U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA PROTEÇÃO COSTEIRA BASEADAS NA NATUREZA PARA ADAPTAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

PEDRO MIGUEL TAVARES VINAGRE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

Coorientador: Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos

JULHO 2019

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha mãe, madrinha e irmão

.

A sorte favorece os audazes.

Alexandre, o Grande

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto, orientador do presente trabalho, pela disponibilidade, acompanhamento, ensinamentos, preocupação com o sucesso dos trabalhos e por garantir todos os meios necessários para o desenrolar desta dissertação.

Ao Professor Doutor Paulo Jorge Rosa Santos, coorientador da presente dissertação, pela prontidão, constante acompanhamento, auxílio, ensinamentos, motivação, e bastante paciência que transmitiu ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL), por ter permitido a utilização dos registos obtidos com os testes ao modelo, com os quais esta dissertação ficou enriquecida.

A todos os professores, em particular aos da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRA), que me acompanharam ao longo do meu percurso académico e me transmitiram os conhecimentos essenciais para a concretização do presente trabalho.

Ao Sr. Miguel pela amizade, prontidão, ensinamentos, engenho e motivação no desenvolvimento do modelo que foi parte integrante desta dissertação.

À D. Esmeralda pela amizade, prontidão, apoio, conselhos, preocupação e auxílio essencial ao longo deste último ano, em particular ao longo desta dissertação.

À Professora Doutora Elsa Carvalho, que me incentivou a escolher a opção de Hidráulica, pela amizade e conselhos ao longo deste último ano.

Ao Tomás e ao Daniel, pela prontidão, auxílio e explicações ao longo do desenvolvimento dos testes realizados para este trabalho.

Ao meu amigo Chambel, pela amizade, companheirismo, apoio, motivação e auxílio ao longo do meu percurso académico, em particular na construção do modelo e desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus amigos Daniel, Diogo, Duarte, Júlio, Luís, Nuno, Rafa, Rocha, Tomé, Zé e ao Ivan, Jorge, Mourão e Sá que me acompanham desde o secundário, pela amizade, companheirismo, apoio, motivação e bons momentos ao longo do meu percurso académico.

À D. Júlia Baère de Faria pela amizade e apoio ao longo do meu percurso académico.

Aos meus tios e primos por toda amizade, motivação, apoio e ensinamentos que me transmitiram ao longo da minha vida estudantil e que de certa forma contribuíram para a elaboração desta dissertação.

Por fim, à minha mãe, ao meu irmão e à minha madrinha, não só por toda a educação, amizade, e amor incondicional com que me presentearam, mas também por todos os sacrifícios e obstáculos que tiveram de superar, mantendo sempre em primeiro lugar o meu sucesso.

RESUMO

A erosão torna as zonas costeiras mais expostas e vulneráveis a eventos extremos, pondo em risco pessoas e bens de elevado valor patrimonial. No futuro, este fenómeno tenderá a agravar-se, fruto dos efeitos das alterações climáticas. A implementação de soluções para proteção costeira baseadas na natureza e de baixo custo poderá permitir o controlo e a minimização do movimento de sedimentos para o largo, assim como uma melhor proteção contra a erosão costeira, aumentando a resiliência das praias e dunas, aspetos de grande importância num contexto de adaptação às alterações climáticas. A presente dissertação visa o estudo e desenvolvimento de soluções para proteção costeira baseadas na natureza para um trecho da costa Oeste de Portugal.

O trecho escolhido para caso de estudo desta dissertação foi a praia do Carneiro, junto à Foz do Rio Douro, no Porto. As soluções de proteção costeira a implementar foram quebramares destacados.

Para o estudo experimental, foi construído um modelo físico à escala geométrica de 1/60 no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Após a construção do modelo, procedeu-se à definição do plano de testes, tendo-se definido quatro níveis de água, três períodos de onda de pico, e diversas alturas de onda significativa incidentes. Numa primeira fase, foram realizados testes sem as estruturas, sendo que os resultados obtidos serviram de base de comparação para os resultados posteriormente obtidos nos testes realizados após a implementação das estruturas (segunda fase), permitindo assim a avaliação da eficácia das soluções. Numa terceira fase, foram novamente realizados testes experimentais com as estruturas, sendo que esta fase se destinava à repetição dos testes da segunda fase, servindo como confirmação dos resultados então obtidos, assim como para detetar algum resultado anormal.

Na análise dos resultados, observou-se que os quebramares destacados potenciam alguma capacidade de acreção, tanto a sotamar como a barlamar, assim como uma certa redução da altura de onda, sendo a eficiência maior para as alturas de onda incidente mais reduzidas. Durante os testes, foi possível observar que para o segundo nível de água mais elevado, o nível de preia mar das águas vivas, os danos nas estruturas começaram a acumular-se, acabando por se considerar a ruína de um dos quebramares, nos primeiros testes deste nível de água. Durante este nível registaram-se ainda alguns galgamentos. Com os testes para o nível de água mais elevado, o nível extremo que tem em consideração a subida do nível médio das águas do mar devida aos efeitos das alterações climáticas, bem como a ocorrência de uma maré meteorológica, os galgamentos e os danos nas estruturas aumentaram consideravelmente, o que resultou rapidamente na ruína de todas as estruturas.

Com o trabalho experimental realizado, foi possível compreender que as estruturas projetadas para a Praia do Carneiro não seriam capazes de resistir às condições de agitação marítima mais extremas para os níveis de água previstos, considerando os efeitos das alterações climáticas.

PALAVRAS-CHAVE: soluções naturais, alterações climáticas, subida do nível da água do mar, proteção costeira, erosão.

ABSTRACT

Erosion makes coastal zones more exposed and vulnerable to extreme events, arming people and properties of significant value. In the future, this phenomenon tends to intensify as a consequence of climate change. The implementation of low-cost and nature-based solutions for coastal protection may allow the control and minimization of offshore sediment transport, increasing beach and dunes resilience, which are aspects of great value in a climate change scenario. The present dissertation aims to develop and test the application of nature-based solutions for coastal protection in a short stretch of Portuguese west coast.

The stretch of the Portuguese west coast selected to this study was the Carneiro beach located close to the Douro river mouth, in Porto. The coastal protection solutions to implement were detached breakwaters.

To perform the experimental study of the coastal protection solution, a 1/60 scale physical model was constructed on the wave basin of the Hydraulics Laboratory of the Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente in Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. After the model construction, the testing program was defined, with four sea water levels, three wave peak periods and multiple incident significant wave heights. In a primary phase, tests without the structures were conducted. The results of these tests provided the basis of comparison with the results obtained for the tests with the structures, allowing the efficiency evaluation. In the second phase, the tests with the structures were conducted and the results were registered. The third testing phase was conducted for the same conditions of the previous ones. The purpose of this tests was to confirm the results obtained in the previous tests, in order to detect any abnormal value.

In the result analysis it was detected some accretion on the leeward and seaward of the detached breakwater, as some wave height reduction, showing more efficiency to reduce incident waves with lower heights. With the analysis of the tests, it was possible to see that for the second highest water level tests (the high tide), the damage increased on the breakwaters. After the first tests, to this level of water, it was considered that one of the breakwaters was on ruin. During the tests carried out for this level, it was also detected overtopping a number of times. During the tests performed for the highest water level, defined to take into account the increasing of the mean sea water level as a consequence of the effects of climate change as well as a storm surge, an increase of the number of overtopping events has occurred as well as the increase of the amount of damage on the breakwaters, leading to the total ruin of all the rubble-mound structures.

With these tests it was possible to understand that the structures designed for the Carneiro beach would not be able to resist the extreme wave conditions for the higher water levels forecasted, that can result from the effects of climate change.

KEYWORDS: natural solutions, climate change, sea level rise, coastal protection, erosion.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I
RESUMO III
ABSTRACT V

1 INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS 1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 2

2 SOLUÇÕES DE PROTEÇÃO COSTEIRA BASEADAS NA NATUREZA 3

2.1. BREVE ENQUADRAMENTO 3
2.2. TIPOS DE SOLUÇÕES 4
2.2.1. ESTRUTURAS SUBMERSAS (RECIFES ARTIFICIAIS) 4
2.2.2. VEGETAÇÃO (MARINHA) 13
2.2.3. DUNAS 19
2.2.4. ZONAS HÚMIDAS (*WETLANDS*) 23
2.3. TÉCNICAS PARA O ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE SOLUÇÕES 26

3 CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO 29

3.1. INTRODUÇÃO 29
3.2. SOLUÇÕES PARA PROTEÇÃO COSTEIRA 30

4 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL 35

4.1. TANQUE DE ONDAS 35
4.2. SISTEMA DE GERAÇÃO DE AGITAÇÃO MARÍTIMA 36
4.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE AGITAÇÃO MARÍTIMA 37
4.4. CONSTRUÇÃO DO MODELO FÍSICO REDUZIDO 38
4.5. CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS 42
4.6. SETUP EXPERIMENTAL 43

5 ANÁLISE DA EFICÁCIA E DA ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA 45

5.1. INTRODUÇÃO 45
5.2. PLANO DE TESTES 45
5.2.1. CALIBRAÇÃO DO FATOR DE GANHO 46
5.2.2. 1ª FASE DE TESTES: SEM QUEBRAMARES DESTACADOS 46
5.2.3. 2ª E 3ª FASE DE TESTES: COM QUEBRAMARES DESTACADOS 47
5.3. ANÁLISE DA EFICÁCIA DAS ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA 48
5.3.1. COMPARAÇÃO ENTRE BARLAMAR E SOTAMAR 50
5.3.2. COMPARAÇÃO DOS REGISTOS EM CADA SONDA 59
5.4. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA 91
5.4.1. QUEBRAMAR 1 91
5.4.2. QUEBRAMAR 2 93
5.4.3. QUEBRAMAR 3 95
5.5. SOBRELEVAÇÃO A SOTAMAR DOS QUEBRAMARES 97

6 SÍNTESE, CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 107
6.1. CONCLUSÕES 107
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 108

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS 111

ANEXOS 115
ANEXO A: REGISTO DO COMPORTAMENTO DOS QUEBRAMARES 117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Riscos costeiros, seus agentes potencializadores e processo de mitigação através de habitats naturais (adaptado de Morris *et al.*, 2018) 4

Figura 2.2 - Exemplo de um recife artificial (adaptado de Harris, 2003). 5

Figura 2.3 - Mergulhador a retirar pneus de um recife artificial na Florida, USA. [1]..... 5

Figura 2.4 - Recife artificial construído com tubos PVC. [2] 6

Figura 2.5 - Recife artificial construído com enrocamento, Madagáscar. [3]..... 6

Figura 2.6 - Exemplos de recifes artificiais em aço/metais diversos. a) módulos de aço em Alvor, Portugal [4] e b) carcaça de tanque. [5]..... 7

Figura 2.7 - Exemplos de recifes artificiais construídos em betão: a) *Reef Ball;* [6] b) cubos modificados [7]; c) bloco de betão simples. [8]..... 7

Figura 2.8 - Exemplo de contentor em geotêxtil preenchido com areia (adaptado de Corbett, 2001). .. 8

Figura 2.9 - Imagem aérea do recife Narrowneck, Gold Coast, Austrália. [9] 9

Figura 2.10 - Recife Narrowneck em Gold Coast, Austrália (Voorde *et al.*, 2006). 10

Figura 2.11 - Fabricação e exemplo já construído de *Reef Balls* (adaptado de Harris, 2009). 11

Figura 2.12 - Perfis. Vista aérea em Abril de 2001 (adaptado de Harris (2003)). 11

Figura 2.13 - Diferença da largura da praia entre 1998 (esquerda) e 2001 (direita) (adaptado de Harris, 2003). 12

Figura 2.14 - Perfil da praia antes e depois da obra (adaptado de Harris, 2003)..... 12

Figura 2.15 - Vegetação marinha. [10]..... 13

Figura 2.16 - Exemplos de espécies de erva marinha: a) *Cymodocea nodosa*; [11] b) *Posidonia oceânica*; [12] c) *Zostera marina*; [13] d) *Zostera noltii*. [14] 14

Figura 2.17 - Interação entre a vegetação marinha e a) correntes e b) ondas (adaptado de Ondiviela *et al.*, 2014). 16

Figura 2.18 - Alternativas de gestão costeira: a) praia autossustentável com vegetação; b) praia instável sem vegetação (adaptado de James *et al.*, 2019). 18

Figura 2.19 – Exemplos de regime: a) Praia natural com costa revestida por vegetação (Puerto Morelos); b) Praia parcialmente instável (Mirador Nizuc) e c) Praia instável (Cancun) (adaptado de James *et al.*, 2019). 19

Figura 2.20 - Duna na praia de Mira, Portugal. [15]..... 19

Figura 2.21 - *Ammophilia arenaria*. [16]..... 20

Figura 2.22 - Paliçadas em São Bartolomeu do Mar, Portugal..... 21

Figura 2.23 – Cilindro geossintético em Ofir, Portugal. 21

Figura 2.24 - Reforço dunar com geossintético em Leirosa, Portugal 2005 (adaptado de Carmo, 2013). 22

Figura 2.25 - Danos nos contentores em 2006 (adaptado de Carmo, 2013). 22

Figura 2.26 - Área de intervenção em 2013 (adaptado de Carmo, 2013). 23

Figura 2.27 - Floresta de mangais. [17]..... 24

Figura 2.28 - Pântano de água salgada, Escócia. [18] 25

Figura 2.29 - Evolução da erosão/acreção na Tailândia para florestas de mangais densas, escassas, desflorestadas ou sem mangais em a) todas as zonas costeiras, b) na costa oeste e c) na costa este. (adaptado de Thampanya *et al.*, 2006) 26

Figura 2.30 - Construção de modelos físicos e numéricos (adaptado de Taveira Pinto, 2019). 27

Figura 3.1 - Vista aérea da localização do trecho a estudar, a praia do Carneiro (*Google Maps*, Junho 2019)..... 29

Figura 3.2 - Posição dos três quebramares de taludes em enrocamento a estudar. 30

Figura 3.3 - Secção transversal tipo de quebramares de taludes galgáveis com três camadas, dentro da zona de rebentação (adaptado de CEM, 2003). 32

Figura 4.1 - Tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP. 35

Figura 4.2 - Sistema de geração de ondas com 16 pás independentes do laboratório da SHRHA na FEUP. 36

Figura 4.3 - Vista interior da sala de controlo do tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP. 37

Figura 4.4 - Linhas guia a marcar no fundo do tanque. 38

Figura 4.5 – Fases da construção das secções dos molhes: a) moldes das várias secções; b) enchimento e compactação do betão; c) moldes cheios com betão e d) molde da secção da cabeça do molhe de Felgueiras. 39

Figura 4.6 – Sequência construtiva do modelo físico: a) realização de marcações no fundo do tanque; b) após a colocação dos afloramentos rochosos e durante a colocação dos tripés; c) colocação das secções do molhe Felgueiras; d) colocação das réguas e após colocação de ambos os molhes; e) após colocação do muro na praia e dos afloramentos rochosos visíveis na muito baixa mar; f) após a colocação da areia e durante a definição do perfil da praia e g) durante o primeiro enchimento. 41

Figura 4.7 – a) Modelo físico construído e estrutura colocada atrás do mesmo para calibração das sondas e b) Haste das sondas de níveis hidrodinâmicos com as marcações do “+”,”-“ e do “0”. 43

Figura 4.8 - Construção dos quebramares de taludes: a) vista das réguas colocadas, com a secção dos quebramares que auxiliaram a colocação das camadas dos quebramares e b) três fases distintas da colocação das camadas dos quebramares de taludes. 44

Figura 5.1 - Estrutura e disposição das quatro sondas para a análise da reflexão. 46

Figura 5.2 – Localização adotada para as sondas de níveis hidrodinâmicos no tanque de ondas. 49

Figura 5.3 - Comparação Barlamar/Sotamar entre os registos das sondas e respetivo C_T na Fase 1.2. 54

Figura 5.4 - Comparação Barlamar/Sotamar entre os registos das sondas e respetivo C_T na Fase 1.3. 58

Figura 5.5 - Sonda 1: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 61

Figura 5.6 - Sonda 1: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 62

Figura 5.7 - Sonda 4: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 64

Figura 5.8 - Sonda 4: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 65

Figura 5.9 - Sonda 5: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 68

Figura 5.10 - Sonda 5: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 69

Figura 5.11 - Sonda 6: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 71

Figura 5.12 - Sonda 6: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 72

Figura 5.13 - Sonda 7: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 74

Figura 5.14 - Sonda 7: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 75

Figura 5.15 - Sonda 8: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$ .. 77

Figura 5.16 - Sonda 8: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$ .. 78

Figura 5.17 - Sonda 9: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 80

Figura 5.18 - Sonda 9: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 81

Figura 5.19 - Sonda 10: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 83

Figura 5.20 - Sonda 10: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 84

Figura 5.21 - Sonda 12: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 86

Figura 5.22 - Sonda 12: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo $C_{Red.}$... 87

Figura 5.23 - Sonda 14: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}. .. 89

Figura 5.24 - Sonda 14: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}. .. 90

Figura 5.25 – Registo do comportamento do QB1 durante a Fase 1.2: a) situação inicial; b) após o teste S12_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S12_NM_TP16_HS45_01; d) após o teste S12_PM_TP16_HS55_01; e) após o teste S12_SS_TP14_HS60_01. 92

Figura 5.26 – Registo do comportamento do QB1 durante a Fase 1.3: a) situação inicial; b) após o teste S13_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S13_NM_TP16_HS45_01; d) após o teste S13_PM_TP16_HS55_01; e) após o teste S13_SS_TP14_HS60_01. 93

Figura 5.27 - Resumo dos acontecimentos no QB2 durante a Fase 1.2: a) situação inicial; b) após o teste S12_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S12_NM_TP16_HS45_01; d) após o teste S12_PM_TP16_HS55_01; e) após o teste S12_SS_TP14_HS60_01. 94

Figura 5.28 - Resumo dos acontecimentos no QB2 durante a Fase 1.3: a) situação inicial; b) após o teste S13_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S13_NM_TP16_HS45_01; d) após o teste S13_PM_TP16_HS55_01. 95

Figura 5.29 - Resumo dos acontecimentos no QB3 durante a Fase 1.2: a) situação inicial; b) após o teste S13_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S13_NM_TP16_HS45_01; d) após o teste S13_PM_TP10_HS55_01. 96

Figura 5.30 - Resumo dos acontecimentos no QB3 durante a Fase 1.3: a) situação inicial; b) após o teste S13_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S13_NM_TP14_HS35_01; d) após o teste S13_NM_TP14_HS40_01. 97

Figura 5.31 - Série temporal da elevação da superfície livre no registo (PM_TP14_HS40) inicial e após a aplicação do filtro de passa-baixos para frequências de corte de 0.025 a 0.5 f_p da sonda 1, sem quebramares. 98

Figura 5.32 - Série temporal da elevação da superfície livre do registo (PM_TP14_HS40) inicial e após a aplicação do filtro de passa-baixos para frequências de corte de 0.025 a 0.5 f_p da sonda 1, com quebramares. 98

Figura 5.33 - Série temporal da sonda 1 (PM_TP14_HS40) para a frequência de corte de 0.10 f_p..... 99

Figura 5.34 - Série temporal da sonda 1 (PM_TP14_HS40) para a frequência de corte de 0.05 f_p..... 99

Figura 5.35 - Série temporal da sonda 1 (PM_TP14_HS40) para a frequência de corte de 0.025 f_p. 100

Figura A.1 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_BM_TP10_HS20_01; c) teste S12_BM_TP10_HS30_01; d) teste S12_BM_TP10_HS35_01; e) teste S12_BM_TP10_HS40_01; f) teste S12_BM_TP14_HS20_01……118

Figura A.2 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_BM_TP14_HS30_01; c) teste S12_BM_TP14_HS35_01; d) teste S12_BM_TP14_HS40_01; e) teste S12_BM_TP16_HS20_01; f) teste S12_BM_TP16_HS30_01. 119

Figura A. 3 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_BM_TP16_HS35_01; c) teste S12_BM_TP16_HS35_02; d) teste S12_NM_TP10_HS20_01; e) teste S12_NM_TP10_HS20_02; f) teste S12_NM_TP10_HS30_01. 120

Figura A.4 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_NM_TP10_HS35_01; c) teste S12_NM_TP10_HS40_01; d) teste S12_NM_TP10_HS45_01; e) teste S12_NM_TP14_HS20_01; f) teste S12_NM_TP14_HS30_01. 121

Figura A.5 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_NM_TP14_HS30_02; c) teste S12_NM_TP14_HS35_01; d) teste S12_NM_TP14_HS40_01; e) teste S12_NM_TP16_HS20_01; f) teste S12_NM_TP16_HS30_01. 122

Figura A.6 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_NM_TP16_HS35_01; c) teste S12_NM_TP16_HS40_01; d) teste S12_NM_TP16_HS45_01; e) teste S12_PM_TP10_HS20_01; f) teste S12_PM_TP10_HS30_01. 123

Figura A.7 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_PM_TP10_HS35_01; c) teste S12_PM_TP10_HS40_01; d) teste S12_PM_TP10_HS45_01; e) teste S12_PM_TP10_HS50_01; f) teste S12_PM_TP10_HS55_01. 124

Figura A.8 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_PM_TP10_HS60_01; c) teste S12_PM_TP14_HS20_01; d) teste S12_PM_TP14_HS30_01; e) teste S12_PM_TP14_HS35_01; f) teste S12_PM_TP14_HS40_01. 125

Figura A.9 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_PM_TP14_HS45_01; c) teste S12_PM_TP14_HS50_01; d) teste S12_PM_TP16_HS20_01; e) teste S12_PM_TP16_HS30_01; f) teste S12_PM_TP16_HS35_01. 126

Figura A.10 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_PM_TP16_HS40_01; c) teste S12_PM_TP16_HS45_01; d) teste S12_PM_TP16_HS50_01; e) teste S12_PM_TP16_HS55_01; f) teste S12_SS_TP14_HS30_01. 127

Figura A.11 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_SS_TP14_HS40_01; c) teste S12_SS_TP14_HS50_01; d) teste S12_SS_TP14_HS60_01. 128

Figura A.12 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_BM_TP10_HS20_01; c) teste S13_BM_TP10_HS30_01; d) teste S13_BM_TP10_HS35_01; e) teste S13_BM_TP10_HS40_01; f) teste S13_BM_TP10_HS45_01. 129

Figura A.13 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_BM_TP14_HS20_01; c) teste S13_BM_TP14_HS30_01; d) teste S13_BM_TP14_HS35_01; e) teste S13_BM_TP14_HS40_01; f) teste S13_BM_TP16_HS20_01. 130

Figura A.14 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_BM_TP16_HS30_01; c) teste S13_BM_TP16_HS35_01; d) teste S13_BM_TP16_HS35_02; e) teste S13_NM_TP10_HS20_01; f) teste S13_NM_TP10_HS20_02 131

Figura A.15 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_NM_TP10_HS30_01; c) teste S13_NM_TP10_HS35_01; d) teste S13_NM_TP10_HS40_01; e) teste S13_NM_TP10_HS45_01; f) teste S13_NM_TP14_HS20_01 132

Figura A.16 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_NM_TP14_HS30_01; c) teste S13_NM_TP14_HS35_01; d) teste S13_NM_TP14_HS40_01; e) teste S13_NM_TP16_HS20_01; f) teste S13_NM_TP16_HS30_01 133

Figura A.17 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_NM_TP16_HS35_01; c) teste S13_NM_TP16_HS40_01; d) teste S13_NM_TP16_HS45_01; e) teste S13_PM_TP10_HS20_01; f) teste S13_PM_TP10_HS30_01. 134

Figura A.18 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_PM_TP10_HS35_01; c) teste S13_PM_TP10_HS40_01; d) teste S13_PM_TP10_HS45_01; e) teste S13_PM_TP10_HS50_01; f) teste S13_PM_TP10_HS55_01. 135

Figura A.19 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_PM_TP10_HS60_01; c) teste S13_PM_TP14_HS20_01; d) teste S13_PM_TP14_HS30_01; e) teste S13_PM_TP14_HS35_01; f) teste S13_PM_TP14_HS40_01. 136

Figura A.20 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_PM_TP14_HS45_01; c) teste S13_PM_TP14_HS50_01; d) teste S13_PM_TP16_HS20_01; e) teste S13_PM_TP16_HS30_01; f) teste S13_PM_TP16_HS35_01. 137

Figura A.21 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_PM_TP16_HS40_01; c) teste S13_PM_TP16_HS45_01; d) teste S13_PM_TP16_HS50_01; e) teste S13_PM_TP16_HS55_01; f) teste S13_SS_TP14_HS30_01. 138

Figura A.22 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_SS_TP14_HS40_01; c) teste S13_SS_TP14_HS50_01; d) teste S13_SS_TP14_HS60_01. 139

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Alterações da linha de costa e de volume entre 1998 e 2001 (adaptado de Harris, 2003). 12

Quadro 2.2 - Resumo das condições de aplicação de quatro espécies de vegetação aquática nativas de águas EU (adaptado de Ondiviela *et al.* (2014)) 15

Quadro 2.3 - Influência relativa das propriedades dinâmicas da água e elementos biológicos e do ecossistema na redução de correntes, atenuação de ondas e estabilização de sedimentos: ↑ Alta; ↑↑ Muito alta; (adaptado de Ondiviela *et al.*, 2014) 17

Quadro 3.1 - Valores de K_D para blocos de enrocamento (adaptado de SPM,1984). 32

Quadro 3.2 - Valores de KD para blocos em enrocamento (adaptado de LNEC). 32

Quadro 3.3 - Condições para o dimensionamento da secção do perfil corrente dos quebramares. ... 33

Quadro 3.4 - Condições para o dimensionamento da secção da cabeça dos quebramares. 33

Quadro 3.5 - Peso dos blocos em cada uma das camadas, para a seção do perfil corrente e para a secção da cabeça dos quebramares. 33

Quadro 3.6 - Determinação da espessura das camadas dos quebramares para a secção do perfil corrente. 34

Quadro 3.7 - Determinação da espessura das camadas dos quebramares para a secção da cabeça. 34

Quadro 5.1 - Plano de testes para a 1ª Fase (sem quebramares destacados). 47

Quadro 5.2 - Plano de testes para a 2ª e 3ª Fases (com quebramares destacados). 48

Quadro 5.3 - Coeficientes de transmissão (%) obtidos para os testes da Fase 1.2 para os níveis de BM e NM. 52

Quadro 5.4 - Coeficientes de transmissão (%) obtidos para os testes da Fase 1.2 para os níveis de PM e SS. 53

Quadro 5.5 - Coeficientes de transmissão (%) obtidos para os testes da Fase 1.3 para os níveis de BM e NM. 56

Quadro 5.6 - Coeficientes de transmissão (%) obtidos para os testes da Fase 1.3 para os níveis de PM e SS. 57

Quadro 5.7 - Sonda 1: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m. 60

Quadro 5.8 - Sonda 4: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m. 63

Quadro 5.9 - Sonda 5: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}. 66

Quadro 5.10 - Sonda 6: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red} 70

Quadro 5.11 - Sonda 7: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}. 73

Quadro 5.12 - Sonda 8: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}. 76

Quadro 5.13 - Sonda 9: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}. 79

Quadro 5.14 - Sonda 10: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m. 82

Quadro 5.15 - Sonda 12: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), TP de 10, 14 e 16 s e HS de 2 a 6 m. 85

Quadro 5.16 - Sonda 14: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m. 88

Quadro 5.17 – Valores médios das séries temporais da sonda 1 para os testes PM_TP10_HS30_01, PM_TP14_HS40_01, PM_TP16_HS45_01, SS_TP14_HS30_01 e SS_TP14_HS60_01, antes da aplicação do filtro e após a aplicação do filtro para frequências de corte de 0.025 a 0.500 f_p. 101

Quadro 5.18 - Valores médios das séries temporais da sonda 4 para os testes PM_TP10_HS30_01, PM_TP14_HS40_01, PM_TP16_HS45_01, SS_TP14_HS30_01 e SS_TP14_HS60_01, antes da aplicação do filtro e após a aplicação do filtro para frequências de corte de 0.025 a 0.500 fp 102

Quadro 5.19 - Nível médio e sobrelevação registados na sonda 1 para cada um dos testes, sem e com quebramares. 103

Quadro 5.20 - Nível médio e sobrelevação registados na sonda 4 para cada um dos testes, sem e com quebramares. 104

SIMBOLOS E ACRÓNIMOS

APDL - Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo

BM – Baixa Mar

BMAV – Baixa Mar de Águas Vivas

CEM - *Coastal Engineering Manual*

C_{Red} – Coeficiente de redução

C_T – Coeficiente de transmissão

EARRN - *European Artificial Reef Research Network*

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

F_G – Fator de ganho

f_p – Frequência de pico

GCCC – *Gold Coast City Council & Government*

$H_{Máx}$ – Altura de onda máxima

H_{proj} – Altura de onda de projeto

$H_{s,barlamar}$ – Altura de onda a barlamar

$H_{s,sotamar}$ – Altura de onda a sotamar

H_{sf} – Altura de onda final

H_{si} – Altura de onda inicial

ICM – *International Coastal Management*

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

JONSWAP - *Joint North Sea Wave Project*

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MDF - *Medium Density Fiberboard*

MR – Manto Resistente

NM – Nível Médio

PM – Preia Mar

PMAV – Preia Mar de Águas Vivas

QB1 – Quebramar 1

QB2 – Quebramar 2

QB3 – Quebramar 3

QB4 – Quebramar 4

QB5 – Quebramar 5

RA – Recife Artificial

S1 – Sonda 1

S10 – Sonda 10

S12 – Sonda 12

S14 – Sonda 14

S3 – Sonda 3

S4 – Sonda 4

S5 – Sonda 5

S6 – Sonda 6

S7 – Sonda 7

S8 – Sonda 8

S9 – Sonda 9

SHRHA - Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

SPM - *Shore Protection Manual*

SS – *Storm Surge*

T_P – Período da onda de pico

ZH – Zero Hidrográfico

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS

A subida do nível médio da água do mar é um dos fenómenos associados às alterações climáticas que tem vindo a aumentar de intensidade nos últimos anos, assim como o aumento da intensidade e do número de tempestades e mudança nos rumos das tempestades e, portanto, da agitação marítima, fenómenos decorrentes do efeito das alterações climáticas e que tem grande influência na proteção costeira. Este aumento do nível médio da água do mar tem consequências muito importantes ao nível do dano em estruturas costeiras, fenómenos erosivos em geral, assim como no aumento do risco de inundações e na ocorrência de danos provocados por galgamentos, sendo as zonas costeiras naturalmente as mais afetadas. O relatório da *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) atribui o aumento do nível médio das água do mar, em grande parte, ao aquecimento global que, por consequência, provoca o degelo de glaciares Church *et al.*, 2013. Assim, existem duas formas de lidar com o problema, para tentar reduzir os fenómenos que provocam o aquecimento global e a consequente subida do nível médio da água do mar: adaptação aos efeitos das alterações climáticas ou atuando ao nível da minoração dos processos e mecanismos causadores das alterações climáticas.

Perante o aumento dos efeitos das alterações climáticas, é essencial desenvolver estratégias de adaptação às mesmas. Estas medidas de adaptação devem conseguir minorar os riscos e impactes associados às alterações climáticas. Tal como a definição de adaptação do IPCC sugere (ajuste nos sistemas humanos ou naturais face a efeitos e alterações climáticas atuais ou previstos, com o intuito de atenuar os danos ou explorar e, eventualmente, beneficiar com esses fenómenos), o propósito destas medidas reside, essencialmente, na redução ou mitigação das consequências dos fenómenos associados às alterações climáticas, anulando ou diminuindo substancialmente o risco de danos e potenciando eventuais benefícios. O facto de a curto prazo as alterações climáticas não poderem ser evitadas, a tomada de decisões sustentadas no clima histórico (níveis de água e direção da agitação marítima) pode ser inapropriada, assim como o facto de um plano de adaptação ser mais eficaz do que medidas reativas em ocasiões de emergência, são evidências da importância das estratégias de adaptação às alterações climáticas.

É no seguimento da importância destas estratégias que se insere este trabalho de investigação, que visa a avaliação da eficácia e da estabilidade de estruturas de proteção costeira num contexto de adaptação às alterações climáticas. Dentro das soluções de proteção costeira, aquelas baseadas na natureza (*e.g.*, recifes artificiais, vegetação, dunas, zonas pantanosas) merecem especial destaque, pois não só se apresentam, usualmente, como soluções de custo reduzido, como podem também aumentar a proteção contra a erosão e favorecer a sedimentação, minimizando o transporte de sedimentos para o largo, assim como reduzir o risco de inundações.

Sendo Portugal um país com cerca de 1860 km de costa (Portugal continental e Arquipélagos dos Açores e da Madeira), em que grande parte da mesma é afetada por problemas graves de erosão e apresenta ainda risco de inundação, a importância do estudo e implementação destas soluções é evidente. Assim, o presente trabalho pretende apresentar, estudar e avaliar soluções baseadas na natureza e com capacidade de adaptação às alterações climáticas.

Assim, a componente principal desta dissertação consistiu no estudo em modelo físico reduzido de um trecho da costa Oeste de Portugal, afetado por problemas de erosão e onde existe elevado risco de inundações, que poderão ser agravados significativamente no futuro devido aos efeitos das alterações climáticas. O trecho estudado foi a praia do Carneiro, junto à Foz do Rio Douro, no Porto.

Com o estudo em modelo físico, pretendeu-se avaliar a eficácia de soluções de proteção costeira, neste caso quebramares destacados, na resolução dos problemas anteriormente identificados. O modelo físico, construído no Laboratório de Hidráulica, mais concretamente no tanque de ondas, da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), foi sujeito a uma extensa série de testes experimentais com o objetivo de realizar uma comparação entre a reposta hidrodinâmica do modelo sem as estruturas e a resposta do mesmo com as estruturas de proteção costeira implementadas, permitindo assim avaliar a eficácia das mesmas.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos, apresentados numa estrutura sequencial, que serão aqui descritos de forma concisa.

No presente capítulo, pretende-se realizar um breve enquadramento do tema e dos objetivos que estão na base deste estudo.

O capítulo 2 é dedicado à pesquisa e apresentação de soluções de proteção costeira baseadas na natureza para adaptação aos efeitos das alterações climáticas, apresentando-se diferentes tipos de soluções e as condições de aplicação das mesmas. São ainda apresentados casos de estudo em que essas soluções foram implementadas.

No capítulo 3 é apresentado o trecho da costa Oeste Portuguesa a estudar, assim como a caracterização da solução a estudar, o seu pré-dimensionamento e a caracterização das ações do ambiente marítimo.

O capítulo 4 destina-se à apresentação da instalação experimental, o Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP, assim como os respetivos equipamentos de geração e aquisição de agitação marítima, incluindo os respetivos processos de calibração. Neste capítulo é ainda descrito o processo de construção do modelo físico reduzido, bem como o setup experimental.

O capítulo 5 é reservado para apresentação detalhada dos testes realizados e para a exposição dos resultados obtidos após a realização dos referidos testes. É realizada uma análise da eficácia das estruturas de proteção costeira, bem como da sua estabilidade. É feita também uma análise da possível sobrelevação do nível de água a sotamar dos quebramares.

Por fim, no capítulo 6, é feita a apresentação das conclusões finais retiradas do estudo realizado, assim como a apresentação de sugestões para desenvolvimentos futuros.

2
SOLUÇÕES DE PROTEÇÃO COSTEIRA BASEADAS NA NATUREZA

2.1. BREVE ENQUADRAMENTO

Os efeitos das alterações climáticas, como a subida do nível médio das águas do mar, o aumento da intensidade e frequência das ondas, aumentam os riscos de erosão e inundação ao longo das faixas costeiras a um nível global IPCC, 2014.O fenómeno da erosão leva a que as zonas costeiras fiquem mais expostas e vulneráveis a eventos extremos, colocando em risco pessoas e bens com elevado valor patrimonial.

Face ao referido, é necessário implementar soluções para proteção costeira, em que aquelas baseadas na natureza se apresentam como uma boa solução e de baixo custo, melhorando a proteção contra a erosão e permitindo o controlo e minimização do arrastamento de sedimentos para o largo. Estas soluções são distintas das soluções mais tradicionais (quebramares, esporões, etc) por tentarem minimizar os seus mesmos efeitos negativos, sendo por vezes consideradas mais "amigas" da natureza. Apesar de as soluções baseadas na natureza poderem ter menos impactos negativos do que as mais tradicionais, estas também podem ser consideradas "amigas" do ambiente pois a sua existência, já é só por si um sinal de que estas foram implementadas de forma a combater algum risco. Cada caso deve ser muito bem analisado e ponderado, para depois ser tomada a opção entre o tipo de estrutura. Na Figura 2.1 é possível observar os riscos costeiros, tais como erosões e inundações, os seus agentes potencializadores (subida do nível médio da água do mar, marés meteorológicas, agitação marítima, transporte de sedimentos e tempestades) e o processo de mitigação destes fenómenos recorrendo a soluções naturais como recifes artificiais, dunas e vegetação.

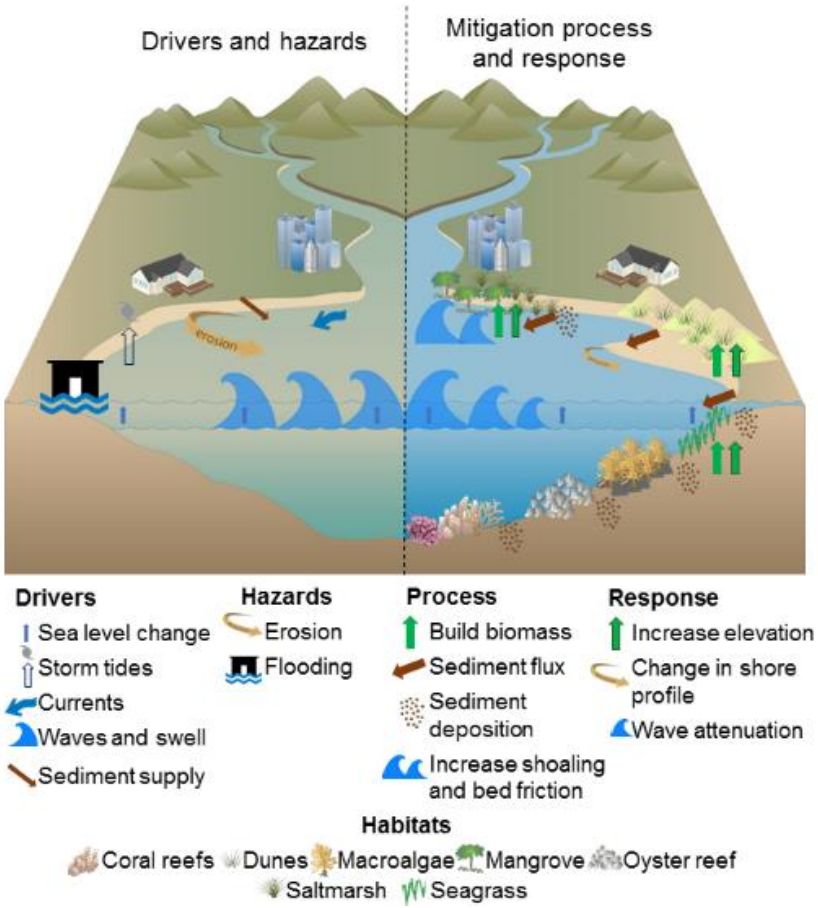


Figura 2.1 - Riscos costeiros, seus agentes potencializadores e processo de mitigação através de habitats naturais (adaptado de Morris *et al.*, 2018) .

2.2. TIPOS DE SOLUÇÕES

2.2.1. ESTRUTURAS SUBMERSAS (RECIFES ARTIFICIAIS)

Segundo a *European Artificial Reef Research Network (EARRN)*, um recife artificial é uma estrutura submersa, colocada em fundos marítimos, de forma a recriar as características de um recife natural Jensen, 2001. No fundo, um recife artificial pode ser considerado um quebramar que se encontra permanentemente submerso. Num estudo realizado por Baine (2001), em que foram analisados 249 artigos científicos sobre recifes artificiais, verificou-se que grande parte dos estudos sobre recifes foram dedicados à ecologia da pesca e sua gestão, sendo que apenas 2 artigos se dedicaram à análise de recifes artificiais integrados em intervenções de proteção e gestão costeira. Este aspeto, exemplifica a multifuncionalidade que um recife artificial pode apresentar, mas também prova a falta de estudo de recifes artificiais como uma solução para proteção costeira.

A Figura 2.2 apresenta um exemplo de recife artificial que foi instalado ao longo da costa sul da República Dominicana. Este quebramar submerso foi construído utilizando elementos individuais, *Reef Ball*, que serão abordados em detalhe posteriormente.



Figura 2.2 - Exemplo de um recife artificial (adaptado de Harris, 2003).

2.2.1.1.Materiais

Atualmente, os recifes artificiais podem ser construídos com uma grande variedade de materiais, como plástico, PVC, pneus, rocha/enrocamento, aço e metais variados, carcaças de carros, vagões de comboios e betão. O betão e o aço são os materiais mais utilizados devido às falhas pouco frequentes no cumprimento dos seus objetivos, pelas suas propriedades resistentes, durabilidade e possibilidade de materializar vários tipos de peças, no caso do betão, com recurso a moldes diferentes.

A Figura 2.3 ilustra um recife artificial construído com pneus. Apesar de ser uma boa solução do ponto de vista económico, a utilização de pneus tem mais desvantagens do que vantagens:

- O recife desagrega-se facilmente;
- Quando ocorre desagregação, os pneus podem danificar outros sistemas naturais (*e.g.*, recifes naturais);
- São constituídos por materiais que poluem a água;



Figura 2.3 - Mergulhador a retirar pneus de um recife artificial na Florida, USA. [1]

A Figura 2.4 apresenta um recife artificial constituído por módulos que foram construídos com tubos de PVC, que apenas favorecem o crescimento de corais, não apresentando qualquer eficácia no combate à erosão costeira. Por outro lado, há que ter em conta o facto de se aumentar a quantidade de plástico presentes nos oceanos.



Figura 2.4 - Recife artificial construído com tubos PVC. [2]

Apesar de também apresentarem um bom comportamento na proteção costeira, os recifes artificiais construídos com enrocamento têm como principal objetivo proporcionar abrigo a várias espécies marinhas e desviar atividades de pesca de outros locais mais fragilizados. Na Figura 2.5 é possível observar um recife artificial construído com enrocamento.



Figura 2.5 - Recife artificial construído com enrocamento, Madagáscar. [3]

Tal como a grande maioria dos materiais referidos anteriormente, os recifes artificiais realizados em aço ou metais diversos têm como objetivo desenvolver e proteger espécies aquáticas, a criação de corais e fomentar atividades como mergulho. Na Figura 2.6, em a) pode-se observar o módulo de um recife artificial realizado em aço e em b) um tanque afundado. Em ambos os casos, os objetivos são os já referidos.

a) b)



Figura 2.6 - Exemplos de recifes artificiais em aço/metais diversos. a) módulos de aço em Alvor, Portugal [4] e b) carcaça de tanque. [5]

No estudo realizado por Baine (2001), é percetível a grande variedade de fins a que os recifes artificiais construídos com elementos fabricados com em betão se destinam, destacando-se a atração de peixes, desenvolvimento de corais, algas e proteção costeira. A Figura 2.7 exemplifica os diferentes tipos peças em betão utilizados na construção de recifes artificiais.

a) b)



c)

Figura 2.7 - Exemplos de recifes artificiais construídos em betão: a) *Reef Ball;* [6] b) cubos modificados [7]; c) bloco de betão simples. [8]

Outro exemplo de material utilizado para a criação de um recife artificial são os contentores fabricados em geotêxtil ou geossintético enchidos com areia. Esta solução apresenta bom comportamento na criação de corais, algas, atração de peixes e proteção costeira, permitindo também maior segurança durante a realização de atividades desportivas (*e.g.*, *surf*), pois em caso de embate do praticante contra a estrutura, esta é menos rígida e, portanto, menos perigosa. Na Figura 2.8 é apresentado um exemplo deste tipo de contentores.



Figura 2.8 - Exemplo de contentor em geotêxtil preenchido com areia (adaptado de Corbett, 2001).

2.2.1.2.Condições de aplicação

De forma a averiguar a possibilidade de aplicação de um recife artificial (RA) numa determinada zona, tendo presente a necessidade garantir a estabilidade e o cumprimento dos objetivos a que este se propõe, devem ser analisados os seguintes aspetos:

- Transporte de sedimentos;
- Condicionantes marítimas (ondas e correntes);
- Profundidade de água;
- Submersão;
- Características do fundo do mar;

Não existem estudos que sugiram a existência de impactos negativos resultantes do uso de RA (Simioni e Esteves, 2010). Sabendo que os RA têm influência nas ondas e correntes da envolvente, supõe-se que os RAs afetam o transporte de sedimentos de uma forma idêntica aos quebramares. Os RAs funcionam como obra de proteção costeira através da dissipação de energia das ondas, resultando na diminuição do transporte de sedimentos para o largo e favorecendo a sedimentação a sotamar do RA e consequente aumento da praia. Contudo, o fato de os RAs interromperem o transporte transversal de sedimentos, favorecendo a sua deposição a sotamar dos mesmos, que deixarão assim de contribuir para a sedimentação a barlamar do RA, podendo resultar em erosões. Tal como em outras obras marítimas, os RAs podem provocar deposição e/ou erosão excessiva resultando em soterramento ou subsidência, o que coloca em causa a estabilidade da estrutura (Simioni e Esteves, 2010).

De forma a reduzir o transporte de sedimentos para o largo, os RAs têm como base de funcionamento a diminuição da altura de onda incidente numa situação regular/normal, mas também em cenários de

tempestade, que serão cada vez mais frequentes e intensos devido aos efeitos das alterações climáticas, sendo nestas condições em que se verifica o maior transporte e perda de sedimentos para o largo. Os RAs podem ser aplicados a zonas mais ou menos expostas energeticamente, apresentando naturalmente melhor comportamento em zonas menos expostas.

Outro aspeto a considerar é a profundidade a que se pretende implementar um RA. Importa referir que um RA é um tipo de quebramar destacado, que se encontra predominantemente submerso. Estudos revelam que o aumento da profundidade e, por consequência, aumento da distância à linha de costa favorece o aumento da deposição de sedimentos a sotamar do RA. No entanto, para uma altura de recife fixa, com o aumento da profundidade também se verifica o aumento do nível de submersão, que é também influenciado pela variação da maré, resultando na perda de eficácia do RA na redução da altura de onda e consequente dissipação de energia.

As características do fundo do mar são outro aspeto importante a estudar aquando da utilização de um RA, pois esta deve ser uma estrutura bastante estável perante as ações a que estará sujeita, levando a que, em fundos arenosos, pesos estruturais elevados possam provocar assentamentos e pesos menores possam não contrariar as impulsões a que estrutura estará sujeita, colocando em risco a estabilidade da mesma. Os RAs são aplicáveis tanto a fundos rochosos como arenosos, devendo, no entanto, o tipo de fundos ser um aspeto fundamental a considerar aquando do dimensionamento da estrutura.

2.2.1.3.Casos de estudo

Narrowneck *reef*, Gold Coast, Austrália

Um exemplo de uma implementação com sucesso de um recife artificial, é o do recife Narrowneck. Este é um recife artificial localizado na Austrália, mais precisamente na cidade Gold Coast (Figura 2.9). Este foi o primeiro recife artificial multifuncional tendo como principal objetivo alargar e proteger a praia que teria uma alimentação artificial com mais de 1 milhão de metro cúbicos de areia. Como papel secundário, pretendia-se que o recife melhorasse as condições para a prática de surf. A construção da obra foi concluída em dezembro de 2002, com o recife artificial a ter uma implantação em "V" (vértice a apontar na direção do mar) e dimensões totais de 400 m perpendicularmente à costa e de 200 m medidos paralelamente à costa. O recife é composto por mega contentores fabricados em geotêxtil preenchidos com areia, com pesos entre as 1600 e 3000 kN. A maioria dos contentores tem 20 m de comprimento e até 5 m de diâmetro, tendo sido necessários 332 contentores, perfazendo o volume total de cerca de 110000 m^3 de areia. Os contentores foram colocados no local pretendido com recurso a um batelão posicionado através de imagens satélite (Voorde *et al.*, 2006). Segundo Black e Mead (2001), a amplitude da maré no local varia entre 1 a 2 m, com uma altura de onda entre 0.5 e 4 m, podendo atingir os 13 m durante as tempestades. A submergência é de 1.5 m durante a ocorrência da baixa-mar.



Figura 2.9 - Imagem aérea do recife Narrowneck, Gold Coast, Austrália. [9]

De forma a assegurar que o recife artificial cumpria o objetivo pretendido, para o seu dimensionamento foram utilizados modelos físicos e numéricos. Com o intuito de avaliar o alargamento da praia para vários coeficiente de redução da altura de onda, foi utilizado o modelo numérico designado GENESIS. Este modelo indicou que para um coeficiente de redução da altura de onda de 30%, a linha média da praia deslocar-se-ia cerca de 50 m para barlamar. Para a definição da forma do recife e avaliação de possíveis impactos foram utilizados os modelos numéricos GENIUS, 3DD e POL3DD, que foram calibrados usando dados obtidos na zona de surf (Jackson *et al.*, 2007). De forma a alcançar os objetivos pretendidos para a prática de surf, o recife assumiu inicialmente a já mencionada forma convencional em "V". Segundo Jackson *et al.* (2007), esta forma causava grandes velocidades sobre o topo do recife, o que era inaceitável do ponto de vista da segurança, levando a que o recife sofresse uma alteração na sua forma: forma em "V" foi mantida, mas com abertura no seu vértice (Figura 2.10). Foi ainda sugerido que o braço norte do recife fosse aumentado de forma a melhorar a retenção de sedimentos. Após a análise de todos os resultados obtidos através dos modelos mencionadas, por razões de segurança e de forma a evitar a acumulação excessiva de areia e possível soterramento da estrutura, as entidades responsáveis pelo projeto (ICM e GCCC), optaram por realizar o recife com o coroamento à cota de -0.5 m abaixo do Zero Hidrográfico (ZH) da zona em questão.

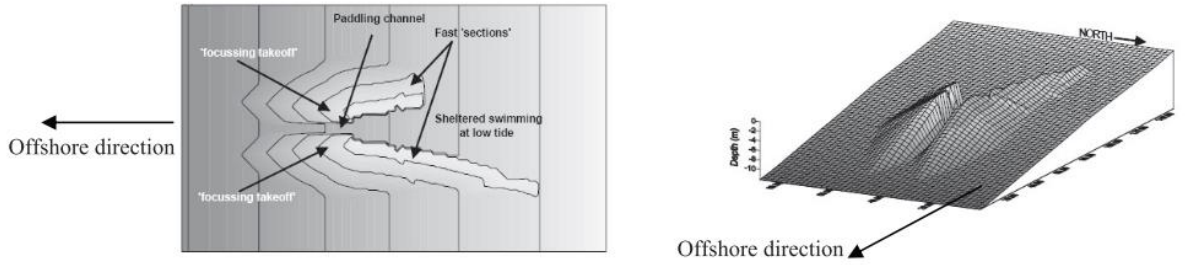


Figura 2.10 - Recife Narrowneck em Gold Coast, Austrália (Voorde *et al.*, 2006).

Durante o período compreendido entre 2000 e 2004, foi realizado um estudo de monitorização que revelou obtenção de 30 m adicionais a sotamar do recife (Jackson *et al.*, 2005). Deve ser referido, uma vez mais, que antes da realização do recife artificial procedeu-se a uma alimentação artificial da praia com cerca de 1 milhão de m^3 de areia, o que não permite distinguir o contributo do recife para o alargamento da praia.

Reef Ball, República Dominicana

Outro exemplo de um recife artificial construído com o intuito de proteção costeira é o criado na costa sul da República Dominicana. Este recife foi construído com as já mencionadas *Reef Balls*, que são elementos em betão pré-fabricados (Figura 2.11). Estes elementos são bastante vantajosos por: se tratarem de elementos económicos; fáceis de fabricar (podendo ser fabricados no próprio local da obra); facilidade e economia na colocação das unidades no local pretendido por flutuação com recurso a sacos próprios; e possibilidade de ancorar as unidades ao fundo marinho (Harris, 2009).



