

The background of the slide is an aerial photograph of the ocean, showing deep blue water with white, frothy waves and eddies, creating a complex, swirling pattern.

Soluções híbridas baseadas na natureza para a redução de riscos costeiros

Gonçalo Vaz, Francisca Sarmento, Mahmoud Abouhalima, Luciana das Neves, Paulo Rosa-Santos, Francisco Taveira Pinto

Enquadramento

Riscos costeiros



Fig. 1 – Galgamento em Santander, Espanha (Marques, 2021).



Fig. 2 – Galgamento na Madeira, Portugal (Marques, 2021).



Fig. 3 – Colapso de estrutura no Rio de Janeiro, Brasil (Bulhões, 2020).



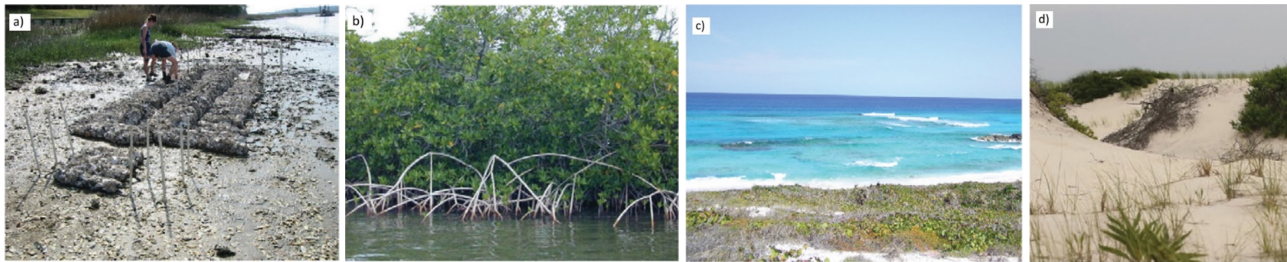
Fig. 4 – Galgamento no Furadouro, Portugal (Câmara Municipal de Ovar, 2021).

Estruturas tradicionais de proteção:

- **Alterações morfológicas e hidrodinâmicas, erosão costeira;**
- **Impacte nos ecossistemas costeiros, nos serviços de ecossistemas e na biodiversidade;**
- **Reduzida da capacidade de adaptação e resiliência às alterações climáticas.**

Enquadramento

Soluções baseadas na natureza (SbN)



Soluções baseadas na natureza – Híbridas (SbN-H)



Fig. 6 – Classificação de estruturas de proteção costeira. Schoonees et. al. (2019).

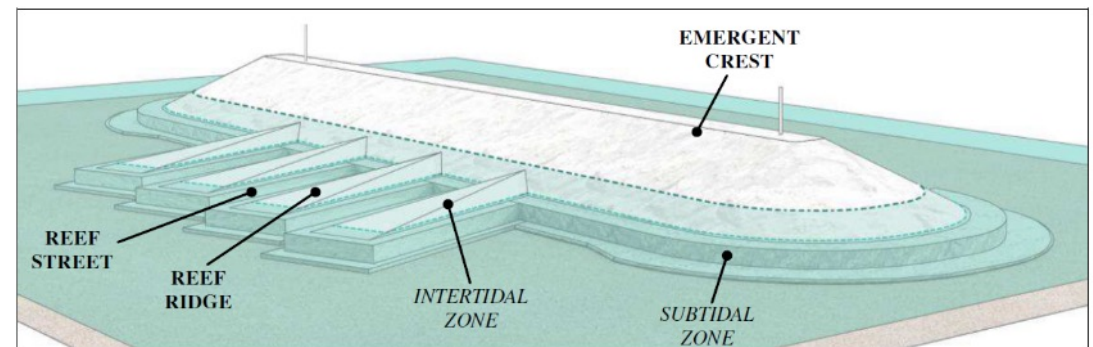


Fig. 7 – Design de quebramar de crista alta. SCAPE Landscape Architecture.

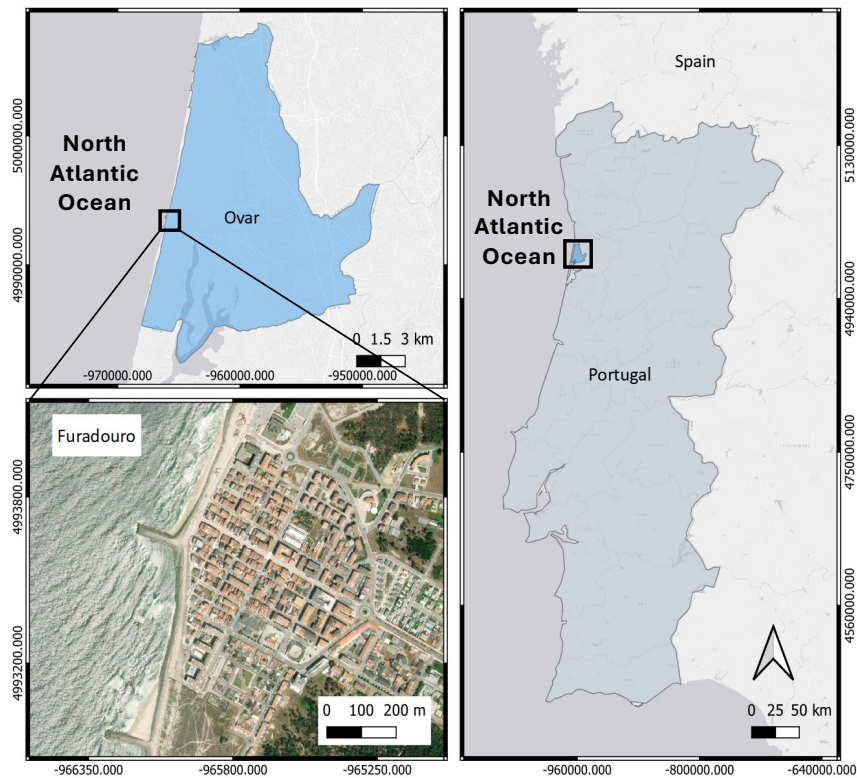
Objetivo

Analisar a eficácia de uma **SbN-H** destacada comparativamente a uma solução tradicional tendo como referência a situação atual, usando **modelação física**:

- **espraçamento**,
- **danos** na estrutura,
- **galgamentos**,
- espectros de **energia** de onda,
- **coeficientes** de reflexão, transmissão e dissipação,
- **morfodinâmica** do perfil.

