retirada de sedimentos nas praias. Por se tratar de uma região com processos hidrodinâmicos intensos aliado a presença de infraestruturas urbanas e relativa densidade populacional, a orla de Matinhos sofre os efeitos ambientais, econômicos e sociais deste problema.

As intervenções costeiras propostas visam equilibrar o transporte longitudinal de sedimentos e estabilizar a largura da faixa de areia, porém a escolha das soluções ideais é tecnicamente complexa e requer uma visão crítica ante os fenômenos extremos que podem ser encontrados in loco.

Neste tópico será feita uma avaliação geral do projeto de proteção costeira com geossistemas em Matinhos, apresentando pontos de destaque das propostas descritas, sugestões, críticas e impactos positivos e negativos do empreendimento.

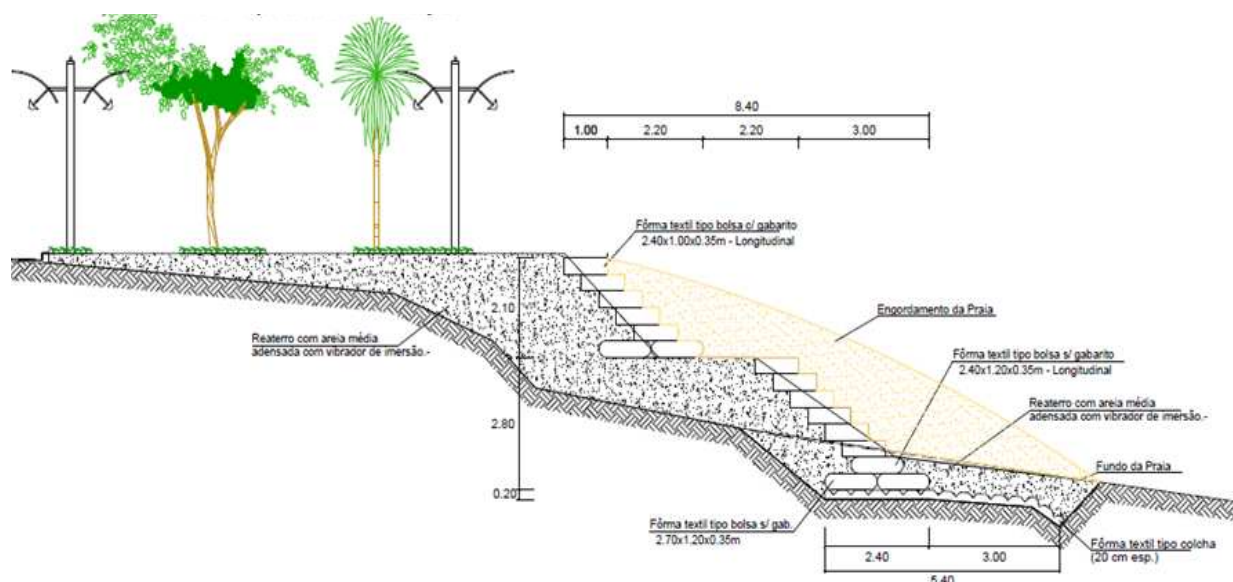
5.2 CONFIGURAÇÃO FINAL DO PROJETO

O projeto executivo foi constituído por sistemas distintos e relacionados, caracterizados pela técnica de alimentação artificial de praias, instalação de geobags para proteção costeira e a construção de estruturas semi rígidas compostas por núcleo de geotubos, enrocamentos e tetrápodes.

O engordamento proposto visa o avanço da faixa de areia para toda orla com o aporte de sedimentos proveniente de jazida submarina próxima à costa, aliada a instalação de geobags preenchidas com argamassa no corpo dos taludes para evitar o desmoronamento dos maciços arenosos. Esse sistema de reforço não foi fundamentalmente dimensionado para resistir ao impacto de arrebentação das ondas, mas sim prover estabilidade ao terreno da costa. A efetividade desses dois sistemas depende da preservação do alargamento da faixa de areia e do impedimento da chegada das ressacas até os taludes.