Figura 2.11 - Fabricação e exemplo já construído de *Reef Balls* (adaptado de Harris, 2009).

Este recife localizado na costa da República Dominicana começou a ser construído durante o verão de 1998, tendo sido utilizados para o efeito 450 *Reef Balls* Harris, 2009. A intervenção tinha como objetivo o alargamento e a estabilização da linha de costa, o desenvolvimento ambiental e, sendo esta uma zona com forte atração turística, fomentar o ecoturismo. Para a materialização do recife foram utilizadas duas soluções distintas: as *Reef Balls* com cerca de 1.2 m de altura e as designadas *Ultra Balls* com cerca de 1.3 m de altura, tendo 1.5 m e 1.6 m de diâmetro (medido na base) e pesos de 16 e 20 kN, respetivamente (Harris, 2009). O recife é constituído por três segmentos com três filas de *Reef Balls* cada um (Figura 2.12). A amplitude de maré da zona é de cerca de 0.4 m e o recife foi instalado a profundidades entre os 1.6 m e 2 m, de forma a que as *Reef Balls* ficassem com níveis de submersão de 0.3 m a 0.8 m em relação ao nível médio da água do mar (Harris, 2009). A Figura 2.12 apresenta a localização do recife, bem como a localização dos perfis que serviram de base para análise da eficiência da solução.

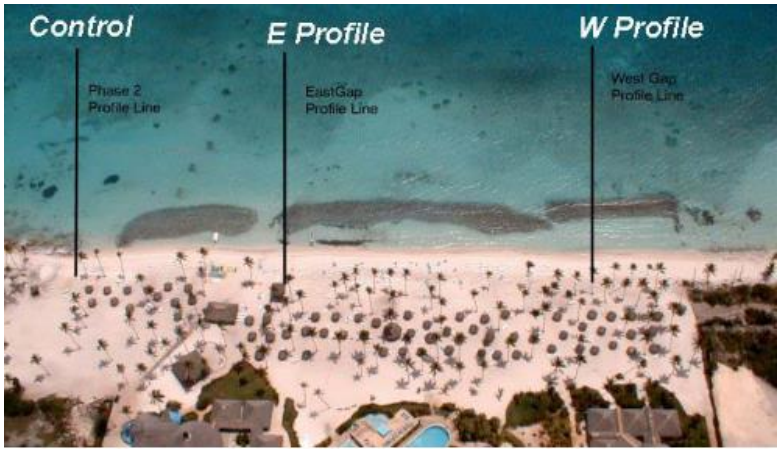


Figura 2.12 - Perfis. Vista aérea em Abril de 2001 (adaptado de Harris (2003)).

Em 1998, pouco depois da finalização da construção do recife artificial, a zona foi atingida diretamente pelo furacão George e por ondas de grande altura associadas ao furacão Mitch, não tendo sido registado qualquer dano ou deslocamento dos elementos do recife. Na Figura 2.13 é visível a alteração na largura da praia, acreção de areia e estabilização da linha de costa não tendo sido registados quaisquer impactos negativos em praias adjacentes (Harris, 2003).



Figura 2.13 - Diferença da largura da praia entre 1998 (esquerda) e 2001 (direita) (adaptado de Harris, 2003).

Harris (2003) avaliou também as diferenças entre a situação antes e depois da construção do recife, apresentando resultados numéricos (Quadro 2.1) e gráficos (Figura 2.14), que evidenciam mais precisamente as diferenças.

Quadro 2.1 - Alterações da linha de costa e de volume entre 1998 e 2001 (adaptado de Harris, 2003).

Perfil	Alterações na linha de costa (m)	Variação do volume de areia (m^3/m)
West	10	25.65
East	13	44.25
Control	0	2

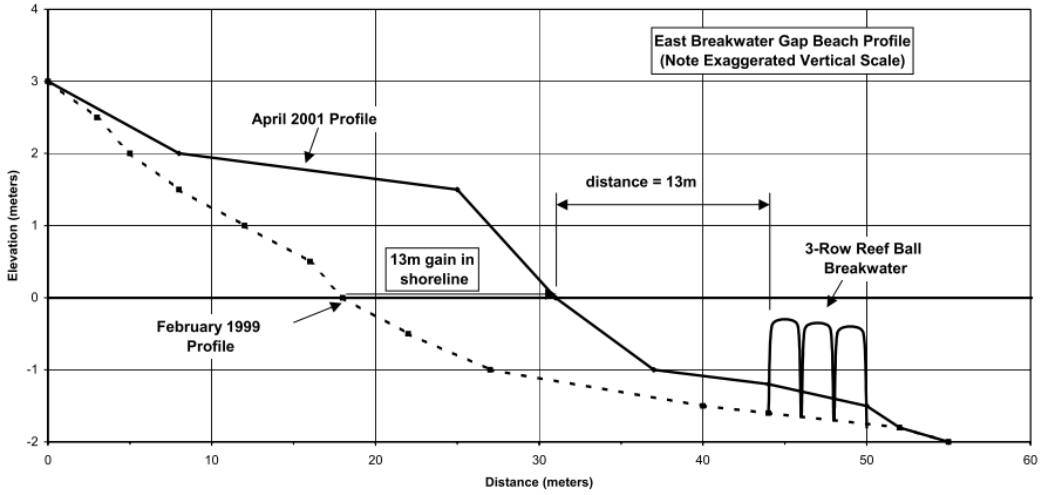


Figura 2.14 - Perfil da praia antes e depois da obra (adaptado de Harris, 2003).

Os resultados apresentados anteriormente demonstram o grande resultado obtido com a implementação desta solução. Menos de dois anos após a conclusão da obra foi registado um ganho máximo de 13 m na linha de costa. Contudo, tal como refere Harris (2003), esta é uma solução adequada para zonas com amplitude de maré reduzidas (0.4 m neste caso) e climas de agitação pouco ou moderadamente energéticos.

2.2.2.VEGETAÇÃO (MARINHA)

O recurso à vegetação como medida de proteção costeira é cada vez mais frequente pelos bons resultados apresentados e baixo custo de implementação (Borsje *et al.*, 2011). A capacidade que a vegetação tem de reter sedimentos e consequentemente aumentar a cota dos fundos e atenuar as ondas, além da capacidade de acompanhar o aumento do nível médio das águas do mar, demonstra que esta é uma solução sustentável, económica e com boa adaptação às alterações climáticas (Borsje *et al.*, 2011). Este tipo de vegetação, com capacidade para se desenvolver em condições completamente submersas, é também geralmente designada por erva marinha pela sua semelhança com a erva terrestre.



Figura 2.15 - Vegetação marinha. [10]

2.2.2.1.Condições de aplicação

Existem cerca de sessenta espécies de vegetação marinha distribuídas mundialmente, sendo que sete dessas espécies estão localizadas na Europa (*Halophila decipiens, Cymodocea nodosa, Posidonia oceanica, Zostera marina, Zostera noltii, Ruppia maritima* e *Halophila stipulacea*) e quatro são nativas de águas Europeias (*Zostera marina, Zostera noltii, Posidonia oceânica* e *Cymodocea nodosa*). A Figura 2.16 apresenta essas quatro espécies que serão descritas em seguida.

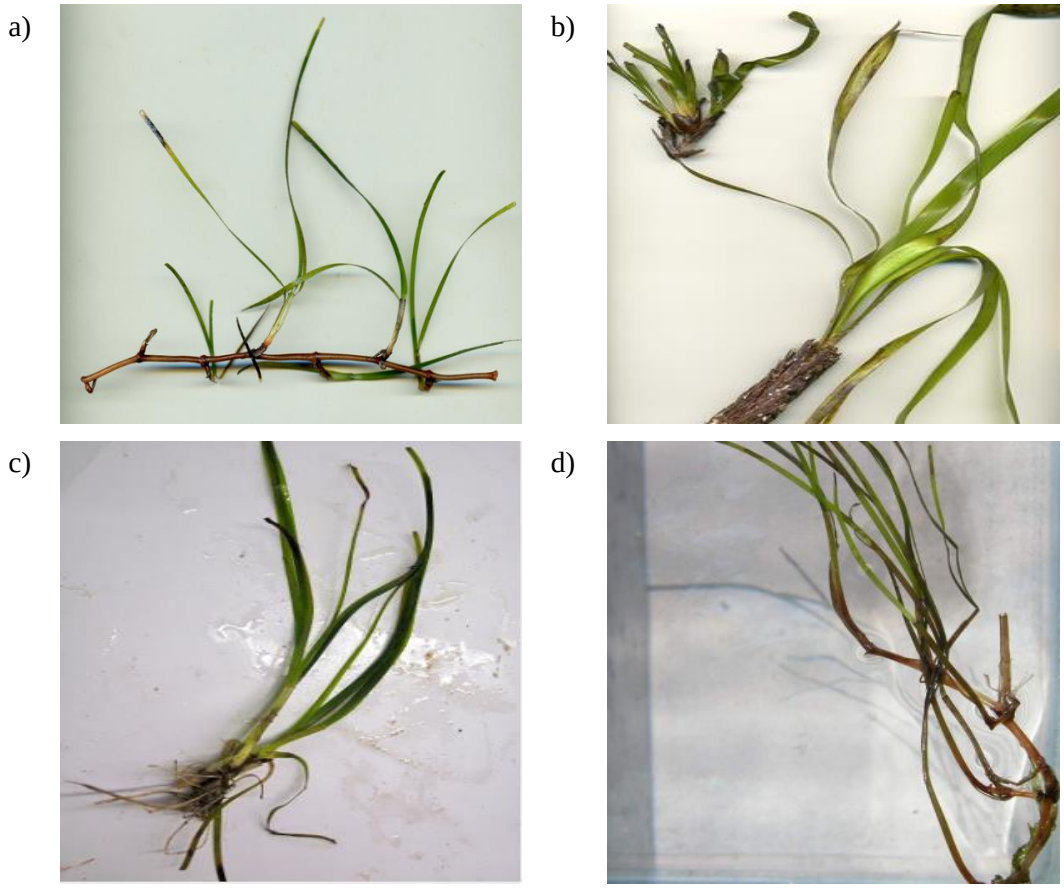


Figura 2.16 - Exemplos de espécies de erva marinha: a) *Cymodocea nodosa*; [11] b) *Posidonia oceânica*; [12] c) *Zostera marina*; [13] d) *Zostera noltii*. [14]

A *Cymodocea nodosa* é uma espécie presente em águas quentes, existindo em zonas subtidiais do Mediterrâneo, Ilhas Canárias e norte de África. Já a *Posidonia oceânica* é uma espécie presente no Mediterrâneo, formando grandes campos em profundidades que variam de 1 a 60 m. Ondiviela *et al.* (2014) refere que a espécie *Zostera marina* apresentam uma grande diversidade de condições de aplicação, podendo ser encontradas em zonas costeiras e estuários de rios, zonas entremarés ou permanentemente submersas, e em costas mais expostas ou protegidas. Normalmente esta espécie que não coabita com outras espécies, no entanto, em zonas como o norte do Atlântico ou Mediterrâneo pode coexistir com a espécie *Zostera noltii* (Larkin *et al.*, 2006). A *Zostera noltii* pode ser encontrada nas costas da Europa e norte de África banhadas pelo oceano Atlântico, desenvolvendo-se em zonas entremarés e zonas submersas com profundidades de água que variam entre 1 a 2 m (Ondiviela *et al.*, 2014). Todas estas condicionantes são apresentadas resumidamente no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Resumo das condições de aplicação de quatro espécies de vegetação aquática nativas de águas EU (adaptado de Ondiviela *et al.* (2014))

	Cymodocea nodosa	*Posidonia oceânica*	*Zostera marina*	*Zostera noltii*
Distribuição geográfica na Europa	Ilhas Canárias e Mediterrâneo	Mediterrâneo	Atlântico (excluindo Ilhas Canárias) desde o Ártico até ao sul de Espanha, Mediterrâneo e mar Negro	Atlântico, desde a Noruega até às Ilhas Canárias, Mediterrâneo e mar Negro
Habitat	Águas costeiras e lagos	Águas costeiras e lagos	Estuários, águas costeiras e lagos	Estuários, águas costeiras e lagos
Condições de maré	Infra maré	Infra maré	Infra maré	Entremarés e infra marés pouco profundas
Profundidade máxima (m)	50-60	50-60	15	10

2.2.2.2.Proteção

O facto de a vegetação marinha ser uma fonte de alimento de herbívoros como tartarugas e outros mamíferos já é demonstrativo da sua importância, no entanto, é a sua influência na proteção costeira que merece maior destaque (Orth *et al.*, 2006). Existem três processos de dissipação da energia das ondas incidente (Orth *et al.*, 2006): através da rebentação da onda; dissipação através de fricção; e reflexão para o largo. Estes processos de dissipação de energia podem se desencadeados pela vegetação marinha, no entanto, a sua influência é quase nula, ou mesmo nula, quando comparada com as estruturas mais tradicionais e rígidas que têm grande efeito na reflexão de energia e atenuação das ondas através de rebentação e fricção (Ondiviela *et al.*, 2014). Enquanto as estruturas artificiais atuam de uma forma mais direta na proteção costeira, a vegetação tem um comportamento mais indireto, através da sua capacidade para estabilizar e manter os sedimentos em zonas menos profundas. Como já foi referido (Borsje *et al.*, 2011), a vegetação marinha é também capaz de se adaptar às alterações climáticas mantendo a proteção costeira já proporcionada, desde que essas alterações sejam lentas o suficiente para permitir essa adaptação. São exemplos dessas alterações, o aumento das concentrações de CO_2 (Palacios e Zimmerman, 2007), do transporte de sedimentos e acreção que se revelam importantes na capacidade para a vegetação marinha lidar com o aumento das temperaturas da água (Ehlers *et al.*, 2008).

A vegetação marinha interage e modifica as correntes e as ondas (Ondiviela *et al.*, 2014). No caso das correntes (Figura 2.17a), a vegetação reduz a velocidade das correntes através da deflexão do sentido do escoamento sobre a copa da planta e consequente perda de momento devido à turbulência gerada no interior do campo de vegetação (Koch *et al.*, 2006). Ocorre frequentemente uma corrente acelerada sobre a copa das plantas (*skimming flow*), devida à descontinuidade na força de arrasto entre a área ocupada pela vegetação e o escoamento livre sobre a mesma (Ondiviela *et al.*, 2014). No caso das ondas (Figura 2.17b), é produzido um movimento orbital nas plantas, com a amplitude a ser dependente da rigidez da vegetação. As ondas levam a velocidades orbitais (*orbital water flow*) sobre a vegetação que são alteradas devido à descontinuidade na força de arrasto, que se propaga na direção da onda (Ondiviela *et al.*, 2014). O movimento vertical associado a condições oscilatórias, favorece a penetração das velocidades orbitais na vegetação. Tal como no caso das correntes, a turbulência gerada no interior da vegetação leva à diminuição da velocidade do escoamento, resultando numa maior deposição de sedimentos.

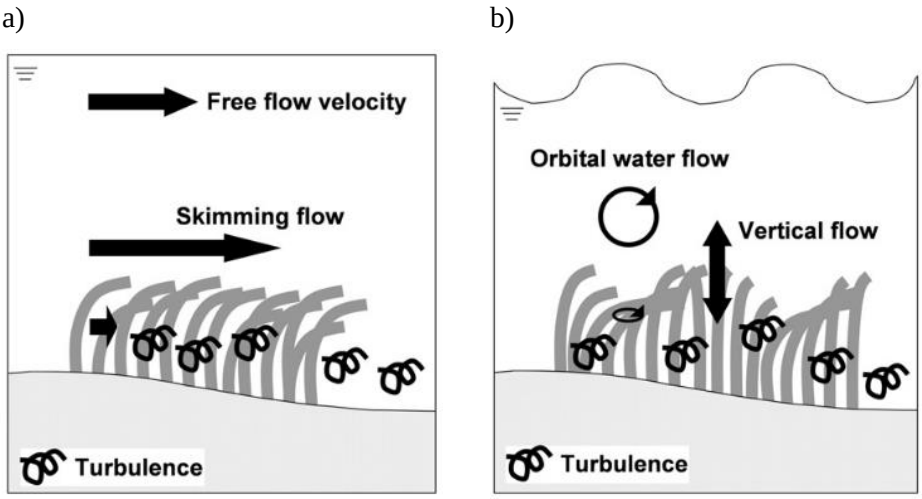


Figura 2.17 - Interação entre a vegetação marinha e a) correntes e b) ondas (adaptado de Ondiviela *et al.*, 2014).

Os principais fatores ao nível da dinâmica do escoamento com influência na capacidade de a vegetação marinha atenuar a ocorrência de erosões e inundações são o período de onda e a energia incidente sobre a mesma. No entanto, a combinação de dinâmicas de escoamento (unidirecional ou orbital) com o nível de água também poderá ter influencia na aptidão da água em penetrar a vegetação e portanto dissipar energia (Orth *et al.*, 2006). As zonas menos expostas e com agitação caracterizada por períodos de onda menores apresentam melhores condições para que a vegetação consiga oferecer a devida proteção costeira (Ondiviela *et al.*, 2014). Além das propriedades dinâmicas da água, os elementos biológicos e do ecossistema também têm influência no comportamento da vegetação como um meio de proteção costeira. A profundidade relativa, a relação entre a largura do campo de vegetação e o comprimento da onda incidente e a composição dos sedimentos são os elementos do ecossistema que têm maior influência nos aspetos mencionados. Os elementos biológicos com maior influência na redução de correntes, atenuação das ondas e estabilização dos sedimentos, são a rigidez e densidade da vegetação, o comprimento das folhas e a morfologia. O Quadro 2.3 apresenta simplificadamente a importância de cada um destes elementos mencionados.

Quadro 2.3 - Influência relativa das propriedades dinâmicas da água e elementos biológicos e do ecossistema na redução de correntes, atenuação de ondas e estabilização de sedimentos: ↑ Alta; ↑↑ Muito alta; (adaptado de Ondiviela *et al.*, 2014)

Fatores influenciadores		Redução de correntes	Atenuação das ondas	Estabilização de sedimentos
Propriedades dinâmicas da água	Período de onda		↑ ↑	↑
	Energia	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑
	Combinação de dinâmicas	↑	↑ ↑	↑ ↑
Elementos do ecossistema	Profundidade relativa	↑ ↑	↑ ↑	
	Largura relativa do campo de vegetação	↑ ↑	↑ ↑	
	Composição dos sedimentos			↑ ↑
Elementos biológicos	Rigidez	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑
	Densidade	↑ ↑	↑ ↑	↑
	Comprimento das folhas	↑ ↑	↑ ↑	
	Morfologia	↑ ↑	↑ ↑	

2.2.2.3.Algas

Apesar de as algas serem muitas vezes consideradas como plantas, estas são organismos bem menos complexos. As algas pertencem ao grupo de seres vivos chamados protistas, sendo associadas a plantas por também realizarem fotossíntese. Um dos contribuintes para a produção de sedimentos são as algas calcárias da família *Halimedaceae*, uma vez que são compostas por 70% a 90% de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), o principal constituinte de rochas calcárias (James *et al.*, 2019). Estes organismos desenvolvem-se regularmente em comunhão ou nas proximidades de campos de vegetação marinha, realizando em conjunto uma espécie de alimentação natural das praias através dos sedimentos produzidos pelas algas e da criação de condições para a sua deposição e fixação pela vegetação marinha (James *et al.*, 2019).

As intervenções de alimentação artificial com areia são cada vez mais frequentes em praias em claro recuo. Contudo, esta solução quando aplicada singularmente pode ajudar na estabilização da praia a curto prazo, mas em períodos de tempo mais alargados, as alimentações artificiais podem necessitar recargas sucessivas, o que pode ser economicamente insustentável (James *et al.*, 2019). Por outro lado, sucessivas alimentações artificiais em praias que tenham presentes vegetação marinha e algas calcárias, poderão resultar na sufocação da vegetação e algas, criando uma superfície de sedimentos instável que será mais propicia à erosão (Figura 2.18).

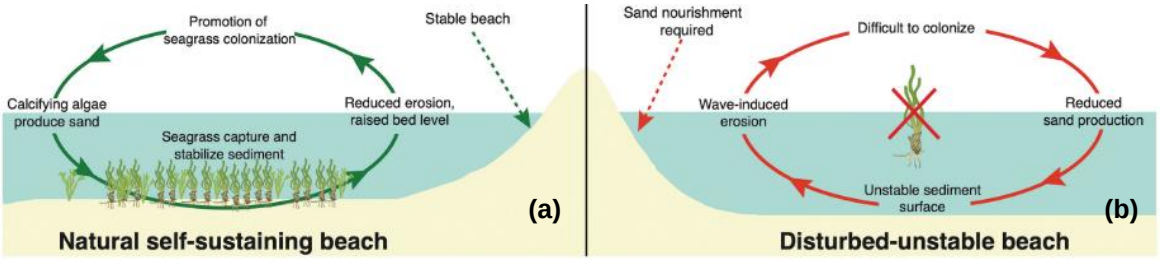


Figura 2.18 - Alternativas de gestão costeira: a) praia autossustentável com vegetação; b) praia instável sem vegetação (adaptado de James *et al.*, 2019).

A Figura 2.18 ilustra dois tipos de regimes costeiros. A alternativa da Figura 2.18b envolve uma costa sem vegetação, com pouca ou nenhuma produção de areia e com sedimentos muito móveis. Este regime resulta numa praia exposta à erosão, com necessidade de alimentação artificial de maneira a manter o seu perfil. Na Figura 2.18a, pode-se observar um regime natural e capaz de se autossustentar, com vegetação e algas calcárias que possibilitam esse regime.

2.2.2.4.Caso de estudo de Puerto Morelos, Mirador Nizuc e Cancun no México

Exemplo dos dois regimes representados na Figura 2.18 e outro de transição, podem ser encontrados ao longo da costa do México. Puerto Morelos é um exemplo de uma praia natural, apresentando uma costa com a presença de vegetação e algas. O perfil desta praia foi monitorizado no período de 2008 a 2012 (Figura 2.19a), apresentando-se estável durante esse período de observação. Pelo contrário, praias despidas de vegetação e algas apresentam um perfil tipo marcado por erosão constante (Figura 2.19c), que se mantém após alimentações artificiais, sendo disso exemplo a zona de Cancun. Em Mirador Nizuc foram também registados perfis no período entre 2007 e 2017. Durante este período, em 2015, foi registada a perda de uma extensa região de vegetação marinha. Como resultado desta perda, os perfis registados no período referido (Figura 2.19b), revelam que a praia sofreu um intensa erosão vertical, contrastando com a zona da mesma praia que não perdeu vegetação marinha e que apresentou erosão mínima, mantendo-se estável (James *et al.*, 2019).

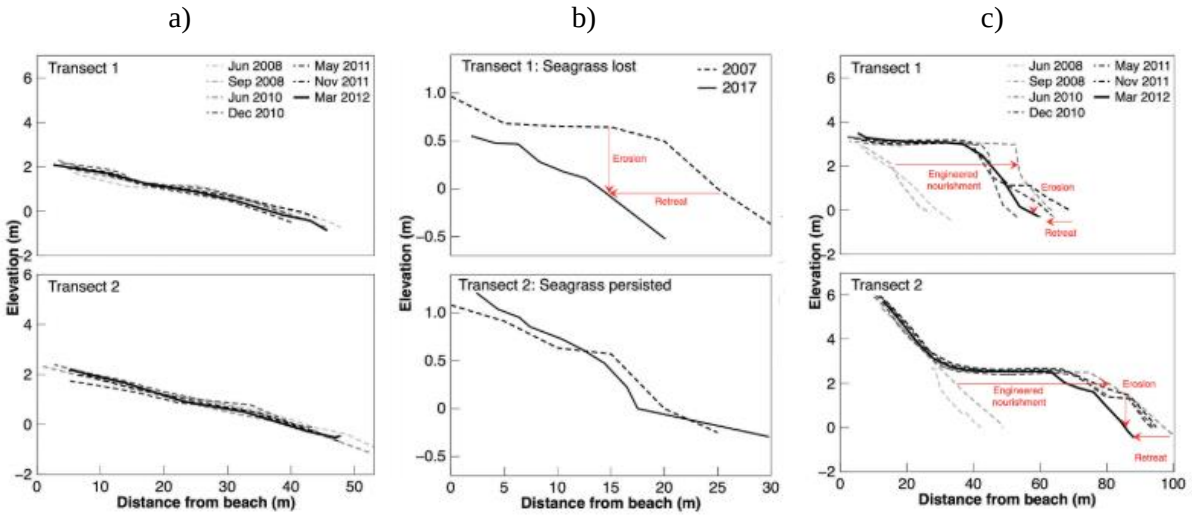


Figura 2.19 – Exemplos de regime: a) Praia natural com costa revestida por vegetação (Puerto Morelos); b) Praia parcialmente instável (Mirador Nizuc) e c) Praia instável (Cancun) (adaptado de James *et al.*, 2019).

Os exemplos apresentados são demonstrativos da importância da vegetação como agente de proteção costeira, assegurando a estabilidade das praias e permitindo a adaptação aos efeitos das alterações climáticas.

2.2.3. DUNAS

As dunas são mais um exemplo de soluções naturais que podem servir como uma barreira de proteção entre o mar e as zonas populacionais (Borsje *et al.*, 2011). Uma duna é uma elevação do solo composta por areia e tendo o vento como o principal agente formador e modelador. Podem ser classificadas como dunas móveis, fixas (quando estabilizadas por algum elemento, nomeadamente vegetação, estruturas de madeira) ou fósseis, quando formadas e consolidadas numa época geológica antiga.



Figura 2.20 - Duna na praia de Mira, Portugal. [15]

Por se tratar de uma elevação do solo, as dunas são uma solução de proteção costeira com capacidade de proteção contra inundações, que serão previsivelmente cada vez mais frequentes devido à subida do

nível médio da água do mar e ao aumento da frequência e intensidade das tempestades, sendo especialmente importantes em zonas com cotas próximas das do nível médio do mar.

Assim, torna-se evidente a necessidade de promover o desenvolvimento das dunas bem como de sistemas de proteção das mesmas, através de soluções que serão abordadas em seguida.

2.2.3.1.Restauração e proteção de dunas

Como foi referido, existem soluções que visam a restauração e desenvolvimento de dunas e outras que visam a proteção das mesmas. Nesta secção, serão abordados o uso de vegetação e estacas de madeira como medidas de restauração e desenvolvimento das dunas móveis, enquanto que como medida de proteção das dunas será abordado o uso de cilindros fabricados em material geotêxtil ou geossintético, embora qualquer uma das soluções contribua direta ou indiretamente para o desenvolvimento e proteção das dunas. Quando se opta por recorrer a plantas como medida de restauração e desenvolvimento de dunas, a seleção da espécie das plantas revela-se importante.

A vegetação dunar deve ser capaz de resistir à abrasão da areia que se deslocará devido à ação do vento, ao seu soterramento pela areia, à nevoa e água salina, ao calor, bem como a períodos de seca e de escassez de nutrientes (Olafson, 1997). São poucas as espécies de plantas capazes de resistir a todo este stress, apresentando-se em seguida uma das espécies mais presentes em dunas.

A *Ammophilia arenaria* (Figura 2.21) é um exemplo de uma espécie de planta frequentemente presente nas dunas, sendo por vezes chamada de pioneira no desenvolvimento dunar. Esta é uma espécie vigorosa que se desenvolve em tufos bastante densos e com rápida dispersão lateral, apresentando eficácia na fixação dos sedimentos. Quando usada na reconstrução e estabilização de dunas, estas plantas tendem a apresentar um crescimento bastante rápido na face frontal ao mar, no entanto, esta tende a morrer com facilidade na face a sotamar (por trás da crista da duna), devido a fungos e insetos. De forma a aumentar a diversidade e garantir o desenvolvimento do sistema dunar, quando se recorre à *Ammophilia arenaria* como vegetação para o desenvolvimento dunar deve-se, monitorizar e identificar as zonas em que a planta não sobreviveu, substituindo-a por espécies mais capazes de resistir a esses fatores (Olafson, 1997).



Figura 2.21 - *Ammophilia arenaria*. [16]

Outra solução bastante utilizada na estabilização das dunas são as paliçadas (Figura 2.22). As paliçadas são estruturas em madeira que formam um caixão, constituindo um obstáculo à passagem do vento que arrasta os sedimentos e assim os deposita no interior desta estrutura, precisamente pelo obstáculo que esta constitui à continuação do transporte eólico dos sedimentos.



Figura 2.22 - Paliçadas em São Bartolomeu do Mar, Portugal.

Uma outra solução da proteção das dunas passa pelo seu reforço através da criação de um núcleo resistente com cilindros fabricados em material geotêxtil ou geossintético. Este método consiste no enchimento de cilindros com areia (regra geral) *in situ*, formando uma barreira de proteção que uma vez construída será coberta com areia e com possível colocação de vegetação. Esta é uma solução que oferece boa proteção, mas que exige boa ligação entre os vários cilindros colocados, sendo normalmente cozidos entre si, de forma a evitar o deslocamento dos cilindros, uma vez que os mesmos podem resultar numa perda de eficácia da solução na proteção dunar ou até aumentar os danos provocados na duna (Simão e Antunes do Carmo, 2018). Sendo esta uma solução que poderá ficar exposta, existe a hipótese de vandalismo dos cilindros o que também resultará na ineficácia da solução.



Figura 2.23 – Cilindro geossintético em Ofir, Portugal.

2.2.3.2.Caso de estudo do sistema Dunar da Leirosa, Portugal

Com a implantação de um emissário submarino na praia da Leirosa, deu-se a interrupção do sistema dunar. Três anos após a intervenção, foi realizada uma reabilitação da zona através da alimentação artificial com areia, ao qual se seguiu a revegetação do local. Após um forte temporal, que afetou a zona no final do ano 2000, a zona ficou bastante debilitada, sendo necessária uma intervenção. Em 2004 foram colocados contentores fabricados com material geossintético preenchidos com areia, numa extensão de 120 m e com 8 m de altura (Figura 2.24) (Carmo, 2013).



Figura 2.24 - Reforço dunar com geossintético em Leirosa, Portugal 2005 (adaptado de Carmo, 2013).

Como referido anteriormente, os contentores em material geossintético devem ser bem ligados entre si. Neste caso, foi usado um processo em que os contentores são colados a quente, que se revelou ineficiente pois com os temporais que atingiram o cordão dunar no início de 2006, alguns contentores sofreram rasgos, resultando na perda de grande parte da areia que continham (Figura 2.25).



Figura 2.25 - Danos nos contentores em 2006 (adaptado de Carmo, 2013).

Apesar de a maioria dos contentores terem ficado bastante expostos, a configuração da barreira após o temporal manteve-se estável no inverno de 2006, pelo que não foram realizadas novas intervenções (Carmo, 2013). Em 2008 foram colocados novos contentores geotêxtis, de forma a reforçar a camada inferior da proteção construída em 2005 que tinha sido afetada em 2006. Após a colocação do contentores ao longo de toda a extensão anterior, seguiu-se a cobertura dos mesmos com areia e posterior revestimento da superfície com vegetação. A Figura 2.26 ilustra o recuo, consideravelmente reduzido, da frente do sistema dunar (Carmo, 2013).



Figura 2.26 - Área de intervenção em 2013 (adaptado de Carmo, 2013).

2.2.4.ZONAS HÚMIDAS (*WETLANDS*)

A introdução de zonas húmidas, como pântanos de água salgada e florestas de mangais, é também um exemplo de soluções de proteção natural. As florestas de mangais e pântanos são soluções de proteção costeira por conseguirem dissipar a energia das ondas, aumentar a capacidade de sedimentação e reduzir o transporte de sedimentos para o largo (Spalding *et al.*, 2014). A deposição de sedimentos nestas zonas pode impulsionar o desenvolvimento de raízes da vegetação presente na área, resultando numa maior coesão do solo e consequente diminuição dos efeitos de erosão. A dissipação de energia das ondas é resultante da passagem das mesmas pela vegetação. Spalding *et al.* (2014) refere que as alturas de onda podem ser reduzidas em 13% a 66% numa floresta de mangais e até 61% em pântanos.

2.2.4.1.Florestas de mangais

Os mangais são árvores típicas de climas tropicais, distinguindo-se pelas suas longas raízes (Figura 2.27). Estes são capazes de atenuar os efeitos das marés meteorológicas, reduzindo a sua altura em cerca de 4 a 48 cm por quilómetro de passagem pelo mangal, o que poderá ser essencial na diminuição da área de zonas de inundação. Para além da atenuação dos efeitos das marés meteorológicas, os mangais também têm um papel na dissipação da energia das ondas e na atenuação da geração local de ondas, diminuindo a velocidade do vento junto à superfície livre da água.



Figura 2.27 - Floresta de mangais. [17]

Quanto à possível ocorrência de um *tsunami*, não existe grande conhecimento acerca do papel dos mangais em atenuar as consequências desses fenómenos, embora alguns artigos o mencionem (após o *tsunami* no Oceano Indico em 2004), mas que poderão ter sobrestimado a capacidade dos mangais em proteger a costa durante a ocorrência destes eventos. Contudo, vários estudos numéricos revelaram que as florestas de mangais têm capacidade de atenuar a ação das ondas e reduzir o movimento de destroços provocados pelos *tsunamis*, devido à resistência que as raízes, troncos e folhas dos mangais oferecem ao escoamento. Existem estudos que demonstram que o dimensionamento de florestas de mangais para uma eficiente proteção costeira necessita de ter em consideração vários fatores, tais como, a densidade da floresta de mangais, diâmetro dos troncos e raízes, para além da forma e batimetria do fundo.

2.2.4.2.Pântanos

King e Lester (1995) definem os pântanos de água salgada como zonas cobertas por vegetação diversa, desde ervas, a relva e pequenos arbustos, que estão em contato periódico (conforme as marés) com águas salinas (Figura 2.28). Estas zonas são consideradas pântanos por o seu solo ser lamacento e conter grandes quantidades de matéria orgânica de plantas em decomposição.

Ao provocarem a sedimentação, os pântanos aumentam a cota do terreno, o que resultará na atenuação das ondas que chegam à costa. A vegetação do pântano desempenha um grande papel na atenuação das ondas, protegendo a costa e estabilizando a mesma (Sutton-Grier *et al.*, 2015). O mesmo artigo refere que durante as marés meteorológicas, mesmo quando as ondas são suficientemente grandes para quebrar os troncos das plantas, as raízes das mesmas são capazes de impedir a erosão do solo. Outro aspeto bastante interessante na proteção costeira utilizando pântanos é a capacidade da vegetação em recuperar de eventuais danos que possam sofrer, sendo exemplo o que analisaram Sutton-Grier *et al.* (2015) acerca da tempestade Irene, em que a vegetação do pântano danificada pela tempestade, recuperou a densidade que tinha antes da tempestade em menos de um ano.



Figura 2.28 - Pântano de água salgada, Escócia. [18]

2.2.4.3. Condições de aplicação

As condições de aplicação de zonas húmidas em proteção costeira são bastante limitativas. Tanto as florestas de mangais como os pântanos de água salgada, requerem zonas com um clima de agitação maritima pouco energético (Gedan *et al.*, 2010).

Os mangais são característicos das zonas tropicais, precisamente pela sua necessidade de receber grandes quantidades de radiação solar. São ainda característicos de zonas em que o escoamento é mais lento, pelo que é frequente encontrar mangais em zonas de menor declive. O solo dos mangais é húmido, lodoso e salgado uma vez que os mangais se desenvolvem em zonas com contato direto ou em períodos diários com a água do mar.

Por sua vez, os pântanos de água salgada desenvolvem-se em zonas menos energéticas e menos expostas às ações das ondas. Estes pântanos também se desenvolvem em locais que entram em contato periódico ou constante com a água do mar. São recorrentes em áreas em que o declive da costa é pequeno (Figura 2.28) e o escoamento de águas é lento, permitindo a decomposição de matéria orgânica e sua deposição, bem como a sedimentação.

2.2.4.4.Caso de estudo da costa sul da Tailândia

Com recurso a pesquisas de campo e imagens de satélite, Thampanya *et al.*, 2006 analisaram a erosão na costa sul da Tailândia, que tinha perdido cerca de 50% da sua floresta de mangais desde 1961, concluindo que a zona costeira sofria erosões de 0.01 a 0.32 km^2 por ano, num período compreendido entre 1967 a 1998. Apenas nas zonas em que as florestas de mangais se mantiveram intactas, foi possível observar acreção de sedimentos (Figura 2.29). Thampanya *et al.*, 2006 denotaram ainda que zonas costeiras que perderam florestas de mangais erodiram a um ritmo tão rápido como as zonas em que os mangais eram escassos ou inexistentes, provando que a estrutura da planta também era capaz de prevenir a erosão (Figura 2.29) e validando a eficácia das florestas de mangais como solução para mitigar a erosão costeira.

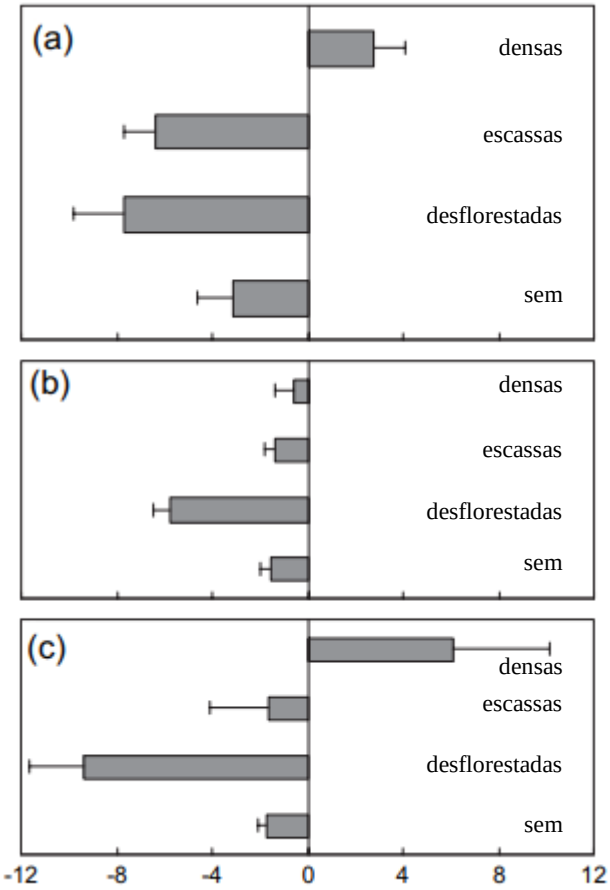


Figura 2.29 - Evolução da erosão/acreção na Tailândia para florestas de mangais densas, escassas, desflorestadas ou sem mangais em a) todas as zonas costeiras, b) na costa oeste e c) na costa este. (adaptado de Thampanya *et al.*, 2006)

2.3. TÉCNICAS PARA O ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE SOLUÇÕES

Com o intuito de obter as melhores características da solução proteção costeira a implementar numa determinada zona, é recorrente a utilização de modelos numéricos e físicos. A modelação numérica é uma ferramenta bastante importante pela diversidade de modelos, com qualidade comprovada, destinados a estudar diversos agentes que serão determinantes no dimensionamento das estruturas a implementar. A título de exemplo, no caso de estudo mencionado anteriormente, para o dimensionamento do recife artificial construído na Austrália (*Narrowneck reef*), foram utilizados quatro modelos numéricos: WBEND para o estudo da refração, um modelo para estudar múltiplos propósitos, o 3DD, o modelo POL3DD para o estudo do transporte de sedimentos e outro modelo para a circulação da praia e transporte de sedimentos 2DBeach. Para além destes modelos, existem outros também bastante utilizados como o XBeach, Delft3D e Mike21 entre uma grande gama de modelos com bons resultados. Outra alternativa para o estudo e dimensionamento de soluções para proteção costeira são os modelos físicos. Uma vez que para o dimensionamento, e como já referido, interessa bastante analisar a interação da agitação marítima com as estruturas que se pretendem implementar, e conhecendo a complexidade destes fenómenos hidráulicos, a modelação física revela-se extremamente importante na realização de trabalhos marítimos, por se tratar de uma representação mais aproximada destes

fenómenos hidráulicos. Esta é a principal vantagem que os modelos físicos apresentam em relação aos modelos numéricos, na medida em que representam o mundo físico real, e facilitam a compreensão dos processos envolvidos no dimensionamento e estudo das soluções. A Figura 2.30 ilustra o aspeto após a construção do modelo físico (em cima na figura) e do modelo numérico (em baixo na figura).

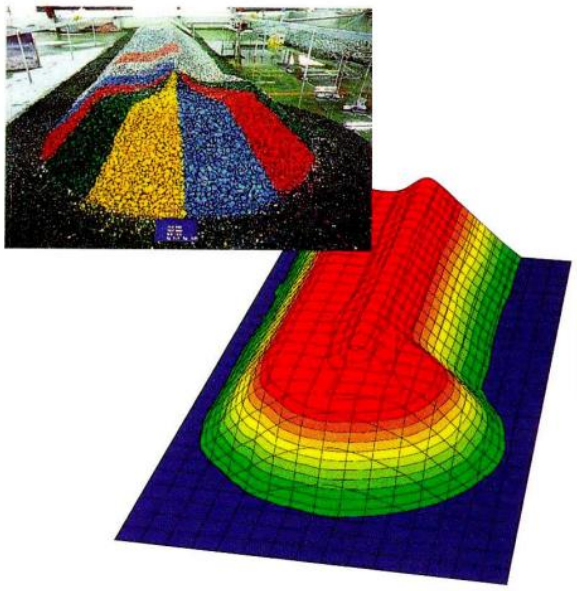


Figura 2.30 - Construção de modelos físicos e numéricos (adaptado de Taveira Pinto, 2019).

Para o estudo deste tipo de obras marítimas, é também frequente o recurso a vídeos ou a fotografias do local em estudo. É exemplo, uma vez mais, o caso de estudo do recife artificial construído em Gold Coast na Austrália (*Narrowneck reef*), em que foi utilizado o sistema de vídeo ARGUS, durante e após a construção, permitindo avaliar as alterações provocadas pela introdução do recife artificial. Noutro caso de estudo também abordado anteriormente, o recife artificial construído com *Reef Balls* na costa sul da República Dominicana, realizou-se a comparação da linha de costa antes da implementação do recife artificial e após a implementação, com recurso a fotografias que evidenciaram a alteração significativa (ganho em relação ao mar) da linha de costa.

Quando se pretende construir qualquer obra marítima, neste caso soluções baseadas na natureza, a estratégia ideal para o seu estudo e dimensionamento passa pela utilização conjunta e coordenada de todos os métodos referidos, designadamente a modelação física, a modelação numérica e a monitorização através de imagens antes, durante e após a construção. De facto, embora individualmente sejam ferramentas poderosas, podem apresentar algumas lacunas que poderão ser ultrapassadas com a introdução das outras técnicas complementares.

3
CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

3.1. INTRODUÇÃO

A costa Portuguesa, com maior incidência na costa Oeste, tem sido afetada por tempestades cada vez mais frequentes e intensas. Estas tempestades são caracterizadas pelos seus ventos intensos e por baixas pressões. Estes dois fenómenos, além de criarem um clima de agitação marítimo bastante energético, são também responsáveis pela sobrelevação do nível do mar, ou maré meteorológica. A combinação destes dois fenómenos, ondas muito energéticas e sobrelevação do nível do mar, podem ter consequências danosas pois, embora a incidência e as características da rebentação destas ondas seja dependente da batimetria do local, a existência de uma sobrelevação do nível do mar irá ter efeito na altura de onda que atinge a costa, o que por sua vez, e tendo em consideração que se tratam de ondas bastante energéticas, acarreta um grande espraiamento, aumentando o risco de inundações. A subida do nível médio da água do mar, associado a este aumento da frequência das tempestades que atingem Portugal, são evidência dos efeitos das alterações climáticas.

A zona do Passeio Alegre junto à Foz do Rio Douro, no Porto, tem sido nos últimos anos vítima destes fenómenos associados às alterações climáticas, tendo já ocorrido danos materiais e pessoais, pelo que esta é uma zona muitas vezes encerrada por segurança. Por esta razão, pela proximidade ao local e porque se pretende realizar um estudo em modelo reduzido para a Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL) nas instalações do Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP, onde serão estudadas soluções de proteção costeira para esta praia, este será o caso a estudar na presente dissertação. A Figura 3.1 apresenta uma vista aérea do trecho a estudar no presente capítulo.

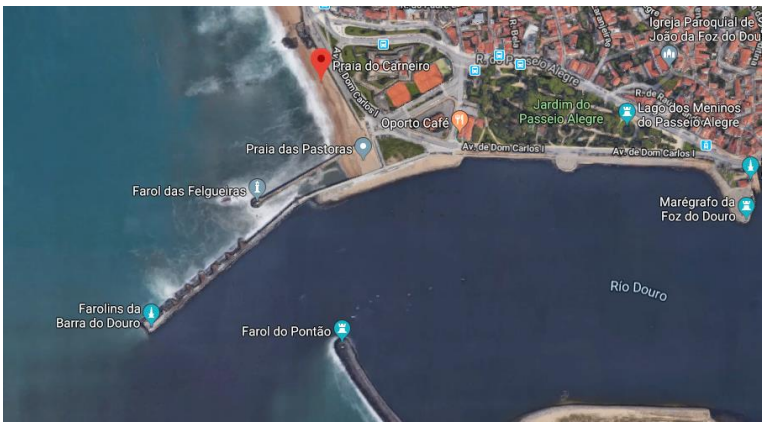


Figura 3.1 - Vista aérea da localização do trecho a estudar, a praia do Carneiro (*Google Maps*, Junho 2019).

3.2. SOLUÇÕES PARA PROTEÇÃO COSTEIRA

A solução de proteção costeira a estudar para a praia do Carneiro, é constituída por cinco quebramares destacados: três quebramares de taludes em enrocamento e dois quebramares verticais em betão (Figura 3.2). Nesta secção dá-se especial destaque às estruturas em taludes (QB1, QB2 e QB3). O quebramar 1 (QB1) é o mais extenso, tendo cerca de 78 m de comprimento no coroamento. O coroamento desse quebramar, dista do molhe Felgueiras cerca de 22 m. Quanto ao quebramar 2 (QB2), este tem perto de 68 m de comprimento medido pelo coroamento, distando do QB1 (medido pelo coroamento dos dois quebramares) cerca de 56 m. O quebramar 3 (QB3) é o menor dos quebramares a estudar, tendo perto de 45 m de comprimento no coroamento e distando do QB3 cerca de 40 m (medidas pelo coroamento dos quebramares). A Figura 3.2 ilustra a posição dos quebramares em relação à praia do Carneiro.

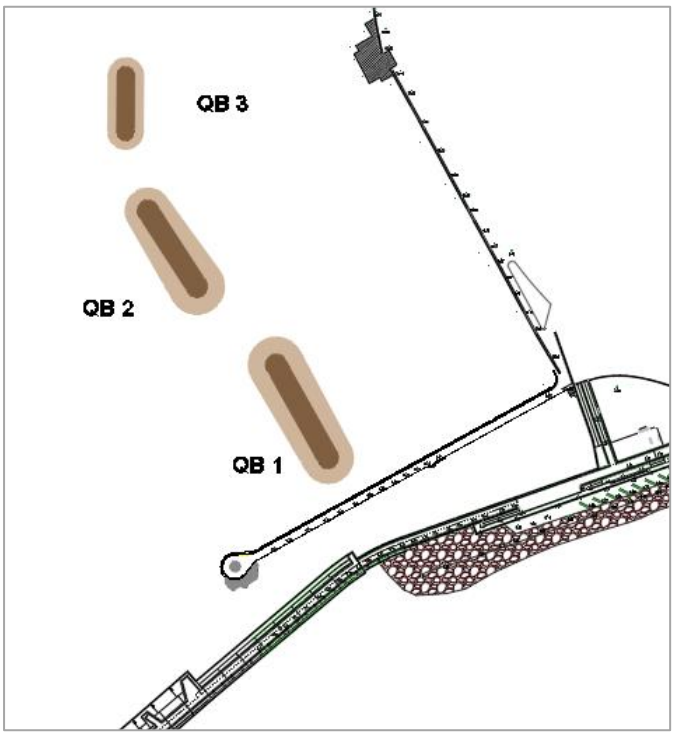


Figura 3.2 - Posição dos três quebramares de taludes em enrocamento a estudar.

O pré-dimensionamento de um quebramar é normalmente iniciado pela definição da altura de onda de projeto, H_{proj}. A correta definição deste parâmetro tem uma grande influência no comportamento do quebramar ao longo da sua vida útil. Por sua vez, a incorreta definição deste parâmetro, pode resultar em graves problemas, como o movimento e posteriormente projeção de blocos contra a estrutura e, por consequência, a possível ruína da estrutura. Com o intuito de determinar o valor de H_{proj}, utilizou-se o critério de rebentação da onda, que permite obter a máxima altura de onda que atinge a estrutura sem rebentar, que é dada pela seguinte expressão,

$$\frac{H_{máx}}{d} = 0.78 \tag{3.1}$$

em que $H_{máx}$ representa a altura de onda incidente máxima e d a profundidade de água em frente à estrutura. No entanto, alguns autores consideram que esta altura de onda é demasiado conservadora, optando por utilizar a altura de onda significativa (H_S) como a altura de onda de projeto (Taveira Pinto, 2018). A altura de onda significativa pode ser obtida pela seguinte expressão,

$$H_S = \frac{H_{máx}}{1.76} \tag{3.2}$$

Para a determinação de $H_{máx}$ é então necessário obter o nível de água máximo em frente à estrutura e a cota dos fundos no mesmo local. O nível de água a considerar será o nível da Preia-Mar de Águas Vivas (PMAV) que para o local (Porto), é de +4.00 m (ZH), acrescentando a este nível 0.75 m, a possivel sobrelevação do nível das águas, associada aos efeitos das alterações climáticas, totalizando + 4.75 m (ZH), sendo este nível designado por PMAV + *Storm Surge* (SS) . A cota dos fundos pode ser obtida através dos registos da batimetria do local. Apesar de a cota dos fundos do QB3 ser superior às do QB1 e QB2, o que resultaria numa altura de onda máxima menor, considerou-se como altura de onda de projeto aquela obtida para o QB1, por este se encontrar a uma cota menor e por isso, resultará numa maior altura de onda de projeto, privilegiando a segurança. Após a análise da batimetria, no local onde será implementado o QB1, tem a cota dos fundos a varia entre. Recorrendo à expressão 3.1, para um d de 6.75 m, o resultado é uma $H_{máx}$ de 5.27 m, que aplicando à expressão 3.2, resulta numa H_S de 3m. Como H_S é muito baixa, optou-se por considerar para a H_{proj}, a $H_{máx}$ de 5.27 m.

Após a determinação da altura da onda de projeto segue-se o cálculo do peso dos blocos do manto resistente. A fórmula de Hudson (1974) é recorrentemente usada no dimensionamento de quebramares de taludes, permitindo a determinação do peso dos blocos do manto resistente. A fórmula de Hudson é dada pela seguinte expressão:

$$W = \frac{H^3 \times \gamma}{K_D \times (\frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w})^3 \times \cot\theta} \tag{3.3}$$

em que H (m) representa a altura de onda de projeto, γ (kN/m^3) o peso volúmico do material dos blocos a colocar, K_D (-) o coeficiente de estabilidade, γ_w (kN/m^3) o peso volúmico da água do mar e θ (º) o ângulo do talude do manto resistente com a horizontal.