Caso de estudo - Furadouro

Dezenas de ocorrências de galgamento nos últimos anos



Descrição do caso de estudo - Furadouro

Problemas existentes/registados

Data do evento		Descrição do evento
Ano	Mês	
2018	Nov	Galgamento da marginal. Rebaixamento da praia numa altura máxima de 4 m. Rombos na obra longitudinal aderente.
2019	Fev	Galgamento da marginal. Danos nas infraestruturas a norte do esporão norte.
2019	Mar	Dunas a sul do esporão sul em queda na sequência do avanço contínuo do mar.
2019	Set	Geotubo danificado.
2019	Nov	Galgamentos frequentes sobre o enrocamento sul, permitindo a erosão acentuada no seu tardoz.
2019	Dez	Galgamentos da marginal. Sedimentos sobre a via pedonal e rodoviária provenientes dos galgamentos. Danos nas obras de defesa costeira. Deslocamento das estruturas para estacionamento de bicicletas na zona entre esporões. Rebaixamento de praia a norte numa altura máxima de 3 metros.
2020	Fev	Galgamento da marginal.
2020	Out	Galgamentos na frente urbana. Danos nas obras de defesa costeira.
2020	Dez	Galgamentos intensos sobre a marginal. Projeção de enrocamentos da obra longitudinal aderente sobre a marginal. Alguns galgamentos atingiram os telhados de algumas edificações e obrigaram a retirada de veículos da via pública. Inundações da via pública e de edifícios de restauração. Danos nas obras de defesa costeira.
2021	Fev	Galgamentos intensos sobre a marginal. Danos nas obras de defesa costeira. Destruição dunar a sul do esporão sul. Inundações da via pública. Sedimentos sobre a via pedonal e rodoviária proveniente dos galgamentos.



Fig. 15 – Enrocamento visível, Furadouro, Portugal (Helena Pinho, 2022).



Fig. 16 – Remoção de areia na zona dunar, Furadouro, Portugal (Marques, 2021).



Fig. 17 – Galgamento, Furadouro, Portugal (Câmara Municipal de Ovar, 2021).

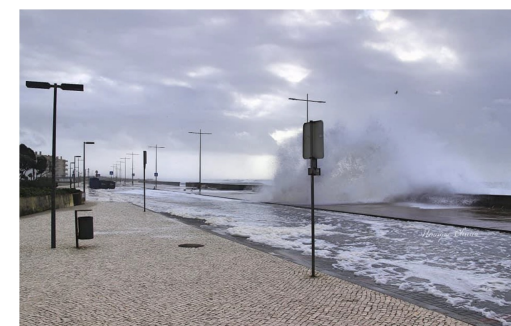


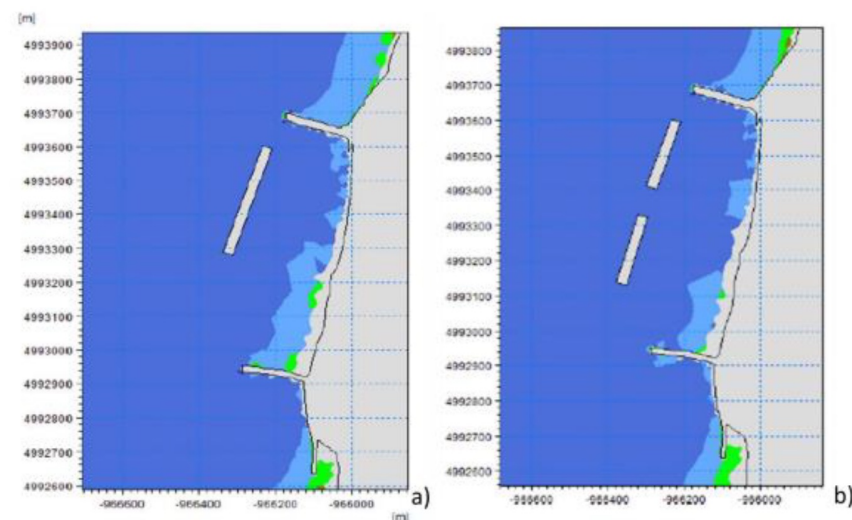
Fig. 18. – Galgamento, Furadouro, Portugal (Câmara Municipal de Ovar, 2021)

Descrição do caso de estudo - Furadouro



Soluções anteriormente testadas

- Estudo de **Castro** (2015):
Opções testadas: Um quebramar de 250 m, Dois quebramares de 150m.
- Estudo de **Martins** (2016) (continuidade de Castro)
- Estudo de **Fonseca** (2015)
- Estudo de **Marques** (2021)
- Etc....



Descrição do caso de estudo - Furadouro

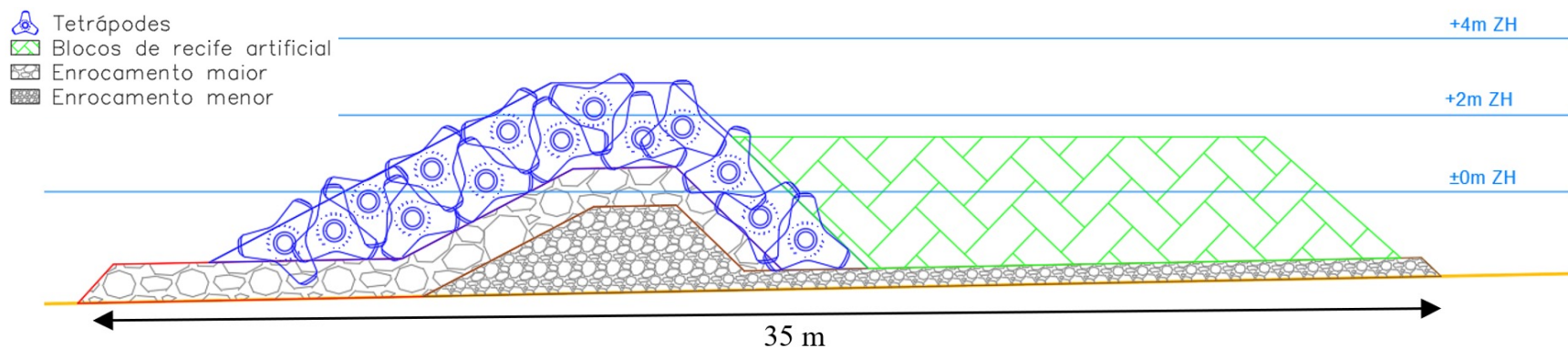
Conceito proposto

- Estrutura híbrida destacada
- Parte exposta
 - QM destacado em tetrápodes
- A sotamar
 - Função do recife artificial