A Figura 52 apresenta configuração final do projeto de reforço com geobags na orla da Av. Paraná:

Figura 52 - Configuração final da orla da Av. Paraná após engordamento e implantação de geobags



Fonte: Aquamodelo,2021

Em relação às estruturas semi rígidas, o projeto previu a construção de headlands e espigão para controlar o fluxo longitudinal de sedimentos e manter a

integridade da linha de praia, bem como a implantação de guias-correntes para assegurar a estabilidade dos canais de drenagem e impedir o assoreamento dessas áreas.

A Figura 53 mostra imagem renderizada do projeto final das estruturas semi rígidas para a Avenida Paraná:

Figura 53 - Modelagem final do projeto para a Avenida Paraná



Fonte: AEN,2022

O consumo de materiais nas estruturas semi rígidas é apresentado na Tabela 10, com exceção do guia-corrente sul do Canal de Matinhos que ainda se encontra em fase de execução.

Tabela 10 - Quantitativo total de materiais usados nas estruturas semi rígidas até o momento

QUANTITATIVO DE MATERIAIS DAS OBRAS SEMI RÍGIDAS	
TIPO	UNIDADE
ROCHAS	134740,00 m ³
CONCRETO CICLÓPICO	38119,00 m ³
TETRÁPODES	5153 und
GEOTUBOS	488 und

Fonte: Adaptado de CREA-PR, 2023

5.3 IMPACTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DAS OBRAS

Para estudar os impactos decorrentes das obras de proteção costeira na orla de Matinhos foi analisada informações do parecer técnico do ITTI - Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura da Universidade Federal do Paraná.

5.3.1 Impactos físicos

Em relação aos impactos físicos gerados pela implantação das obras pode-se destacar o aumento na turbidez da água pelo excesso de partículas em suspensão, alteração da dinâmica marinha natural e a descaracterização do terreno subaquático. Durante a etapa de dragagem ocorreu um decréscimo momentâneo na qualidade da água com perdas referentes à transparência e quantidade de oxigênio dissolvido.

Na fase de bombeamento e espalhamento dos sedimentos dragados na faixa de areia ocorreram perturbações no terreno original e taludes próximos, pois a circulação de trabalhadores e a operação de equipamentos de carga degradam o solo. Dentre os impactos de menor ordem, podem-se citar a poluição sonora relacionada ao funcionamento das máquinas de terraplanagem e a poluição do ar referente a queima de combustível e emissão de poeira.

Se tratando da construção das estruturas semi rígidas, se prevê uma dinâmica diferente na ação das ondas, com alterações nas forças de arrasto e surgimento de áreas de arrebenção para formar um novo perfil de praia e auxiliar na retenção da faixa de areia.

Caso as intervenções propostas cumpram um desempenho satisfatório no controle da erosão costeira pode-se aferir um impacto positivo ao empreendimento, todavia a eficiência das estruturas deve ser monitorada após a execução da obra com estudos sobre a dinâmica costeira local.

5.3.2 Impactos sociais e econômicos

Nesse aspecto, os impactos negativos se restringiram a etapa de implantação das obras e o retorno positivo virá após a conclusão do empreendimento com benefícios para a prefeitura, população local e turistas que poderão presenciar um

aumento de arrecadação nas receitas municipais e de renda per capita dos cidadãos, bem como melhorias no cotidiano urbano para tarefas de lazer.

No que se refere aos efeitos adversos da obra para a população, podem ser citados a indisponibilidade momentânea de espaço na praia durante as intervenções, tráfego acentuado de máquinas de operação, ruídos extremos, poluição do ar, risco de danos físicos a edificações adjacentes, prejuízo a comércios próximos à área das construções por travamento de acessos e interferências na prática da pesca e outras atividades recreativas. Esses infortúnios possuíram caráter temporário e se limitaram apenas à fase de execução, constituindo impactos de baixa intensidade.

