



Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Análise Experimental da Dinâmica Ero- siva na base Geoformas Têxteis Empre- gadas em Obras de Proteção Costeira

Dissertação de:
Mikael Freitas Ribeiro

Orientador:
Diego de Freitas Fagundes

Coorientador:
Débora Martins Machado

Março de 2025

Dissertação - PPGeo – FURG

Mikael Freitas Ribeiro

Mestre em Engenharia Oceânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGeo) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Elizaldo Domingues dos Santos
Coordenador do PPGeo

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **DIEGO DE FREITAS FAGUNDES**
Data: 23/06/2025 23:30:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Diego de Freitas Fagundes
Orientador — FURG/PPGeo

Documento assinado digitalmente
 **DEBORA MARTINS MACHADO**
Data: 23/06/2025 12:45:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Débora Martins Machado
Coorientadora — FURG/Escola de Engenharia

Documento assinado digitalmente
 **LIERCIO ANDRE ISOLDI**
Data: 16/06/2025 17:37:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Membro Interno — FURG/PPGeo

Documento assinado digitalmente
 **WALDIR TERRA PINTO**
Data: 23/06/2025 12:47:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Waldir Terra Pinto
Membro Externo — FURG/Escola de Engenharia

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO CONTREIRA PEREIRA**
Data: 23/06/2025 13:17:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leonardo Contreira Pereira
Membro Externo — UFPel/CDTec

Rio Grande, 30 de maio de 2025

Ficha Catalográfica

R484a Ribeiro, Mikael Freitas.

Análise experimental da dinâmica erosiva na base geoformas têxteis empregadas em obras de proteção costeira / Mikael Freitas Ribeiro. – 2025.

xvi, 92 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2025.

Orientador: Dr. Diego de Freitas Fagundes.

Coorientadora: Dra. Débora Martins Machado.

1. Obras costeiras. 2. Erosão. 3. Geoforma têxtil. 4. Canal de ondas. 5. Scour. I. Fagundes, Diego de Freitas. II. Machado, Débora Martins. III. Título.

CDU 551.4.038

Catálogo na Fonte: Bibliotecária Sabrina Vaz da Silva CRB 10/2243

A ciência não é apenas compatível com a espiritualidade; ela é uma profunda fonte de espiritualidade.

CARL SAGAN

Agradecimentos

Com o coração cheio de gratidão, encerro esta etapa da minha vida com a certeza de que nada disso teria sido possível sem o apoio, a paciência e a generosidade de pessoas muito especiais que me acompanharam nessa jornada.

Ao meu orientador, professor Diego de Freitas Fagundes, e à minha coorientadora, professora Débora Martins Machado, agradeço profundamente por não desistirem de mim. Por mais difíceis que tenham sido alguns momentos, vocês sempre estiveram presentes com palavras de incentivo, orientação firme e acolhimento. Sua confiança foi, sem dúvida, um dos pilares que sustentaram essa caminhada.

Aos membros da banca, meu sincero agradecimento por aceitarem o convite de avaliar este trabalho.

Agradeço também ao Igor Almeida da Rosa, que, junto a outros colegas que cruzaram meu caminho neste processo, esteve ao meu lado com sugestões, apoio e companheirismo nos momentos de laboratório, dúvidas e incertezas.

Um agradecimento muito especial aos meus amigos e colegas de trabalho, Verônica Hammes Garcia e Ricardo Decker. Obrigada por estarem lá quando precisei me ausentar, por compreenderem o peso desta etapa e por me apoiarem com afeto e amizade sinceros.

À minha mãe, Delma Lorisa Domingues Freitas, e ao meu irmão, Maicon Bernardino Freitas, que são minha base. Em cada conquista minha, há um pouco de vocês. Sua presença, amor e apoio incondicional me deram forças quando eu pensei que não conseguiria. Muito do que sou e do que alcancei devo a vocês.

Às minhas tias queridas, Selma Mariza e Maria Secundina, que infelizmente não estão mais entre nós, obrigado por terem sido fonte constante de carinho, força e orgulho. Sei que, mesmo não estando fisicamente aqui, continuam me olhando com amor, de algum lugar muito especial, e me impulsionando a seguir com coragem.

Por fim, acima de tudo agradeço a Deus. Mesmo nos momentos em que eu me senti distante, em que questionei ou hesitei, sei que Ele nunca deixou de caminhar ao meu lado. Sua presença silenciosa me fortaleceu nos dias difíceis e me sustentou até aqui.

Resumo

Mikael Freitas Ribeiro

A presente dissertação analisa, em ambiente laboratorial, os efeitos hidrodinâmicos e morfodinâmicos da interação entre ondas regulares e estruturas submersas do tipo geoforma têxtil tubular, utilizadas como solução de proteção costeira. O estudo busca compreender o comportamento erosivo induzido por ondas oscilatórias e os mecanismos de formação de cavidades erosivas (*scour*) e ondulações sedimentares (sand ripples) ao redor dessas estruturas. Foram conduzidos 12 ensaios experimentais em canal de ondas, variando-se a profundidade da lâmina d'água ($h = 21, 26$ e 31 cm) e o período das ondas ($T = 0,80$ a $2,68$ s). Os resultados demonstram que ondas de menor período ($T = 0,80$ s) geraram maior dissipação de energia, intensificaram a erosão localizada e promoveram a formação de *ripples* assimétricos com maior amplitude. A presença da estrutura reduziu significativamente a energia das ondas, sobretudo em cenários com maiores profundidades, influenciando a propagação do escoamento e o transporte sedimentar. Observou-se, ainda, a possível geração de vórtices e recirculações associadas à cavitação sob a estrutura, indicando riscos potenciais à sua estabilidade. Os dados obtidos foram comparados a modelos clássicos da teoria linear de ondas e a estudos de referência sobre erosão costeira, validando experimentalmente o comportamento hidrodinâmico observado. Os achados apontam para a importância de se considerar o regime de propagação das ondas e a geometria da estrutura no projeto de soluções têxteis sustentáveis e eficazes para mitigação da erosão em zonas litorâneas vulneráveis.

Palavras-chave: obras costeiras; erosão; geoforma têxtil; *scour*; canal de ondas.

Abstract

Mikael Freitas Ribeiro

This dissertation presents a laboratory investigation on the hydrodynamic and morphodynamic effects of the interaction between regular waves and submerged structures of the tubular textile geoform type, employed as coastal protection solutions. The study aims to understand the erosive behavior induced by oscillatory waves and the mechanisms responsible for the formation of scour cavities and sedimentary bedforms (sand ripples) around such structures. A total of 12 physical tests were conducted in a wave flume, varying water depths ($h = 21, 26, \text{ and } 31 \text{ cm}$) and wave periods ($T = 0.80 \text{ to } 2.68 \text{ s}$). The results show that shorter-period waves ($T = 0.80 \text{ s}$) generated higher energy dissipation, increased local erosion, and promoted the formation of asymmetric ripples with greater amplitude. The presence of the structure significantly reduced wave energy, particularly under greater depths, affecting flow propagation and sediment transport. Potential vortex generation and recirculation patterns beneath the structure were also observed, suggesting risks to its stability. The data were compared with classical wave theory and reference studies on coastal erosion, experimentally validating the observed hydrodynamic behavior. The findings highlight the relevance of considering wave propagation regimes and structural geometry in the design of sustainable and effective textile-based solutions for mitigating erosion in vulnerable coastal zones.

Keywords: coastal structures; erosion; tubular textile geoform; scour; wave flume.

Sumário

	Página
Lista de Figuras	X
Lista de Tabelas	XIV
Lista de Símbolos	XV
Lista de Siglas	XVI
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Estrutura da Dissertação	3
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Importância da proteção costeira	5
2.2 Processos erosivos em zonas costeiras	6
2.3 Impactos ambientais: degradação de ecossistemas costeiros	11
2.4 Tecnologias e estratégias de mitigação para proteção costeira	13
2.4.1 Medidas estruturais: obras rígidas e flexíveis	13
2.4.2 Medidas não estruturais: soluções naturais e adaptativas	17
2.5 Geossintéticos e sua Aplicação na Engenharia Costeira	18
2.5.1 Formas Têxteis Tubulares (FTT)	19
2.6 Conceitos Fundamentais das Ondas	25
2.7 Interação entre ondas e solo	30
2.8 Modelagem Física	32
2.9 Erosão localizada ao redor de Estruturas Costeiras	33
2.9.1 Formas têxteis tubulares e erosão localizada	36
2.9.2 Liquefação	37
2.9.3 Revisão sobre <i>Scour</i> e Liquefação	40
3 Metodologia	41
3.1 Canal de Ondas	42
3.2 Arranjo experimental	42
3.2.1 Testes preliminares com diferentes tamanhos de geoformas	47
3.3 Caracterização do solo	48
3.4 Caracterização do dispositivo de medição dos pontos	51
3.5 Campanha experimental	54
4 Resultados e discussões	56

	IX
4.1 Cálculos Hidrodinâmicos e Regime de Propagação das Ondas	56
4.1.1 Caracterização dos Regimes de Escoamento	58
4.2 Efeito da Estrutura na Propagação das Ondas	61
4.2.1 Análise da Energia nas Ondas	64
4.2.2 Análise Temporal da Propagação da Onda	68
4.3 Análise do Processo Erosivo	70
4.4 Formação de <i>Sand Ripples</i>	74
5 Conclusões	81
5.1 Contribuições do Estudo	82
5.2 Limitações do Estudo	82
5.3 Direções para Pesquisas Futuras	83
Referências	84

Lista de Figuras

- Figura 1 - Balanço sedimentar na zona litorânea. Fonte: Alfredini e Arasaki (2009). _ 7
- Figura 2 - À medida que as ondas se aproximam da costa, elas "tocam o fundo" quando a profundidade é igual à metade do comprimento de onda, e a onda começa a desacelerar. Ao desacelerar, o comprimento de onda diminui e a altura da onda aumenta, até que ela quebre (Steven Earle, 2015). _____ 8
- Figura 3 – Erosão costeira impactando infraestrutura rodoviária of east coast of Korea (Young-Jin beach). Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2005). _____ 9
- Figura 4 - Erosão Costeira e destruição de infraestrutura pública e privada em área urbana após tempestade, Praia da Macumba, Rio de Janeiro, RJ. Em 15 anos tal estrutura colapsou ao menos cinco vezes. Fontê Thiago Pereira, 2017 retirado de Muehe, D.(2020). _____ 10
- Figura 5 – Erosão da linha costeira do Leste da Coreia (Young-Jin beach). Fonte: Oh e Shin, 2006. _____ 10
- Figura 6 - Registros fotográficos em Imbé (RS). A: fotografia evidenciando as escarpas erosivas altas. B: foto para evidenciar a declividade acentuada das escarpas erosivas do trecho; e C: imagem de satélite do Google Earth evidenciando a baixa cobertura impenetrável dentro dos 200 m adjacentes ao mar. Fonte: Barros (2023). _____ 12
- Figura 7 – Exemplo esquemático de aplicações de estruturas rígidas. Fonte: Souza (2023) _____ 14
- Figura 8 - O espigão do Náutico, em Fortaleza, concluído em 2016. Fonte: Nilton Alves _____ 15
- Figura 9 - Vista aérea do Quebra-Mar que protege a planta industrial da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis, Rio de Janeiro. Fonte: Eletronuclear (acessado em: 13/02/2025). _____ 15
- Figura 10 - Molhes da Barra, Rio Grande, Brasil. Fonte: Acervo Prefeitura Municipal de Rio Grande, acessado em 2025. _____ 16
- Figura 11 - Dique coberto por grama, concreto e protegido por enrocamento na Holanda. Fonte: Kobus van Leer (2019). _____ 16
- Figura 12 - Espigão Guia-Corrente construído com geotêxteis (geobags) para interromper o transporte de sedimentos, fixar a embocadura de um canal e fornecer acesso à uma marina em Armação de Búzios, RJ. Fonte: Foto de Eduardo Bulhões, 2015. _____ 17
- Figura 13 - Comparativo da Praia de Copacabana antes e depois do projeto de alimentação artificial. À esquerda, registro fotográfico de evento extremo com ondas de tempestade que destruíram o calçadão (Leme, década de 1920). À direita, vista

panorâmica da praia após a execução da obra, em 2006. Fontes: à esquerda, Fundação Biblioteca Nacional; à direita, Renata Rocha (Wikimedia Commons). _____ 18

Figura 14 – Forma têxtil tubular como estrutura de quebra-mar. Fonte: Wilke *et al.* (2015b). _____ 19

Figura 15 - Vista Isométrica de um Tubo de Geotêxtil. Fonte: Ortiz *et al.* (2013). ____ 20

Figura 16 – A) Pit Lake, na Alemanha, um projeto de estabilização da margem de um lago; Figura B) New Jersey, Estados Unidos, a estabilização de um litoral com forte processo de erosão costeira; C) Amwaj Islands, Bahrein, foram utilizados 30 km de FTT de 2,6 m de altura na primeira fase do projeto e, em seguida, outra FTT completando uma altura de 3,6 m para formação de um dique para as ilhas artificiais do país; D) Zoutkamp, na Holanda, um projeto de estabilização de taludes em barragem; E) Rabat, Marrocos, 3 FTT de 65 m de comprimento, 15 m de circunferência e 3 m de altura, foram a solução proposta para a Barragem de Sidi Mohamed Ben Abdellah. Fonte: Koffler *et al.* (2008) e Wilke *et al.* (2015a) _____ 21

Figura 17 - Esquemático caracterizando a fluência no geotêxtil com o tempo. Fonte: Filho, J.L. (2016) _____ 22

Figura 18 - FTT vazio e preenchido. Fonte: WILKE *et al.* (2015a) _____ 23

Figura 19 - Esquemático de esforços que mostra o geotêxtil sendo tracionado. Fonte: Filho, J.L. (2016) _____ 23

Figura 20 - Esquemático de esforços mostra o puncionamento no geotêxtil por pedregulho. Fonte: Filho, J.L.(2016) _____ 23

Figura 21 - Ilustrações dos mecanismos de falha de FTT. Fonte: Adaptado de Lawson (2018), modificado por Filho (2016). _____ 24

Figura 22 – Componentes básicos da onda (modificado por PW de Steven Earle, 2015). _____ 25

Figura 23 - Representação do movimento orbital das partículas de água dentro de uma onda, com destaque para a variação da forma das órbitas conforme a profundidade. Fonte: Modificado por PW a partir de Steven Earle, 2015. _____ 29

Figura 24 - Seções transversais de dutos mostrando etapas progressivas de auto enterro. _____ 34

Figura 25 - Esquema dos vórtices e das zonas críticas de scour ao redor de estruturas circulares. Vórtice A: vórtice de estagnação; Vórtice B: vórtices de esteira; Vórtice C: vórtice de túnel (por piping). Fonte: Mao (1988). _____ 36

Figura 26 – Observação durante a construção de um tubo de grande diâmetro em geossintéticos, colocado na posição correta, no entanto apresentando dificuldades de instalação do tapete ante erosão e os pequenos tubos de ancoragem em Toscana na Italia. A) O tapete ante erosão com tubo de ancoragem vazio (quebrado); B) Bom desempenho

do tapete ante erosão na área protegida; C) Tapete ante erosão flutuante; Fonte: Aminti <i>et al</i> (2010)	37
Figura 27 - Descrição esquemática da série temporal períodos médios em profundidade z. Fonte: Summer (2002).	38
Figura 28 – Deformação elástica do leito sedimentar sob Ondas progressivas. Fonte: Summer (2002).	39
Figura 29 – Representação esquemática do procedimento experimental.	41
Figura 30 – Vista de dentro do canal de ondas do LIFE. Fonte: Autor (2025)	42
Figura 31 – Tubo de PVC envolto em tecido geotêxtil. Fonte: Autor (2025)	43
Figura 32 - Etapas da montagem experimental no canal de ondas: (A) Posicionamento do absorvedor de ondas (praia); (B) Posicionamento da caixa de sedimentos; (C) Instalação da rampa de transição; (D) Colocação do fundo plano sob a caixa de sedimentos; (E) Preenchimento da caixa com sedimentos; (F) Posicionamento da estrutura final (GTT); (G) Enchimento do canal com água até a lâmina d'água de projeto; (H) Instalação dos sensores capacitivos (Waveprobes); (I) Calibração dos equipamentos e aquisição dos dados experimentais.	44
Figura 33 - Representação esquemática do setup experimental no canal de ondas. Fonte: Autor (2025)	45
Figura 34 – Sensores do tipo <i>Waveprobe</i> utilizados na aquisição dos dados. Fonte: Autor, 2025.	46
Figura 35 – Esquema de posicionamento dos sensores <i>WaveProbe</i> (WP1, WP2 e WP3) ao longo do canal experimental.	47
Figura 36 - Representação esquemática dos modelos testados com suas respectivas dimensões. Fonte: Autor (2025).	48
Figura 37 – Fotografia das geoformas utilizadas no modelo A e B. Fonte: Autor (2025)	48
Figura 38 - Peneiras de aberturas 16#, 30#, 40#, 50#, 70#, 100#, 200#. Fonte: Autor (2025)	49
Figura 39 - Curva granulométrica do solo utilizado. Fonte: Autor (2025)	50
Figura 40 - Dispositivo de medição. Fonte: Autor(2025)	52
Figura 41 – Representação do grid para medição das erosões, a montante da geoforma. Fonte: Autor (2025)	53
Figura 42 – Histograma das elevações médias da superfície livre registradas pelos três <i>WaveProbes</i> , nas condições com e sem a presença da estrutura.	63
Figura 43 – Energia média das ondas calculada a partir das elevações registradas pelos sensores WP1, WP2 e WP3, nos ensaios com diferentes profundidades (<i>hs1</i> , <i>hs2</i> e <i>hs3</i>) e períodos de onda.	67

- Figura 44 – Elevação da superfície livre registrada nos três sensores (WP1, WP2 e WP3), com e sem estrutura, para T4 nas profundidades *hs1*, *hs2* e *hs3*. _____ 68
- Figura 45 – Evolução temporal da profundidade erosiva para diferentes condições de lâmina d'água (*hs*), sob o período de onda $T = 0,80$ s. _____ 70
- Figura 46 – Perfis longitudinais das cavidades erosivas formadas junto à estrutura para o período $T = 0,80$ s, considerando as três profundidades analisadas (*hs1*, *hs2* e *hs3*). As curvas representam a variação da profundidade do leito junto a geoforma têxtil, O posicionamento da estrutura está indicado no desenho esquemático no canto superior esquerdo, e o gráfico evidencia a influência da profundidade da lâmina d'água na intensidade e na geometria da escavação. _____ 71
- Figura 47 – Cavidade erosiva formada junto à FFT no ensaio *hs1-T4*, evidenciando escavação a montante e lateral da estrutura. _____ 73
- Figura 48 - Cavidade erosiva formada junto à geoforma têxtil no ensaio *hs2-T4*, evidenciando escavação a montante e lateral da estrutura. _____ 73
- Figura 49 - Cavidade erosiva formada junto à geoforma têxtil no ensaio *hs3-T4*, evidenciando escavação a montante e lateral da estrutura. _____ 74
- Figura 50 – Comparação entre as condições iniciais e finais dos ensaios T4 nas profundidades *hs1*, *hs2* e *hs3*, evidenciando a formação de sand ripples a montante da FFT. A seta indica a direção de propagação das ondas regulares. _____ 75
- Figura 51 – Mapa de relevo do leito sedimentar com identificação da movimentação de fundo para a condição *hs1-T4*, evidenciando a formação de *sand ripples* a montante da geoforma têxtil _____ 76
- Figura 52 - Mapa de relevo do leito sedimentar com identificação da movimentação de fundo para a condição *hs2-T4*, evidenciando a formação de *sand ripples* a montante da geoforma têxtil. _____ 77
- Figura 53 – Mapa de relevo do leito sedimentar com identificação da movimentação de fundo para a condição *hs3-T4*, evidenciando a formação de *sand ripples* a montante da geoforma têxtil. _____ 78
- Figura 54 – Quantificação dos parâmetros médios das *ripples*, em cm, para os períodos T4 para todas as profundidades (*hs*). _____ 79

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificação dos regimes de propagação de ondas segundo kh e h/L . Fonte: Autor (2025)	26
Tabela 2 – Classificação dos tipos de erosão localizada em estruturas submersas. Adaptado de Whitehouse (1998) e CIRIA (2007).	35
Tabela 3 - Composição granulométrica e propriedades físicas do solo utilizado.	50
Tabela 4 - Combinação dos parâmetros nos ensaios realizados.	55
Tabela 5 - Tempo de duração dos ensaios de acordo com o período de onda.	55
Tabela 6 - Parâmetros hidrodinâmicos considerando diferentes profundidades sobre o leito sedimentar (hs).	57
Tabela 7 – Caracterização hidrodinâmica pelo cálculo de Re nos ensaios sem a estrutura, considerando $D = 0,13$ m.	58
Tabela 8 - Caracterização hidrodinâmica pelo cálculo de Re e KC nos ensaios com a estrutura, considerando $D = 0,13$ m.	59
Tabela 9 - Valores médios de elevação da superfície livre da água registrados pelos WPs , nas condições sem a presença da estrutura. As medidas das elevações estão expressas em cm.	61
Tabela 10 - Valores médios de elevação da superfície livre da água registrados pelos sensores capacitivos ($WaveProbes$), nas condições com a presença da estrutura. As medidas das elevações estão expressas em cm.	62
Tabela 11 - Cálculo da energia média por unidade de área registrada por altura de onda de cada sensor ($WaveProbe$) e a energia total média, nas condições sem a presença da estrutura.	64
Tabela 12 – Cálculo da energia média por unidade de área registrada por altura de onda de cada sensor ($WaveProbe$) e a energia total média, nas condições com a presença da estrutura.	65

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos

C	Celeridade da onda [m/s].
Cu	Coeficiente de uniformidade [adimensional].
Cc	Coeficiente de curvatura [adimensional] .
D_{10}	Diâmetro médio de 10% das partículas [mm ou m].
$D_{\bar{3}}$	Diâmetro médio das partículas [mm ou m].
D_{50}	Diâmetro médio das partículas [mm ou m].
Fr	Número de Froude [adimensional].
H	Altura da onda [m].
h	Profundidade total da lâmina [m ou cm].
hs	Altura da lâmina sobre o leito [m].
k	Diâmetro médio das partículas [mm ou m].
L	Comprimento de onda [m ou cm].
t	Tempo [s].
x	Coordenada horizontal [m ou cm].
y	Coordenada vertical [m ou cm].
z	Cota [m ou cm].

Símbolos Gregos

ρ	Massa específica [kg/m ³].
ω	Frequência angular [rad/s].
η	Elevação da superfície livre [m].
ϕ	Função potencial de velocidade [m ² /s].
γ_s	Peso específico dos sólidos [Kn/m ³].
ε_{min}	Índice de vazios mínimo [adimensional].
ε_{max}	Índice de vazios máximo [adimensional].

Subscritos e Superscritos

Fr_p	Número de Froude do protótipo [adimensional].
Fr_m	Número de Froude do modelo [adimensional].
L_p	Comprimento de onda do protótipo [m].
L_m	Comprimento de onda do modelo [m].
N_L	Escala de comprimento (protótipo/modelo) [adimensional].
N_T	Escala de período (protótipo/modelo) [adimensional].
T_p	Período do protótipo [s].
T_m	Período do modelo [s].

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM D422	<i>Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils</i>
ASTM D2487	<i>Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes</i>
FFT	Forma Flexível Têxtil
FTT	Forma Têxtil Tubular
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LIFE	Laboratório de Interação Fluido-Estrutura
<i>LabVIEW</i>	Ambiente de programação gráfica utilizado para aquisição e tratamento de dados
MEF	Método dos Elementos Finitos
<i>Nbs</i>	<i>Nature-Based Solutions</i>
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIDS	<i>Small Island Developing States</i>
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
<i>WP</i>	<i>WaveProbe</i>

1 | Introdução

A intensificação dos processos de erosão costeira, resultado tanto das pressões antrópicas como das mudanças climáticas, tem impulsionado o desenvolvimento de soluções sustentáveis que sejam ao mesmo tempo eficientes e adaptáveis às condições dinâmicas dos ambientes litorâneos. Nesse contexto, as geoformas têxteis tubulares (FTTs) vêm se consolidando como alternativas promissoras às obras tradicionais de proteção costeira, destacando-se por sua flexibilidade, menor custo, facilidade de instalação e, sobretudo, por oferecerem menor impacto ambiental em comparação às estruturas rígidas convencionais (Dong *et al.*, 2024).

A trajetória da utilização dos geossistemas, especialmente dos geotubos, remonta às duas últimas décadas, quando experimentações iniciais demonstraram seu potencial como alternativa técnica e ambientalmente viável às soluções convencionais de engenharia costeira.

As primeiras aplicações de materiais geossintéticos com função de contenção e controle de erosão ocorreram entre o fim da década de 1960 e o início dos anos 1970 (Carroll, Rodencal e Collin, 1992). Contudo, foi apenas a partir da década de 1990 que os geotubos passaram a ser amplamente empregados, consolidando-se como componentes fundamentais de obras de proteção litorânea, principalmente por sua capacidade de adaptação às variações morfológicas e sua relativa facilidade de execução (Saathoff; Oumeraci e Restall, 2007).

O período entre 2003 e 2010, marcou a consolidação inicial dessa tecnologia, com estudos pioneiros que buscaram avaliar sua eficácia e desempenho funcional. Nesse período, Álvarez *et al.* (2007) demonstraram, por meio de aplicações na costa de Yucatán, que os tubos submersos foram capazes de promover avanços significativos na linha de costa, da ordem de até 7,6 metros, embora tenha sido identificado que sua durabilidade poderia ser comprometida por fatores como abrasão e exposição aos raios ultravioleta. De forma complementar, Oumeraci *et al.* (2003) destacaram que a estabilidade dessas estruturas dependia diretamente da permeabilidade dos materiais empregados e do grau de compactação interna. Isebe *et al.* (2007), por sua vez, desenvolveram modelos que integraram aspectos morfodinâmicos e estruturais, contribuindo para a melhoria do entendimento sobre a interação entre as geoformas e o meio físico.

Entre os anos de 2011 e 2018, os avanços foram direcionados para o aperfeiçoamento técnico das FTTs, sobretudo no que diz respeito à configuração dos arranjos, às propriedades dos materiais e ao entendimento dos processos hidrodinâmicos associados. Na'im *et al.* (2018) conduziram investigações que compararam diferentes configurações de implantação, concluindo que arranjos duplos apresentam desempenho superior na dissipação da energia incidente das ondas. Paralelamente, das Neves *et al.* (2011) evidenciaram que tanto a profundidade local quanto o regime energético das ondas exercem

forte influência na formação de cavidades erosivas (*scour*) ao redor das estruturas. Moreira *et al.* (2015) destacou a existência de discrepâncias entre os resultados obtidos em ensaios de laboratório e as condições observadas em campo, especialmente no que se refere à subestimação dos coeficientes de atrito.

Entre os anos de 2021 e 2024, o desenvolvimento tecnológico e metodológico das estruturas tubulares de geotêxteis (FTTs) voltadas à proteção costeira avançou de forma significativa, tanto em termos de desempenho hidráulico quanto de adequação morfo-dinâmica. Cook *et al.* (2021) demonstraram que a posição dos geotubos submersos é decisiva na dissipação da energia das ondas e, conseqüentemente, na redução da erosão. Os autores identificaram que a eficácia das estruturas aumenta quando estas são instaladas em posições otimizadas, capazes de induzir a quebra prematura das ondas e minimizar a energia transmitida à linha de costa.

De maneira complementar, Pattipawaj (2023) avaliou a aplicação de geotubos na área costeira de Way Hawang, província de Bengkulu (Indonésia), destacando que a colocação estratégica dos tubos entre zonas de abrasão e acreção resultou em maior estabilidade do perfil litorâneo, com redução significativa na largura da zona de erosão. Os resultados da simulação indicaram que a instalação contínua dos geotubos entre os grids 10 e 50 foi a mais eficaz na mitigação dos efeitos erosivos.

Por sua vez, Vieira *et al.* (2023) exploraram a comparação entre estruturas inovadoras, baseadas em morfologias naturais, e soluções tradicionais como esporões. O estudo evidenciou que estruturas adaptadas ao ambiente intertidal, com geometria otimizada, são capazes de promover a inversão da deriva litoral e favorecer a retenção sedimentar a jusante, o que representa um avanço substancial em relação às barreiras convencionais.

No âmbito das perspectivas internacionais, relatórios de mercado, como os publicados pela BusinessWire (2024), confirma o crescimento exponencial do uso de geotêxteis tubulares na engenharia costeira, impulsionado tanto pela demanda por soluções sustentáveis quanto pela eficiência econômica desses sistemas. Além disso, estudos desenvolvidos em regiões costeiras do Sudeste Asiático e em países classificados como *Small Island Developing States* (SIDS) reforçam a adoção crescente de infraestruturas híbridas, que conciliam tecnologias baseadas em materiais geossintéticos com soluções baseadas na natureza, alinhando-se às diretrizes globais de sustentabilidade e adaptação às mudanças climáticas (Hernández-Delgado, 2024).

Apesar dos avanços consideráveis no desenvolvimento e na aplicação das FTTs, persiste uma lacuna relevante na produção científica voltada para os ambientes costeiros da América Latina. Embora haja registros de aplicações no Brasil e em outros países da região, verifica-se que poucos desses estudos são formalmente publicados na literatura científica internacional, o que limita o compartilhamento de conhecimento e o desenvolvimento de metodologias adaptadas às particularidades litorâneas locais. Assim, observa-se a complexidade dos processos hidrodinâmicos e geotécnicos envolvidos na aplicação de FTTs.

A problemática é ampliada quando se considera o risco de liquefação dos sedimentos. Como discutido por Sumer (2002), em ambientes com sedimentos não coesivos e quando submetidos a ondas repetitivas, o acúmulo de poropressão pode induzir instabilidades progressivas, reduzindo a tensão efetiva do solo e favorecendo o colapso das fundações.

Assim, embora os geotubos representem uma alternativa promissora para obras de defesa costeira, sua eficácia depende de múltiplos fatores: forma geométrica, porosidade do material, intensidade das ondas, comportamento do solo e resposta morfológica do sistema. A avaliação integrada dessas variáveis exige abordagens combinadas de modelagem física, modelagem numérica e monitoramento em longo prazo, a fim de garantir segurança, eficiência e durabilidade.

O presente estudo insere-se nesse panorama de investigação aplicada, propondo uma abordagem experimental sistemática para analisar a interação entre ondas regulares e uma Forma Têxtil Tubular em escala reduzida, com especial atenção aos processos de erosão localizada (*scour*) e instabilidade do solo. Busca-se, assim, contribuir para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre a aplicação de geossistemas na engenharia costeira e para a consolidação de critérios de projeto mais adequados às especificidades dos ambientes litorâneos.

1.1 Objetivos

Avaliar experimentalmente a influência hidrodinâmica e morfodinâmica de uma geoforma têxtil tubular submersa sob a propagação de ondas regulares. Para atingir esse objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Quantificar o impacto da estrutura na dissipação da energia ondulatória, considerando variações no período das ondas e na profundidade da lâmina d'água.
- Determinar as alterações no campo hidrodinâmico causadas pela presença da estrutura, por meio da análise dos parâmetros adimensionais de escoamento.
- Avaliar a evolução temporal e espacial de cavidades erosivas formadas ao redor da geoforma, relacionando-as à intensidade do cisalhamento de fundo.
- Caracterizar a formação e os parâmetros morfológicos induzidos pela ação ondulatória em diferentes profundidades, com ênfase na influência da estrutura sobre o transporte sedimentar.
- Correlacionar a eficiência dissipativa da estrutura às condições hidrodinâmicas dominantes.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 1, são apresentados o tema, a delimitação do problema, os objetivos da pesquisa (geral e específicos), a justificativa e a organização geral do trabalho, contextualizando a relevância científica e prática do estudo.

O Capítulo 2 corresponde à Revisão Bibliográfica, na qual são abordados os fundamentos teóricos relacionados à dinâmica costeira, aos processos erosivos, às estruturas de proteção utilizando geotêxteis, bem como aos métodos experimentais aplicados em canais de ondas.

A Metodologia, descrita no Capítulo 3, detalha a montagem do canal experimental, as características físicas das geoformas têxteis, os equipamentos empregados, os parâmetros testados e os procedimentos adotados para a coleta, processamento e análise dos dados.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos nos ensaios experimentais, destacando os cálculos hidrodinâmicos, os padrões de propagação das ondas, o comportamento erosivo e a influência da presença das geoformas têxteis, com análise comparativa aos referenciais teóricos e estudos prévios.

Por fim, o Capítulo 5 reúne as Conclusões, sintetizando os principais achados da pesquisa, suas limitações, as contribuições acadêmicas e aplicadas, além de sugestões para o desenvolvimento de investigações futuras sobre a temática.

2 | Revisão bibliográfica

Este capítulo estabelece os fundamentos conceituais e teóricos que norteiam o presente estudo, com o objetivo de aprofundar a compreensão dos processos hidrossedimentares associados à proteção costeira e avaliar o papel de novas tecnologias, como as geoformas têxteis, na mitigação dos impactos sobre o litoral.

2.1 Importância da proteção costeira

As zonas costeiras configuram-se como ambientes altamente dinâmicos, sujeitos à contínua transformação por forças naturais e intervenções humanas. Processos como a ação das ondas, marés, correntes e ventos interagem com ações antrópicas, como urbanização desordenada, dragagens, construções de infraestrutura e supressão de ecossistemas, provocando alterações significativas na morfologia costeira (Bulhões, 2020; Muehe, 2018).

O equilíbrio sedimentar das faixas litorâneas — isto é, a relação entre o suprimento e a retirada de sedimentos — é crucial para a manutenção das funções ecológicas, sociais e econômicas dessas regiões. A erosão costeira, entendida como a perda líquida de sedimentos e o recuo da linha de costa, compromete diretamente os ecossistemas associados, como dunas, manguezais e recifes, e coloca em risco a infraestrutura urbana e a segurança das populações (Nicholls *et al.*, 2007; Cooper e Pilkey, 2012).

