



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CONFIDENCIAL

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

**Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento
do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições
de agitação da praia de Matosinhos**

Relatório Final



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CONFIDENCIAL

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

**Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento
do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições
de agitação da praia de Matosinhos**

Relatório Final

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

Lisboa • abril de 2017

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 306/2017 – DHA/NPE



Co-financiado pela União Europeia

O Mecanismo Interligar a Europa

Título

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos

Relatório Final

Autoria

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Liliana Vieira Pinheiro

Bolseira de Pós-Doutoramento, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Conceição Juana Fortes

Investigadora Principal, Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Maria da Graça Neves

Investigadora Auxiliar com Agregação, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Colaboração

Branca Branco

Assistente Técnica, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Francisco Pedro

Bolseiro de Investigação, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 306/2017

Proc. 0603/121/20692

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo II – Avaliação dos impactos do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos
Relatório Final

Resumo

O presente relatório descreve o Estudo II dos estudos de apoio ao projeto do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões. Este estudo tem como objetivo analisar, usando um modelo numérico, a influência do prolongamento do quebra-mar exterior nas características da agitação marítima na praia de Matosinhos. O estudo inclui a análise da agitação marítima de curto período.

O modelo numérico utilizado foi o modelo de elementos finitos DREAMS (Fortes, 1993) que é baseado na equação de declive suave de Berkhoff (1972) e permite realizar estudos de propagação de agitação marítima em portos e bacias abrigadas, bem como estudos de ressonância portuária.

As simulações com o modelo numérico DREAMS foram feitas para a Situação Atual e para seis alternativas do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, a fim de analisar a influência desta estrutura na agitação (ondas curtas) na praia de Matosinhos.

Palavras-chave: Prolongamento do quebra-mar exterior / Leixões / DREAMS / Agitação / Praia de Matosinhos

PHYSICAL AND NUMERICAL MODEL STUDIES OF THE LENGTHENING OF THE OUTER BREAKWATER AND MARITIME ACCESSIBILITIES OF LEIXÕES HARBOUR

Study II – Evaluation of the impacts of the extension of the outer breakwater of the Port of Leixões in the wave conditions of the beach of Matosinhos
Final Report

Abstract

This report describes the second study of the studies that support the project for the extending of the outer breakwater and of the new containers terminal of the port of Leixões. This study aims to analyze, using a numerical model, the influence of the extension of the Leixões west breakwater on the wave characteristics of the beach of Matosinhos. The study includes short agitation propagation analysis.

The numerical model used was the mild slope finite element DREAMS (Fortes, 1993) which is based on the mild slope equation of Berkhoff (1972), and allows to perform sea wave propagation studies in port or sheltered areas as well as port resonance studies.

The simulations with DREAMS were done for the present situation and for six layouts of the extension of the west breakwater, in order to analyze the influence of this extension on the wave characteristics (short waves) in the Matosinhos beach.

Keywords: Breakwater extension / Leixões / DREAMS / Wave penetration / Matosinhos beach

Índice

1	Introdução	1
2	Área de estudo	3
	2.1 Descrição	3
	2.2 Situação Atual e alternativas de prolongamento do quebra-mar exterior	4
3	Objetivos do estudo e metodologia.....	7
	3.1 Objetivos	7
	3.2 Metodologia.....	7
4	Caraterização da agitação marítima em frente ao Porto de Leixões.....	9
	4.1 Introdução	9
	4.2 Regime de agitação marítima no ponto W	10
	4.3 Regime de agitação marítima no ponto P	12
5	Caraterização da agitação marítima na praia de Matosinhos.....	15
	5.1 Introdução	15
	5.2 Descrição sumária do modelo numérico DREAMS	15
	5.3 Batimetria e domínio de cálculo.....	16
	5.4 Condições de agitação e características das malhas de elementos finitos	17
	5.4.1 Condições de agitação	17
	5.4.2 Definição das malhas de elementos finitos e das condições de fronteira.....	18
	5.5 Resultados	22
	5.5.1 Introdução	22
	5.5.2 Índices de agitação	24
	5.5.3 Alturas de onda.....	27
	5.5.4 Rebentação.....	34
	5.5.5 Análise estatística	36
6	Considerações finais	44
	Referências bibliográficas	47
	Anexos.....	49
	ANEXO I Diagramas de valores dos índices de agitação.....	51
	ANEXO II Alturas de onda para uma onda incidente de 1.0 m, 2.0 m e 4.0 m.....	59
	ANEXO III Linha de rebentação	69
	ANEXO IV Regimes de agitação nos pontos P1, P32, P36, P40, P42, P43, P44 e P45	83
	ANEXO V Valores médios e máximos de HS	99