Já os efeitos sociais positivos começaram antes mesmo da conclusão da obra e se relacionaram com a oferta massiva de empregos e valorização imobiliária local. Após a finalização do empreendimento, se prevê uma melhoria na qualidade de vida urbana com o aumento na eficiência dos canais de drenagem, modernização paisagística da orla, maior espaço de lazer na faixa de areia e garantia de segurança contra a ação marítima.

Em termos estritamente econômicos, a implantação das obras de proteção costeira gerará vantagens locais aos proprietários de imóveis, agentes imobiliários, indústria da construção civil, cofres públicos e setores de bens e serviços.

5.3.3 Impactos à biota local

As obras de recuperação da orla de Matinhos impactaram o habitat natural de organismos terrestres e aquáticos durante a fase de implantação. Porém, após os danos imediatos, espera-se um período de adaptação e restabelecimento gradual da dinâmica natural das espécies que ali vivem.

Os processos de dragagem e engordamento da praia geraram efeitos negativos à comunidade biótica devido às consequências do lançamento de sujeira na água, diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido, sedimentação de partículas e produção de ruídos incômodos. Todavia, a formação da nova faixa de areia pode propiciar um espaço agradável para o desenvolvimento de espécies animais e vegetais.

Em relação à construção das estruturas semi rígidas, as obras afetaram a fauna local que viviam próxima às áreas de canais, onde foi alterado o ambiente

natural e as espécies de animais não podem mais usufruir do espaço para seu desenvolvimento.

Para minimizar os impactos ao meio biótico foram adotadas medidas de controle durante as construções e atividades de monitoramento de toda a biodiversidade presente.

5.4 CRÍTICAS AO PROJETO

Um grupo de trabalho da Universidade Federal do Paraná (GT-UFPR) formado por pesquisadores, elaboraram uma nota técnica com questionamentos e críticas sobre o projeto de proteção costeira em Matinhos.

O primeiro fator de descontentamento são os elevados custos econômicos de construção e manutenção do empreendimento, estimados em 512 milhões de reais, que aumentam a dívida do Estado e comprometem o orçamento do município. O segundo ponto geral de preocupação se refere a mudança na dinâmica natural marítima após as intervenções, que podem causar grandes impactos ambientais e sociais, bem como alterar de forma abrupta a paisagem local. Outro questionamento geral se deve à ausência de participação pública na discussão do projeto, já que o conjunto de obras irá influenciar a dinâmica social e o zoneamento urbano da cidade.

Nos aspectos técnicos, os pesquisadores criticam a construção dos guias-correntes nas desembocaduras dos canais, justificando que essas estruturas não servem para controlar a erosão e bloqueiam a deriva litorânea, podendo causar um acúmulo de sedimentos no lado sul das instalações e defasagem de areia no lado norte, transferindo o problema da erosão costeira em Matinhos para outras localidades vizinhas.

O grupo também critica a construção dos headlands, justificando que essa escolha é baseada apenas em critérios estéticos. Em contrapartida, sugerem a substituição dessas estruturas por espigões convencionais posicionados no nível topográfico da praia. De acordo com os pesquisadores, os espigões constituem uma solução mais confiável tecnicamente, menos onerosa e que mitiga melhor os impactos ambientais do empreendimento comparado aos headlands.

Por fim, um ponto de preocupação sobre o serviço de engordamento foram os dados inconclusivos sobre a capacidade de sedimentos da jazida submarina

escolhida para a dragagem, visto que segundo o grupo não houve transparência sobre a comprovação de volume de areia para atender as demandas do projeto, o que configura um serviço sem viabilidade técnica demonstrada.