Uma vez que a altura da onda de projeto já foi definida, é necessário definir os restantes parâmetros. Sendo este um quebramar construído em enrocamento, e estando a obra localizada no Porto, é natural que os blocos utilizados sejam de granito. Tendo em consideração a gama de valores típica do peso volúmico do granito, adotou-se o peso volúmico de 26.5 kN/m^3. Quanto ao peso volúmico da água do mar, adotou-se o valor de 10.25 kN/m^3. Os taludes serão realizados em 3:2 (H:V). Na determinação do valor de K_D são muitas vezes utilizados os valores presentes no *Shore Protection Manual* (SPM) de 1984. No entanto, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), também recomenda valores de K_D a utilizar, que até são menos conservativos e apresentam ainda assim bons resultados. O Quadro 3.1 apresenta os valores a utilizar de K_D para blocos de enrocamento, segundo o SPM. O Quadro 3.2 apresenta os valores a utilizar no K_D para blocos de enrocamento, segundo o LNEC.

Quadro 3.1 - Valores de K_D para blocos de enrocamento (adaptado de SPM,1984).

Tipo de blocos	Nº de Camadas	Perfil		Cabeça	
		Dentro da zona de rebentação	Fora da zona de rebentação	Dentro da zona de rebentação	Fora da zona de rebentação
Natural, rugoso e irregular	1	-	2.9	-	2.2
	2	2.0	4.0	1.6	2.8
	3	2.2	4.5	2.1	4.2

Quadro 3.2 - Valores de K_D para blocos em enrocamento (adaptado de LNEC).

Talude	Quedas (%)	Probabilidade de não excedência		
		0.01	0.05	0.1
3:2	0	0.07	0.2	0.4
	0.5	0.08	0.3	0.5
	1	4.1	5.7	6.9
	2	5.7	7.7	9.1
	2.5	6.4	8.6	10.0
	5	9.0	11.6	13.2

Uma vez que a utilização dos valores do K_D indicados no SPM (1984) resultarem em pesos excessivos dos blocos, optou-se por considerar os valores de K_D indicados pelo LNEC, para uma probabilidade de não excedência de 0.01 e uma percentagem de quedas de 2.5 %, obteve-se o valor de 6.4 para o K_D.

Quanto às restantes características da secção dos quebramares, elas foram determinadas tendo em consideração as recomendações do *Coastal Engineering Manual* (CEM) de 2003. A Figura 3.3 apresenta a secção transversal tipo para quebramares galgáveis, dentro da zona de rebentação, indicando as características do peso dos blocos das subcamadas e as características da risberma (peso dos blocos e dimensões da mesma).

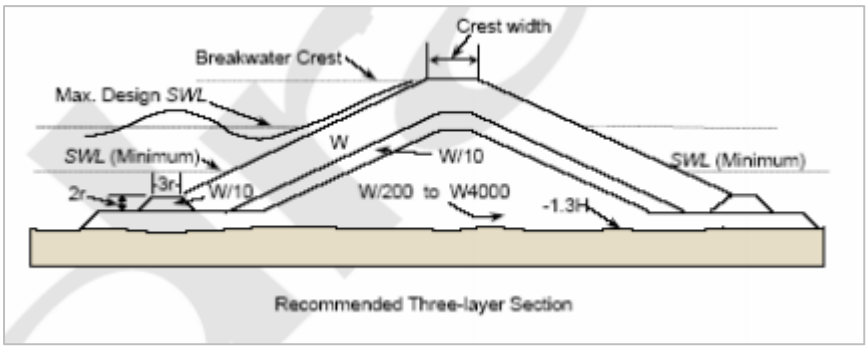


Figura 3.3 - Secção transversal tipo de quebramares de taludes galgáveis com três camadas, dentro da zona de rebentação (adaptado de CEM, 2003).

Apesar de ser recomendado utilizar para núcleo enrocamento com peso entre 1/200 e 1/4000 do peso dos blocos do manto resistente, no núcleo é proposta utilização de T.O.T. A subcamada será realizada com um peso dos blocos de W/10, em que W representa o peso dos blocos do manto resistente (MR).

Para determinar a espessura de cada uma das camadas dos quebramares, é necessário obter a dimensão característica de blocos de enrocamento. A dimensão característica dos blocos pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$e_{\Delta} = K_{\Delta} \cdot \left(\frac{W}{\gamma_{enr}}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{3.3}$$

em que e_{Δ} representa a dimensão característica dos blocos, W o peso dos blocos da camada a dimensionar, γ_{enr} o peso volúmico dos blocos e K_{Δ} um coeficiente de forma, que traduz o processo de colocação dos blocos e as suas características físicas. Tendo em consideração que os blocos são rochosos e irregulares, para uma colocação especial, admitiu-se o valor 1.10 para o K_{Δ}, tendo por base o que é proposto por Cur/Ciria (1991). Este valor foi usado apenas para o manto resistente, por a sua colocação ser especial, o que não se verifica para as camadas inferiores, pelo que, para estas camadas, adotou-se o valor de 1 para o K_{Δ}.

Uma vez que o quadro do LNEC não faz qualquer distinção entre a zona do perfil corrente do quebramar e a zona da cabeça e sabendo que a zona da cabeça do quebramar é aquela onde os danos são mais frequentes, optou-se por majorar o peso dos blocos para a secção da cabeça, em 1.5, dividindo o valor de K_D pelo valor referido.

O Quadro 3.3 e Quadro 3.4 apresentam, respetivamente, as condições para o dimensionamento da secção do perfil corrente e da secção da cabeça dos quebramares de taludes. O Quadro 3.5 apresenta o peso dos blocos obtidos para cada camada, na secção do perfil corrente e na cabeça dos quebramares.

Quadro 3.3 - Condições para o dimensionamento da secção do perfil corrente dos quebramares.

H_{proj} [m]	γ [kN/m^3]	γ_w [kN/m^3]	K_D [-]	cotg (θ) [-]
5.27	26.50	10.25	7.70	1.50

Quadro 3.4 - Condições para o dimensionamento da secção da cabeça dos quebramares.

H_{proj} [m]	γ [kN/m^3]	γ_w [kN/m^3]	K_D [-]	cotg (θ) [-]
5.27	26.50	10.25	5.13	1.50

Quadro 3.5 - Peso dos blocos em cada uma das camadas, para a seção do perfil corrente e para a secção da cabeça dos quebramares.

Secção	W_{MR} [kN]	Gradagem 125 a 75% [kN]	W_1 [kN]	Gradagem 130 a 70% [kN]
Perfil Corrente	84	63 a 105	8	6 a 11
Cabeça	126	95 a 158	13	10 a 17

Resta apenas determinar a espessura de cada uma das camadas. O Quadro 3.6 e Quadro 3.7 apresentam, respetivamente, a espessura das várias camadas dos quebramares para as secções do perfil corrente e para a secção da cabeça dos quebramares.

Quadro 3.6 - Determinação da espessura das camadas dos quebramares para a secção do perfil corrente.

Camada	Nº de camadas	e_{Δ} [m]	Espessura [m]
MR	2	1.62	3.23
1ª subcamada	2	0.68	1.36

Quadro 3.7 - Determinação da espessura das camadas dos quebramares para a secção da cabeça.

Camada	Nº de camadas	e_{Δ} [m]	Espessura [m]
MR	2	1.85	3.70
1ª subcamada	2	0.78	1.56

Para concluir o pré-dimensionamento, resta definir a risberma. Segundo o CEM (2003), a risberma deve ser realizada com blocos de peso igual ao da subcamada, ou seja, de 6 a 11 kN para a secção do perfil corrente e de 10 a 17 kN para a secção da cabeça do quebramar. Quanto às dimensões, a altura da risberma deve ser igual a 2 vezes a dimensão característica dos blocos da subcamada e largura do coroamento da mesma, igual a 3 vezes a dimensão característica da subcamada. Assim para a secção do perfil corrente, a risberma terá cerca de 1.36 m de altura e cerca de 2.04 m de largura do coroamento, enquanto que para a secção da cabeça, a risberma terá cerca de 1.56 m de altura e cerca de 2.34 m de largura do coroamento.

Assim, fica concluído o pré-dimensionamento dos quebramares a implementar na solução de proteção costeira. De referir que, por a análise experimental presente nesta dissertação se basear nos testes realizados para a APDL, os quebramares estudados nos seguintes capítulos, projetados pela Consulmar em 2018, apresentam algumas diferenças, mais concretamente no peso e dimensão dos blocos de enrocamento, em relação aqueles que foram dimensionados no presente capítulo.

4
INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1. TANQUE DE ONDAS

Os ensaios em modelo físico da intervenção de proteção costeira foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA na FEUP, o qual apresenta 28 m de comprimento, 12 m de largura e 1.2 m de altura. No centro do tanque existe um fosso com 4.5 m de comprimento, 2 m de largura e 1.5 m de profundidade.

Numa das extremidades do tanque encontra-se o sistema de geração de ondas (descrito posteriormente) enquanto na outra extremidade existe uma praia dissipadora realizada num talude com cerca de 8 m de largura e composta por enrocamento de granulometria diversa que conferem à mesma, rugosidade e porosidade. Esta praia tem como objetivo a dissipação de energia das ondas geradas e o controlo da reflexão provocada pelas fronteira físicas do tanque. A inexistência desta praia resultaria em grandes reflexões, que provavelmente não existem no protótipo, resultando na diminuição da qualidade e fiabilidade dos resultados do modelo. A Figura 4.1 mostra o tanque de ondas e as características referidas.



Figura 4.1 - Tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da FEUP.

4.2. SISTEMA DE GERAÇÃO DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

O sistema de geração de agitação marítima presente no Laboratório de Hidráulica da FEUP foi desenvolvido pela *HR Wallingford (UK)* e que permite a simulação, à escala, das condições de agitação marítimas pretendidas. Este sistema permite gerar ondas irregulares de crista longa a 2D e de crista curta a 3D, estados de mar bidirecionais e ondas regulares. Na simulação de estados de mar irregulares o sistema permite definir o espetro pretendido, sendo possível que as ondas sejam geradas conforme o espetro de JONSWAP ou de *Pierson-Moskowitz.*

Este sistema consiste em 2 módulos, com 8 pás independentes com 0.75 m de largura, totalizando 16 pás, que são movidas por ação de motores elétricos (Figura 4.2), podendo operar com profundidades de água até 1 m. Cada uma das pás pode funcionar independentemente ou em conjunto com todas as outras, permitindo assim a geração de ondas provenientes de várias direções. Os motores são controlados através aparelhos digitais que se encontram em cabines colocadas por cima do conjunto de batedores (Figura 4.2). O sistema de geração está ainda dotado de um módulo de absorção ativa de reflexões, integrado nas pás do sistema de geração, como é visível na Figura 4.2. [19]



Figura 4.2 - Sistema de geração de ondas com 16 pás independentes do laboratório da SHRHA na FEUP.

A sala de controlo dos sistemas de aquisição e geração de agitação marítima está localizada atrás dos batedores. A Figura 4.3 mostra o interior da sala de controlo do laboratório da SHRHA na FEUP: o equipamento mais à esquerda controla o sistema de aquisição de agitação marítima e o equipamento mais à direita controla o sistema de geração de agitação marítima.

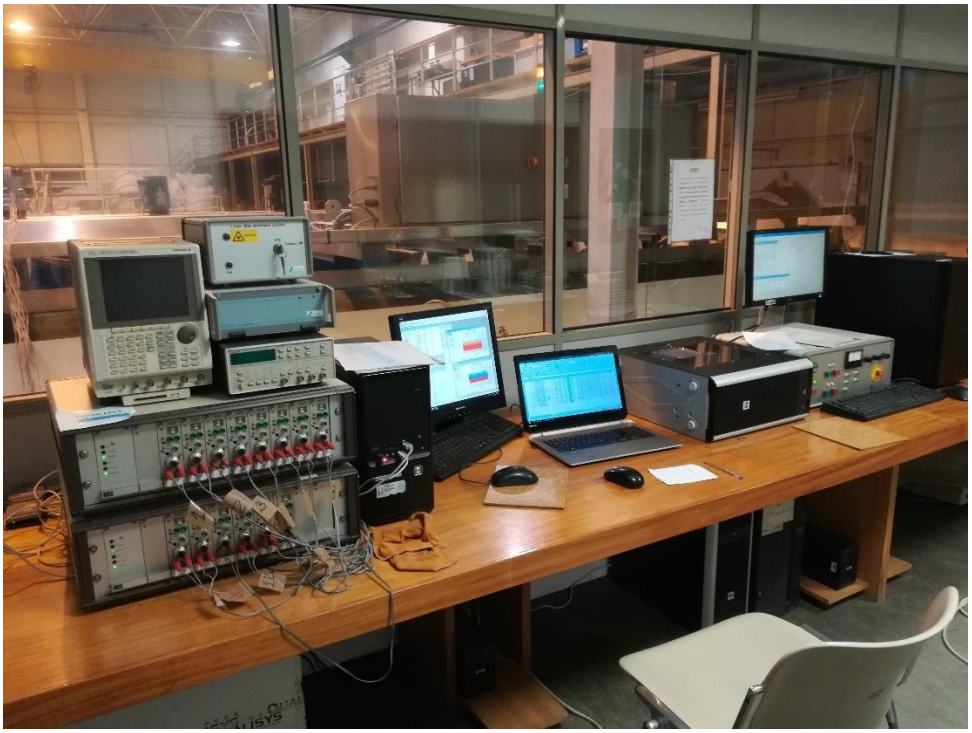


Figura 4.3 - Vista interior da sala de controlo do tanque de ondas do laboratório de hidráulica da FEUP.

4.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

O sistema de aquisição de agitação marítima permite averiguar se o sistema de geração de agitação marítima está a produzir ondas com a altura pretendida e, talvez o mais interessante, determinar a elevação da superfície livre da água em qualquer ponto do tanque de ondas. Este sistema é composto por duas *boards*, por sondas hidrodinâmicas e por um software de aquisição de dados, o HR DAQ.

As sondas de níveis hidrodinâmicos são constituídas por um par de condutores (duas hastes de aço) instalados em tripés colocados nos locais pretendidos. A medição da altura da superfície livre da água, é feita através da circulação de uma corrente elétrica entre os condutores, que resulta numa diferença de potencial (voltagens). Assim, as sondas adquirem séries temporais de voltagens que, tendo por base a calibração, são convertidas em registos da elevação da superfície livre da água, possibilitando a determinação das condições de agitação em qualquer local no tanque.

Como mencionado, para que os resultados dos ensaios sejam o mais fidedignos possível, é necessário que as sondas sejam corretamente calibradas. De forma a garantir o referido (resultados o mais corretos possível), as sondas foram calibradas diariamente e sempre que houve alterações no nível de água a testar.

O sistema de aquisição de agitação marítima permite ainda verificar se o sistema de geração de agitação se encontra a reproduzir ondas com a altura desejada, através de uma ferramenta (*Reflection Analysis*) do software HR DAQ, permitindo, no caso de a altura de onda não ser a pretendida, determinar o fator de ganho (F_G) a introduzir no sistema de geração de agitação marítima e assim ajustar o sistema para gerar ondas com a altura desejada.

4.4. CONSTRUÇÃO DO MODELO FÍSICO REDUZIDO

O estudo em modelo físico foi dividido em quatro fases de testes[1], pelo que se pode considerar que existem também quatro fases de construção do modelo físico reduzido à escala 1/60. De forma a conseguir orientar e situar o modelo no local pretendido, foram desenhadas, no fundo do tanque, doze linhas guia para a construção do modelo. Estas linhas guia serviram dois propósitos:

- Referência para colocação das sondas e molhes e construção dos quebramares;
- Definir o local onde seriam colocadas réguas construídas em *MDF* 3 mm (*Medium Density Fiberboard* de 3 mm de espessura), um derivado da madeira, que definiriam a batimetria do modelo reduzido.

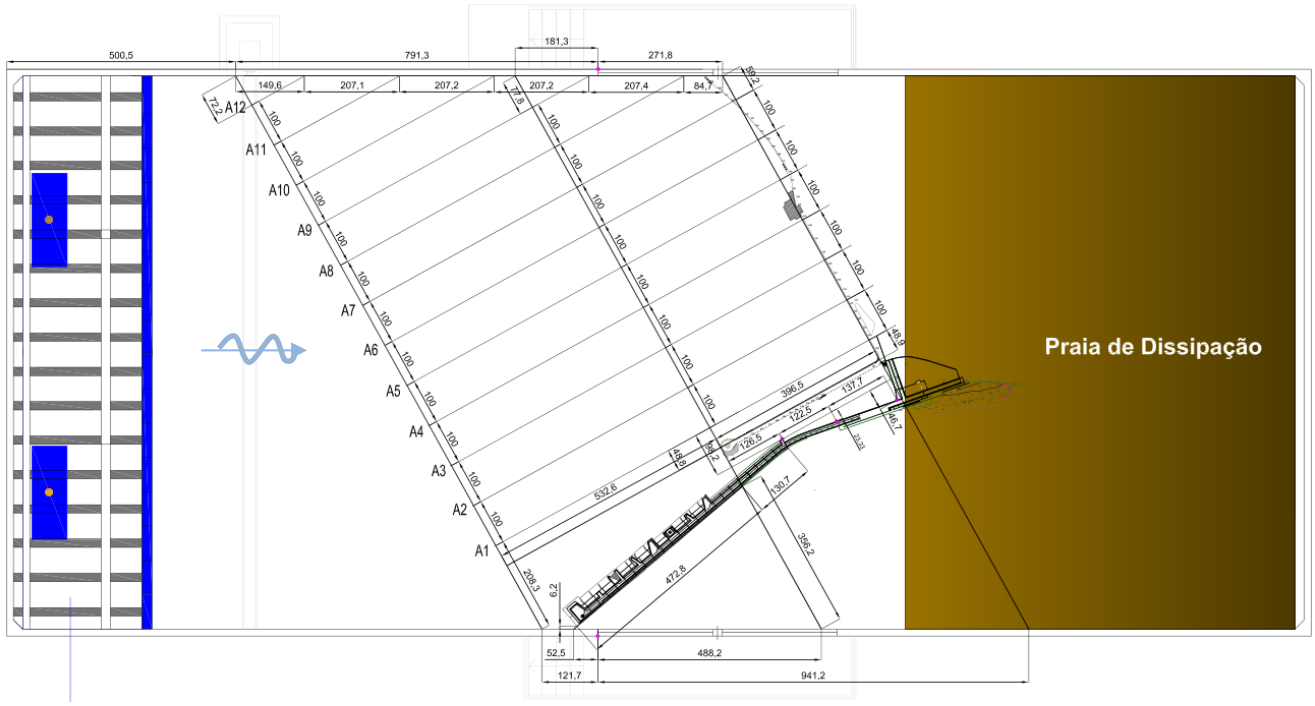


Figura 4.4 - Linhas guia a marcar no fundo do tanque.

Assim que se desenharam as referidas linhas guia no fundo do tanque, foram marcadas as posições das sondas hidrodinâmicas a colocar, dos quebramares destacados a construir, a posição dos dois molhes existentes no local (molhe Norte da foz do rio Douro e de Felgueiras) e dos afloramentos rochosos existentes no local em estudo.

Uma vez que ambos os molhes, Norte e de Felgueiras, seriam construídos em betão, este foi o primeiro aspeto a ser desenvolvido devido ao tempo necessário para a cura do betão, sendo necessário construir moldes que permitissem a obter as várias seções dos molhes. Esses moldes foram construídos em contraplacado marítimo e posteriormente preenchidos com betão. A Figura 4.5 ilustra um resumo das fases da construção do modelo dos molhes Norte e de Felgueiras.

[1] As quatro fases de testes serão descritas no capítulo 5.

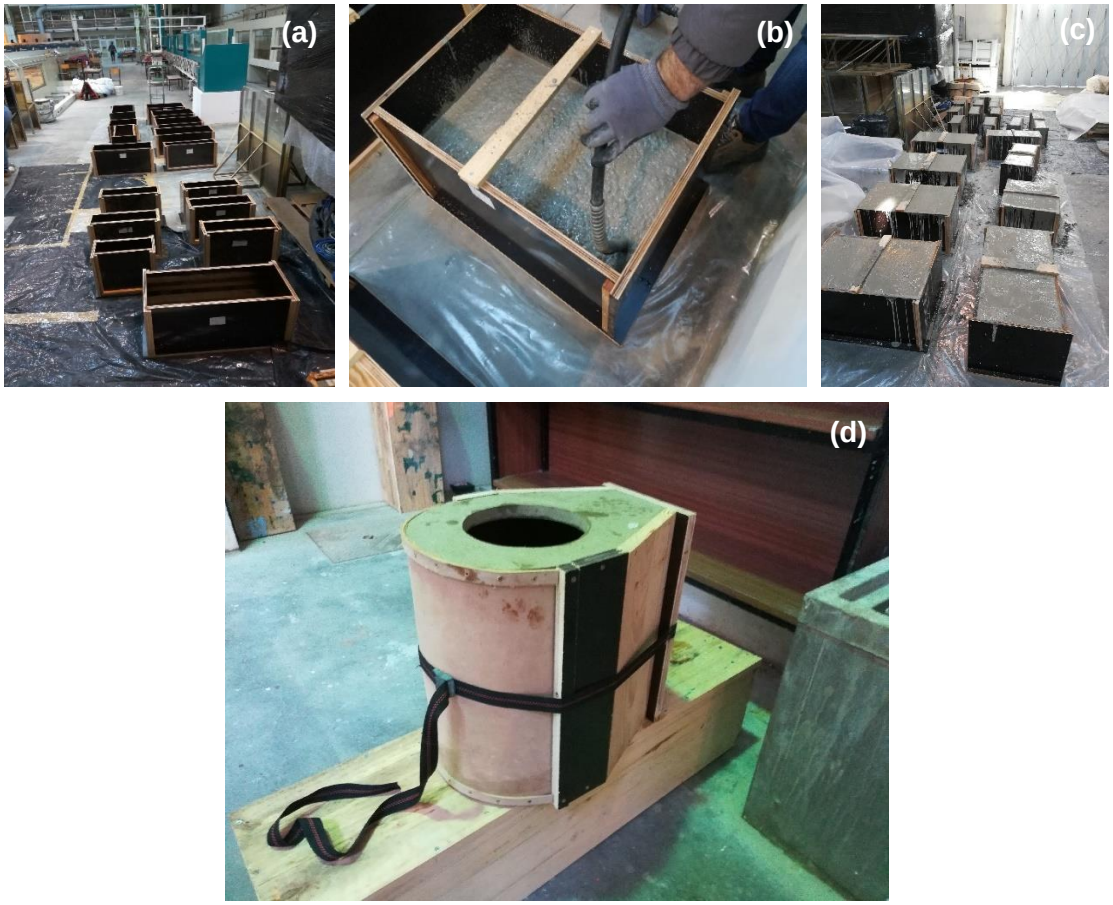


Figura 4.5 – Fases da construção das secções dos molhes: a) moldes das várias secções; b) enchimento e compactação do betão; c) moldes cheios com betão e d) molde da secção da cabeça do molhe de Felgueiras.

Em seguida foi utilizado enrocamento para reproduzir a volumetria (altura e área pretendida) dos afloramentos rochosos localizados na praia, com o intuito de traduzir da melhor forma possível a influência que estes afloramentos têm na hidrodinâmica e morfodinâmica local. Após a definição dos afloramentos, procedeu-se à colocação dos tripés que serviriam de suporte para as hastes das sondas de níveis hidrodinâmicos onde seriam ligados os caboa, tendo-se colocado ainda mais dois tripés, maiores do que os anteriores, para servir de apoio para os cabos das sondas.

Posteriormente, e após descofragem, os blocos correspondentes a cada secção foram colocados no devido local (já marcado anteriormente), de forma a materializar os dois quebramares. Apesar de ser apenas um pormenor visual, optou-se por pintar o molhe de Felgueiras com um tom de amarelo de forma a ter um aspeto mais parecido com a realidade (molhe felgueiras tem um aspeto mais envelhecido).

Concluída a implantação dos molhes, foram colocadas as réguas de *MDF* sobre as guias, já marcadas no fundo do tanque, que serviriam como referência para a correta definição do batimetria da praia, isto é, assegurar que a batimetria da praia do modelo era o mais aproximada possível da batimetria do protótipo.

Uma vez que entre a praia do Carneiro e a marginal, existe um muro com alguma altura, e sendo esta uma dissertação que visa estudar não só as soluções de proteção contra erosões, mas também avaliar a sua eficácia na redução do risco de inundações, foi importante representar também este pormenor de forma a estudar a possibilidade de ocorrerem galgamentos. No modelo reduzido, o muro foi representado

por pranchas de madeira que foram cortadas de forma a traduzir a altura do muro em relação à praia à escala do modelo reduzido. O muro serviu também de contenção da areia colocada na praia.

A reprodução dos afloramentos rochosos teve por base uma imagem aérea obtida aquando da ocorrência de uma muito baixa baixa-mar, em que é possível ver a existência de uma vasta área com grande quantidade de rochas, o que faz com que a mesma seja um ponto fixo, sendo, por isso, um pormenor importantíssimo a representar no modelo físico. Assim, no modelo, foi delimitada esta área que foi, posteriormente, preenchida com enrocamento até uma altura máxima idêntica à altura das réguas já colocadas e que traduzem a batimetria da praia. Tendo presente a função das réguas (definir a batimetria dos fundos no modelo), colocar pedras num nível superior ao das réguas representaria uma proteção que não existe no protótipo, pelo que este pormenor foi tido em consideração aquando da colocação das pedras.

Com a conclusão das tarefas mencionadas anteriormente, estavam definidas as fronteiras fixas do modelo físico, pelo que seria possível proceder à colocação de areia. De todas as tarefas, esta foi talvez a mais trabalhosa e cansativa, pois este é um modelo à escala 1/60, que representa uma grande área (desde o molhe Norte até ao fim da praia do Carneiro), tendo sido necessários utilizar aproximadamente 17 m^3 de areia (19 *Big Bags*, sendo que cada um dos *Big Bags* tem sensivelmente 1 tonelada de areia). Com a colocação da areia concluída, é necessário igualar o perfil da praia com aquele que as réguas, previamente colocadas, traduzem. Esta tarefa foi conseguida com uma régua de metal, que unindo duas régua consecutivas, se ia conduzindo até ao fim da praia e assim removendo o excesso de areia entre as mesmas réguas, deixando o perfil da praia nivelado com o das réguas. Este processo foi repetido para todas as réguas, que foram retiradas após a definição do perfil da praia. Para definir a batimetria da praia das Pastoras, foi marcado o perfil da praia em ambos os molhes que limitam a praia, o molhe Norte e o molhe de Felgueiras. Após a colocação de areia no referido local, o processo para acertar o perfil da praia foi o mesmo utilizado entre as réguas: com uma régua de metal foi-se retirando o excesso de areia até que o perfil da praia coincidisse com o perfil marcado nos molhes.

Após a reprodução da praia, foi realizada a primeira fase de testes, que na realidade não se trata bem de testes, mas de uma preparação para a realização dos testes, em que se faz a análise da reflexão do modelo, para assim se determinar as alturas de ondas efetivamente geradas pelos batedores, fazendo variar o F_G até que as ondas geradas pelo sistema apresentem uma altura igual à pretendida. Uma vez que todos os tripés que suportam as sondas já estavam colocados nos respetivos locais na praia (retirar os tripés significaria perder a posição exata da sonda), foi necessário construir um suporte para quatro sondas, que seriam alinhadas em frente aos batedores de forma a possibilitar a posterior análise da reflexão.

Após esta fase de definição do F_G, e como o perfil da praia tinha sofrido alterações com os testes, era necessário repor o perfil da praia. Para tal, foi necessário fazer uma espécie de trincheira no alinhamento em que se encontravam as marcas das guias de referência e onde, posteriormente, seriam colocadas novamente as réguas de *MDF* de forma a possibilitar a correta definição do perfil da praia.

Concluída esta fase de calibração das ondas (que será descrita mais detalhadamente no capítulo 5), pode-se considerar como concluída a construção do modelo, sendo possível dar-se início aos testes. A Figura 4.6 apresenta um lapso de tempo com fotografias capturadas durante os vários momentos da construção do modelo, descritos anteriormente.

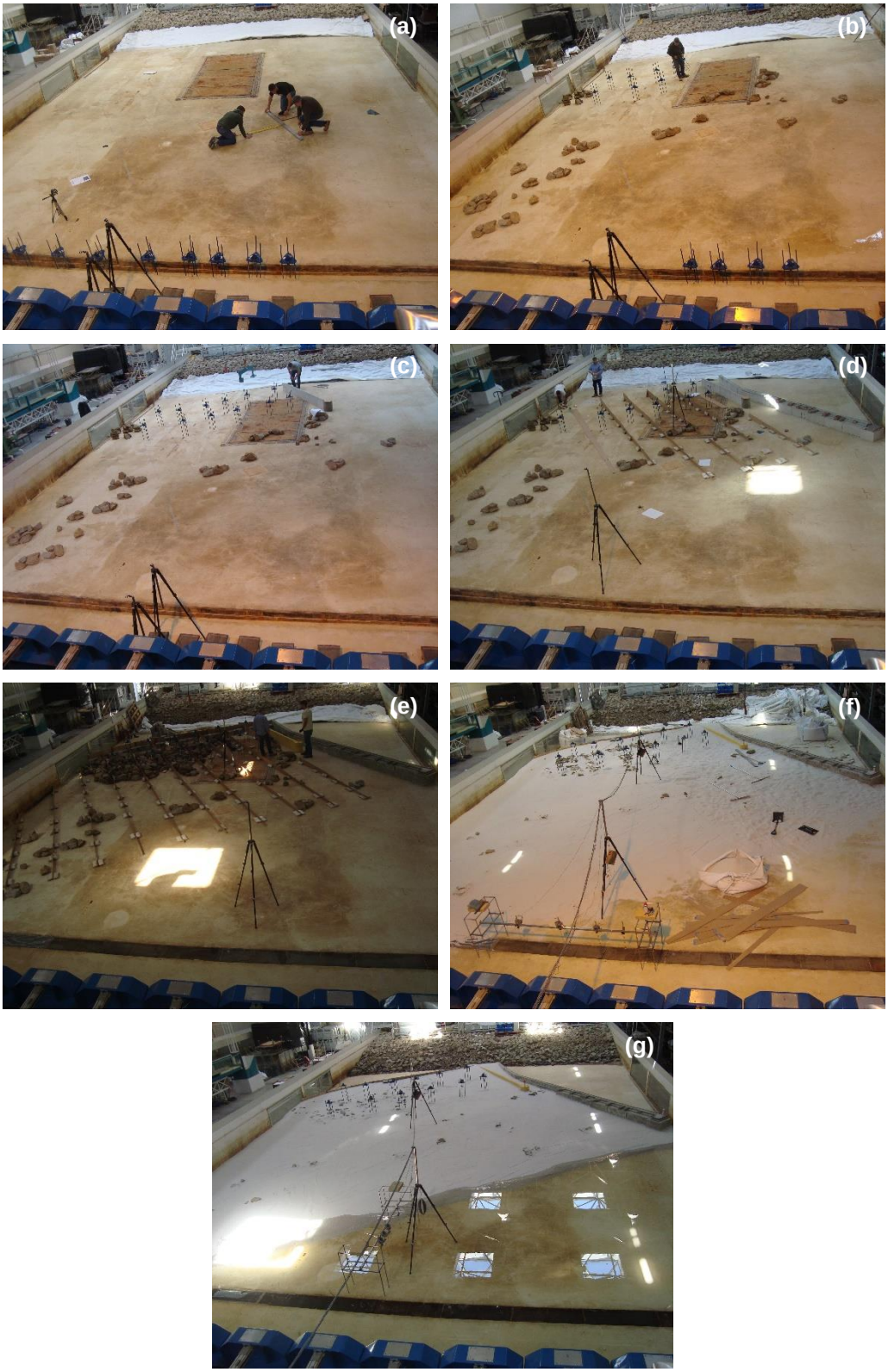


Figura 4.6 – Sequência construtiva do modelo físico: a) realização de marcações no fundo do tanque; b) após a colocação dos afloramentos rochosos e durante a colocação dos tripés; c) colocação das secções do molhe Felgueiras; d) colocação das réguas e após colocação de ambos os molhes; e) após colocação do muro na praia e dos afloramentos rochosos visíveis na muito baixa mar; f) após a colocação da areia e durante a definição do perfil da praia e g) durante o primeiro enchimento.

4.5. CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Para a realização do estudo em modelo físico foi necessário fazer a calibração do sistema de aquisição de agitação marítima e pela calibração do sistema de geração de agitação marítima. A calibração do sistema de geração de agitação marítima, que passa pela definição do F_G para cada um dos testes a realizar, será detalhada no capítulo 5, como referido anteriormente. Nesta secção é descrita a calibração do sistema de aquisição de agitação marítima.

Tal como detalhado anteriormente, o sistema de aquisição de agitação marítima é composto por sondas hidrodinâmicas que realizam a leitura da posição da superfície livre da água, por 2 *Boards* que recebem e convertem a leitura das sondas e pelo *software* HR DAQ que permite controlar este sistema além de realizar o tratamento preliminar dos dados adquiridos. Para a realização dos testes é necessário preparar, ou calibrar previamente, o sistema de aquisição para esse teste. Neste caso, as calibrações do sistema eram realizadas sempre que havia alterações no nível de água a ser testado e sempre no início de cada dia de testes.

A calibração do sistema de aquisição de agitação marítima inicia-se com a criação de um ficheiro de calibração, no *software* referido, associado a cada uma das sondas hidrodinâmicas que se pretendem utilizar. Em seguida, é necessário definir três pontos, que são obtidos através da variação da profundidade de água a que se encontram as sondas (conseguido através da subida ou descida das hastes nos tripés), que são designados de "0", "+" e "−". A definição destes pontos inicia-se com a definição do "0", onde se colocam as hastes das sondas hidrodinâmicas dentro de água, para em seuida centrar o sinal captado na *board*, de forma a que os registos fiquem dentro da amplitude que o sistema é capaz de captar. Após este processo e depois de se dar a estabilização da água (que foi perturbada pelo operador, sendo que qualquer perturbação da água durante a fase de calibração tem grande influência nos resultados), dava-se a indicação no *software* de que este seria o ponto que se encontra na posição "0". Posteriormente, seguia-se a definição do "+", que consiste em fazer baixar a haste da sonda até ao máximo, ou seja, aumentar (daí a designação "+") a profundidade de água sobre a sonda, sendo necessário determinar a distância desde o ponto "0" até ao ponto em que se define o "+". Esta distância era lida na haste, onde era possível fazer subir ou descer a sonda de nível, sendo que a distância entre cada nível é precisamente 1 cm. Após a definição do "+", era introduzido no sistema essa diferença de profundidades entre o "+" e o "0" (*e.g.*, se a distância medida fosse de 5 níveis, ou seja, 5 cm, no sistema era introduzido o valor +0.05). Para a definição do "−", o processo era idêntico, sendo necessário subir a haste da sonda até à profundidade de água mínima (daí o "−"), garantindo sempre uma submersão mínima de 2 cm. Em seguida, era medida a distância desde o ponto "0" até ao ponto definido como o "−", introduzindo o valor no sistema tal como no processo para o ponto "+"). A Figura 4.7b, talvez mais elucidativa, facilita a compreensão deste processo.

O resultado da calibração do sistema de aquisição de agitação marítima é uma regressão linear para cada uma das sondas que relaciona voltagem com a posição da superfície livre de água, que é usada durante os testes. Uma vez que grande parte das sondas estavam localizadas no início da praia, onde a profundidade de água é muito reduzida, sendo insuficiente para a calibração das mesmas (processo que, como referido, necessita de uma submersão mínima e uma profundidade de água suficiente que permitam a definição dos três pontos), foi necessário deslocar as sondas para uma estrutura, que foi colocada dentro do tanque de ondas atrás do modelo construído, onde a profundidade de água já era suficiente para a calibração das sondas Na Figura 4.7a é possível observar a localização desta estrutura.

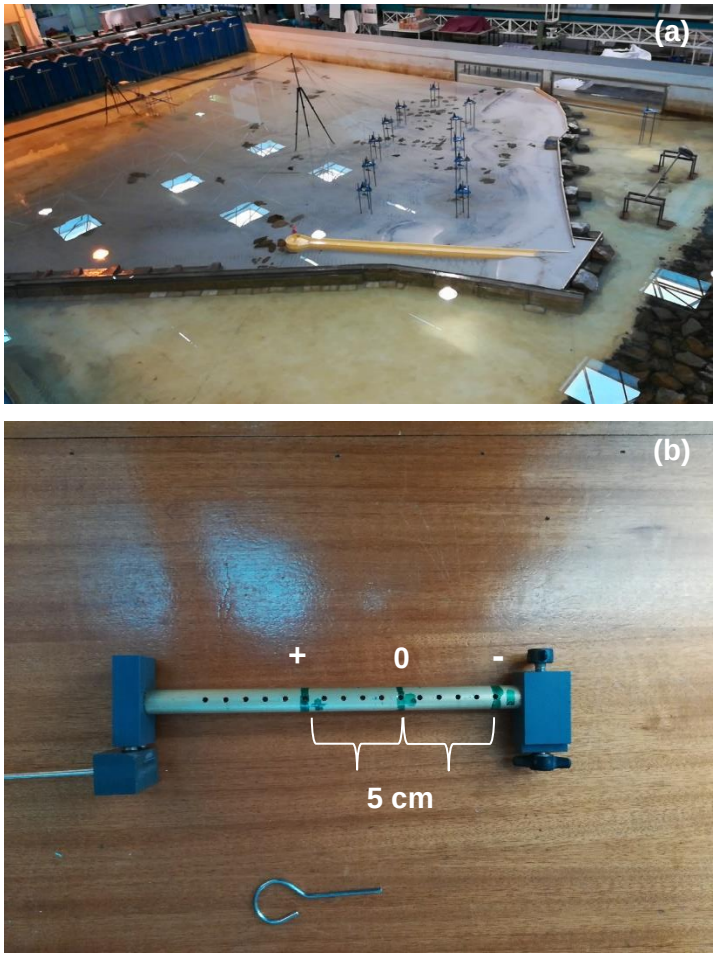


Figura 4.7 – a) Modelo físico construído e estrutura colocada atrás do mesmo para calibração das sondas e b) Haste das sondas de níveis hidrodinâmicos com as marcações do "+","-" e do "0".

4.6. SETUP EXPERIMENTAL

O modelo físico foi construído com o intuito de avaliar a eficácia e a estabilidade de soluções de proteção costeira num contexto também de adaptação às alterações climáticas.

Para tal, foram realizados testes com o modelo sem estruturas de proteção costeira e, posteriormente, com as estruturas já implementadas, permitindo assim estabelecer uma comparação entre os registos e, posteriormente, efetuar uma avaliação da eficácia das estruturas de proteção costeira.

A solução de proteção costeira a estudar consiste em cinco quebramares destacados, dois deles verticais (construídos em betão, num processo idêntico ao usado na construção dos molhes Norte e de Felgueiras) e três de taludes. Tendo como base as estruturas a estudar, e apenas do ponto de vista hidráulico (além das marés e da agitação marítima, também os sismos têm influência na estabilidade dos quebramares), foram definidas as variáveis a analisar:

- O período de pico da onda (T_P);
- A altura de onda significativa (H_S);

No estudo destas estruturas, o nível de água é também uma variável muito importante e foi definido tendo em conta o regime de marés do local, ou seja nível de Preia mar, baixa mar e nível médio, aos quais se acrescentou o nível extremo de previsão para o efeito das alterações climáticas. Outro aspeto

tido em consideração (não variável neste trabalho) para a realização dos testes, foi a direção da agitação incidente, que foi Oeste baseada nas condições existentes no local em estudo.

Assim, a planificação[2] dos testes foi definida tendo por base as três variáveis referidas (nível de água, H_S e T_P), tendo-se previsto testar para cada nível definido, três períodos da onda de pico e várias alturas de onda significativa (desde H_S mais reduzidas até H_S mais elevadas) para cada T_P definido.

Os quebramares verticais, Quebramar 4 (QB4) e 5 (QB5), foram construídos em betão simples, com as seguintes dimensões:

- QB4 com largura de 13.3 cm e 91.7 cm de desenvolvimento, com coroamento à cota + 8.33 cm ao Zero Hidrográfico (ZH) (dimensões do modelo);
- QB5 com largura de 13.3 cm e 66.7 cm de desenvolvimento, com coroamento à cota + 8.33 cm (ZH) (dimensões do modelo);

Quanto aos quebramares de taludes, o seu processo de construção foi um pouco mais complexo. Para este modelo físico os três quebramares de taludes eram constituídos por um núcleo central, uma subcamada e pelo manto resistente. O núcleo de todos os quebramares foi construído com brita miúda. Para a construção da subcamada do QB3 foi utilizada brita com 0.8 a 2.1 g e diâmetro de 0.78 a 1.06 cm, enquanto que o manto resistente foi realizado em brita com 12.6 a 25.1 g e diâmetro de 1.93 a 2.43 cm, estando o coroamento do quebramar à cota + 6.2 cm (ZH). A secção do QB1 e QB2 são iguais, sendo a subcamada realizada em brita com 2.1 a 4.2 g e diâmetro de 1.06 a 1.34 cm, enquanto que o manto resistente foi realizado em brita com 25.1 a 37.7 g e diâmetro de 2.43 a 2.79 cm, estando o coroamento de ambos à cota + 6.8 cm (ZH). Os taludes dos três quebramares foram realizados em 3:2 (H:V).

De forma a possibilitar a análise do estragos nos quebramares de taludes, as diferentes britas utilizadas na constituição dos mantos resistentes foram divididas em três quantidades idênticas sendo, posteriormente, pintadas em três cores também diferentes (branco, azul e vermelho). Assim, a colocação dos blocos seria dividida por cores, o que permitiria, posteriormente aos testes, avaliar o deslocamento de blocos do manto resistente. A Figura 4.8 retrata a construção dos quebramares de taludes.

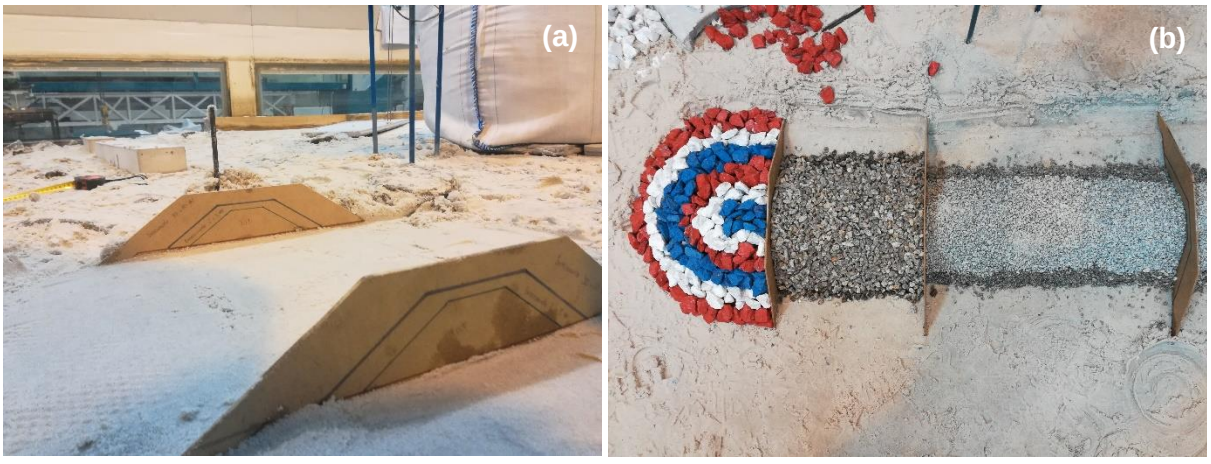


Figura 4.8 - Construção dos quebramares de taludes: a) vista das réguas colocadas, com a secção dos quebramares que auxiliaram a colocação das camadas dos quebramares e b) três fases distintas da colocação das camadas dos quebramares de taludes.

[2] O plano de testes é descrito em detalhe no capítulo 5

5 ANÁLISE DA EFICÁCIA E DA ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA

5.1. INTRODUÇÃO

Concluída a construção do modelo físico e a calibração das condições de agitação marítima no tanque de ondas da SHRHA na FEUP, seguiu-se a execução dos testes que foi dividida em quatro fases:

- Fase 0 - calibração das condições de agitação marítima;
- Fase 1.1 - estudo da resposta do modelo físico sem as estruturas de defesa costeira;
- Fase 1.2 - estudo da resposta do modelo físico com as estruturas de defesa costeira já implantadas;
- Fase 1.3 - repetição dos testes da fase 2 de forma a validar os resultados obtidos na fase anterior.

A análise da resposta do modelo físico permitirá estabelecer uma comparação entre as condições antes e após a construção dos quebramares destacados, possibilitando a avaliação da eficiência dessas estruturas, bem como a análise da sua estabilidade para as condições de agitação marítima máximas no local.

O presente capítulo visa a descrição detalhada do plano e condições de teste, bem como a apresentação e análise dos resultados obtidos.

5.2. PLANO DE TESTES

Como foi referido anteriormente, o presente estudo visa a análise, em modelo físico, de soluções de proteção costeira a implementar na Praia do Carneiro, no Porto.

De forma a avaliar corretamente a eficácia e estabilidade das estruturas, foi definido um plano de testes adequado e que considerando determinados parâmetros que têm influência no estudo dos aspetos referidos, em particular estados de agitação marítima. Assim, foram considerados parâmetros representativos da agitação marítima como a altura de onda significativa (H_S) e o período de onda de pico (T_P) para a definição dos testes a realizar. Os períodos de pico a testar foram de 10 s, 14 s e 16 s. As alturas de onda significativas foram definidas de forma a, partindo de um valor fixo de 2 m, ir aumentando sucessivamente a altura de onda até se obter a máxima altura de onda fisicamente possível na primeira linha de sondas, ou seja, mesmo aumentando a altura de onda gerada pelo sistema de geração de agitação marítima, a altura da onda registada nas referidas sondas mantinha-se constante por essa ser a máxima altura de onda a atingir o local sem rebentar. Por este motivo, no plano de testes, foi previsto testar alturas de onda significativas de 2 m a 5 m, mas em determinadas condições os testes foram realizados até alturas de onda significativas maiores e menores do que 5 m, dependendo da altura de onda para a qual seria aparente a referida estabilização.

Outro parâmetro a ter em consideração na realização dos testes, foi o nível de água. Como referido, o local em estudo é a Praia do Carneiro junto à Foz do Rio Douro no Porto, pelo que os níveis de água a utilizar nos testes deviam ser aqueles existentes no local, definindo-se assim três níveis em função do efeito das marés: BMAV + 0.5 m ZH; NM + 2.0 ZH; PMAV + 3.5 m ZH. Com o intuito de estudar o possível impacto nas estruturas e na praia, que a subida do nível da água do mar, assim como a sobrelevação do nível médio da água do mar associada a marés meteorológicas cada vez mais frequentas e intensas, devido aos efeitos das alterações climáticas, foi definido um outro nível resultante da soma destes efeitos com o nível de PMAV, originando o quarto nível de + 4.75 m ZH designado de PMAV+SS. Todos os testes foram realizados com uma sequência aleatória de 1000 ondas.

5.2.1. Calibração do Fator de Ganho

Com o propósito de garantir que a altura de onda gerada era igual à pretendida, foi necessário efetuar a calibração do fator de ganho a introduzir no sistema de geração de agitação marítima. Para tal, foram colocadas quatro sondas numa posição frontal aos batedores com as quais, e após a realização de cada teste de calibração, se podia fazer a análise da reflexão (através da ferramenta *Reflection Analysis* do *software* HR DAQ) e obter a altura de onda incidente efetivamente gerada pelo sistema (Figura 5.1). Este processo foi repetido com ajustes no fator de ganho até se obter a altura de onda pretendida.



Figura 5.1 - Estrutura e disposição das quatro sondas para a análise da reflexão.

5.2.2. 1ª Fase de Testes: Sem Quebramares Destacados

Como mencionado anteriormente, na primeira fase dos testes foi testada a resposta do modelo físico às condições pretendidas, na ausência das estruturas na praia. Por isso optou-se por testar apenas os níveis de PMAV e de PMAV+SS, uma vez que para a análise da eficácia das estruturas (galgamentos e condições de tranquilidade a sotamar das estruturas) apenas têm interesse os níveis de água mais elevados.

O Quadro 5.1 apresenta as condições para os testes a realizar na 1ª Fase sem a presença quebramares destacados. De referir que para o nível extremo, PMAV+SS, decidiu-se testar apenas os períodos de

onda de pico de 14 e 16 s, com alturas de onda entre 3 a 5 m para o período de 14 s e 4 a 6 m para o período de 16 s.

Quadro 5.1 - Plano de testes para a 1ª Fase (sem quebramares destacados).

Nível	T_P (s)	H_S (m)
PMAV (+3,5 m ZH)	10	2
		...
		5
	14	2
		...
		5
	16	2
		...
		5
PMAV+SS (+4,75 m ZH)	14	3
		...
		5
	16	4
		...
		6

5.2.3. 2ª E 3ª FASE DE TESTES: COM QUEBRAMARES DESTACADOS

Na segunda e terceira fases do estudo, em que se realizaram testes com os quebramares destacados já implementados, foram planeados testes para todos os níveis de água previstos. Distintamente da fase de testes sem estruturas, nesta fase seria importante testar todos os níveis de água e assim avaliar a resposta das estruturas nas condições a que estas serão sujeitas se forem construídas no local em estudo. Apesar de o efeito das marés não ter influência direta na estabilidade dos quebramares de taludes, as marés são importantes no estudo e dimensionamento destas estruturas pois definem a zona ativa do manto resistente, ou seja, a zona mais exposta à ação das ondas, assim como a definição da maior profundidade de água em frente à estrutura que, por sua vez, defina a altura de onda máxima que atingirá a estrutura sem rebentar. Assim, foram planeados testes para os quatro níveis de água previstos, BMAV, NM, PMAV e PMAV+SS, para os três períodos de onda previstos de 10 s, 14 s e 16 s e com alturas de onda de 2 a 6 m.

O Quadro 5.2 apresenta o plano dos testes a realizar para o modelo com quebramares destacados. De salientar que, uma vez mais, manteve-se o critério de estabilização da altura de onda junto à primeira linha de sondas (descrito anteriormente), pelo que os testes a realizar poderão ser mais ou menos do que aqueles presentes no plano.

Quadro 5.2 - Plano de testes para a 2ª e 3ª Fases (com quebramares destacados).

Nível	T_P (s)	H_S (m)
BMAV (+0,5 m ZH)	10	2.0
		…
		4.0
	14	2.0
		…
		4.0
	16	2.0
		…
		4.0
NM (+2,0 m ZH)	10	2.0
		…
		4.0
	14	2.0
		…
		4.0
	16	2.0
		…
		4.0
PMAV (+3,5 m ZH)	10	2.0
		…
		5.0
	14	2.0
		…
		5.0
	16	2.0
		…
		5.0
PMAV+SS (+4,75 m ZH)	14	3.0
		…
		5.0
	16	3.0
		…
		6.0

5.3. ANÁLISE DA EFICÁCIA DAS ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA

Como já foi referido, foram realizados testes em três fases: a primeira fase correspondendo aos testes sem a presença dos quebramares; a segunda fase para os testes a realizar com os quebramares destacados e a terceira fase destinada à repetição dos testes da 2ª Fase. No total, para as várias fases de testes e de calibração dos ganhos a considerar, foram realizados 188 testes com duração de cerca de 92 horas.

De forma a facilitar e melhor organizar os testes, foi atribuída uma nomenclatura aos testes que permitia identificar as condições testadas, e.g. para o teste em que se pretendia testar a altura de onda de 3 m, período de onda de pico de 14 s, para o nível de preia mar e na fase de testes sem quebramares (Fase 1.1) foi atribuído o nome S11_PM_TP14_HS30.