Índice de figuras

Figura 2.1 – Localização da zona em estudo (Google Earth© 2017)	3
Figura 2.2 – Porto de Leixões e praia de Matosinhos.....	4
Figura 2.3 – Situação Atual, Alternativas 1 a 6	5
Figura 2.4 – Situação Atual e Alternativa 3. Configuração e batimetrias.....	6
Figura 4.1 – Localizações relativas do ponto da bóia de Leixões (ponto L), do ponto de cálculo do modelo de reconstituição WAM (ponto W), ambos ao largo de Leixões, e do ponto local, P - Google Earth© 2017	9
Figura 4.2 – Ponto W. Rosa de direções	10
Figura 4.3 – Largo. Distribuição conjunta de HS-TZ. Dados do ECMWF (ponto W).....	11
Figura 4.4 – Largo. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados do ECMWF (ponto W).....	11
Figura 4.5 – Ponto P. Rosa de direções	12
Figura 4.6 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-TZ. Dados do ECMWF no ponto W	13
Figura 4.7 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados do ECMWF no ponto W.....	13
Figura 5.1 – Domínio de cálculo do modelo DREAMS. Troços de fronteiras	18
Figura 5.2 – Coeficientes de reflexão nas fronteiras de praia e de estruturas portuárias	21
Figura 5.3 – Localização dos 49 pontos de controlo no interior do Porto de Leixões e na praia de Matosinhos.....	22
Figura 5.4 – Localização dos pontos de análise (vermelho), em frente à praia para as 7 configurações testadas	23
Figura 5.5 – P42. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	25
Figura 5.6 – P43. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	25
Figura 5.7 – P44. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	26
Figura 5.8 – P45. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	26
Figura 5.9 – P32. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	26
Figura 5.10 – P36. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	26
Figura 5.11 – P40. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	27
Figura 5.12 – P42. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_o=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	28
Figura 5.13 – Linha de 100 pontos extraídos sobre a batimétrica -2.0m (ZHL), em frente à praia	29
Figura 5.14 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=10$ s, $D=292.5^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6.....	29
Figura 5.15 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=14.0$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6.....	30
Figura 5.16 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=18$ s, $D=247.5^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6.....	30
Figura 5.17 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0 m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=10$ s, $D=292.5^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6.....	32
Figura 5.18 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0 m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=14$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6.....	32
Figura 5.19 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0 m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=18.0$ s, $D=247.5^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6	33

Figura 5.20 – P42. Histogramas marginais de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Cenários S0 a S6.....	36
Figura 5.21 – P32, P36 e P40. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6	38
Figura 5.22 – P42 a P45. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6	39
Figura 5.23 – P48 e P49. Configurações S0 a S6. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa	40
Figura 5.24 – P42. Altura significativa média. Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6.....	42
Figura 5.25 – P42. Diminuição de $H_{s_{med}}$ (%). Alternativas S1 a S6.....	42
Figura 5.26 – P42. Altura significativa máxima. Inverno e Verão. Configurações S0 a S6	42
Figura 5.27 – P42. Redução da altura significativa máxima. Alternativas S1 a S6	43
Figura A.1 – Índices de agitação para a condição de agitação: $T=10$ s, $D=292.5^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	53
Figura A.2 – Índices de agitação para a condição de agitação: $T=14$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	54
Figura A.3 – Índices de agitação para a condição de agitação: $T=18$ s, $D=247.5^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	55
Figura A.4 – Índices de agitação para a condição de agitação: $T=10$ s, $D=292.5^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	56
Figura A.5 – Índices de agitação para a condição de agitação: $T=14$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	57
Figura A.6 – Índices de agitação para a condição de agitação: $T=18$ s, $D=247.5^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	58
Figura A.7 – P32. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_o = 1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	61
Figura A.8 – P36. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_o=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	62
Figura A.9 – P40. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_o=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	63
Figura A.10 – P42. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_o=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	64
Figura A.11 – P43. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_o=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	65
Figura A.12 – P44. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_o=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	66
Figura A.13 – P45. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_o=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6	67
Figura A.14 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=10.0$ s, $D=292.5^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	71
Figura A.15 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=14$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	72
Figura A.16 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=18$ s, $D=247.5$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6	73
Figura A.17 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=2.0$ m, $T=10$ s, $D=292.5^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	74
Figura A.18 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=2.0$ m, $T=14$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	75
Figura A.19 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=2.0$ m, $T=18$ s, $D=247.5$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6	76
Figura A.20 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=4.0$ m, $T=10$ s, $D=292.5^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	77