5.5 PONTOS DE DESTAQUE DAS PROPOSTAS

5.5.1 Estudos preliminares

Tratando-se das operações preliminares às obras, percebe-se que o projeto apresenta estudos topobatimétricos da região, banco de dados consistente para determinação das ondas de projeto, cálculo de transporte longitudinal de sedimentos e análises de estabilidade das praias em Matinhos. Todo esse conhecimento introdutório sobre a área de estudo proporcionou informações críveis ao setor de execução e por conseguinte garantem segurança e credibilidade às obras.

5.5.2 Construção das estruturas semirrígidas

O dimensionamento dos blocos de rocha foi condicionado à altura e a energia de impacto das ondas de projeto, resultando em uma carapaça com resistência efetiva para proteger o núcleo de geossintéticos.

Vale ressaltar a adoção dos elementos tetrápodes, que reduzem o peso próprio da estrutura e aumentam o intertravamento das rochas. Pode-se aferir, que o uso desses componentes promove estabilidade ao enrocamento e estende a vida útil da estrutura.

O uso de software para o dimensionamento dos geotubos minimizou as chances de erros humanos e garantiu transparência ao projeto.

Por fim, entende-se que a aplicação de elementos flexíveis e rígidos foi a solução ideal para a configuração hidrodinâmica de Matinhos, visto que os núcleos constituídos por geotubos inibem o processo de ruptura das estruturas por tensões internas e os enrocamentos protegem os geossistemas da degradação por intempéries, galgamentos e impacto direto das ondas.

5.5.3 Dragagem, engordamento e instalação de geobags

Por meio dos relatórios de análise feitos pelas empresas Aquamodelo e Água & Minerio Sondagens de Solo Ltda, a jazida submarina apresentou capacidade suficiente para suprir o volume de areia necessário para o engordamento da praia e os diâmetros dos sedimentos dragados foram compatíveis com a areia natural presente na faixa costeira. Portanto, pode-se aferir que o cumprimento desses dois quesitos garantem a viabilidade técnica da operação e o resguardo de sedimentos na faixa costeira no período pós obra.

É válido destacar a escolha de draga hopper, que se configura como ideal para este tipo de operação, visto que o litoral de Matinhos conta com características geomorfológicas e marítimas favoráveis.

Um aspecto importante do projeto foi a avaliação dos fatores que afetam a produtividade da dragagem, com isso foi possível captar uma quantidade sobressalente de material para a engorda e estimar um cronograma verossímil de serviço.

As geobags instaladas para a proteção costeira foram projetadas com revestimento auto drenante e filtragem unifluxo, que não permitem a fuga de argamassa e expõem somente água do seu interior. Essa propriedade garante a resistência mecânica das geobags e formam uma barreira estanque contra infiltrações externas.

5.6 SUGESTÕES PÓS OBRA

Após o término das obras é imprescindível por parte dos órgãos competentes a realização de análises de comportamento dos sistemas de proteção costeira através de estudos sobre a eficiência do transporte longitudinal de sedimentos e monitoramento das ondas que atingem as praias.

Sugere-se a implementação de serviços periódicos de inspeção dos taludes e manutenção das estruturas semi rígidas, bem como a realização de transpasse mecanizado de sedimentos para consertar eventuais falhas na fase de espalhamento e controlar o acúmulo de areia no lado sul das praias.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho se propôs a fazer um estudo sobre as técnicas modernas usadas em estruturas de proteção costeira com foco na aplicação de geossistemas. No corpo da dissertação foram listadas suas principais propriedades, funções, vantagens e limitações, de modo a caracterizar a viabilidade dessa tecnologia na área de engenharia costeira.

A descrição dos aspectos técnicos desses sistemas costeiros foi feita por meio de revisão sistemática do assunto, avaliando em sequência, os efeitos decorrentes da erosão marítima, o uso de estruturas convencionais, os problemas associados a esses tipos de obra e por fim o surgimento dos geossintéticos como alternativa viável.