A localização das sondas de níveis hidrodinâmicos (Figura 5.2) foi efetuada de forma a que existisse pelo menos uma sonda a barlamar e outra a sotamar de cada um dos quebramares, existindo ainda uma sonda a barlamar e outra a sotamar das aberturas entre os quebramares destacados (QB1, QB2 e QB3). Uma vez que existiam apenas 12 sondas operacionais e tendo em conta a necessidade de existir uma sonda colocada imediatamente a sotamar dos batedores, optou-se por retirar a sonda a sotamar do maior dos quebramares verticais (QB4). Um aspeto importante a referir é que a sonda 3 teve um mau funcionamento no início dos testes da Fase 1.2, pelo que qualquer análise comparativa com esta sonda será impossível de realizar. Este incorreto funcionamento da sonda 3 pareceu dever-se à incapacidade da mesma em detetar profundidades de água reduzidas, o que tendo em consideração a localização da sonda (a sotamar do quebramar 3 e próxima à praia) em que a profundidade da água era muito reduzida, inviabilizou a sua calibração e utilização no registo durante os testes. Tentou-se ainda trocar esta sonda por outra sonda com maiores profundidades de água (e.g. sonda 13, a sotamar dos batedores), que se verificou inútil pois mesmo assim a sonda não detetava profundidades menores durante a calibração da mesma.

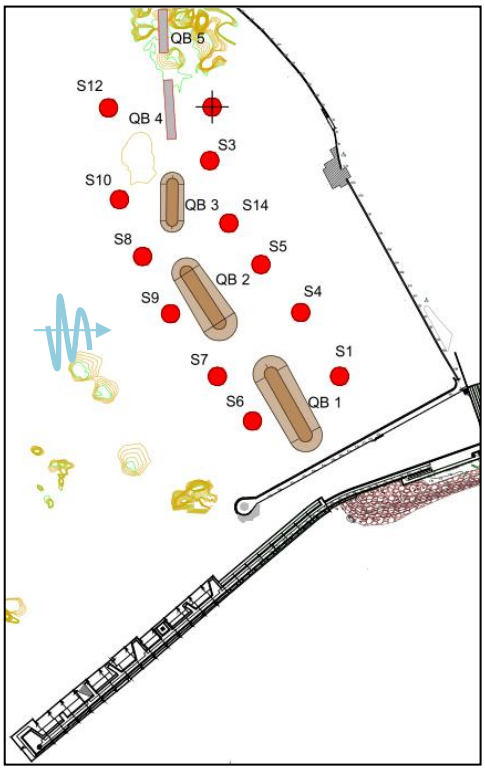


Figura 5.2 – Localização adotada para as sondas de níveis hidrodinâmicos no tanque de ondas.

Com os testes realizados, é possível realizar diferentes tipos de análise e comparação de dados:

- Comparar os níveis registados nas sondas a barlamar e a sotamar dos quebramares;

- Comparar os níveis registados nas sondas nos testes sem quebramares com os testes com quebramares, comparando os dados sonda a sonda, ou seja, comparar os dados de cada sonda nos testes sem quebramares com os dados da mesma sonda nos testes com quebramares;

5.3.1. COMPARAÇÃO ENTRE BARLAMAR E SOTAMAR

A comparação entre as alturas de onda significativa registadas a barlamar e sotamar dos quebramares destacados permite analisar o efeito que a introdução dos mesmos têm. Com o intuito de compreender melhor os registos, foi determinado um coeficiente de transmissão (C_T),

$$C_T = \frac{H_{s,sotamar}}{H_{s,barlamar}} \tag{5.1}$$

em que $H_{s,sotamaar}$ corresponde à altura de onda registada a sotamar do quebramar e $H_{s,barlamar}$ corresponde à altura de onda registada a barlamar do quebramar.

5.3.1.1. Fase 1.2

Durante os testes da Fase 1.2 foi possível observar o desenvolvimento de uma barra a barlamar das sondas 6 e 7, junto ao Molhe de Felgueiras. Na comparação dos registos entre a sonda 1 (S1) e sonda 6 (S6) (Figura 5.3), pode-se observar que as diferenças de altura de onda registadas nas duas sondas aparentam manter-se constantes até ao instante em que se iniciam os testes para o nível de preia mar (PM). Isto pode ser explicado pelo desenvolvimento da referida barra, que até ao NM ganhou altura e tendeu a deslocar-se no sentido das sondas 6 e 7, aparentando estabilizar o seu deslocamento precisamente no local destas sondas para, em seguida, perder altura e deslocar-se na direção da praia durante os testes para o NM e PM. O deslocamento desta barra na direção da praia reduziu a cota dos fundos a barlamar do Quebramar 1 (QB1), o que implica o aumento da profundidade de água. Por sua vez, este aumento da profundidade de água implica o aumento da altura de onda máxima que atinge a estrutura sem quebrar, justificando assim, o aumento da diferença entre as alturas de onda registada na sonda 6 (S6) e sonda 1 (S1) é representado sob forma de C_T (Quadro 5.3 e Quadro 5.4).

Na comparação entre os dados das sondas 4 e 7 (Figura 5.3), pode-se observar uma situação idêntica à observada na comparação entre a S1 e S6. Durante o nível de baixa mar, a diferença entre as alturas de onda registadas nas sondas 4 (S4) e 7 (S7) aparenta manter-se constante, o que coincide com o desenvolvimento da barra, para depois aumentar durante os testes para o nivel médio, coincidindo novamente com o desaparecimento da barra. Nos níveis de preia mar (PM) e extremos (SS) esta diferença aparenta estabilizar o que pode ser justificado através da localização das sondas S4 e S7, que se encontram no alinhamento da abertura dos quebramares QB1 e QB2 e assim a sonda a sotamar (S4) não está tão protegida, logo a altura de onda registada é menor do que a sonda a barlamar (S7). Este aspeto pode ser justificado pelas razões referidos anteriormente, a deslocação da barra, que até ao início dos testes para os níveis PM e SS estabilizou no local da S6 e S7, no sentido da praia, o que provocou a diminuição da cota dos fundos, que por sua vez aumentam a profundidade de água em frente à estrutura e assim proporciona o aumento da altura de onda máxima que atinge a estrutura sem rebentar. Esta evolução da diferença de alturas registadas entre S4 e S7 é traduzida através do C_T (Quadro 5.3 e Quadro 5.4).

Tal como as sondas S1 e S6, as sondas 5 (S5) e 9 (S9) encontram-se, respetivamente, a sotamar e a barlamar de um quebramar, ou seja, o QB2. Do mesmo modo que entre as sondas S1 e S6, a diferença entre as alturas registadas em ambas as sondas é aproximadamente constante ao londo dos vários testes.

Contudo, observando os resultados é possivel reparar que para níveis mais elevados (PM e SS) e alturas de onda mais reduzidas (2 m e 3 m), a diferença de alturas registadas entre S5 e S9 é muito pequena (C_T maior no Quadro 5.3 e Quadro 5.4), o que pode ser justificado pela menor capacidade de dissipação de energia do QB2, ou seja, maior altura de onda registada a sotamar para as referidas condições de teste. Esta análise foi realizada tendo como base o gráfico da Figura 5.3 e o Quadro 5.3 e Quadro 5.4.

Para o caso das sondas 14 (S14) e 8 (S8), o comportamento é idêntico ao registado em S4 e S7. Nesta comparação (Figura 5.3), a diferença entre as alturas de onda registadas entre as sondas (S14 e S8) apresenta um aumento muito ligeiro (Quadro 5.3 e Quadro 5.4) até ao periodo da onda de pico (T_P) de 10 s do nivel de PM, para depois diminuir até ao final dos testes podendo ser explicado pela diminuição da capacidade de dissipar energia do QB2 e QB3.

Não é possivel estabelecer comparação entre as sondas 3 (S3) e 10 (S10) pois, como já referido, durante os testes a sonda 3 deixou de funcionar, pelas razões mencionadas anteriormente, não existindo dados que permitam estabelecer a correta comparação.

Quadro 5.3 - Coeficientes de transmissão (%) obtidos para os testes da Fase 1.2 para os níveis de BM e NM.

Nome do teste	C_T (%)			
	S1/S6	S4/S7	S5/S9	S14/S8
S12_BM_TP10_HS20_01	1.0	18.4	1.2	9.8
S12_BM_TP10_HS30_01	4.6	25.3	3.6	16.8
S12_BM_TP10_HS35_01	7.1	28.9	5.5	18.5
S12_BM_TP10_HS40_01	10.9	33.2	8.1	20.3
S12_BM_TP10_HS45_01	14.6	36.6	10.8	21.8
S12_BM_TP14_HS20_01	1.4	20.3	1.1	10.8
S12_BM_TP14_HS30_01	8.2	30.5	5.9	18.4
S12_BM_TP14_HS35_01	13.3	34.8	9.4	19.3
S12_BM_TP14_HS40_01	12.3	34.6	9.3	4.1
S12_BM_TP16_HS20_01	0.3	15.3	0.7	0.0
S12_BM_TP16_HS30_01	5.3	27.9	4.6	2.1
S12_BM_TP16_HS35_01	7.0	29.3	5.5	2.3
S12_BM_TP16_HS35_02	10.6	30.6	5.8	3.0
S12_NM_TP10_HS20_01	42.3	35.9	32.3	25.3
S12_NM_TP10_HS20_02	39.9	35.9	31.2	25.2
S12_NM_TP10_HS30_01	42.2	30.2	31.2	24.2
S12_NM_TP10_HS35_01	44.1	30.5	32.2	24.8
S12_NM_TP10_HS40_01	45.6	30.8	32.5	24.3
S12_NM_TP10_HS45_01	45.2	32.0	32.0	24.0
S12_NM_TP14_HS20_01	39.9	39.3	40.2	29.7
S12_NM_TP14_HS30_01	41.1	38.4	38.0	28.0
S12_NM_TP14_HS30_02	39.7	37.6	38.2	28.1
S12_NM_TP14_HS35_01	39.5	36.9	37.7	27.2
S12_NM_TP14_HS40_01	38.7	36.5	36.7	27.2
S12_NM_TP16_HS20_01	32.4	36.0	38.5	31.3
S12_NM_TP16_HS30_01	37.6	36.9	37.5	29.5
S12_NM_TP16_HS35_01	38.1	37.9	37.7	29.5
S12_NM_TP16_HS40_01	38.4	38.1	37.4	29.3
S12_NM_TP16_HS45_01	39.4	37.8	37.3	29.5

Quadro 5.4 - Coeficientes de transmissão (%) obtidos para os testes da Fase 1.2 para os níveis de PM e SS.

Nome do teste	C_T (%)			
	S1/S6	S4/S7	S5/S9	S14/S8
S12_PM_TP10_HS20_01	38.6	48.2	52.7	64.4
S12_PM_TP10_HS30_01	36.0	41.3	51.4	52.0
S12_PM_TP10_HS35_01	36.0	40.7	53.8	44.6
S12_PM_TP10_HS40_01	38.4	41.0	52.8	40.2
S12_PM_TP10_HS45_01	42.2	45.5	52.5	38.0
S12_PM_TP10_HS50_01	46.9	47.1	51.0	36.6
S12_PM_TP10_HS55_01	50.7	47.9	50.3	36.3
S12_PM_TP10_HS60_01	54.5	50.2	48.9	36.6
S12_PM_TP14_HS20_01	45.9	66.4	77.0	64.1
S12_PM_TP14_HS30_01	50.0	61.3	68.4	54.3
S12_PM_TP14_HS35_01	51.8	59.1	65.1	50.6
S12_PM_TP14_HS40_01	56.0	59.4	62.3	48.8
S12_PM_TP14_HS45_01	57.5	61.7	59.3	46.1
S12_PM_TP14_HS50_01	59.1	62.6	57.5	43.9
S12_PM_TP16_HS20_01	56.0	75.6	74.6	70.4
S12_PM_TP16_HS30_01	57.8	65.3	65.9	60.0
S12_PM_TP16_HS35_01	58.2	63.5	61.4	56.0
S12_PM_TP16_HS40_01	59.0	63.0	60.0	53.1
S12_PM_TP16_HS45_01	60.0	64.4	53.8	51.6
S12_PM_TP16_HS50_01	58.6	65.8	47.1	49.9
S12_PM_TP16_HS55_01	56.5	65.6	46.7	49.3
S12_SS_TP14_HS30_01	60.5	76.6	87.2	83.6
S12_SS_TP14_HS40_01	55.3	72.9	76.5	67.7
S12_SS_TP14_HS50_01	51.7	69.8	75.2	59.2
S12_SS_TP14_HS60_01	48.7	69.6	68.8	55.6

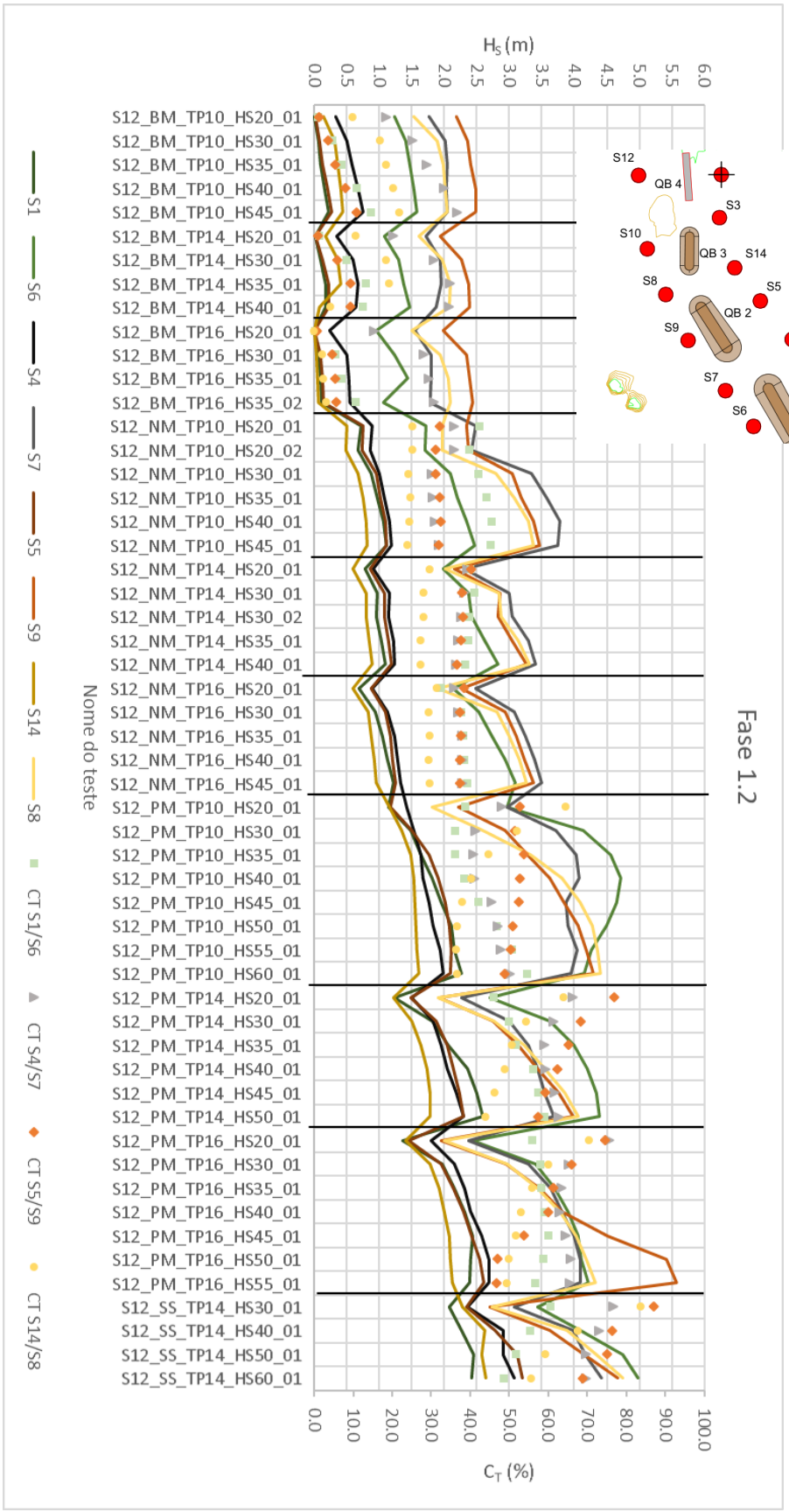


Figura 5.3 - Comparação Barlamar/Sotamar entre os registos das sondas e respetivo C_T na Fase 1.2.

5.3.1.2.Fase 1.3

A comparação das alturas de onda registadas a barlamar e a sotamar durante os testes da Fase 1.3 (repetição dos testes com quebramares nas mesmas condições da Fase 1.2) é muito idêntica à Fase 1.2.

Tal como na Fase 1.2, na comparação entre S1 e S6 (Figura 5.4) parece existir uma certa constância na diferença de alturas de onda registada até ao fim dos testes do NM, para depois existir um ligeiro aumento (Quadro 5.5 e Quadro 5.6) gradual da diferença de alturas durante os testes para o nível mais elevado (SS), justificada pelas mesmas razões mencionadas na comparação realizada na Fase 1.2.

Os resultados obtidos nas sondas 4 e 7 durante a Fase 1.3 (Figura 5.4) são também muito idênticos aos da Fase 1.2, apresentando uma diferença entre alturas de onda registadas que se mantém constante até aos testes de PM, mostrando uma ligeira diminuição devida, essencialmente, ao aumento mais acentuado da altura de onda registada em S4 para os níveis mais elevados (Quadro 5.5 e Quadro 5.6). Isto pode ser explicado pelo alinhamento das sondas, que se encontram na abertura entre as cabeças do QB1 e QB2, estando por isso menos protegida no caso da S4 e menos exposta a reflexões no caso da S7.

As sondas 5 e 9 (Figura 5.4) registaram uma diferença de alturas de onda que tende a diminuir ao longo dos testes, sendo menor durante os testes para os níveis mais elevados (PM e SS). Este aspeto pode ser justificado com a menor capacidade de dissipação do QB2 assim como pela maior propagação das ondas pelas aberturas existentes entre o QB2 e o QB1 e entre o QB2 e o QB3 que provocam o aumento de galgamento no QB2 e assim, a altura de onda registada na sonda a sotamar do quebramar (S5) vai aumentando e por isso aproximando-se da altura de onda registada em S9, resultando em C_T mais elevados (Quadro 5.5 e Quadro 5.6).

Tal como nos testes para a Fase 1.2, as sondas S8 e S14 (Figura 5.4) apresentam um aumento ligeiro da diferença entre as alturas de onda registadas (Quadro 5.5 e Quadro 5.6) até ao fim dos testes para o período da onda de pico (T_P) de 10 s do nível PM diminuindo, em seguida, até ao final dos testes. As razões para tal são as mesmas da Fase 1.2, o maior fluxo entre as aberturas dos quebramares provoca o aumento dos galgamentos dos QB2 e QB3.

Identicamente aos testes da Fase 1.2 a sonda 3 não se encontrava a funcionar, como já foi explicado anteriormente, impossibilitando qualquer comparação entre barlamar e sotamar com a sonda correspondente (S10).

Quadro 5.5 - Coeficientes de transmissão (%) obtidos para os testes da Fase 1.3 para os níveis de BM e NM.

Nome do teste	C_T (%)			
	S1/S6	S4/S7	S5/S9	S14/S8
S13_BM_TP10_HS20_01	0.1	3.6	0.8	23.9
S13_BM_TP10_HS30_01	1.3	6.3	4.2	27.0
S13_BM_TP10_HS35_01	1.7	7.8	5.1	28.1
S13_BM_TP10_HS40_01	2.1	8.4	8.6	28.8
S13_BM_TP10_HS45_01	2.5	7.4	7.1	26.6
S13_BM_TP14_HS20_01	0.0	5.5	0.0	9.6
S13_BM_TP14_HS30_01	0.0	10.4	0.5	14.9
S13_BM_TP14_HS35_01	0.0	13.6	0.9	17.5
S13_BM_TP14_HS40_01	0.1	15.9	1.4	19.4
S13_BM_TP16_HS20_01	0.0	6.0	0.0	7.3
S13_BM_TP16_HS30_01	0.0	12.0	0.4	15.3
S13_BM_TP16_HS35_01	0.0	15.9	0.7	18.8
S13_BM_TP16_HS35_02	0.0	15.7	0.9	18.0
S13_NM_TP10_HS20_01	9.5	44.0	37.7	32.6
S13_NM_TP10_HS20_02	7.8	42.0	40.4	32.7
S13_NM_TP10_HS30_01	15.8	38.5	36.2	29.0
S13_NM_TP10_HS35_01	19.6	38.8	37.4	28.1
S13_NM_TP10_HS40_01	25.4	41.7	38.9	27.8
S13_NM_TP10_HS45_01	28.8	41.6	39.3	28.4
S13_NM_TP14_HS20_01	10.2	49.3	52.1	36.9
S13_NM_TP14_HS30_01	18.9	48.2	47.2	35.1
S13_NM_TP14_HS30_02	18.1	47.5	47.2	35.8
S13_NM_TP14_HS35_01	22.5	46.2	46.7	35.0
S13_NM_TP14_HS40_01	27.6	48.1	46.1	35.0
S13_NM_TP16_HS20_01	8.7	47.6	48.6	41.8
S13_NM_TP16_HS30_01	16.8	45.9	46.6	37.4
S13_NM_TP16_HS35_01	21.6	46.4	46.8	36.4
S13_NM_TP16_HS40_01	25.9	45.8	46.8	36.2
S13_NM_TP16_HS45_01	28.0	43.9	46.6	36.0

Quadro 5.6 - Coeficientes de transmissão (%) obtidos para os testes da Fase 1.3 para os níveis de PM e SS.

Nome do teste	C_T (%)			
	S1/S6	S4/S7	S5/S9	S14/S8
S12_PM_TP10_HS20_01	44.5	43.2	69.8	56.7
S12_PM_TP10_HS30_01	42.2	41.2	64.8	49.0
S12_PM_TP10_HS35_01	42.5	41.3	62.0	45.9
S12_PM_TP10_HS40_01	45.2	44.2	60.2	44.3
S12_PM_TP10_HS45_01	51.6	45.5	58.9	43.7
S12_PM_TP10_HS50_01	56.2	47.1	56.2	43.8
S12_PM_TP10_HS55_01	59.1	49.4	55.5	43.8
S12_PM_TP10_HS60_01	60.0	49.3	55.4	44.1
S12_PM_TP14_HS20_01	53.2	66.1	77.3	76.2
S12_PM_TP14_HS30_01	52.1	61.8	75.5	68.1
S12_PM_TP14_HS35_01	49.2	62.2	73.9	62.7
S12_PM_TP14_HS40_01	47.6	61.7	72.1	60.5
S12_PM_TP14_HS45_01	47.2	62.3	69.1	58.0
S12_PM_TP14_HS50_01	47.4	62.3	67.0	55.9
S12_PM_TP16_HS20_01	28.2	75.6	79.0	90.9
S12_PM_TP16_HS30_01	32.5	63.2	72.8	76.9
S12_PM_TP16_HS35_01	33.5	61.1	71.4	73.6
S12_PM_TP16_HS40_01	35.0	60.2	71.2	69.6
S12_PM_TP16_HS45_01	11.1	61.2	69.4	66.2
S12_PM_TP16_HS50_01	12.7	61.0	68.3	62.8
S12_PM_TP16_HS55_01	14.0	60.2	68.5	59.5
S12_SS_TP14_HS30_01	42.2	82.8	81.9	87.6
S12_SS_TP14_HS40_01	38.2	73.4	79.2	75.1
S12_SS_TP14_HS50_01	40.0	72.8	75.4	65.5
S12_SS_TP14_HS60_01	42.1	70.5	71.0	60.6

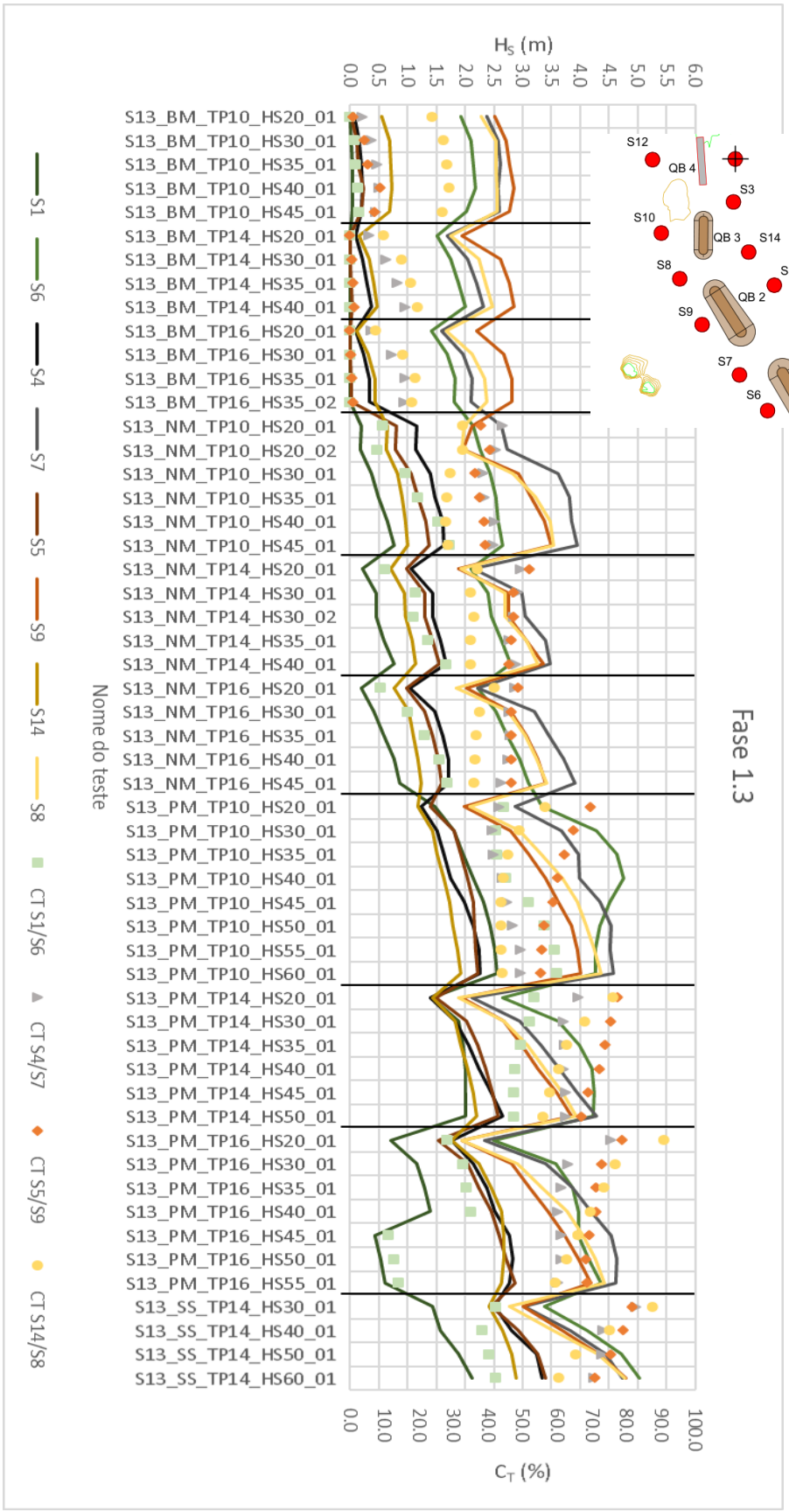


Figura 5.4 - Comparação Barlamar/Sotamar entre os registos das sondas e respetivo C_T na Fase 1.3.

5.3.2. COMPARAÇÃO DOS REGISTOS EM CADA SONDA

A comparação dos registos em cada sonda permite analisar a redução, ou não, da altura de onda provocada pelos quebramares, ou seja, antes e depois da implementação das estruturas, algo que a outra comparação realizada (Barlamar/Sotamar) não permitia, justificando assim a importância desta análise.

Com o intuito de melhor compreender a influência das estruturas na altura de onda registada, foi calculado para cada sonda e para todos os testes realizados, um coeficiente de redução da altura de onda (C_{Red}) igual a:

$$C_{Red} = \frac{H_{Si} - H_{Sf}}{H_{Si}} \tag{5.2}$$

em que H_{Si} representa a altura de onda significativa inicial, ou seja, a altura de onda registada em determinada sonda na fase de testes sem estruturas e H_{Sf} a altura de onda significativa final, que corresponde à altura de onda registada na mesma sonda durante as fases de testes com as estruturas.

A única desvantagem desta análise em comparação com a análise dos registos a barlamar e a sotamar, é o menor número de comparações que é possível realizar uma vez que para os testes sem estruturas foram apenas ensaiados os níveis mais elevados (PM e SS).

5.3.2.1. Análise dos registos da sonda 1

Uma vez que a sonda 1 está localizada a sotamar do QB1, e por isso mais protegida em relação à agitação marítima incidente, é expectável que esta sonda apresente coeficientes de redução mais elevados que as sondas posicionadas a barlamar ou que não se encontrem na zona de sombra dos quebramares.

A análise dos valores do C_{Red} determinados para a Fase 1.2 (Figura 5.5 - Sonda 1: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.Figura 5.5), permite verificar a diminuição desse coeficiente ao longo dos testes realizados, podendo concluir-se que o QB1 tem maior capacidade para redução da altura de onda para condições em que o nível e a altura de onda testados são menores. Comparando os testes realizados para o mesmo nível e altura de onda, verifica-se que o coeficiente de redução é maior para os menores períodos de onda de pico testados. Assim, pela análise da sonda 1, o QB1 tem um comportamento mais favorável para condições em que o nível, a altura de onda e o período de onda de pico são menores.

Nos testes realizados durante a Fase 1.3 (Figura 5.6), verifica-se que o C_{Red} tem valores um pouco diferentes dos registados na Fase 1.2 (Quadro 5.7). Enquanto que para a Fase 1.2, no nível PM e T_P de 10 s, os valores do C_{Red} variam de 46.1% a 31% do primeiro ao último teste, para estas condições, na Fase 1.3, o C_{Red} varia entre 30.2% a 22%. Uma vez que esta é uma sonda que se encontra no alinhamento de um quebramar (QB1), é possível que pequenas diferenças na fase de construção (colocação dos blocos de enrocamento na mesma posição anterior, pequenas diferenças na batimetria, entre outros) entre cada fase de testes sejam as causas para estas diferenças. Durante os testes para o nível de PM e T_P de 14 s, pode-se observar assoreamento a sotamar do QB1 junto ao molhe de Felgueiras, algo que se fez sentir no C_{Red} associado à sonda 1, que se localiza precisamente a sotamar do QB1. A referida acumulação de sedimentos continuou a aumentar até ao ponto de nos testes da Fase 1.3, nível PM, T_P de 16 s surgirem valores do coeficiente de redução com valores anormais (69.7%, 86.8 % e 84.4). Estes

valores são algo díspares daqueles que vinham a ser obtidos nesta fase e na fase anterior. Analisando os dados obtidos para os referidos testes, pode-se observar que para o teste (S13_PM_TP16_HS45_01) com maior C_{Red} (86.8%) a altura de onda registada pela sonda 1 na Fase 1.3 foi de 0.44 m, quando estavam a ser geradas ondas de 4.5 m. Este é um valor anormal, mesmo tendo em consideração a dissipação introduzida pelo QB1. A observação do registo de vídeo dos referidos testes, leva a concluir que o assoreamento a sotamar do QB1 desenvolveu-se de tal forma que acabou por soterrar a haste da sonda e assim influenciar os dados obtidos pela mesma.

Quadro 5.7 - Sonda 1: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m.

Nome do Teste	H_S (m)			C_{Red} (%)	
	F1.1	F1.2	F1.3	F1.2	F1.3
S_PM_TP10_HS20_01	2.13	1.15	1.49	46.1	30.2
S_PM_TP10_HS30_01	2.69	1.49	1.81	44.7	32.8
S_PM_TP10_HS35_01	2.85	1.64	1.97	42.4	30.8
S_PM_TP10_HS40_01	2.93	1.82	2.15	38.0	26.6
S_PM_TP10_HS45_01	3.08	1.96	2.33	36.3	24.4
S_PM_TP10_HS50_01	3.15	2.11	2.45	33.1	22.4
S_PM_TP10_HS55_01	3.22	2.16	2.52	32.8	21.6
S_PM_TP10_HS60_01	3.28	2.26	2.56	31.0	22.0
S_PM_TP14_HS20_01	2.09	1.24	1.41	40.4	32.4
S_PM_TP14_HS30_01	2.76	1.82	1.89	34.1	31.6
S_PM_TP14_HS35_01	3.02	2.07	1.97	31.4	34.8
S_PM_TP14_HS40_01	3.21	2.36	2.00	26.6	37.6
S_PM_TP14_HS45_01	3.30	2.50	2.01	24.3	39.3
S_PM_TP14_HS50_01	3.37	2.59	2.01	23.2	40.5
S_PM_TP16_HS20_01	2.33	1.37	0.71	41.2	69.7
S_PM_TP16_HS30_01	2.82	1.97	1.17	30.1	58.6
S_PM_TP16_HS35_01	3.09	2.15	1.29	30.3	58.1
S_PM_TP16_HS40_01	3.25	2.31	1.39	28.8	57.2
S_PM_TP16_HS45_01	3.32	2.44	0.44	26.6	86.8
S_PM_TP16_HS50_01	3.38	2.41	0.53	28.7	84.4
S_SS_TP14_HS30_01	3.54	2.09	1.43	41.1	59.6
S_SS_TP14_HS40_01	4.03	2.27	1.58	43.8	60.9
S_SS_TP14_HS50_01	4.22	2.45	1.89	41.9	55.3
S_SS_TP14_HS60_01	4.44	2.43	2.12	45.3	52.2

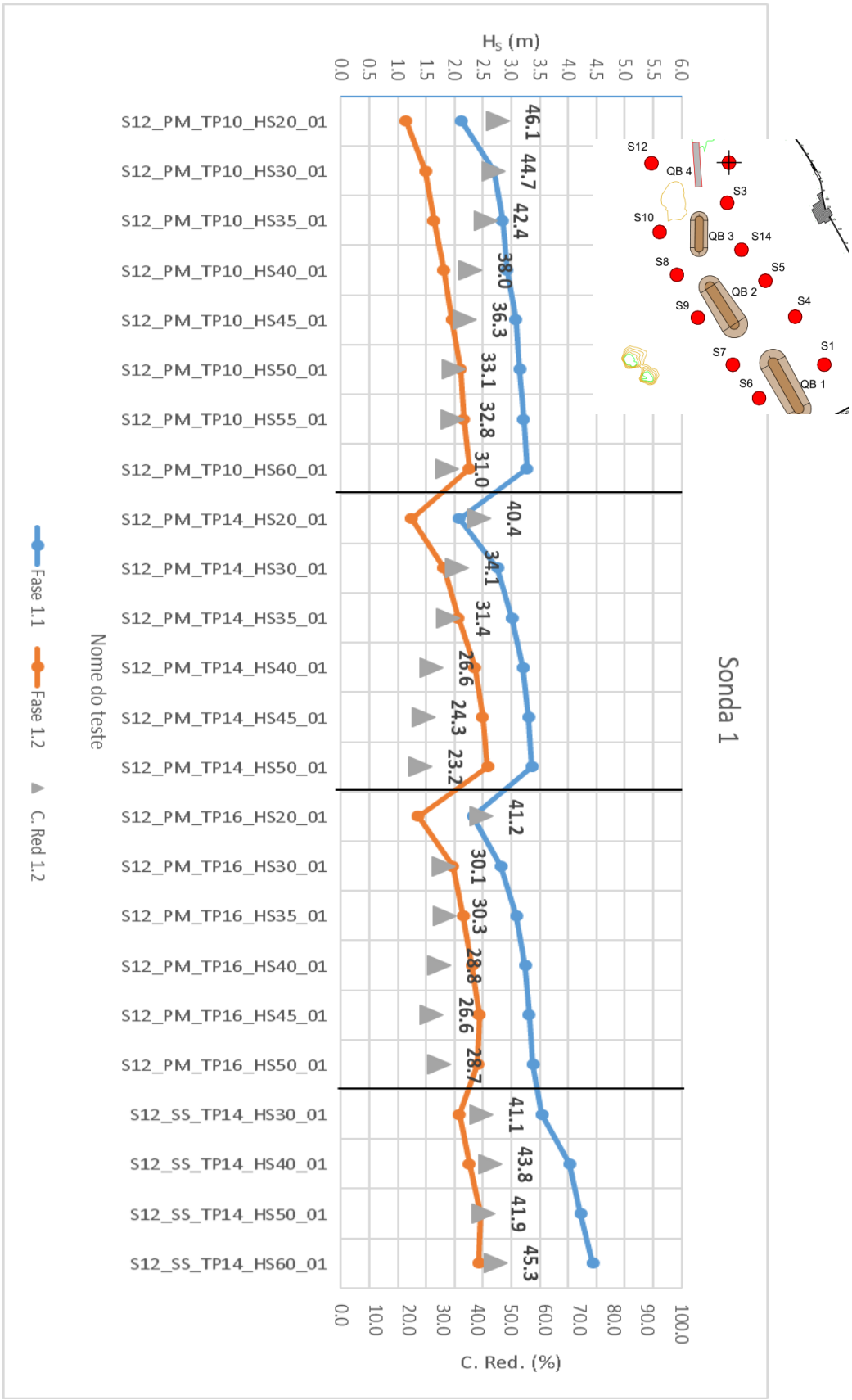


Figura 5.5 - Sonda 1: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

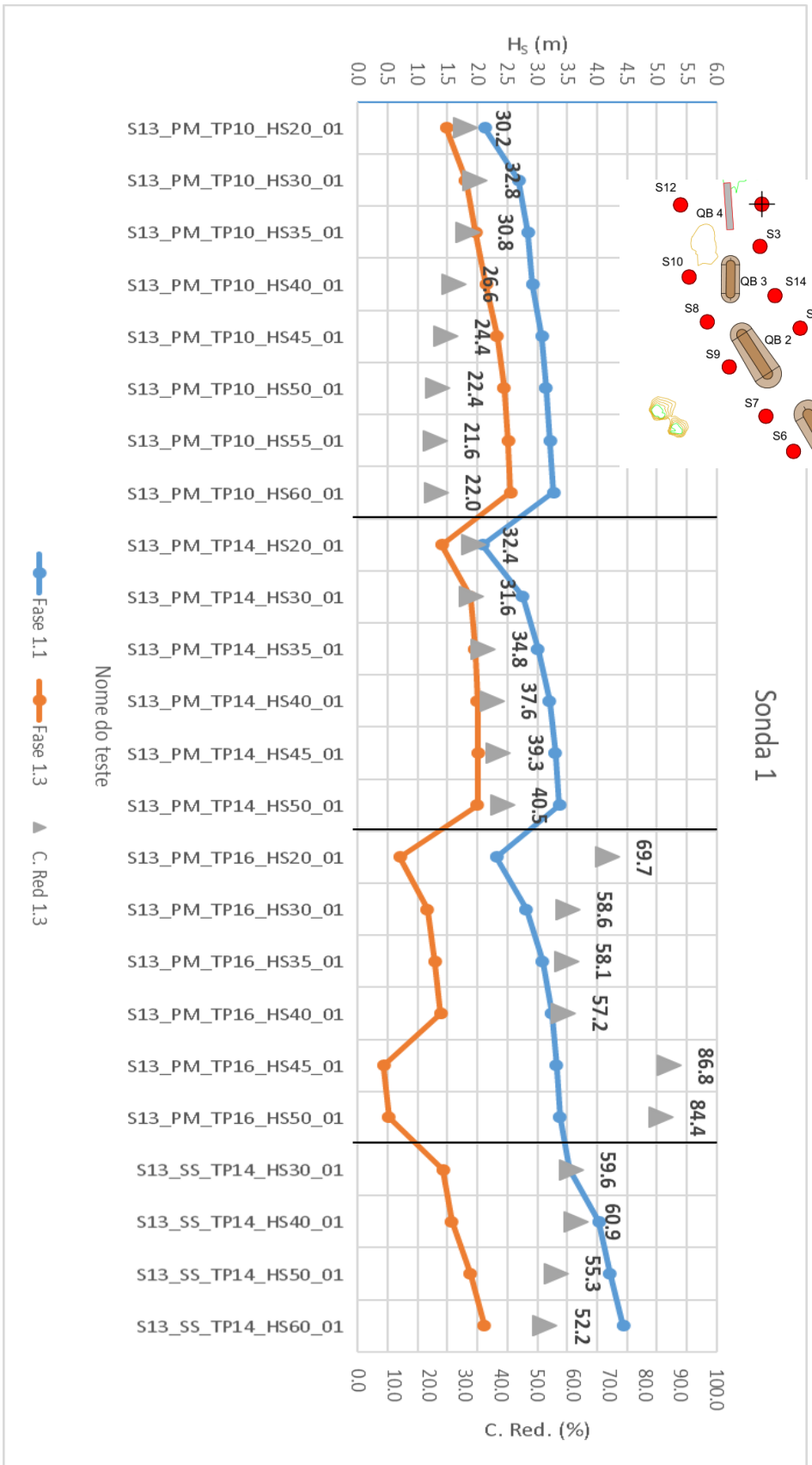


Figura 5.6 - Sonda 1: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

5.3.2.2. Análise dos registos da sonda 4

Como a sonda S4 se localiza a sotamar dos quebramares, mas num alinhamento entre o quebramar QB1 e o QB2, é expectável que os C_{Red} obtidos para esta sonda sejam menores do que os obtidos para uma sonda que esteja numa zona abrigada por um quebramar, como é o caso da sonda 1. Na Fase 1.2 (Figura 5.7), e tendo como referência a sonda 1, os C_{Red} obtidos são menores tendo, ainda assim, sido obtido o valor de 36.1% no teste S12_PM_TP10_HS40_01. Observando a Figura 5.7 é possível perceber que existe uma tendência na evolução do C_{Red}: o C_{Red} é menor para as alturas de onda mínima e máxima testadas e nos três T_P testados (10, 14 e 16 s) para o nível de PM, o C_{Red} atingiu sempre o seu máximo no teste para H_S de 4 m. Na Fase 1.3, os C_{Red} obtidos são menores do que na Fase 1.2 (Quadro 5.8), algo que pode ser explicado pelas mesmas razões mencionadas na análise dos registos da sonda 1: pequenas diferenças na construção dos quebramares (neste caso o QB1 e QB2 que são os que exercem maior influência sobre esta sonda). Nesta fase, os valores mais elevados do C_{Red} foram obtidos nos testes realizados para H_S de 4 m, tal como na Fase 1.2, por outro lado manteve-se a tendência de este coeficiente ter um ligeiro aumento durante os primeiros testes realizados para cada T_P, seguindo-se um decréscimo para H_S maiores (Figura 5.8).

Quadro 5.8 - Sonda 4: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m.

Nome do Teste	H_S (m)			C_{Red} (%)	
	F1.1	F1.2	F1.3	F1.2	F1.3
S_PM_TP10_HS20_01	1.66	1.43	1.24	13.6	25.3
S_PM_TP10_HS30_01	2.22	1.54	1.52	30.8	31.8
S_PM_TP10_HS35_01	2.54	1.64	1.64	35.5	35.5
S_PM_TP10_HS40_01	2.62	1.67	1.76	36.1	32.8
S_PM_TP10_HS45_01	2.67	1.77	1.98	34.0	26.0
S_PM_TP10_HS50_01	2.67	1.84	2.14	31.1	20.0
S_PM_TP10_HS55_01	2.64	1.94	2.24	26.6	15.2
S_PM_TP10_HS60_01	2.64	1.98	2.26	24.8	14.5
S_PM_TP14_HS20_01	1.81	1.51	1.40	16.4	22.2
S_PM_TP14_HS30_01	2.33	1.84	1.83	21.0	21.4
S_PM_TP14_HS35_01	2.51	1.95	2.06	22.4	17.9
S_PM_TP14_HS40_01	2.65	2.05	2.24	22.9	15.5
S_PM_TP14_HS45_01	2.72	2.19	2.46	19.3	9.4
S_PM_TP14_HS50_01	2.69	2.31	2.67	14.4	1.0
S_PM_TP16_HS20_01	1.94	1.80	1.77	7.2	8.8
S_PM_TP16_HS30_01	2.48	2.15	2.15	13.3	13.6
S_PM_TP16_HS35_01	2.72	2.31	2.37	15.0	12.8
S_PM_TP16_HS40_01	2.94	2.41	2.53	18.1	13.9
S_PM_TP16_HS45_01	2.99	2.58	2.78	13.7	7.0
S_PM_TP16_HS50_01	2.98	2.69	2.83	9.7	5.0
S_SS_TP14_HS30_01	2.68	2.36	2.51	11.8	6.2
S_SS_TP14_HS40_01	3.43	2.91	2.82	15.1	17.9
S_SS_TP14_HS50_01	3.59	2.91	3.24	19.0	9.7
S_SS_TP14_HS60_01	3.45	3.08	3.34	10.8	3.3

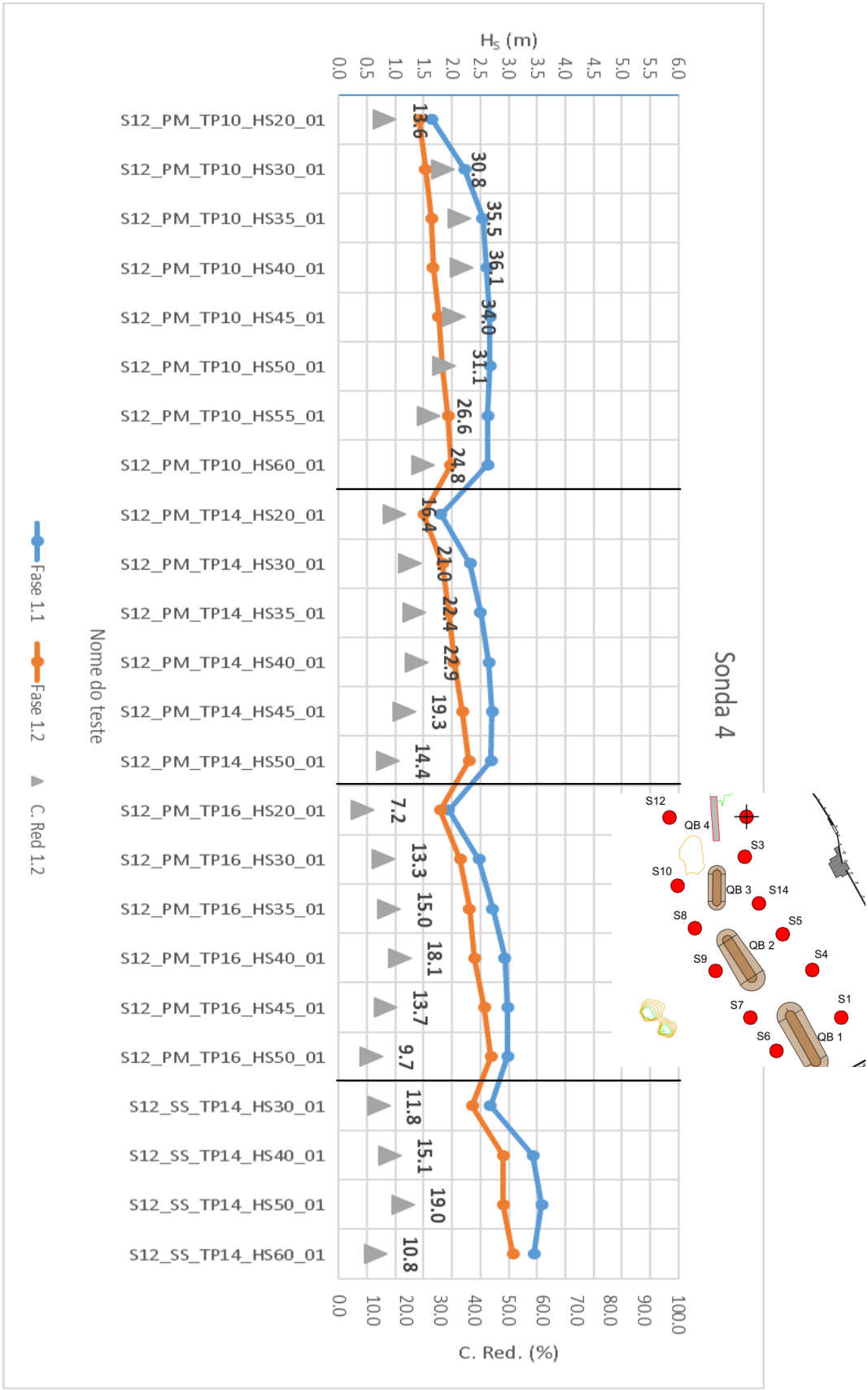


Figura 5.7 - Sonda 4: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

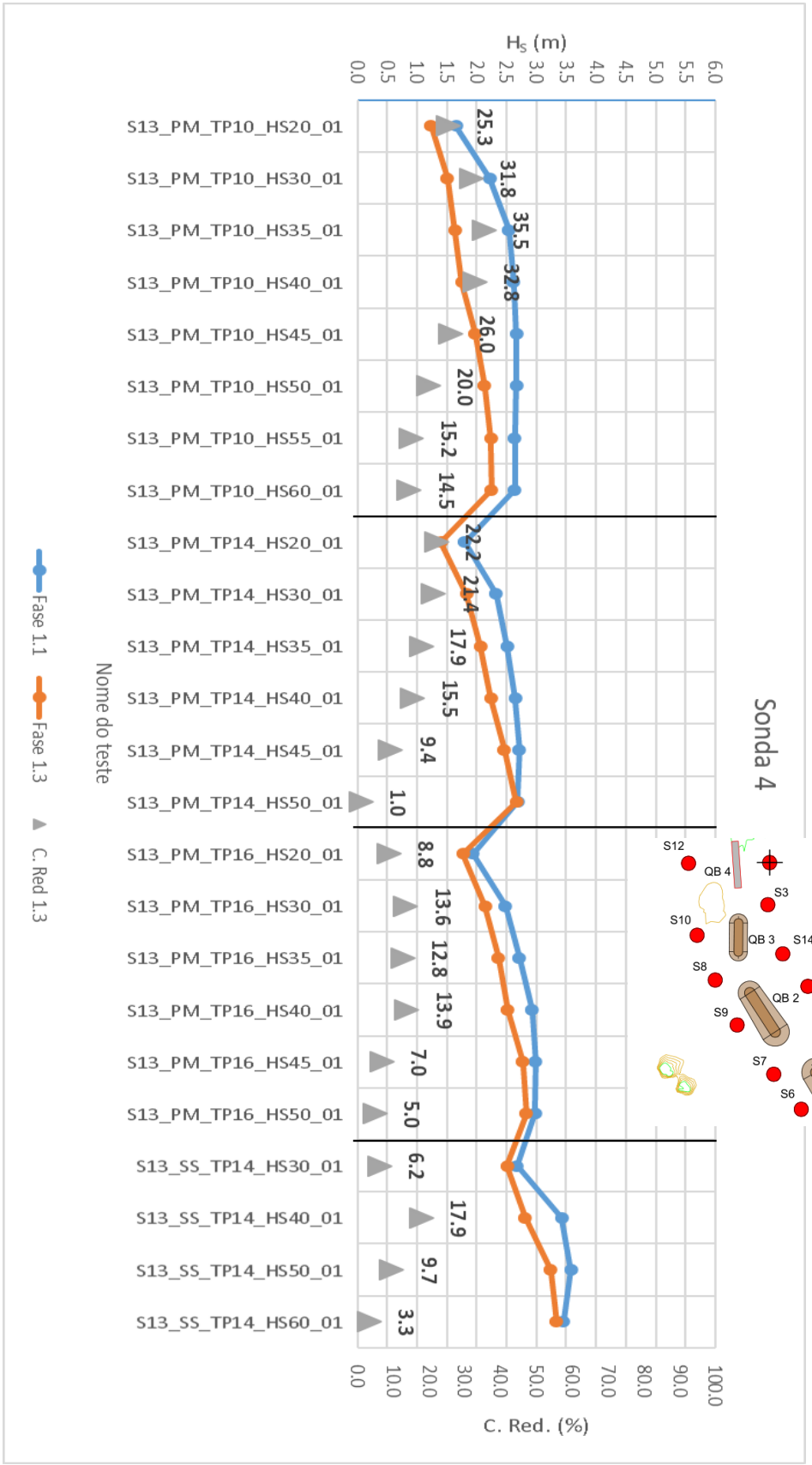


Figura 5.8 - Sonda 4: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

5.3.2.3. Análise dos registos da sonda 5

Na Fase 1.2 (Figura 5.9) dos testes, a sonda 5 apresenta registos que resultam em C_{Red} razoáveis para H_S menores, com tendência para diminuir durante a sucessão de testes em que H_S a testar vai aumentando, algo expectável que ocorresse nas sondas a sotamar dos quebramares que seriam construídos. No entanto, sabendo que esta é uma sonda localizada a sotamar dos quebramares mais concretamente do QB2, a obtenção de valores do C_{Red} perto do zero ou até mesmo negativos (e.g.: C_{Red} do teste S12_PM_TP10_HS50_01 foi de -1.9%) significa que houve aumento da altura de onda registada, mas dado o valor tão reduzido, este aspeto foi desvalorizado.