Figura A.21 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=4.0$ m, $T=14$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	78
Figura A.22 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=4.0$ m, $T=18.0$ s, $D=247.5^\circ$ N e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6	79
Figura A.23 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=4.0$ m, $T=10.0$ s, $D=292.5^\circ$ N e $NM=+4.0$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6	80
Figura A.24 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=4.0$ m, $T=14$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	81
Figura A.25 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=4.0$ m, $T=18.0$ s, $D=247.5^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6.....	82
Figura A.26 – Regime geral no ponto P1 transferido a partir dos dados do ECMWF (de 1 Janeiro de 1979 a 31 agosto de 2016). Situação Atual.....	85
Figura A.27 – P1. Distribuição conjunta de HS-TZ. Situação Atual.....	85
Figura A.28 – P1. Distribuição conjunta de HS-DIR. Situação Atual.....	86
Figura A.29 – Regime geral no ponto P32 transferido a partir dos dados do ECMWF (de 1 Janeiro de 1979 a 31 agosto de 2016). Situação Atual.....	87
Figura A.30 – Regime geral no ponto P36 transferido a partir dos dados do ECMWF (de 1 Janeiro de 1979 a 31 agosto de 2016). Situação Atual.....	88
Figura A.31 – Regime geral no ponto P40 transferido a partir dos dados do ECMWF (de 1 Janeiro de 1979 a 31 agosto de 2016). Situação Atual.....	89
Figura A.32 – Regime geral no ponto P44 transferido a partir dos dados do ECMWF (de 1 Janeiro de 1979 a 31 agosto de 2016). Situação Atual.....	90
Figura A.33 – P32. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6.....	91
Figura A.34 – P36. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6.....	91
Figura A.35 – P40. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6.....	92
Figura A.36 – P43. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6.....	92
Figura A.37 – P44. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6.....	93
Figura A.38 – P45. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6.....	93
Figura A.39 – P30, P31, P32 e P33. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6	94
Figura A.40 – P34, P35, P36 e P37. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6	95
Figura A.41 – P38, P39, P40 e P41. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6	96
Figura A.42 – P42, P43, P44 e P45. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6	97
Figura A.43 – P46, P47, P48 e P49. Configurações S0 a S6. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa	98
Figura A.44 – P32. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6.....	101
Figura A.45 – P32. Diminuição de $H_{s_{med}}$. Alternativas S1 a S6.....	101
Figura A.46 – P32. Valor máximo de HS. Configurações S0 a S6.....	102
Figura A.47 – P32. Diminuição de $H_{s_{max}}$. Alternativas S1 a S6.....	102