No estudo de caso foram analisadas as recentes obras de proteção costeira na orla de Matinhos-PR, que contam com o uso combinado de técnicas de geossistemas, enrocamentos com tetrápodes e alimentação artificial de sedimentos. Para o estudo, foram explorados dados em relatórios técnicos, pranchas de projeto, memoriais descritivos e consultas com profissionais atuantes no empreendimento.

No que se refere à avaliação geral das obras, a configuração final conta com três sistemas integrados de proteção costeira, que devem assegurar a estabilidade das praias e controlar o fluxo longitudinal de sedimentos durante o seu funcionamento.

Os impactos negativos gerados pelas obras foram momentâneos e se limitaram à fase de execução. Já o retorno positivo do empreendimento dependerá da eficiência das intervenções propostas, onde se prevê um boom imobiliário, crescimento turístico, aumento na arrecadação pública e melhoria na qualidade de vida dos cidadãos. As críticas ao empreendimento se concentraram no alto custo financeiro das obras, impactos paisagísticos e decisões técnicas de projeto.

Em relação às propostas implementadas, conclui-se que os estudos preliminares foram bem elaborados com o levantamento de dados da dinâmica marinha na área de estudo, o que possibilitou a correta execução dos serviços. Os serviços de dragagem e engordamento contaram com uma metodologia inteligente de divisão de seções das praias e estudo de compatibilidade dos sedimentos, já nas obras semi rígidas foram incorporadas técnicas combinadas de engenharia costeira que asseguraram flexibilidade interna e segurança externa às estruturas.

Portanto, este trabalho evidencia que o uso de geossistemas em obras de proteção costeira, sejam em aplicações individuais ou combinadas, possui vantagens econômicas, ambientais e técnicas. O emprego dessa tecnologia vem crescendo nos últimos anos em países desenvolvidos e os exemplos de sucesso da sua implantação corroboram com essa alta demanda. O Brasil conta com recursos hídricos e minerais abundantes para sua difusão, contudo a carência de estudos aprofundados sobre esse sistema torna o seu uso em larga escala uma realidade distante.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- **Análise de desempenho das intervenções feitas em Matinhos:** Durante o funcionamento dos sistemas de proteção costeira é necessário o estudo da eficiência dos serviços empregados.
- **Estudo comparativo com obras semelhantes:** Comparar as metodologias construtivas e a eficiência dos sistemas de proteção costeira implantados em Matinhos com obras internacionais bem estabelecidas.
- **Estudo dos benefícios indiretos das obras:** Analisar através de critérios qualitativos, os benefícios socioeconômicos proporcionados pelas obras à comunidade local.
- **Estudo sobre incorporação de tecnologias digitais:** Estudar a possibilidade da aplicação de ferramentas digitais como BIM, drones e Laser Scan em obras de proteção costeira.

REFERÊNCIAS

Alfredini, P.; Arasaki, E. (2009). **Obras e gestão de portos e costas: A técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. 2ª Edição. São Paulo: Editora Blucher. Acesso em: 29/03/2023.

Aquamodelo Consultoria e Engenharia. (2020). **Projeto Executivo de Proteção da Orla de Matinhos Anexo 3**. Projetos. Estruturas Marítimas. Rio de Janeiro. Acesso em: 08/11/2022.

Aquamodelo Consultoria e Engenharia. (2021). **Projeto Executivo de Proteção da Orla de Matinhos Revisão 2**. Enrocamento e Engordamento. Rio de Janeiro. Acesso em: 08/11/2022.

Bathurst, R.J. (2015). **Funções dos geossintéticos**. International Geosynthetic Society – IGS. Brasil. Acesso em: 25/10/2022.

BBC Brasil. (2019). **Como a erosão afeta 60% do litoral brasileiro e deforma centenas de quilômetros de praia**. São Paulo, Brasil. <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-46783072>. Acesso em: 10/05/2023.