Estima-se que aproximadamente 23% da população mundial habita regiões costeiras a menos de 100 km do mar e abaixo de 100 m de altitude (Small e Nicholls, 2003), o que acentua a vulnerabilidade frente às mudanças climáticas e à elevação do nível do mar. No Brasil, mais de 60% da população reside em municípios litorâneos (PBMC, 2016), onde a pressão urbana sobre os sistemas costeiros e a escassez de planejamento ambiental tornam ainda mais urgente a implementação de medidas de proteção eficazes.

A proteção costeira pode ser compreendida como o conjunto de estratégias destinadas a reduzir os efeitos da erosão marinha e preservar a estabilidade da linha de costa. Tais estratégias abrangem desde intervenções estruturais, como espigões, molhes, quebra-mares e enrocamentos, até abordagens não estruturais que privilegiam a conservação ambiental, como a revegetação, a recuperação de dunas e o ordenamento territorial (Alfredini e Arasaki, 2009; Bulhões, 2020).

Nos últimos anos, tem-se ampliado a discussão sobre a eficiência das soluções adotadas, considerando que nenhuma intervenção é capaz de eliminar completamente os processos erosivos, sendo possível apenas atenuá-los e prolongar a estabilidade costeira (Brayshaw e Lemckert, 2012). Assim, a escolha de alternativas técnicas deve considerar fatores como durabilidade das estruturas, custo de implantação e manutenção, impactos ambientais e compatibilidade com a dinâmica costeira local (Souza, 2008; MOCZM, 2013).

Do ponto de vista ambiental, a erosão costeira representa uma ameaça aos ecossistemas marinhos e costeiros, podendo provocar a degradação de habitats críticos, como manguezais, marismas e recifes de coral. Tais ambientes fornecem serviços ecossistêmicos essenciais, como a proteção contra inundações, o sequestro de carbono e a manutenção da biodiversidade (Temmerman *et al.*, 2013; Barbier *et al.*, 2011).

No aspecto socioeconômico, os impactos da erosão refletem-se na perda de bens públicos e privados, na interrupção de atividades econômicas — sobretudo o turismo e a pesca — e na elevação dos custos com manutenção de infraestrutura e reassentamento populacional (Hallegatte *et al.*, 2013). Estimativas apontam que, globalmente, mais de 28.000 km² de áreas costeiras foram erodidas nos últimos 30 anos (Mentaschi *et al.*, 2018), evidenciando a escala e a complexidade do problema.

Além disso, o desequilíbrio sedimentar e a deposição inadequada de sedimentos em áreas de reservatórios costeiros afetam negativamente a qualidade da água, a geração de energia hidrelétrica e a navegação (Obialor *et al.*, 2019). Portanto, o planejamento e a execução de medidas de proteção costeira devem ser embasados em estudos científicos que integrem conhecimento interdisciplinar, modelos físicos e socioeconômicos, e perspectivas de longo prazo frente aos cenários de mudança climática.

Nesse sentido, ganha destaque o conceito de resiliência costeira, entendido como a capacidade dos sistemas naturais e sociais de absorver perturbações, adaptar-se às mudanças e recuperar-se após eventos extremos. A promoção dessa resiliência exige não apenas a implementação de infraestruturas eficazes, mas também a adoção de estratégias baseadas na natureza, que respeitem os processos naturais e promovam benefícios múltiplos (Furtado e Woodroffe, 2021; Sutton-Grier *et al.*, 2015).

Portanto, a importância da proteção costeira reside não apenas na contenção física da erosão, mas na construção de um modelo integrado de gestão litorânea que concilie desenvolvimento humano, conservação ambiental e adaptação climática.

2.2 Processos erosivos em zonas costeiras

A erosão costeira é um processo morfodinâmico natural, caracterizado pela remoção, transporte e redistribuição de sedimentos da linha de costa sob ação de ondas, marés, ventos e correntes. Embora intrínseco à dinâmica litorânea, torna-se problemático quando compromete a integridade ecológica e estrutural das zonas costeiras urbanizadas (Oh e Shin, 2006; Nicholls *et al.*, 2007).

A erosão costeira é um processo morfodinâmico natural, resultante do desequilíbrio no balanço sedimentar (Bosom; JIMENEZ, 2010; MENEZES; PEREIRA; GONÇALVES, 2018) de um determinado trecho da linha de costa, sendo caracterizado pela remoção, transporte e redistribuição de sedimentos sob a ação de agentes marinhos e atmosféricos, como ondas, marés, ventos e correntes litorâneas (Bulhões, 2020; Nicholls *et al.*, 2007). Embora seja um fenômeno intrínseco à dinâmica litorânea, a erosão adquire

caráter problemático quando interfere na estabilidade de ecossistemas costeiros e compromete a segurança de estruturas urbanas e a integridade de atividades socioeconômicas localizadas em zonas costeiras.

O balanço sedimentar pode ser definido como a diferença, em volume, entre o suprimento e a supressão de sedimentos em um segmento costeiro durante um intervalo de tempo (Figura 1). Quando o suprimento excede a perda, o sistema apresenta balanço sedimentar positivo, resultando em acréscimo ou progradação da linha de costa. Por outro lado, quando predomina a perda, o sistema entra em balanço sedimentar negativo, levando à erosão e ao recuo da linha de costa (Bulhões, 2020).

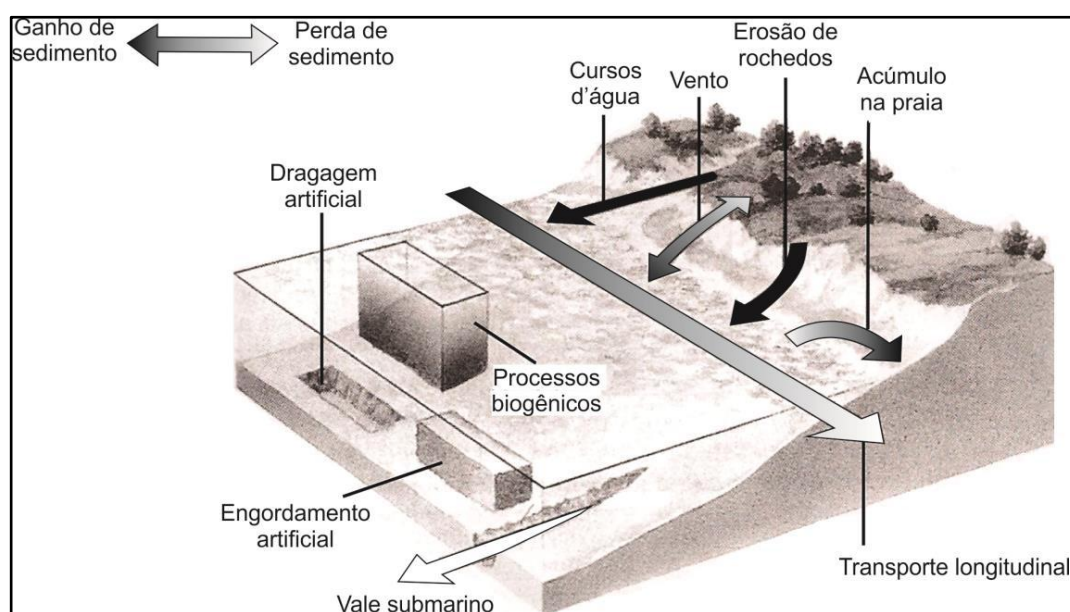


Figura 1 - Balanço sedimentar na zona litorânea. Fonte: Alfredini e Arasaki (2009).

O principal agente físico responsável pela erosão em ambientes costeiros é o impacto das ondas, que atuam por processos de abrasão, turbulência e cisalhamento. Durante eventos de alta energia, como ressacas, tempestades tropicais e ciclones extratropicais, as ondas provocam a suspensão de partículas e a remoção do material arenoso da faixa praial, muitas vezes em curtos períodos de tempo (Oh e Shin, 2006).

A energia das ondas ao atingirem áreas rasas sofre transformação devido à interação com o relevo submarino, gerando os fenômenos de refração, difração, rebentação e reflexão (Figura 2). A rebentação mergulhante, em particular, exerce forças hidráulicas intensas, promovendo a erosão da base de falésias e taludes. O tipo de rebentação pode ser caracterizado pelo parâmetro de Iribarren (ξ), que depende da inclinação do talude e da declividade da onda, sendo crucial para o dimensionamento de estruturas de proteção (Bessa, 2017).

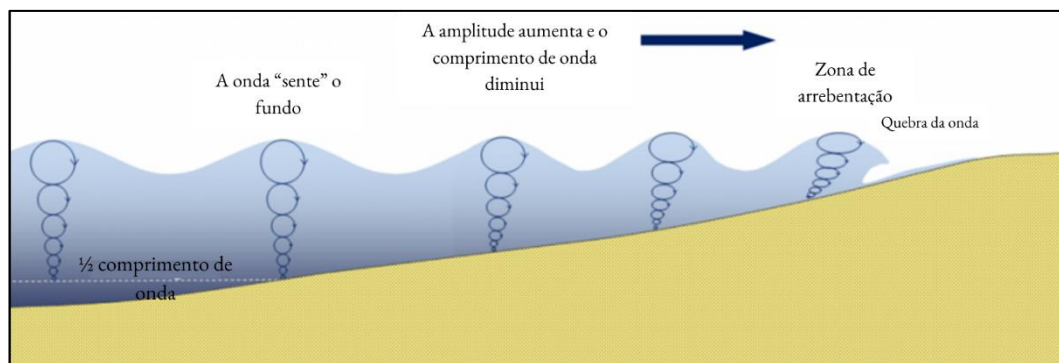


Figura 2 - À medida que as ondas se aproximam da costa, elas "tocam o fundo" quando a profundidade é igual à metade do comprimento de onda, e a onda começa a desacelerar. Ao desacelerar, o comprimento de onda diminui e a altura da onda aumenta, até que ela quebre (Steven Earle, 2015).

Além disso, o transporte sedimentar ocorre de forma longitudinal, ao longo da linha de costa, e transversal, entre a zona de arrebatamento e a praia seca. A direção dominante das ondas, em geral oblíqua à costa, gera uma corrente de deriva litorânea que redistribui os sedimentos, promovendo erosão em trechos a jusante de estruturas e acúmulo em outras áreas (Alfredini e Arasaki, 2009).

As mudanças climáticas acentuam os processos erosivos por meio da elevação do nível médio do mar, aumento da frequência de tempestades severas e intensificação das marés de tempestade (Hinkel *et al.*, 2013). O aumento da energia das ondas, estimado em 5% nas últimas três décadas no oceano Sul (Young e Ribal, 2019), contribui diretamente para a maior incidência de galgamentos, inundações costeiras e instabilização de estruturas.

Bulhões (2020) destaca que eventos extremos, como ciclones e tempestades intensificadas pelo fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), podem causar erosão súbita e significativa, especialmente em regiões de baixa altitude. Embora esses eventos sejam episódicos, seus impactos acumulados podem alterar permanentemente a morfologia costeira.

A urbanização acelerada e desordenada, a supressão de dunas e vegetação nativa, e a construção de obras rígidas de engenharia costeira (como molhes e espigões) são responsáveis por mudanças drásticas no equilíbrio sedimentar (Cooper e Pilkey, 2012; Muehe, 2018). Tais intervenções frequentemente interrompem o fluxo natural de sedimentos, promovendo a erosão a jusante (sotamar) dessas estruturas, como demonstrado em Quissamã (RJ), onde houve assimetria de até 290 m na linha de costa ao longo de 30 anos (Bulhões, 2019).

Outros fatores antrópicos relevantes incluem a construção de barragens e a mineração de areias nos cursos fluviais, que reduzem drasticamente o aporte de sedimentos aos deltas e sistemas estuarinos, contribuindo para a erosão das praias arenosas adjacentes (Luijendijk *et al.*, 2018). No Brasil, esse processo é agravado pela ocupação urbana em

faixas ativas da praia, impedindo o recuo natural da linha de costa e comprometendo a resiliência do ambiente costeiro (Muehe, 2018).

Os efeitos da erosão costeira vão além da perda de material sedimentar. Do ponto de vista físico, há riscos significativos de colapso estrutural de edificações, exposição de fundações, desmoronamento de vias públicas e comprometimento de portos e canais de navegação devido ao assoreamento.

No âmbito socioeconômico, destaca-se a perda de terrenos com alto valor imobiliário, a redução da atratividade turística e o impacto sobre comunidades que dependem da pesca e do comércio local. Monitoramentos realizados no Brasil entre 2013 e 2018 revelaram que o índice de trechos em erosão passou de 40% para 60%, afetando principalmente as regiões Norte e Nordeste (PGGM, 2021; Amorim *et al.*, 2023).

A Figura 3 ilustra um caso típico de erosão impactando a infraestrutura rodoviária na Coreia do Sul e a Figura 4 evidencia os danos recorrentes na Praia da Macumba (RJ), onde estruturas colapsaram cinco vezes em 15 anos, enquanto na Figura 5 observa-se o recuo expressivo da linha de praia na Coreia do Sul, evidenciando os efeitos acumulados de erosão costeira sobre uma área previamente urbanizada. Esses casos exemplificam como a ausência de políticas integradas de gestão costeira e o desprezo pelas faixas de amortecimento natural aumentam os custos de manutenção e recuperação de infraestrutura pública e privada.



Figura 3 – Erosão costeira impactando infraestrutura rodoviária of east coast of Korea (Young-Jin beach). Fonte: Adaptado de Souza *et al.* (2005).



Figura 4 - Erosão Costeira e destruição de infraestrutura pública e privada em área urbana após tempestade, Praia da Macumba, Rio de Janeiro, RJ. Em 15 anos tal estrutura colapsou ao menos cinco vezes. Fonte: Thiago Pereira, 2017 retirado de Muehe, D.(2020).



Figura 5 – Erosão da linha costeira do Leste da Coreia (Young-Jin beach). Fonte: Oh e Shin, 2006.

2.3 Impactos ambientais: degradação de ecossistemas costeiros

Os ecossistemas costeiros constituem ambientes complexos e altamente dinâmicos, cuja estabilidade depende diretamente do equilíbrio sedimentar e das condições hidrodinâmicas locais. A erosão costeira, ao alterar esse equilíbrio, provoca transformações significativas que afetam tanto a estrutura física quanto a funcionalidade ecológica desses sistemas. A perda de sedimentos, a elevação do nível do mar e as intervenções humanas comprometem a integridade dos habitats, gerando impactos cumulativos e, por vezes, irreversíveis (Bulhões, 2020; Lopes *et al.*, 2020).

Tais impactos ambientais não se restringem à retirada de material arenoso, mas envolvem uma série de processos que degradam ecossistemas sensíveis, afetam a biodiversidade marinha e terrestre e reduzem os serviços ecossistêmicos oferecidos pelas zonas costeiras — tais como proteção contra tempestades, regulação hídrica e retenção de poluentes (Muehe, 2013; Silva *et al.*, 2019).

Entre os ecossistemas mais vulneráveis aos efeitos da erosão estão os manguezais, recifes de coral e dunas. Os manguezais, localizados em regiões tropicais e subtropicais, são ambientes de transição entre os meios fluvial e marinho, com elevada produtividade biológica e funções ecológicas fundamentais. Ao atuarem como berçários naturais e filtros de poluentes, contribuem para a manutenção da qualidade da água e da biodiversidade costeira. No entanto, alterações na dinâmica sedimentar, causadas pela erosão costeira, podem levar à submersão desses habitats ou ao assoreamento dos estuários, modificando a salinidade e a oxigenação da água e prejudicando espécies adaptadas a condições ambientais específicas (Muehe, 2013).

De maneira semelhante, os recifes de coral também sofrem impactos expressivos. O aporte de sedimentos finos em suspensão — resultante da erosão de encostas e da destruição de dunas — eleva a turbidez da água, reduzindo a penetração de luz solar essencial à fotossíntese dos organismos simbiotes presentes nos corais. Esse processo, aliado à acidificação dos oceanos e ao aumento da temperatura da água, acelera o branqueamento e a mortalidade dos recifes, comprometendo não apenas a biodiversidade associada, mas também serviços como a proteção natural das costas e a sustentação de atividades pesqueiras tradicionais (Nicholls *et al.*, 2007; Furtado e Woodroffe, 2021).

Ouro exemplo emblemático de vulnerabilidade ambiental são as dunas costeiras. Essas formações sedimentares, moldadas pela ação combinada do vento e da vegetação, funcionam como barreiras naturais contra o avanço das marés e das ondas. Contudo, sua integridade tem sido severamente afetada por processos erosivos associados à urbanização desordenada e à supressão da cobertura vegetal nativa, o que reduz a capacidade de regeneração e aumenta a suscetibilidade da costa a eventos extremos. A Figura 6 apresenta registros fotográficos da erosão de dunas no município de Imbé (RS), onde é possível observar a formação de escarpas acentuadas e a perda da vegetação estabilizadora. Essas alterações comprometem não apenas a estrutura física da faixa litorânea, mas também a fauna e a flora associadas a esse bioma.

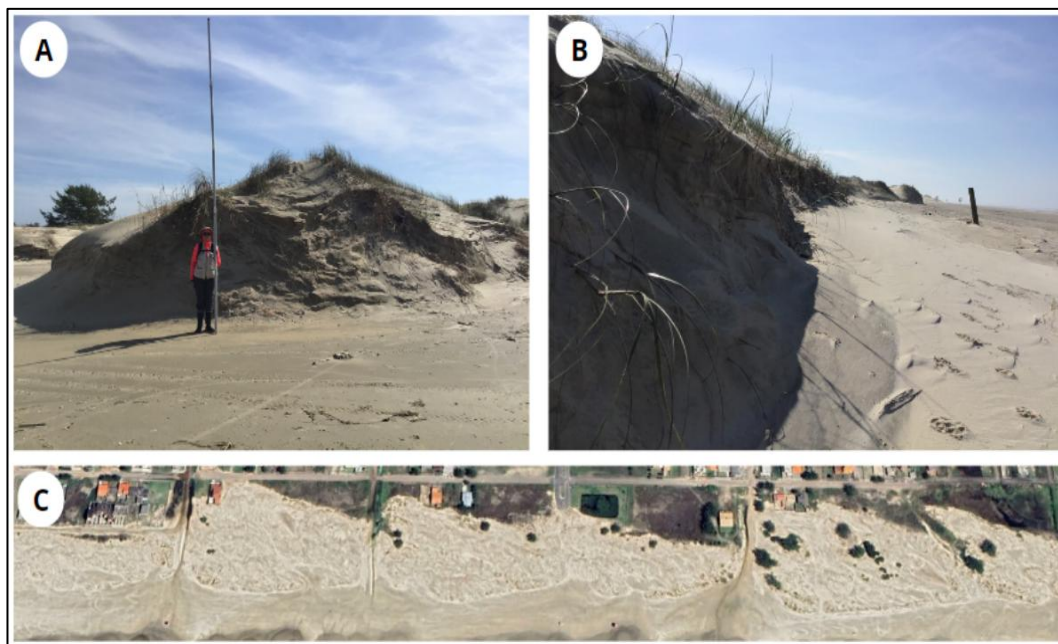


Figura 6 - Registros fotográficos em Imbé (RS). A: fotografia evidenciando as escarpas erosivas altas. B: foto para evidenciar a declividade acentuada das escarpas erosivas do trecho; e C: imagem de satélite do Google Earth evidenciando a baixa cobertura impenetrável dentro dos 200 m adjacentes ao mar. Fonte: Barros (2023).

A mitigação dos impactos ambientais provocados pela erosão costeira demanda estratégias integradas e sustentáveis, capazes de aliar a proteção de infraestruturas humanas à conservação da biodiversidade. No entanto, essa abordagem encontra diversos obstáculos:

a) Custos elevados de intervenção

A implementação de soluções técnicas como engordamento artificial de praias, realocação de infraestruturas ou restauração ecológica demanda investimentos significativos. Isso limita a aplicação de medidas eficazes, especialmente em países em desenvolvimento ou regiões com orçamento público restrito (Amrouni *et al.*, 2024).

b) Sustentabilidade das obras de engenharia costeira

Embora estruturas rígidas como espigões, molhes e quebra-mares sejam amplamente utilizadas, estas frequentemente transferem os problemas de erosão para trechos adjacentes (efeito de sotamar). Além disso, podem comprometer habitats naturais e modificar irreversivelmente a dinâmica costeira. Por isso, recomenda-se a avaliação prévia dos impactos ambientais, geotécnicos e sociais antes da sua implantação (Brayshaw e Lemckert, 2012; Bulhões, 2020).

c) Intensificação das mudanças climáticas

O aumento do nível médio do mar, associado à intensificação dos eventos extremos como tempestades, ciclones e cheias, reduz a eficácia de soluções tradicionais. Tais alte-

rações exigem a reformulação contínua das estratégias de proteção, incorporando tecnologias adaptativas e baseadas na natureza, como sistemas híbridos e soluções baseadas em ecossistemas (Furtado e Woodroffe, 2021).

2.4 Tecnologias e estratégias de mitigação para proteção costeira

Diante dos impactos ambientais, sociais e econômicos provocados pela erosão costeira discutidos anteriormente, torna-se indispensável o desenvolvimento de estratégias eficazes para mitigar seus efeitos e preservar a estabilidade das zonas litorâneas. Essas estratégias podem ser classificadas em duas categorias principais: (i) medidas estruturais (*hard engineering*), que envolvem obras físicas voltadas ao controle direto da erosão; e (ii) medidas não estruturais (*soft engineering*), que priorizam a adaptação aos processos naturais e a recuperação ambiental dos ecossistemas costeiros. A escolha entre essas abordagens depende de fatores como a intensidade dos processos erosivos, as características geológicas locais, os impactos ambientais esperados e a viabilidade técnica e econômica (Brayshaw e Lemckert, 2012).

2.4.1 Medidas estruturais: obras rígidas e flexíveis

As medidas estruturais são frequentemente utilizadas em regiões com infraestrutura costeira consolidada ou elevada vulnerabilidade (Figura 7). Essas intervenções físicas, também denominadas obras de proteção e recuperação costeira, têm como principal objetivo atuar diretamente sobre a ação das ondas e o transporte de sedimentos, favorecendo a estabilização ou a progradação da linha de costa por meio da reflexão das ondas e da retenção e/ou adição de sedimentos (Alfredini, 2005; Klein *et al.*, 2005).

Tais obras podem ser classificadas conforme seu posicionamento em relação à linha de costa, paralelas ou perpendiculares, bem como em relação ao seu comportamento estrutural, sendo divididas em rígidas (como espigões e quebra-mares) ou flexíveis (como geobags e mantas drenantes). Estruturas rígidas tendem a apresentar maior durabilidade e resistência, mas frequentemente provocam impactos significativos nos processos naturais costeiros. Já as estruturas flexíveis, embora menos duráveis, apresentam maior capacidade de adaptação às dinâmicas ambientais, sendo consideradas alternativas menos intrusivas.

As obras estruturais podem ser empregadas tanto para proteger sistemas naturais — como falésias, dunas, manguezais e praias, promovendo a manutenção da zonação morfológica e biótica — quanto para salvaguardar infraestruturas e construções humanas situadas na faixa litorânea (USACE, 2002b). No entanto, fatores como o tamanho, a forma, a orientação, o tipo de material utilizado, bem como a idade e o estado de conservação das estruturas, influenciam diretamente a capacidade dos ecossistemas costeiros de evoluírem naturalmente (Nordstrom, 2014).

Tradicionalmente, os modelos de classificação das obras costeiras consideram apenas o tipo ou o peso dos materiais utilizados, sem uma análise mais aprofundada sobre o desempenho estrutural das intervenções (Klein *et al.*, 2009).

Portanto, as medidas estruturais, embora muitas vezes indispensáveis à proteção costeira, devem ser concebidas com base em princípios de sustentabilidade ambiental, observando não apenas sua eficácia técnica, mas também os impactos ecológicos e paisagísticos associados à sua implementação.



Figura 7 – Exemplo esquemático de aplicações de estruturas rígidas. Fonte: Souza (2023)

A seguir, apresentam-se exemplos representativos de diferentes categorias de obras estruturais, implementadas em contextos variados, com finalidades específicas de proteção costeira:

Espigões (Groynes)

São estruturas perpendiculares à linha de costa, projetadas para interceptar o transporte longitudinal de sedimentos e promover o acúmulo de areia em setores específicos da praia. No entanto, podem intensificar a erosão a jusante, ao interromper a deriva litorânea (Figura 8).



Figura 8 - O espigão do Náutico, em Fortaleza, concluído em 2016. Fonte: Nilton Alves

Quebra-mares (Breakwaters)

Construídos paralelamente à linha de costa, os quebra-mares reduzem a energia das ondas, protegendo portos, marinas e áreas urbanizadas (Figura 9). Contudo, causam alterações na dinâmica sedimentar, podendo gerar assoreamento nas áreas protegidas.



Figura 9 - Vista aérea do Quebra-Mar que protege a planta industrial da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis, Rio de Janeiro. Fonte: Eletro-nuclear (acessado em: 13/02/2025).

Molhes (Jetties)

Localizados na entrada de canais, os molhes são projetados para estabilizar bocas de rios e portos (Figura 10). Podem induzir alterações duradouras no fluxo sedimentar e exigir reequilíbrio morfológico em áreas vizinhas.



Figura 10 - Molhes da Barra, Rio Grande, Brasil. Fonte: Acervo Prefeitura Municipal de Rio Grande, acessado em 2025.

Revestimentos e enrocamentos

Aplicados em encostas e falésias, consistem na instalação de blocos de rocha, concreto ou geoestruturas para dissipar a energia das ondas (Figura 11). Embora eficazes localmente, podem comprometer a paisagem e provocar erosão na base da estrutura por reflexão de energia.



Figura 11 - Dique coberto por grama, concreto e protegido por enrocamento na Holanda. Fonte: Kobus van Leer (2019).

Geossistemas (Geossintéticos)

O uso de geossintéticos — como geotubos, geocontainers e geobags (Figura 12) — tem se mostrado eficaz na contenção costeira. Eles funcionam como barreiras flexíveis, capazes de reter sedimentos e dissipar a energia das ondas.



Figura 12 - Espigão Guia-Corrente construído com geotêxteis (geobags) para interromper o transporte de sedimentos, fixar a embocadura de um canal e fornecer acesso à uma marina em Armação de Búzios, RJ. Fonte: Foto de Eduardo Bulhões, 2015.

2.4.2 Medidas não estruturais: soluções naturais e adaptativas

As abordagens não estruturais valorizam a adaptação à dinâmica costeira, priorizando a restauração ecológica e o uso de soluções baseadas na natureza.

Principais técnicas:

Alimentação artificial de praias: Adição de sedimentos dragados para recompor o perfil da praia (Figura 13).

Restauração de dunas e vegetação: Replanteio de espécies nativas para estabilização.

Zonamento e recuo planejado: Reordenamento territorial para afastar infraestrutura das áreas de risco.

Educação ambiental: Sensibilização da população sobre os riscos e medidas preventivas.



Figura 13 - Comparativo da Praia de Copacabana antes e depois do projeto de alimentação artificial. À esquerda, registro fotográfico de evento extremo com ondas de tempestade que destruíram o calçadão (Leme, década de 1920). À direita, vista panorâmica da praia após a execução da obra, em 2006. Fontes: à esquerda, Fundação Biblioteca Nacional; à direita, Renata Rocha (Wikimedia Commons).

2.5 Geossintéticos e sua Aplicação na Engenharia Costeira

e acordo com a norma ABNT NBR ISO 10318, e conforme reforçado pela Associação Brasileira de Geossintéticos (2018), o termo geossintético designa produtos industrializados compostos total ou parcialmente por polímeros sintéticos ou naturais. Esses materiais podem ser apresentados em forma de mantas, tiras, estruturas tubulares ou tridimensionais, sendo amplamente empregados em diversas áreas da engenharia civil, geotécnica, ambiental e costeira (Palmeira *et al.*, 2020).

Na engenharia costeira, os geossintéticos têm ganhado destaque pelas suas múltiplas funções: reforço estrutural, quebra-mar (Figura 14), separação, filtração, drenagem, proteção contra erosão e impermeabilização, contribuindo para soluções mais sustentáveis e menos invasivas que estruturas rígidas tradicionais, como enrocamentos e espigões de concreto (Nogueira, 2018; Gomes, 2020). Sua elevada durabilidade, flexibilidade e adaptabilidade a diferentes condições hidrodinâmicas tornam essas soluções ideais para ambientes sujeitos à ação de ondas, marés e correntes.

Além disso, os avanços recentes na produção e caracterização de materiais poliméricos permitem o emprego de geossintéticos com melhor desempenho mecânico, alta resistência à tração, resistência química e estabilidade a longo prazo, inclusive em ambientes marinhos agressivos (Greenwood *et al.*, 2012).

A seleção do tipo de geossintético para obras costeiras depende de variáveis como o tipo de solo, o nível de energia das ondas, a profundidade da instalação e os objetivos específicos da intervenção. Entre os principais produtos utilizados na engenharia costeira, destacam-se:

Geotêxteis (tecidos e não tecidos): Aplicados na separação, filtração e proteção de solos contra erosão. Sua flexibilidade e permeabilidade permitem o uso em estruturas dinâmicas, como barreiras, colchões e geotubos.

Geogrelhas: Empregadas no reforço de fundações e na estabilização de camadas submetidas a tensões horizontais, especialmente em taludes costeiros.

Geocélulas: Estruturas celulares tridimensionais preenchidas com solo ou concreto para contenção e estabilização de taludes em margens de rios ou encostas marinhas.

Geomantas e biomantas: Utilizadas na proteção superficial de encostas e na recuperação de vegetação em áreas expostas à ação das águas.

Geocompostos: Combinação de dois ou mais geossintéticos (por exemplo, geotêxtil com geonet ou geomembrana), oferecendo desempenho múltiplo como drenagem e barreira hidráulica.

Geoformas têxteis tubulares (geotubos, geossacos, geocontainers): Aplicações estruturais temporárias ou permanentes com função de desaguoamento, proteção costeira, retenção de sedimentos e reforço de dunas (Vertematti, 2015).



Figura 14 – Forma têxtil tubular como estrutura de quebra-mar. Fonte: Wilke *et al.* (2015b).

Entre as aplicações mais promissoras dos geossintéticos na engenharia costeira destacam-se as Formas Têxteis Tubulares (FTT), objeto de aprofundamento na subseção a seguir.

2.5.1 Formas Têxteis Tubulares (FTT)

As Formas Têxteis Tubulares (FTT), também denominadas geotubos, geoformas, tubos de geotêxteis, espigões ou salsichões, são estruturas tubulares fabricadas com geossintéticos, com diâmetros que variam de um a vários metros e comprimento teórica-

mente indefinido. Essas estruturas podem ser preenchidas com ar, água ou materiais sólidos como areia e argamassa, sendo aplicadas em diferentes contextos de engenharia, notadamente na contenção de processos erosivos em ambientes fluviais e marinhos, bem como na estabilização de taludes (Koffler *et al.*, 2008; Wilke *et al.*, 2015a). As principais componentes de um tubo de geotêxtil (Figura 15) compreendem a estrutura tubular em si, a tela de proteção contra erosão, os elementos de fixação e o orifício de entrada para o material de preenchimento.

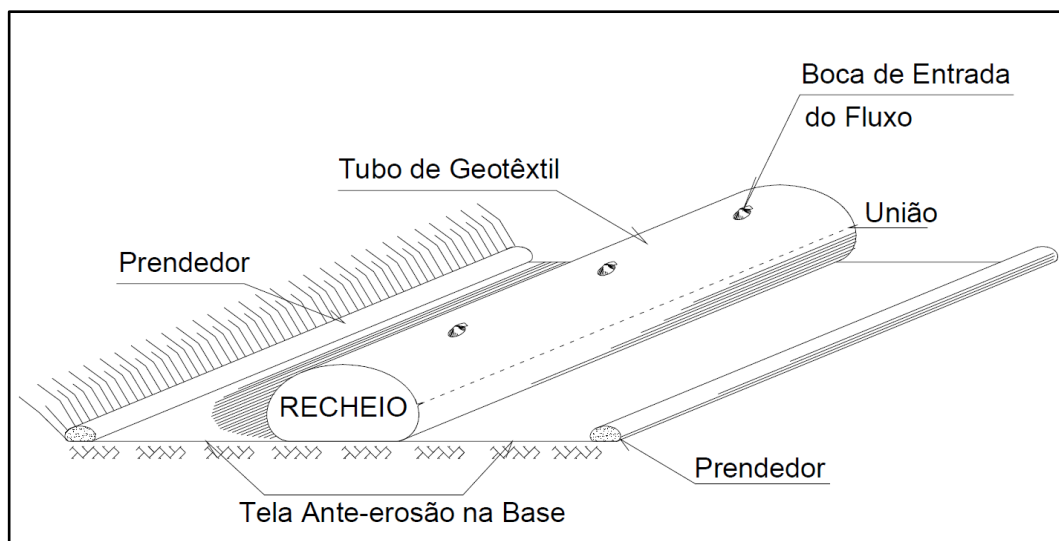


Figura 15 - Vista Isométrica de um Tubo de Geotêxtil. Fonte: Ortiz *et al.* (2013).

Segundo Ortiz *et al.* (2003), o tubo de geotêxtil propriamente dito constitui o núcleo da estrutura tubular, sendo confeccionado a partir da costura das bordas laterais de um ou mais rolos de geotêxtil, assim como de suas extremidades inicial e final, resultando em uma estrutura contínua e alongada. Essa confecção pode ocorrer tanto em fábrica quanto no próprio canteiro de obras, dependendo das exigências estabelecidas nas especificações técnicas do projeto.

Quando preenchido, o tubo adquire uma seção transversal que se aproxima de uma elipse, apresentando achatamentos nas superfícies superior e inferior (Ortiz *et al.*, 2003). Em algumas aplicações mais recentes, foram desenvolvidos tubos de geotêxtil sem costura, produzidos com o perímetro exato exigido por projeto.

A escolha do tipo de geotêxtil utilizado leva em consideração os esforços aos quais o material será submetido, tanto durante o enchimento quanto ao longo da vida útil da estrutura, sendo fundamental adotar fatores de segurança adequados que garantam seu desempenho mecânico e sua durabilidade. Associada a essa estrutura tubular, há uma tela de proteção contra erosão posicionada em sua base, composta por um geotêxtil tecido de alta resistência que se estende lateralmente por um ou ambos os lados. Sua função é proteger o solo de fundação contra a escavação provocada pelo fluxo de material durante o enchimento e também contra os efeitos do movimento das ondas (Ortiz *et al.*, 2003).