Benefícios

- Criação de **habitat** para espécies marinhas
- Sequestro de **carbono**
- Potencial para atividades de **lazer** (mergulho) e **económicas** (pesca).
- Redução da **erosão** e aumento da **proteção costeira**

Abordagem que equilibra **proteção costeira** com **conservação** e potenciação ambiental.



Estudo Experimental – Modelação Física

Instalações Experimentais Tanque de Ondas



Laboratório de Hidráulica

Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (**SHRHA**).

28 m long,
12 m wide
1.2 m deep

Estudo experimental – Modelação física

Instalação experimental e modelo físico



Fig. 23 – Canal no tanque de ondas.



Fig. 24 – Recolha de galgamentos



Fig. 25 – Sondas de nível hidrodinâmico



Fig. 26 – Régua para medição do espalhamento

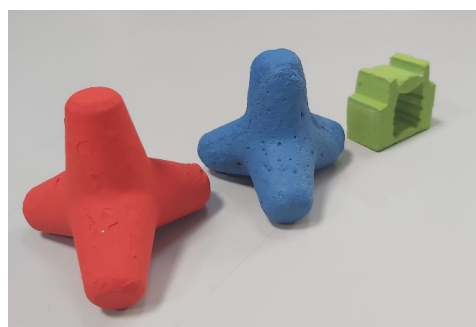


Fig. 27 – Tetrápodes e dos blocos de recife artificial.

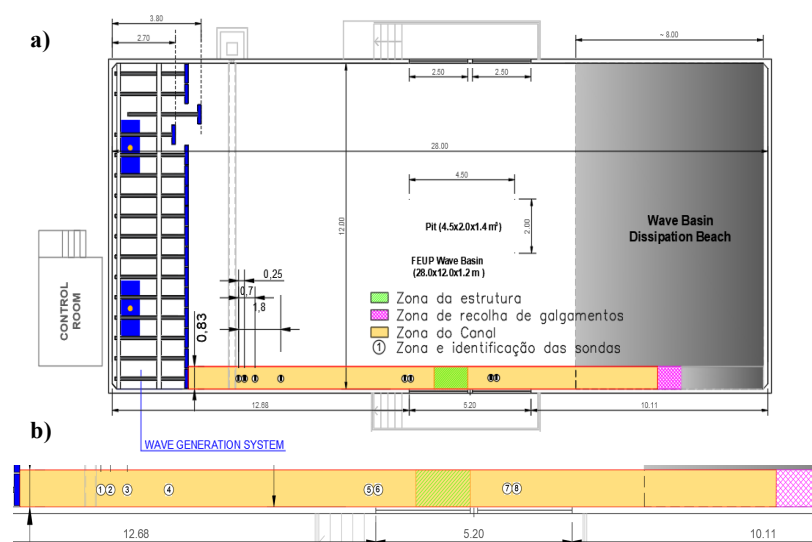


Fig. 28 – a) Esquema da localização do canal no tanque de ondas, b) “zoom” na zona do canal e disposição da estrutura, sondas e sistema de recolha de galgamentos.

Estudo experimental – Modelação física

Condições experimentais e plano de testes

Tab. 3 – Condições de testes (em valores de protótipo) das diferentes séries de testes.

Série de testes	Designação	Maré	Hm01 (m)	Maré2 (m)	Tp (s)	ΔT ensaio (horas)
1	Calibração	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
2	Situação atual (sem estrutura)	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
3	Teste da estrutura de proteção tradicional	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
4	Teste da estrutura de proteção híbrida	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		

Estudo experimental – Modelação física

Condições experimentais e plano de testes

Tab. 3 – Condições de testes (em valores de protótipo) das diferentes séries de testes.

Série de testes	Designação	Maré	Hm ₀ ¹ (m)	Maré ² (m)	Tp (s)	ΔT ensaio (horas)
1	Calibração	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
2	Situação atual (sem estrutura)	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
3	Teste da estrutura de proteção tradicional	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
4	Teste da estrutura de proteção híbrida	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		

Estudo experimental – Modelação física

Condições experimentais e plano de testes

Tab. 3 – Condições de testes (em valores de protótipo) das diferentes séries de testes.

Série de testes	Designação	Maré	Hm ₀ ¹ (m)	Maré ² (m)	Tp (s)	ΔT ensaio (horas)
1	Calibração	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
2	Situação atual (sem estrutura)	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
3	Teste da estrutura de proteção tradicional	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
4	Teste da estrutura de proteção híbrida	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		

Estudo experimental – Modelação física

Condições experimentais e plano de testes

Tab. 3 – Condições de testes (em valores de protótipo) das diferentes séries de testes.

Série de testes	Designação	Maré	Hm ₀ ¹ (m)	Maré ² (m)	Tp (s)	ΔT ensaio (horas)
1	Calibração	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
2	Situação atual (sem estrutura)	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
3	Teste da estrutura de proteção tradicional	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		
4	Teste da estrutura de proteção híbrida	Baixa	3	0.5	10	2.84
		Média	3.5	2	10	2.84
			4	2	12	3.41
		Preia	3.5	3.5	10	2.84
			4	3.5	12	3.41
			5	3.5	14	3.98
Extrema	5	4.5	16	4.55		