Figura A.48 – P36. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6	103
Figura A.49 – P36. Diminuição de $H_{s_{med}}$. Alternativas S1 a S6	103
Figura A.50 – P36. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6	104
Figura A.51 – P36. Diminuição de $H_{s_{max}}$. Alternativas S1 a S6	104
Figura A.52 – P40. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6	105
Figura A.53 – P40. Diminuição de $H_{s_{med}}$. Alternativas S1 a S6	105
Figura A.54 – P40. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6	106
Figura A.55 – P40. Diminuição de $H_{s_{max}}$. Alternativas S1 a S6	106
Figura A.56 – P42. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6	107
Figura A.57 – P42. Diminuição de $H_{s_{med}}$. Alternativas S1 a S6	107
Figura A.58 – P42. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6	108
Figura A.59 – P42. Diminuição de $H_{s_{max}}$. Alternativas S1 a S6	108
Figura A.60 – P43. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6	109
Figura A.61 – P43. Diminuição de $H_{s_{med}}$. Alternativas S1 a S6	109
Figura A.62 – P43. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6	110
Figura A.63 – P43. Diminuição de $H_{s_{max}}$. Alternativas S1 a S6	110
Figura A.64 – P44. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6	111
Figura A.65 – P44. Diminuição de $H_{s_{med}}$. Alternativas S1 a S6	111
Figura A.66 – P44. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6	112
Figura A.67 – P44. Diminuição de $H_{s_{max}}$. Alternativas S1 a S6	112
Figura A.68 – P45. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S5	113
Figura A.69 – P45. Diminuição de $H_{s_{med}}$. Alternativas S1 a S6	113
Figura A.70 – P45. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6	114
Figura A.71 – P45. Diminuição de $H_{s_{max}}$. Alternativas S1 a S6	114

Índice de quadros

Quadro 4.1 – Coordenadas dos pontos de cálculo do estudo	9
Quadro 4.2 – Estatísticas das séries totais de HS, TZ e DIR, com base em dados estimados pelo ECMWF (de 1 de janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016	10
Quadro 4.3 – Ponto P. Estatísticas das séries totais de HS, TP e DIR, com base em dados estimados pelo ECMWF no ponto W e transferidos com o modelo SWAN (de 1 de janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016	12
Quadro 5.1 – Características dos troços da fronteira da bacia portuária	19
Quadro 5.2 – Coeficientes de reflexão nos troços A-L da fronteira dos domínios de cálculo	20
Quadro 5.3 – Coeficientes de reflexão nos troços O-AG da fronteira dos domínios de cálculo.....	20
Quadro 5.4 – Coeficientes de reflexão nos troços AF-AW da fronteira dos domínios de cálculo	20
Quadro 5.5 – Coeficientes de reflexão nos troços AF-AW da fronteira dos domínios de cálculo	21
Quadro 5.6 – Pontos analisados, profundidade e respetivos limites de rebentação	23
Quadro 5.7 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0m (ZHL), com NM=+0.5 m (ZHL), em frente à praia.....	30
Quadro 5.8 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0 m (ZHL), nos primeiros 500 m (ver Figura 5.13), em frente à praia, com NM=+0.5 m (ZHL)	31
Quadro 5.9 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0m (ZHL), nos últimos 500 m (ver Figura 5.13), com NM=+0.5 m (ZHL), em frente à praia	31
Quadro 5.10 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0 m (ZHL), em frente à praia, com NM=+4.0 m (ZHL).....	33
Quadro 5.11 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0 m (ZHL), nos primeiros 500 m (ver Figura 5.13), em frente à praia	33
Quadro 5.12 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0m (ZHL), nos últimos 500 m (ver Figura 5.13), em frente à praia, com NM=+4.0 m (ZHL)	34

1 | Introdução

Em 19 de setembro de 2016, a Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL), solicitou ao LNEC uma proposta de estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões. A apresentação desta proposta pelo LNEC foi efetuada em 3 de outubro de 2016. A adjudicação da proposta ao LNEC foi efetuada em 24 de outubro de 2016. Todo o processo foi efetuado via plataforma eletrónica VORTAL.

Esta proposta surge na sequência da necessidade por parte da APDL em prolongar o quebra-mar exterior do Porto de Leixões, de modo a aumentar as condições de abrigo que permitam a entrada de navios porta-contentores até 300 m de comprimento, 40.2 m de boca e 14.0 m de calado.

Nos últimos anos foram desenvolvidos alguns estudos preliminares, IHRH 2013, com vista ao pré-dimensionamento do quebra-mar exterior, dos terraplenos e do cais, assim como à análise das condições de navegabilidade na entrada do porto. Esses estudos apontaram para a necessidade de prolongamento do quebra-mar exterior (entre 200 e 300 m), com um ângulo de abertura de até 20°.