Para assegurar a estabilidade da tela durante o processo de instalação e operação, utilizam-se prendedores ao longo de sua extensão. Esses elementos são, geralmente, confeccionados com o mesmo geotêxtil da tela, contribuindo para a homogeneidade e eficiência do sistema. O enchimento do tubo ocorre por meio de aberturas localizadas em sua parte superior, conhecidas como bocas de entrada ou portas, que são constituídas por mangas de geotêxtil costuradas à estrutura. Por essas aberturas, o material de preenchimento é introduzido, sendo posteriormente vedadas por meio de costura, colagem ou amarração, conforme previsto no projeto (Ortiz *et al.*, 2003).



Figura 16 – A) Pit Lake, na Alemanha, um projeto de estabilização da margem de um lago; Figura B) New Jersey, Estados Unidos, a estabilização de um litoral com forte processo de erosão costeira; C) Amwaj Islands, Bahrein, foram utilizados 30 km de FTT de 2,6 m de altura na primeira fase do projeto e, em seguida, outra FTT completando uma altura de 3,6 m para formação de um dique para as ilhas artificiais do país; D) Zoutkamp, na Holanda, um projeto de estabilização de taludes em barragem; E) Rabat, Marrocos, 3 FTT de 65 m de comprimento, 15 m de circunferência e 3 m de altura, foram a solução proposta para a Barragem de Sidi Mohamed Ben Abdellah. Fonte: Koffler *et al.* (2008) e Wilke *et al.* (2015a)

O uso dessas estruturas teve origem na Holanda e, com o sucesso alcançado, expandiu-se para outros países (Figura 16), com destaque para projetos executados na Alemanha, Estados Unidos, Bahrein, Marrocos e Brasil. Exemplos notáveis incluem o projeto de estabilização de margens em Pit Lake (Alemanha), contenção costeira em New Jersey (EUA), diques artificiais nas Amwaj Islands (Bahrein), reforço de taludes na barragem de Zoutkamp (Holanda) e estabilização da barragem de Sidi Mohamed Ben Abdellah, em Rabat (Marrocos), com FTTs de grandes dimensões (Koffler *et al.*, 2008; Wilke *et al.*, 2015a).

No Brasil, Bogossian *et al.* (1982) relataram o uso de FTT como alternativa a diques convencionais em Cubatão (SP) e no estuário de São Luís (MA), sendo este último o primeiro caso nacional com preenchimento hidráulico com areia.

As FTT podem ser classificadas como permeáveis, impermeáveis ou infláveis, conforme o tipo de preenchimento e a aplicação. Para projetos de proteção costeira e estabilização de margens, utilizam-se predominantemente FTT permeáveis, preenchidas com areia, argila misturada com cimento ou argamassas (Fowler, 1997; Kim *et al.*, 2004; Alvarez *et al.*, 2007). Já as impermeáveis, preenchidas com lama ou pasta de argila, são recomendadas para controle de inundação, contenção de contaminantes e controle de nível d'água (Szyszkowski e Glockner, 1987; Plaut e Suherman, 1998). As infláveis, por sua vez, utilizam ar e/ou água e têm aplicação em barragens temporárias, vertedouros e estruturas de desvio (Sehgal, 1996).

A geometria e as propriedades das FTT estão diretamente relacionadas ao processo construtivo e ao dimensionamento do projeto. De acordo com Sarti e Larsen (1983), Leshchinsky (1993) e Erchinger (1993), o diâmetro final da estrutura é influenciado por fatores como altura de queda do material e pressão de bombeamento (Figura 17). Quando a altura necessária não pode ser atingida por uma única unidade tubular, é possível realizar o empilhamento de múltiplas FTTs, dispostas em camadas sobrepostas, de forma a atingir o dimensionamento estrutural exigido (Perry e Myers, 1993; Pilarczyk & Zeidler, 1997).

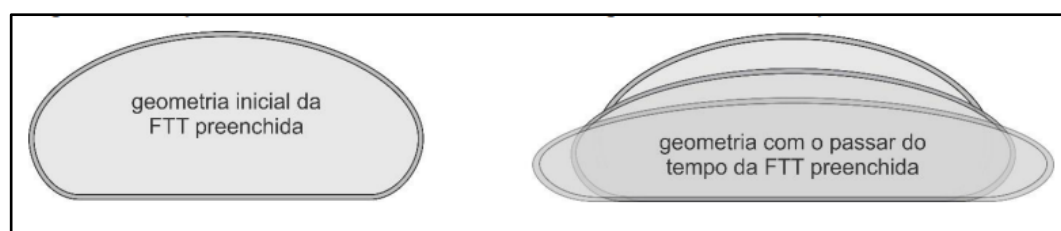


Figura 17 - Esquemático caracterizando a fluência no geotêxtil com o tempo.

Fonte: Filho, J.L. (2016)

As FTT são, em geral, confeccionadas com polipropileno de alta resistência à tração (100 a 200 kN/m), sendo suas extremidades unidas por costura, solda ou colagem. Contudo, a resistência da costura tende a ser inferior à do material geossintético, sendo o dimensionamento pautado nesse parâmetro, esse aspecto torna a costura o ponto crítico no dimensionamento estrutural, devendo ser considerado com fator de segurança adicional (Koerner e Koerner, 2006; Leshchinsky, 1993). Para aumentar a durabilidade, recomenda-se a proteção contra radiação ultravioleta (UV), mediante cobertura com outros geossintéticos (John, 1987), aplicação de revestimentos acrílicos ou de cloreto de polivinila (Gutman, 1979), ou ainda adição de negro de fumo e antioxidantes durante a fabricação (Den Hoedt, 1989; Lodi *et al.*, 2007).

O preenchimento das FTT (Figura 18), especialmente com areia dragada, é uma etapa crítica e pode ocorrer com diferentes níveis de pressão, o que influencia a relação entre largura e altura da estrutura. Segundo Leshchinsky *et al.* (1996), pressões elevadas

tendem a formar seções mais circulares, enquanto pressões baixas resultam em formas mais achatadas.



Figura 18 - FTT vazio e preenchido. Fonte: WILKE *et al.* (2015a)

Do ponto de vista geomecânico, as FTT são submetidas a esforços de tração e punção, tanto durante o enchimento quanto na operação contínua (Figura 19 e 20). As deformações resultantes podem ocorrer de forma imediata ou ao longo do tempo, como no caso da fluência, que é particularmente relevante em projetos com vida útil prolongada (Leshchinsky *et al.*, 1996; Perkins, 2000; Cantré e Saathoff, 2011).

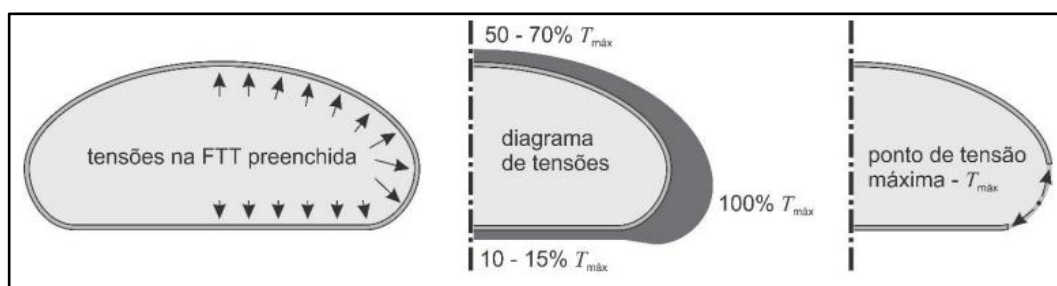


Figura 19 - Esquemático de esforços que mostra o geotêxtil sendo tracionado.

Fonte: Filho, J.L. (2016)

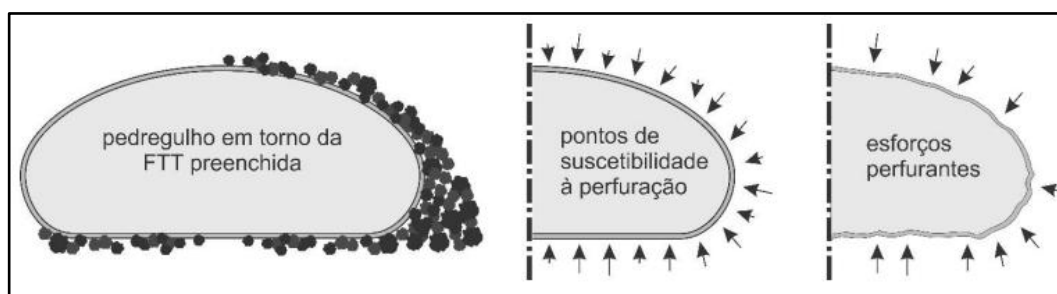


Figura 20 - Esquemático de esforços mostra o puncionamento no geotêxtil por pedregulho. Fonte: Filho, J.L.(2016)

Em aplicações como quebra-mares, é necessário considerar aspectos relacionados ao empilhamento, à estabilidade dos taludes e ao impacto das ondas (Alvarez *et al.*,

2007). Os principais modos de falha estão associados a fatores hidrodinâmicos (Figura 21), como deslizamento, giro e erosão, geotécnicos, como recalque da fundação, instabilidade global e ruptura local, e falhas intrínsecas do próprio material geossintético, como rompimentos e erosões superficiais (Kazimierowicz-Frankowska, 2014; Nishold *et al.*, 2014; Lawson, 2008). A ocorrência de instabilidades é mais provável em estruturas com diâmetro inferior a 2 m ou com preenchimento abaixo de 80% de sua capacidade.

Diversos autores destacam as vantagens das FTT em relação a soluções convencionais de enrocamento, considerando critérios técnicos, ambientais e econômicos. Instalações simples, custos reduzidos e menor impacto ambiental fazem das FTT uma alternativa eficiente em obras costeiras e fluviais (Shi e Oh, 2007; Lee e Douglas, 2012; Heibaum, 2014). Estudos de Armstrong (1976) e Restall *et al.* (2002) mostram que, em alguns projetos, o uso de FTT resultou em redução de até 60% nos custos totais.

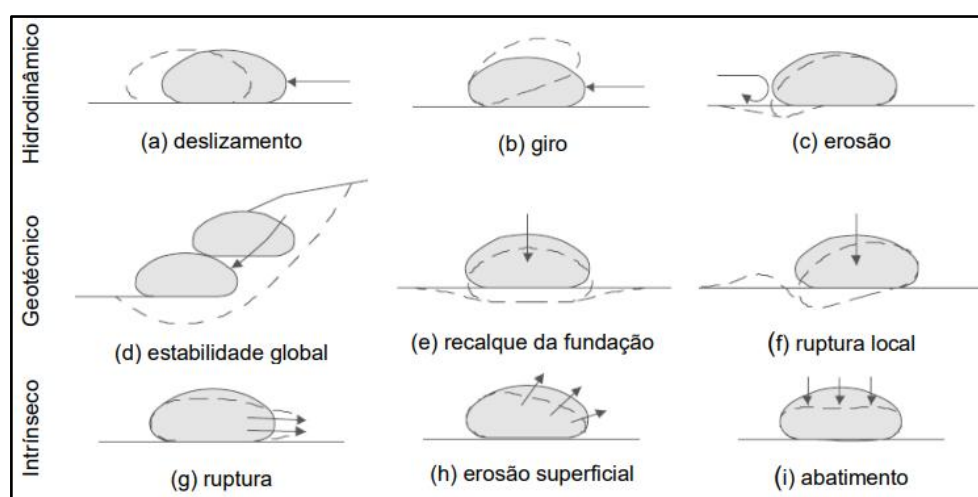


Figura 21 - Ilustrações dos mecanismos de falha de FTT. Fonte: Adaptado de Lawson (2018), modificado por Filho (2016).

A compreensão das propriedades, modos de falha e aplicações práticas das FTT é fundamental para sua incorporação segura em projetos de proteção costeira. Considerando a crescente adoção dessas estruturas como alternativa sustentável às obras rígidas tradicionais, torna-se essencial avaliar, em ambiente controlado, o comportamento dessas formas sob ação de ondas e sua influência sobre o leito sedimentar, objeto central da presente pesquisa.

Nesta dissertação, adota-se a nomenclatura Formas Têxteis Tubulares (FTT) para se referir às estruturas cilíndricas confeccionadas com materiais geossintéticos e preenchidas com areia, utilizadas como elementos de contenção e dissipação de energia em ambiente costeiro. De forma intercambiável e com objetivo descritivo mais abrangente, também se emprega o termo geoformas têxteis, considerando sua aplicação como solução flexível e porosa para mitigação de processos erosivos. Ambas as expressões serão utilizadas ao longo do texto com o propósito de uniformizar a referência à estrutura analisada nos ensaios experimentais.

2.6 Conceitos Fundamentais das Ondas

As ondas representam um dos principais agentes físicos atuantes em ambientes costeiros, exercendo influência direta sobre o transporte sedimentar, a estabilidade das estruturas e a morfologia do litoral. Segundo Dean e Dalrymple (1984), “em um corpo d’água aberto à atmosfera, tudo que está próximo ou dentro dele está sujeito à ação de ondas”. Essas ondas se manifestam em uma ampla variedade de formas e tamanhos, estando diretamente relacionadas à intensidade das forças externas que atuam sobre o fluido. No contexto do presente trabalho, o foco recai sobre um tipo específico de onda: as denominadas ondas de gravidade.

As ondas de gravidade constituem uma resposta do fluido às forças restauradoras da gravidade e da tensão superficial, que tendem a resistir às deformações em sua superfície. Essas ondas são, em geral, geradas pela ação dos ventos sobre a superfície livre da água e se caracterizam por oscilações do nível do mar, acompanhadas por correntes locais, variações de aceleração e flutuações de pressão (Kamphuis, 2000). Tais características fazem com que sejam de particular interesse em estudos de engenharia costeira, oceanografia e hidrodinâmica.

Ao longo da história, diversas teorias foram propostas com o intuito de descrever e modelar o comportamento das ondas de gravidade. Conforme destaca Kamphuis (2000), as abordagens mais amplamente aceitas atualmente baseiam-se na aplicação das equações de movimento e da continuidade para fluidos, complementadas por condições de contorno específicas. Entre essas teorias, destaca-se a Teoria das Ondas de Pequena Amplitude, também conhecida como Teoria Linear, formulada por George Biddell Airy em 1845.

A teoria de ondas lineares (ou teoria de Airy) constitui a base analítica mais empregada no estudo das ondas regulares em engenharia costeira (Figura 22). Essa teoria assume um fluido ideal, ou seja, incompressível, invíscido, homogêneo, e que se comporta de forma irrotacional, o que permite a definição de uma função de potencial de velocidade satisfazendo a equação de Laplace. Além disso, considera-se que as ondas são periódicas, unidimensionais e de pequena amplitude, propagando-se sobre uma lâmina de água com profundidade constante (Dean e Dalrymple, 1991; Sawaragi, 1995).

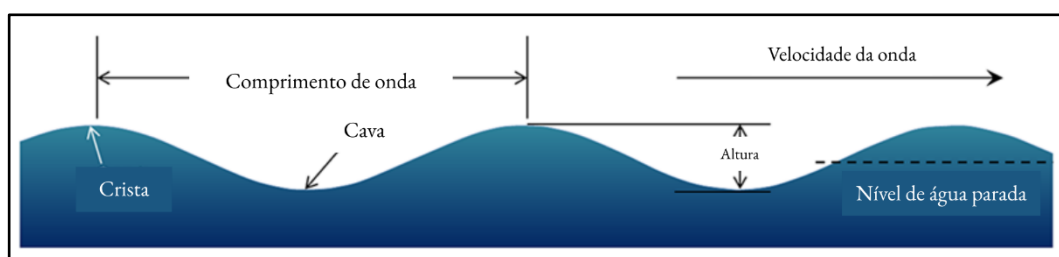


Figura 22 – Componentes básicos da onda (modificado por PW de Steven Earle, 2015).

No âmbito da teoria linear das ondas, a propagação das ondas de gravidade pode ser classificada em três regimes distintos: águas profundas, águas intermediárias e águas rasas. Essa classificação é estabelecida com base na relação adimensional entre a profundidade da água (h) e o comprimento de onda (L), expressa pelo parâmetro h/L , ou alternativamente pelo produto adimensional kh , onde k representa o número de onda ($k = 2\pi/L$). Conforme delineado por Dean e Dalrymple (1991), essa distinção é fundamental para a compreensão dos efeitos físicos predominantes em cada regime, uma vez que a interação entre a onda e o fundo do corpo hídrico varia significativamente de acordo com a profundidade relativa.

A Tabela 1 apresenta os critérios para classificação dos regimes de propagação, bem como as principais características físicas associadas a cada faixa, conforme descrito por Dean e Dalrymple (1991). Em águas profundas ($h/L > 0,5$ ou $kh > \pi$), as órbitas das partículas de água tendem a ser circulares e não há influência significativa do fundo sobre a propagação. À medida que a profundidade relativa diminui, entra-se no regime de águas intermediárias ($0,05 < h/L < 0,5$), no qual as órbitas se tornam elípticas e a dispersão é parcial, evidenciando uma crescente influência do fundo. Por fim, no regime de águas rasas ($h/L < 0,05$ ou $kh < \pi/10$), as órbitas são elípticas e fortemente achatadas, com a propagação ocorrendo de forma não dispersiva e com intensa interação com o fundo.

Tabela 1 – Classificação dos regimes de propagação de ondas segundo kh e h/L .

Fonte: Autor (2025)

Regime de propagação	Faixa de kh	Condição h/L	Características Físicas Principais
Águas Profundas	$kh > \pi$	$\frac{h}{L} > 0,5$	Órbitas circulares, dispersão forte, fundo não influencia.
Águas Intermediárias	$\frac{\pi}{10} < kh < \pi$	$0,05 < \frac{h}{L} < 0,5$	Órbitas elípticas; dispersão parcial; fundo começa a influenciar.
Águas Rasas	$kh < \frac{\pi}{10}$	$\frac{h}{L} < 0,05$	Órbitas elípticas achatadas; não dispersiva; interação forte com o fundo

Essa classificação dos regimes de propagação é de importância central em estudos de engenharia costeira, pois determina a forma como as ondas interagem com estruturas submersas, o fundo do leito e os materiais sedimentares presentes, influenciando diretamente os processos de transporte de sedimentos, erosão e dissipação de energia (Dean & Dalrymple, 1991; Masselink & Hughes, 2003; Mei et al., 2005).

Sob essas premissas, o deslocamento vertical da superfície livre da água, $\eta(x,t)$, de uma onda progressiva bidimensional no plano x-z, pode ser descrito por uma função harmônica do tipo (Dean & Dalrymple, 1991):

$$\eta(x, t) = a \cos(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

onde:

$a = \frac{H}{2}$, é a amplitude da onda (sendo H a altura da onda, distância entre crista e cava),

$k = \frac{2\pi}{L}$, é o número de onda, sendo L o comprimento de onda,

$\omega = \frac{2\pi}{T}$, é a frequência angular, com T sendo o período da onda,

x é a coordenada horizontal,

t é o tempo.

A função de potencial de velocidade, $\phi(x,z,t)$, que satisfaz a equação de Laplace no domínio fluido e respeita as condições de contorno dinâmicas e cinemáticas na superfície livre e no fundo (Dean & Dalrymple, 1991), é expressa por:

$$\phi(x, z, t) = \frac{Hg}{2\omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.2)$$

Neste contexto, a velocidade horizontal das partículas fluidas é dada pela derivada da função potencial em relação a x (Dean e Dalrymple, 1991):

$$u(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{H g k}{2\omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.3)$$

a velocidade vertical:

$$w(x, z, t) = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{H g k}{2\omega} \frac{\sinh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.4)$$

A partir da equação (2.3) é possível determinar sua componente de velocidade máxima.

Sua equação reduzida fica na forma de:

$$U_{\max} = \frac{2\pi H}{2T} = \frac{2a\pi}{T} \quad (2.5)$$

O comprimento de onda está relacionado ao período da onda e à profundidade da água por meio da equação de dispersão, fundamental para a Teoria Linear (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.6)$$

rearranjando,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (2.7)$$

Esta equação demonstra que o comprimento de onda não depende apenas do período, mas também da profundidade (Dean e Dalrymple, 1991). Em águas profundas ($h/L > 0,5$), $\tanh(kh) \sim 1$, e a equação se reduz a:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.8)$$

A celeridade da onda C , definida como a velocidade de propagação da crista da onda (Dean e Dalrymple, 1991), é dada por:

$$C = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (2.9)$$

Já em águas rasas ($h/L < 0,05$), $\tanh(kh) \sim kh$, e a celeridade torna-se função apenas da profundidade:

$$C = \sqrt{gh} \quad (2.10)$$

e sua forma depende da profundidade relativa, como demonstrado acima. Esse comportamento gera o fenômeno de dispersão, no qual ondas de diferentes comprimentos se propagam com diferentes velocidades, levando à organização do mar em trens de ondas conforme se afastam da zona de geração (Soulsby, 1997).

A energia média por unidade de área transportada por uma onda linear é expressa por:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.12)$$

onde ρ é a densidade da água e g a gravidade.

Nos casos em que a razão entre a profundidade da água (h) e o comprimento de onda (L) se situa entre os limites de águas rasas e profundas, define-se a condição de águas intermediárias. Neste regime, a celeridade da onda, o comprimento de onda e outras propriedades físicas tornam-se dependentes tanto da profundidade como do período da onda, exigindo o uso completo da equação de dispersão (Eq. 2.6).

A variação da forma das órbitas das partículas é outro aspecto relevante (Figura 23). Enquanto em águas profundas essas órbitas são circulares e em águas rasas tornam-se elípticas achatadas, em águas intermediárias o movimento particulado assume órbitas levemente elípticas que se atenuam com a profundidade, mas ainda são capazes de interagir com o fundo, o que implica efeitos importantes sobre transporte de sedimentos, pressões dinâmicas em estruturas submersas e transformação de ondas na zona de transição (Dean e Dalrymple, 1991).

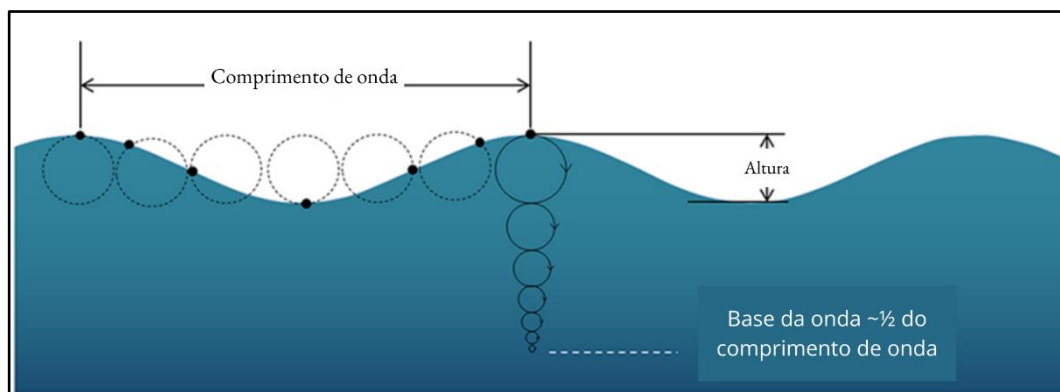


Figura 23 - Representação do movimento orbital das partículas de água dentro de uma onda, com destaque para a variação da forma das órbitas conforme a profundidade. Fonte: Modificado por PW a partir de Steven Earle, 2015.

Portanto, a compreensão do regime intermediário é indispensável para o dimensionamento de obras costeiras, pois a maioria das intervenções ocorre em profundidades relativas entre 5 e 20 m, onde os efeitos da dispersão parcial, refração, amplificação da altura de onda e tensões de cisalhamento no fundo são altamente influenciados por esse regime (Dean & Dalrymple, 1991; Soulsby, 1997; Masselink & Hughes, 2003).

Outro aspecto importante é a órbita das partículas fluídas. Em águas profundas, as partículas descrevem trajetórias aproximadamente circulares com amplitude decrescendo exponencialmente com a profundidade. Em águas rasas, as órbitas tornam-se elípticas e se estendem até o fundo, tornando o movimento mais significativo para processos como transporte de sedimentos e interação com estruturas (Dean & Dalrymple, 1991; Mei *et al.*, 2005; Soulsby, 1997).

A aplicação da teoria linear, apesar de suas simplificações, oferece um conjunto robusto de ferramentas para análises de propagação, refração, difração e interação onda-estrutura em projetos costeiros. Sua validade é restrita a ondas de pequena amplitude e

regimes onde o fluxo permanece irrotacional, mas fornece estimativas confiáveis de velocidade, energia, pressão e esforços em zonas de águas relativamente profundas e moderadamente rasas (Masselink e Hughes, 2003).

2.7 Interação entre ondas e solo

A interação entre ondas e sedimentos constitui um dos processos fundamentais da dinâmica costeira, uma vez que controla a morfologia do fundo, a evolução da linha de costa e a estabilidade de estruturas artificiais. Durante a propagação, as ondas induzem forças hidrodinâmicas que mobilizam sedimentos por meio de cisalhamento no leito, pressão oscilatória e geração de vórtices, promovendo erosão, transporte e deposição de partículas (Dean & Dalrymple, 1991; Nielsen, 1992; Soulsby, 1997).

No caso de estruturas submersas, como Formas Têxteis Tubulares (FTT), estruturas flexíveis e porosas utilizadas para proteção costeira, o escoamento gerado pelas ondas sofre significativa modificação ao redor do corpo, gerando zonas de recirculação e padrões de vórtices. Esses mecanismos influenciam diretamente o processo de erosão localizada (*scour*), a formação de microfeições no leito, como *ripples*, e a distribuição dos esforços sobre a estrutura.

Um dos parâmetros adimensionais clássicos para caracterizar esse tipo de escoamento é o número de Keulegan–Carpenter (KC), que relaciona a escala do movimento oscilatório do fluido com o tamanho da estrutura:

$$KC = \frac{U_{m\acute{a}x}T}{D} \quad (2.13)$$

onde:

$U_{m\acute{a}x}$ é a velocidade máxima do fluido;

D é o diâmetro característico da estrutura;

T é o período da onda;

No presente estudo, essa análise é aplicada a uma estrutura simulada por um semicilindro de PVC revestido com geotêxtil, disposto horizontalmente sobre o leito, com comportamento hidrodinâmico similar ao de dutos semi-enterrados. Essa configuração permite aplicar o modelo de escoamento oscilatório ao redor de corpos semicirculares fixos parcialmente imersos (Sumer & Fredsøe, 2006).

O número KC permite avaliar o predomínio relativo das forças de inércia e de arrasto na equação de Morison. Segundo Patel (1989), os regimes de escoamento oscilatório podem ser classificados da seguinte forma:

- $KC < 5$: Regime dominado por inércia: a aceleração do fluido é a principal força atuante sobre a estrutura. A formação de vórtices é incipiente ou inexistente, com padrão de escoamento simétrico.

- $5 \leq KC \leq 25$: Regime misto: coexistência de forças de arrasto e inércia. O escoamento apresenta instabilidade crescente e formação de vórtices alternados.
- $KC > 25$: Regime dominado por arrasto: o desprendimento de vórtices assimétricos gera esforços hidrodinâmicos significativos sobre a estrutura, com predominância da força de arrasto.

Esses limites são amplamente reconhecidos na literatura técnica e foram propostos por Patel (1989) com base em experimentos de escoamento oscilatório ao redor de cilindros lisos submetidos a ondas periódicas.

Esse número representa, portanto, o deslocamento relativo de uma partícula de fluido ao longo de um ciclo oscilatório, comparado ao diâmetro da estrutura. É mais representativo que a razão H/D , especialmente em profundidades maiores, por incorporar diretamente a cinemática do fluido (Patel, 1989).

A representação de regimes de escoamento (adaptado de Patel, 1989), em função da razão H/D :

- $H/D < 1,5$: regime dominado por inércia, sem desprendimento de vórtices.
- $H/D > 8$: regime dominado por arrasto, com desprendimento de vórtices bem definidos.

A evolução desses regimes de escoamento está associada a alterações importantes na distribuição de tensão de cisalhamento no leito, afetando diretamente a mobilização, instabilidade e reorganização dos sedimentos.

Além do número KC , outro parâmetro relevante é o número de Reynolds (Re), que quantifica os efeitos da viscosidade sobre o escoamento e é dado por:

$$Re = \frac{U_{m\acute{a}x} D}{\nu} \quad (2.14)$$

em que ν representa a viscosidade cinemática do fluido.

De acordo com Sumer e Fredsøe (2006), a transição de regimes de escoamento afeta significativamente os gradientes de pressão e a formação de vórtices ao redor da estrutura, o que pode gerar forças verticais e horizontais capazes de causar instabilidade e erosão localizada na base da FTT.

A aplicação combinada dos números adimensionais KC e Re permite identificar os regimes dominantes ao redor da estrutura e estimar a magnitude relativa das forças de arrasto e inércia. Esses dados são fundamentais para interpretar os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, especialmente nos fenômenos de erosão localizada, escavação sob a estrutura e formação de *sand ripples*.

2.8 Modelagem Física

A modelagem física desempenha um papel fundamental nos ensaios hidrodinâmicos, pois permite a simulação, em escala reduzida, das forças dominantes que ocorrem em ambientes naturais. Segundo Hughes (1993), a eficácia dessa abordagem depende diretamente da aplicação adequada dos critérios de similaridade, que asseguram que os fenômenos observados no modelo sejam representativos do comportamento do protótipo.

Para garantir a fidelidade entre modelo e protótipo, devem ser considerados três tipos principais de semelhança: geométrica, cinemática e dinâmica. A semelhança geométrica implica que todas as dimensões do modelo mantenham a mesma proporção do protótipo, ou seja, o modelo deve ser uma réplica em escala reduzida da configuração espacial original. A semelhança cinemática refere-se à correspondência entre os padrões de movimento dos fluidos, de modo que o rastro de partículas e a relação entre espaço e tempo sejam mantidos proporcionalmente entre o modelo e o protótipo.

Já a semelhança dinâmica incorpora, além das proporções geométricas e cinemáticas, a igualdade entre os efeitos das forças físicas envolvidas, sendo estabelecida por meio de números adimensionais. Os dois mais relevantes nos estudos hidrodinâmicos são o número de Reynolds, que expressa a razão entre forças inerciais e viscosas, e o número de Froude, que relaciona as forças inerciais com as forças gravitacionais. Este último é o mais utilizado na modelagem de obras costeiras e na simulação do comportamento de ondas.

O Número de Froude (Fr) compara forças inerciais com gravitacionais e é dado pela fórmula:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2.15)$$

onde V é a velocidade característica da onda (m/s) e L comprimento característico, geralmente o comprimento de onda (m).

Para que haja similaridade dinâmica entre o modelo e o protótipo, é necessário que os números de Froude sejam iguais em ambos:

$$Fr_p = Fr_m \quad (2.16)$$

Em que Fr_p é o número de Froude do protótipo e Fr_m o número de Froude do modelo.

Essa igualdade leva à relação entre os períodos (T) e comprimentos (L) característicos, conforme a equação:

$$\frac{T_p}{T_m} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} \quad (2.17)$$

Definindo-se as escalas adimensionais como:

$$\frac{T_p}{T_m} = Nt, \text{ que é a Escala de Períodos entre modelo e protótipo;}$$

$$\frac{L_p}{L_m} = Ni, \text{ que é a Escala de Comprimentos entre modelo e protótipo;}$$

E considerando que a gravidade g é constante tanto no modelo quanto no protótipo (ou seja, $Ng = 1$), a equação é simplificada da seguinte forma:

$$Nt = \sqrt{Ni} \quad (2.18)$$

A equação (2.18) expressa a relação fundamental entre a escala de períodos e a escala geométrica, sendo crucial para a aplicação da semelhança dinâmica baseada no número de Froude.

2.9 Erosão localizada ao redor de Estruturas Costeiras

A erosão localizada, comumente denominada *scour*, representa um dos mecanismos mais críticos de instabilidade em estruturas costeiras e offshore. Trata-se da erosão progressiva de sedimentos em torno da base de estruturas submersas, provocada pela intensificação do escoamento e da turbulência local. Esse fenômeno está diretamente relacionado à interação entre ondas, correntes e a geometria das estruturas, sendo especialmente relevante em projetos que envolvem fundações expostas, como geotubos e barreiras submersas, foco do presente estudo. Esse fenômeno é especialmente crítico em zonas onde estruturas interagem com correntes oscilatórias e ondas, alterando o campo de pressões e o perfil de velocidades sobre o leito (Sumer e Fredsøe, 2002; Whitehouse, 1998).

Segundo Sumer e Fredsøe (2002), o *scour* ocorre devido à combinação de mecanismos hidrodinâmicos, como:

- a) contração do escoamento ao redor da estrutura;
- b) formação de vórtices em ferradura na face de montante;
- c) geração de vórtices de esteira à jusante (com ou sem desprendimento);
- d) aumento da turbulência e da tensão de cisalhamento no leito;
- e) variações de pressão induzidas por estagnação e separação de escoamento;
- f) liquefação do solo por gradientes hidráulicos ascendentes.

A Figura 24 apresenta um exemplo típico de autoenterro progressivo de estruturas cilíndricas em ambientes arenosos, evidenciando como o acúmulo de escoamento oscilatório pode induzir escavações progressivas mesmo na ausência de sedimento transportado da montante.