Análise e discussão de resultados

Análise do espraio da onda

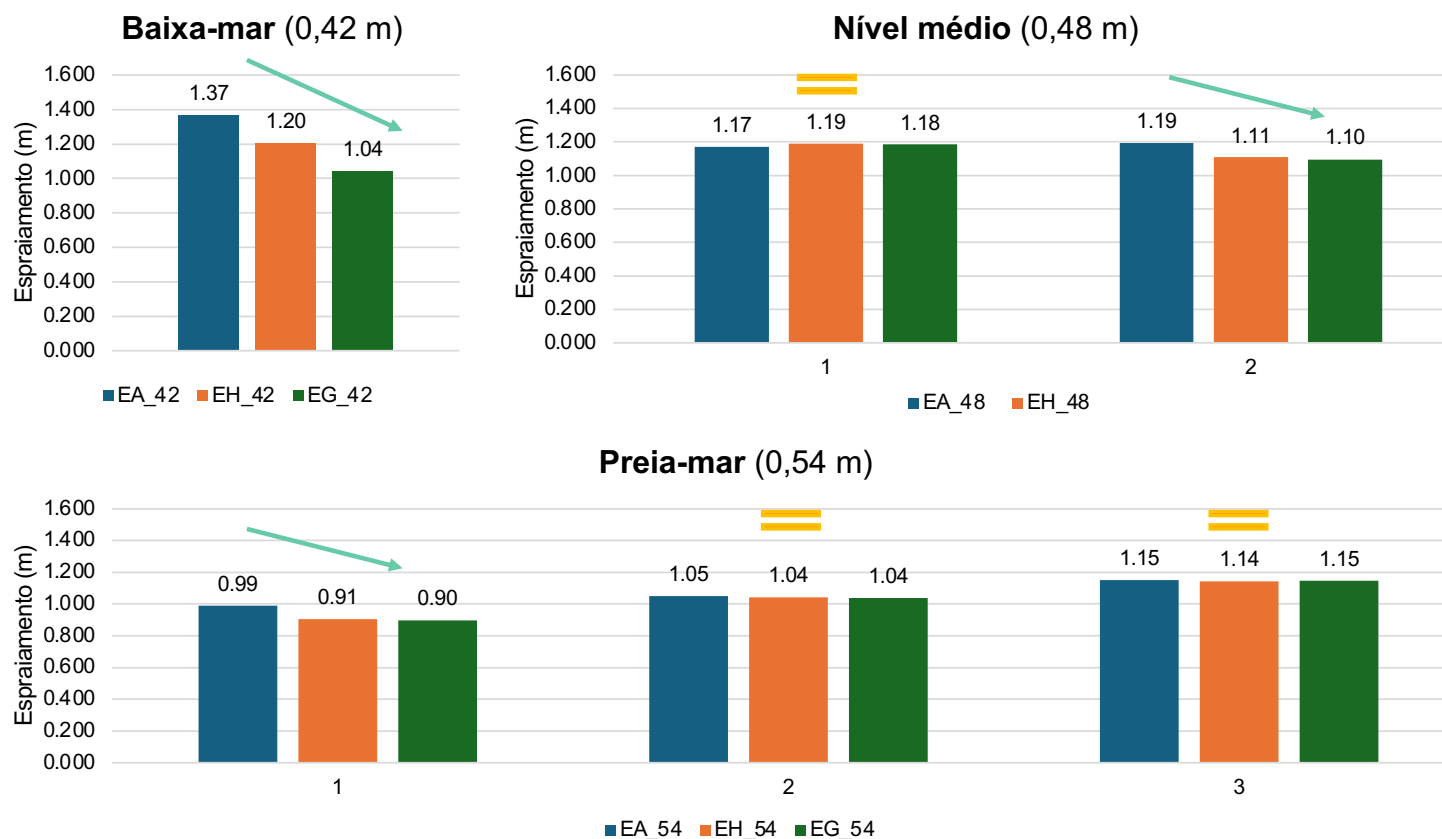
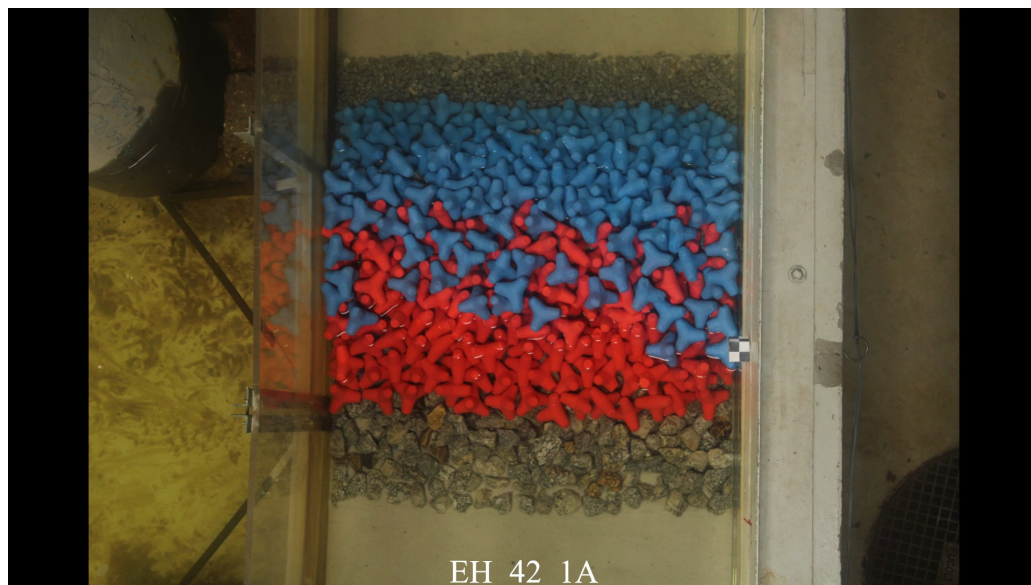