Quadro 5.9 - Sonda 5: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

Nome do Teste	H_S (m)			C_{Red} (%)	
	F1.1	F1.2	F1.3	F1.2	F1.3
S_PM_TP10_HS20_01	1.73	1.17	1.39	32.3	19.7
S_PM_TP10_HS30_01	1.88	1.51	1.81	19.8	3.8
S_PM_TP10_HS35_01	1.94	1.77	1.93	9.0	0.8
S_PM_TP10_HS40_01	2.02	1.91	2.04	5.2	-1.2
S_PM_TP10_HS45_01	1.99	2.02	2.14	-1.5	-7.5
S_PM_TP10_HS50_01	2.04	2.07	2.16	-1.9	-6.0
S_PM_TP10_HS55_01	2.09	2.11	2.19	-0.9	-4.9
S_PM_TP10_HS60_01	2.14	2.10	2.22	1.8	-3.9
S_PM_TP14_HS20_01	1.87	1.48	1.51	20.5	19.3
S_PM_TP14_HS30_01	2.14	1.88	2.02	12.5	5.8
S_PM_TP14_HS35_01	2.25	2.04	2.22	9.3	1.7
S_PM_TP14_HS40_01	2.30	2.15	2.36	6.7	-2.4
S_PM_TP14_HS45_01	2.31	2.23	2.48	3.2	-7.6
S_PM_TP14_HS50_01	2.35	2.29	2.58	2.2	-9.9
S_PM_TP16_HS20_01	1.88	1.45	1.53	22.6	18.4
S_PM_TP16_HS30_01	2.27	1.95	2.05	13.9	9.5
S_PM_TP16_HS35_01	2.40	2.14	2.24	11.0	6.8
S_PM_TP16_HS40_01	2.49	2.29	2.46	8.1	1.5
S_PM_TP16_HS45_01	2.51	2.43	2.59	3.2	-3.1
S_PM_TP16_HS50_01	2.58	2.56	2.72	0.8	-5.5
S_SS_TP14_HS30_01	2.84	2.35	2.46	17.2	13.3
S_SS_TP14_HS40_01	3.16	2.78	2.93	12.2	7.4
S_SS_TP14_HS50_01	3.26	3.12	3.26	4.2	0.1
S_SS_TP14_HS60_01	3.36	3.21	3.41	4.6	-1.2

Os resultados obtidos na sonda 5 para a Fase 1.3 (Figura 5.10) dos testes apresentam um comportamento idêntico aos registados na mesma sonda durante a Fase 1.2 dos testes. O C_{Red}, tal como na Fase 1.2, apresenta valores superiores para os testes com H_S menores (H_S de 2 m) revelando tendência para diminuir durante os teste para H_S mais elevados. Uma vez mais, obtiveram-se valores do C_{Red} negativos (e.g.: C_{Red} do teste S13_PM_TP14_HS50_01 foi de -9.9%) (Quadro 5.9) mas de uma forma mais

acentuada do que na Fase 1.2, algo que não era expectável pois significa que houve um aumento da altura de onda registada numa sonda a sotamar dos quebramares, quando o principal objetivo dos quebramares é a redução da altura de onda. Este acontecimento é justificado por diferenças na batimetria junto à sonda e imediatamente a sotamar da mesma, uma vez que este é um modelo de fundos móveis, resultando numa maior profundidade de água na sonda 5 para a Fase 1.3 e assim aumentando a altura da onda máxima que atinge a referida sonda sem quebrar.

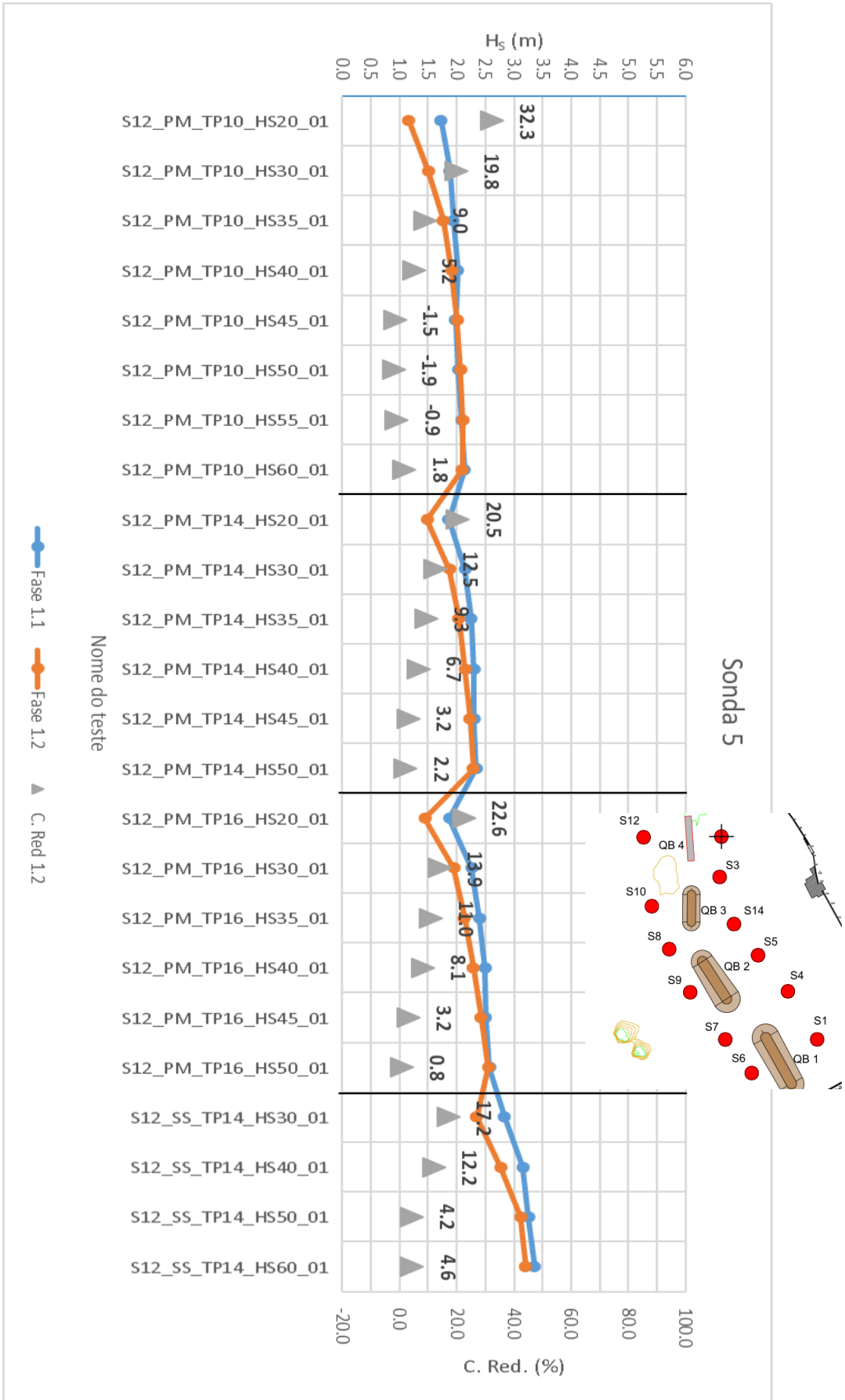


Figura 5.9 - Sonda 5: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

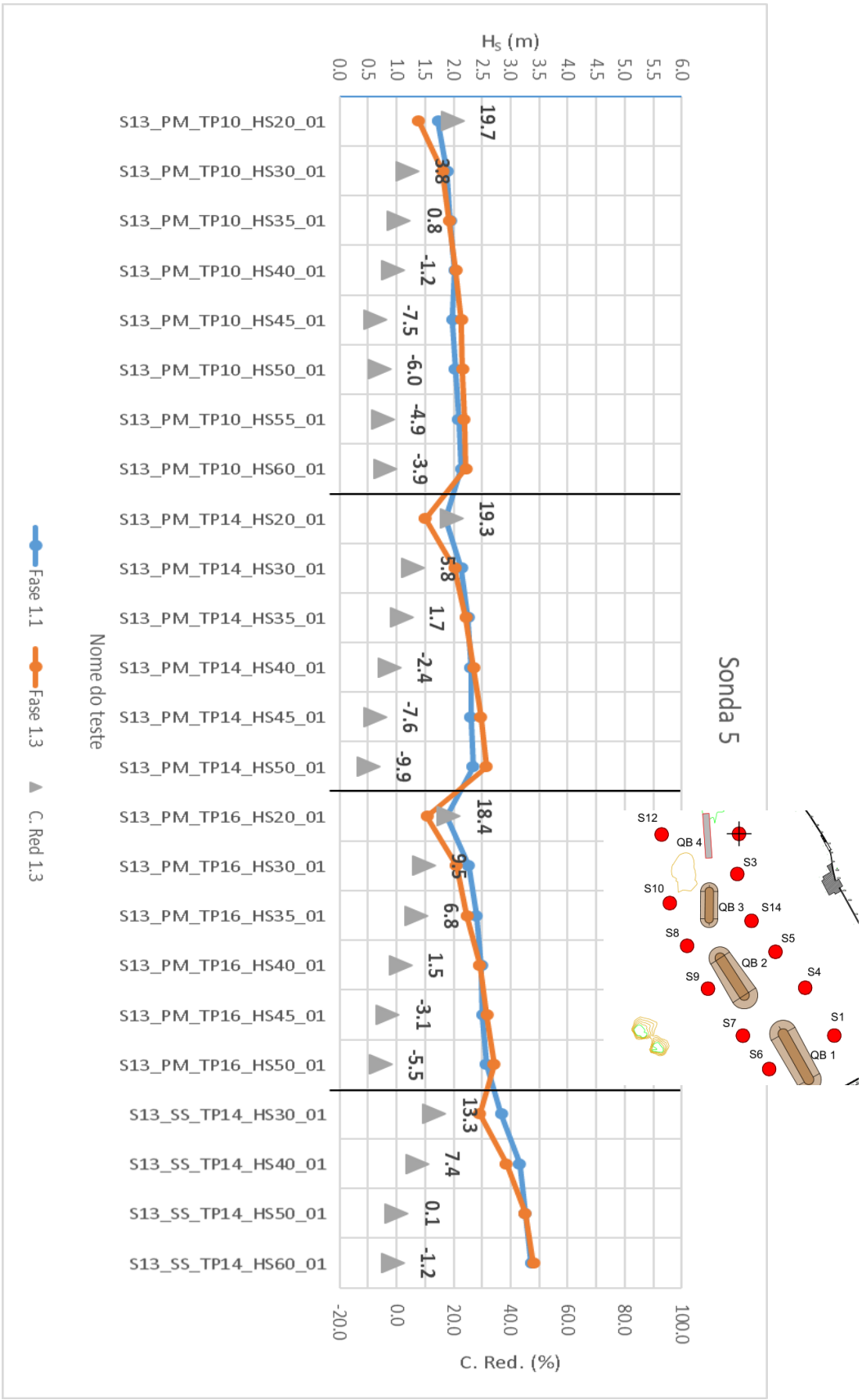


Figura 5.10 - Sonda 5: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

5.3.2.4. Análise dos registos da sonda 6

A sonda 6 localiza-se a barlamar dos quebramares, pelo que seria expectável um aumento da altura de onda nesta sonda. Avaliando os valores do C_{Red} registados nesta sonda é desde logo evidente o aumento da altura de onda registada pois todos os valores do C_{Red} são negativos (Figura 5.11 e Figura 5.12). Este aumento da altura de onda registada deve-se à reflexão resultante da introdução dos quebramares na praia. O C_{Red} apresenta valores menores para menores valores de H_S testados, aumentando ao longo dos testes devido ao também aumento de H_S, permitindo concluir que o quebramar 1 apresenta maior reflexão para menores H_S testados existindo ainda a influencia do Molhe de Felgueiras, pela sua proximidade a esta sonda.

Na Fase 1.3 dos testes, o C_{Red} apresenta um comportamento bastante semelhante ao observado na Fase 1.2, mas com valores menores, o que pode traduzir a maior reflexão por parte dos quebramares, mais concretamente o QB1.

Quadro 5.10 - Sonda 6: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

Nome do Teste	H_S (m)			C_{Red} (%)	
	F1.1	F1.2	F1.3	F1.2	F1.3
S_PM_TP10_HS20_01	2.43	2.97	3.34	-22.2	-37.3
S_PM_TP10_HS30_01	3.50	4.13	4.29	-18.0	-22.4
S_PM_TP10_HS35_01	3.75	4.56	4.64	-21.7	-23.9
S_PM_TP10_HS40_01	3.91	4.72	4.75	-21.0	-21.7
S_PM_TP10_HS45_01	3.93	4.65	4.52	-18.4	-14.8
S_PM_TP10_HS50_01	4.06	4.49	4.35	-10.6	-7.1
S_PM_TP10_HS55_01	3.99	4.27	4.27	-7.0	-6.9
S_PM_TP10_HS60_01	3.92	4.15	4.26	-5.8	-8.7
S_PM_TP14_HS20_01	2.10	2.71	2.65	-29.4	-26.6
S_PM_TP14_HS30_01	2.87	3.63	3.62	-26.6	-26.1
S_PM_TP14_HS35_01	3.39	3.99	4.00	-18.0	-18.1
S_PM_TP14_HS40_01	3.65	4.20	4.20	-15.1	-15.0
S_PM_TP14_HS45_01	3.85	4.35	4.25	-12.9	-10.4
S_PM_TP14_HS50_01	3.82	4.38	4.24	-14.8	-10.9
S_PM_TP16_HS20_01	2.33	2.44	2.51	-4.8	-7.6
S_PM_TP16_HS30_01	3.02	3.41	3.58	-12.7	-18.5
S_PM_TP16_HS35_01	3.40	3.70	3.87	-8.8	-13.6
S_PM_TP16_HS40_01	3.70	3.91	3.97	-5.7	-7.0
S_PM_TP16_HS45_01	3.85	4.06	3.96	-5.6	-3.1
S_PM_TP16_HS50_01	3.89	4.11	4.15	-5.8	-6.7
S_SS_TP14_HS30_01	3.19	3.44	3.39	-8.0	-6.1
S_SS_TP14_HS40_01	4.07	4.10	4.13	-0.7	-1.4
S_SS_TP14_HS50_01	4.42	4.74	4.72	-7.2	-6.6
S_SS_TP14_HS60_01	4.26	4.98	5.03	-17.1	-18.2

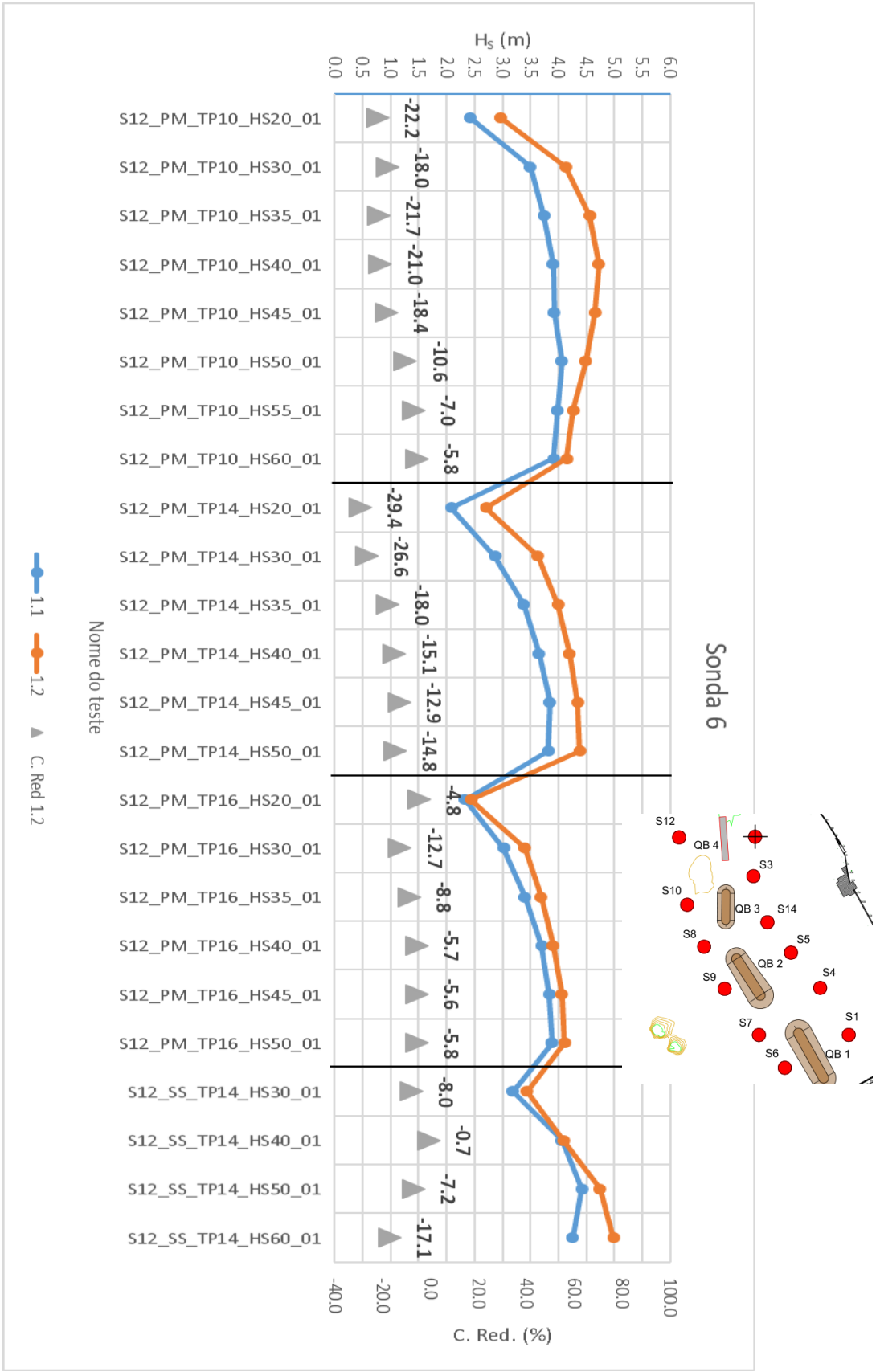


Figura 5.11 - Sonda 6: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

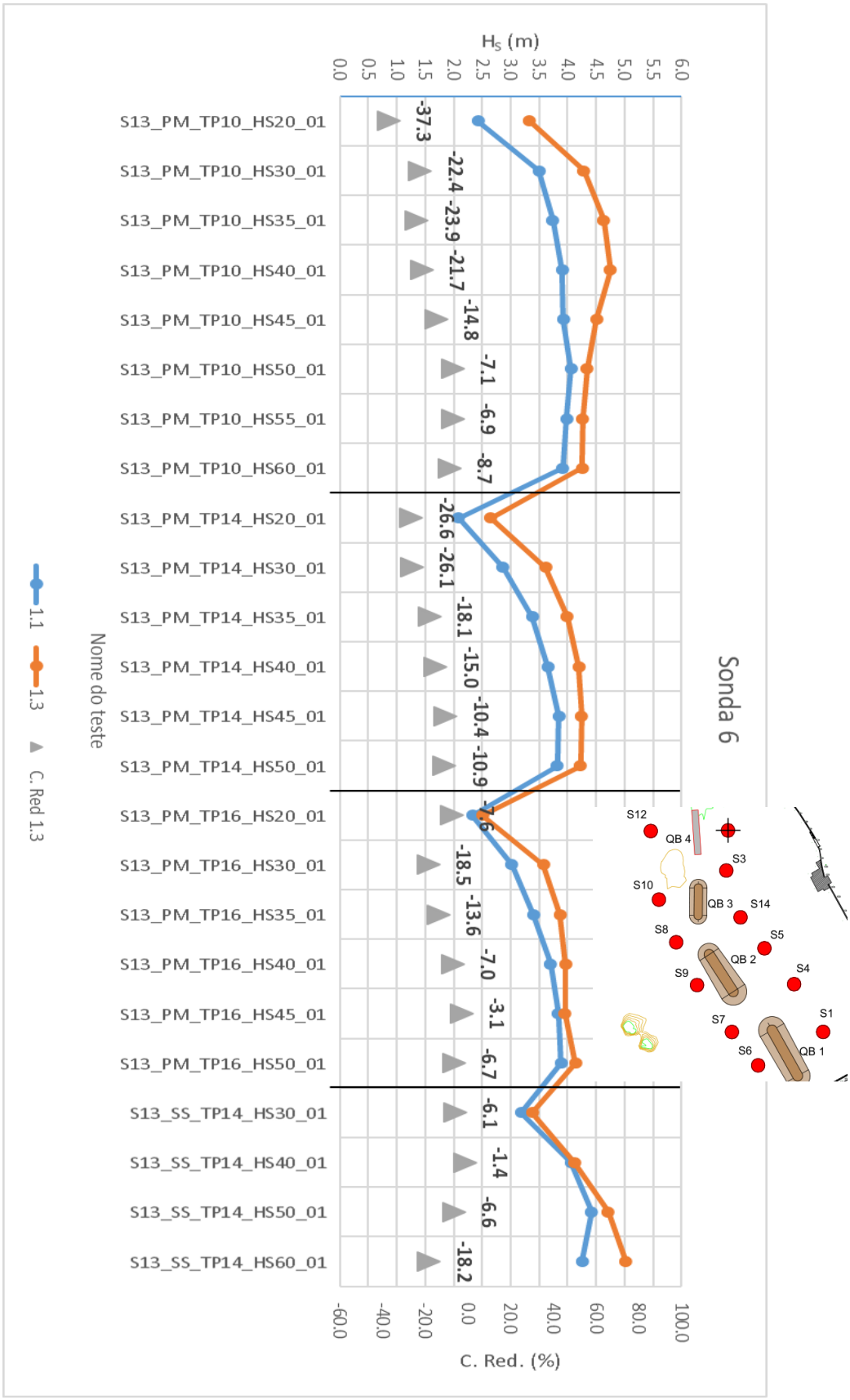


Figura 5.12 - Sonda 6: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

5.3.2.5.Sonda 7

À semelhança da S6, S7 é também uma sonda que se encontra numa posição a barlamar dos quebramares construídos. Assim, é expectável um aumento da altura de onda registada pela mesma, devido aos efeitos de reflexão introduzidos pelos quebramares construídos. Os valores do C_{Red} (Quadro 5.11) obtidos comprovam-no pois, grande parte dos valores obtidos são negativos o que implica o aumento da altura de onda registada. Em alguns testes, o valor do C_{Red} foi positivo o que envolve a diminuição da altura de onda, algo que não era expectável por se tratar de uma sonda localizada a barlamar dos quebramares. A justificação pode estar na posição da S7, pois esta localiza-se na abertura entre os QB1 e QB2 e por isso menos exposta a reflexões dos quebramares. Na Fase 1.3 (Figura 5.14) existem também valores do C_{Red} positivos e que podem ser justificados pela mesma razão mencionada anteriormente. Comparando os valores do C_{Red} da Fase 1.2 com da Fase 1.3, na Fase 1.2 (Figura 5.13) era maior para maiores valores de H_S, pois para maiores valores de H_S o quebramar não tem tanta influência e assim existem menos reflexões, no entanto, na Fase 1.3 o C_{Red} diminui para maiores valores de H_S, justificado por diferenças na batimetria, sendo que este modelo foi construído em fundos móveis alterando a profundidade de água e assim influenciando na máxima altura de onda que atinge a estrutura.

Quadro 5.11 - Sonda 7: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

Nome do Teste	H_S (m)			C_{Red} (%)	
	F1.1	F1.2	F1.3	F1.2	F1.3
S_PM_TP10_HS20_01	2.43	2.97	2.86	-22.1	-17.8
S_PM_TP10_HS30_01	3.50	3.73	3.68	-6.4	-4.9
S_PM_TP10_HS35_01	3.75	4.03	3.97	-7.6	-5.8
S_PM_TP10_HS40_01	3.91	4.08	3.99	-4.4	-2.0
S_PM_TP10_HS45_01	3.93	3.88	4.35	1.3	-10.7
S_PM_TP10_HS50_01	4.06	3.90	4.54	3.9	-11.7
S_PM_TP10_HS55_01	3.99	4.05	4.52	-1.5	-13.4
S_PM_TP10_HS60_01	3.92	3.95	4.57	-0.8	-16.6
S_PM_TP14_HS20_01	2.10	2.27	2.13	-8.5	-1.4
S_PM_TP14_HS30_01	2.87	3.00	2.96	-4.4	-3.1
S_PM_TP14_HS35_01	3.39	3.30	3.32	2.5	2.1
S_PM_TP14_HS40_01	3.65	3.45	3.63	5.7	0.6
S_PM_TP14_HS45_01	3.85	3.55	3.95	7.8	-2.5
S_PM_TP14_HS50_01	3.82	3.68	4.28	3.6	-12.0
S_PM_TP16_HS20_01	2.33	2.38	2.34	-2.1	-0.4
S_PM_TP16_HS30_01	3.02	3.30	3.40	-9.0	-12.3
S_PM_TP16_HS35_01	3.40	3.64	3.88	-7.0	-14.1
S_PM_TP16_HS40_01	3.70	3.82	4.20	-3.1	-13.3
S_PM_TP16_HS45_01	3.85	4.00	4.54	-4.1	-18.0
S_PM_TP16_HS50_01	3.89	4.10	4.64	-5.4	-19.4
S_SS_TP14_HS30_01	3.19	3.08	3.03	3.4	4.9
S_SS_TP14_HS40_01	4.07	3.99	3.84	1.9	5.7
S_SS_TP14_HS50_01	4.42	4.17	4.45	5.8	-0.7
S_SS_TP14_HS60_01	4.26	4.43	4.74	-4.0	-11.3

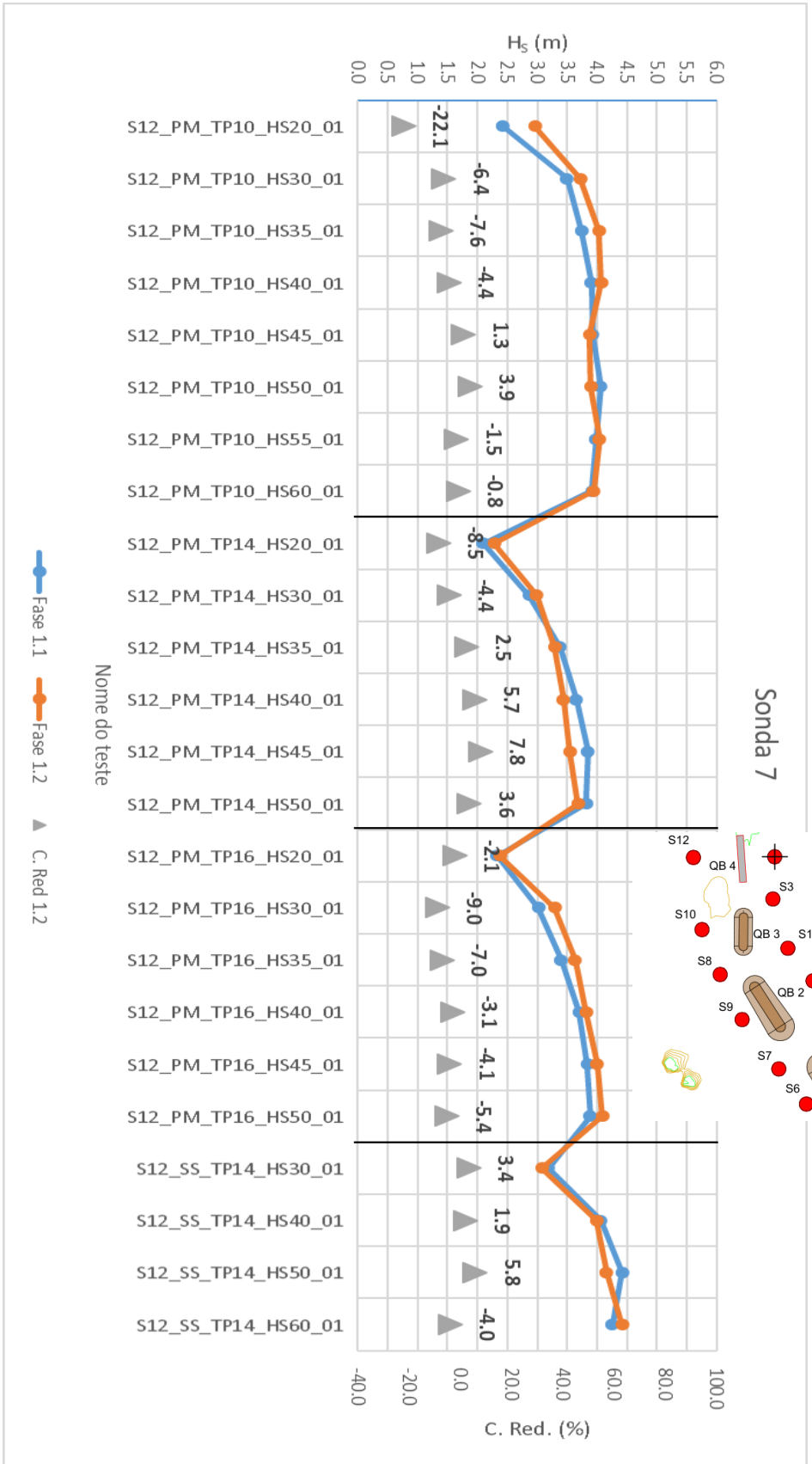


Figura 5.13 - Sonda 7: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

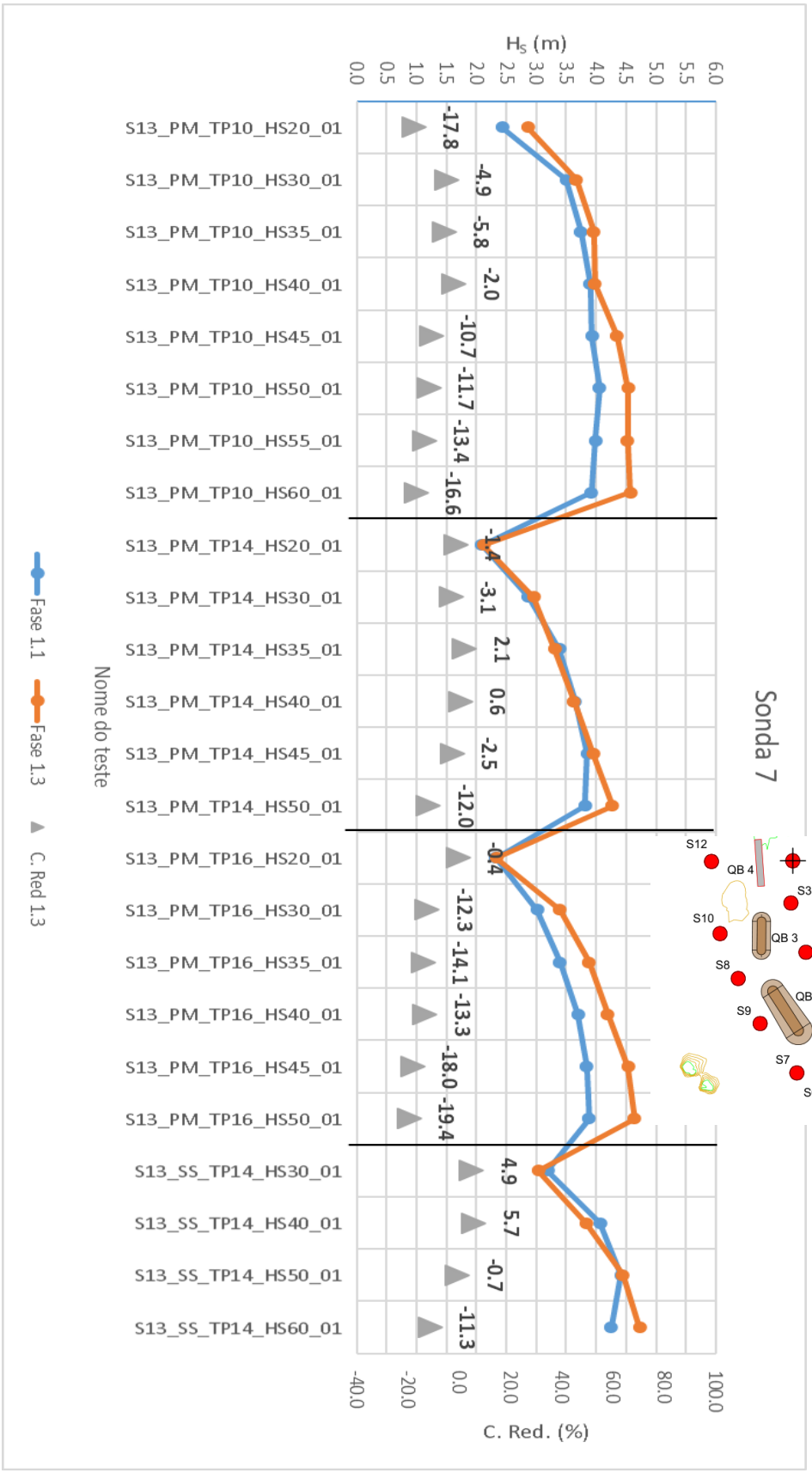


Figura 5.14 - Sonda 7: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

5.3.2.6.Sonda 8

Identicamente à sonda 7, a sonda 8 é uma sonda posicionada a barlamar dos quebramares, mais concretamente num alinhamento entre o QB2 e o QB3. A existência de valores positivos do C_{Red}, essencialmente para valores de H_S menores, foi um aspeto inesperado pois esta é uma sonda posicionada a barlamar dos quebramares e por isso era expectável que houvesse um aumento do nível de agitação registado, tal como se verifica para H_S maiores (Quadro 5.12). A introdução dos quebramares, aliada ao facto de este ser um modelo em fundos móveis, tem grande influência no desenvolvimento da batimetria, que por sua vez influencia a agitação marítima. Uma vez que a sonda 8 está localizada a barlamar dos quebramares na abertura entre o quebramar QB2 e QB3, a introdução dos quebramares pode criar uma corrente de retorno precisamente entre estes quebramares, o que pode resultar na elevação do nível de água neste local, além de influenciar a batimetria e posteriormente a agitação marítima incidente neste local, sendo esta a causa para a elevação do nível de agitação registado na sonda 8. Analisando os gráficos da Figura 5.15 e Figura 5.16 , referentes à comparação dos registos da Fase 1.1 com os da Fase 1.2 e 1.3 respetivamente, é possível observar que o C_{Red} é maior para T_P maiores, com tendência para diminuir à medida que se aumenta o H_S gerado.

Quadro 5.12 - Sonda 8: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

Nome do Teste	H_S (m)			C_{Red} (%)	
	F1.1	F1.2	F1.3	F1.2	F1.3
S_PM_TP10_HS20_01	2.03	1.81	2.09	10.9	-2.9
S_PM_TP10_HS30_01	2.70	2.60	2.95	3.8	-9.1
S_PM_TP10_HS35_01	2.84	3.33	3.32	-17.2	-17.0
S_PM_TP10_HS40_01	3.29	3.82	3.70	-15.9	-12.4
S_PM_TP10_HS45_01	3.43	4.10	3.96	-19.5	-15.5
S_PM_TP10_HS50_01	3.57	4.28	4.11	-19.8	-15.2
S_PM_TP10_HS55_01	3.67	4.36	4.25	-18.9	-15.9
S_PM_TP10_HS60_01	3.70	4.41	4.36	-19.0	-17.7
S_PM_TP14_HS20_01	2.19	1.90	1.89	13.3	13.7
S_PM_TP14_HS30_01	2.98	2.77	2.68	6.9	10.1
S_PM_TP14_HS35_01	3.18	3.24	3.08	-1.8	3.1
S_PM_TP14_HS40_01	3.30	3.55	3.38	-7.4	-2.4
S_PM_TP14_HS45_01	3.55	3.86	3.70	-8.8	-4.3
S_PM_TP14_HS50_01	3.73	4.07	3.94	-8.9	-5.6
S_PM_TP16_HS20_01	2.44	2.00	1.95	17.8	20.1
S_PM_TP16_HS30_01	3.38	2.97	2.92	12.0	13.8
S_PM_TP16_HS35_01	3.48	3.43	3.35	1.5	3.7
S_PM_TP16_HS40_01	3.64	3.78	3.78	-3.7	-3.7
S_PM_TP16_HS45_01	3.75	4.03	4.05	-7.7	-8.2
S_PM_TP16_HS50_01	3.83	4.19	4.26	-9.5	-11.3
S_SS_TP14_HS30_01	2.94	2.74	2.77	7.0	6.0
S_SS_TP14_HS40_01	3.67	3.89	3.55	-6.0	3.3
S_SS_TP14_HS50_01	4.20	4.35	4.30	-3.7	-2.6
S_SS_TP14_HS60_01	4.49	4.75	4.77	-5.8	-6.3

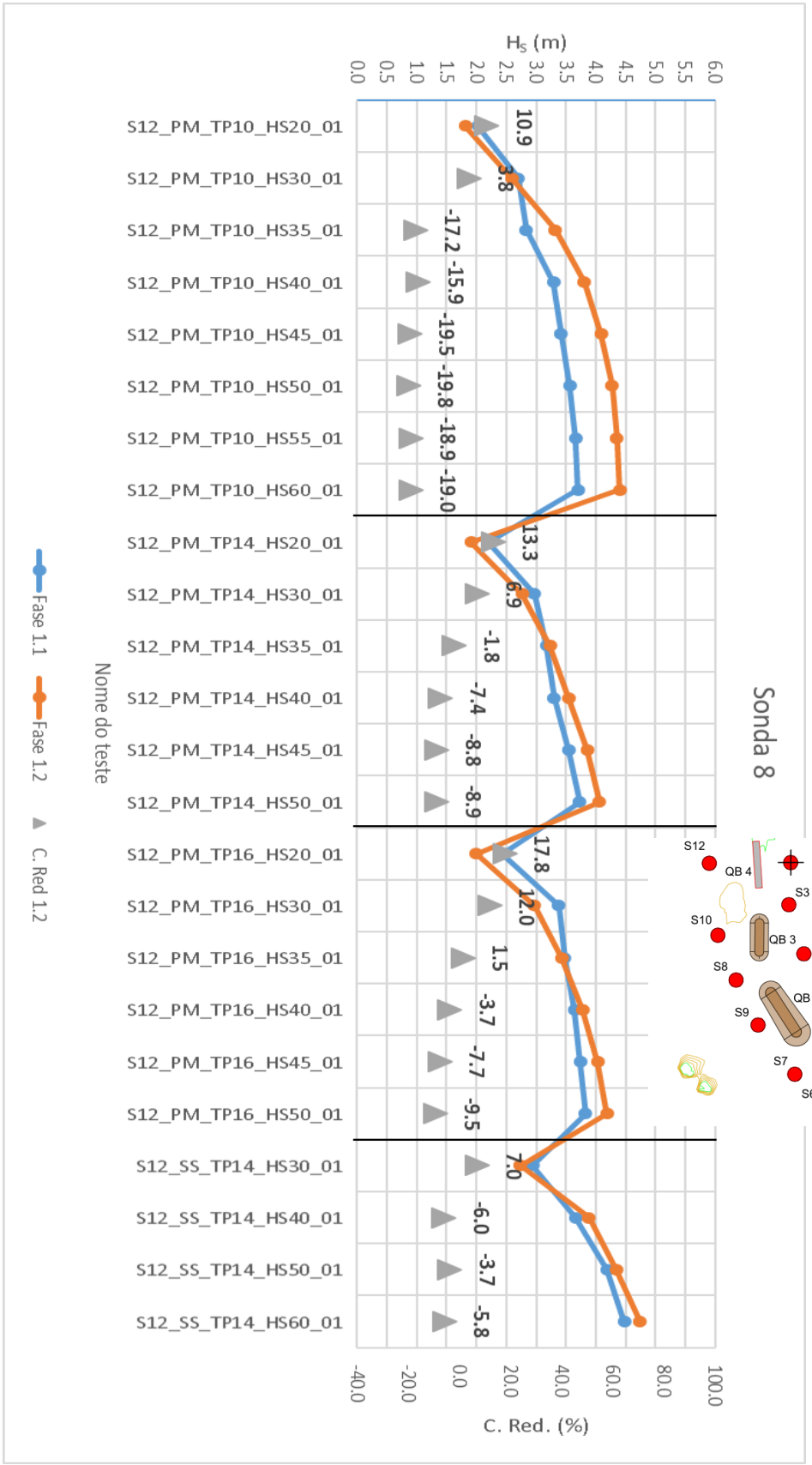


Figura 5.15 - Sonda 8: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

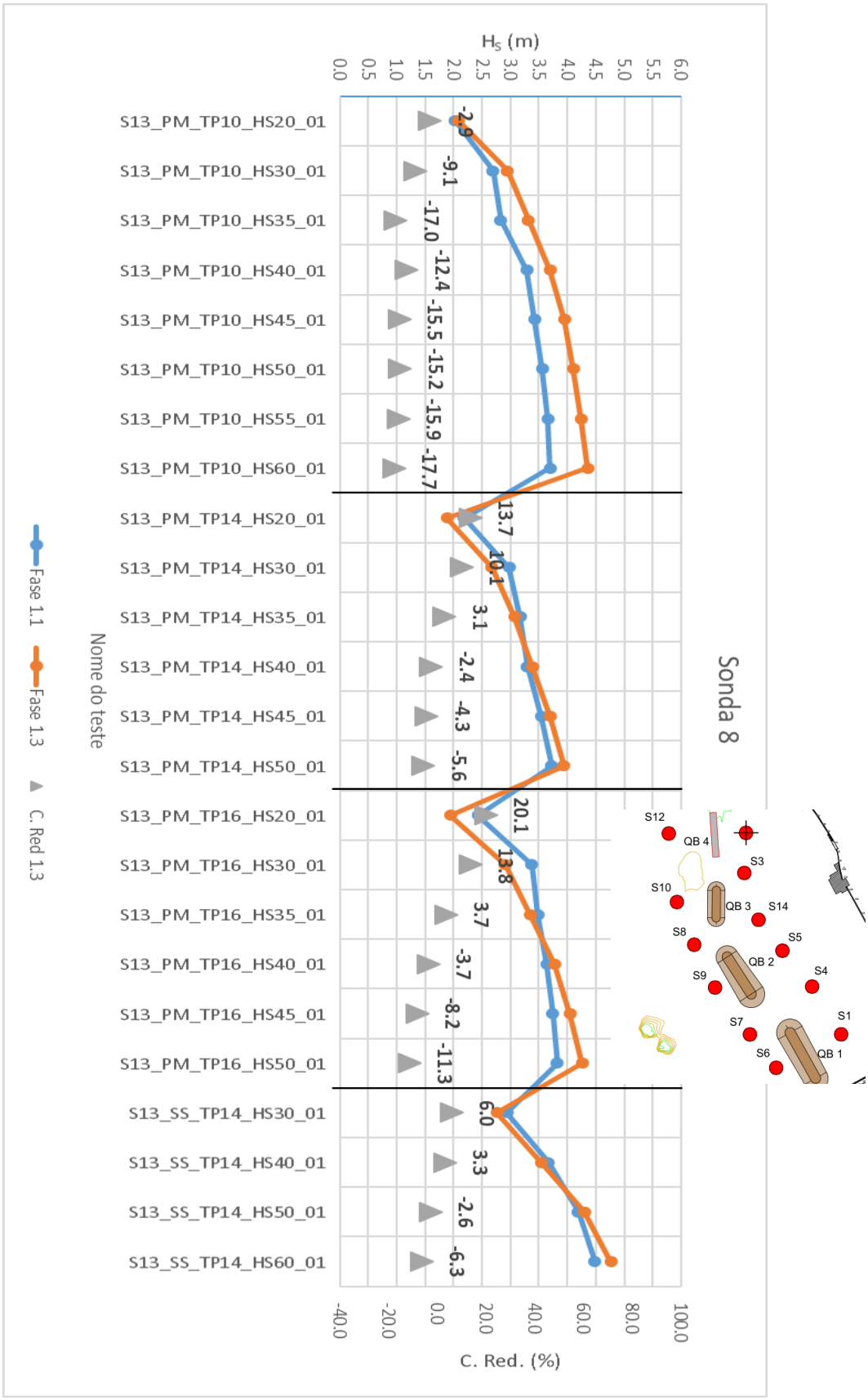


Figura 5.16 - Sonda 8: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

5.3.2.7.Sonda 9

A sonda 9, como já foi referido, está numa posição a barlamar dos quebramares neste caso do QB2, pelo que a influência deste quebramar nos registos obtidos nesta sonda será relevante. Analisando os gráficos da Figura 5.17 e Figura 5.18 é possível observar um comportamento muito idêntico entre os registos e C_{Red} da Fase 1.2 com a Fase 1.3, o que de certa forma valida os resultados. Os valores obtidos para o C_{Red} estão presentes no Quadro 5.13, onde se observa que para o T_P de 10 s do nível PM a maioria dos C_{Red} são negativos, significando que houve um aumento dos niveis de agitação em particular para este período da onda de pico. As alterações na batimetria assim como as reflexões introduzidas com a construção dos quebramares, poderão ser a causa para a elevação do nível de agitação registado.

Quadro 5.13 - Sonda 9: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

Nome do Teste	H_S (m)			C_{Red} (%)	
	F1.1	F1.2	F1.3	F1.2	F1.3
S_PM_TP10_HS20_01	2.09	2.22	1.99	-6.3	4.7
S_PM_TP10_HS30_01	2.90	2.94	2.79	-1.4	3.5
S_PM_TP10_HS35_01	3.34	3.28	3.10	1.6	7.0
S_PM_TP10_HS40_01	3.54	3.62	3.39	-2.2	4.2
S_PM_TP10_HS45_01	3.43	3.84	3.62	-11.9	-5.5
S_PM_TP10_HS50_01	3.46	4.07	3.85	-17.7	-11.3
S_PM_TP10_HS55_01	3.51	4.19	3.95	-19.2	-12.4
S_PM_TP10_HS60_01	3.55	4.29	4.01	-20.9	-13.0
S_PM_TP14_HS20_01	2.51	1.93	1.95	23.3	22.6
S_PM_TP14_HS30_01	3.48	2.75	2.68	21.1	23.1
S_PM_TP14_HS35_01	3.85	3.14	3.00	18.5	22.1
S_PM_TP14_HS40_01	3.98	3.44	3.27	13.6	18.0
S_PM_TP14_HS45_01	3.84	3.77	3.60	1.9	6.3
S_PM_TP14_HS50_01	3.83	3.99	3.85	-4.1	-0.3
S_PM_TP16_HS20_01	2.28	1.95	1.94	14.7	15.1
S_PM_TP16_HS30_01	3.25	2.96	2.82	9.0	13.4
S_PM_TP16_HS35_01	3.66	3.48	3.14	5.0	14.3
S_PM_TP16_HS40_01	3.86	3.82	3.45	1.1	10.6
S_PM_TP16_HS45_01	3.94	4.52	3.73	-14.7	5.3
S_PM_TP16_HS50_01	4.03	5.42	3.98	-34.5	1.3
S_SS_TP14_HS30_01	3.41	2.70	3.01	20.9	11.9
S_SS_TP14_HS40_01	4.15	3.63	3.70	12.6	10.9
S_SS_TP14_HS50_01	4.36	4.15	4.32	4.8	0.9
S_SS_TP14_HS60_01	4.70	4.67	4.80	0.7	-2.0

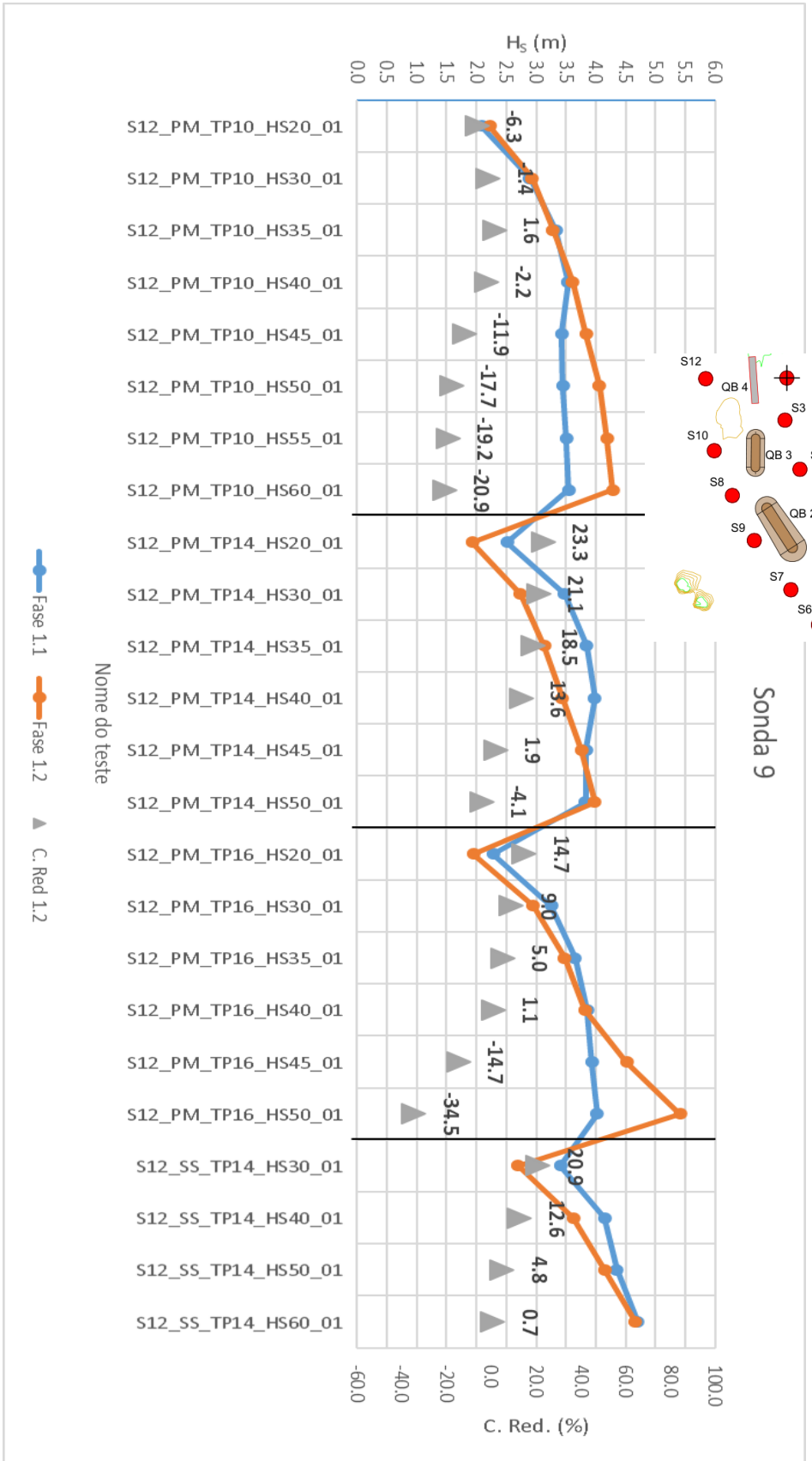


Figura 5.17 - Sonda 9: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

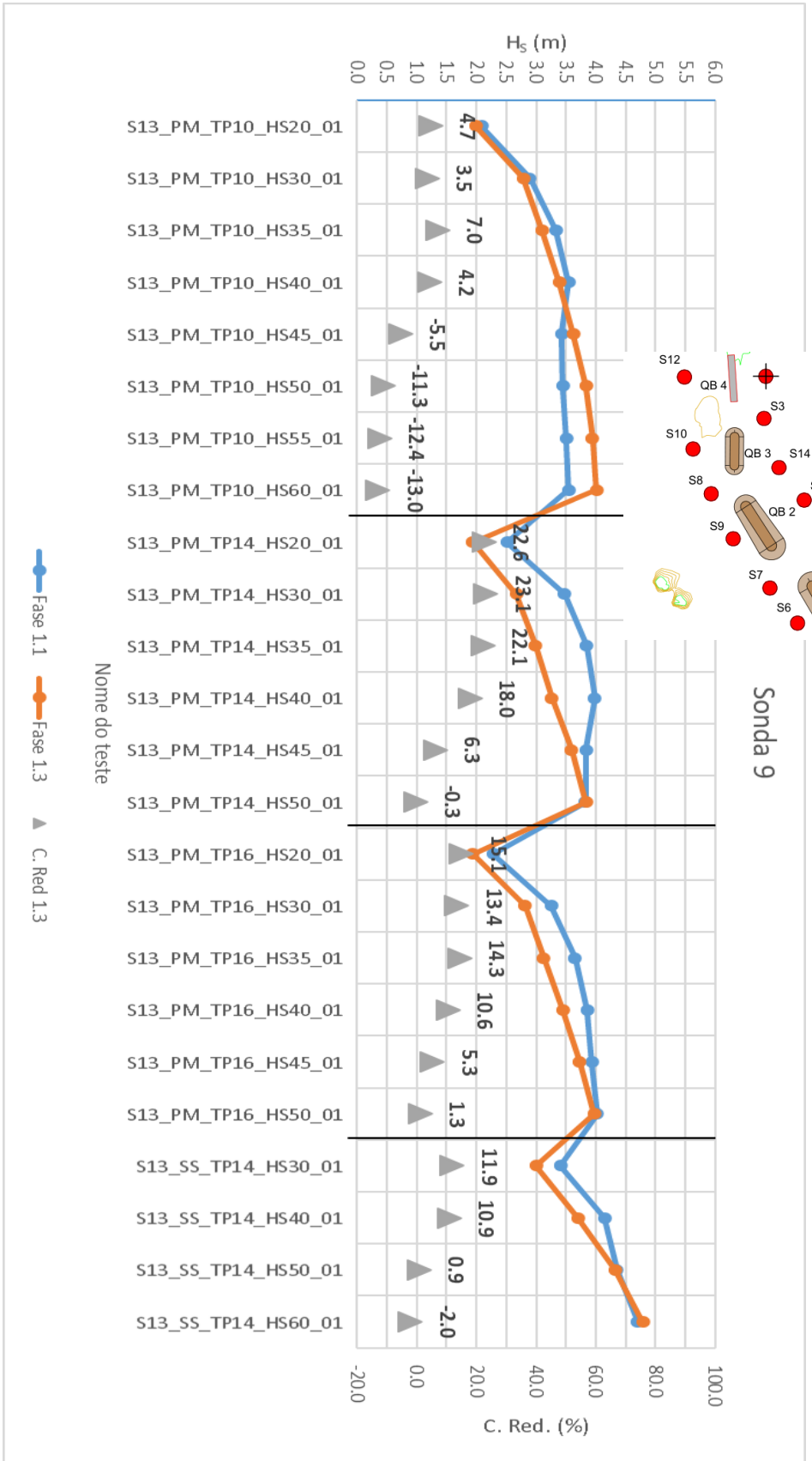


Figura 5.18 - Sonda 9: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

5.3.2.8.Sonda 10

A sonda 10 localiza-se a barlamar do QB3 pelo que o mesmo quebramar terá grande influência nos registos desta sonda. Comparando os C_{Red} presentes no Quadro 5.14 é possível verificar alguma semelhança entre os valores do mesmo coeficiente para as distintas fases, existindo ainda assim diferenças entre o C_{Red} da Fase 1.2 e 1.3 para valores de H_S menores, sendo o C_{Red} da Fase 1.3 maior para as mesmas condições de H_S. O facto de a grande maioria destes coeficientes serem negativos (Figura 5.19 e Figura 5.20) era algo expectável, uma vez que esta é uma sonda a barlamar dos quebramares construídos. Os valores negativos significam que houve uma elevação do nível de agitação registado, que pode ser justificado pelas mesmas razões mencionadas para outras sondas localizadas a barlamar, a introdução dos quebramares aliada ao facto de este ser um modelo de fundos móveis, tem grandes influências na alteração da batimetria que por sua vez tem efeito na agitação marítima neste local. Outro aspeto a referir é, por esta sonda se localizar numa abertura de quebramares (QB2 e QB3) a progressão é favorecida por esta abertura, pelo que isto representa um aumento do nível registado na sonda 10.