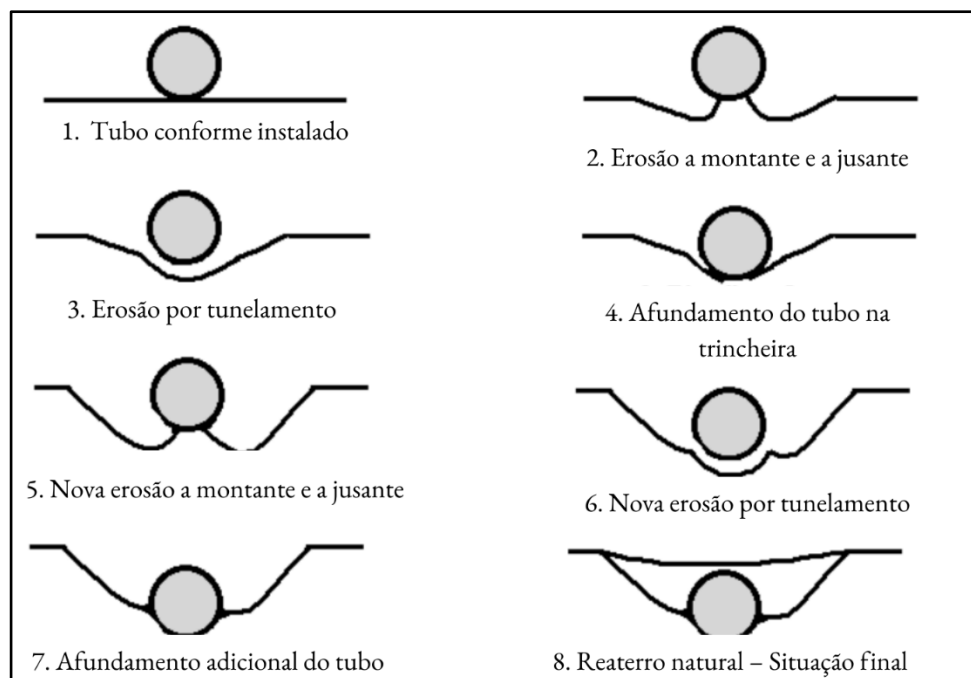


Figura 24 - Seções transversais de dutos mostrando etapas progressivas de auto enterro.

No contexto da engenharia hidráulica, a erosão local ao redor de estruturas submersas, como pilares de pontes ou fundações de barragens, pode ser classificada de acordo com a presença ou ausência de transporte sedimentar no leito do curso d'água. Dois tipos principais são reconhecidos na literatura especializada: erosão em água clara (*clear-water scour*) e erosão em leito ativo (*live-bed scour*).

A erosão em água clara ocorre quando não há transporte sedimentar significativo fora da zona de influência da estrutura. Ou seja, o escoamento tem energia suficiente para remover os sedimentos do fundo, mas não há sedimentos sendo aportados da montante para repor o material erodido. Essa situação é comum quando o leito é composto por materiais mais resistentes ao início do movimento, ou em condições hidrológicas iniciais após um evento de cheia. A ausência de sedimentos disponíveis aumenta a eficiência erosiva do escoamento, resultando em escavações mais profundas ao redor das fundações (Barbhuiya e Dey, 2020).

Por outro lado, a erosão em leito ativo caracteriza-se pela ocorrência de transporte sedimentar contínuo ao longo de todo o leito do rio. Nessa situação, típica de ambientes de alta energia, o escoamento carrega sedimentos em suspensão ou por rolamento, e ainda assim provoca erosão nas imediações da estrutura. O processo é mais dinâmico e

apresenta maior variabilidade espacial e temporal, dado o equilíbrio entre a carga sedimentar e a capacidade de transporte do regime de escoamento (Barbhuiya e Dey, 2020).

A erosão pode ser classificada conforme sua extensão e mecanismo de ativação. Whitehouse (1998) e CIRIA (2007) categorizam o *scour* em três formas principais (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação dos tipos de erosão localizada em estruturas submersas.
Adaptado de Whitehouse (1998) e CIRIA (2007).

Tipo de <i>Scour</i>	Descrição
<i>Scour</i> Local	Cavidades íngremes ao redor de pilares, estacas ou tubos isolados.
<i>Scour</i> Global (<i>Dishpan</i>)	Depressões rasas e amplas em torno de instalações ou grupos de estruturas.
Movimento Global do Leito	Inclui erosão generalizada, deposição e formação de feições de leito.

A compreensão desses mecanismos é fundamental para o correto dimensionamento de estruturas hidráulicas, especialmente no que se refere à profundidade de escavação potencial ao redor das fundações. A escolha de modelos hidráulicos e empíricos apropriados para cada tipo de erosão é crucial na prevenção de falhas estruturais.

A presença de uma estrutura altera significativamente o escoamento, induzindo efeitos de estagnação, aceleração lateral, descida de fluxo e vórtices intensos. Essa perturbação gera regiões de alta tensão de cisalhamento, propícias ao arraste de partículas (Fael, 2007). O desenvolvimento de *scour* pode ser dividido em três fases:

Início do processo (onset): ocorre devido à ação combinada dos vórtices em fenda e da pressão diferencial no leito.

Desenvolvimento (growth): intensificação do escoamento descendente e remoção progressiva de sedimentos.

Equilíbrio (equilibrium): ocorre quando as forças hidrodinâmicas são equilibradas pela morfologia resultante (Sumer e Fredsøe, 2002).

Estudos experimentais como os de Mao (1988) e Bijker e Leeuwestein (1984) identificaram a formação de três vórtices distintos em torno de tubos: vórtice de estagnação, vórtices de esteira e vórtice de túnel (Figura 25). Este último é especialmente crítico, pois representa um processo progressivo e invisível que pode comprometer a integridade da fundação.

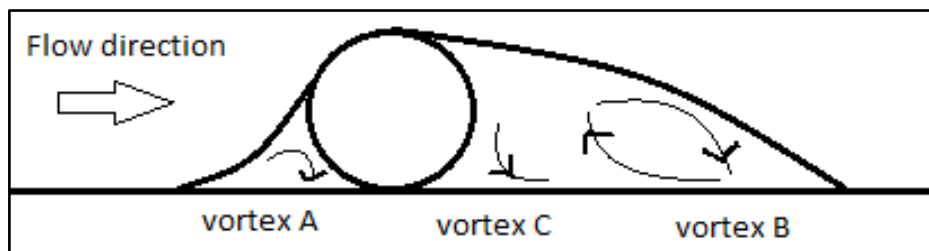


Figura 25 - Esquema dos vórtices e das zonas críticas de scour ao redor de estruturas circulares. Vórtice A: vórtice de estagnação; Vórtice B: vórtices de esteira; Vórtice C: vórtice de túnel (por piping). Fonte: Mao (1988).

2.9.1 Formas têxteis tubulares e erosão localizada

No caso específico de estruturas construídas com geotubos, há desafios particulares relacionados ao seu comportamento frente à erosão. Como apontado por Recio e Oumeraci (2007) e Corvaro *et al.* (2014), a interação entre a onda incidente e o tubo resulta em padrões complexos de escoamento descendente e refluxo, sobretudo quando há variação de maré ou quebra de onda sobre a estrutura.

A instalação de proteções complementares, como telas de geotêxtil (*scour aprons*), é prática comum para mitigar o início de *scour* (Figura 26). Tais proteções visam aumentar a resistência superficial, estabilizar o fundo e reduzir o impacto direto do fluxo sobre o leito (Pilarczyk, 2008; Whitehouse *et al.*, 2011).

A análise experimental com semicilindros de PVC revestidos com geotêxtil, simulando geotubos preenchidos com areia, representa uma abordagem válida para estudar o comportamento frente ao *scour*. Como apontado por Kim *et al.* (2013) e van Steeg *et al.* (2011), a estabilidade de geotubos depende fortemente da proteção de base, da profundidade de instalação e do clima de ondas local.

Estudos recentes com modelagem numérica CFD-DEM (Ma *et al.*, 2022; Guan *et al.*, 2022) permitem analisar com mais detalhe a interação fluido-sedimento ao redor de estruturas. Essa abordagem permite prever o comportamento de partículas individuais e identificar a contribuição de vórtices e gradientes de pressão para o início do processo erosivo.

A erosão localizada é um dos principais fatores de instabilidade de estruturas costeiras, sobretudo em ambientes dinâmicos com ondas oscilatórias. A compreensão dos mecanismos hidrodinâmicos, aliada ao uso de soluções construtivas adequadas como geotubos protegidos com *apron* (traduzidas como aventais, mantas utilizadas na base das FTT's), é fundamental para o desempenho a longo prazo de obras de proteção costeira.

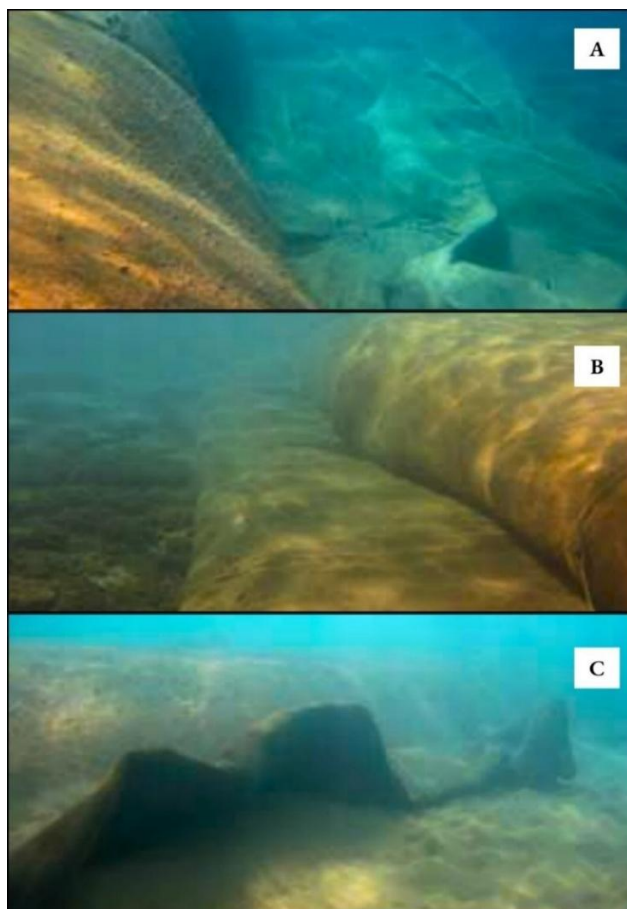


Figura 26 – Observação durante a construção de um tubo de grande diâmetro em geossintéticos, colocado na posição correta, no entanto apresentando dificuldades de instalação do tapete ante erosão e os pequenos tubos de ancoragem em Toscana na Italia. A) O tapete ante erosão com tubo de ancoragem vazio (quebrado); B) Bom desempenho do tapete ante erosão na área protegida; C) Tapete ante erosão flutuante; Fonte: Aminti *et al* (2010)

2.9.2 Liquefação

Além da erosão por cisalhamento direto, outro mecanismo relevante de instabilidade é a liquefação do solo, cuja ocorrência pode potencializar significativamente os efeitos do *scour* ao comprometer a resistência interna do material sedimentar.

A liquefação é um fenômeno de instabilidade que ocorre em solos saturados e não coesivos submetidos a carregamentos dinâmicos, como terremotos ou, no caso de ambientes costeiros, sob ação de ondas. Durante a liquefação, a resistência ao cisalhamento do solo diminui drasticamente devido ao aumento da pressão de poro, levando à perda de sustentação estrutural. Essa condição pode resultar no colapso de fundações ou no afundamento de elementos individuais, como contêineres de areia confeccionados com geotêxteis (Sumer *et al.*, 1999).

Além disso, a liquefação tem um papel indireto, mas significativo no agravamento da erosão localizada (*scour*), pois reduz a coesão interna do solo e facilita o transporte sedimentar sob ação hidrodinâmica (Sumer e Fredsøe, 2002).

A liquefação em ambientes marinhos ocorre predominantemente por dois mecanismos distintos:

Liquefação residual: resulta do acúmulo progressivo de poropressão no solo ao longo do tempo, geralmente em resposta à ação repetitiva de ondas. À medida que as partículas do solo são submetidas a tensões de cisalhamento, a reorganização dos grãos provoca uma redução do volume dos vazios. Se a drenagem for limitada, como ocorre em solos finos, a poropressão aumenta até atingir o peso submerso do solo, levando à liquefação.

Liquefação momentânea: ocorre de forma súbita e cíclica, causada por gradientes verticais de pressão durante a passagem das cristas e cavas das ondas. Esse fenômeno gera forças de levantamento capazes de anular o peso submerso das partículas do solo, tornando-as momentaneamente instáveis.

A sequência típica dos eventos que conduzem à liquefação pode ser representada de forma esquemática (Figura 27), conforme estudos experimentais conduzidos por Sumer *et al.* (2006). Inicialmente, há o acúmulo de poropressão, seguido pela emergência da liquefação, dissipação da pressão excedente e compactação do solo. Eventualmente, forma-se uma nova morfologia no leito, como ondulações (*ripples*), que podem indicar a ocorrência anterior do processo.

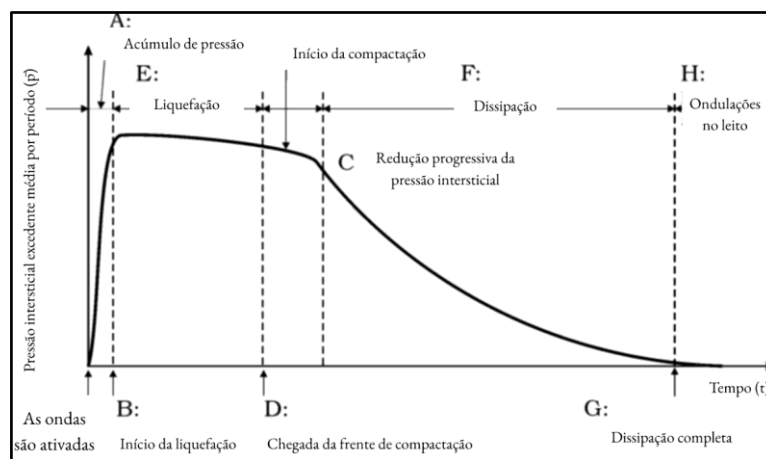


Figura 27 - Descrição esquemática da série temporal períodos médios em profundidade z . Fonte: Summer (2002).

Durante o avanço das ondas, o solo é comprimido sob a crista e sofre expansão sob a cava. Esta variação periódica da pressão resulta em tensões de cisalhamento cíclicas, que, quando não dissipadas, promovem a instabilidade do solo, conforme ilustrado na literatura técnica (Figura 28).

A presença ou ausência de ar nos poros do solo tem influência direta sobre a dissipação da pressão de poro. Solos saturados tendem a reter essa pressão por mais tempo,

enquanto solos parcialmente saturados (com microbolhas de ar) apresentam gradientes de pressão mais intensos, mas de curta duração. Esse fator é crucial na avaliação da estabilidade de estruturas costeiras em áreas de recarga gasosa ou com solos orgânicos.

A ocorrência de liquefação pode agravar significativamente o processo de *scour* em estruturas costeiras, especialmente aquelas apoiadas em solos arenosos e mal compactados. A redução da tensão efetiva torna o sedimento mais propenso à erosão mesmo sob condições de onda moderadas. Em estruturas como geotubos, o risco de afundamento parcial ou completa desestabilização é aumentado durante eventos repetitivos de carregamento cíclico, como tempestades sucessivas.

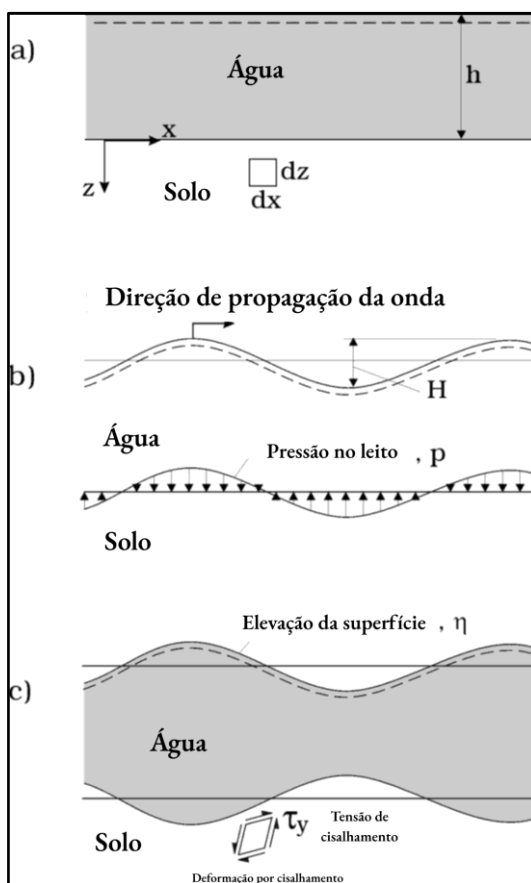


Figura 28 – Deformação elástica do leito sedimentar sob Ondas progressivas.

Fonte: Summer (2002).

A liquefação induzida por ondas é um processo complexo que combina aspectos da mecânica dos solos, hidrodinâmica e comportamento poroelástico. A literatura especializada, em especial os estudos de Sumer e Fredsøe (2002), destaca a importância de se considerar não apenas a amplitude e o período das ondas, mas também as propriedades do solo, como porosidade, permeabilidade e grau de saturação. Esses parâmetros determinam a resposta do solo frente às pressões intersticiais, podendo definir o sucesso ou a falha de obras de proteção costeira.

2.9.3 Revisão sobre *Scour* e Liquefação

A compreensão integrada da erosão localizada (*scour*) e da liquefação dos sedimentos é fundamental para o projeto de soluções de proteção costeira baseadas em geoformas têxteis. Ambas as ocorrências envolvem interações complexas entre escoamento, pressão intersticial e resistência do solo, e impactam diretamente a estabilidade estrutural de dispositivos como os geotubos analisados no presente estudo.

A erosão localizada (*scour*) e a liquefação dos sedimentos constituem dois dos mecanismos mais críticos de instabilidade em estruturas costeiras. Ambos os processos ocorrem na interface entre solo e fluido, e são influenciados por fatores hidrodinâmicos complexos que afetam diretamente a segurança estrutural e a eficiência de soluções de proteção costeira.

O *scour* pode reduzir significativamente o nível do leito marinho ou da praia imediatamente à frente de uma estrutura, alterando o gradiente hidráulico e expondo fundações, o que compromete sua estabilidade. Já a liquefação, por sua vez, afeta a resistência ao cisalhamento do solo, tornando-o incapaz de suportar cargas estruturais devido à intensificação da pressão de poro. Quando esses fenômenos ocorrem de forma combinada, os efeitos podem ser cumulativos e altamente destrutivos.

O *scour* é um processo de alta complexidade, sem diretrizes universalmente aceitas para prever sua profundidade máxima nem sua evolução temporal com precisão. As equações presentes na literatura, mostram que a profundidade de *scour* pode depender de até nove parâmetros adimensionais, incluindo características das ondas, do solo e da geometria estrutural. Além disso, a escala de tempo em que o *scour* se desenvolve é variável e, em muitos casos, não acompanha a duração de eventos de tempestade.

O estudo da poropressão induzida por ondas é fundamental para a avaliação do risco de liquefação. Como demonstrado ao longo desta seção, o aumento progressivo dessa pressão pode reduzir drasticamente a tensão efetiva no solo, favorecendo o colapso estrutural em regiões com fundações rasas ou com materiais inconsolidados.

A associação entre *scour* e liquefação torna-se especialmente relevante em áreas costeiras sujeitas a eventos extremos, como tempestades ou marés meteorológicas, nas quais a ação conjunta das ondas e da elevação do nível d'água pode acelerar o processo erosivo e comprometer a segurança de obras marítimas.

Os resultados da literatura especializada e dos estudos experimentais indicam que tanto o *scour* quanto a liquefação devem ser considerados desde a fase de concepção de qualquer estrutura costeira. O tratamento conjunto desses dois fenômenos fornece uma base mais robusta para prever instabilidades e definir estratégias de proteção adequadas, como o uso de geossistemas, tapetes ante erosão e melhorias no solo de fundação.

3 | Metodologia

Este estudo tem como objetivo analisar, em ambiente laboratorial, os efeitos da erosão localizada (*scour*) induzida pela ação de ondas sobre estruturas de proteção compostas por geoformas têxteis. Para tanto, foi desenvolvido um programa experimental nos Laboratórios de Interação Fluido-Estrutura (LIFE) e de Geotecnia e Concreto (LGC) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), visando à compreensão dos parâmetros hidrodinâmicos e geotécnicos que influenciam a formação do *scour* e à avaliação do desempenho de soluções mitigadoras aplicáveis ao contexto da engenharia costeira. A Figura 29 ilustra as etapas dos procedimento experimental adotado.

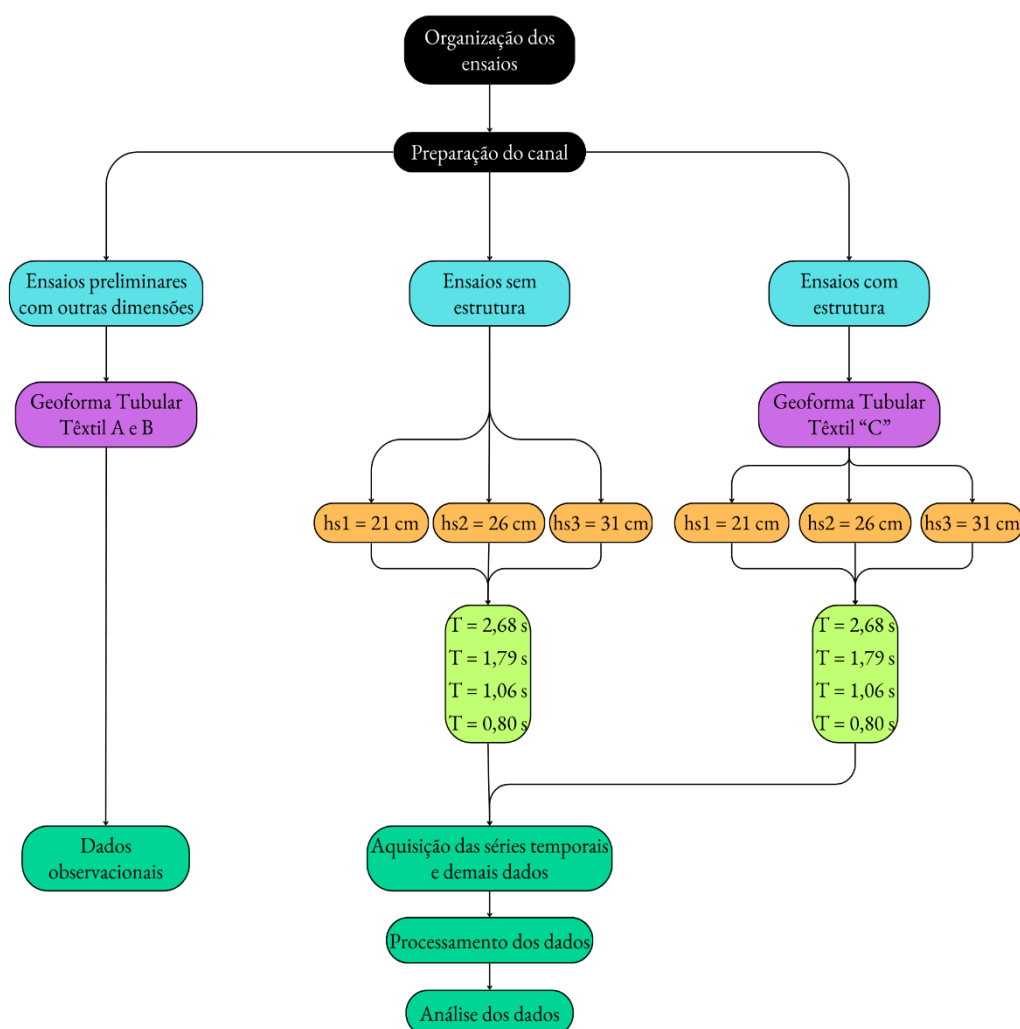


Figura 29 – Representação esquemática do procedimento experimental.

A campanha foi estruturada em duas etapas principais: a primeira sem a presença da estrutura geotêxtil no canal, e a segunda com a estrutura posicionada sobre o leito do solo. Em ambas as fases, foram combinados quatro diferentes períodos de onda com três distintas profundidades de lâmina d'água, totalizando doze configurações experimentais para cada cenário. A aquisição das séries temporais e o posterior processamento dos dados permitiram a análise comparativa entre os casos com e sem a presença da geoforma têxtil.

3.1 Canal de Ondas

Os ensaios foram realizados no canal de ondas (Figura 30) do LIFE da FURG. O canal possui 16 m de comprimento, 0,71 m de largura e 0,79 m de altura, sendo equipado com um sistema de geração de ondas regulares e um absorvedor de ondas ajustável.

Para os testes experimentais, o absorvedor foi posicionado com uma inclinação de 8° , a fim de minimizar a reflexão das ondas e garantir maior estabilidade do campo de propagação. As ondas foram geradas por um batedor do tipo cunha, com movimento harmônico controlado, amplitude fixa de 0,9 cm e capacidade de variação de frequência entre 0,3 Hz e 1,5 Hz. A cunha utilizada apresenta 50 cm de altura e um ângulo de inclinação de 26° , sendo projetada para simular com fidelidade o comportamento de ondas regulares em escala reduzida.



Figura 30 – Vista de dentro do canal de ondas do LIFE. Fonte: Autor (2025)

3.2 Arranjo experimental

A realização de experimentos físicos em escala reduzida é essencial para a compreensão dos processos hidrodinâmicos que ocorrem na interação entre ondas e geoformas

têxteis tubulares, especialmente no que se refere à *scour* na base dessas estruturas. O presente estudo busca avaliar a influência das ondas na estabilidade e no comportamento morfodinâmico da geoforma têxtil tubular, considerando diferentes condições hidrodinâmicas e o desenvolvimento natural da cavidade erosiva ao seu redor.

Os ensaios foram realizados com uma Forma Têxtil Tubular solta, posicionada sobre o leito sedimentar e preenchida com o mesmo material utilizado no fundo, de forma a simular condições realistas de campo e evitar deslocamentos por flutuação. A proposta experimental não se destina à reprodução de um caso específico, mas sim à obtenção de subsídios empíricos para compreender os mecanismos de interação entre ondas e geoformas flexíveis assentadas sobre solos não coesivos.

A FTT foi representada por uma tubo de PVC com 0,125 m de diâmetro e 0,702 m de comprimento (Figura 31), envolta em tecido geotêxtil para representar de forma mais fidedigna o comportamento físico de uma estrutura real. O interior da calha foi preenchido com o mesmo sedimento arenoso utilizado na caixa de ensaio, garantindo consistência na densidade e na resposta mecânica. A escolha por esse material visou à replicação da geometria e à estabilidade da instalação durante os ensaios. Contudo, essa opção suprimiu intencionalmente a porosidade e permeabilidade típicas das geoformas têxteis. Essa simplificação foi adotada com o objetivo de isolar os efeitos geométricos na modulação hidrodinâmica, permitindo um controle das variáveis experimentais.

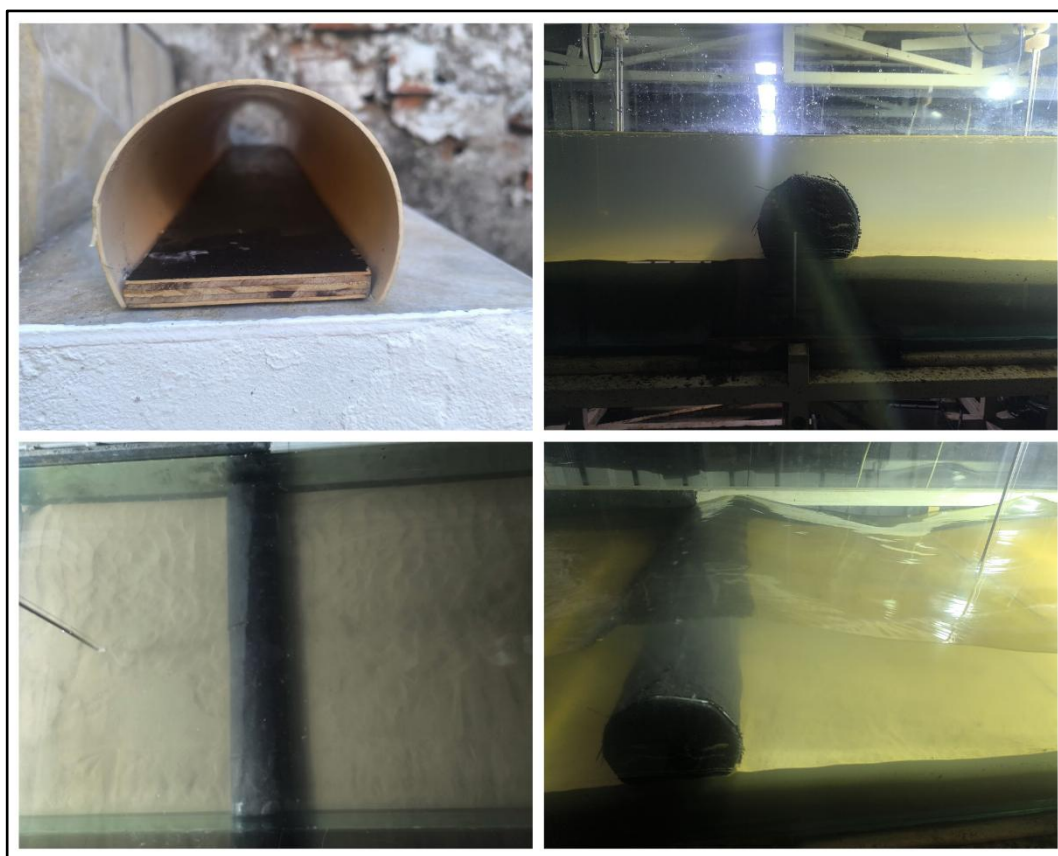


Figura 31 – Tubo de PVC envolta em tecido geotêxtil. Fonte: Autor (2025)

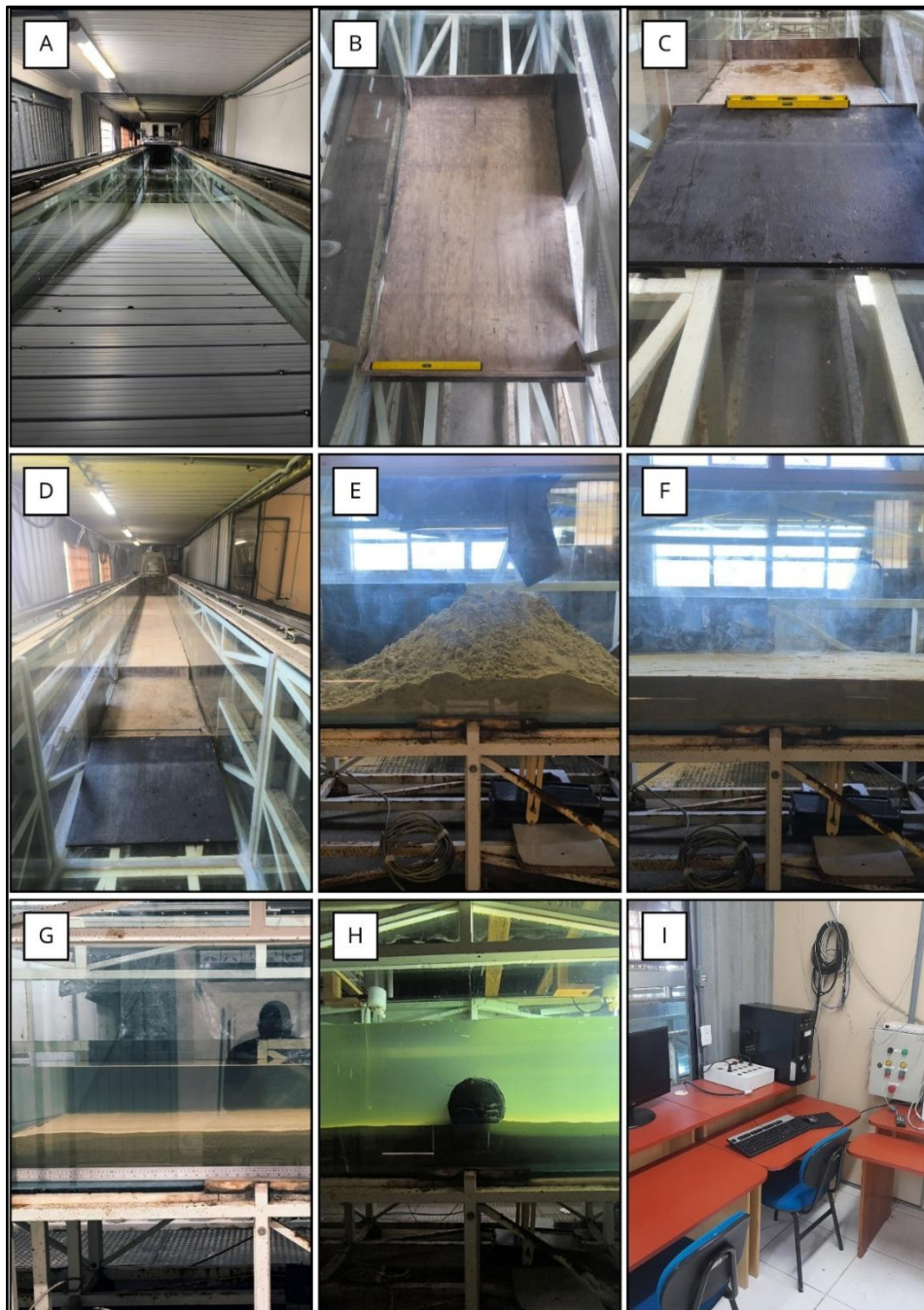


Figura 32 - Etapas da montagem experimental no canal de ondas: (A) Posicionamento do absorvedor de ondas (praia); (B) Posicionamento da caixa de sedimentos; (C) Instalação da rampa de transição; (D) Colocação do fundo plano sob a caixa de sedimentos; (E) Preenchimento da caixa com sedimentos; (F) Posicionamento da estrutura final (GTT); (G) Enchimento do canal com água até a lâmina d'água de projeto; (H) Instalação dos sensores capacitivos (Waveprobes); (I) Calibração dos equipamentos e aquisição dos dados experimentais.

A estrutura foi posicionada de forma centralizada no banco de sedimentos, na região da janela de visualização do canal, sem qualquer fixação, permitindo a livre atuação das ondas. Essa configuração favorece a observação do desenvolvimento das cavidades erosivas tanto a montante quanto a jusante da estrutura.