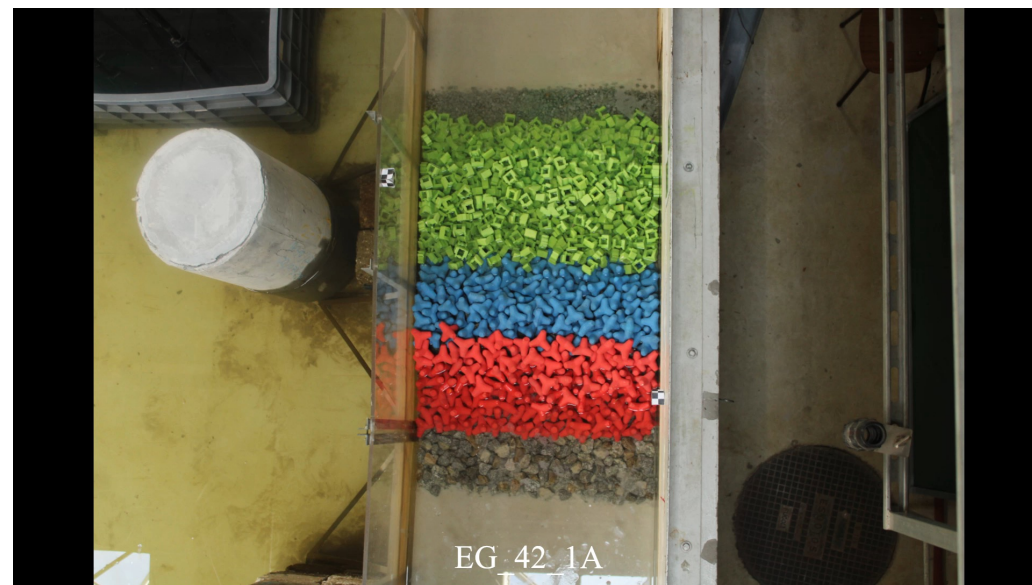
Fig. 29 – Comparação do espraio máximo (m) dos diferentes testes (valores no modelo físico).

Análise e discussão de resultados

Análise de danos na estrutura



Vídeo. 1 – Timelapse do movimento dos blocos da estrutura tradicional



Vídeo. 2 – Timelapse do movimento dos blocos da estrutura híbrida

Análise e discussão de resultados

Análise de movimento da estrutura



Vídeo. 3 – Movimento dos blocos da estrutura híbrida

Análise e discussão de resultados

Análise de galgamentos

Fig. 30 – Caudal médio de galgamento no protótipo (L/s/m).

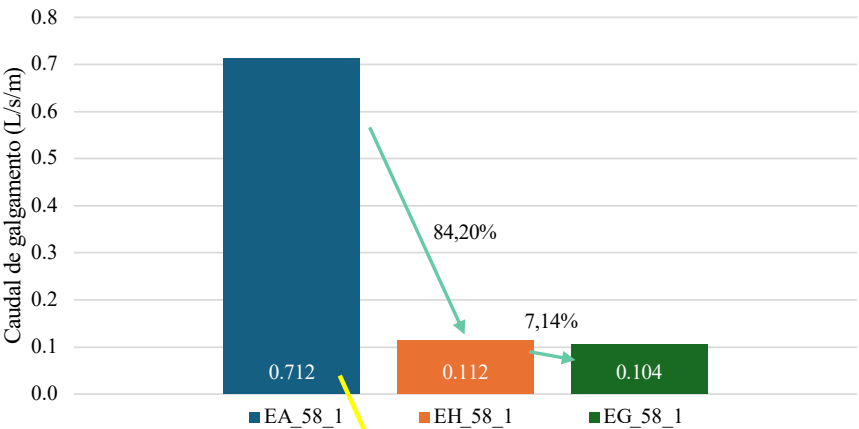


Fig. 31 – Limites de galgamento para pessoas e veículos segundo o EurOtop manual.

Tipo de ameaça e razão	Descarga Média q (l/s por m)	Volume Máximo Vmax (l por m)
Pessoas em estruturas com possível galgamento violento, estruturas na sua maioria verticais	Nenhum valor de galgamento previsto	Nenhum valor de galgamento previsto
Pessoas em obras longitudinais aderentes / coroamento de diques. Com vista clara para o mar. H _{m0} = 3 m H _{m0} = 2 m H _{m0} = 1 m H _{m0} < 0.5 m	0.3 1 10-20 Sem limite	600 600 600 Sem limite
Carros em obras longitudinais aderentes / coroamento de diques, ou caminho-de-ferro próximo logo atrás do coroamento H _{m0} = 3 m H _{m0} = 2 m H _{m0} = 1 m	<5 10-20 <75	2000 2000 2000
Estradas e autoestradas, tráfego rápido	Próximo do ponto em que o spray de detritos se torna perigoso	Próximo do ponto em que o spray de detritos se torna perigoso



Análise e discussão de resultados

Análise dos espectros de energia da onda

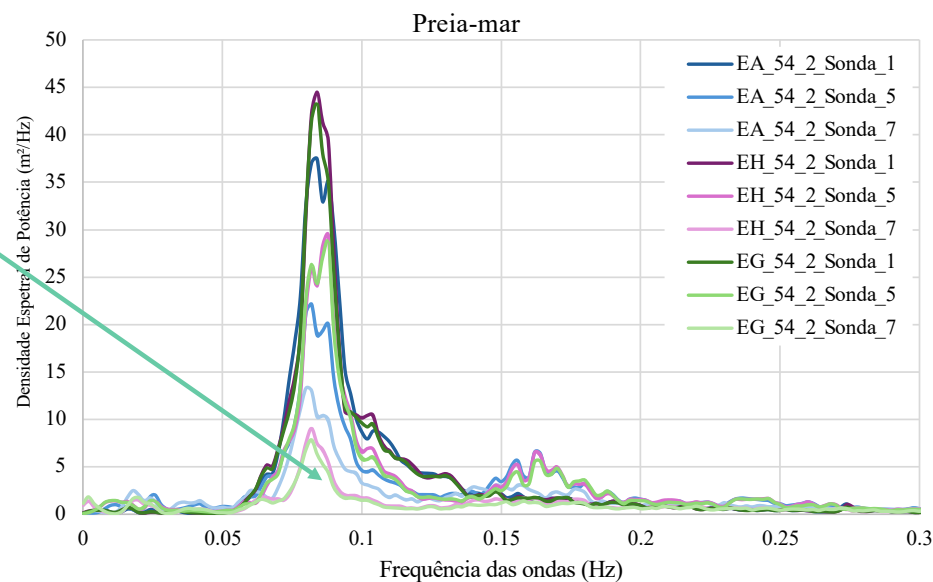


Fig. 32 – Densidade espectral de potência (m^2/Hz) em função da frequência das ondas (Hz) para os segundos testes de altura de água a 0,54 m, para as três sequências de testes.