Freire, L.F. (2011). **Erosão Costeira: Alternativas de Proteção e Proposta de Solução - Matinhos,PR**. Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia do IEP, Instituto de Engenharia do Paraná. Acesso em: 08/04/2023.

FUVEST. (2015). Geografia. São Paulo, Brasil. <https://www.kuadro.com.br/gabarito/fuvest/2015/geografia/fuvest-2015-o-brasil-poss-oi-cerca-de-7-500-km-de-l/11827>. Acesso em: 10/05/2023.

GT-UFPR. (2020). **Segunda Nota Técnica a Obra de recuperação da Orla de Matinhos: Pendências Técnicas e Riscos Associados**. Universidade Federal do Paraná. Acesso em: 08/04/2023.

Heerten G.; Jackson A.; Restall S. and Saathoff F. (2000). **New developments with mega sand containers of nonwoven needle-puncture geotextile for the construction of coastal structures.** Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering. Sydney, Australia. Acesso em: 25/10/2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2021. Matinhos, Paraná, 2021. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/matinhos.html>. Acesso em: 10/05/2023.

Instituto Água e Terra. (2021a). **Recuperação da Orla de Matinhos. Elementos Técnicos Instrutores Anexo 1.** Governo do Estado do Paraná. Acesso em: 10/01/2023.

Instituto Água e Terra. (2021b). **Recuperação da Orla de Matinhos. Proteção Costeira Capítulo 2.** Governo do Estado do Paraná. Acesso em: 10/01/2023.

ITTI – Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura. (2020). **Parecer Técnico Sobre a Recuperação da Orla de Matinhos, Controle de Cheias e Revitalização Urbanística.** Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Acesso em: 08/04/2023.

Koffler, A. (2008). **Geosynthetics in protection against erosion for river and coastal banks and marine and hydraulic construction.** Journal of Coastal Conservation, vol. 12, pg 11-17. Acesso em: 25/10/2022.

Lopes, M.L. (1992). **Muros reforçados com geossintéticos.** Dissertação de doutorado em Engenharia Civil. FEUP, Portugal. Acesso em: 25/10/2022.

Marinho, B. (2013). **Procedimentos no Estudo de Obras de Defesa Costeira.** Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Portugal. Acesso em: 07/09/2022.

Morais, L. (2010). **Efeitos de Escala Associados à Modelação Física de Geo Contentores**. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. FEUP, Portugal. Acesso em: 07/09/2022.

Neves, L. (2003). **Geossintéticos e Geossistemas em Engenharia Costeira**. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. FEUP, Portugal. Acesso em: 25/10/2022.

Palma, Daniela M. L da Costa. (2016). **Aplicação de geossistemas em obras de proteção costeira, o caso da restinga de Ofir**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal. Acesso em: 07/09/2022.

Pilarczyk, K.W. (2000). **Geosynthetics and geosystems in hydraulics and coastal engineering**. Balkema Publications. Rotterdam, Holanda. Acesso em: 25/10/2022.

Polis Litoral Norte, S.A. (2013). **Manutenção e reforço do cordão dunar da restinga de Ofir**. Portugal. Acesso em: 07/09/2022.

Recio, J. (2008). **Hydraulic Stability of Geotextile Sand Containers for Coastal Structures - Effect of Deformations and Stability Formulae**. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia. Fakultät Architektur, Technische Universität Braunschweig. Alemanha. Acesso em: 07/09/2022.

Robrini, M; Silva, M. (2014). **Projeto gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos transfronteiriços na bacia do rio Amazonas considerando a variabilidade e as mudanças climáticas**. Brasil. Acesso em: 07/09/2022.

Taveira Pinto, F. (2001). **Análise das oscilações e dos campos de velocidades nas proximidades de quebra mares submersos sob a ação da agitação marítima**. Dissertação de doutorado em Engenharia Civil. FEUP, Portugal. Acesso em: 25/10/2022.