Posicionamento do absorvedor de ondas (Figura 32-A): instalado na extremidade oposta ao gerador de ondas, com inclinação de 10° , visando à atenuação da reflexão e à criação de um ambiente hidrodinâmico estável.

Instalação do banco de sedimentos (Figura 32-B): posicionado a 7,2 m do gerador de ondas, de forma a coincidir com a zona de visualização do canal.

Adição da rampa de transição (Figura 32-C): com 0,5 m de comprimento, foi instalada para suavizar o degrau entre o fundo do canal e o banco de sedimentos, evitando discontinuidades no escoamento.

Instalação de fundo plano (Figura 32-D): uma base rígida foi instalada sob a caixa de sedimentos, com 12 cm de altura, para nivelar o leito e impedir impactos diretos das ondas no banco.

Preenchimento com sedimentos (Figura 32-E): o solo arenoso foi adicionado até o nível da borda da caixa, promovendo uma superfície uniforme e saturada.

Posicionamento da estrutura (Figura 32-F): a FFT foi cuidadosamente colocada sobre o leito sedimentar, com preenchimento interno de sedimentos para evitar deslocamentos indesejados e simular sua massa efetiva.

Enchimento do canal (Figura 32-G): a lâmina d'água foi ajustada conforme a cota prevista para o ensaio, garantindo as condições estabelecidas de h_s .

Instalação dos sensores *Waveprobes* (Figura 32-H): três sensores capacitivos foram distribuídos ao longo do canal, com o objetivo de registrar com precisão as elevações da superfície livre da água.

Calibração dos equipamentos e aquisição de dados (Figura 32-I): todos os sistemas de medição foram previamente calibrados, e os dados foram registrados de forma contínua durante os ensaios.

A Figura 33 apresenta uma vista esquemática do arranjo experimental adotado, destacando a disposição do gerador de ondas, do banco de sedimentos, da FFT e dos sensores de medição.

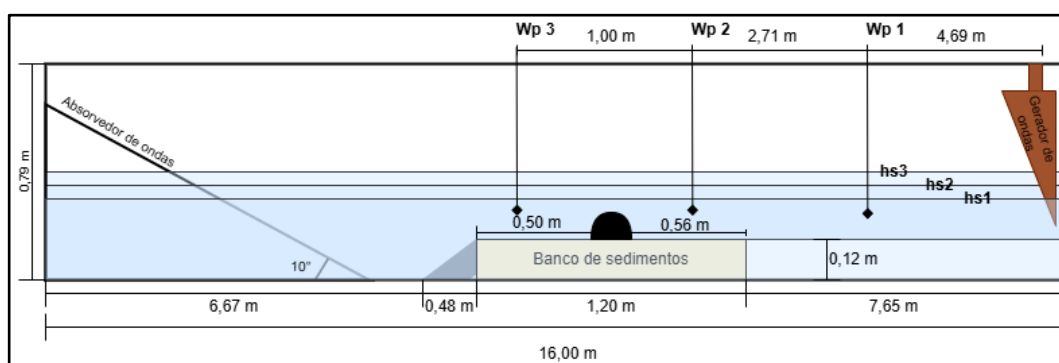


Figura 33 - Representação esquemática do setup experimental no canal de ondas.

Fonte: Autor (2025)

A aquisição dos dados hidrodinâmicos foi realizada por meio de três sensores do tipo *Waveprobe* (Figura 34), que operam com base em variações de capacitância. Esses dispositivos permitem o monitoramento em alta frequência da superfície livre da água, fornecendo dados de elevação e amplitude das ondas em diferentes pontos do canal.

Cada *Waveprobe* é composto por um sensor submerso conectado a uma unidade eletrônica via cabo coaxial, responsável pela conversão, filtragem e amplificação do sinal analógico. As informações adquiridas foram processadas utilizando o software LabView 2014 (*National Instruments*), permitindo a reconstrução precisa do campo de ondas ao longo dos testes.



Figura 34 – Sensores do tipo *Waveprobe* utilizados na aquisição dos dados. Fonte: Autor, 2025.

O posicionamento dos sensores foi definido de forma a captar a evolução da onda ao longo do trecho experimental e a influência direta da geoforma têxtil tubular submersa sobre o campo hidrodinâmico. Conforme representado na Figura 35, o sensor WP1 foi instalado a montante da caixa de solo, em um trecho ainda não influenciado

pela presença da estrutura, funcionando como referência para a condição de onda incidente. O sensor WP2 foi posicionado logo antes da estrutura, com o objetivo de medir as alterações na altura da onda imediatamente antes da interação com a FTT. Por fim, o sensor WP3 foi colocado a jusante da estrutura, permitindo a avaliação da dissipação de energia promovida pela interação entre a onda e a geoforma.

Esse arranjo permitiu monitorar a transformação das ondas ao longo do canal e a influência da FTT nos padrões morfodinâmicos do leito.

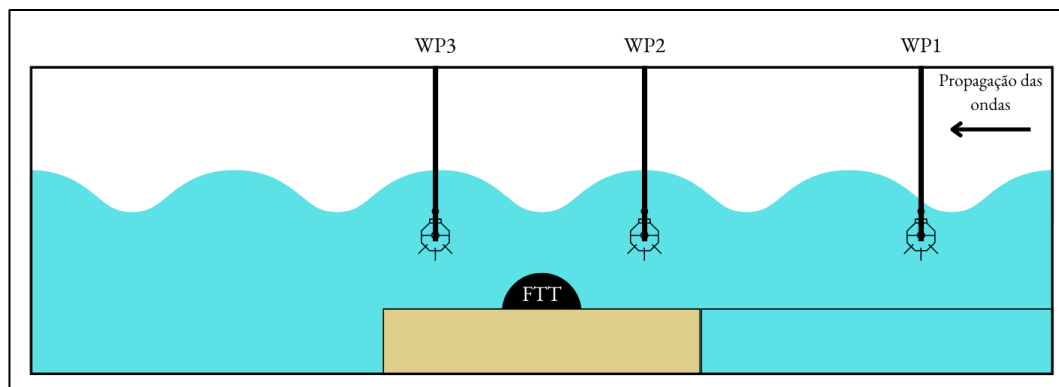


Figura 35 – Esquema de posicionamento dos sensores *WaveProbe* (WP1, WP2 e WP3) ao longo do canal experimental.

3.2.1 Testes preliminares com diferentes tamanhos de geoformas

Antes da definição do modelo principal adotado na campanha experimental, foram conduzidos ensaios exploratórios com outras duas configurações de geoformas têxteis tubulares, de dimensões menores que a estrutura descrita na Seção 3.2. O objetivo desses testes preliminares foi avaliar a capacidade das diferentes geometrias em promover interação significativa com o escoamento gerado pelas ondas.

As estruturas testadas, denominadas Modelo A e Modelo B, apresentavam seções transversais semicirculares achatadas, com alturas de 0,060 m e 0,090 m, respectivamente, e larguras de 0,075 m e 0,100 m. Ambas foram submetidas às mesmas condições hidrodinâmicas previstas para os ensaios principais (profundidade h_{s1}), com variação dos períodos de onda.

Os resultados não indicaram interferências significativa, como *scours*, ao redor das FTTs para todas as combinações de parâmetros testadas, o que evidenciou que os modelos menores não geravam perturbações relevantes no campo de ondas. Essa constatação levou à adoção do modelo final (Modelo C), com 0,130 m de altura e 0,140 m de largura, o qual demonstrou maior capacidade de interação com o escoamento e, portanto, maior potencial para induzir processos erosivos detectáveis e mensuráveis.

Para fins de análise hidrodinâmica, adotou-se como o parâmetro D , utilizado na eq. 2.13, a altura máxima da seção transversal, por representar a dimensão mais relevante na obstrução ao escoamento ondulatório e na geração de erosão localizada. Dessa forma, o

parâmetro (D) para os modelos A, B e C corresponde, respectivamente, a 0,060 m, 0,090 m e 0,130 m.

A Figura 36 apresenta uma comparação esquemática entre os três modelos testados, enquanto as Figuras 37 ilustram a montagem dos modelos A e B no canal durante os testes preliminares.

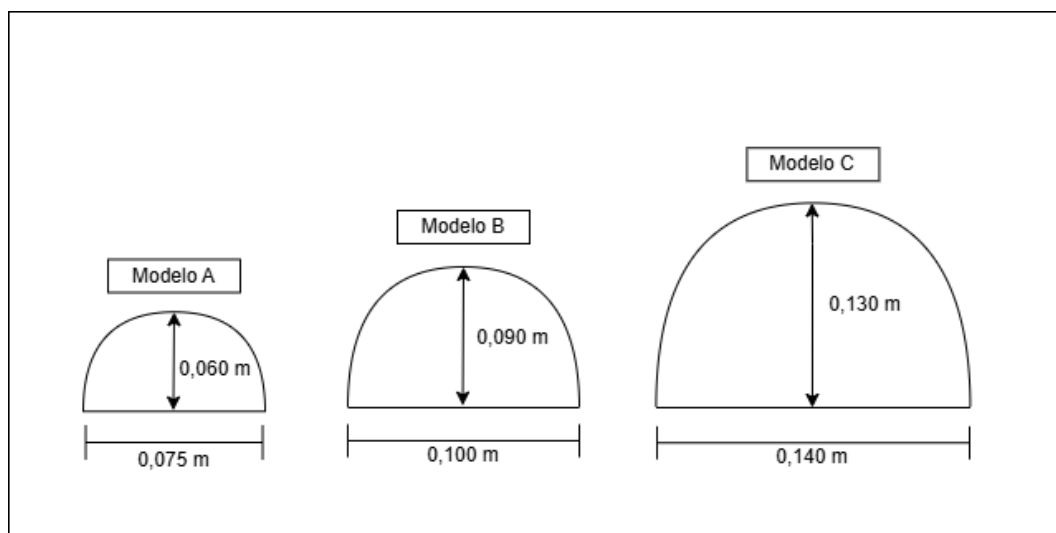


Figura 36 - Representação esquemática dos modelos testados com suas respectivas dimensões. Fonte: Autor (2025).



Figura 37 – Fotografia das geoformas utilizadas no modelo A e B. Fonte: Autor (2025)

3.3 Caracterização do solo

A caracterização do solo empregado nos ensaios físicos foi realizada com o objetivo de assegurar a confiabilidade e representatividade dos resultados obtidos, uma vez que as

propriedades físicas e granulométricas do solo influenciam diretamente os processos de erosão, deposição e estabilidade estrutural. A amostra utilizada foi fornecida pelo Laboratório de Geotecnia da FURG e analisada por meio de ensaios laboratoriais normatizados.

A análise granulométrica foi conduzida por meio de ensaios de sedimentação e peneiramento, em conformidade com as normas ABNT NBR 6457:2016 e ABNT NBR NM 248:2003, respectivamente. O ensaio de sedimentação, baseado na lei de Stokes, permitiu identificar a inexistência de frações finas (silte e argila), enquanto o ensaio de peneiramento possibilitou a determinação detalhada da distribuição de partículas no intervalo de areia. As etapas envolvidas incluíram a secagem da amostra a 105 ± 5 °C por 24 h, montagem sequencial das peneiras (Figura 38), agitação mecânica por 15 min e pesagem das frações retidas em cada peneira.

A análise revelou que o solo é predominantemente arenoso, com 99,45 % das partículas classificadas como areia fina. A ausência de partículas finas confere à amostra elevada permeabilidade e baixa coesão interna, fatores que intensificam a susceptibilidade à erosão localizada.

A determinação da densidade dos sólidos foi realizada conforme a norma ABNT NBR 12051:2010, utilizando o método do picnômetro. A massa específica dos grãos foi obtida pela relação entre a massa da amostra seca e o volume deslocado no interior do picnômetro.

O índice de vazios foi quantificado com base na ABNT NBR 12004:2012, considerando dois estados: o solo depositado frouxamente, sem compactação ($e_{\max}$), e o solo submetido a uma carga estática de 98,1 N ($e_{\min}$). Estes parâmetros são cruciais para avaliar a compactidade relativa do material, seu comportamento mecânico e sua resistência à ação das ondas.



Figura 38 - Peneiras de aberturas 16#, 30#, 40#, 50#, 70#, 100#, 200#. Fonte: Autor (2025)

Os resultados obtidos estão sintetizados na Figura 39 apresenta a curva granulométrica representativa da distribuição de tamanhos das partículas.

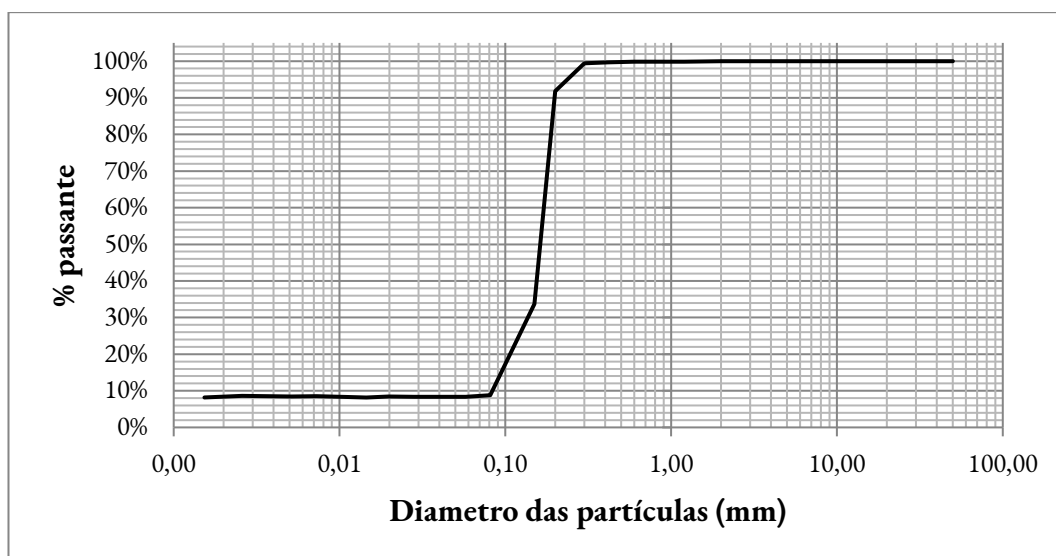


Figura 39 - Curva granulométrica do solo utilizado. Fonte: Autor (2025)

A Tabela 3 apresenta a caracterização granulométrica e as principais propriedades físicas do solo utilizado nos ensaios.

Tabela 3 - Composição granulométrica e propriedades físicas do solo utilizado.

Propriedades físicas do solo	
Areia grossa	0,09%
Areia média	0,46%
Areia fina	99,45%
Silte e Argila	0%
$\gamma_s (kN/m^3)$	26,60
e_{min}	0,640
$e_{máx}$	0,877
$D_{10}(mm)$	0,14
$D_{30}(mm)$	0,18
$D_{60}(mm)$	0,21
$D_{50}(mm)$	0,14
C_u	1,55
C_c	1,14

Do ponto de vista geotécnico, a caracterização do solo também foi realizada com base nas classificações SUCS e HRB, conforme descritas por ASTM D2487 e AASHTO

M 145, respectivamente. De acordo com os resultados da análise granulométrica, o solo foi classificado como SP – areia mal graduada (*poorly graded sand*) pelo sistema SUCS, indicando uma distribuição granulométrica estreita e ausência significativa de partículas mais finas. Essa tipologia está associada a solos não coesivos, com elevada permeabilidade e baixa capacidade de retenção de umidade, características frequentemente observadas em ambientes de alta energia hidrodinâmica.

Pela classificação HRB (AASHTO, 1973), o solo enquadra-se no grupo A-3 (índice de grupo 0), o qual corresponde a areias finas com pouco ou nenhum teor de silte e argila, com boa drenabilidade e baixa plasticidade. Esse grupo é tipicamente encontrado em regiões costeiras e apresenta comportamento favorável à drenagem rápida, embora também seja altamente suscetível a processos de erosão superficial e instabilidade quando submetido a ações cíclicas, como ondas ou variações no nível freático.

Apesar de não corresponder exatamente a um material dragado, a tipologia sedimentar identificada é coerente com o contexto geológico da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, mais especificamente no Sistema Laguna-Barreira IV, cuja formação ocorreu durante o Holoceno e é caracterizada por depósitos arenosos pouco consolidados (Villwock e Tomazelli, 1998; Toldo Jr. *et al.*, 2006). Estes ambientes apresentam dinâmica sedimentar intensa e são particularmente vulneráveis a fenômenos erosivos localizados, especialmente em áreas onde estruturas costeiras ou geotêxteis interferem no regime hidrodinâmico natural.

3.4 Caracterização do dispositivo de medição dos pontos

Para a quantificação da profundidade da cavidade erosiva formada ao redor da geofoma têxtil tubular, foi desenvolvido um dispositivo mecânico de medição por deslocamento vertical controlado. A concepção deste equipamento seguiu critérios de exatidão, repetibilidade e mínima interferência no leito sedimentar durante o processo de medição.

O dispositivo é constituído por dois perfis estruturais de alumínio, com seção transversal de 3×3 cm, que atuam como suporte e guia para o sistema de medição. No perfil principal foi inserida uma barra rosqueável de aço inoxidável, com 0,2 cm de diâmetro, posicionada por meio de um furo centralizado (Figura 40). Este componente permite o controle do deslocamento vertical até o contato com o fundo da cavidade.

O segundo perfil de alumínio, disposto transversalmente às bordas do canal, confere estabilidade estrutural ao sistema durante as medições. O deslocamento da barra é monitorado por uma escala graduada integrada ao sistema e por um paquímetro analógico, que registra a profundidade relativa em cada ponto de medição.

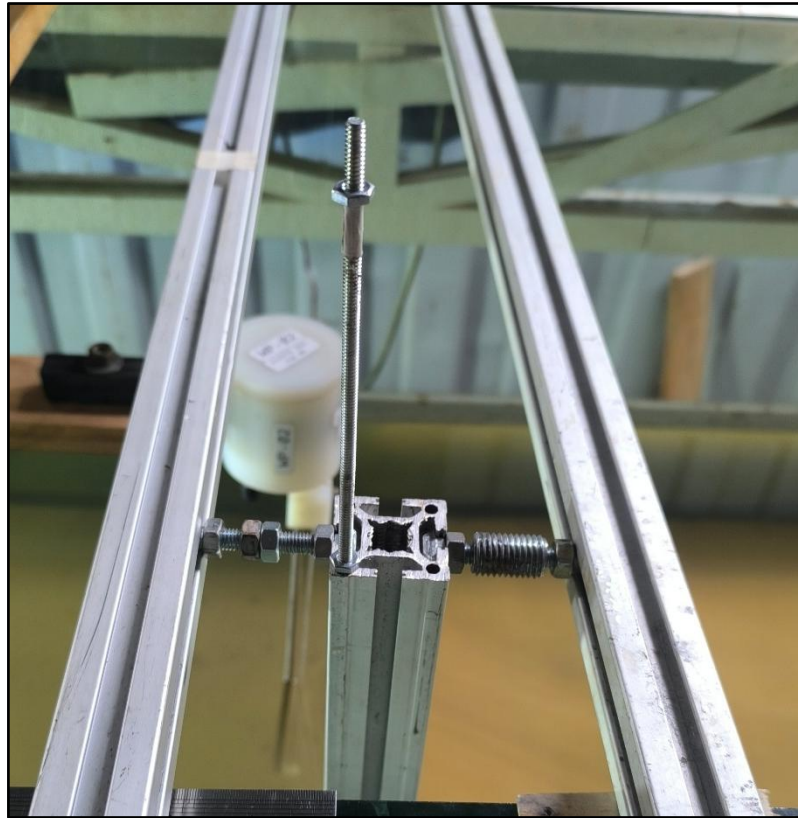


Figura 40 - Dispositivo de medição. Fonte: Autor(2025)

O procedimento experimental consistiu no posicionamento do dispositivo sobre a cavidade erosiva, seguido da realização de medições pontuais ao longo do eixo longitudinal da geoforma. A barra foi deslocada verticalmente até o contato com o fundo sedimentar, com posterior registro da posição utilizando o paquímetro. As medições foram realizadas em intervalos regulares de 1 cm, ao longo da região montante da geoforma (Figura 41).

Essa metodologia permitiu a obtenção de perfis topográficos da cavidade de erosão, viabilizando o monitoramento da evolução temporal do processo de *scour*.

A escolha por um sistema de medição mecânico, em detrimento de sensores eletrônicos, baseou-se em critérios de robustez operacional, baixo custo, resistência em ambiente submerso.

O uso da barra rosqueável proporcionou deslocamentos incrementais controlados, minimizando interferências no leito sedimentar durante a medição, visando o aprimoramento da acurácia e a repetibilidade dos dados obtidos.

O grid de medição foi aplicado exclusivamente na região montante da geoforma, uma vez que, durante os ensaios, não foram identificadas alterações morfológicas relevantes a jusante. Essa definição baseou-se em inspeções visuais e medições exploratórias preliminares, que não indicaram processos significativos de escavação ou movimentação do sedimento nesse setor.

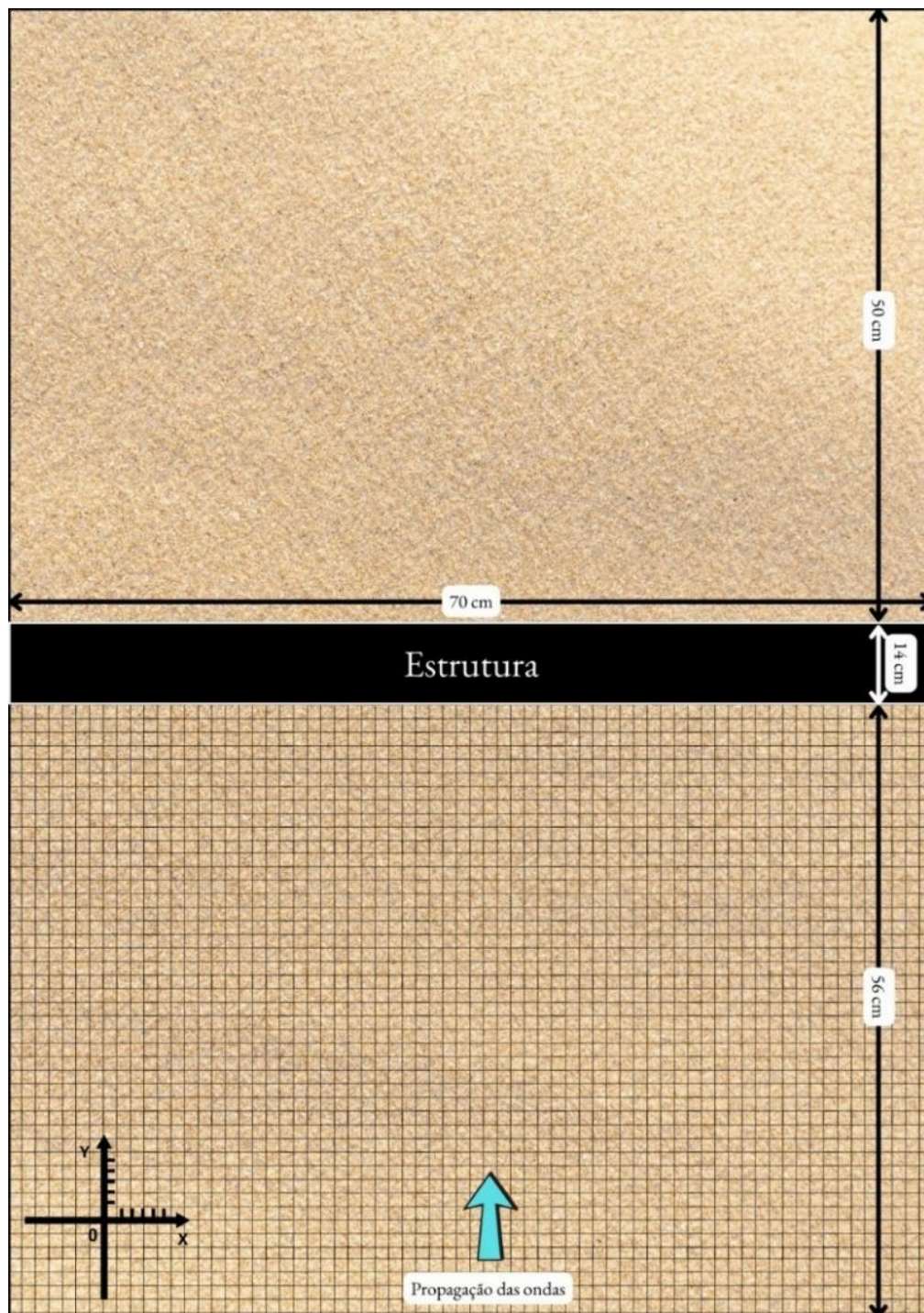


Figura 41 – Representação do grid para medição das erosões, a montante da geoforma. Fonte: Autor (2025)

Admite-se que a ausência de alterações detectadas a jusante pode estar associada às limitações de resolução vertical do dispositivo, cuja sensibilidade é restrita à identificação de variações morfológicas de maior magnitude.

3.5 Campanha experimental

A campanha experimental foi planejada com o objetivo de avaliar a influência da interação entre ondas e uma forma têxtil tubular sobre os processos hidrodinâmicos e erosivos sob um solo não coesivo. Para tanto, foram conduzidos ensaios físicos controlados em canal de ondas, nos quais se variaram os parâmetros hidrodinâmicos, particularmente a profundidade da lâmina d'água e o período das ondas, com o intuito de analisar as respostas morfológicas do solo e as alterações nas características do escoamento.

Foram utilizados três diferentes valores de profundidade (h_s) e quatro diferentes períodos de onda (T), totalizando 12 combinações experimentais, conforme ilustrado na representação esquemática da metodologia (Figura 32). Essa combinação permitiu avaliar a atuação das ondas sob diferentes regimes e suas interações com a estrutura geotêxtil instalada sobre o leito arenoso.

A escolha dos quatro períodos de onda adotados ($T1 = 2,68$ s, $T2 = 1,79$ s, $T3 = 1,06$ s e $T4 = 0,80$ s) baseou-se em dados característicos da região da Praia do Cassino, em Rio Grande (RS), obtidos por meio de campanhas de monitoramento e modelagem numérica, conforme descrito por Cuchiara *et al.* (2009), Pianca *et al.* (2010) e Melo *et al.* (2010). Os valores foram adaptados à escala reduzida do canal experimental utilizando o critério de Froude, que assegura a similaridade dinâmica entre modelo e protótipo. Essa abordagem permitiu simular, de forma representativa, as condições reais observadas em campo e, ao mesmo tempo, manter a coerência física nos testes laboratoriais. A seleção desses períodos visa refletir situações comumente observadas no litoral sul do Rio Grande do Sul, garantindo a relevância prática dos resultados obtidos na avaliação do desempenho das estruturas têxteis tubulares frente a diferentes regimes hidrodinâmicos.

A fim de assegurar a reprodutibilidade e a comparabilidade entre os ensaios, ao término de cada experimento procedeu-se à reconstituição do leito sedimentar. Esse processo seguiu os protocolos descritos na Seção 3.2, utilizando como referência a escala lateral presente no canal para garantir que as condições iniciais fossem rigorosamente mantidas. Tal cuidado minimizou variações sistemáticas indesejadas, permitindo a análise isolada da influência dos parâmetros hidrodinâmicos sobre o processo erosivo.

O índice de vazios do leito sedimentar, após a saturação do material, foi determinado como $e = 0,76$ e, densidade relativa $Dr = 0,494$, valor que reflete uma areia de compactidade média. Este parâmetro exerce influência significativa na estabilidade do solo e na suscetibilidade à erosão, sendo considerado essencial na interpretação dos dados obtidos.

Para fins de organização e clareza na apresentação dos resultados, adotaram-se nomenclaturas padronizadas para os diferentes períodos de onda e profundidades, conforme apresentado na Tabelas 4.

Tabela 4 - Combinação dos parâmetros nos ensaios realizados.

Ensaio	Período (T)	hs (cm)
T1hs1	2,68 s (T1)	21 (hs1)
T2hs1	1,79 s (T2)	21 (hs1)
T3hs1	1,06 s (T3)	21 (hs1)
T4hs1	0,80 s (T4)	21 (hs1)
T1hs2	2,68 s (T1)	26 (hs2)
T2hs2	1,79 s (T2)	26 (hs2)
T3hs2	1,06 s (T3)	26 (hs2)
T4hs2	0,80 s (T4)	26 (hs2)
T1hs3	2,68 s (T1)	31 (hs3)
T2hs3	1,79 s (T2)	31 (hs3)
T3hs3	1,06 s (T3)	31 (hs3)
T4hs3	0,80 s (T4)	31 (hs3)

Nos casos com maiores períodos (*T1*, *T2* e *T3*), não foram detectadas alterações morfológicas significativas. Para o menor período de onda (*T4*), foi observada atividade erosiva perceptível, razão pela qual o tempo de exposição foi estendido até o limite operacional do gerador de ondas de aproximadamente 60 min (Tabela 5). Essa diferenciação assegurou que cada regime fosse explorado em sua plenitude sem comprometer a integridade do sistema experimental.

Tabela 5 - Tempo de duração dos ensaios de acordo com o período de onda.

Período de onda (T)	Duração do ensaio	Observações
2,68 s	30 min	Sem movimentação significativa observada
1,79 s	30 min	Sem movimentação significativa observada
1,06 s	30 min	Sem movimentação significativa observada
0,80 s	Aprox. 60 min	Movimentação do fundo observada, ensaio até o limite máximo do gerador de ondas

A campanha experimental foi conduzida com rigor técnico, baseando-se em referências consolidadas na literatura de hidráulica experimental e geotecnia. As condições de contorno, os parâmetros de controle e os procedimentos de medição foram definidos de modo a garantir a confiabilidade dos dados e a relevância científica dos resultados obtidos. A próxima seção apresentará a análise e discussão dos dados coletados, relacionando os efeitos observados com modelos teóricos de erosão localizada e de interação solo-estrutura.

4 | Resultados e discussões

Este capítulo tem por objetivo apresentar, interpretar e discutir os resultados obtidos a partir da campanha experimental conduzida, com foco na análise da interação entre ondas e estruturas geotêxteis tubulares posicionadas sobre um leito sedimentar não coesivo. A partir da variação dos parâmetros hidrodinâmicos, como o período das ondas e a profundidade da lâmina d'água, foi possível observar os efeitos morfológicos no leito e o comportamento erosivo ao redor da estrutura.

A interpretação dos dados baseia-se em três pilares principais:

- Gráficos de elevação da superfície livre da água, que indicam o padrão de propagação das ondas e suas amplitudes;
- Medições de profundidade da cavidade erosiva, coletadas pontualmente ao longo do experimento por meio de dispositivo de aferição mecânico (Seção 3.4);
- Análises comparativas entre as diferentes condições de ensaio, considerando o avanço e a geometria da erosão formada ao redor da estrutura.

Os ensaios foram organizados em um total de 12 experimentos (Tabela 4), divididos em três grupos distintos conforme a profundidade da lâmina d'água sob o leito sedimentar ($h_s = 21$ cm, 26 cm e 31 cm), e submetidos a quatro períodos de onda distintos ($T = 2,68$ s, 1,79 s, 1,06 s e 0,80 s). Essa matriz experimental possibilitou uma abordagem sistemática e abrangente, visando entender como diferentes combinações de energia ondulatória e profundidade impactam os processos de erosão local.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos para cada combinação de parâmetros, com ênfase nas variações observadas na geometria da cavidade erosiva, na influência do período de onda sobre o processo de erosão e no papel desempenhado pela profundidade relativa na modulação da interação entre escoamento e estrutura.

4.1 Cálculos Hidrodinâmicos e Regime de Propagação das Ondas

A caracterização hidrodinâmica representa uma etapa essencial na análise dos mecanismos que controlam os processos de erosão em estruturas costeiras, sobretudo quando se trata de sistemas compostos por materiais flexíveis e porosos, como as geofor-mas têxteis tubulares. A avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos, especialmente o comprimento de onda (L) e a profundidade relativa (h/L), permite a classificação do regime de propagação das ondas e a previsão do grau de interação entre as ondas e o fundo sedimentar.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para diferentes profundidades efetivas sobre o leito sedimentar (h_s), considerando os comprimentos de onda estimados com base na Teoria Linear de Ondas (Airy, 1845). Os valores de h/L obtidos variaram entre 0,05 e 0,32, o que indica que todas as condições testadas enquadram-se no regime de

propagação intermediário, conforme os critérios definidos por Dean e Dalrymple (1991).

Tabela 6 - Parâmetros hidrodinâmicos considerando diferentes profundidades sobre o leito sedimentar (hs).

$hs(m)$	T	L	h/L	Regime de propagação
0,21	2,68	3,85	0,05	Intermediária
	1,79	2,54	0,08	Intermediária
	1,06	1,40	0,15	Intermediária
	0,8	0,93	0,23	Intermediária
0,26	2,68	4,27	0,06	Intermediária
	1,79	2,81	0,09	Intermediária
	1,06	1,50	0,17	Intermediária
	0,8	0,96	0,27	Intermediária
0,31	2,68	4,66	0,07	Intermediária
	1,79	3,05	0,10	Intermediária
	1,06	1,57	0,20	Intermediária
	0,8	0,98	0,32	Intermediária

Esse regime intermediário, segundo Sumer e Fredsøe (2006), é caracterizado por órbitas elípticas e deformadas das partículas de água, com interação parcial com o fundo, promovendo níveis moderados de cisalhamento e potencial de mobilização sedimentar. Essa condição é particularmente crítica do ponto de vista da erosão local, pois permite o início da movimentação de partículas mesmo na ausência de correntes significativas, sendo impulsionada pela componente oscilatória das ondas.

Conforme esperado pela teoria linear, observou-se um aumento progressivo no comprimento de onda (L) à medida que a profundidade da lâmina d'água aumentou. Este comportamento é compatível com o modelo proposto por Airy (1895), em que a dispersividade das ondas em profundidades intermediárias e profundas influencia diretamente a distribuição espacial de energia, afetando a interação entre a onda e a estrutura.

Essa maior distribuição de energia ao longo da estrutura implica também em uma ampliação do campo de atuação das forças orbitais, potencializando a escavação ao redor do corpo submerso, sobretudo nas regiões a montante. A este respeito, Reeve, Chadwick e Fleming (2018) destacam que estruturas costeiras flexíveis exigem análises tridimensionais do campo hidrodinâmico para a correta previsão da resposta ao carregamento ondulatório.