Quadro 5.14 - Sonda 10: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m.

Nome do Teste	H_S (m)			C_{Red} (%)	
	F1.1	F1.2	F1.3	F1.2	F1.3
S_PM_TP10_HS20_01	1.82	2.34	2.20	-28.9	-20.7
S_PM_TP10_HS30_01	2.64	3.35	3.04	-26.6	-15.1
S_PM_TP10_HS35_01	2.80	3.53	3.43	-26.0	-22.6
S_PM_TP10_HS40_01	2.92	3.64	3.76	-24.8	-29.0
S_PM_TP10_HS45_01	2.94	3.78	3.92	-28.4	-33.2
S_PM_TP10_HS50_01	3.02	3.86	4.00	-28.0	-32.5
S_PM_TP10_HS55_01	3.07	3.92	4.10	-27.7	-33.7
S_PM_TP10_HS60_01	3.18	3.99	4.22	-25.5	-32.6
S_PM_TP14_HS20_01	2.20	2.70	2.16	-22.9	1.8
S_PM_TP14_HS30_01	2.92	3.60	3.04	-22.9	-4.0
S_PM_TP14_HS35_01	3.03	3.85	3.48	-27.0	-15.0
S_PM_TP14_HS40_01	3.16	4.00	3.78	-26.6	-19.6
S_PM_TP14_HS45_01	3.30	4.12	4.01	-24.6	-21.5
S_PM_TP14_HS50_01	3.38	4.16	4.14	-23.2	-22.6
S_PM_TP16_HS20_01	2.27	2.46	2.03	-8.5	10.3
S_PM_TP16_HS30_01	2.99	3.46	2.97	-15.6	0.8
S_PM_TP16_HS35_01	3.15	3.80	3.43	-20.7	-8.8
S_PM_TP16_HS40_01	3.34	4.02	3.77	-20.3	-13.1
S_PM_TP16_HS45_01	3.50	4.17	4.01	-19.0	-14.5
S_PM_TP16_HS50_01	3.63	4.32	4.23	-19.1	-16.5
S_SS_TP14_HS30_01	3.28	3.44	2.92	-4.9	10.8
S_SS_TP14_HS40_01	3.86	4.21	3.80	-9.2	1.6
S_SS_TP14_HS50_01	4.13	4.72	4.49	-14.3	-8.7
S_SS_TP14_HS60_01	4.31	4.94	4.83	-14.6	-12.1

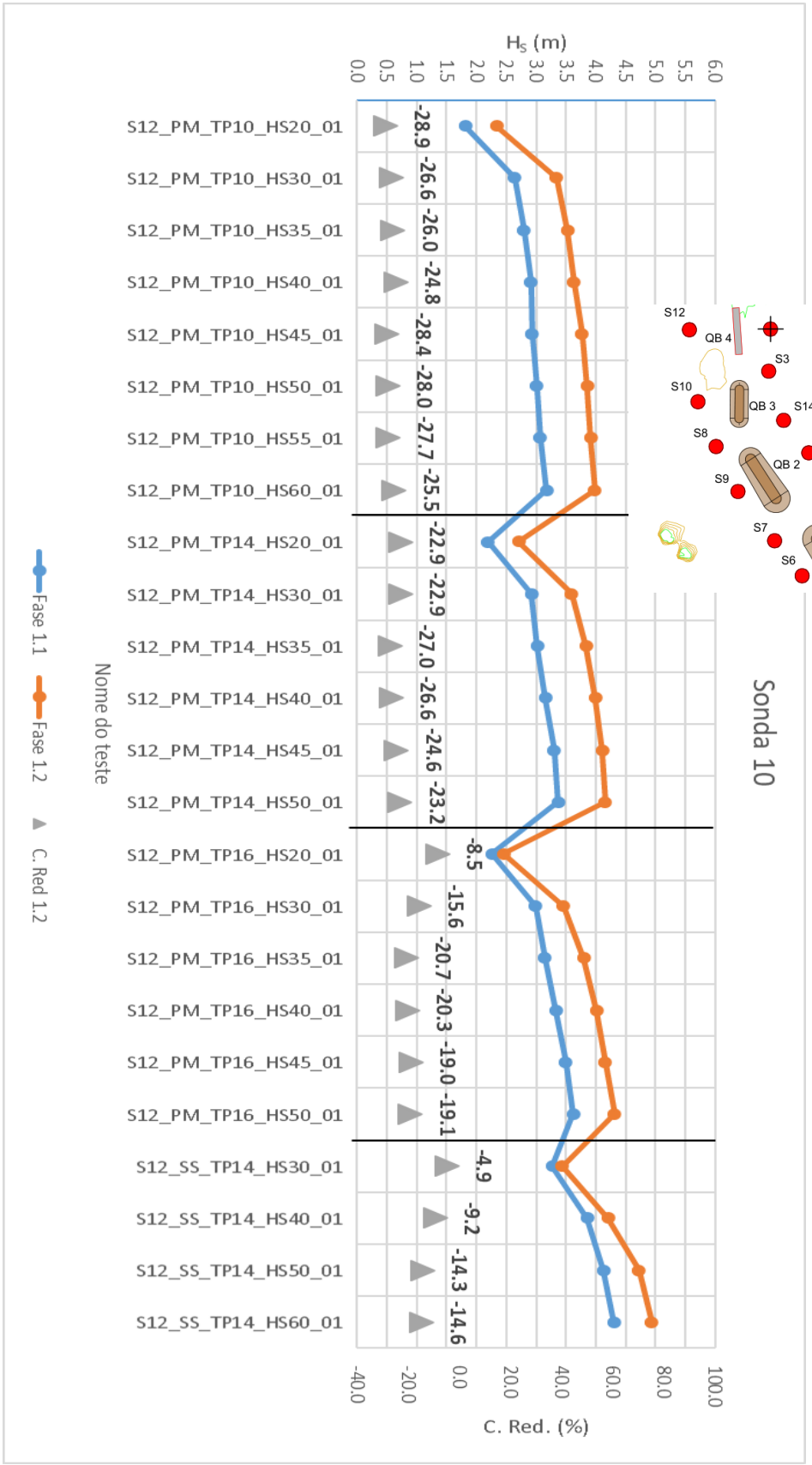


Figura 5.19 - Sonda 10: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

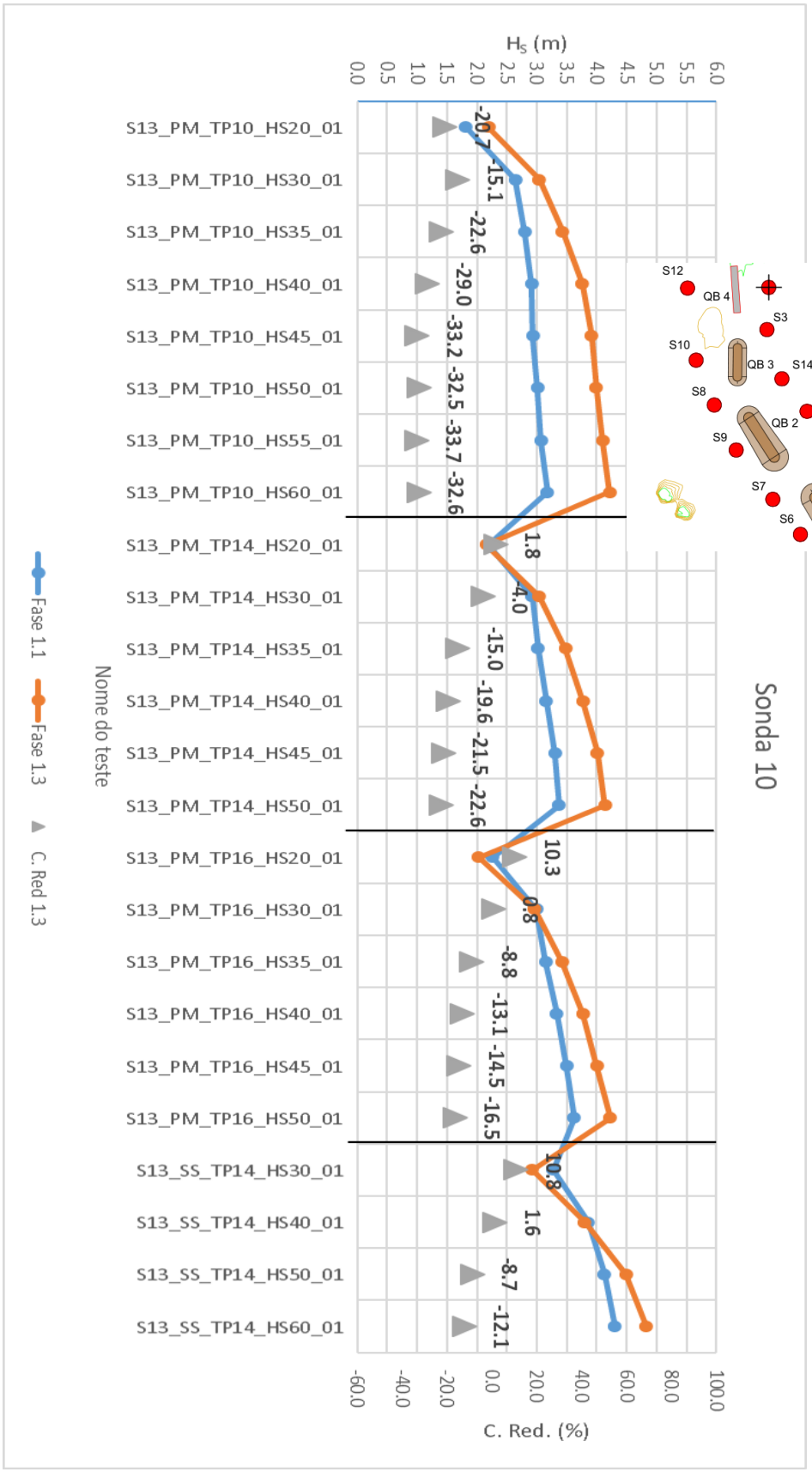


Figura 5.20 - Sonda 10: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

5.3.2.9.Sonda 12

A sonda 12 é mais uma sonda que se localiza a barlamar dos quebramares destacados, mais concretamente de um dos quebramares verticais implementados, o QB4, verificando-se uma vez mais, a ocorrência de valores negativos do C_{Red} (Quadro 5.15). Analisando a Figura 5.21 e Figura 5.22, correspondentes a comparações entre a Fase 1.1 com a Fase 1.2 e 1.3 respetivamente, pode-se observar um certo paralelismo com desfasamento aproximadamente constante entre as linhas correspondentes a cada uma das fases, o que evidencia a grande semelhança entre a evolução dos registos das respetivas fases. Este comportamento é devido sobretudo à tipologia do QB4, um quebramar vertical, que implica grandes reflexões e que neste caso é a causa da elevação do nível registado a barlamar do mesmo quebramar. De referir a existência de valores baixos do C_{Red} que implicam aumento do nível de agitação registado, nos testes para o nível extremo (SS) da Fase 1.3, que sucedem após grandes erosões a barlamar do QB4 que se iniciaram no final dos testes de preia mar (PM) e se acentuaram durante os testes para o nível extremo (SS) da referida fase de testes. A ocorrência destas erosões podem ser motivo de maior reflexão por parte do quebramar e consequente aumento do nível registado pela sonda 12, localizada a barlamar do quebramar.

Quadro 5.15 - Sonda 12: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), TP de 10, 14 e 16 s e HS de 2 a 6 m.

Nome do Teste	H_S (m)			C_{Red} (%)	
	F1.1	F1.2	F1.3	F1.2	F1.3
S_PM_TP10_HS20_01	2.18	2.24	2.50	-2.7	-14.8
S_PM_TP10_HS30_01	2.53	3.01	3.29	-19.1	-30.3
S_PM_TP10_HS35_01	2.60	3.29	3.57	-26.4	-37.3
S_PM_TP10_HS40_01	2.64	3.62	3.81	-37.1	-44.5
S_PM_TP10_HS45_01	2.95	3.82	3.98	-29.7	-35.2
S_PM_TP10_HS50_01	3.11	4.05	4.15	-30.1	-33.2
S_PM_TP10_HS55_01	3.23	4.23	4.27	-30.8	-32.1
S_PM_TP10_HS60_01	3.31	4.27	4.38	-29.0	-32.3
S_PM_TP14_HS20_01	2.18	2.81	3.40	-29.0	-56.1
S_PM_TP14_HS30_01	2.90	3.66	4.16	-26.0	-43.2
S_PM_TP14_HS35_01	3.15	4.03	4.35	-27.8	-38.2
S_PM_TP14_HS40_01	3.31	4.21	4.43	-27.1	-33.6
S_PM_TP14_HS45_01	3.41	4.36	4.47	-28.0	-31.1
S_PM_TP14_HS50_01	3.49	4.47	4.55	-27.9	-30.4
S_PM_TP16_HS20_01	2.19	2.70	3.24	-23.3	-48.1
S_PM_TP16_HS30_01	3.06	3.63	4.04	-18.6	-32.2
S_PM_TP16_HS35_01	3.26	3.86	4.21	-18.5	-29.2
S_PM_TP16_HS40_01	3.39	4.00	4.29	-18.0	-26.3
S_PM_TP16_HS45_01	3.49	4.16	4.33	-19.1	-24.1
S_PM_TP16_HS50_01	3.56	4.27	4.36	-19.9	-22.5
S_SS_TP14_HS30_01	3.09	3.68	5.14	-19.2	-66.4
S_SS_TP14_HS40_01	3.73	4.00	5.73	-7.3	-53.9
S_SS_TP14_HS50_01	4.08	4.67	5.92	-14.5	-44.9
S_SS_TP14_HS60_01	4.24	4.86	5.90	-14.6	-39.1

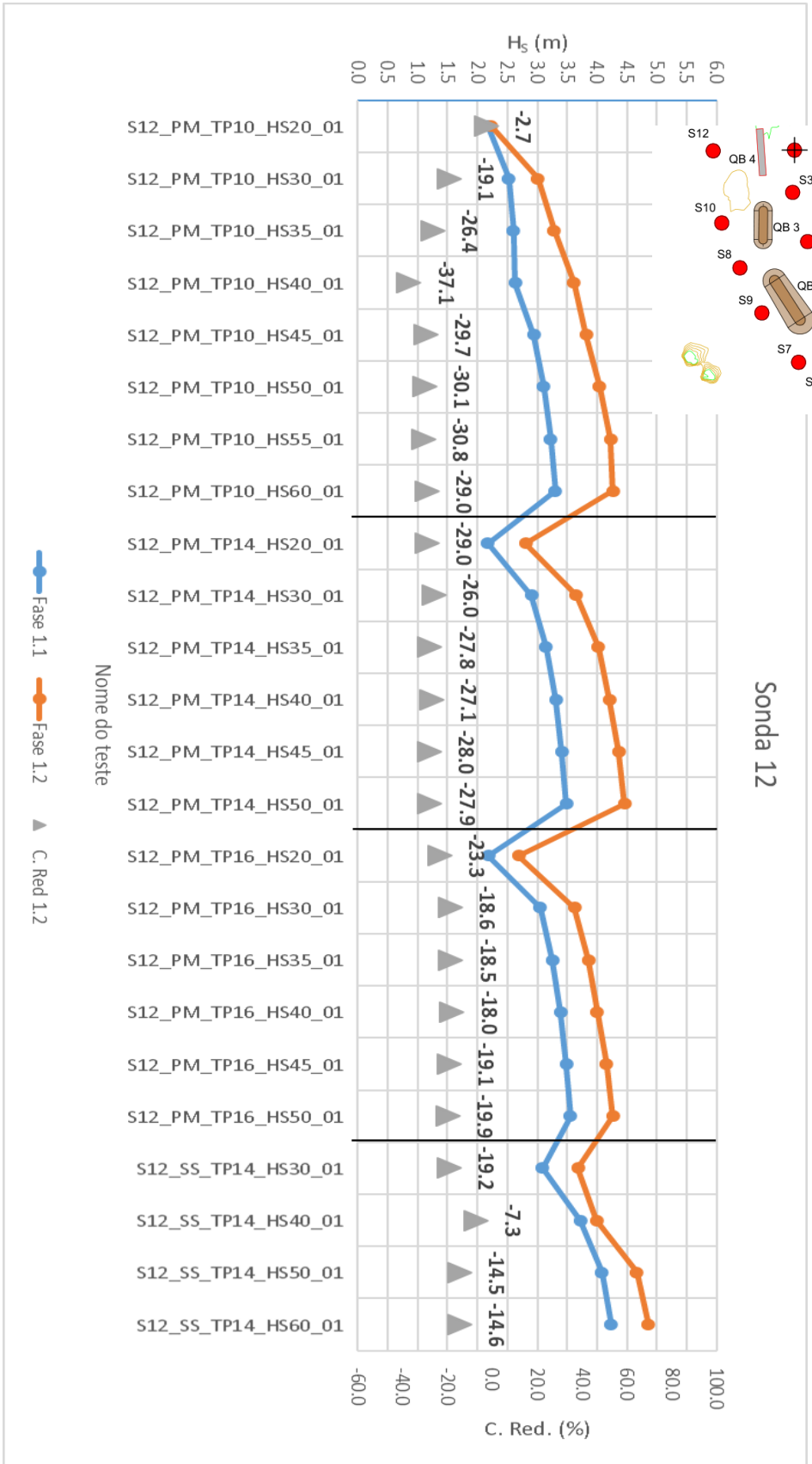


Figura 5.21 - Sonda 12: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

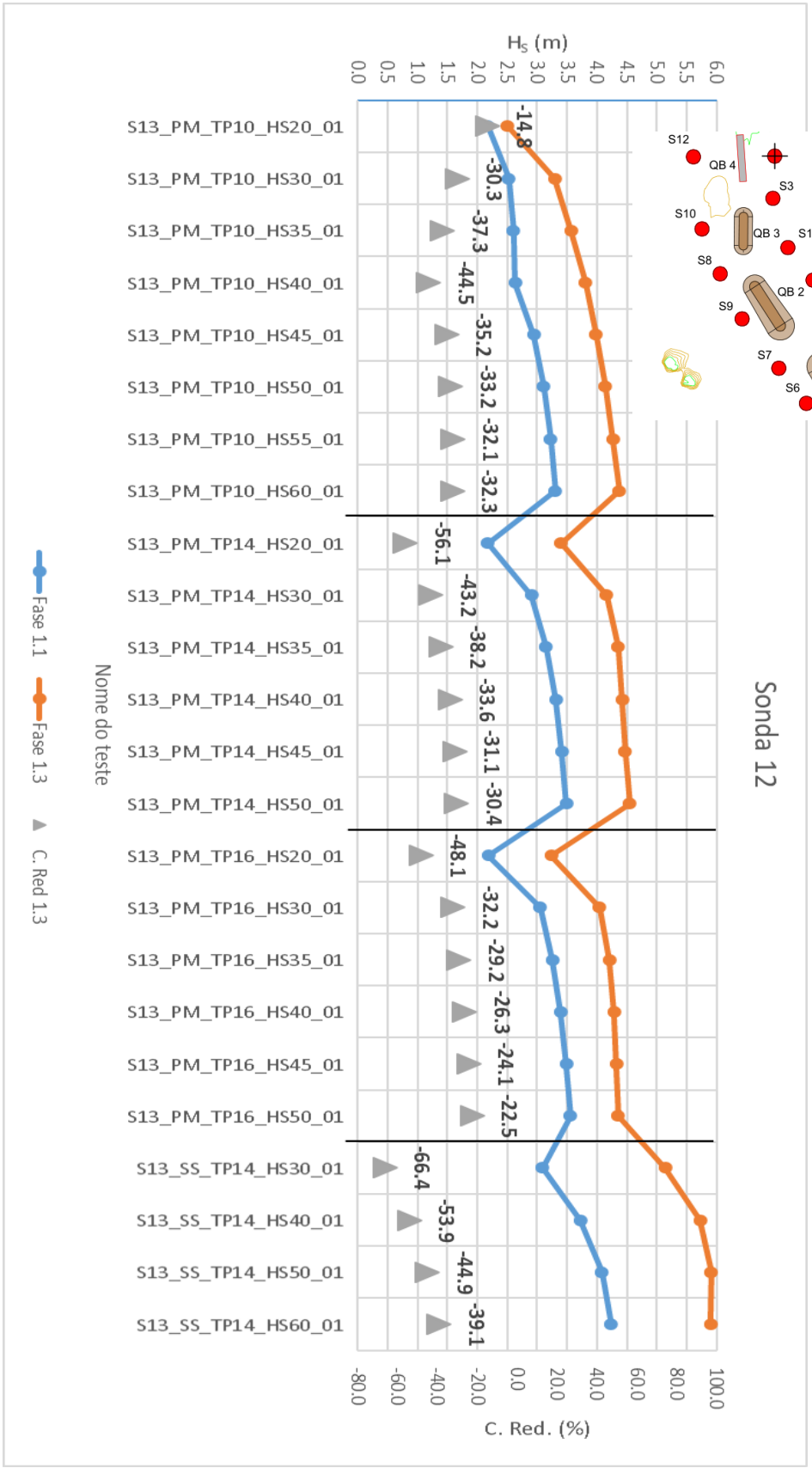


Figura 5.22 - Sonda 12: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

5.3.2.10.Sonda 14

Na sonda 14 era esperado que existisse alguma redução da altura de onda incidente por esta ser uma sonda a sotamar dos quebramares implementados, ainda que pouca pela sua posição. Na Fase 1.2 dos testes, os valores obtidos para o C_{Red} (Quadro 5.16) confirmam de certa forma o esperado, alguma redução da altura de onda incidente, essencialmente nos teste para o T_p de 10 s do nível de preia mar. No entanto, em alguns testes (S12_PM_TP14_HS40_01 e S12_SS_TP14_HS40_01) o C_{Red} obtido foi negativo (Quadro 5.16) o que implica um aumento do nível de agitação registado pela sonda quando comparado com a Fase 1.1, embora residuais (-0.5% e -1.2% respetivamente). Analisando a Figura 5.24 e o C_{Red} da Fase 1.3, observa-se um aumento significativo do nível de agitação registado pela sonda 14 desde o inicio dos testes do nível PM para o T_p de 14 s até ao final dos testes do nível PM para o T_P de 16 s, quando comparado com os testes da Fase 1.1. Como referido, a sonda 14 é uma sonda posicionada a sotamar dos quebramares, pelo que estes registos são inesperados. Com o intuito de compreender as causas deste aumento, foram analisadas as fotografias dos quebramares, o registo temporal da sonda para cada teste e os vídeos dos referidos testes tendo-se verificado que a batimetria da praia na zona da sonda 14 durante os testes para a Fase 1.3 estava diferente, existindo maior profundidade de água na sonda 14 e imediatamente a sotamar da sonda, a praia estava bastante elevada e com grande declive.

Quadro 5.16 - Sonda 14: Valores obtidos nas Fases 1.1, 1.2 e 1.3, para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m.

Nome do Teste	H_S (m)			C_{Red} (%)	
	F1.1	F1.2	F1.3	F1.2	F1.3
S_PM_TP10_HS20_01	1.24	1.17	1.19	5.7	4.2
S_PM_TP10_HS30_01	1.55	1.35	1.45	12.9	7.0
S_PM_TP10_HS35_01	1.56	1.48	1.52	5.0	2.5
S_PM_TP10_HS40_01	1.66	1.53	1.64	7.9	1.5
S_PM_TP10_HS45_01	1.71	1.56	1.73	8.9	-1.4
S_PM_TP10_HS50_01	1.76	1.56	1.80	11.3	-2.0
S_PM_TP10_HS55_01	1.80	1.58	1.86	11.9	-3.6
S_PM_TP10_HS60_01	1.83	1.61	1.92	11.9	-5.1
S_PM_TP14_HS20_01	1.47	1.22	1.44	16.9	1.6
S_PM_TP14_HS30_01	1.74	1.51	1.82	13.6	-4.6
S_PM_TP14_HS35_01	1.76	1.64	1.93	6.9	-9.7
S_PM_TP14_HS40_01	1.73	1.73	2.05	-0.5	-18.8
S_PM_TP14_HS45_01	1.79	1.78	2.14	0.4	-19.9
S_PM_TP14_HS50_01	1.85	1.79	2.20	3.7	-18.8
S_PM_TP16_HS20_01	1.49	1.41	1.77	5.6	-18.5
S_PM_TP16_HS30_01	1.88	1.78	2.24	5.3	-19.2
S_PM_TP16_HS35_01	1.94	1.92	2.47	0.8	-27.5
S_PM_TP16_HS40_01	2.05	2.01	2.63	2.1	-28.4
S_PM_TP16_HS45_01	2.18	2.08	2.68	4.4	-23.2
S_PM_TP16_HS50_01	2.26	2.09	2.68	7.6	-18.4
S_SS_TP14_HS30_01	2.43	2.29	2.43	5.8	0.2
S_SS_TP14_HS40_01	2.60	2.63	2.66	-1.2	-2.4
S_SS_TP14_HS50_01	2.64	2.58	2.82	2.5	-6.6
S_SS_TP14_HS60_01	2.71	2.64	2.89	2.7	-6.7

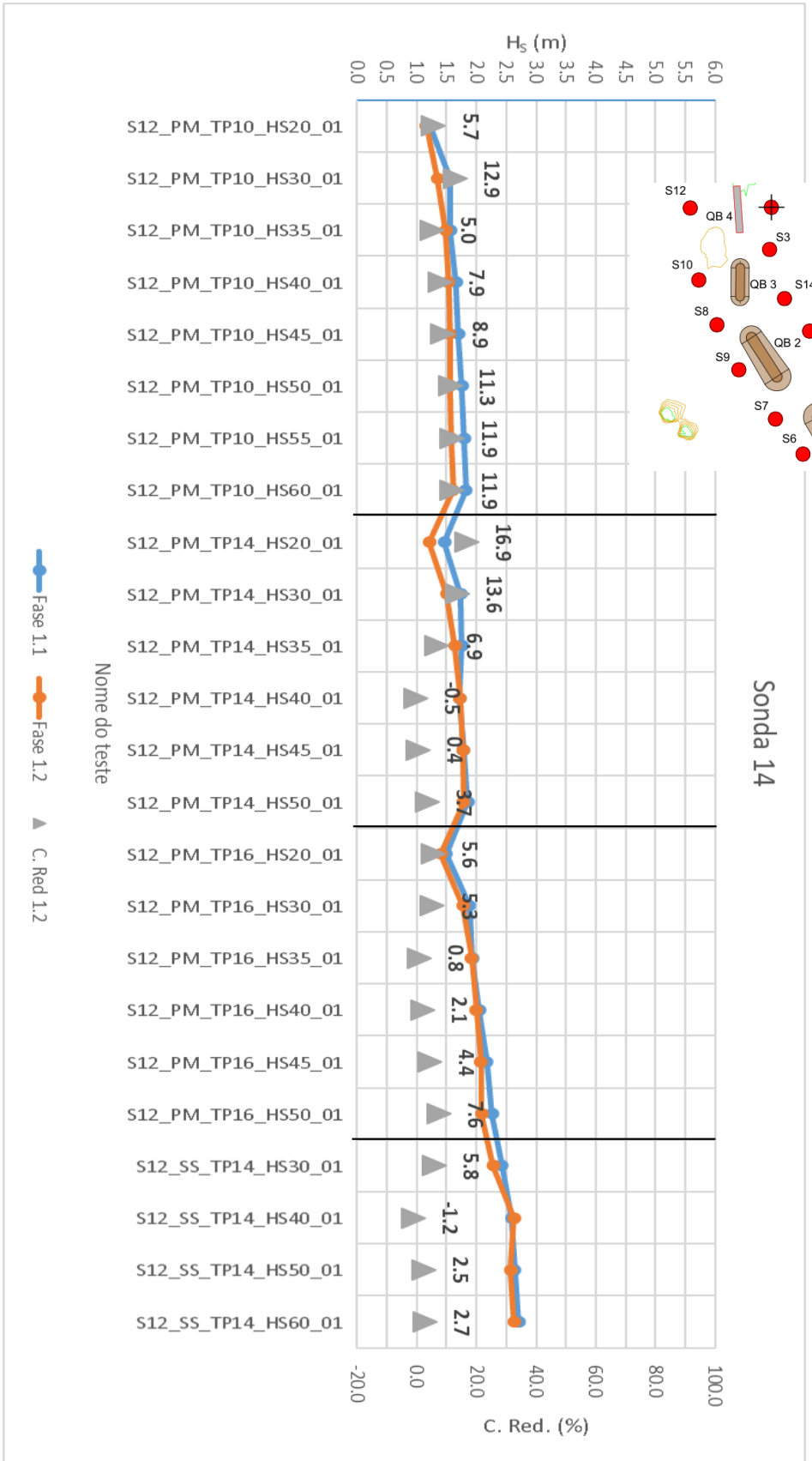


Figura 5.23 - Sonda 14: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.2 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

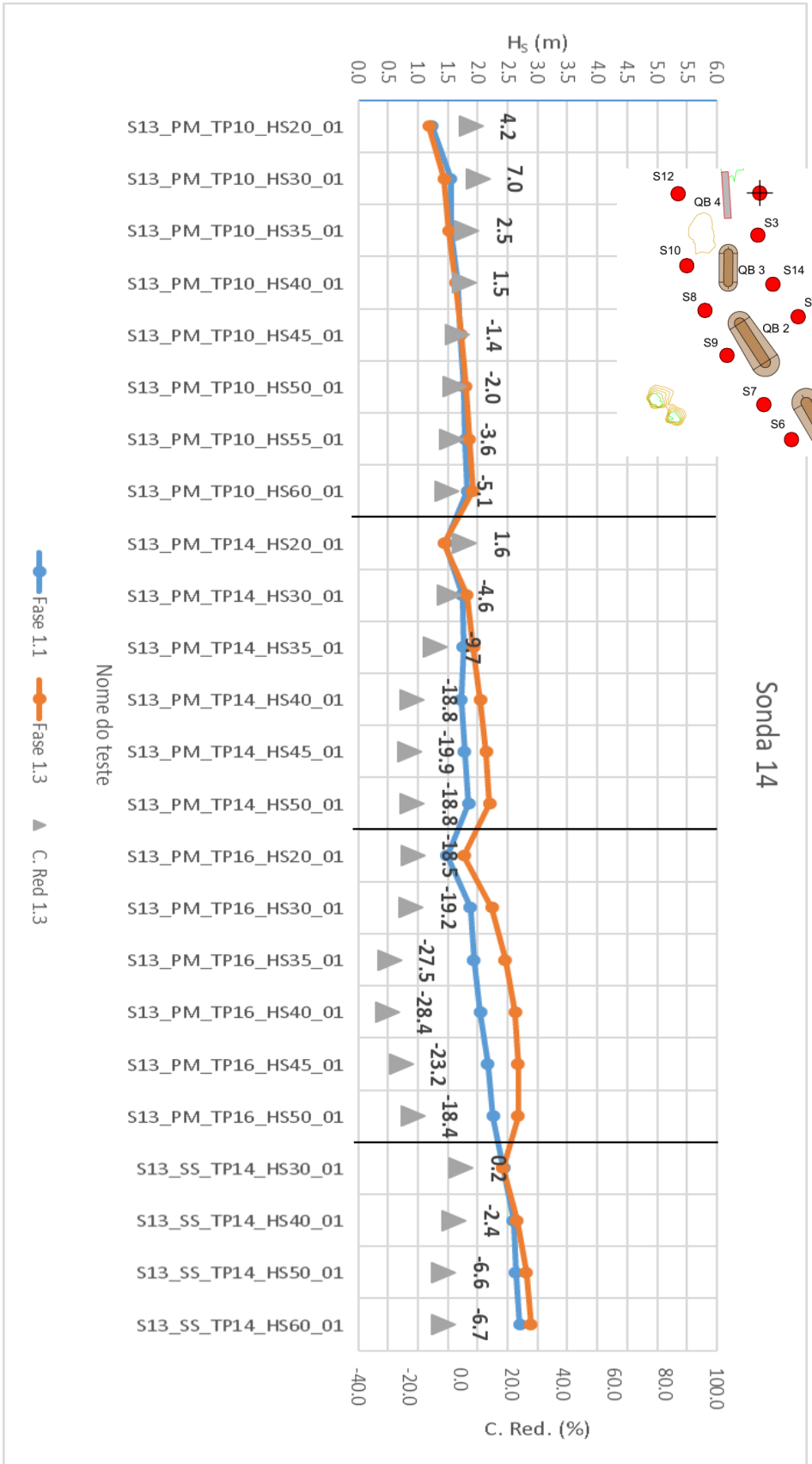


Figura 5.24 - Sonda 14: Comparação dos registos obtidos na Fase 1.1 e 1.3 para os níveis de preia mar (PM) e extremo (SS), T_P de 10, 14 e 16 s e H_S de 2 a 6 m e respetivo C_{Red}.

5.4. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA

A análise das fotografias dos quebramares é bastante importante pois permite a deteção de danos, e posterior determinação das condições do teste em que estes ocorrem. Esta análise permite ainda compreender a evolução da envolvente do quebramar pois sendo este um modelo de fundos móveis, é natural que exista acreção e erosão que são aspetos importantes para a avaliação da eficácia das estruturas. Nesta secção serão apenas apresentadas as fotografias consideradas como as mais relevantes, no entanto, em anexo expõem-se as fotografias organizadas de acordo com a sequência dos testes.

5.4.1. QUEBRAMAR 1

O Quebramar 1 (QB1) por ser o mais extenso e por, a par com o QB2, o quebramar com coroamento à cota mais elevada, era aquele em que se esperava que existissem menores danos e que apresentasse melhor comportamento.

Na Fase 1.2, até ao final dos testes com o nível de baixa mar (BM) não existe muito a referir acerca do QB1 pois este apresentou bom comportamento, não se tendo assinalado o deslocamento de qualquer bloco do manto resistente do quebramar, devendo-se apenas referir a existência de acreção de sedimentos junto à cabeça em ambos os extremos do quebramar, como é visível na Figura 5.25b. Os testes para o nível médio (NM) conduziram aos primeiros danos visíveis no quebramar com o deslocamento de pelo menos um bloco do manto resistente (teste S12_NM_TP10_HS30_01), mas também de grande acreção de sedimentos ao longo do extradorso do tronco e em todo o perfil de rotação da cabeça do quebramar com grande incidência na cabeça junto ao molhe Felgueiras (extremidade direita na Figura 5.25c). Esta acreção na extremidade do quebramar junto ao molhe Felgueiras coincide com a passagem da já referida barra pelo quebramar, sendo que esta surgiu a barlamar do quebramar, deslocando-se no sentido do quebramar durante os teste para o NM.

Durante os testes para o nível de PM a acumulação de danos foi constante, registando-se o deslocamento de um elevado número de blocos do manto resistente (Figura 5.25d). Os perfis de rotação de ambas as cabeças do quebramar, que durante os testes para o NM tinham sido alvo de grande acreção de sedimentos, foram objeto de erosões que removeram os sedimentos que se tinham acumulado, enquanto que na zona do intradorso do quebramar houve uma grande acreção de sedimentos. De referir que durante o nível PM, mais concretamente após o teste S12_PM_TP16_HS30_01, já era visível, em alguns pontos do coroamento, a primeira subcamada do quebramar. Com os testes para o nível extremo (SS), a acumulação de danos foi elevada e no final do teste S12_SS_TP14_HS60_01 (Figura 5.25e) a parte central do coroamento do tronco tinha ficado sem blocos do manto resistente, sendo visível grande parte da primeira subcamada do quebramar e por isso considerou-se ter ocorrido a ruína do quebramar.

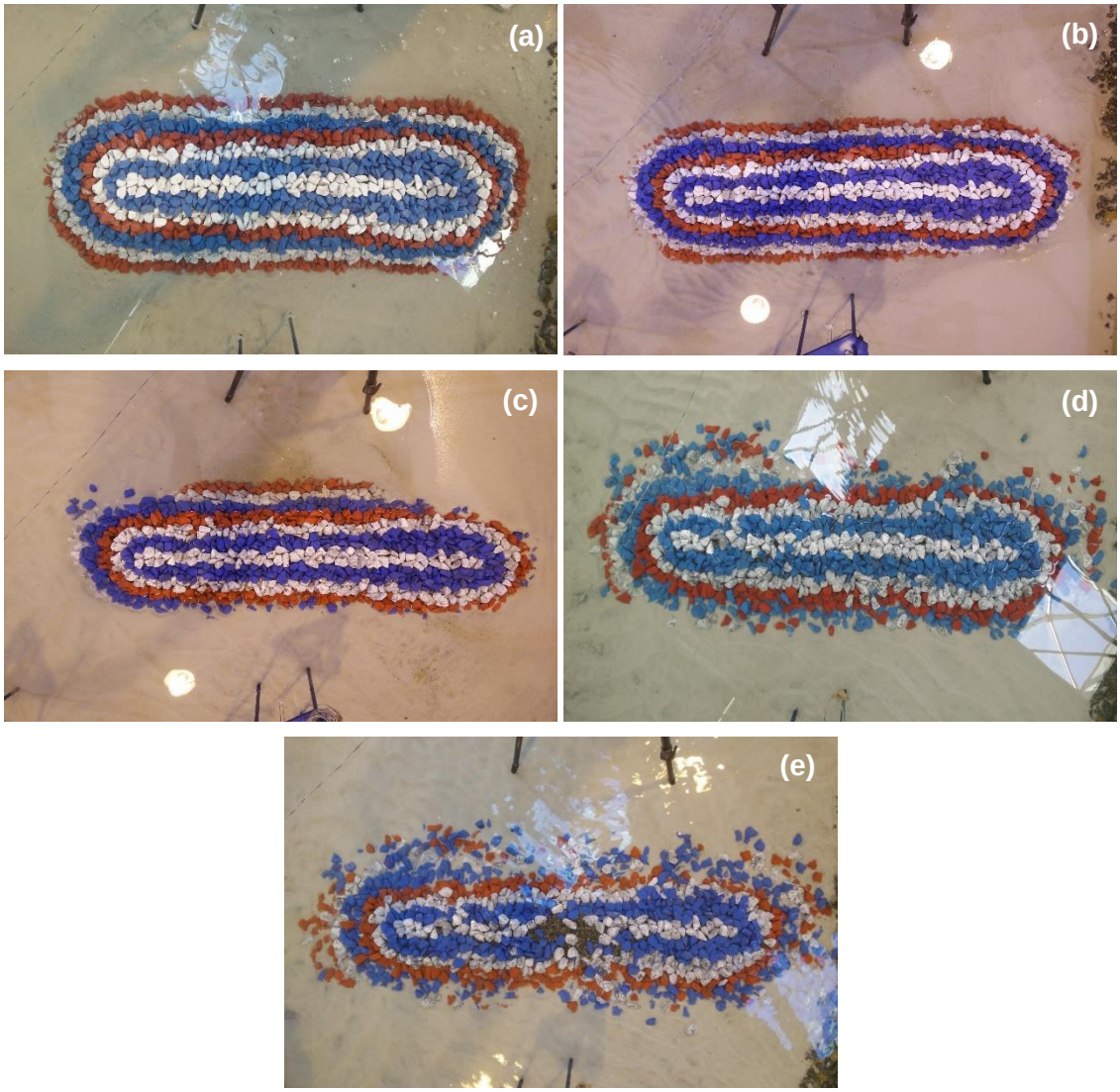


Figura 5.25 – Registo do comportamento do QB1 durante a Fase 1.2: a) situação inicial; b) após o teste S12_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S12_NM_TP16_HS45_01; d) após o teste S12_PM_TP16_HS55_01; e) após o teste S12_SS_TP14_HS60_01.

Na Fase 1.3, e ao contrário da Fase 1.2, durante os testes para o nível de baixa mar (BM) ocorreu a queda de alguns blocos do manto resistente na zona da cabeça do quebramar, tendo-se observado também grande acumulação de sedimentos no extradorso do tronco do quebramar bem como em todo o perfil de rotação de ambas as cabeças do quebramar (Figura 5.26b), à semelhança do que ocorreu para os testes do NM da Fase 1.2. Durante o nível médio há apenas a referir a queda de um reduzido número de blocos do talude anterior na zona da cabeça mais à esquerda na Figura 5.26c, assim como o registo de acreção no intradorso do tronco do quebramar e continuação da acumulação de sedimentos na zona do extradorso do tronco, mantendo-se inalterável na zona das cabeças a acumulação de sedimentos. Analisando as fotografias do quebramar durante o nível de preia mar, pode-se observar o deslocamento de um elevado número de blocos do manto resistente, no entanto em menor número quando comparado com a Fase 1.2, e com maior incidência no talude anterior do quebramar, podendo ser explicado pelos galgamentos que eram constantes para este nível testado. De salientar que no final do teste S13_PM_TP16_HS35_01 já era visível, em determinados pontos do coroamento do quebramar, a primeira subcamada. No nível

extremo (SS) os danos foram ainda mais evidentes e bastante concentrados no último teste S13_SS_TP14_HS60_01 (Figura 5.26e), onde a parte central do coroamento do tronco do quebramar ficou sem grande parte dos blocos do manto resistente, expondo a primeira subcamada do quebramar, considerando-se assim a ocorrência da ruína da estrutura.

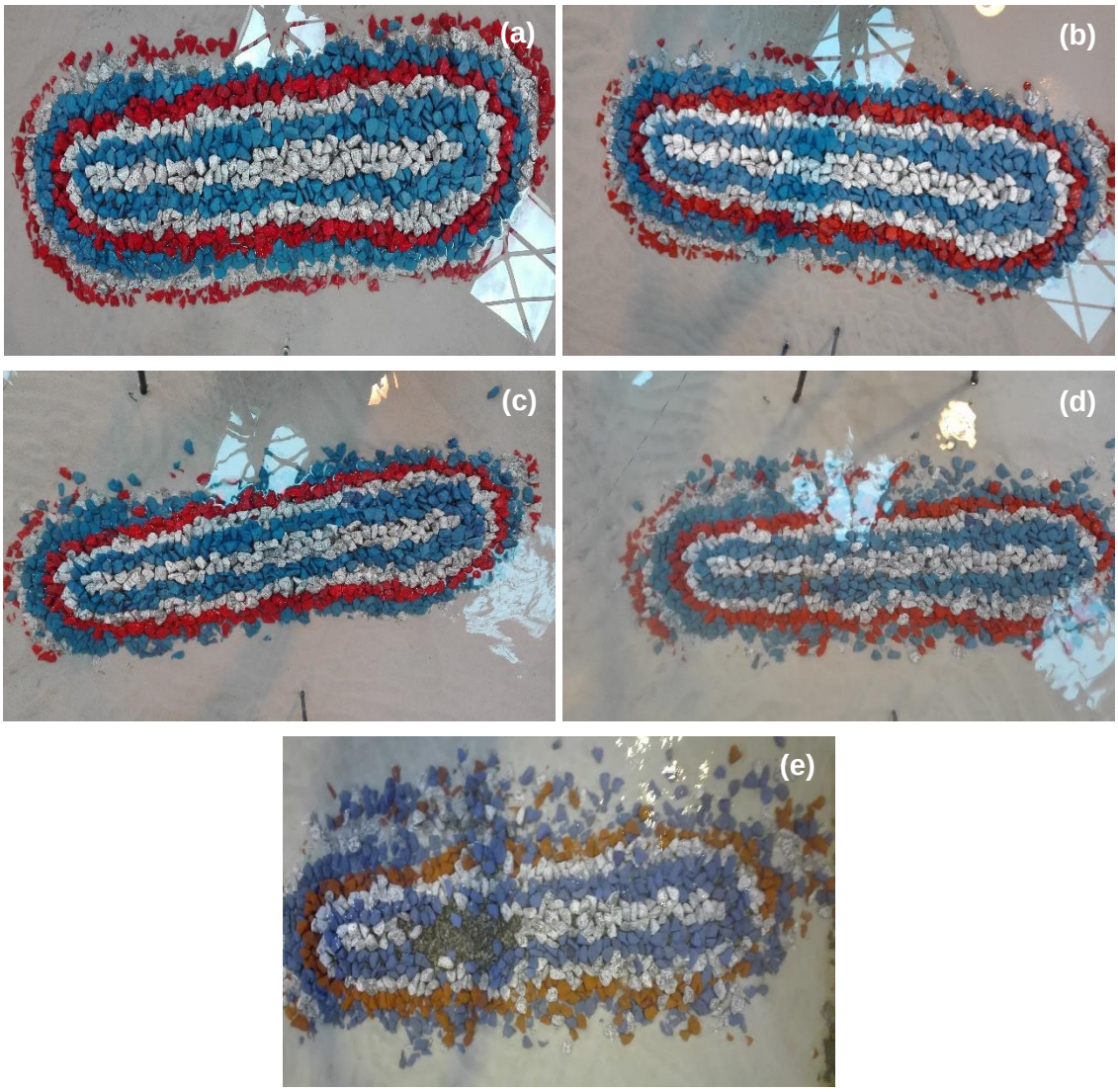


Figura 5.26 – Registo do comportamento do QB1 durante a Fase 1.3: a) situação inicial; b) após o teste S13_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S13_NM_TP16_HS45_01; d) após o teste S13_PM_TP16_HS55_01; e) após o teste S13_SS_TP14_HS60_01.

5.4.2. QUEBRAMAR 2

Relativamente à Fase 1.2 dos testes, durante o nível de baixa mar (BM) há a referir o deslocamento de um pequeno número blocos do manto resistente na zona do extradorso do tronco do quebramar e da cabeça mais à esquerda na Figura 5.27b. Durante os testes com este nível, pode-se verificar a acumulação de alguns sedimentos em parte do talude posterior e, essencialmente, em todo o perfil de rotação da cabeça mais à direita na Figura 5.27b. Na análise das fotografias relativas ao nível médio (NM), observou-se o deslocamento de alguns blocos do manto resistente (Figura 5.27c) com grande

incidência nos locais onde se registou a acumulação de sedimentos durante o nível de baixa mar, podendo este aspeto (acreção) ter sido um fator importante para o deslocamento dos mesmos blocos. Quanto à acumulação de sedimentos na envolvente do quebramar, não houve grandes alterações com os testes para o NM. Para o nível de preia mar (PM) há a registar erosões dos sedimentos que se tinham acumulado desde o nível BM, na zona da cabeça mais próxima do QB1 (extremidade direita na Figura 5.27d). Tal como no QB1, para o nível de PM o QB2 já apresenta danos consideráveis, com a queda de bastantes blocos do manto resistente (MR), com maior incidência no talude anterior do QB2, podendo ser justificado pelo elevado número de galgamentos durante os testes com este nível. De referir que após o teste S12_PM_TP10_HS40_01, numa pequena área do coroamento do quebramar, houve danos que deixaram visível a primeira subcamada do quebramar. Para o nível extremo, e à semelhança do que ocorreu no QB1, os danos na estrutura agravaram-se e no final do teste havia parte da cabeça da extremidade esquerda do quebramar (Figura 5.27e) e do coroamento em que era possível uma área significativa da primeira subcamada do quebramar, não sendo no entanto suficiente para se considerar que o quebramar tivesse atingido a ruína.