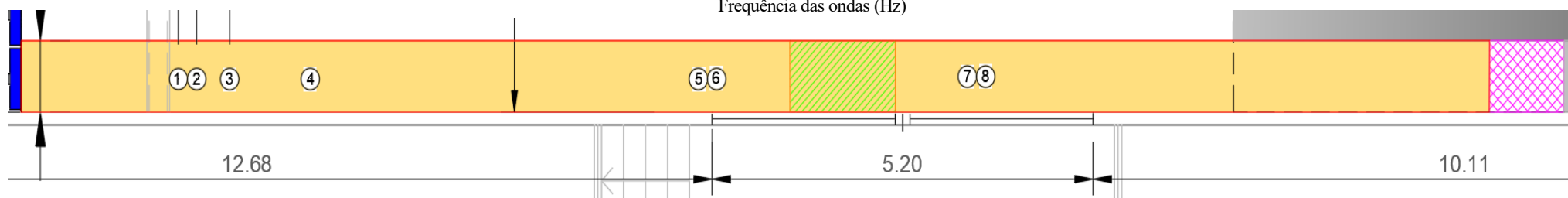
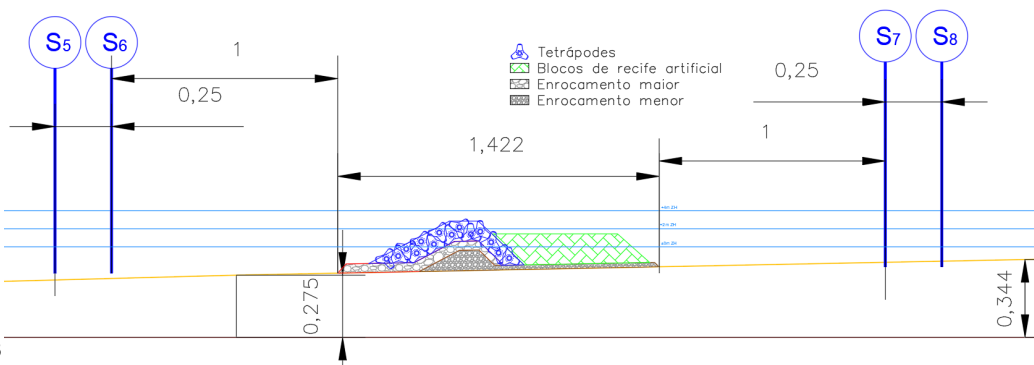
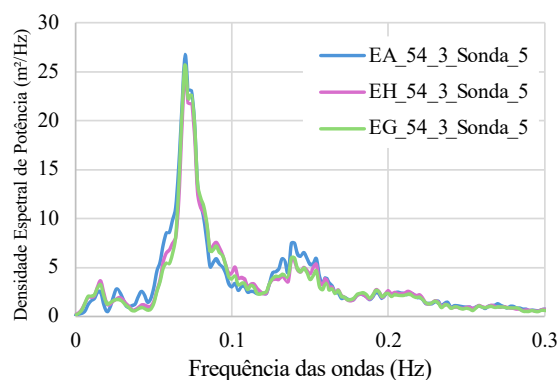


Fig. 33 – Esquema da zona do canal e disposição da estrutura, sondas e sistema de recolha de galgamentos.

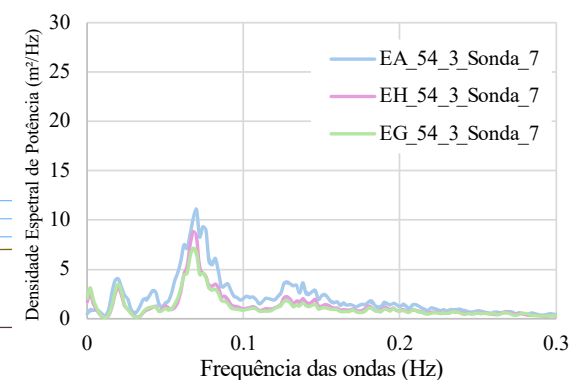
Análise e discussão de resultados

Análise dos espectros de energia da onda

Preia-mar Sonda 5



Preia-mar Sonda 7



Tab. 4 – Percentagens de redução de m_0 para a configuração tradicional e híbrida em relação à situação atual.

Série	Sonda	Baixa-mar	Nível Médio		Preia-mar			Extremo
		42_1	48_1	48_2	54_1	54_2	54_3	58_1
Tradicional	1	-5.35%	-3.73%	-0.16%	-2.87%	-0.66%	1.09%	0.74%
	5	0.51%	-9.54%	-22.42%	-19.69%	-8.89%	5.24%	11.62%
	7	88.53%	63.49%	56.59%	47.48%	43.43%	37.47%	28.78%
Híbrida	1	-3.47%	-1.91%	1.64%	1.50%	3.51%	4.65%	2.81%
	5	29.73%	-9.30%	-20.61%	-12.03%	-5.02%	7.50%	14.68%
	7	93.02%	97.28%	60.88%	55.46%	49.32%	42.83%	35.36%

Análise e discussão de resultados

Análise dos coeficientes de reflexão, dissipação e transmissão



Vídeo. 5 – Configuração híbrida com maré 42 cm.



Vídeo. 6 – Configuração híbrida com maré 54 cm.