Portanto, a análise hidrodinâmica realizada reforça a importância de considerar o regime de propagação das ondas como um fator determinante no desenvolvimento de estratégias de mitigação da erosão em sistemas costeiros, especialmente quando se utilizam materiais geossintéticos. A caracterização detalhada dos parâmetros L e h/L fornece

uma base sólida para compreender a intensidade e a área de influência dos processos erosivos desencadeados pela ação ondulatória.

4.1.1 Caracterização dos Regimes de Escoamento

Com o objetivo de avaliar a dinâmica do escoamento ao redor das Formas Têxteis Tubulares (FTT), foram calculados os números de Re e de KC a partir dos dados obtidos nos sensores de onda (WP1, WP2 e WP3) para cada condição experimental. Os valores correspondentes aos ensaios sem a estrutura encontram-se na Tabela 7, enquanto os valores obtidos com a estrutura instalada sobre o leito estão apresentados na Tabela 8.

Apesar de o número de Keulegan–Carpenter (KC) ser tradicionalmente empregado em estudos envolvendo corpos cilíndricos lisos, especialmente em geometrias circulares completas, sua aplicação direta em estruturas do tipo FTT, de geometria semicilíndrica e parcialmente enterradas com a rugosidade do material geotêxtil, pode apresentar limitações.

Os valores calculados para o KC permaneceram abaixo de 2, indicando predominância das forças inerciais, segundo os critérios definidos por Patel (1989).

Embora o KC não ter resultado em um valor maior que 5, a ação inercial foi suficiente para provocar alterações relevantes no leito sedimentar, incluindo a formação de cavidades erosivas a montante da estrutura e a organização de microfleixões (*sand ripples*), o que evidencia que mesmo regimes inerciais podem induzir tensões de cisalhamento significativas, especialmente sob velocidades orbitais elevadas.

A análise dos números de Re complementa essa avaliação. Os valores observados variaram de aproximadamente 1.600 a mais de 24.000, abrangendo largamente o regime de escoamento oscilatório turbulento, de acordo com Sumer e Fredsøe (2006). Contudo, a redução consistente dos valores de Re ao longo do canal (de WP1 para WP3) nos ensaios com estrutura confirma a atuação dissipativa da FTT sobre o escoamento oscilatório. As maiores intensidades foram registradas para os menores períodos de onda ($T = 0,80$ s e $1,06$ s), especialmente nos sensores WP1 e WP2, posicionados antes da estrutura. Esses valores indicam maior energia disponível para mobilização do sedimento e estão associados às zonas de erosão mais intensas observadas nos ensaios.

Ao se comparar os valores de Re obtidos com e sem a presença da estrutura FTT, nota-se uma redução sistemática a jusante (WP3) em todos os cenários experimentais. Esse comportamento evidencia o efeito dissipativo promovido pela FTT, que atua atenuando a energia das ondas e, consequentemente, reduzindo o potencial erosivo na região posterior à estrutura.

Tabela 7 – Caracterização hidrodinâmica pelo cálculo de Re nos ensaios sem a estrutura, considerando $D = 0,13$ m.

h	WP's	T(s)	a	U_{máx}	Re
hs1	WP1	2,68	0,003	0,027	3638,038

		1,79	0,005	0,040	5306,169
		1,06	0,016	0,133	17367,926
		0,80	0,016	0,147	19117,642
	WP2	2,68	0,001	0,013	1703,891
		1,79	0,003	0,022	2868,199
		1,06	0,009	0,079	10357,980
		0,80	0,013	0,119	15500,791
	WP3	2,68	0,003	0,026	3407,782
		1,79	0,003	0,023	3107,216
		1,06	0,012	0,102	13287,510
		0,80	0,011	0,099	12974,736
hs2	WP1	2,68	0,003	0,021	2752,653
		1,79	0,008	0,053	6970,456
		1,06	0,015	0,114	14946,754
		0,80	0,015	0,131	17140,872
	WP2	2,68	0,002	0,013	1709,981
		1,79	0,005	0,038	4966,450
		1,06	0,013	0,097	12673,299
		0,80	0,015	0,131	17140,872
	WP3	2,68	0,002	0,015	2043,636
		1,79	0,003	0,025	3310,966
		1,06	0,013	0,103	13495,613
		0,80	0,013	0,113	14738,966
hs3	WP1	2,68	0,003	0,020	2655,091
		1,79	0,007	0,049	6426,542
		1,06	0,017	0,120	15686,729
		0,80	0,017	0,143	18602,381
	WP2	2,68	0,002	0,015	2000,938
		1,79	0,003	0,021	2829,295
		1,06	0,014	0,104	13589,085
		0,80	0,015	0,127	16535,449
	WP3	2,68	0,002	0,012	1616,142
		1,79	0,004	0,030	3920,594
		1,06	0,016	0,112	14592,306
		0,80	0,016	0,137	17860,405

Tabela 8 - Caracterização hidrodinâmica pelo cálculo de Re e KC nos ensaios com a estrutura, considerando $D = 0,13$ m.

h	WP's	T(s)	a	U_{máx}	Re	Kc
----------	-------------	-------------	----------	------------------------	-----------	-----------

hs1	WP1	2,68	0,004	0,030	4006,446	0,636
		1,79	0,005	0,040	5258,365	0,556
		1,06	0,018	0,144	18832,691	1,181
		0,80	0,020	0,176	22964,135	1,087
	WP2	2,68	0,003	0,027	3545,935	0,563
		1,79	0,004	0,031	4158,889	0,440
		1,06	0,021	0,169	21971,473	1,378
		0,80	0,021	0,185	24112,342	1,141
	WP3	2,68	0,003	0,025	3315,680	0,526
		1,79	0,002	0,021	2820,396	0,298
		1,06	0,011	0,088	11508,867	0,721
		0,80	0,010	0,088	11482,067	0,543
hs2	WP1	2,68	0,004	0,029	3837,032	0,609
		1,79	0,010	0,067	8713,070	0,922
		1,06	0,021	0,159	20799,690	1,304
		0,80	0,021	0,180	23473,169	1,111
	WP2	2,68	0,003	0,021	2794,360	0,443
		1,79	0,005	0,036	4792,188	0,507
		1,06	0,014	0,107	14027,698	0,879
		0,80	0,014	0,121	15830,741	0,749
	WP3	2,68	0,002	0,018	2377,291	0,377
		1,79	0,003	0,022	2962,444	0,313
		1,06	0,020	0,148	19348,549	1,213
		0,80	0,014	0,117	15284,854	0,723
hs3	WP1	2,68	0,004	0,025	3270,764	0,519
		1,79	0,009	0,059	7679,515	0,813
		1,06	0,021	0,147	19152,401	1,201
		0,80	0,021	0,171	22259,259	1,053
	WP2	2,68	0,003	0,020	2616,611	0,415
		1,79	0,005	0,034	4446,035	0,470
		1,06	0,015	0,108	14136,296	0,886
		0,80	0,016	0,134	17489,418	0,827
	WP3	2,68	0,002	0,016	2116,377	0,336
		1,79	0,006	0,040	5254,405	0,556
		1,06	0,018	0,129	16872,353	1,058
		0,80	0,018	0,146	19079,365	0,903

Assim, mesmo considerando as limitações da aplicação direta de KC ao caso estudado, a análise conjunta dos parâmetros adimensionais KC e Re demonstrou-se útil para

compreender os regimes hidrodinâmicos envolvidos e sua relação com os processos erosivos observados. Os resultados reforçam a importância de se considerar os efeitos das forças inerciais, mesmo na ausência de escoamentos altamente turbulentos, no dimensionamento e análise de soluções costeiras com geossintéticos.

4.2 Efeito da Estrutura na Propagação das Ondas

A investigação do comportamento hidrodinâmico das ondas, em um canal experimental com e sem a presença de uma Forma Têxtil Tubular submersa, foi conduzida por meio de medições realizadas com sensores capacitivos de superfície livre (*WaveProbes* WP1, WP2 e WP3). A disposição longitudinal dos sensores, antes (WP1), imediatamente a montante (WP2) e a jusante (WP3) da estrutura, permite avaliar o impacto da presença da estrutura nos processos de atenuação, dissipação e possível reflexão da energia ondulatória.

As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores médios de elevação da superfície livre registrados durante os ensaios sem e com a estrutura, respectivamente, para diferentes profundidades e períodos de onda. A variação percentual entre WP2 e WP3 foi calculada como indicador da dissipação hidrodinâmica, dado que esses pontos representam a entrada e saída imediatas da região ocupada pela estrutura.

Tabela 9 - Valores médios de elevação da superfície livre da água registrados pelos *WP*s, nas condições sem a presença da estrutura. As medidas das elevações estão expressas em cm.

hs(cm)	T(s)	η (Wp1)	η (Wp2)	η (Wp3)	Variação Wp2-Wp3
21	2,68	0,365	0,204	0,370	81%
	1,79	0,470	0,260	0,350	35%
	1,06	1,650	0,880	1,260	43%
	0,8	1,690	1,700	1,220	-28%
26	2,68	0,300	0,200	0,170	-15%
	1,79	0,970	0,510	0,400	-22%
	1,06	2,213	1,960	1,400	-29%
	0,8	2,090	1,940	1,440	-26%
31	2,68	0,410	0,250	0,230	-8%
	1,79	0,980	0,430	0,400	-7%
	1,06	1,177	1,250	1,500	20%
	0,8	1,840	1,580	1,610	2%

Na condição sem estrutura (Tabela 9), observam-se reduções expressivas nos valores de elevação entre WP2 e WP3, principalmente em ensaios com ondas curtas (*T*4 e

$T3$), indicando dissipação natural da energia das ondas sobre o leito arenoso. Por exemplo, em $hs2-T3$, a redução foi de -29%, e em $hs2-T4$, de -26%, o que demonstra a ação do fundo no amortecimento da propagação mesmo na ausência de obstáculos físicos.

No entanto, em alguns casos, observam-se aumentos positivos entre WP2 e WP3, como em $hs1-T4$ (+28%) e $hs3-T3$ (+20%). Esses aumentos não são típicos da propagação ondulatória linear e podem estar associados a interferência construtiva, reflexões secundárias no canal ou mesmo pequenas variações locais na topografia do fundo.

Com a presença da estrutura (Tabela 10), o padrão se modifica. Observa-se que, na maioria dos casos, a variação entre WP2 e WP3 é negativa e mais acentuada do que na condição sem estrutura, o que indica forte atenuação da amplitude de onda ao longo da FTT. Os exemplos mais evidentes são $hs1-T4$ (-52%) e $hs2-T3$ (-48%).

Tabela 10 - Valores médios de elevação da superfície livre da água registrados pelos sensores capacitivos (*WaveProbes*), nas condições com a presença da estrutura. As medidas das elevações estão expressas em cm.

hs(cm)	T(s)	η (Wp1)	η (Wp2)	η (Wp3)	Variação Wp2-Wp3
21	2,68	0,435	0,385	0,360	-6%
	1,79	0,550	0,435	0,295	-32%
	1,06	1,800	2,100	1,100	-48%
	0,80	2,000	2,100	1,000	-52%
26	2,68	0,460	0,335	0,285	-15%
	1,79	1,000	0,550	0,340	-38%
	1,06	2,150	1,450	2,000	38%
	0,80	2,150	1,450	1,400	-3%
31	2,68	0,425	0,340	0,275	-19%
	1,79	0,950	0,550	0,650	18%
	1,06	2,100	1,550	1,850	19%
	0,80	2,100	1,650	1,800	9%

Tais reduções podem ser atribuídas a mecanismos como geração de turbulência ao redor da estrutura, fricção entre o escoamento e o geotêxtil poroso, perda de energia associada à interação entre a estrutura e o leito arenoso e/ou reflexões internas e recirculações.

Esses resultados estão em conformidade com os mecanismos descritos por Sumer e Fredsøe (2006), que apontam a capacidade de estruturas porosas ou submersas de reduzir significativamente a energia orbital de ondas regulares.

Por outro lado, em alguns ensaios com estrutura, como $hs2-T3$ (+38%) e $hs3-T3$ (+19%), foram observados aumentos inesperados entre WP2 e WP3. Embora atípicos, esses casos podem refletir instabilidades locais no campo de ondas, como superposição

de ondas refletidas ou interferência com as bordas da estrutura, especialmente em geometrias que facilitam a canalização do escoamento.

A Figura 42, que apresenta histogramas comparativos das elevações médias dos três sensores sem e com estrutura, com base nos dados que constam nas tabelas 9 e 10, representando graficamente os padrões descritos. No cenário sem estrutura, os valores entre WP2 e WP3 mantêm variações próximas de zero, com pequenas oscilações positivas e negativas. Já com a presença da estrutura, observa-se uma tendência consistente de queda nas elevações em WP3, com destaques visuais claros para os ensaios T3 e T4 nos diferentes níveis de profundidade h_s .

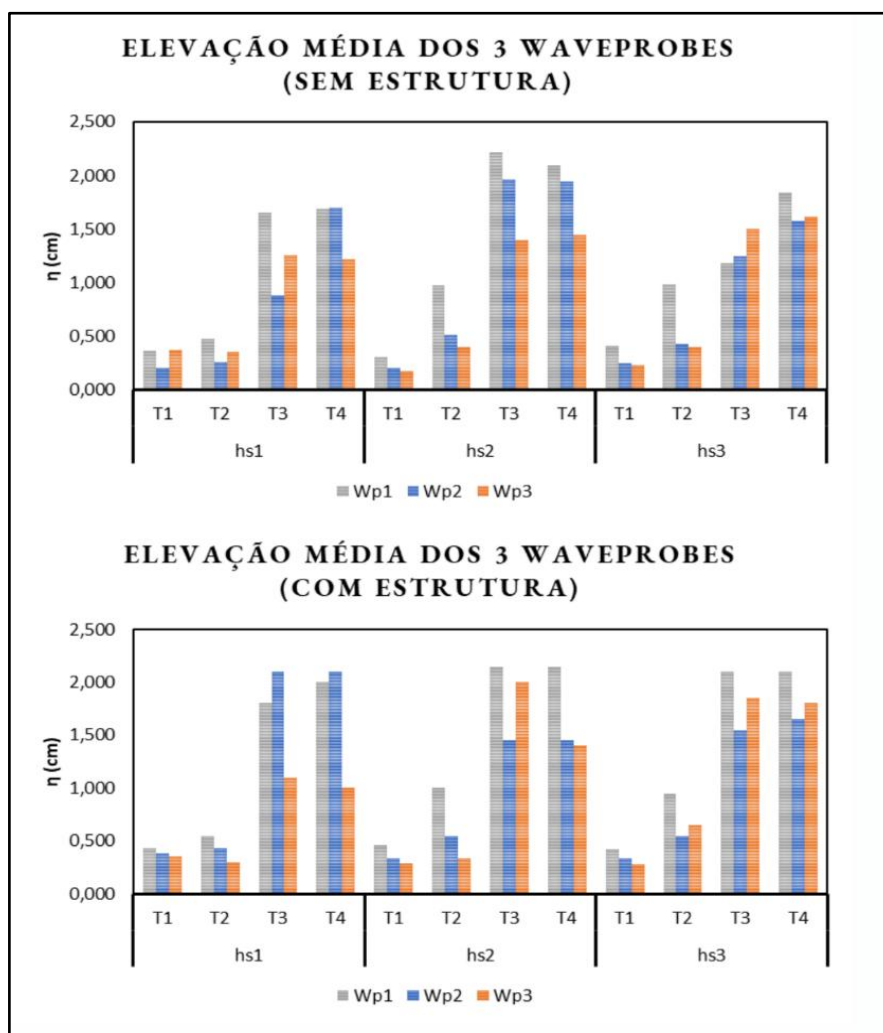


Figura 42 – Histograma das elevações médias da superfície livre registradas pelos três *WaveProbes*, nas condições com e sem a presença da estrutura.

O comportamento demonstrado na figura 42 é compatível com os princípios hidrodinâmicos descritos por Patel (1989), que identifica a formação de zonas de recirculação, dissipação turbulenta e perda de carga em torno de estruturas submersas cilíndricas.

cas submetidas à ação de ondas periódicas. Tais mecanismos são responsáveis pela redução da energia propagante e podem ser explorados como estratégia de mitigação da erosão em ambientes costeiros.

Os dados analisados demonstram de forma consistente que a presença da FTT altera significativamente o campo hidrodinâmico local, promovendo dissipação de energia ondulatória e, potencialmente, redução do impacto erosivo a jusante. Os efeitos são mais evidentes nas condições com menor período (ondas mais curtas), nas quais o tempo de interação entre a onda e a estrutura é mais intenso e o campo orbital mais concentrado.

A comparação entre os diferentes sensores evidencia também o papel do substrato na propagação da onda e sugere a importância de considerar a rugosidade do leito e a geometria da estrutura nos modelos numéricos de simulação. Os resultados obtidos fornecem subsídios relevantes para o dimensionamento de estruturas costeiras porosas e flexíveis, alinhando-se às recomendações teóricas de Dean e Dalrymple (1991) e Sumer e Fredsøe (2006).

4.2.1 Análise da Energia nas Ondas

A energia média por unidade de área das ondas foi estimada com base nas elevações da superfície livre registradas pelos sensores capacitivos (WP1, WP2 e WP3), posicionados ao longo do canal experimental. Os cálculos seguiram a equação clássica da energia de ondas regulares proposta por Dean e Dalrymple (1991), conforme a Eq. (2.12).

As Tabelas 11 e 12 apresentam os valores de energia total estimados nos três sensores, bem como a média total para cada configuração de h_s e T , sem e com a estrutura.

Tabela 11 - Cálculo da energia média por unidade de área registrada por altura de onda de cada sensor (*WaveProbe*) e a energia total média, nas condições sem a presença da estrutura.

h_s	$T(s)$	Wp1 - Et (J/m^2)	Wp2 - Et (J/m^2)	Wp3 - Et (J/m^2)	Etm(J/m^2)
hs1	2,68	0,076	0,017	0,067	0,053
	1,79	0,147	0,044	0,051	0,081
	1,06	1,507	0,477	0,785	0,923
	0,8	1,349	0,352	0,181	0,627
hs2	2,68	0,053	0,020	0,029	0,034
	1,79	0,311	0,158	0,070	0,180
	1,06	1,161	0,835	0,940	0,979
	0,8	1,199	1,199	0,887	1,095
hs3	2,68	0,058	0,032	0,021	0,037
	1,79	0,308	0,060	0,114	0,161
	1,06	1,439	1,080	1,246	1,255
	0,8	1,499	1,184	1,381	1,355

Tabela 12 – Cálculo da energia média por unidade de área registrada por altura de onda de cada sensor (*WaveProbe*) e a energia total média, nas condições com a presença da estrutura.

hs	T(s)	Wp1 - Et (J/m ²)	Wp2 - Et (J/m ²)	Wp3 - Et (J/m ²)	Etm(J/m ²)
hs1	2,68	0,092	0,072	0,063	0,076
	1,79	0,147	0,092	0,042	0,094
	1,06	1,577	2,146	0,589	1,437
	0,8	1,946	2,146	0,487	1,526
hs2	2,68	0,103	0,054	0,040	0,066
	1,79	0,487	0,147	0,056	0,230
	1,06	2,249	1,023	1,946	1,740
	0,8	2,249	1,023	0,954	1,409
hs3	2,68	0,088	0,056	0,037	0,060
	1,79	0,439	0,147	0,206	0,264
	1,06	2,146	1,168	1,665	1,660
	0,8	2,146	1,324	1,577	1,682

A FTT foi instalada entre os sensores WP2 e WP3, de modo que qualquer variação significativa nos valores de energia entre esses dois pontos pode ser atribuída à sua ação sobre o escoamento.

Os resultados (Tabela 11 e 12) evidenciam diferenças expressivas no comportamento da energia ondulatória em função tanto da profundidade da lâmina d'água quanto do período das ondas. Na ausência da estrutura (Tabela 11), os dados demonstram que a energia se propaga ao longo do canal de forma relativamente estável, com pequenas flutuações entre os sensores WP2 e WP3.

Em situações de ondas curtas, como nas configurações com T_4 s e T_3 , observa-se uma tendência de redução da energia total na direção do escoamento, embora essa perda seja frequentemente discreta. A média energética nestes casos reflete a dominância das forças oscilatórias de curta escala, que mantêm elevada a concentração de energia mesmo em curtas distâncias de propagação.

Com a inserção da FTT (Tabela 12), entretanto, observa-se um comportamento distinto. A análise dos dados evidencia uma atenuação mais pronunciada da energia entre os pontos imediatamente antes e após a estrutura.

Esse efeito é particularmente notável em *hs1*, onde a interação entre a onda e a FTT é mais intensa devido à proximidade entre o campo orbital da onda e o fundo do canal.

Nessas condições, a estrutura se mostrou eficaz como elemento dissipador, promovendo perdas significativas de energia em WP3, especialmente para os períodos mais curtos. Em T_4 , por exemplo, a energia registrada em WP2 ultrapassou os 2,1 J/m², mas caiu para menos de 0,5 J/m² em WP3, o que representa uma redução superior a 75% do conteúdo energético em um curto trecho do canal. Tal comportamento é compatível com a

literatura especializada, que aponta para a intensificação da dissipação de energia em ambientes rasos, onde as forças orbitais interagem mais diretamente com estruturas submersas (Sumer e Fredsøe, 2006).

À medida que a profundidade aumenta, o efeito dissipativo da estrutura tende a se atenuar. Em *hs2*, observam-se reduções de energia ainda relevantes, mas menos expressivas do que nas configurações rasas. Em *T3*, por exemplo, a energia permaneceu elevada mesmo após a interação com a estrutura, o que sugere que parte da onda consegue transpor o obstáculo com menor perda. Isso indica que a eficiência da estrutura não é apenas função da intensidade da onda incidente, mas também da profundidade relativa do ambiente, que condiciona o grau de interferência entre o escoamento e a estrutura.

Em profundidade elevada (*hs3*), a eficiência dissipativa da estrutura mostra-se consideravelmente reduzida. Mesmo em ondas curtas, os valores de energia permanecem altos ao longo dos três sensores. Nessa condição, a estrutura interage apenas parcialmente com o campo de velocidades orbitais, localizado predominantemente próximo à superfície livre. A menor atenuação do cisalhamento e a menor geração de vórtices ao redor da estrutura resultam em uma dissipação energética limitada. Esse comportamento é coerente com os princípios da teoria linear de ondas, segundo os quais, em águas profundas, as órbitas das partículas tornam-se circulares e confinadas às camadas superiores da coluna d'água (Dean e Dalrymple, 1991), reduzindo a interação com estruturas submersas.

A Figura 43 corrobora visualmente essas observações. Nela, nota-se que, na condição sem estrutura, os maiores valores de energia média ocorrem nos menores períodos, especialmente em profundidades maiores, como *hs3*.

A energia decresce sistematicamente à medida que o período aumenta, comportamento esperado diante da relação inversa entre a frequência e o conteúdo energético por unidade de área. Já com a estrutura, percebe-se uma queda mais acentuada da energia nas profundidades menores, sobretudo em *hs1*, revelando a atuação ativa da estrutura sobre a dissipação do conteúdo energético das ondas. Em *hs3*, por outro lado, as curvas com e sem estrutura apresentam proximidade considerável, por exemplo, em *hs3* com *T4*, os valores em WP2 e WP3 foram $1,324 \text{ J/m}^2$ e $1,577 \text{ J/m}^2$, respectivamente, indicando até um ligeiro aumento, o que reforça a menor eficácia da estrutura nessa condição, reforçando o argumento de que a dissipação efetiva depende da proximidade entre o fundo e o campo orbital da onda.

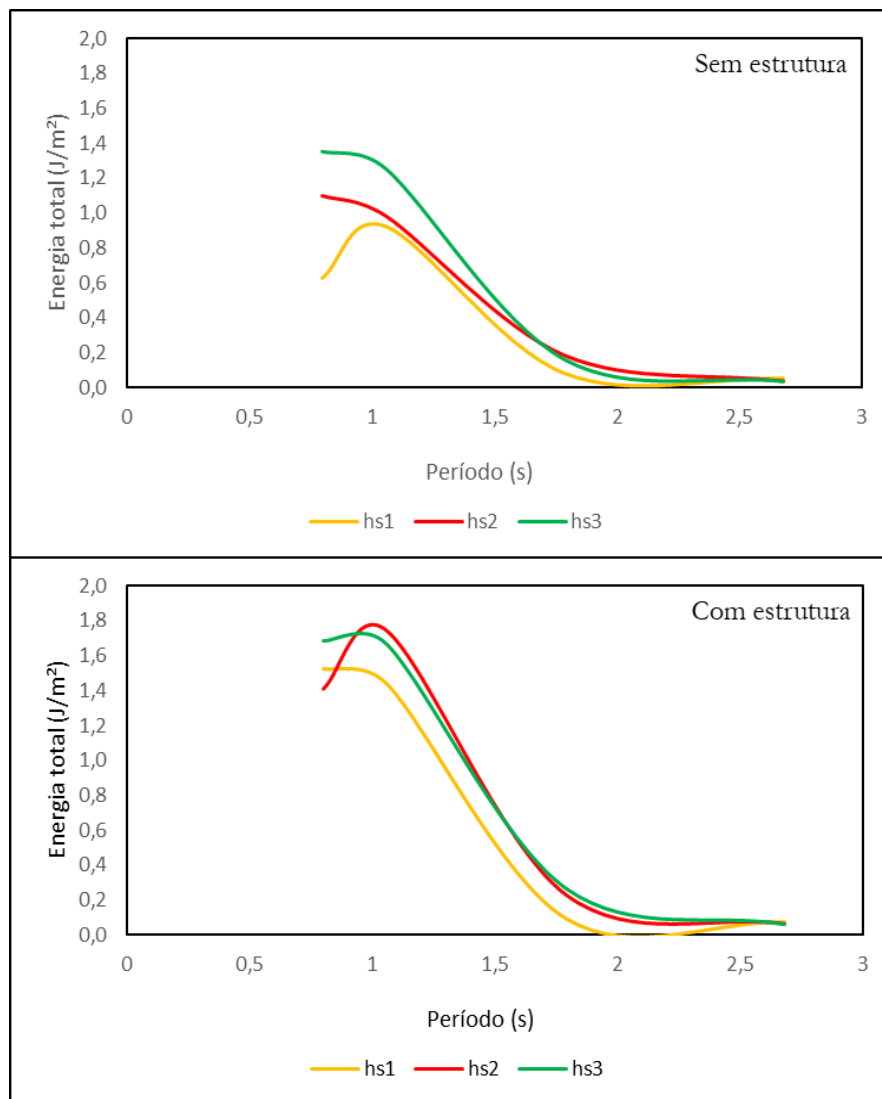


Figura 43 – Energia média das ondas calculada a partir das elevações registradas pelos sensores WP1, WP2 e WP3, nos ensaios com diferentes profundidades (*hs1*, *hs2* e *hs3*) e períodos de onda.

Assim, a análise conduzida demonstra que a FTT cumpre uma função técnica relevante no controle da energia das ondas, com desempenho mais expressivo em águas rasas e sob a ação de ondas de curto período. O comportamento identificado indica que, nesses contextos, há maior geração de turbulência, fricção e/ou quebra de simetria no escoamento ao redor da estrutura, contribuindo para a redução efetiva da energia. Em contrapartida, em águas mais profundas (*hs3*), sua eficácia diminui, o que sugere que ajustes no dimensionamento, na forma ou na posição da estrutura podem ser necessários para assegurar a eficiência do dispositivo em diferentes condições ambientais.

4.2.2 Análise Temporal da Propagação da Onda

Com o objetivo de aprofundar a avaliação do comportamento hidrodinâmico das ondas regulares em interação com a estrutura submersa, procedeu-se à análise das séries temporais de elevação da superfície livre, com foco no período T4. Esta condição foi selecionada por representar, nos resultados anteriores, os cenários mais expressivos de dissipação de energia e alteração do padrão de propagação, particularmente nas menores profundidades. A Figura 44 apresenta os trechos representativos das séries temporais obtidas nos três sensores capacitivos (WP1, WP2 e WP3), para os ensaios realizados com e sem a FTT, nas profundidades *hs1*, *hs2* e *hs3*.

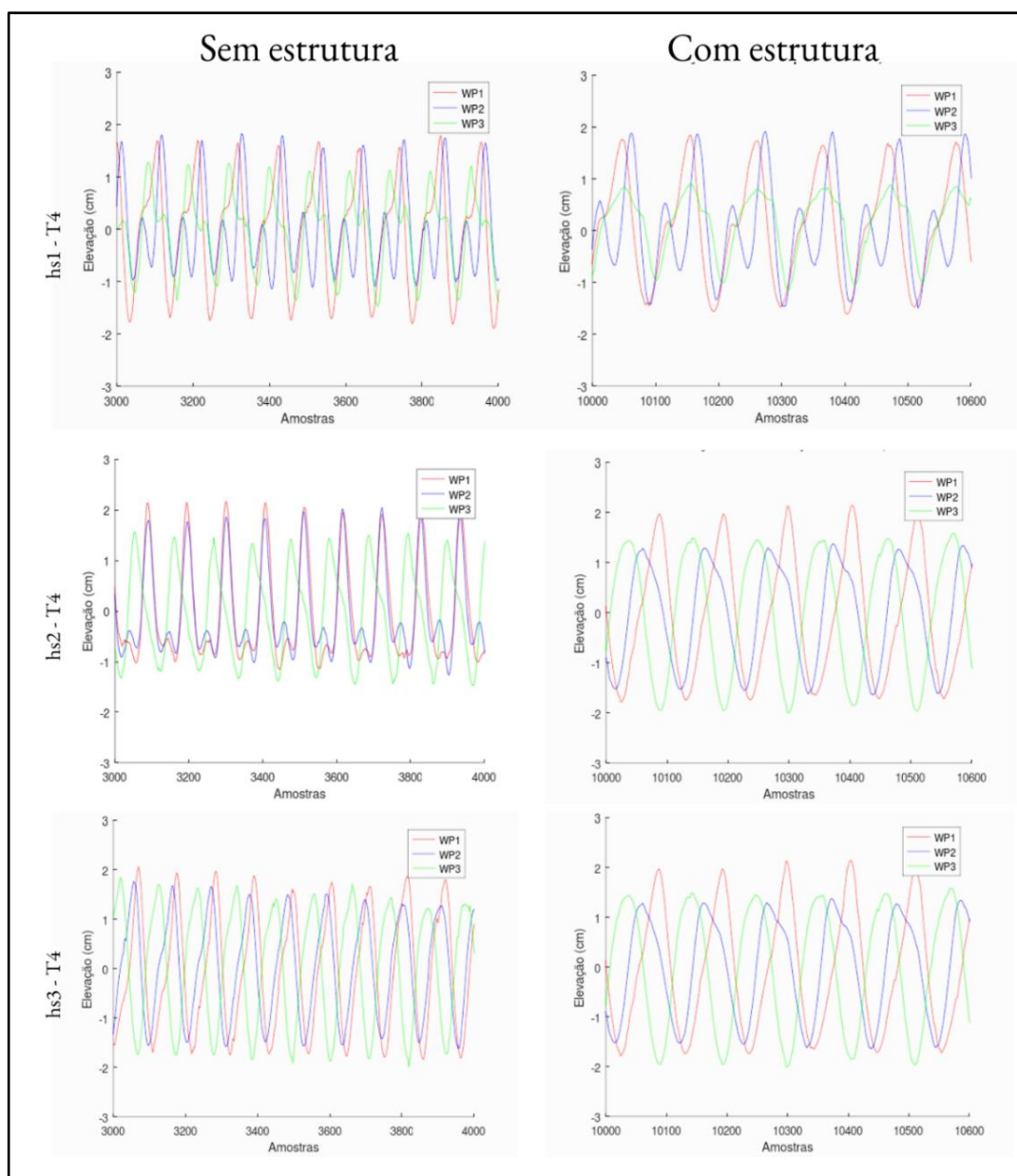


Figura 44 – Elevação da superfície livre registrada nos três sensores (WP1, WP2 e WP3), com e sem estrutura, para T4 nas profundidades *hs1*, *hs2* e *hs3*.

A observação das séries temporais na Figura 44 revela padrões distintos de propagação conforme a presença ou ausência da estrutura. No cenário sem estrutura, os sinais registrados mantêm alta coerência entre os sensores, com amplitudes similares e pouca defasagem de fase, indicando que as ondas se propagam de forma contínua e sem interferências significativas. Esse comportamento sugere baixa dissipação de energia ao longo do canal e confirma a regularidade da propagação em ambientes sem obstáculos físicos.

Em contraste, no cenário com a estrutura instalada, nota-se uma alteração significativa na morfologia do sinal, especialmente no sensor WP3, posicionado imediatamente a jusante da estrutura. A amplitude da onda apresenta uma redução perceptível, acompanhada de distorções de forma e mudanças de fase em relação a WP2. Esse comportamento é compatível com a ação dissipativa da estrutura, que interfere no campo orbital das partículas da água, promovendo atenuação energética e potencial geração de vórtices e zonas de recirculação.

A profundidade da lâmina d'água mostrou-se determinante na intensidade desse efeito. Em *hs1*, a interação é mais pronunciada: WP3 registra uma onda com amplitude visivelmente reduzida e forma assimétrica, sinalizando a presença de mecanismos de fricção e turbulência induzidos pela geometria da estrutura. Já em *hs2*, embora ainda haja dissipação, o impacto visual nos gráficos é moderado, e as amplitudes de WP3 se mantêm relativamente próximas às de WP2. Por fim, em *hs3*, as diferenças entre os sinais com e sem estrutura são mais sutis, evidenciando que a ação dissipativa da estrutura diminui em ambientes mais profundos, onde o campo de velocidades orbitais se concentra nas camadas superiores da coluna d'água e interage menos com o obstáculo submerso.

Esses resultados estão de acordo com as considerações teóricas de Sumer *et al.* (2013), segundo as quais estruturas submersas atuam como elementos dissipadores de energia mais eficazes quando a escala da onda é comparável à altura da estrutura e ao relevo do fundo. Quando essa relação é desfavorável, como em águas profundas, a estrutura exerce menor influência sobre a onda incidente.