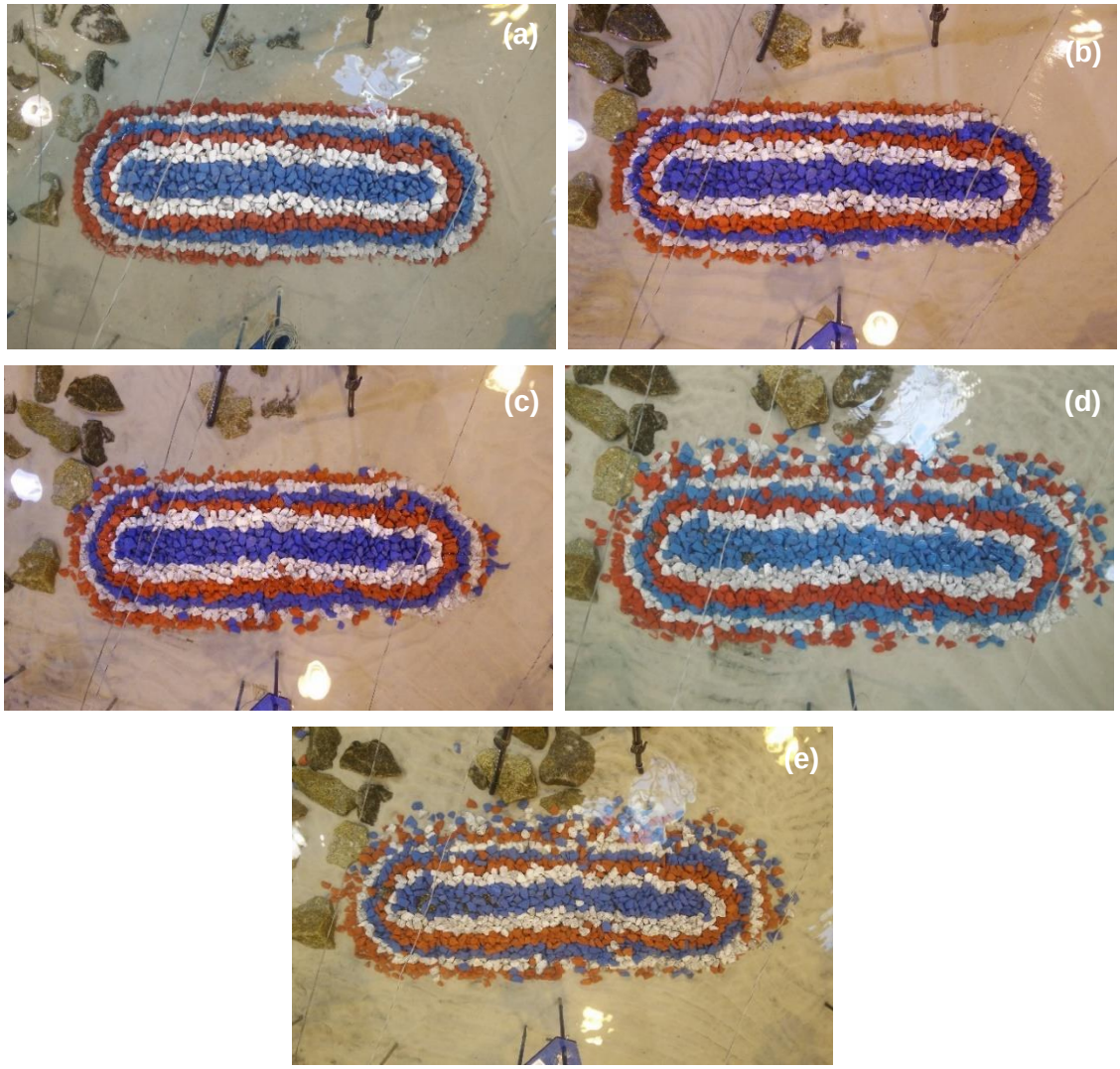


Figura 5.27 - Resumo dos acontecimentos no QB2 durante a Fase 1.2: a) situação inicial; b) após o teste S12_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S12_NM_TP16_HS45_01; d) após o teste S12_PM_TP16_HS55_01; e) após o teste S12_SS_TP14_HS60_01.

Relativamente à Fase 1.3, e à semelhança do ocorrido na Fase 1.2, durante os testes para o nível de baixa mar (BM) o QB2 sofreu o deslocamento de um pequeno número de blocos do manto resistente assim como acreção, nos mesmos locais da Fase 1.2: parte do extradorso do tronco e em todo o perfil de rotação da cabeça mais à direita na Figura 5.28b. Para o nível médio (NM) pode-se observar o deslocamento de um número considerável de blocos do manto resistente (Figura 5.28c), com maior incidência no talude anterior do quebramar. Não existiram grandes alterações quanto a erosões ou acumulação de sedimentos na envolvente do quebramar. Para o nível de preia mar (PM), uma vez mais e tal como na Fase 1.2, os danos no quebramar foram acentuados e mais localizados no coroamento do mesmo. Os referidos danos foram de tal forma significantes que após o teste S13_PM_TP16_HS55_01 (Figura 5.28d), em que se registaram o deslocamento de vários blocos do coroamento, foi considerado que a estrutura tinha entrado em ruína.

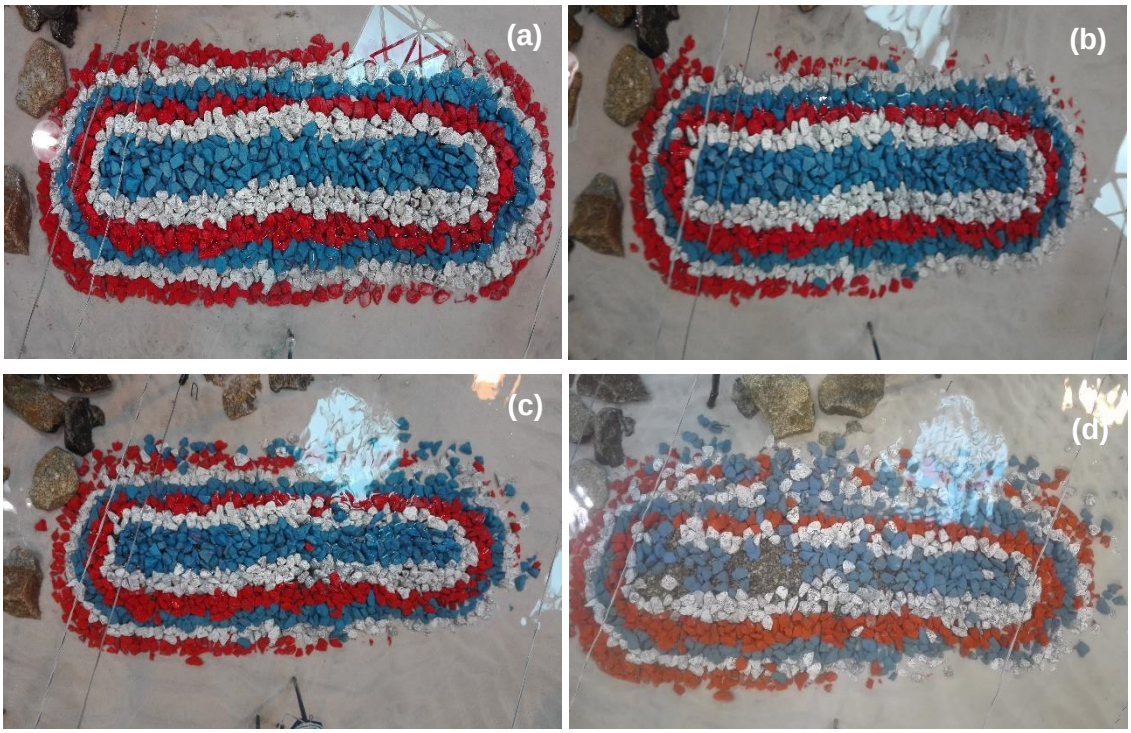


Figura 5.28 - Resumo dos acontecimentos no QB2 durante a Fase 1.3: a) situação inicial; b) após o teste S13_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S13_NM_TP16_HS45_01; d) após o teste S13_PM_TP16_HS55_01.

5.4.3. QUEBRAMAR 3

O quebramar 3 (QB3) por ser o quebramar menos extenso e com menor cota de coroamento, era aquele que se esperava que atingisse primeiro a ruína.

Analisando as fotografias dos testes para o nível de baixa mar (BM) referentes à Fase 1.2 do quebramar 3 (QB3) o menos extenso, pode-se observar que o QB3 sofre ligeiros danos com o deslocamento de alguns blocos do manto resistente, ao mesmo tempo em que se constata uma grande acumulação de sedimentos no extradorso do tronco do quebramar e, com grande incidência, na zona da cabeça mais à esquerda na Figura 5.29b. Logo após o primeiro teste para o nível médio (NM), a zona da cabeça do quebramar que havia sido alvo de grande acreção, foi desta vez objeto de erosões, ficando com um perfil muito idêntico ao inicial. Durante os restantes testes para o NM registaram-se deslocamentos de alguns blocos, mas não o suficiente para colocar em causa o equilíbrio da estrutura. Assim que se iniciaram os

testes para o nível de preia mar (PM), os danos foram cada vez maiores e bastante concentrados na parte central do coroamento, tendo-se considerado que o quebramar tinha atingido a ruína após o teste S12_PM_TP10_HS55_01 (Figura 5.29d) , bastante cedo em relação à sequência de testes quando comparado com os outros quebramares. O facto de este quebramar atingir a ruína bastante mais cedo do que os outros quebramares, é justificado pelas próprias características do quebramar, por este ser um quebramar bastante menos extenso do que os outros quebramares e principalmente por ter menor cota de coroamento e blocos de menor peso.

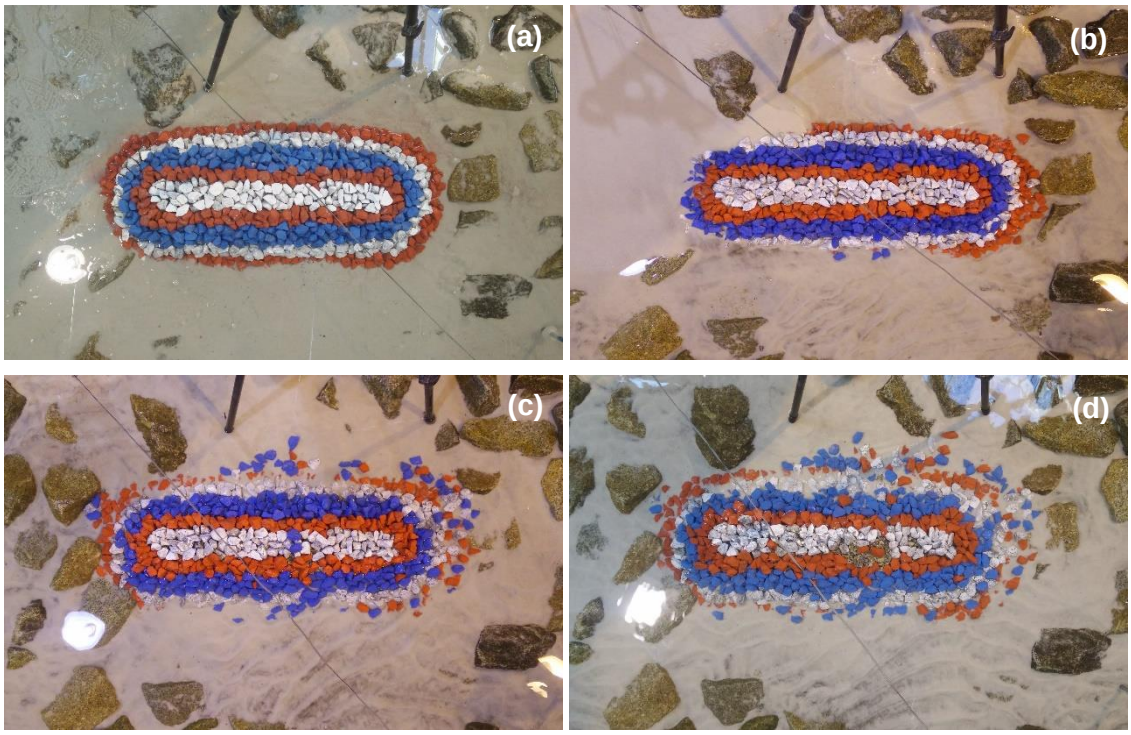


Figura 5.29 - Resumo dos acontecimentos no QB3 durante a Fase 1.2: a) situação inicial; b) após o teste S13_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S13_NM_TP16_HS45_01; d) após o teste S13_PM_TP10_HS55_01.

Relativamente à análise das fotografias da Fase 1.3, durante o nível de baixa mar (BM) é possível observar o deslocamento de alguns blocos assim como uma elevada acreção de sedimentos tanto no intradorso, como no extradorso do tronco do quebramar (Figura 5.30b). Com os testes para o nível médio os danos aumentaram um pouco em relação ao nível de BM, no entanto, estes danos aparentavam ser mais localizados e após o teste S13_NM_TP14_HS35_01 (Figura 5.30c), com o deslocamento de alguns blocos do manto resistente, a primeira subcamada do quebramar ficou visível numa pequena área, que se revelou ser a zona onde o quebramar sofreu graves danos no teste imediatamente a seguir, S13_NM_TP14_HS40_01 (Figura 5.30d), que culminariam na ruína do quebramar. A ruína deste quebramar surge bastante cedo, algo que era expectável tendo em consideração as suas características (pouco extenso e cota do coroamento baixa), e blocos de menor peso.

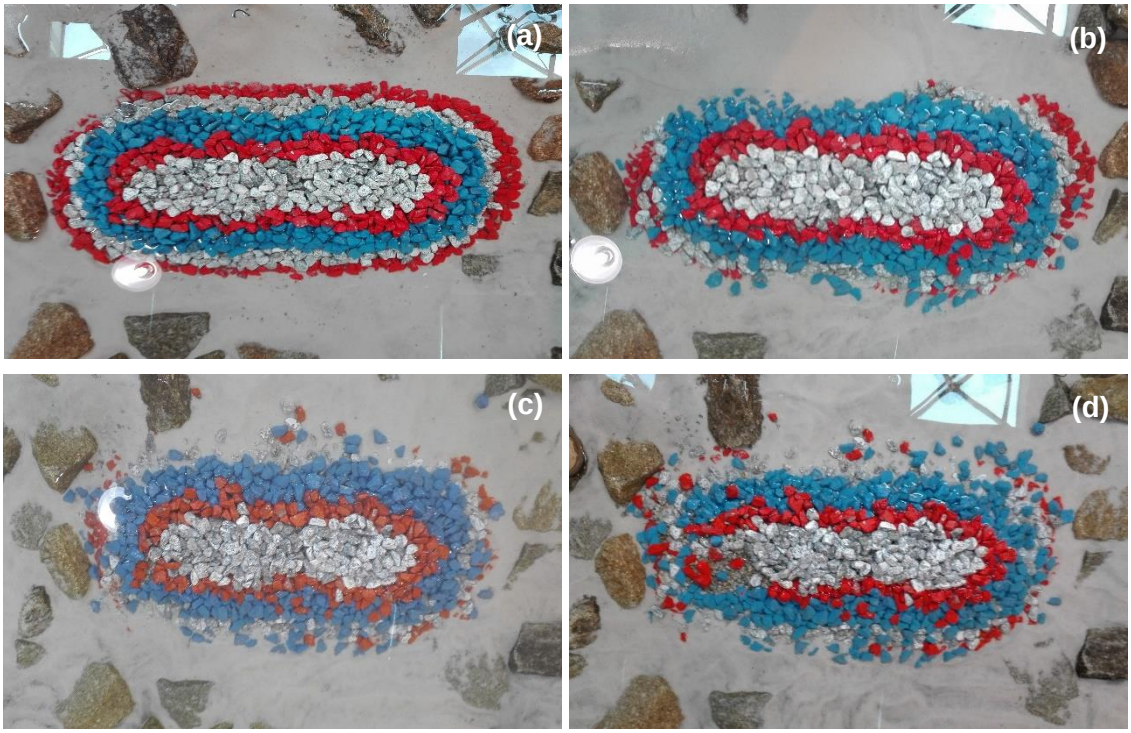


Figura 5.30 - Resumo dos acontecimentos no QB3 durante a Fase 1.3: a) situação inicial; b) após o teste S13_BM_TP16_HS35_02; c) após o teste S13_NM_TP14_HS35_01; d) após o teste S13_NM_TP14_HS40_01.

5.5. SOBRELEVAÇÃO A SOTAMAR DOS QUEBRAMARES

A introdução dos quebramares destacados pode resultar no aumento do nível da superfície livre de água a sotamar, uma vez que estas estruturas dificultam o escoamento da água para o largo (refluxo), pelo que é evidente a importância do estudo deste fenómeno.

Para o estudo deste fenómeno, foram selecionadas duas sondas que se localizam a sotamar dos quebramares implementados, tendo-se escolhido as sondas 1 e 4. A razão da escolha destas sondas encontra-se, precisamente, na localização das mesmas pois a sonda 1 e 4 estão numa localização muito próxima do molhe de Felgueiras, onde a possibilidade de ocorrer sobrelevação do nível de água é maior, devido à proximidade do QB1, que se encontra a barlamar das referidas sondas, do molhe Felgueiras. A escolha das sondas foi baseada ainda na possibilidade de se analisar uma sonda que se encontra na zona de sombra de um quebramar e outra sonda que não se encontra protegida por um quebramar.

Através dos registos das sondas e com recurso a uma filtragem da oscilação da superfície livre da água, devida à passagem das ondas, é possível separar alguma sobrelevação do nível médio da água no local das sondas, do resultado da passagem das ondas. Esta filtragem foi realizada com recurso a uma rotina em *MATLab*, que aplica um filtro passa-baixos ao registo das sondas, sendo este de 6ª ordem, com frequências de corte entre 0.025 e 0.500 f_P (frequência de pico). Foi escolhido, como referência, o registo da sonda 1 para o teste com 4 m de H_S, T_P de 14 s e com o nível PM, tendo-se aplicado o referido filtro ao registo sem quebramar e com quebramar (Figura 5.31 e Figura 5.32, respetivamente).

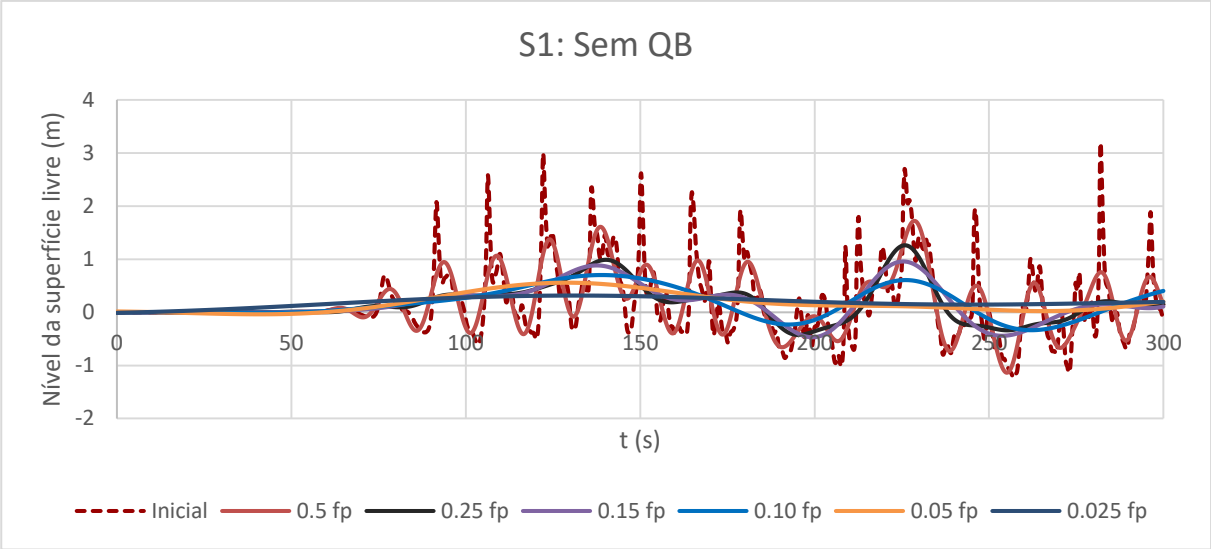


Figura 5.31 - Série temporal da elevação da superfície livre no registo (PM_TP14_HS40) inicial e após a aplicação do filtro de passa-baixos para frequências de corte de 0.025 a 0.5 f_p da sonda 1, sem quebramares.

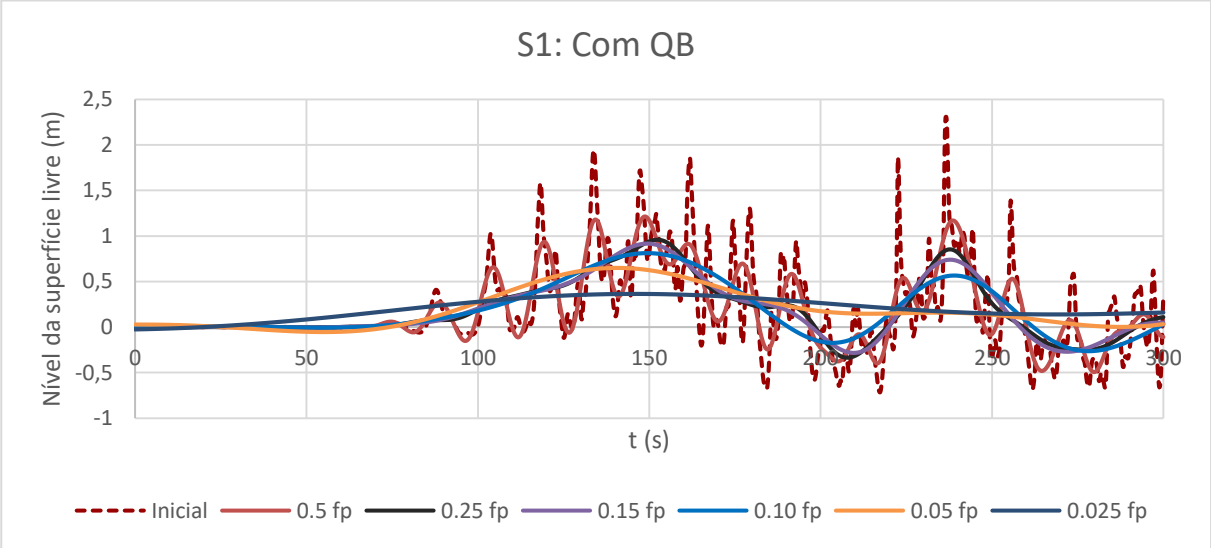


Figura 5.32 - Série temporal da elevação da superfície livre do registo (PM_TP14_HS40) inicial e após a aplicação do filtro de passa-baixos para frequências de corte de 0.025 a 0.5 f_p da sonda 1, com quebramares.

Com a aplicação do filtro e da redução da sua frequência de corte, é possível eliminar as oscilações da superfície livre de alta frequência, obtendo-se uma curva mais estável (Figura 5.31 e Figura 5.32). No referido teste (PM_TP14_HS40), e para a fase com quebramares, a série temporal filtrada (nomeadamente a 0.05 e 0.025 f_p) da sonda 1 não cruza o referencial (Figura 5.32), o que pode ser significado de uma sobrelevação do nível da água, contudo, o mesmo comportamento é visível para as mesmas séries temporais filtradas sem quebramar (Figura 5.31), aparentando não existir sobrelevação do nível da água. Analisando a Figura 5.31 e Figura 5.32 conclui-se que mesmo para frequências de corte de 0.10 f_p existe uma oscilação considerável, cruzando diversas vezes a referência, pelo que são as menores frequências de corte (0.05 e 0.025 f_p) que aparentam ter melhores resultados para avaliação da sobrelevação do nível de água. Como tal foram analisados os resultados da sonda 1, para o referido teste

(PM_TP14_HS40), correspondentes a três frequências de corte, a de 0.10, 0.05 e 0.025 f_p, apresentando, respetivamente, os registos obtidos na Figura 5.33, Figura 5.34 e Figura 5.35.

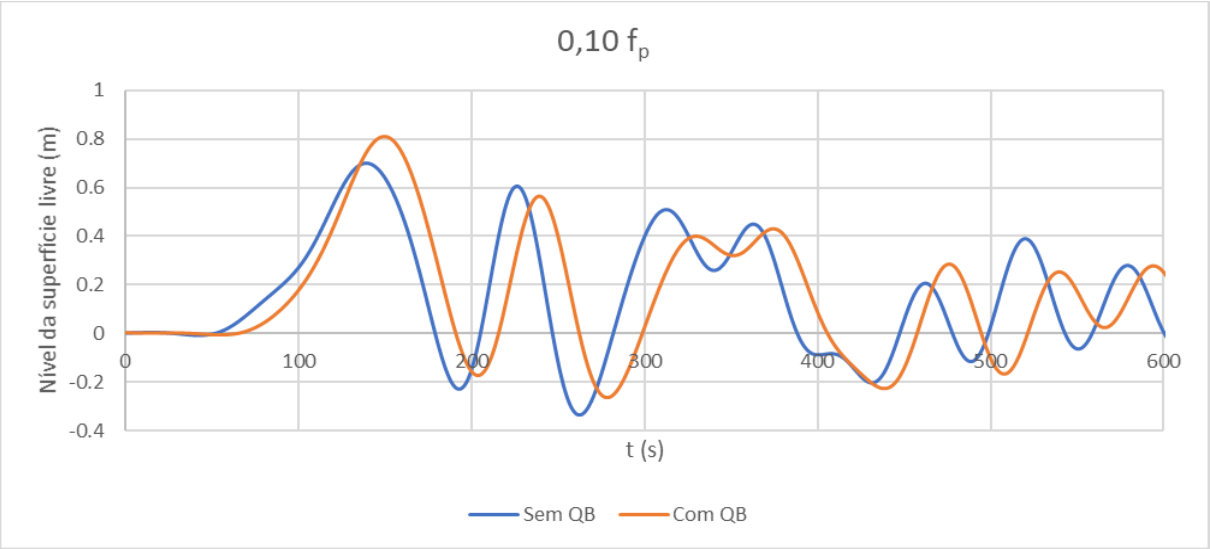


Figura 5.33 - Série temporal da sonda 1 (PM_TP14_HS40) para a frequência de corte de 0.10 f_p.

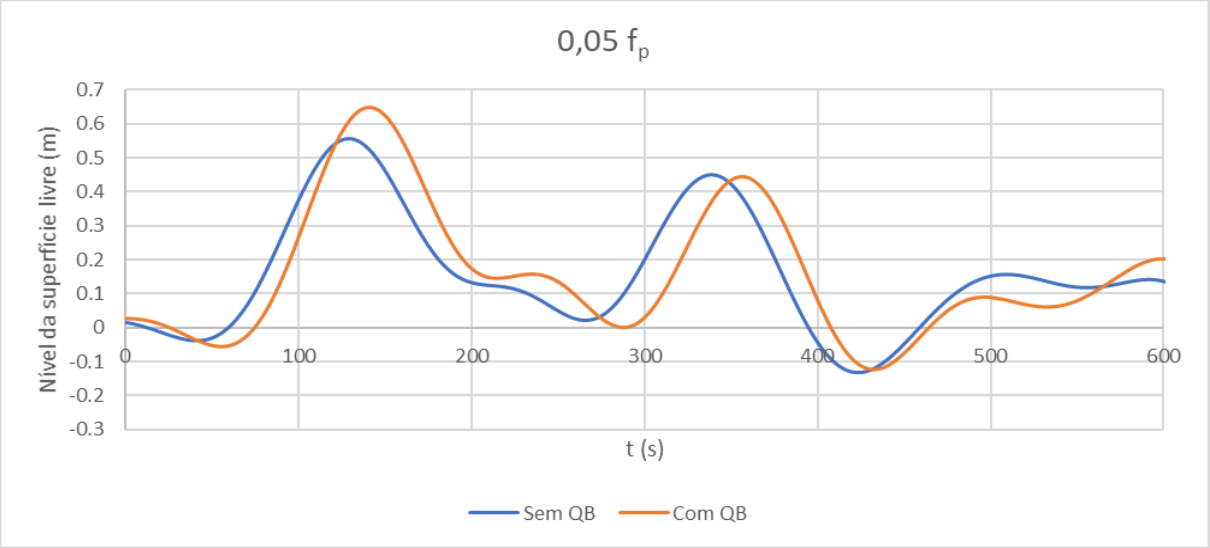


Figura 5.34 - Série temporal da sonda 1 (PM_TP14_HS40) para a frequência de corte de 0.05 f_p.

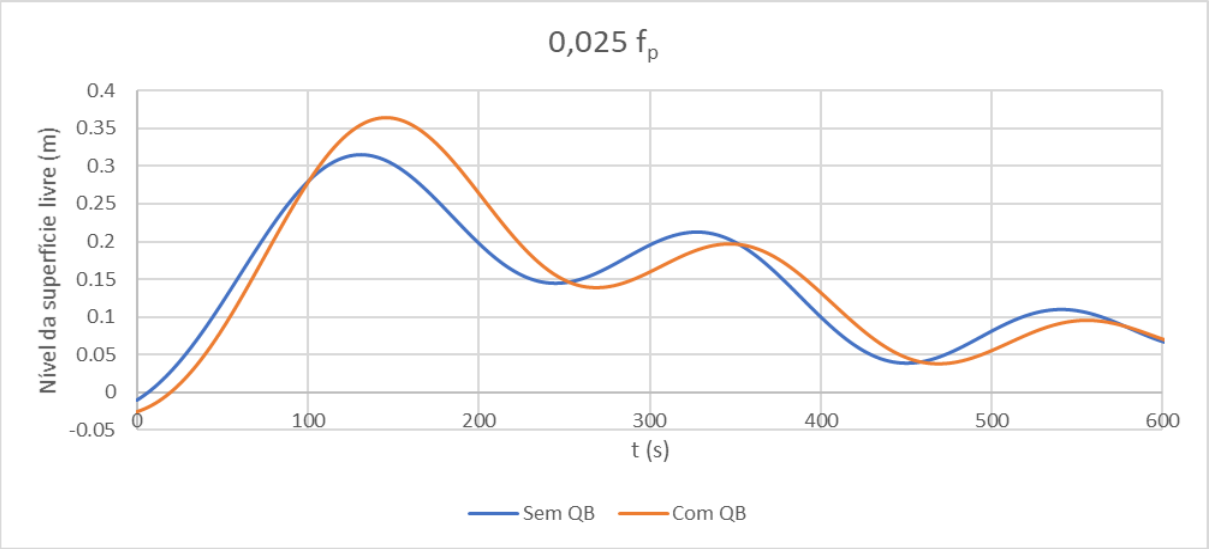


Figura 5.35 - Série temporal da sonda 1 (PM_TP14_HS40) para a frequência de corte de 0.025 f_p.

Para avaliar a sobrelevação local da superfície livre da água, entre as condições de teste com e sem quebramar, determinou-se os valores médios das séries temporais, inicial e após a aplicação do filtro passa-baixos. Assim foram definidos cinco testes de referência, tendo-se escolhido os testes com condições de agitação diferentes (PM_TP10_HS30_01, PM_TP14_HS40_01, PM_TP16_HS45_01, SS_TP14_HS30_01 e SS_TP14_HS60_01) apresentando-se os resultados obtidos para a sonda 1 no Quadro 5.17.

Analisando os valores médios de cada uma das séries temporais é possível observar pequenas sobrelevações do nível médio, tendo-se registado, para estes testes, a maior sobrelevação, de 7 cm (valores do protótipo), para o teste SS_TP14_HS30_01. Estes cinco testes foram escolhidos como resumo dos restantes testes e de forma a tornar o tratamento dos registos mais elucidativo, permitindo concluir que o valor médio da série temporal não sofre alterações com a aplicação do filtro e para qualquer uma das frequências de corte aplicadas. Por este motivo, para os restantes testes, a análise da sobrelevação do nível médio foi realizada com recurso ao valor médio dos registos da sonda 1, não se aplicando o filtro a mais nenhum teste.

Quadro 5.17 – Valores médios das séries temporais da sonda 1 para os testes PM_TP10_HS30_01, PM_TP14_HS40_01, PM_TP16_HS45_01, SS_TP14_HS30_01 e SS_TP14_HS60_01, antes da aplicação do filtro e após a aplicação do filtro para frequências de corte de 0.025 a 0.500 f_p.

Nome do teste	Nível médio (m)						
	Inicial	0.5 fp	0.25 fp	0.15 fp	0.10 fp	0.05 fp	0.025 fp
S11_PM_TP10_HS30_01	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07
S12_PM_TP10_HS30_01	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Sobrelevação	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
S11_PM_TP14_HS40_01	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16
S12_PM_TP14_HS40_01	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21	-0.21	-0.22	-0.21
Sobrelevação	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38	-0.38
S11_PM_TP16_HS45_01	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17
S12_PM_TP16_HS45_01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Sobrelevação	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.11
S11_SS_TP14_HS30_01	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03
S12_SS_TP14_HS30_01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Sobrelevação	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
S11_SS_TP14_HS60_01	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05
S12_SS_TP14_HS60_11	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Sobrelevação	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Identicamente à sonda 1, e como referido anteriormente, foram também analisados os registos da sonda 4 (sonda a sotamar, mas fora da zona de sombra do QB1) aos quais se aplicou o mesmo filtro da sonda 1, para as mesmas frequências de corte, de 0.025 a 0.500 f_p. Tal como a sonda 1, na sonda 4 os valores médios da série temporal com aplicação e sem aplicação do filtro para as diversas frequências de corte, não se alteram pelo que, também para a sonda 4, para a análise da sobrelevação do nível médio foram analisados os valores médios dos registos da sonda 4. O Quadro 5.18 apresenta os valores médios obtidos para os mesmos testes analisados na sonda 1 (PM_TP10_HS30_01, PM_TP14_HS40_01, PM_TP16_HS45_01, SS_TP14_HS30_01 e SS_TP14_HS60_01).

Quadro 5.18 - Valores médios das séries temporais da sonda 4 para os testes PM_TP10_HS30_01, PM_TP14_HS40_01, PM_TP16_HS45_01, SS_TP14_HS30_01 e SS_TP14_HS60_01, antes da aplicação do filtro e após a aplicação do filtro para frequências de corte de 0.025 a 0.500 fp

Nome do teste	Nível médio (m)						
	Inicial	0.5 f_p	0.25 f_p	0.15 f_p	0.10 f_p	0.05 f_p	0.025 f_p
S11_PM_TP10_HS30_01	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
S12_PM_TP10_HS30_01	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10
Sobrelevação	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
S11_PM_TP14_HS40_01	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
S12_PM_TP14_HS40_01	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Sobrelevação	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
S11_PM_TP16_HS45_01	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
S12_PM_TP16_HS45_01	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Sobrelevação	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04	-0.04
S11_SS_TP14_HS30_01	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03
S12_SS_TP14_HS30_01	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03
Sobrelevação	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00
S11_SS_TP14_HS60_01	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
S12_SS_TP14_HS60_11	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
Sobrelevação	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06

O Quadro 5.19 apresenta os valores obtidos para o nível médio e sobrelevação em relação aos registos da sonda 1 para os testes com quebramares e sem quebramares. Durante os testes, os valores da sobrelevação são residuais, existindo até com grande incidência nos testes para o T_P de 14 e 16 s do nível PM, valores negativos da sobrelevação do nível médio, significando que houve até, em alguns momentos, diminuição do nível médio após a introdução dos quebramares. De referir a existência de uma sobrelevação de 22 cm no teste PM_TP16_HS20, mas por ser tão isolado e díspar dos resultados obtidos para os testes realizados antes e após este teste, será comparado, posteriormente, com os resultados obtidos para o mesmo teste da sonda 4.

O Quadro 5.20 ilustra os valores obtidos para o nível médio e sobrelevação em relação aos registos da sonda 4 para os testes com quebramares e sem quebramares. Os valores obtidos para a sobrelevação do nível de água na sonda, quando comparados com os obtidos para a sonda 1, são mais baixos 1, o que era expectável tendo em consideração a localização da sonda 4, pois esta é uma sonda que se encontra a sotamar dos quebramares implementados, mas não está na zona de sombra de nenhum quebramar, ao contrário da sonda 1. Por esta razão é natural a sobrelevação do nível nesta sonda seja menor do que em na sonda 1.

Quadro 5.19 - Nível médio e sobrelevação registados na sonda 1 para cada um dos testes, sem e com quebramares.

Condições do teste	Nível médio (m)		Sobrelevação (m)
	Sem QB (1.1)	Com QB (1.2)	
PM_TP10_HS20	-0.02	-0.01	0.01
PM_TP10_HS30	0.08	0.09	0.01
PM_TP10_HS35	0.12	0.14	0.02
PM_TP10_HS40	0.15	0.17	0.02
PM_TP10_HS45	0.16	0.19	0.03
PM_TP10_HS50	0.17	0.20	0.03
PM_TP10_HS55	0.18	0.23	0.05
PM_TP10_HS60	0.18	0.23	0.05
PM_TP14_HS20	0.01	0.03	0.02
PM_TP14_HS30	0.08	0.05	-0.04
PM_TP14_HS35	0.13	0.14	0.02
PM_TP14_HS40	0.17	-0.21	-0.38
PM_TP14_HS45	0.18	0.08	-0.10
PM_TP14_HS50	0.18	0.14	-0.04
PM_TP16_HS20	0.01	0.23	0.22
PM_TP16_HS30	-0.05	-0.17	-0.11
PM_TP16_HS35	0.12	0.03	-0.08
PM_TP16_HS40	0.10	0.03	-0.07
PM_TP16_HS45	0.16	0.06	-0.10
PM_TP16_HS50	0.16	0.11	-0.06
SS_TP14_HS30	-0.03	0.04	0.07
SS_TP14_HS40	0.03	0.04	0.01
SS_TP14_HS50	0.03	0.09	0.06
SS_TP14_HS60	0.06	0.07	0.02

Quadro 5.20 - Nível médio e sobrelevação registados na sonda 4 para cada um dos testes, sem e com quebramares.

Condições do teste	Nível médio (m)		Sobrelevação (m)
	Sem QB (1.1)	Com QB (1.2)	
PM_TP10_HS20	0.01	-0.01	-0.01
PM_TP10_HS30	0.06	0.10	0.05
PM_TP10_HS35	0.10	0.12	0.02
PM_TP10_HS40	0.10	0.16	0.06
PM_TP10_HS45	0.13	0.17	0.04
PM_TP10_HS50	0.14	0.18	0.04
PM_TP10_HS55	0.15	0.19	0.04
PM_TP10_HS60	0.16	0.20	0.04
PM_TP14_HS20	0.01	0.04	0.03
PM_TP14_HS30	0.04	0.07	0.03
PM_TP14_HS35	0.07	0.09	0.02
PM_TP14_HS40	0.11	0.12	0.01
PM_TP14_HS45	0.14	0.14	0.00
PM_TP14_HS50	0.15	0.15	0.00
PM_TP16_HS20	0.01	0.03	0.02
PM_TP16_HS30	0.01	0.06	0.05
PM_TP16_HS35	0.06	0.09	0.03
PM_TP16_HS40	0.06	0.06	0.00
PM_TP16_HS45	0.11	0.07	-0.03
PM_TP16_HS50	0.10	-0.45	-0.56
SS_TP14_HS30	-0.03	-0.03	0.00
SS_TP14_HS40	-0.03	-0.08	-0.05
SS_TP14_HS50	-0.03	-0.05	-0.02
SS_TP14_HS60	-0.04	-0.10	-0.06

Quanto ao teste PM_TP16_HS20, onde se obteve uma sobrelevação do nível da água de 0.22 m para a sonda 1, o mesmo não se verificou na sonda 4, o que era previsto pela localização da sonda 4 (fora da zona de sombra de um quebramar).

Nos registos da sonda 4, relativamente ao teste PM_TP16_HS50 em que se obteve uma sobrelevação anormal do nível médio da água de -0.56 m (valor do protótipo), e após a análise dos registos, pôde-se verificar que o teste com quebramares (S12_PM_TP16_HS20) (para o qual se obteve um nível médio da água de -0.45 m), se revelou defeituoso pois antes de se iniciar cada teste, era necessário que não existisse qualquer oscilação da superfície da água o que, por lapso, não aconteceu para este teste.

Com a análise dos resultados pode-se concluir que ocorreu a sobrelevação do nível da superfície de água com a implementação dos quebramares, com mais incidência na sonda 1 como era previsto tendo em conta a sua localização (junto ao molhe de Felgueiras e na zona de sombra do QB1). Apesar de a grande maioria aos valores da sobrelevação serem reduzidos (resultados variam muito na proximidade dos 0.03 m), estes valores não devem ser menosprezados. Comprova-se que com a implementação dos quebramares existe uma pequena sobrelevação do nível médio da superfície de água, o que favorece a propagação das ondas até à praia e por consequência aumentar as distâncias de espraiamento o que pode provocar o aumento do número e da intensidade dos galgamentos.

6 SÍNTESE, CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve por objetivo a avaliação da eficácia e da estabilidade de estruturas de proteção costeira, implementadas como forma de mitigação dos efeitos das alterações climáticas. Foram assim implementadas soluções de proteção costeira, quebramares destacados, num trecho da costa Portuguesa, a praia do Carneiro, no Porto, e realizados testes para diferentes condições de agitação marítima e níveis de água, com os quais se obtiveram registos de alturas de onda que permitiram a realização da análise da eficácia das referidas soluções.

A construção do modelo físico, que incluiu a reprodução da praia do Carneiro, da envolvente e dos quebramares destacados, por ser um modelo à escala 1/60 e retratar uma grande área costeira, revelou ser um processo bastante complexo, sendo necessário grande capacidade de coordenação dos participantes, e extenso em quantidade e em tempo de trabalho. Referir que desde o início dos trabalhos e ao longo do mesmo foram surgindo problemas que necessitaram da implementação de soluções diferentes e eficazes.

Uma vez que o modelo físico foi realizado à escala 1/60, uma pequena desatenção na construção do mesmo representaria uma grande diferença em relação ao protótipo, pelo que neste trabalho deve-se salientar a importância da inclusão de variados pormenores no modelo, como a inclusão dos afloramentos rochosos existentes no local, bem como a exigente e difícil representação da batimetria e os pormenores dos molhes existentes, todos eles com grande influência na agitação marítima incidente nas estruturas.

Após a conclusão da construção do modelo, seguiu-se a fase de calibração dos equipamentos, nomeadamente a calibração dos batedores. Para tal foi necessário definir as condições a testar, ou seja, definir os níveis de água e o período da onda de pico e altura de onda significativa a serem geradas. Posteriormente seriam realizados os testes sem as estruturas, sendo que os registos obtidos com estes testes, serviriam como base de comparação com os registos obtidos nos testes realizados com as estruturas implementadas, permitindo assim avaliar a eficácia das estruturas.

Posteriormente à realização dos testes e obtenção dos respetivos registos, foi possível avaliar as estruturas através de comparações entre os registos das diferentes fases de testes.

Através da análise dos resultados obtidos, foi possível concluir que as soluções apresentam, em geral, eficácia na dissipação da energia das ondas, tendo-se verificado que as mesmas apresentam maior dissipação para alturas de onda incidentes menores, tal como era esperado no início dos testes. Com introdução dos quebramares destacados verificou-se alguma acreção de sedimentos na sua envolvente,

bastante acentuada para os níveis de água menores e menos intensa para os níveis de água maiores, tanto a barlamar das estruturas como a sotamar, sendo mais acentuada a sotamar.

No entanto, através da observação durante os testes e visualização das imagens captadas pelo sistema de vídeo, verificou-se a ocorrência de um pequeno número de galgamentos durante o nível de preia-mar que aumentaram de frequência durante os testes para o nível extremo, que prevê os efeitos das alterações climáticas. Estes galgamentos ocorreram tanto na praia das pastoras (praia entre os molhes Norte e de Felgueiras) como na praia do Carneiro (onde se implementaram os quebramares), podendo-se concluir, sob o ponto de vista da mitigação dos galgamentos, que as estruturas não tiveram sucesso.

Através da observação durante os testes e com a análise das fotografias tiradas aos quebramares após cada teste, verificou-se que o QB3, sendo o menor de todos os quebramares, realizado com uma cota de coroamento menor e utilizando blocos de enrocamento no manto resistente com um peso menor, foi aquele que apresentou danos mais cedo (na sequência de testes). Sendo o dano nestas estruturas cumulativo, considerando-se a ruína do quebramar após o teste para o nível de preia mar, com T_p de 10 s e H_S de 5.5 m, quando ainda não se tinham atingido os testes para o nível extremo. Assim, conclui-se que este quebramar não seria uma boa solução para as condições de exposição atuais, nem num futuro próximo em que os efeitos das alterações climáticas se farão sentir de forma mais intensa.

Quanto aos quebramares 1 e 2, que foram realizados com a mesma cota de coroamento e também com secções transversais idênticas, através da observação das fotografias obtidas, observou-se um comportamento estrutural razoável ao longo dos testes registando-se, no entanto, ao longo da primeira sequência de testes para o nível extremo (sequência de testes para o T_p de 14 s), os danos aumentaram e no final da referida sequência de testes, considerou-se a ruína dos dois quebramares. Conclui-se que ambos os quebramares não seriam capazes de resistir a níveis de água que se poderão vir a registar com os efeitos das alterações climáticas.

Para concluir, apesar de os quebramares até terem apresentado eficácia na dissipação da energia das ondas para os níveis de água correntes, baixa mar, nível médio e preia mar (à exceção dos quebramares que se revelou instável estruturalmente), nenhum dos quebramares apresentou sucesso para o nível previsto com os efeitos das alterações climáticas. Este aspeto não invalida o tipo de solução (quebramares destacados), apenas evidencia a necessidade de se alterar algumas características do mesmo (*e.g.*, cota do coroamento e o peso dos blocos do manto resistente).

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com o decorrer e acompanhamento da construção do modelo físico da praia do Carneiro, bem como a observação do desenvolvimento dos testes e a análise dos seus registos, foi possível detetar aspetos que necessitam de ser melhorados e tidos em consideração em trabalhos futuros.

Em primeiro lugar um aspeto relacionado com a construção do modelo reduzido, mais concretamente com a definição da batimetria do modelo. Para a definição da batimetria foram utilizadas réguas em MDF, nas quais estavam marcadas as cotas do fundo. O problema associado a estas réguas, reside na dificuldade em retirar as réguas após a definição do perfil, pois com a impulsão da areia sobre as mesmas é necessário exercer grandes forças resultando, por vezes, em grandes alterações do perfil. Assim, sugere-se a implementação de outros métodos para a definição da batimetria como, por exemplo, a utilização de marcadores em metal (ou outro material) em que seriam marcadas as cotas do solo.

Como referido anteriormente, o trabalho experimental desta dissertação baseia-se numa solução de proteção costeira em estudo. Assim, quanto às estruturas de proteção costeira, e tendo em consideração o referido na secção anterior, sugerem-se as seguintes melhorias:

- Aumento do peso volúmico dos blocos colocados em todas as camadas dos quebramares, pois para o nível extremo (nível que considera a subida do nível médio das águas do mar devido aos efeitos das alterações climáticas) registaram-se graves danos nos quebramares;
- Introdução da risberma nos quebramares;
- Estudo de uma possível solução a colocar na praia das Pastoras, entre os molhes Norte e de Felgueiras, pois também foram registados galgamentos nesta praia;
- Utilização de perfiladores de fundo de forma a garantir a batimetria e analisar a sua evolução;

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

BAINE, Mark (2001) - Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. Ocean & Coastal Management. 44:3. 241-259.

BLACK, Kerry; MEAD, S. (2001) - Design of the gold coast reef for surfing, beach amenity and coastal protection: surfing aspects. Journal of Coastal Research. 29. 115-130.

BORSJE, Bas W.; VAN WESENBEECK, Bregje K.; DEKKER, Frank; PAALVAST, Peter; BOUMA, Tjeerd J.; VAN KATWIJK, Marieke M.; DE VRIES, Mindert B. (2011) - How ecological engineering can serve in coastal protection. Ecological Engineering. 37:2. 113-122. ISSN 09258574.

CARMO, José Simão Antunes do (2013) - Experiência de recuperação de um sistema dunar e proposta de instrumentos complementares de proteção, atração e valorização ambiental. Revista de Gestão Costeira Integrada. 317-328. ISSN 16468872.

CHURCH, J.A. ; CLARK, P.U.; CAZENAVE, A.; GREGORY, J.M.; JEVREJEVA, S.; LEVERMANN, A.; MERRIFIELD, M.A.; MILN, G.A.; NEREM, R.S.; NUNN, P.D.; PAYNE, A.J.; PFEFFER, W.T.; STAMMER, D.; UNNIKRISHNAN, A.S. (2013) - Sea Level Change. In PRESS, Cambridge University ClimateChange 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom e New York, NY, USA:

CORBETT, B. (2001) - *Wave-Induced Pressures and Internal Stabilityof Geotextile Sand Containers in Artificial Reefs*. The University of Queensland.

EHLERS, A.; WORM, B.; REUSCH, T. B. H. (2008) - Importance of genetic diversity in eelgrass Zostera marina for its resilience to global warming. Marine Ecology Progress Series. 355: 1-7. ISSN 0171-8630 1616-1599.

GEDAN, Keryn B.; KIRWAN, Matthew L.; WOLANSKI, Eric; BARBIER, Edward B.; SILLIMAN, Brian R. (2010) - The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. Climatic Change. 106:1. 7-29. ISSN 0165-0009 1573-1480.

HARRIS, Lee (2003) - Artificial Reef Structures for Shoreline Stabilization and Habitat Enhancement. Proceedings of the 3rd International Surfing Reef Symposium. 176-178.

HARRIS, Lee (2009) - Artificial Reefs for Ecosystem Restoration and Coastal Erosion Protection with Aquaculture and Recreational Amenities. Reef Journal. 1: 235-246.

IPCC (2014) - AR5 - Synthesis Report - Climate Change 2014

JACKSON, Leslie; CORBETT, Bobbie; MCGRATH, John; TOMLINSON, Rodger; STUART, Greg (2007) - Narrowneck Reef: review of seven years of monitoring. Shore & Beach.

JACKSON, Leslie; TOMLINSON, Rodger; TURNER, Ian; CORBETT, Bobbie; D'AGATA, Michel; MCGRATH, John (2005) - Narrowneck Artificial Reef Results of 4 Yrs of Monitoring and Modifications. Proceedings of the 4th International Surfing Reef Symposium.

JAMES, Rebecca K.; SILVA, Rodolfo; VAN TUSSENBROEK, Brigitta I.; ESCUDERO-CASTILLO, Mireille; MARIÑO-TAPIA, Ismael; DIJKSTRA, Henk A.; VAN WESTEN, René M.; PIETRZAK, Julie D.; CANDY, Adam S.; KATSMAN, Caroline A.; VAN DER BOOG, Carine G.; RIVA, Riccardo E. M.; SLOBBE, Cornelis; KLEES, Roland; STAPEL, Johan; VAN DER HEIDE, Tjisse; VAN KATWIJK, Marieke M.; HERMAN, Peter M. J.; BOUMA, Tjeerd J. (2019) - Maintaining Tropical

Beaches with Seagrass and Algae: A Promising Alternative to Engineering Solutions. BioScience. 69:2. 136-142. ISSN 0006-3568 1525-3244.

JENSEN, Antony (2001) - European Artificial Reef Research Network (EARRN): Final Report and Recommendations: SOUTHAMPTON, University of.

KING, Susanna E.; LESTER, John N. (1995) - The Value of Salt Marsh as a Sea Defence. Marine Pollution Bulletin. 30: 180-189.

KOCH, Evamaria W.; SANFORD, Larry P.; CHEN, Shih-Nah; SHAFER, Deborah J.; SMITH, Jane McKee (2006) - Waves in seagrass systems: review and technical recommendations Washington DC

LARKIN, Michael; WATTS, Simon; CLIFTON, Elizabeth (2006) - Giving voice and making sense in interpretative phenomenological analysis. Qualitative Research in Psychology. 3:2. 102-120. ISSN 1478-0887 1478-0895.

MORRIS, R. L.; KONLECHNER, T. M.; GHISALBERTI, M.; SWEARER, S. E. (2018) - From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence. Glob Chang Biol. 24:5. 1827-1842. ISSN 1365-2486 (Electronic) 1354-1013 (Linking).