Análise e discussão de resultados

Análise dos coeficientes de reflexão, transmissão e dissipação

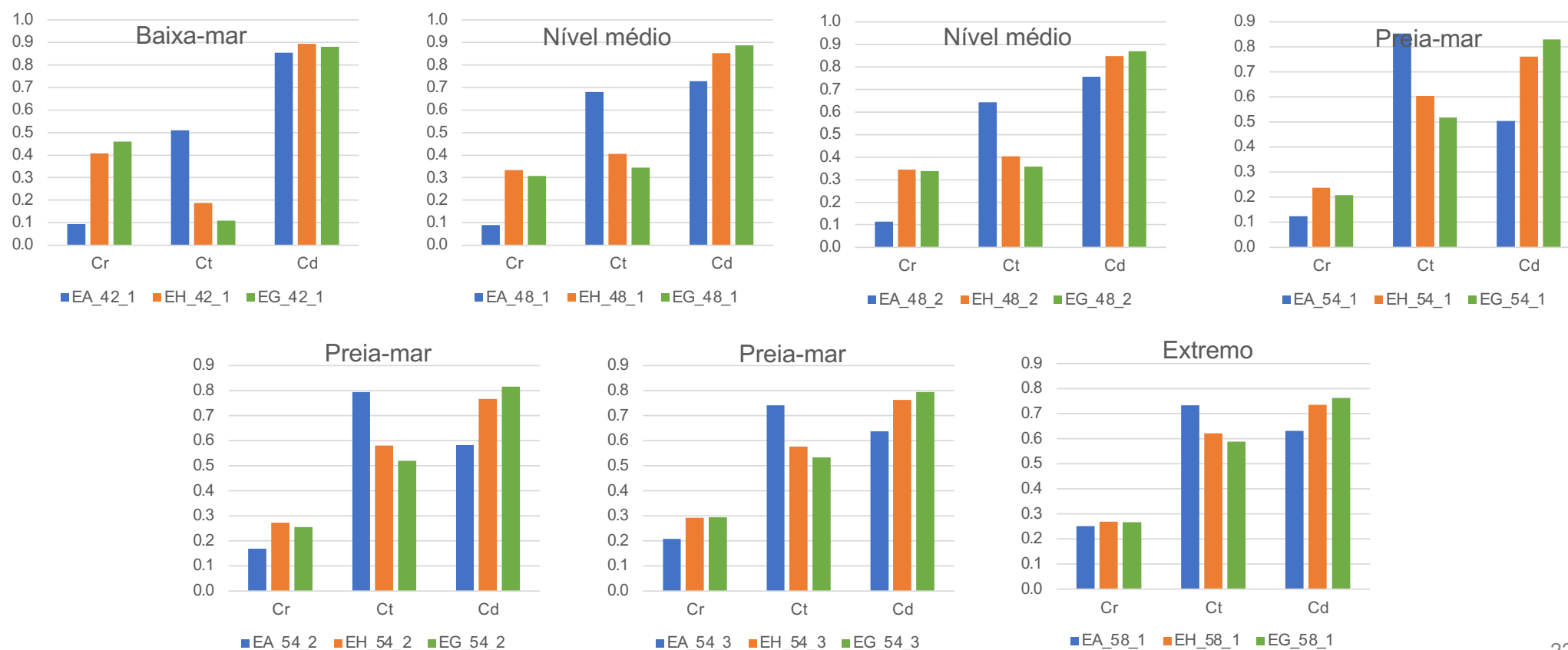


Fig. 38 – Comparação dos coeficientes de reflexão, transmissão e dissipação para os diferentes ensaios.

Análise e discussão de resultados

Análise morfodinâmica: Perfil de areia

Configuração situação atual

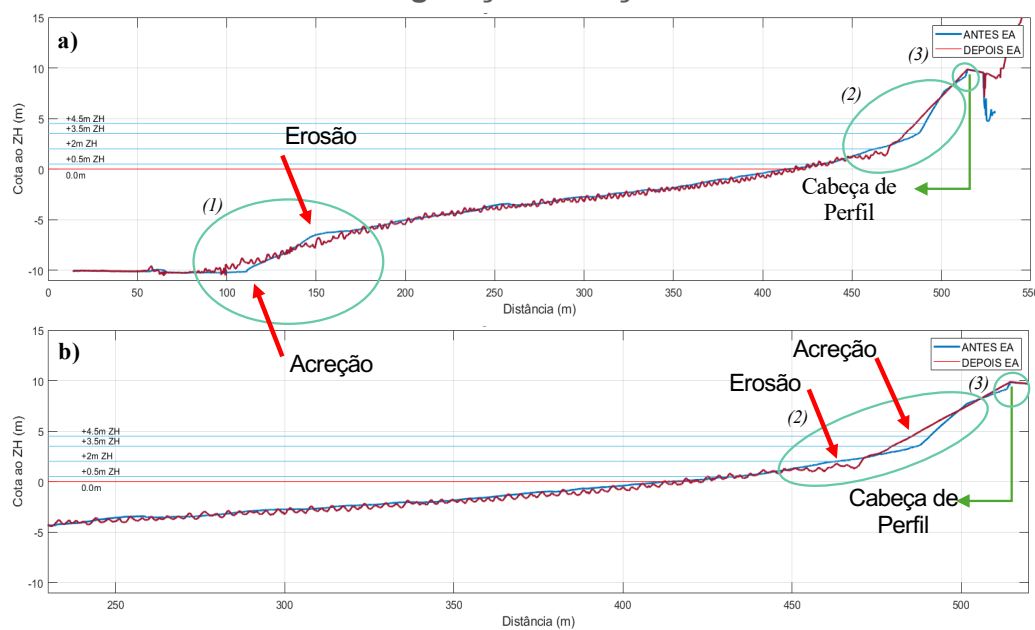


Fig. 39 – (a) sobreposição da seção transversal do perfil antes e depois da sequência de testes EA; (b) zoom sobre a zona onde se localizará a estrutura nas seguintes configurações até à cabeça de perfil.