Adicionalmente, conforme apontado por Dean e Dalrymple (1991), ondas curtas, como aquelas associadas a T4, são mais suscetíveis à dissipação por fricção no fundo e turbulência induzida por obstáculos, o que explica a expressiva redução da elevação e da energia observadas nos sinais experimentais com estrutura. Tal comportamento reforça os achados apresentados nas análises energéticas da seção anterior, nas quais se identificaram perdas significativas de energia entre WP2 e WP3 sob esta mesma condição.

A deformação observada na forma da onda, especialmente em WP3 com estrutura, pode ser atribuída à modificação do campo de escoamento, à formação de zonas de esteira e à presença de rugosidade introduzida pela superfície têxtil. A onda deixa de se propagar com simetria e apresenta flutuações mais irregulares, características que, associadas à queda de amplitude, indicam uma atuação ativa da estrutura sobre o regime ondulatório local.

Essas observações sugerem que a eficácia de geoformas têxteis tubulares em ambientes costeiros está diretamente relacionada à escala das ondas dominantes e à profundidade relativa do ambiente. Em águas rasas, estruturas com geometria adequada podem

contribuir significativamente para a dissipação da energia ondulatória e, por consequência, para a mitigação de processos erosivos. Por outro lado, em águas mais profundas, sua atuação tende a ser mais limitada, o que exige ajustes de projeto, como aumento de altura, alteração de forma ou modificação do posicionamento relativo à linha de costa ou ao gradiente batimétrico.

Em síntese, a análise temporal corrobora os resultados anteriores de elevação e energia média, e confirma que a presença da estrutura rompe o padrão regular de propagação da onda, promovendo reduções de amplitude e distorções de forma.

4.3 Análise do Processo Erosivo

A interação entre as ondas incidentes e o fundo sedimentar mostrou-se determinante na gênese e evolução das cavidades erosivas observadas nos experimentos. Os resultados obtidos evidenciam que a magnitude da erosão foi diretamente influenciada tanto pela profundidade da lâmina d'água quanto pelo período das ondas, em presença da FTT.

A Figura 45 permite uma leitura detalhada da evolução temporal e espacial da erosão no entorno da estrutura.

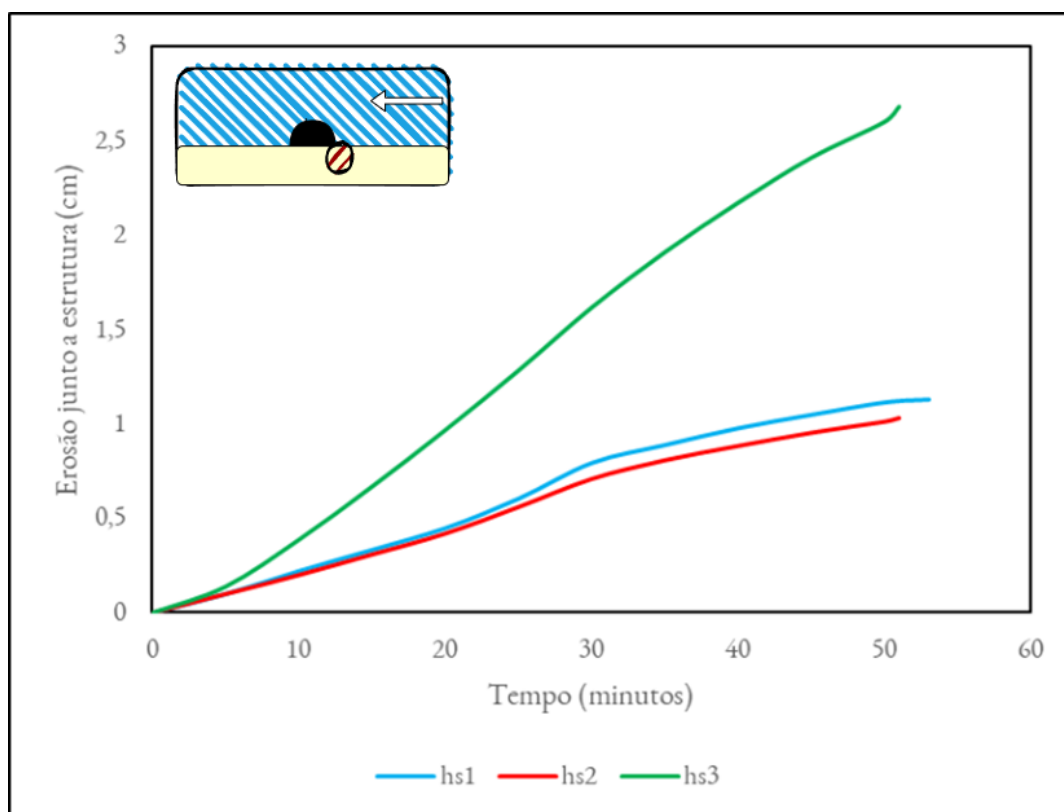


Figura 45 – Evolução temporal da profundidade erosiva para diferentes condições de lâmina d'água (hs), sob o período de onda $T = 0,80$ s.

A Figura 45 apresenta a evolução da profundidade erosiva ao longo do tempo, considerando a condição de T4. Observa-se que, para a profundidade total de *hs3*, a progressão da erosão foi significativamente superior às demais configurações, alcançando valores próximos a 2,6 cm ao final de aproximadamente 50 min de ensaio. Esse comportamento sugere que, sob colunas d'água mais profundas, há maior acúmulo de energia orbital próximo ao fundo, o que intensifica os mecanismos de cisalhamento e, por consequência, a mobilização de partículas (Sumer *et al.*, 2013). Além disso, a maior profundidade reduz a dissipação de energia imposta pela FTT, permitindo maior ação da componente oscilatória do escoamento na base da estrutura.

Em contraste, as curvas correspondentes às condições *hs1* e *hs2* demonstraram evolução mais lenta da escavação, com estabilização em torno de 1 cm. A inclinação das curvas permite inferir que a profundidade atua como um modulador da intensidade do cisalhamento de fundo, nos quais sugerem um aumento da energia orbital com a profundidade promovendo o incremento da taxa de erosão.

A Figura 46 apresenta os perfis longitudinais de erosão junto à estrutura, também sob o efeito do período de T4. Nota-se que, para *hs3* (linha verde), a cavidade formada é mais profunda e extensa, com deslocamento do ponto de máxima erosão para montante da estrutura. Essa configuração apresenta não apenas o maior aprofundamento erosivo (-2,8 cm), mas também uma maior largura da área afetada.

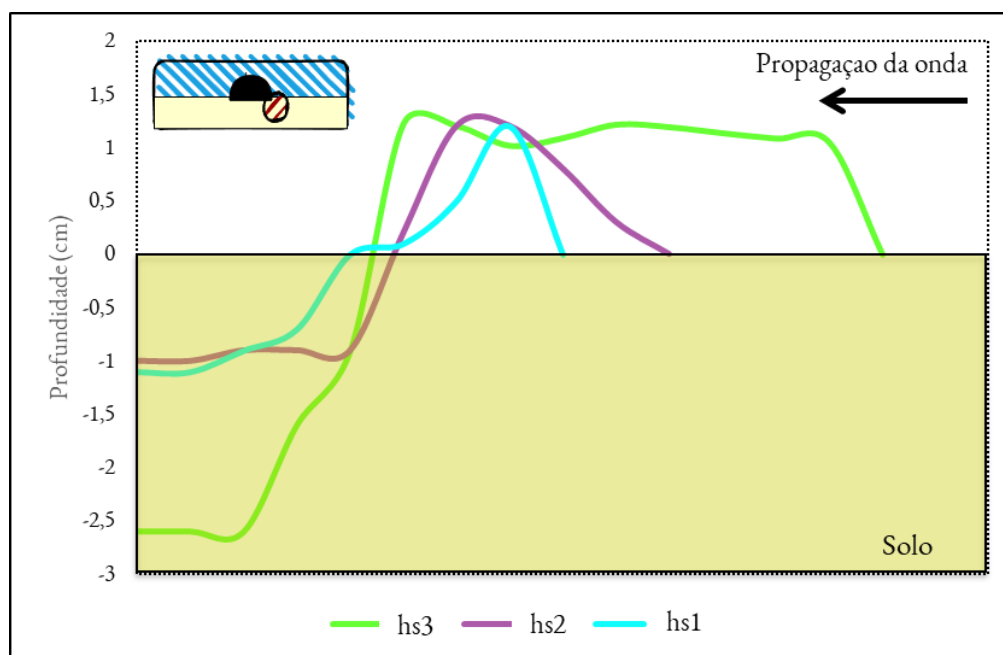


Figura 46 – Perfis longitudinais das cavidades erosivas formadas junto à estrutura para o período $T = 0,80$ s, considerando as três profundidades analisadas (*hs1*, *hs2* e *hs3*). As curvas representam a variação da profundidade do leito junto a geoforma têxtil. O posicionamento da estrutura está indicado no desenho esquemático no canto superior esquerdo, e o gráfico evidencia a influência da profundidade da lâmina d'água na intensidade e na geometria da escavação.

O perfil correspondente à condição *hs1* (linha azul) apresenta um desenvolvimento erosivo mais localizado, com menor profundidade e menor extensão. Já o caso *hs2* (linha roxa) ocupa uma posição intermediária entre as demais curvas.

Tais padrões corroboram a hipótese de que a profundidade relativa influencia o modo como a onda interage com a estrutura e com o solo, alterando o regime de escoamento e, por consequência, a morfodinâmica do leito.

As imagens experimentais (Figuras 47 a 49) reforçam os dados quantitativos ao evidenciarem visualmente a formação de cavidades erosivas junto à estrutura em diferentes profundidades. Na Figura 47 (*hs1-T4*), observa-se uma cavidade restrita e pouco profunda, com limites bem definidos. A Figura 48 (*hs2-T4*) mostra uma cavidade com maior largura e desenvolvimento a montante, enquanto a Figura 49 (*hs3-T4*) revela uma depressão oval e pronunciada sob a FTT, indicando erosão interna com possível formação de zona de recirculação e baixa pressão.

Esse comportamento, particularmente observado na condição *hs3-T4*, sugere a ocorrência de recirculação e geração de zonas de baixa pressão abaixo da estrutura, facilitando a erosão interna, um fenômeno crítico que pode comprometer a estabilidade de geoformas não ou mal ancoradas. Tais padrões indicam que a FTT, ao interagir com o campo de escoamento, altera significativamente o regime hidrodinâmico, intensificando o processo erosivo a montante e, simultaneamente, promovendo certa proteção a jusante. Este comportamento destaca o papel da estrutura na deflexão do escoamento incidente e na geração de gradientes de pressão capazes de redistribuir o campo de cisalhamento.

Os dados indicam que períodos de onda superiores a *T3* não geraram efeitos erosivos significativos, o que se justifica pela menor frequência e energia associada às ondas mais longas em ambientes com profundidade reduzida. Por outro lado, a condição de menor período (*T4*) resultou em impacto mais direto da onda sobre a estrutura, com rápida evolução da cavidade erosiva desde os primeiros *min* de ensaio.

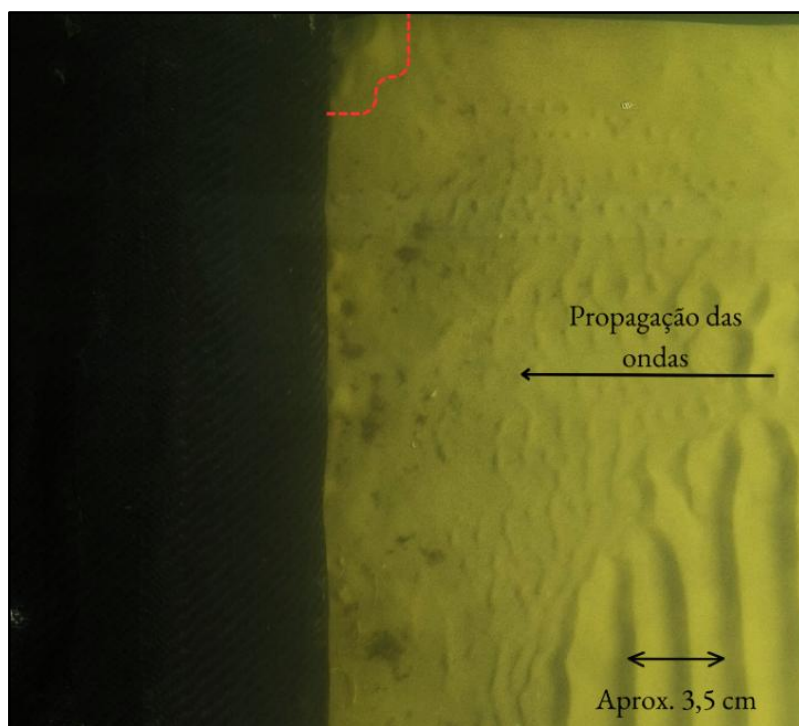


Figura 47 – Cavidade erosiva formada junto à FFT no ensaio *bs1-T4*, evidenciando escavação a montante e lateral da estrutura.



Figura 48 - Cavidade erosiva formada junto à geoforma têxtil no ensaio *bs2-T4*, evidenciando escavação a montante e lateral da estrutura.

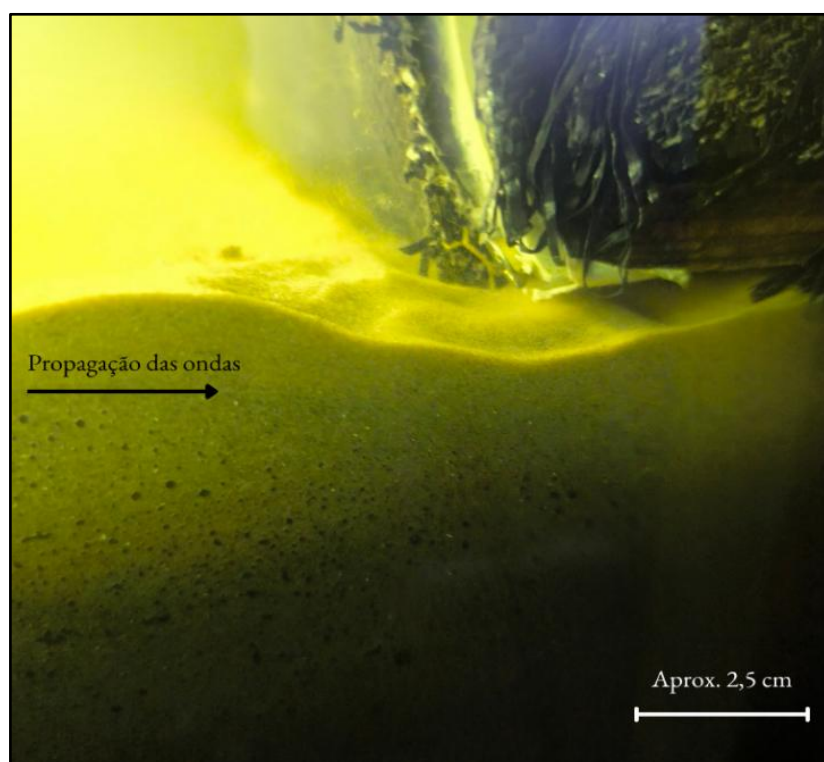


Figura 49 - Cavity erosiva formada junto à geoforma têxtil no ensaio *bs3-T4*, evidenciando escavação a montante e lateral da estrutura.

Nos casos mais severos (*bs3*, *T4*), a erosão atingiu a base da estrutura, sugerindo risco de instabilização estrutural ou colapso parcial. Tais achados evidenciam a necessidade de adoção de medidas mitigadoras no dimensionamento de geoformas flexíveis, como o uso de materiais permeáveis, ancoragens eficazes e modelagem hidrodinâmica tridimensional.

De modo geral, os resultados obtidos nesta seção corroboram a literatura especializada ao demonstrar que a interação entre ondas, fundo e estruturas submersas demanda abordagem tridimensional e integrada. A suscetibilidade do sistema à erosão revelou-se particularmente elevada em condições de maior profundidade e menor período de onda, nas quais os mecanismos de instabilidade hidrodinâmica atuam de forma mais intensa e localizada (Sumer *et al.*, 2013).

4.4 Formação de *Sand Ripples*

A análise experimental demonstrou que, além das cavidades erosivas, houve a formação de *sand ripples* (ondulações sedimentares) em todos os ensaios conduzidos com *T4*, independentemente da profundidade da lâmina d'água. Esse fenômeno é caracterizado por ondulações de pequena escala no fundo sedimentar, decorrentes do movimento oscilatório das partículas de areia induzido pela ação das ondas (Sumer *et al.*,

2013). A presença dessas microestruturas indica modificações relevantes na dinâmica do transporte sedimentar, especialmente em função da interação hidrodinâmica entre as ondas e a geoforma têxtil.

A Figura 50 apresenta a comparação entre as condições iniciais e finais do leito sedimentar nos três cenários testados (*hs1*, *hs2* e *hs3*), com destaque para a região a montante da Forma Têxtil Tubular (FTT), onde as ondulações se manifestaram de forma mais pronunciada.

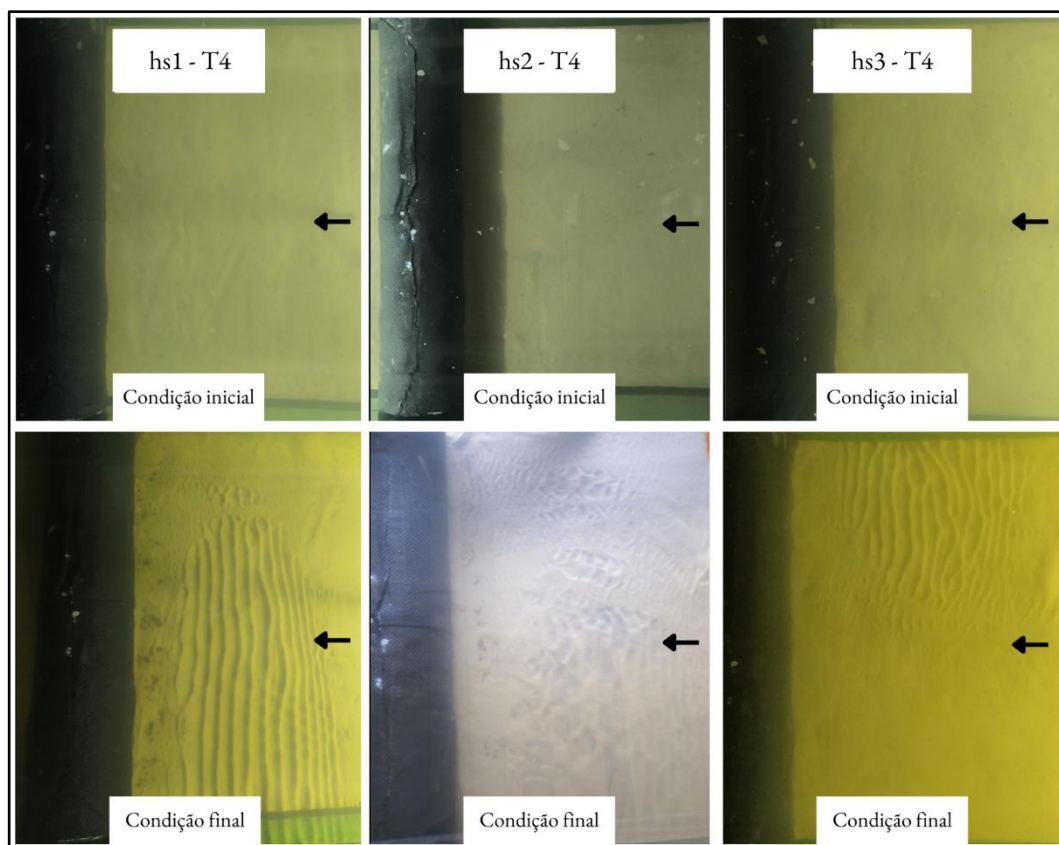


Figura 50 – Comparação entre as condições iniciais e finais dos ensaios T4 nas profundidades *hs1*, *hs2* e *hs3*, evidenciando a formação de sand ripples a montante da FTT. A seta indica a direção de propagação das ondas regulares.

Essas ondulações se caracterizam por pequenas cristas e vales formados na superfície do solo arenoso, resultantes da movimentação oscilatória das partículas de sedimento sob a ação orbital das ondas (Sumer *et al.*, 2013). A morfodinâmica do fundo, inicialmente plana e uniforme (linha superior das imagens), passou a apresentar microfeições bem definidas após a propagação contínua das ondas, especialmente em condições de baixa profundidade (*hs1* e *hs3*), como ilustrado nas imagens da linha inferior.

Em *hs1-T4* e *hs3-T4*, as ondulações surgiram de forma ordenada, com padrão relativamente regular e paralelismo entre as cristas, indicando a predominância de forças oscilatórias simétricas e elevada mobilidade de grãos. Já em *hs2-T4*, observou-se um padrão

menos definido, com ondulações irregulares e de menor contraste, o que pode estar associado à maior instabilidade local do escoamento ou à interferência de recirculações secundárias geradas pela presença da estrutura.

Os mapas de elevação (Figuras 51, 52 e 53) evidenciam a formação de *sand ripples* com intensidades distintas conforme a profundidade da lâmina d'água, indicando que a variação de profundidade influencia diretamente a mobilização dos sedimentos. Já os perfis transversais permitiram visualizar as alterações morfológicas no leito em cada condição testada.

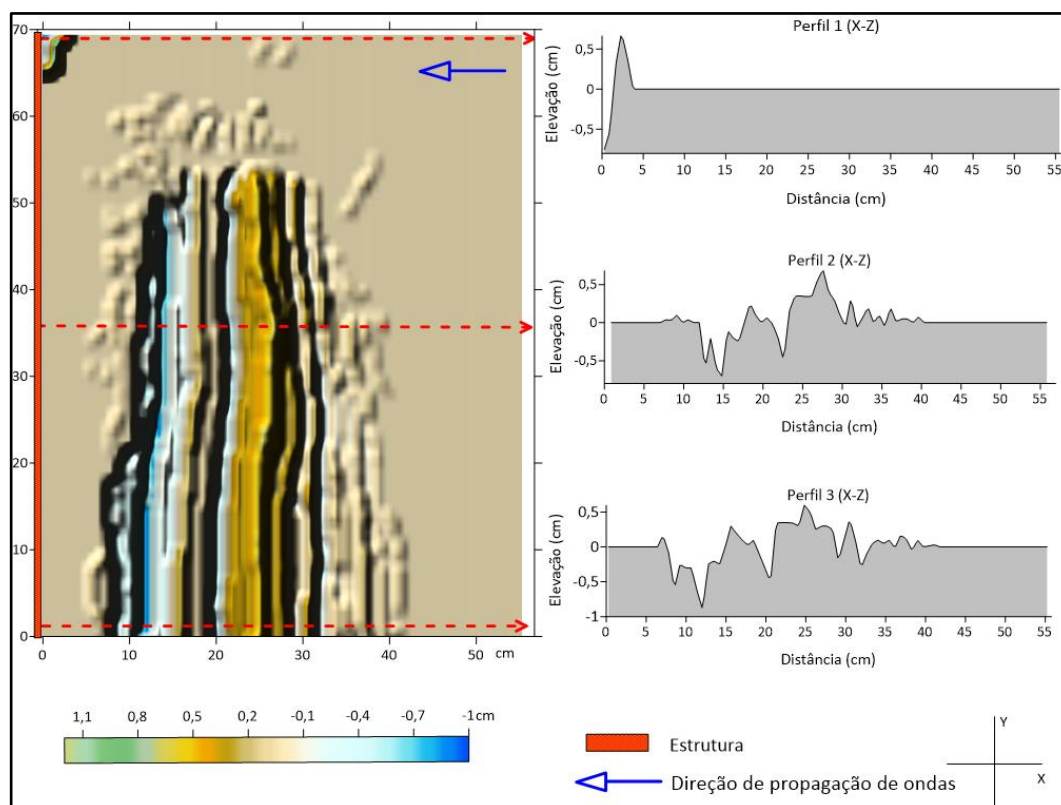


Figura 51 – Mapa de relevo do leito sedimentar com identificação da movimentação de fundo para a condição *hs1-T4*, evidenciando a formação de *sand ripples* a montante da geoforma têxtil

No cenário *hs1* (Figura 51), o qual correspondente à menor profundidade analisada, observa-se a formação de *sand ripples* com amplitude reduzida e espaçamento uniforme, o que sugere um padrão de escoamento mais regular e com menor energia orbital atuante sobre o leito. A simetria predominante nas ondulações reflete a influência limitada da estrutura na geração de perturbações intensas, caracterizando um regime de escoamento com alta instabilidade hidrodinâmica. Esse comportamento é típico de ambientes rasos com ondas curtas, nos quais a movimentação sedimentar ocorre de forma mais desordenada.

Com o aumento da profundidade (Figura 52), nota-se uma alteração no padrão morfológico das ondulações, que se tornam mais irregulares em termos de altura e espaçamento em relação a *hs1*. Essa variabilidade indica uma intensificação da interação entre o campo orbital da onda e a estrutura submersa, promovendo maior instabilidade no transporte de sedimentos. As zonas de concentração das cristas sugerem a presença de vórtices e recirculações localizadas, possivelmente resultantes do efeito de contorno da geoforma têxtil.

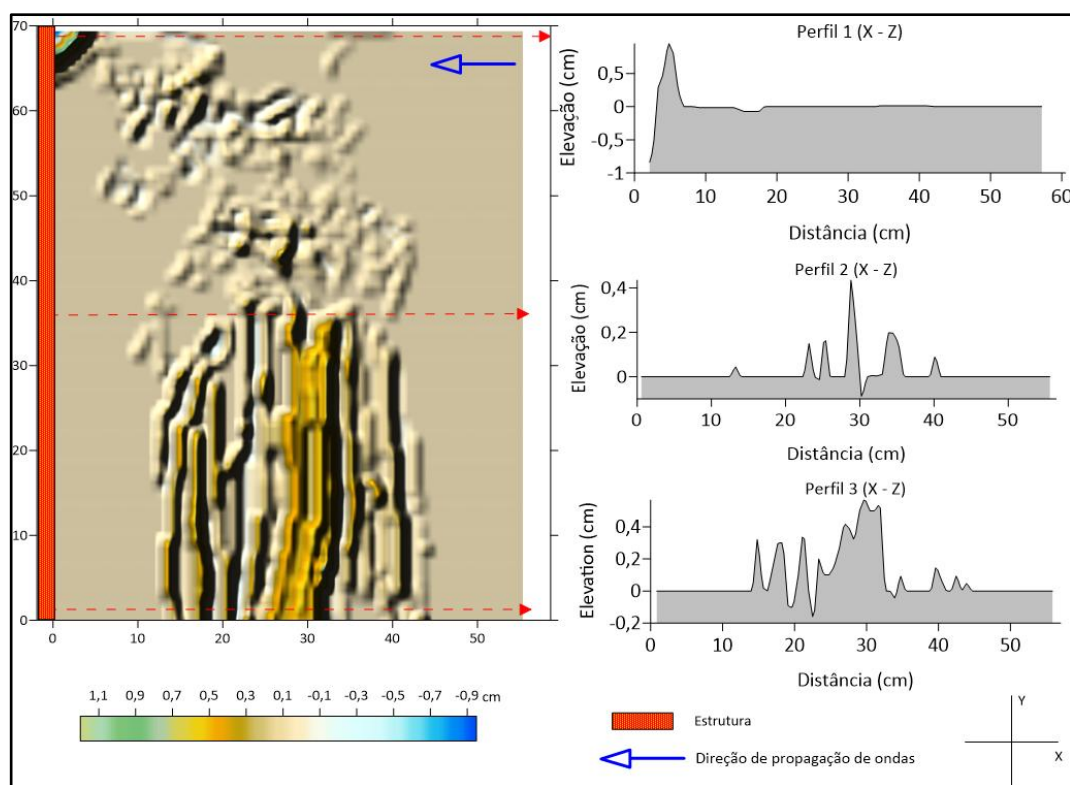


Figura 52 - Mapa de relevo do leito sedimentar com identificação da movimentação de fundo para a condição *hs2-T4*, evidenciando a formação de *sand ripples* a montante da geoforma têxtil.

Na maior profundidade analisada (Figura 53), os *sand ripples* apresentam características marcadamente assimétricas, com cristas mais altas, menor comprimento de onda e orientação irregular. Essa configuração morfológica evidencia a ocorrência de escoamento turbulento mais intenso e anisotrópico, indicando que, mesmo em águas mais profundas, a estrutura continua influenciando a distribuição de energia no leito. Essa condição é crítica para a estabilidade estrutural, pois *ripples* com essas características podem concentrar esforços erosivos em pontos específicos do leito.

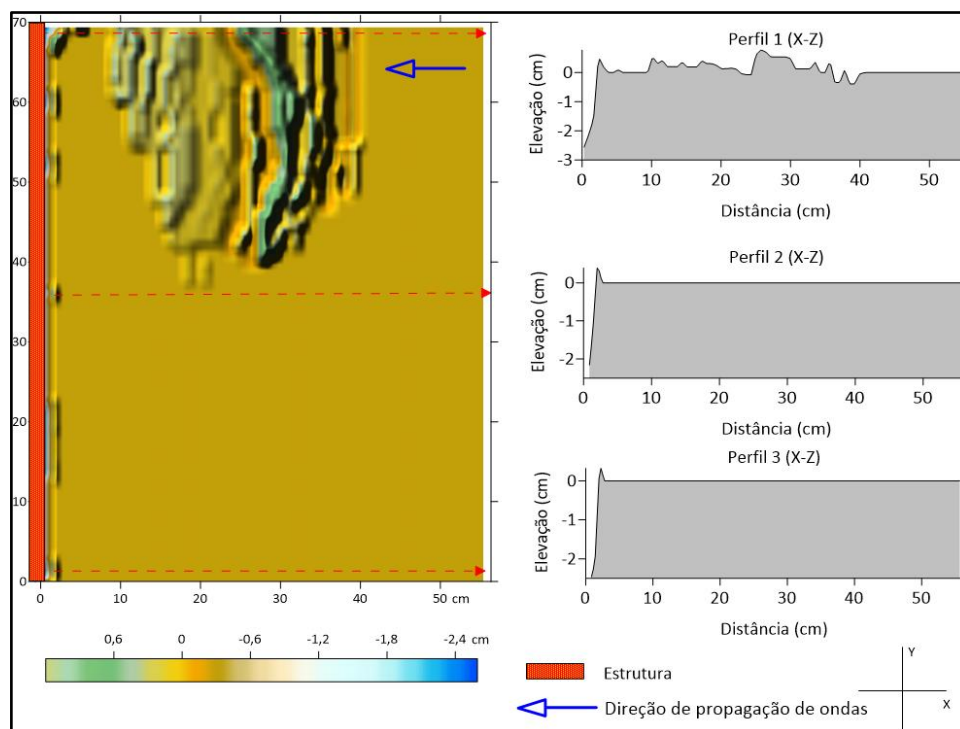


Figura 53 – Mapa de relevo do leito sedimentar com identificação da movimentação de fundo para a condição *hs3-T4*, evidenciando a formação de *sand ripples* a montante da geoforma têxtil.

Nos perfis transversais, observou-se que, em *hs1*, as ondulações apresentaram menor amplitude e espaçamento mais regular (Figura 51). Em *hs2* (Figura 52), houve maior irregularidade nas formas, indicando instabilidade no escoamento. Já em *hs3* (Figura 53), os *ripples* tornaram-se mais assimétricos e pronunciados, sugerindo uma intensificação do transporte de sedimentos.

Para aprofundar essa análise morfológica, os gráficos na Figura 54 quantificam os parâmetros médios dos *sand ripples* formados em cada ensaio com T4, considerando as três profundidades estudadas.

A amplitude média (Figura 54- A) variou de 0,30 cm (*hs1*) a 0,44 cm (*hs3*). Esse crescimento com a profundidade está de acordo com Soulsby (1997), que afirma que a amplitude dos *ripples* depende da intensidade do movimento oscilatório. Em profundidades maiores, a energia orbital parece ter exercido maior cisalhamento no leito, favorecendo ondulações mais altas.

O comprimento médio das cristas (Figura 54-B) apresentou comportamento inverso, com valores decrescentes conforme a profundidade aumentou: 47,05 cm (*hs1*), 31,60 cm (*hs2*) e 23,42 cm (*hs3*). Tal comportamento corrobora os achados de Sumer *et al.* (2013), que apontam que *ripples* mais curtos se formam em ondas de maior energia, onde ocorre redistribuição intensa de sedimentos.

A distância média entre cristas (Figura 54-C) variou entre 1,35 cm (*hs1*) e 2,125 cm (*hs3*). Essa diferença pode ser explicada pelas perturbações hidrodinâmicas induzidas

pela presença da estrutura, que observam que estruturas artificiais podem gerar padrões anômalos de *ripples* ao alterar o campo de escoamento.