OLAFSON, Ann (1997) - Stabilization of Coastal Dunes with Vegetation. Restoration and Reclamation Review.

ONDIVIELA, Barbara; LOSADA, Inigo J.; LARA, Javier L.; MAZA, Maria; GALVÁN, Cristina; BOUMA, Tjeerd J.; VAN BELZEN, Jim (2014) - The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate. Coastal Engineering. 87: 158-168. ISSN 03783839.

ORTH, Robert J.; CARRUTHERS, Tim J. B.; DENNISON, William C.; DUARTE, Carlos M.; FOURQUREAN, James W.; HECK, Kenneth L.; HUGHES, A. Randall; KENDRICK, Gary A.; KENWORTHY, W. Judson; OLYARNIK, Suzanne; SHORT, Frederick T.; WAYCOTT, Michelle; WILLIAMS, Susan L. (2006) - A Global Crisis for Seagrass Ecosystems. BioScience. 56:12. ISSN 0006-3568.

PALACIOS, S. L.; ZIMMERMAN, R. C. (2007) - Response of eelgrass Zostera marina to CO2 enrichment: possible impacts of climate change and potential for remediation of coastal habitats. Marine Ecology Progress Series. 344: 1-13. ISSN 0171-8630 1616-1599.

SIMÃO, José; ANTUNES DO CARMO, José (2018) - Climate Change, Adaptation Measures, and Integrated Coastal Zone Management: The New Protection Paradigm for the Portuguese Coastal Zone. Journal of Coastal Research. 34

SIMIONI, B.; ESTEVES, L. (2010) - Avaliação Qualitativa do Desempenho dos Recifes Artificiais Multifuncionais (RAM). Revista da Gestão Costeira Integrada [Em linha]. 10: 127-145.

SPALDING, Mark D.; RUFFO, Susan; LACAMBRA, Carmen; MELIANE, Imèn; HALE, Lynne Zeitlin; SHEPARD, Christine C.; BECK, Michael W. (2014) - The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards. Ocean & Coastal Management. 90: 50-57. ISSN 09645691.

SUTTON-GRIER, Ariana E.; WOWK, Kateryna; BAMFORD, Holly (2015) - 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. 51: 137-148. ISSN 14629011.

TAVEIRA PINTO, F. (2018) - Quebramar de Taludes. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP.

TAVEIRA PINTO, F. (2019) - Modelação Física. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP.

THAMPANYA, U.; VERMAAT, J. E.; SINSAKUL, S.; PANAPITUKKUL, N. (2006) - Coastal erosion and mangrove progradation of Southern Thailand. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 68:1-2. 75-85. ISSN 02727714.

VOORDE, M.T.; CARMO, José S. Antunes do; NEVES, Maria Graça (2006) - Contribution to the design of artificial surfing reef breakwaters for both coastal protection and recreational activities. In Hydraulic Structures: A Challenge to Engineers and Researchers. Brisbane, Australia: The University of Queensland. p. 115-124.

SITES:

[1] http://californiadiver.com/treaded-mess-millions-of-tires-being-removed-from-artificial-reef-projects-worldwide/ [05-03-2019]

[2] https://andylua.blogspot.com/p/pvc-problematic-plastic.html [05-03-2019]

[3] https://www.reefdoctor.org/projects/conservation/coral-reefs/artificial-reefs [05-03-2019]

[4] http://www.inoxnet.com/portisub/Items.aspx?item=P10&itemtypeid=1647 [06-03-2019]

[5] https://blog.madurodive.com/index.php/scuba-tanks [06-03-2019]

[6] http://www.reefball.org/ [09-03-2019]

[7] https://www.proaquatica.pt/recifes-artificiais.html [09-03-2019]

[8] https://www.instructables.com/id/Build-an-Artificial-Reef [09-03-2019]

[9] https://beachesgoldcoast.com.au/projects/narrowneck-reef-renewal/ [15-03-2019]

[10] https://www.constantinealexander.net/2016/02/seagrass-genome-study-to-boost-ecological-insight-in marine-ecosystems.html [21-03-2019]

[11] http://www.floracatalana.net/cymodocea-nodosa-ucria-asch [22-03-2019]

[12] http://www.floracatalana.net/posidonia-oceanica-l-delile [22-03-2019]

[13] http://intertidal-novascotia.blogspot.com/ [22-03-2019]

[14] http://luirig.altervista.org/ [22-03-2019]

[15] https://www.campeaoprovincias.pt/noticia/mar-destroi-dunas-e-passadicos-na-praia-de-mira [02-04-2019]

[16] https://flora-on.pt/?q=Ammophila [02-04-2019]

[17] https://www.express.co.uk/news/nature/994130/UNESCO-International-Day-Conservation-Mangroves-Th-r-se-Coffey [12-04-2019]

[18] https://www.nature.scot/landscapes-and-habitats/habitat-types/coast-and-seas/coastal-habitats/saltmarsh [15-04-2019]

[19] https://paginas.fe.up.pt/~shrha/laboratorios/lh.html [03-05-2019]

ANEXOS

ANEXO A: REGISTO DO COMPORTAMENTO DOS QUEBRAMARES



Figura A.1 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_BM_TP10_HS20_01; c) teste S12_BM_TP10_HS30_01; d) teste S12_BM_TP10_HS35_01; e) teste S12_BM_TP10_HS40_01; f) teste S12_BM_TP14_HS20_01.



Figura A.2 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_BM_TP14_HS30_01; c) teste S12_BM_TP14_HS35_01; d) teste S12_BM_TP14_HS40_01; e) teste S12_BM_TP16_HS20_01; f) teste S12_BM_TP16_HS30_01.



Figura A. 3 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_BM_TP16_HS35_01; c) teste S12_BM_TP16_HS35_02; d) teste S12_NM_TP10_HS20_01; e) teste S12_NM_TP10_HS20_02; f) teste S12_NM_TP10_HS30_01.



Figura A.4 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_NM_TP10_HS35_01; c) teste S12_NM_TP10_HS40_01; d) teste S12_NM_TP10_HS45_01; e) teste S12_NM_TP14_HS20_01; f) teste S12_NM_TP14_HS30_01.

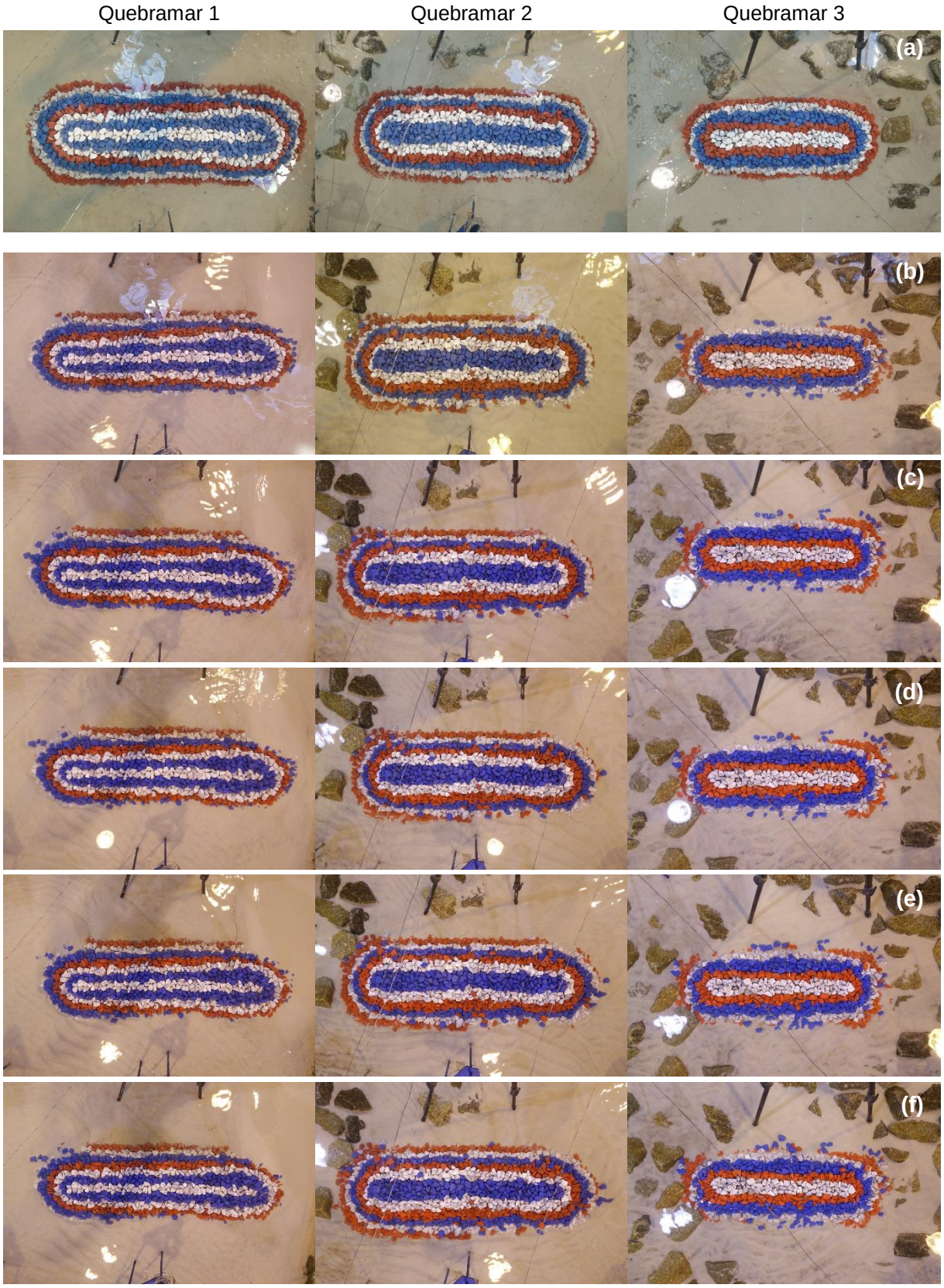


Figura A.5 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_NM_TP14_HS30_02; c) teste S12_NM_TP14_HS35_01; d) teste S12_NM_TP14_HS40_01; e) teste S12_NM_TP16_HS20_01; f) teste S12_NM_TP16_HS30_01.



Figura A.6 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_NM_TP16_HS35_01; c) teste S12_NM_TP16_HS40_01; d) teste S12_NM_TP16_HS45_01; e) teste S12_PM_TP10_HS20_01; f) teste S12_PM_TP10_HS30_01.



Figura A.7 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_PM_TP10_HS35_01; c) teste S12_PM_TP10_HS40_01; d) teste S12_PM_TP10_HS45_01; e) teste S12_PM_TP10_HS50_01; f) teste S12_PM_TP10_HS55_01.



Figura A.8 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_PM_TP10_HS60_01; c) teste S12_PM_TP14_HS20_01; d) teste S12_PM_TP14_HS30_01; e) teste S12_PM_TP14_HS35_01; f) teste S12_PM_TP14_HS40_01.



Figura A.9 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_PM_TP14_HS45_01; c) teste S12_PM_TP14_HS50_01; d) teste S12_PM_TP16_HS20_01; e) teste S12_PM_TP16_HS30_01; f) teste S12_PM_TP16_HS35_01.

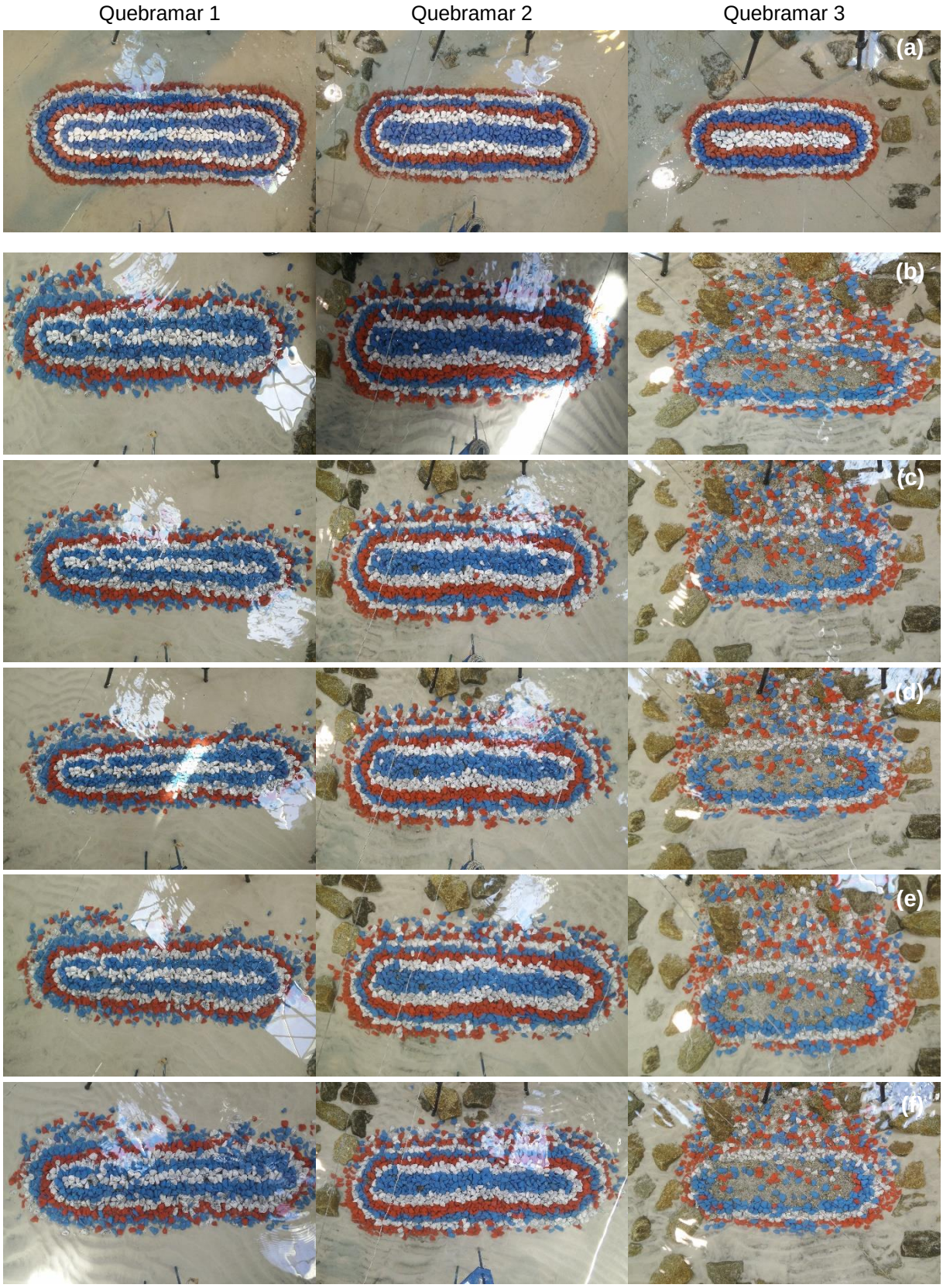


Figura A.10 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_PM_TP16_HS40_01; c) teste S12_PM_TP16_HS45_01; d) teste S12_PM_TP16_HS50_01; e) teste S12_PM_TP16_HS55_01; f) teste S12_SS_TP14_HS30_01.

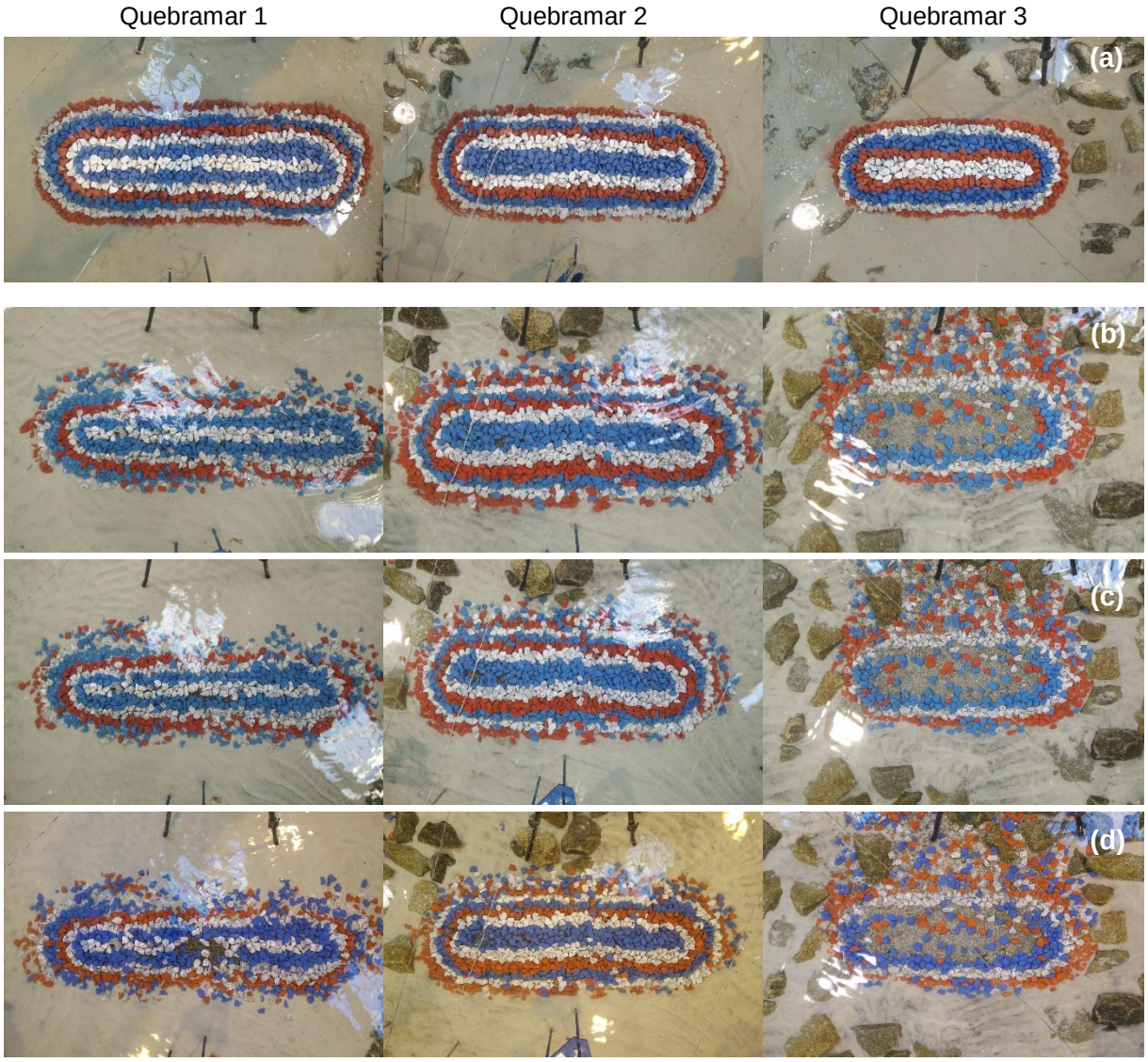


Figura A.11 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial; b) teste S12_SS_TP14_HS40_01; c) teste S12_SS_TP14_HS50_01; d) teste S12_SS_TP14_HS60_01.

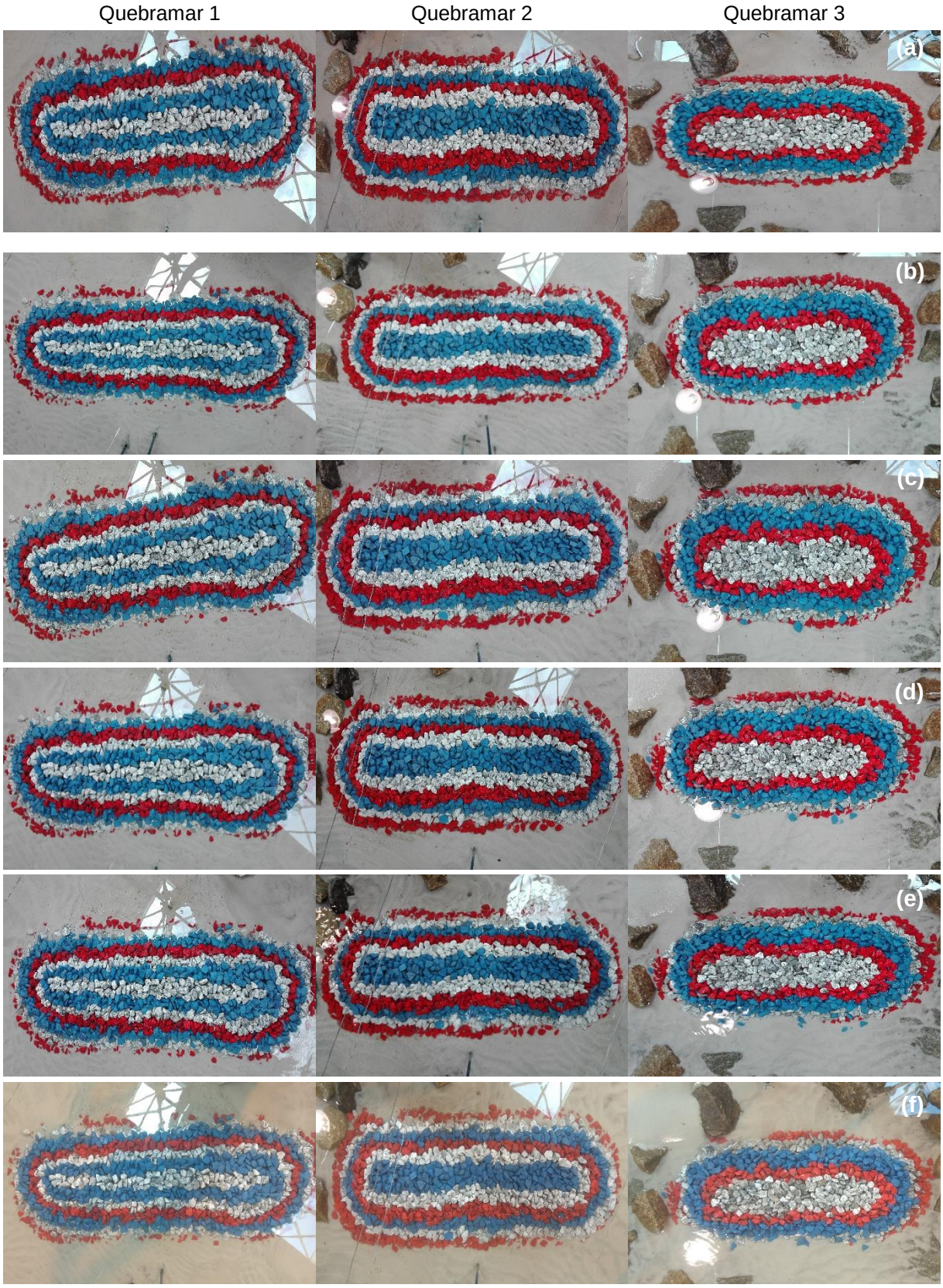


Figura A.12 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_BM_TP10_HS20_01; c) teste S13_BM_TP10_HS30_01; d) teste S13_BM_TP10_HS35_01; e) teste S13_BM_TP10_HS40_01; f) teste S13_BM_TP10_HS45_01.

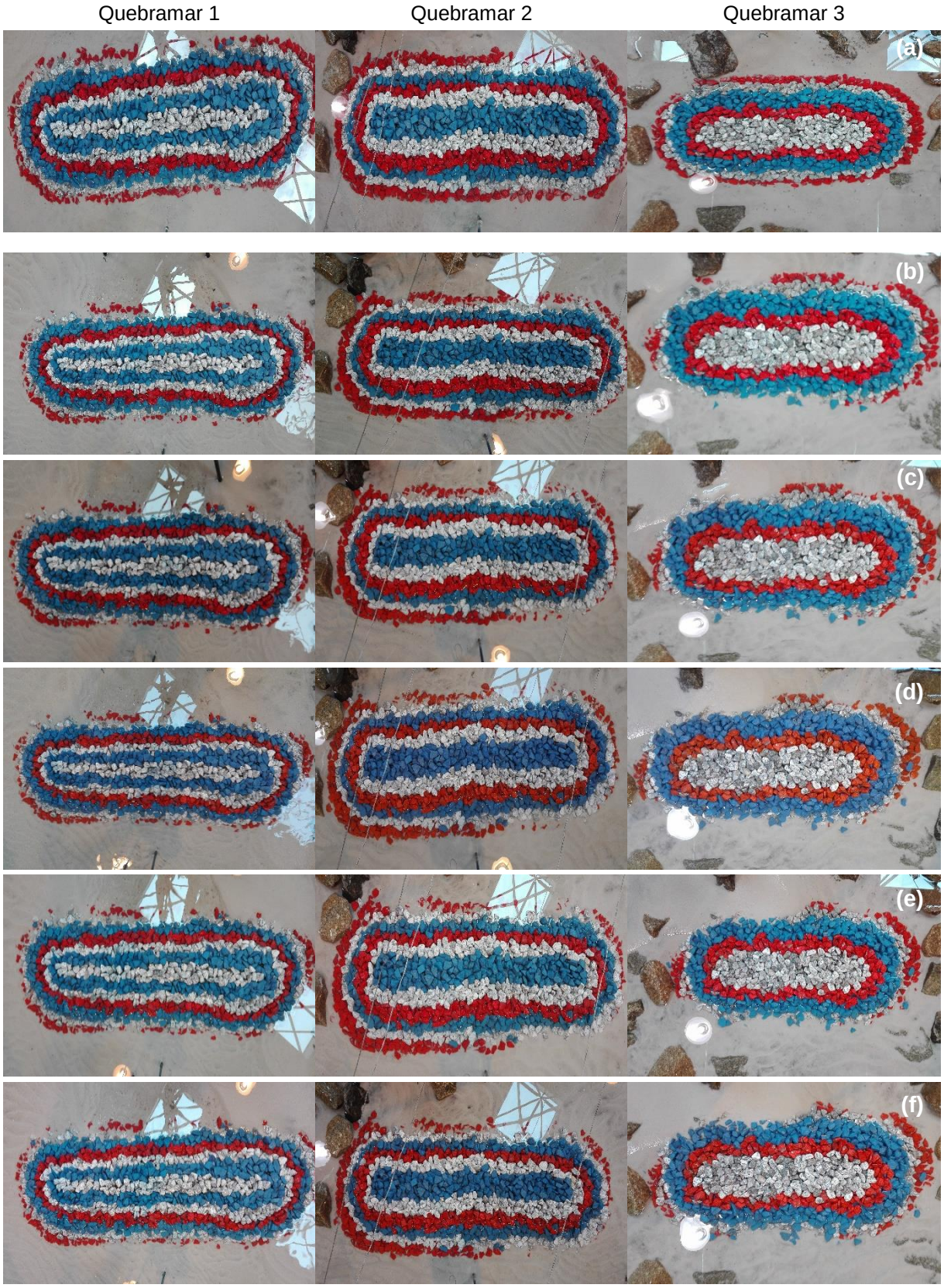


Figura A.13 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_BM_TP14_HS20_01; c) teste S13_BM_TP14_HS30_01; d) teste S13_BM_TP14_HS35_01; e) teste S13_BM_TP14_HS40_01; f) teste S13_BM_TP16_HS20_01.

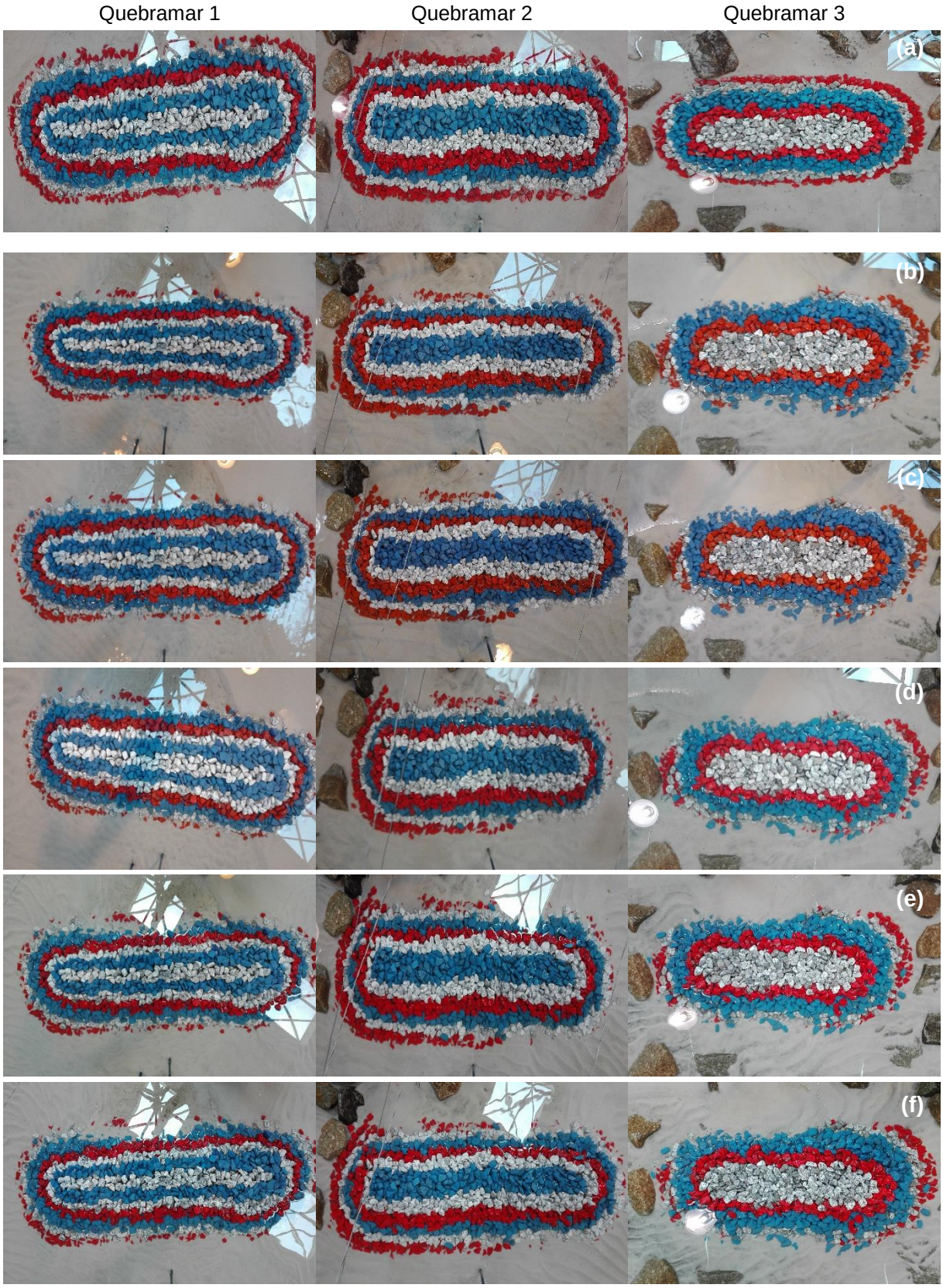


Figura A.14 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_BM_TP16_HS30_01; c) teste S13_BM_TP16_HS35_01; d) teste S13_BM_TP16_HS35_02; e) teste S13_NM_TP10_HS20_01; f) teste S13_NM_TP10_HS20_02.

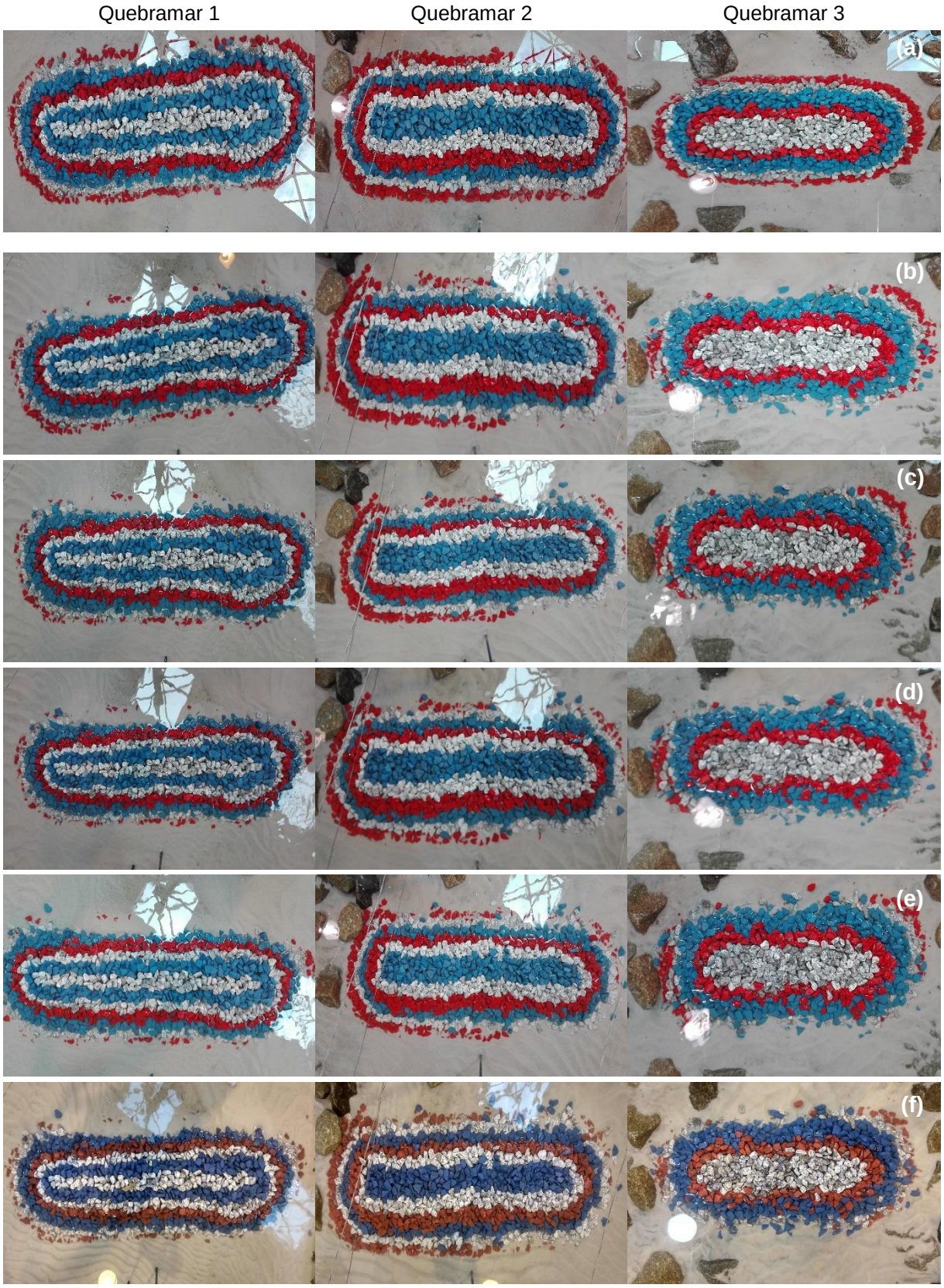


Figura A.15 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_NM_TP10_HS30_01; c) teste S13_NM_TP10_HS35_01; d) teste S13_NM_TP10_HS40_01; e) teste S13_NM_TP10_HS45_01; f) teste S13_NM_TP14_HS20_01.

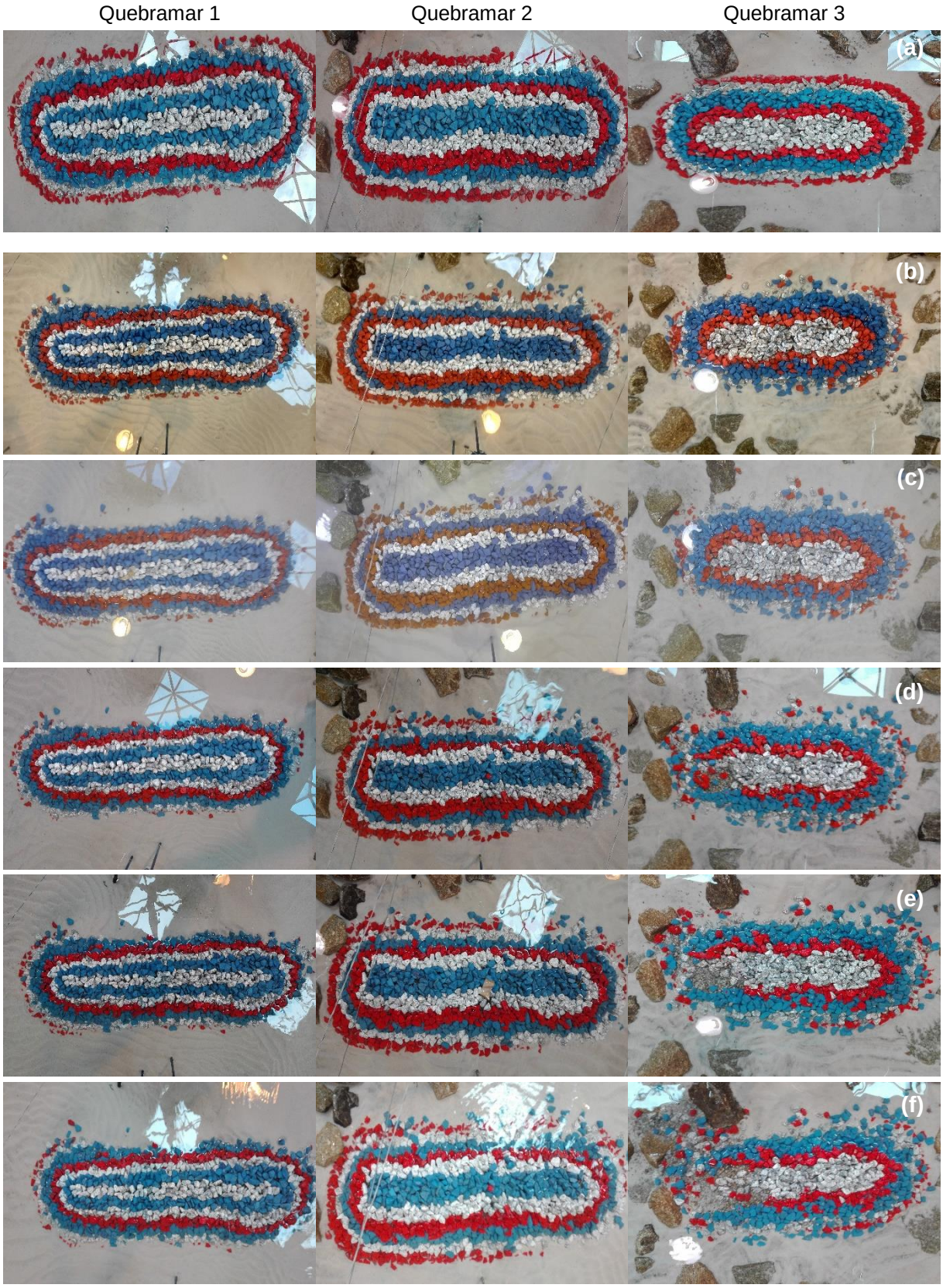


Figura A.16 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_NM_TP14_HS30_01; c) teste S13_NM_TP14_HS35_01; d) teste S13_NM_TP14_HS40_01; e) teste S13_NM_TP16_HS20_01; f) teste S13_NM_TP16_HS30_01.



Figura A.17 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_NM_TP16_HS35_01; c) teste S13_NM_TP16_HS40_01; d) teste S13_NM_TP16_HS45_01; e) teste S13_PM_TP10_HS20_01; f) teste S13_PM_TP10_HS30_01.

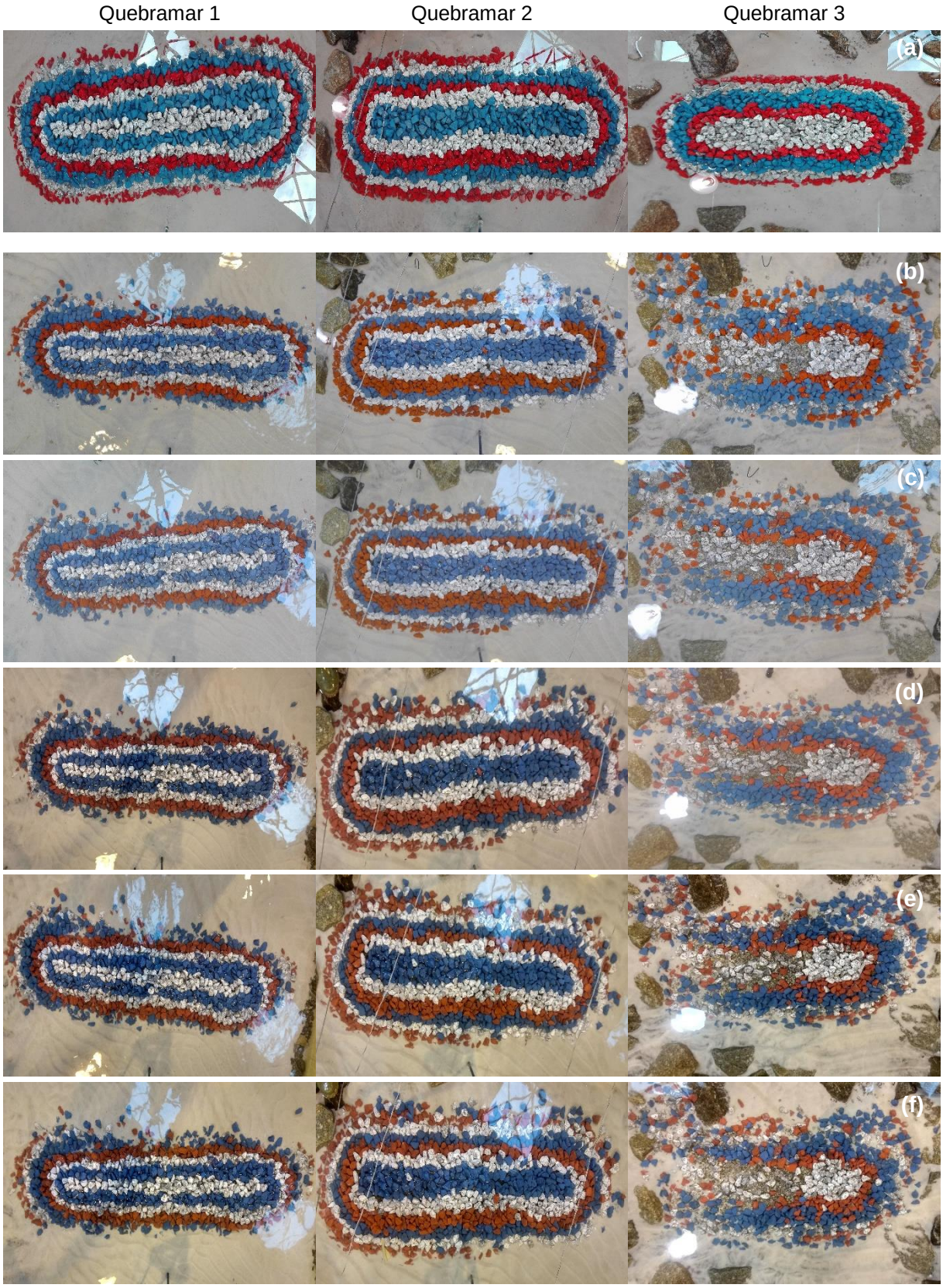


Figura A.18 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_PM_TP10_HS35_01; c) teste S13_PM_TP10_HS40_01; d) teste S13_PM_TP10_HS45_01; e) teste S13_PM_TP10_HS50_01; f) teste S13_PM_TP10_HS55_01.



Figura A.19 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_PM_TP10_HS60_01; c) teste S13_PM_TP14_HS20_01; d) teste S13_PM_TP14_HS30_01; e) teste S13_PM_TP14_HS35_01; f) teste S13_PM_TP14_HS40_01.

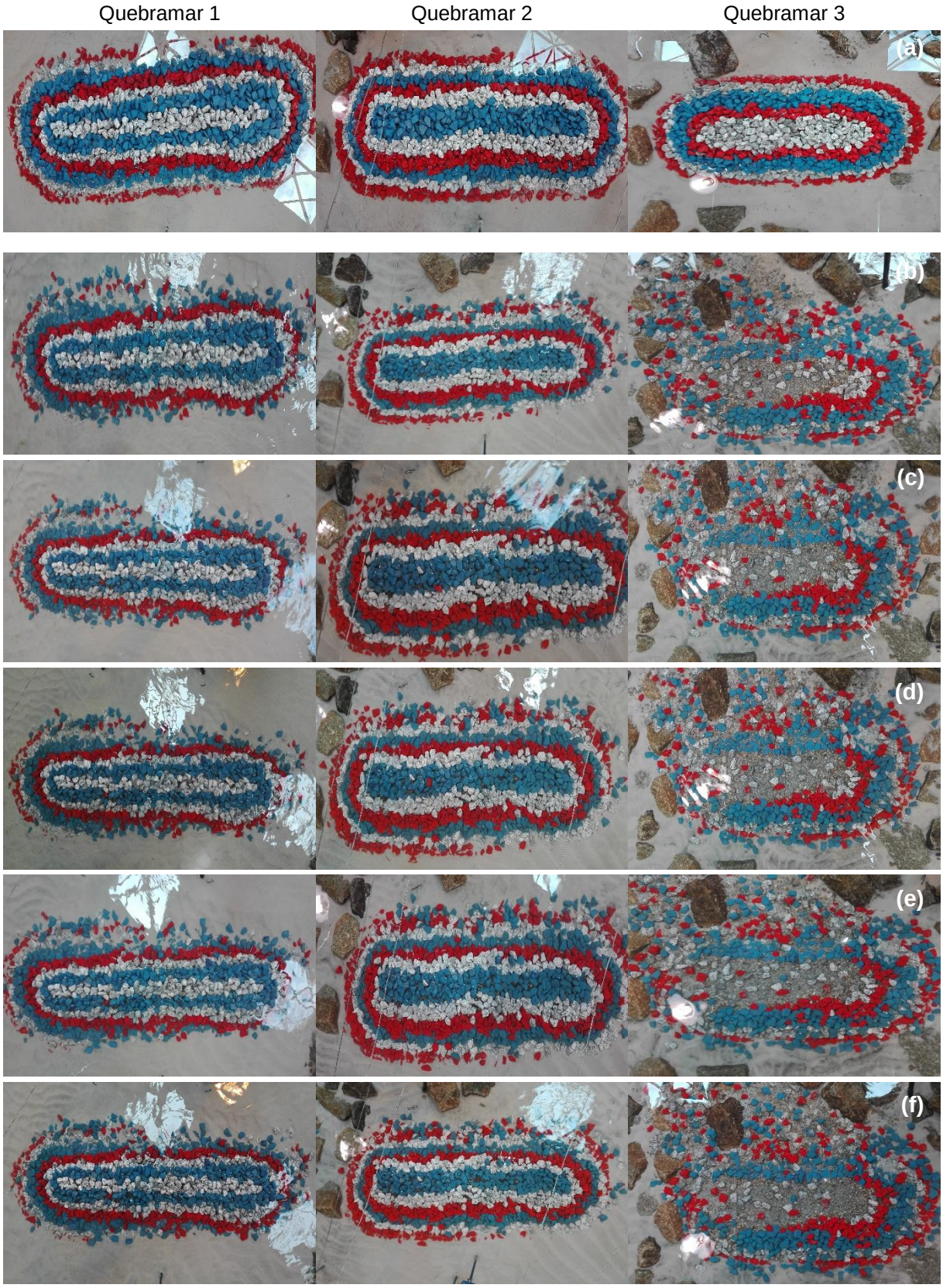


Figura A.20 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_PM_TP14_HS45_01; c) teste S13_PM_TP14_HS50_01; d) teste S13_PM_TP16_HS20_01; e) teste S13_PM_TP16_HS30_01; f) teste S13_PM_TP16_HS35_01.



Figura A.21 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_PM_TP16_HS40_01; c) teste S13_PM_TP16_HS45_01; d) teste S13_PM_TP16_HS50_01; e) teste S13_PM_TP16_HS55_01; f) teste S13_SS_TP14_HS30_01.

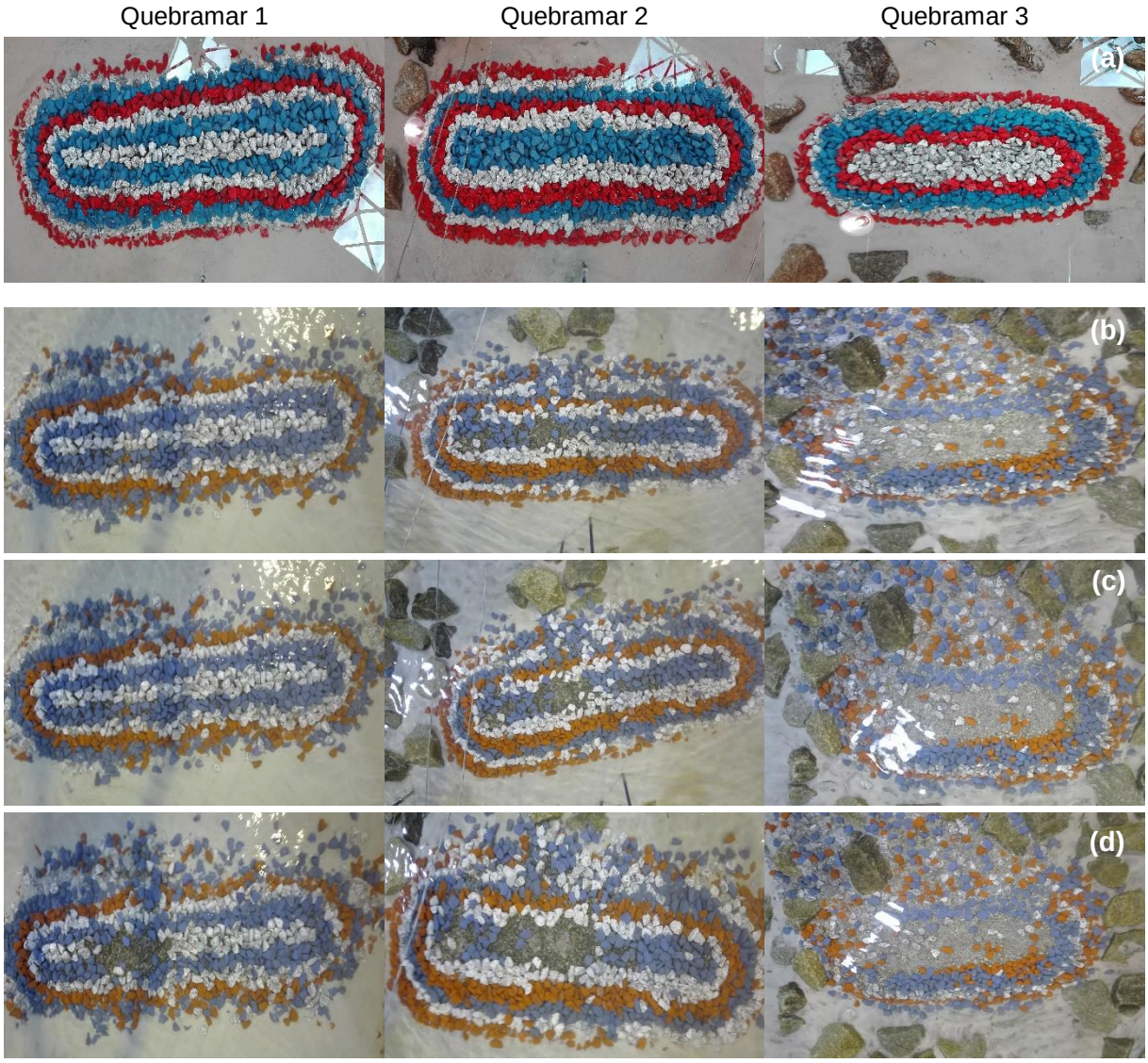


Figura A.22 - Fotografias do estado dos quebramares após: a) Situação Inicial S13; b) teste S13_SS_TP14_HS40_01; c) teste S13_SS_TP14_HS50_01; d) teste S13_SS_TP14_HS60_01.