Configuração estrutura tradicional

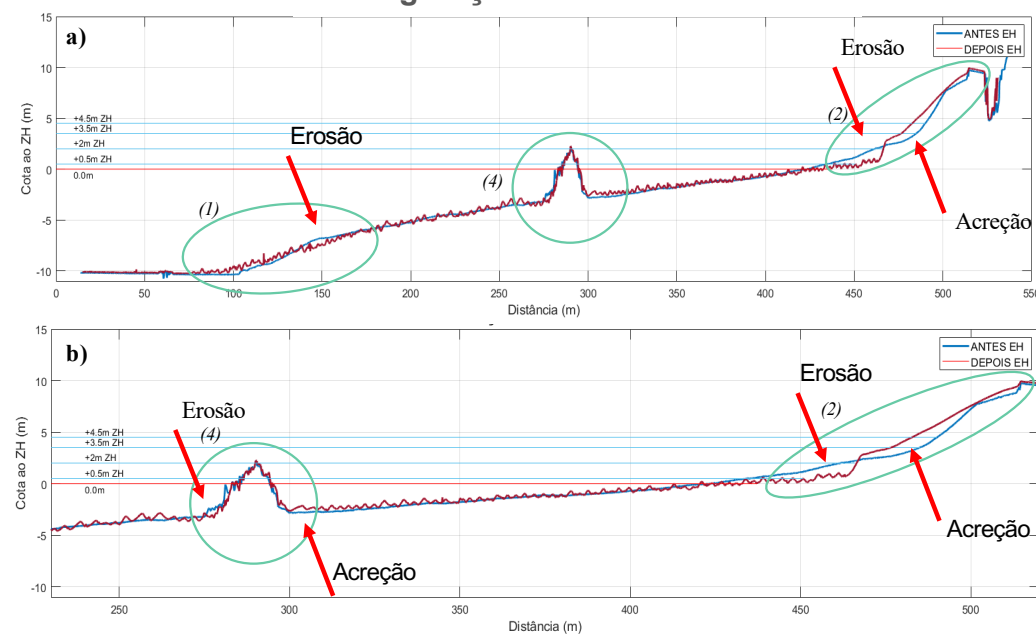


Fig. 40 – (a) sobreposição da seção transversal do perfil antes e depois da sequência de testes EH; (b) zoom na zona onde se localiza a estrutura tradicional até à cabeça de perfil.

Análise e discussão de resultados

Análise morfodinâmica: Perfil de areia

Configuração estrutura híbrida

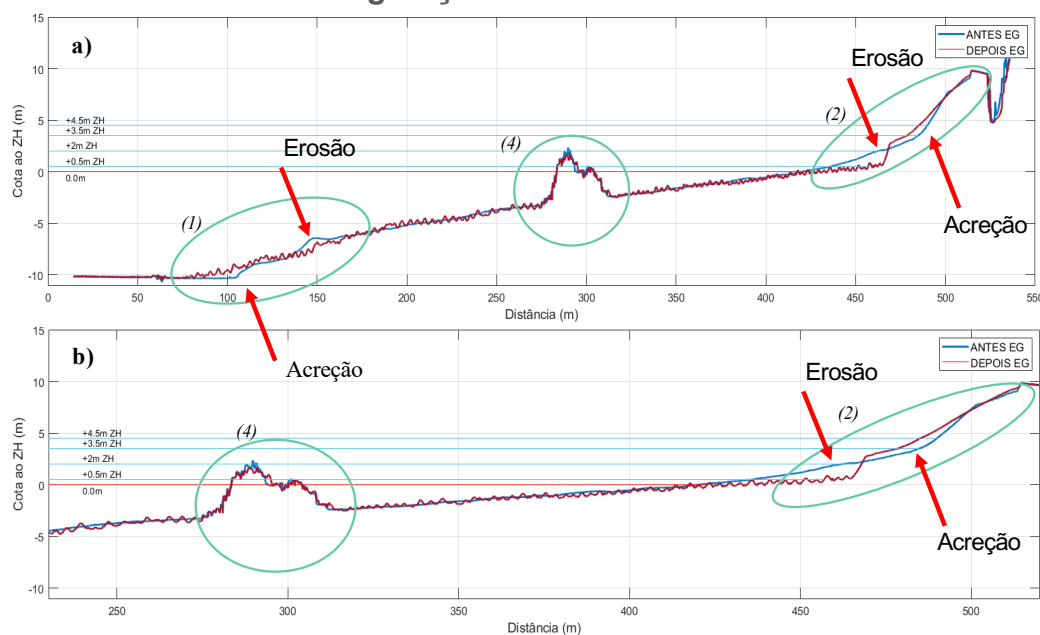


Fig. 41 – (a) sobreposição da secção transversal do perfil antes e depois da sequência de testes EG; (b) zoom na zona onde se localiza a estrutura híbrida até à cabeça de perfil.

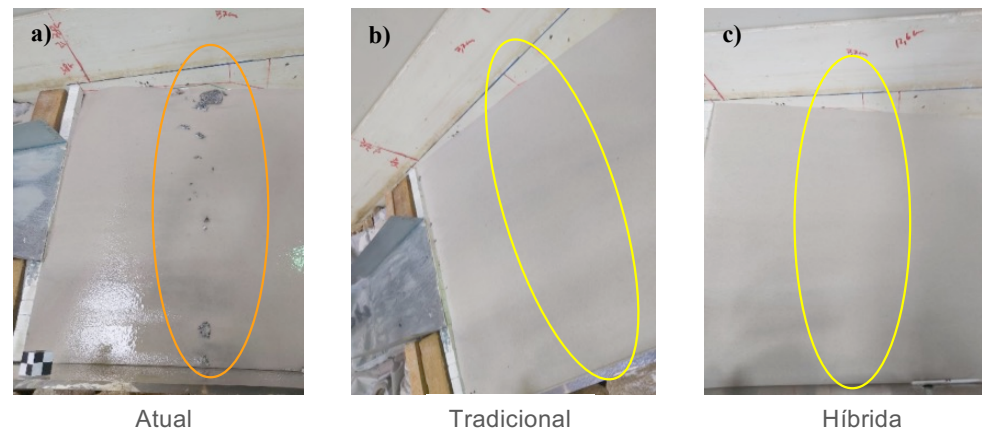


Fig. 42 – Fotografia da cabeça do perfil após cada série de testes.

Conclusões e desenvolvimentos futuros

Conclusões – estudo preliminar

- Os resultados mostraram que tanto a solução tradicional como a híbrida têm vantagem em relação ao cenário atual.
- A nível hidrodinâmico, a solução híbrida:
 - maior dissipação da energia das ondas, devido aos blocos perfurados colocados atrás da estrutura rígida.
 - maior redução do galgamento, a 7% mais eficaz que a tradicional e uma redução de 84% do caudal de galgamento face ao cenário atual.
- Do ponto de vista morfodinâmico, os resultados mostram uma atenuação da erosão na praia, menor espraimento e maior estabilidade do perfil costeiro, sobretudo nas zonas críticas do perfil de praia.



Soluções híbridas baseadas na natureza para a redução de riscos costeiros

Gonçalo Vaz, Francisca Sarmento, Mahmoud Abouhalima, Luciana das Neves, Paulo Rosa-Santos, Francisco Taveira Pinto

OBRIGADO!