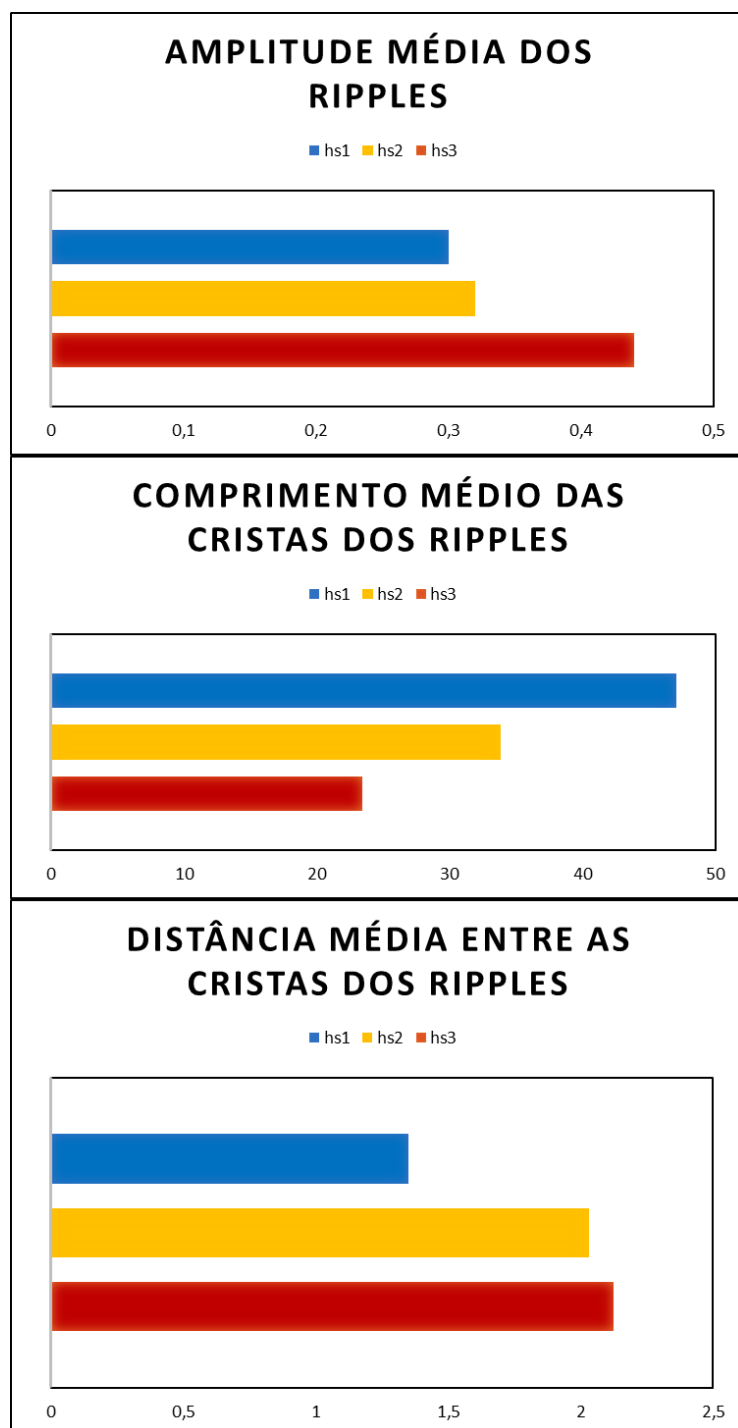


Figura 54 – Quantificação dos parâmetros médios das *ripples*, em cm, para os períodos T4 para todas as profundidades (hs).

Os *ripples* formados apresentaram padrões predominantemente assimétricos, o que indica a existência de um escoamento direcional dominante durante os ensaios. Conforme descrito por Soulsby (1997), essa assimetria é comum em ambientes onde ondas interagem com correntes unidirecionais ou com obstáculos que redirecionam o escoamento, como é o caso da geoforma têxtil simulada.

A predominância de padrões assimétricos nos *ripples* evidencia a existência de um escoamento direcional dominante, resultante da combinação entre ondas oscilatórias e perturbações causadas pela presença da estrutura. Conforme proposto por Soulsby (1997), tal assimetria é característica de ambientes em que a propagação das ondas sofre interferência de barreiras submersas, gerando escoamento preferencial e cisalhamento assimétrico.

Por fim, a irregularidade geométrica observada nos *ripples* está associada à classificação do regime de propagação das ondas como intermediário (ver Seção 4.1), no qual predominam órbitas elípticas e interação significativa com o fundo.

Os achados observados permitem destacar os seguintes pontos:

- A formação de *ripples* modifica a topografia local do leito, o que pode afetar a estabilidade da estrutura ao longo do tempo;
- A redução do comprimento das cristas com o aumento da profundidade sugere maior energia disponível para transporte sedimentar em maiores colunas d'água;
- O padrão assimétrico dos *ripples* evidencia a alteração do regime hidrodinâmico local, o que pode resultar em zonas preferenciais de erosão ou deposição;
- A influência da geoforma têxtil sobre o fundo sedimentar vai além da proteção direta, atuando também na redistribuição morfológica do substrato.

Em síntese, os dados obtidos reforçam que a presença de *sand ripples* é indicativa de um ambiente ativo em termos de transporte sedimentar. A interação entre ondas e estrutura deve ser considerada não apenas sob a ótica da proteção física, mas também sob o ponto de vista morfodinâmico. O monitoramento contínuo desses padrões é fundamental para avaliar o desempenho e a durabilidade das soluções com geoformas têxteis.

Portanto, a combinação entre os resultados quantitativos (medidas de cavidade e parâmetros dos *ripples*) e qualitativos (registros visuais e mapas de relevo) evidencia a complexidade do processo erosivo em torno de geoformas têxteis, reforçando a necessidade de abordagens multidisciplinares em seu dimensionamento e aplicação.

5 | Conclusões

O presente estudo investigou a interação entre ondas e uma forma têxtil tubular de contenção submersa, analisando seus efeitos sobre a propagação das ondas, a dinâmica erosiva e a formação de padrões sedimentares do tipo *sand ripples*. Através de ensaios controlados em canal experimental, foi possível observar modificações substanciais na hidrodinâmica e na morfodinâmica do fundo em função da presença da estrutura, em especial nos regimes dominados por ondas curtas.

Os resultados demonstraram que a estrutura interferiu diretamente na altura das ondas, promovendo um leve aumento da amplitude a montante, seguido de uma redução expressiva a jusante, o que indica a ocorrência de dissipação de energia por mecanismos de fricção, turbulência e dispersão. Tal comportamento foi mais pronunciado em condições com ondas de menor período, nas quais se registraram as maiores variações de energia entre os sensores dispostos antes e depois da estrutura. Em contraste, ondas com períodos mais longos mantiveram-se praticamente inalteradas ao longo do percurso, revelando que a eficiência da estrutura está intimamente relacionada à escala das ondas incidentes.

No tocante à dinâmica sedimentar, os dados evidenciaram um padrão relevante: as maiores alterações morfológicas ocorreram na região situada antes da estrutura, no sentido da propagação das ondas. Nessa área, foram identificadas feições erosivas expressivas e mobilização significativa do sedimento superficial, sugerindo que a concentração de energia remanescente foi suficiente para provocar cisalhamento de fundo. Após a passagem pela estrutura, entretanto, não foram observadas alterações morfológicas mensuráveis, o que reforça a eficácia do sistema em reduzir o impacto hidrodinâmico a jusante.

A formação de *sand ripples* também se mostrou sensível à atuação da estrutura. Notou-se o desenvolvimento de padrões assimétricos, com maior amplitude em condições de maior profundidade, o que indica uma interação complexa entre o campo de velocidade induzido pelas ondas e a topografia resultante do sedimento mobilizado. A sobreposição entre cenários de maior energia e maior erosão reforça a hipótese de que a dissipação localizada elevou os níveis de cisalhamento, potencializando os processos erosivos a montante e favorecendo a organização sedimentar em formas onduladas.

Os achados deste trabalho estão em consonância com a literatura especializada, ou seja, as estruturas submersas são capazes de alterar significativamente o campo de propagação das ondas, induzir padrões diferenciados de erosão e influenciar o comportamento morfodinâmico do substrato. A atuação da estrutura aqui avaliada reforça o entendimento de que elementos submersos têxteis, ao serem corretamente posicionados, podem atuar como barreiras energéticas eficazes, desde que seus efeitos colaterais, como o aumento da erosão a montante, sejam devidamente mitigados por meio de soluções complementares.

5.1 Contribuições do Estudo

Esta investigação fornece evidências experimentais sobre o comportamento de estruturas de contenção têxteis em contextos de propagação de ondas e transporte sedimentar. A análise integrada entre hidrodinâmica e morfodinâmica permitiu validar a eficácia da estrutura na dissipação de energia, bem como demonstrar sua influência direta sobre a mobilização de sedimentos. O estudo também identificou que ondas curtas são mais sensíveis à presença da estrutura, estabelecendo uma correlação clara entre os picos de energia e os trechos com maior intensidade de erosão. Essa compreensão é fundamental para o dimensionamento e a aplicação de soluções costeiras baseadas em geoformas têxteis, ressaltando a importância da seleção adequada de materiais e do uso de tapetes geossintéticos ante erosivos como mecanismos complementares de proteção do leito.

5.2 Limitações do Estudo

Apesar da adoção de protocolos experimentais controlados, algumas limitações inerentes ao modelo físico devem ser explicitadas. A capacidade operacional do gerador de ondas restringiu a reprodução de determinados regimes hidrodinâmicos, particularmente aqueles associados a ondas em águas muito rasas e com maiores amplitudes relativas. Consequentemente, a faixa de condições testadas não abrangeu o espectro completo de cenários observados em ambientes costeiros naturais.

A ausência de porosidade na estrutura modelada representa uma limitação importante do estudo. Estruturas têxteis reais são compostas por materiais permeáveis que permitem escoamento interno e dissipação parcial da energia através da massa da estrutura. A substituição por uma calha de PVC suprimiu esses mecanismos, o que pode ter superestimado o grau de reflexão e subestimado a dissipação interna. Apesar disso, a escolha foi deliberada para privilegiar a análise da interação entre ondas e a geometria da estrutura, isolando os efeitos morfológicos induzidos pela forma externa.

O tempo de duração dos ensaios foi delimitado por questões operacionais, o que limitou a observação de processos associados à estabilização morfológica do leito ou à evolução de formas sedimentares de médio e longo prazo. Portanto, os resultados obtidos representam um recorte temporal restrito dos processos de escavação e não contemplam fases subsequentes de reconfiguração ou possível preenchimento da cavidade erosiva.

Adicionalmente, os efeitos do confinamento lateral do canal de ensaios devem ser considerados. A presença de paredes rígidas impõe restrições à dispersão lateral da energia de onda e aos fluxos secundários, o que pode gerar padrões de sedimentação e escoamento distintos daqueles observados em ambientes costeiros abertos, onde a difração e a propagação lateral não são limitadas.

Outro aspecto relevante refere-se à representatividade granulométrica do material utilizado. O uso de sedimento artificial com composição exclusivamente arenosa, de granulometria uniforme (predominantemente areia fina), foi uma escolha metodológica

para isolar os efeitos da interação onda-estrutura sobre leitos não coesivos. Contudo, a aplicação direta da redução de escala aos sedimentos naturais apresenta limitações, uma vez que a dinâmica do transporte sedimentar não é linearmente escalável. A relação entre forças hidrodinâmicas e forças resistivas nos grãos é afetada pela redução de escala, sobretudo quando não é possível simultaneamente satisfazer os critérios de similitude dos números de Froude e Reynolds, bem como o critério de Shields para mobilização do sedimento.

Dessa forma, os resultados devem ser interpretados dentro das condições específicas do modelo, que privilegia a análise dos mecanismos hidrodinâmicos de escavação ao redor da geoforma têxtil tubular, com as devidas restrições quanto à transposição direta para ambientes naturais de escala real. Este aspecto reforça a necessidade de complementação dos dados experimentais por meio de simulações numéricas ou ensaios adicionais em campo, visando à generalização dos resultados.

5.3 Direções para Pesquisas Futuras

Diante dos resultados obtidos e das limitações identificadas, recomenda-se a continuidade da investigação por meio de ensaios com diferentes geometrias e materiais estruturais, de forma a avaliar sua influência sobre a eficiência hidrodinâmica e a estabilidade do leito sedimentar.

Recomenda-se que estudos futuros incorporem materiais geossintéticos reais ou simulantes porosos em modelos físicos, de forma a avaliar o efeito da permeabilidade da estrutura na dissipação energética e na dinâmica de transporte sedimentar. Isso permitiria uma comparação direta entre os efeitos geométricos e materiais na eficiência da estrutura.

Ainda, a integração de outros sensores para ampliar a eficiência na análise e obtenção de dados dos processos erosivos. Por fim, a integração do uso de modelagem numérica avançada, com simulações computacionais baseadas em dinâmica de fluidos (CFD), permitiria prever com maior precisão os efeitos da interação onda-estrutura sob diferentes cenários, além de compará-los com os resultados experimentais.

Referências

- Alfredini, P.; Arasaki, E. Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 776 p.
- Alvarez, E.; Rubio, R.; Ricalde, H. Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 25, n. 4, p. 233–241, 2007.
- Aminti, P.; Mori, E.; Fantini, P. Submerged barrier for coastal protection application built with tubes in geosynthetics of big diameter in Tuscany - Italy. 9th International Conference on Geosynthetics – Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World, 2010, p. 1235–1240.
- Amrouni, O., Heggy, E. & Hzami, A. Shoreline retreat and beach nourishment are projected to increase in Southern California. *Commun Earth Environ* 5, 274 (2024). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01388-6>
- Armstrong, J. M. Low-cost shore protection on the Great Lakes: a demonstration/research program. *Coastal Engineering Proceedings*, v. 1, n. 15, p. 2858–2887, 1976.
- Barbier, E. B. *Et Al.* The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, v. 81, n. 2, p. 169–193, 2011.
- Bijker, E. W.; Leeuwestein, W. Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and current. In: *Seabed Mechanics, Proc. Symp. IUTAM/IUGG*, Newcastle Upon Tyne, England, Dec., p. 235–242, 1984.
- Brayshaw, S.; Lemckert, C. Pitfalls of shoreline stabilisation – Tweed River Mouth, Gold Coast, Australia. In: COOPER, J.; PILKEY, O. (orgs.). *Pitfalls of Shoreline Stabilization*. Dordrecht: Springer, 2012. (Coastal Research Library, v. 3).
- Bulhões, E. Construindo com a Natureza: erosão costeira e soluções de defesa do litoral. *Revista Ciência Hoje*, 2018a. No prelo.
- Bulhões, E. Erosão costeira e avanço do mar na localidade de Atafona: causas, consequências e propostas de intervenção. Relatório Técnico n. 1/2018 para a Defensoria Pública do Estado do Rio de Janeiro. 37 p., 2018b. Disponibilidade restrita.
- Bulhões, E. Erosão costeira e soluções para a defesa do litoral. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L. (orgs.). *Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos*. 1. ed. Rio de Janeiro: PGGM, 2020.
- Cantré, S.; Saathoff, F. Design method for geotextile tubes considering strain reformulation and verification by laboratory tests using photogrammetry. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 29, n. 3, p. 201–210, 2011.
- Carroll, R. G.; Rodencal, J. Jr.; Collin, J. G. *Geosynthetics in Erosion Control: The Principles*. *Geotextiles and Geomembranes* 11 (1992). ISBN 1-85166-796-2.
- Ciria; Cur; Cetmef. *The Rock Manual: the use of rock in hydraulic engineering*. London: CIRIA, 2007. 1268 p. ISBN 978-0-86017-683-1ciri.

- Cook, M., Bouchette, F., Mohammadi, B., & Fraysse, N. (2021). *Application of Opti-Morph: Optimized beach protection by submerged geotextile tubes*. HAL Archives. hal-03348819
- Cooper, J. A. G.; Pilkey, O. H. (Orgs.). *Pitfalls of Shoreline Stabilization*. 1. ed. London: Springer, 2012. 340 p.
- Corvaro, S.; Lorenzoni, C.; Mancinelli, A. Physical models of geotextile sand containers for coastal protection structures. In: 10th International Conference on Geosynthetics, Berlim, 2014.
- Corvaro, S.; Marini, F.; Mancinelli, A.; Lorenzoni, C.; Brocchini, M. Hydro- and morpho-dynamics induced by a vertical slender pile under regular and random waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 144, n. 6, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000470](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000470).
- Corvaro, S.; Seta, E.; Mancinelli, A.; Brocchini, M. Flow dynamics on a porous medium. *Coastal Engineering*, v. 91, p. 280–298, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.06.001>.
- Das Neves L.; Veloso-Gomes F.; And Lopes M.L. (2005). Coastal erosion control using sand-filled geotextile containers: a case study from the NW coast of Portugal, *Proceedings of the 29th International Conference Coastal Engineering*, McKee Smith Jane (ed.), Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Volume 4, pp. 3852-3864, ISBN 978-981-256-298-2.
- Dean, R. G.; Dalrymple, R. A. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Singapore: World Scientific, 1991. (Advanced Series on Ocean Engineering, v. 2).
- Den Hoedt, G. Durability experience in the Netherlands 1958–1988. In: *Durability and Aging of Geosynthetics*. Geosynthetic Research Institute, 1989. p. 82–94.
- Dong, Wan Shiao et al. *The impact of climate change on coastal erosion in Southeast Asia and the compelling need to establish robust adaptation strategies*. Heliyon, [S.l.], v. 10, n. 4, e25609, 2024. ISSN 2405-8440. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25609>. Acesso em: 25 maio 2025.
- Elias, T., & Shirlal, K. G. (2022). *Experimental Investigation of the Hydraulic Performance of Breakwater Structures with Geotextile Armor Units*. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 148(3), 04022006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000708](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000708)
- Erchinger, E. F. Geotextile tubes filled with sand for beach erosion control, North Sea Coast, Germany. In: *Geosynthetics Case Histories*. Richmond, BC, Canada: BiTech Publishers, 1993. p. 102–103.
- Fael, C. M. Erosões localizadas junto de encontros de pontes e respectivas medidas de protecção. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior, 2007.
- Finkl, C. W.; Khalil, S. M. Offshore exploration for sand sources: general guidelines and procedural strategies along deltaic coasts. *Journal of Coastal Research*, SI 44, p. 203–233, 2005.
- Finkl, C. W.; Walker, H. J. Beach nourishment. In: SCHWARTZ, M. (ed.). *Encyclopedia of Coastal Science*. Dordrecht: Springer, 2005. p. 147–161.

- Fowler, J. Geotextile tubes and flood control. Geotechnical Fabrics Report. Mississippi: TRIS, 1997. p. 28–37.
- Freitas, R. R.; Chamy, P.; Carvalho, D. R. Institutional design of small-scale fisheries in marine protected areas applied to sustainable territorial development on the Brazilian coast. *Ocean & Coastal Management*, v. 139, p. 92–101, 2017.
- Furtado, T. V.; Bonetti, J. Proposta metodológica para o mapeamento de danos causados por eventos extremos em praias densamente urbanizadas. *Arquivo de Ciências do Mar*, v. 53, n. 2 (especial), p. 120–127, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.32360/ac-mar.v53iEspecial.42688>
- Gomes, T. B.; Bulhões, E. Mapeamento de geoindicadores e parâmetros de qualidade ambiental na orla de Campos dos Goytacazes, RJ. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, v. 16, n. 2, p. 162–174, 2022.
- Greenwood, J. H.; Schroeder, H. F.; Voskamp, W. Durability of geosynthetics. CUR Committee C 187 – Building & Infrastructure, 2012.
- Gutman, A. L. Low-cost shoreline protection in Massachusetts. In: *Coastal Structures'79*. New York: ASCE, 1979. p. 373–387.
- Hallegatte, Stéphane; Green, Colin; Nicholls, Robert J.; Corfee-Morlot, Jan. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 9, p. 802–806, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>.
- Heibaum, M. Geosynthetics for waterways and flood protection structures – controlling the interaction of water and soil. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 42, n. 4, p. 374–393, 2014.
- Hinkel, J.; Nicholls, R. J.; Tol, R. S. J.; Wang, Z. B.; Hamilton, J. M.; Boot, G.; Vafeidis, A. T.; Mcfadden, L.; Ganopoloski, A.; Klein, R. J. T. A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA. *Global and Planetary Change*, v. 111, p. 150–158, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.09.002>.
- IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [PÖRTNER, H.-O. *et al.* (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p.
- John, N. W. M. Geotextiles. New York: Chapman and Hall, 1987. 347 p.
- Kamphuis, J. W. Introduction to Coastal Engineering and Management. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000. 437 p. (Advanced Series on Ocean Engineering, v. 16).
- Kazimierowicz-Frankowska, K. Stability of geosynthetic tubes used to flood protection. In: 10th International Conference on Geosynthetics, Berlim, 2014. p. 7.
- Khalak, A.; Williamson, C. H. K. Dynamics of a hydroelastic cylinder with very low mass and damping. *Journal of Fluids and Structures*, v. 10, p. 455–472, 1996.

- Kim, M.; Freeman, M.; Fitzpatrick, B.T.; Nevius, D.B.; Plaut, R.H.; Filz, G.M. Use of an apron to stabilize geomembrane tubes for fighting floods. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 22, n. 4, p. 239–254, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2004.03.004>.
- Kim, H.; Won, M.; Jamin, J. Finite-element analysis on the stability of geotextile tube-reinforced embankments under scouring. *International Journal of Geomechanics*, v. 15, n. 2, 2014.
- Klein, A. H. F. ; Araujo, R. S. ; Polette, M. ; Sperb, R. M. ; Freitas, D. ; Sprovieri, F. C. ; Pinto, F. T. 2009. Ameliorative strategies at Balneário Piçarras Beach - Brazil. In: A.T. Williams; A. Micallef. (Org.). *Beach Management Guidelines: Principles and Practice*. London: Earthscan Publisher, 2009, v. , p. 241-255.
- Kleinhans, M. G., Leuven, J. R. F. W., Braat, L., & Baar, A. W. (2017). Scour holes and ripples occur below the hydraulic smooth to rough transition of movable beds. *Sedimentology*, 64(3), 604–630. <https://doi.org/10.1111/sed.12358>
- Koerner, G. R.; Koerner, R. M. Geotextile tube assessment using a hanging bag test. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 24, n. 2, p. 129–137, 2006.
- Koffler, A.; Choura, M.; Bendriss, A.; Zengerink, E. *Geosynthetics in protection against erosion for river and coastal banks and marine and hydraulic construction*. *Journal of Coastal Conservation*, v. 12, n. 1, p. 11–17, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11852-008-0023-x>.
- Lawson, C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetics International*, v. 15, n. 6, p. 384–427, 2008.
- Lee, E. C.; Douglas, R. S. Geotextile tubes as submerged dykes for shoreline management in Malaysia. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 30, n. 1, p. 8–15, 2012.
- Leshchinsky, D. Issues in geosynthetic-reinforced soil. In: *International Symposium Earth Reinforcement Practice*. Rotterdam: Balkema, 1993. p. 871–897.
- Lodi, P. C.; Bueno, B. C.; Zornberg, J. Degradação ultravioleta de geomembranas poliméricas. In: *VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos*. Recife: REGEO, 2007. p. 6.
- Lopes, M.; Decarli, C.; Silva, L.P.; Silveira, T.C.L. *Urbanization increases carbon concentration and pCO₂ in subtropical streams*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08175-8>.
- Luijendijk, A.; Hagenaars, G.; Ranasinghe, R.; Baart, F.; Donchyts, G.; Aarninkhof, S. *The state of the world's beaches*. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>.
- Ma, H.; Zhou, L.; Liu, Z.; Chen, M.; Xia, X.; Zhao, Y. *A review of recent development for the CFD-DEM investigations of non-spherical particles*. *Powder Technology*, v. 412, p. 117972, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117972>.
- Mao, Y. Seabed scour under pipelines. In: *Proc. of 7th Int. Symp. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, Houston, 1988. p. 33–38.
- MASSELINK, G.; HUGHES, M. G. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. London: Edward Arnold, 2003. 354 p.

- Mendoza, E.; Silva, R.; Enriquez, C.; Díaz-Hernández, G.; Lara, J. L. An experimental evaluation of wave energy dissipation due to submerged structures. In: *6th International Conference on APAC 2013 Proceedings*. Singapura: World Scientific, 2013. DOI: https://doi.org/10.1142/9789814412216_0009.
- Mentaschi, L.; Voudoukas, M.I.; Pekel, J.F.; Voukouvalas, E.; Feyen, L. *Global long-term observations of coastal erosion and accretion*. Scientific Reports, v. 8, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>.
- MOCZM – Massachusetts Office of Coastal Zone Management. StormSmart Properties Fact Sheet 1: Artificial Dunes and Dune Nourishment. 2013.
- Moreira, A.; Vieira, C.S.; Das Neves, L.; Lopes, M. L. *Assessment of friction properties at geotextile encapsulated-sand systems' interfaces used for coastal protection*. Geotextiles and Geomembranes, v. 44, n. 3, p. 278–286, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.12.002>.
- Morris, R.; Konlechner, T.M.; Ghisalberti, M.; Swearer, S.E. *From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence*. Global Change Biology, v. 24, n. 5, p. 1827–1842, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14063>.
- Muehe, D. A posição da Geografia nas ciências marinhas. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L. S. (orgs.). *Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos*. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 10–25.
- Muehe, D. (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Rio de Janeiro: Editora do MMA, 2018.
- Na'im, I. I.; Shahrizal, A. R. M.; Safari, M. D. A short review of submerged breakwaters. MATEC Web of Conferences, v. 203, p. 01005, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820301005>
- Nordstrom, K. F. *Beach and Dune Restoration*. New York: Cambridge University Press, 2008. 187 p.
- Nordstrom, K. F.; Lampe, R.; Jackson, N. L. Increasing the dynamism of coastal landforms by modifying shore protection methods: examples from the eastern German Baltic Sea Coast. *Environmental Conservation*, v. 34, p. 205–214, 2007.
- Nicholls, R. J.; Wong, P. P.; Burkett, V.; Codignotto, J. O.; Hay, J.; Mclean, R. F.; Ragoonaden, S.; Woodroffe, C. D. Coastal systems and low-lying areas. In: Parry, M. L.; Canziani, O. F.; Palutikof, J. P.; Van Der Linden, P. J.; Hanson, C. E. (Org.). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. cap. 6, p. 315–356.
- Nielsen, P. Suspended sediment concentrations under waves. *Coastal Engineering*, v. 8, p. 51–72, 1986.
- Nielsen, P. *Coastal Bottom Boundary Layer and Sediment Transport*. Singapore: World Scientific, 1992. 324 p. (Advanced Series on Ocean Engineering, v. 4).
- Nishold, S. S. P.; Sundaravadivelu, R.; Saha, N. Analysis and design of geotube saline embankment. In: *Advances in Computational and Experimental Marine Hydrodynamics – ACEMH*. Madras: Índia, 2014. p. 292–300.

- Obialor, C.; Okeke, O.; Onunkwo, A.; Fagorite, V. Reservoir sedimentation: causes, effects and mitigation. *International Journal of Environmental Science and Development*, v. 10, n. 3, 2019.
- Oh, Y. I.; Shin, E. C. Using submerged geotextile tubes in the protection of the East Korean shore. *Coastal Engineering*, v. 53, n. 11, p. 879–895, 2006.
- Ortiz, R. N.; Junior, O. S.; Ladchumananandasivam, R. Tubos de geotêxteis aplicados a obras de defesa costeira. In: *II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, 2003.
- Oumeraci, H. (1993). Scour in front of vertical breakwaters - review of scaling problems, Braunschweig, Germany: Leichtweiß Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources, Research Report no. 125, 39p.
- Oumeraci, H.; And Recio, J. (2009). Geotextile sand containers for shore protection, *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, Y.C. Kim (ed.), Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., pp. 553-600, ISBN 13-978-981-281-9291.
- Oumeraci, H.; Hinz, M.; Bleck, M.; And Kübler, S. (2002). Großmaßstäbliche Untersuchungen zurhydraulischen Stabilität geotextiler Sandcontainer unter Wellenbelastung, Braunschweig, Germany: Leichtweiß Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources, Research Report no. 878, unpublished (in German).
- Palmeira, E. M. A review on some factors influencing the behaviour of nonwoven geotextile filters. *Soils and Rocks*, v. 43, n. 3, p. 351–368, 2020.
- Palmeira, E.; Almeida, M. G.; Araújo, G. Geossintéticos em engenharia geotécnica e geoambiental: avanços e perspectivas. *Geotecnia*, n. 152, p. 337–368, 2021. https://doi.org/10.14195/2184-8394_152_10
- Patel M.H. *Dynamics of Offshore Structures*. Butterworths; 1989.
- Pattipawaej, O. C. (2023). *Placement of geotextile tubes as coastal management of Way Hawang seashore area at Bengkulu Province*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1173(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1173/1/012023>
- Paula, D. P.; Dias, A. Ressacas do mar/temporais e gestão costeira. Fortaleza: Premium Editora, 2015. 448 p.
- PBMC. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: relatório especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. MARENGO, J. A.; SCARANO, F. R. (eds.). Rio de Janeiro: PBMC, COPPE – UFRJ, 2016. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6.
- Perkins, S. W. Constitutive modeling of geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 18, n. 5, p. 273–292, 2000.
- Perry, E. B.; Myers, M. Innovative methods for levee repair. *The REMR Bulletin*, v. 10, n. 3, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 1993. p. 16.
- PIANCA, C. M.; PIERO, L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 58, n. 1, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592010000100006>

- Pilarczyk, K. W.; Zeidler, R. B. Offshore breakwaters and shore evolution control. *Oceanographic Literature Review*, v. 44, n. 4, p. 403, 1997.
- Pilkey, O. H.; Wright Iii, H. L. Seawalls versus beaches. *Journal of Coastal Research*, SI 4, p. 41–64, 1988.
- Plaut, R. H.; Suherman, S. Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes. *Acta Mechanica*, v. 129, n. 3–4, p. 207–218, 1998.
- PROCOSTA – Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial. Brasília, DF: MMA, 2018. ISBN: 978-85-7738-362-7.
- Recio, J. Hydraulic stability of geotextile sand containers for coastal structures – effect of deformations and stability formulae. PhD Thesis. Leichtweiß Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources, Germany, 2007.
- Recio, J.; Oumeraci, H. Numerical simulations on the stability of coastal structures made of geotextile sand containers (GSC). Research Report n. 942, Leichtweiß Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources, Braunschweig, Germany, 2007a.
- Recio, J.; Oumeraci, H. Permeability of GSC-structures – laboratory tests and results. Research Report n. 943, Leichtweiß Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources, Braunschweig, Germany, 2007b.
- Recio, J.; Oumeraci, H. Processes affecting the hydraulic stability of geotextile sand containers – experimental studies. Research Report n. 944, Leichtweiß Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources, Braunschweig, Germany, 2007c.
- Reeve, D.; Chadwick, A.; Fleming, C. Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice. 3. ed. CRC Press, 2018. <https://doi.org/10.4324/9781351165525>
- Restall, S.; Jackson, L.A.; Heerten, G.; Hornsey, W.P. Case studies showing the growth and development of geotextile sand containers: an Australian perspective. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 20, n. 5, p. 321–342, out. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(02\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(02)00030-4).
- SARP KAYA, T. Wave Forces on Offshore Structures. New York: Cambridge University Press.
- Sarti, G.; Larsen, J. Underwater filling of Longard tubes. In: Coastal Structures'83. Arlington, Virginia, United States: ASCE, 1983. p. 610–618.
- Saathoff, F.; Oumeraci, H.; Restall, S. Australian and German experiences on the use of geotextile containers. *Geotextiles and Geomembranes* 25 (2007) 251–263.
- Sehgal, C. K. Design guidelines for spillway gates. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 122, n. 3, p. 155–165, 1996.
- Small, C.; Nicholls, R. J. A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, v. 19, n. 3, p. 584–599, 2003.
- Soulsby, R. Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications. London: Thomas Telford, 1997.
- Souza, C. A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 9, p. 17–37, 2009. <https://doi.org/10.5894/rgci147>

- Souza, M. A. L. Benefícios ambientais no controle de erosão costeira com o uso do dissipador de energia “Bagwall” no litoral de Alagoas. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 8, n. 2, p. 139–148, 2008. <http://dx.doi.org/10.32360/acmar.v49i2.6581>
- Souza, M. L. Mudar a cidade: uma introdução crítica ao planejamento e à gestão urbana. 11. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 558 p.
- Sumer, B. M.; Fredsøe, J. *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. Singapore: World Scientific, 2006. (Advanced Series on Ocean Engineering, v. 26).
- Sumer, B. M.; Fredsøe, J. Scour at the head of a vertical-wall breakwater. *Coastal Engineering*, v. 29, n. 3–4, p. 201–230, 1997.
- Sumer, B. M.; Fredsøe, J. Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater. *Coastal Engineering*, v. 40, p. 59–87, 2000.
- Sumer, B. M.; Fredsøe, J. *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. Singapore: World Scientific, 2002. 536 p. (Advanced Series on Ocean Engineering, v. 17).
- Sumer, B. M.; Fredsøe, J.; Christensen, S.; Lind, M. T. Sinking/floatation of pipelines and other objects in liquefied soil under waves. *Coastal Engineering*, v. 38, n. 2, p. 53–90, out. 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00024-1).
- Sutton-Grier, A. E.; Wowk, K.; Bamford, H. Future of our coasts: the potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. *Environmental Science & Policy*, v. 51, p. 137–148, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.006>
- Szyszkowski, W.; Glockner, P. G. On the statics of large-scale cylindrical floating membrane containers. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, v. 22, n. 4, p. 275–282, 1987.
- Temmerman, S.; Meire, P.; Bouma, T.J.; Herman, P.M.J.; Ysebaert, T.; De Vriend, H.J. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, v. 504, p. 79–83, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature12859>.
- U.S. Army Corps Of Engineers. *Coastal Engineering Manual – Part II*. 2002. 608 p. Disponível em: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/>
- Vertematti, J. C. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 570 p.
- Vieira, B. F., Pinho, J. L. S., & Barros, J. A. O. (2023). *Análise comparativa do desempenho de uma estrutura inovadora de proteção costeira baseada na natureza com o de uma estrutura tradicional*. Universidade do Minho.
- Whitehouse, R. *Scour at Marine Structures*. London: Thomas Telford, 1998. 224 p. ISBN: 0-7277-2655-2.
- Wilke, M.; Morgan, K.; Colanese, B. Geosynthetics in coastal and hydraulic engineering - More than 50 years of experience. Third International 231 Workshop on Geosynthetics and Modern Material on Coastal Protection and Related Applications. Geosynthetics & Coasts 2015. Mérida, Yucatán: México. 2015b. p. 7.
- Wilke, M.; Schoenherr, R.; Pfeifer, M. Pit Lake Bank stabilization by use of geosynthetic tubes. Third International Workshop on Geosynthetics and Modern Material on

- Coastal Protection and Related Applications. Geosynthetics & Coasts 2015. Mérida, Yucatán: México. 2015a. p. 6.
- Young, I. R.; Ribal, A. Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height. *Science*, v. 364, n. 6440, p. 548–552, 2019.
- Zanke, Ulrich; Kloker, Markus J. *On the Origin of Sediment Ripples*. Water, Basel, v. 17, n. 5, p. 681, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w17050681>. Acesso em: 12 maio 2025.