Os estudos da proposta do LNEC têm como objetivo servir de base ao desenvolvimento do Projeto de Execução do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões. Nesse sentido, a proposta contempla os seguintes estudos em modelo físico e modelo numérico:

- Estudo I – Otimização da geometria do novo troço do quebra-mar exterior do Porto de Leixões – que inclui a realização de estudos em modelo físico (2D e 3D) e em modelo numérico;
 - Ensaios em modelo físico 2D de estabilidade e galgamento de secções transversais do prolongamento do quebra-mar exterior;
 - Estudo de agitação - Propagação de ondas curtas para o interior do porto, com modelo numérico;
 - Estudo de ressonância - Propagação de ondas longas para o interior do porto, com modelo numérico;
 - Ensaios em modelo físico 3D de agitação, estabilidade e galgamento.
- Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos, que inclui a realização de estudos em modelo numérico;
- Estudo III – Avaliação dos impactes da construção do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões na dinâmica sedimentar na vizinhança do porto, que inclui a realização de estudos em modelo numérico.

Em junho de 2017, foi entregue à APDL um relatório do Estudo II, Pinheiro *et al.* (2017), que descrevia os estudos em modelo numérico de 3 soluções do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões e a comparação, face à Situação Atual, das características da agitação marítima na praia de Matosinhos.

O presente relatório é o relatório final do Estudo II e surge no seguimento do relatório anterior. Nele descrevem-se os estudos, em modelo numérico, de 6 soluções do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões (3 das quais já foram analisadas no relatório anterior) e a comparação, face à Situação Atual, das características da agitação marítima na praia de Matosinhos.

Para este fim, utilizou-se o regime de agitação marítima no exterior do Porto de Leixões obtido no âmbito do Estudo I, mais concretamente nos resultados apresentados no relatório intitulado: “Estudos em Modelo Físico e Numérico do Prolongamento do Quebra-Mar Exterior e das Acessibilidades Marítimas do Porto de Leixões. Estudo I – Regimes de agitação marítima”, Capitão *et al.* (2017), inserido nos “Estudos de agitação - Propagação de ondas curtas para o interior do porto, com modelo numérico”. Com base no regime estabelecido, determinaram-se gamas de valores possíveis para as alturas de onda, períodos e direções num ponto em frente ao Porto de Leixões.

Seguidamente, procedeu-se à propagação de cada trio de valores possíveis de altura de onda, período e direção até à praia de Matosinhos, utilizando o modelo matemático de declive suave do LNEC, DREAMS (Fortes, 1993), considerando seis configurações do prolongamento do quebra-mar exterior. Os resultados obtidos em diferentes localizações na proximidade da praia de Matosinhos para as seis configurações portuárias permitem avaliar as consequências em termos de condições de agitação que cada configuração poderá ter.

O presente relatório tem 6 capítulos e 5 anexos. Depois deste primeiro capítulo de introdução, a área de estudo é apresentada sumariamente no capítulo 2 assim como as alternativas de prolongamento do quebra-mar exterior em análise. O capítulo 3 sintetiza os objetivos e a metodologia empregue. A caracterização da agitação marítima em frente ao Porto de Leixões é descrita no capítulo 4. No capítulo 5 descreve-se a caracterização da agitação marítima na proximidade da praia de Matosinhos, para a Situação Atual e para as alternativas propostas. O capítulo 6 apresenta as considerações finais. Nos anexos I a III apresentam-se os resultados obtidos em termos de índices de agitação, anexo I, de alturas de onda, anexo II, e localização das linhas de rebentação, anexo III, para 3 condições de agitação incidente e dois níveis de maré, baixa-mar e preia-mar, para cada uma das configurações analisadas. No anexo IV apresentam-se os regimes de agitação obtidos nos pontos analisados. Finalmente, no anexo V, apresentam-se, para as 7 configurações testadas, os valores médios e máximos de altura de onda significativa nos pontos em análise.

2 | Área de estudo

2.1 Descrição

A zona de estudo, designada por Porto de Leixões, fica situada a cerca de 2.5 milhas a norte da foz do Rio Douro e nas proximidades da cidade do Porto, sendo enquadrada pelas povoações de Leça da Palmeira, a norte, e Matosinhos, a sul, Figura 2.1.

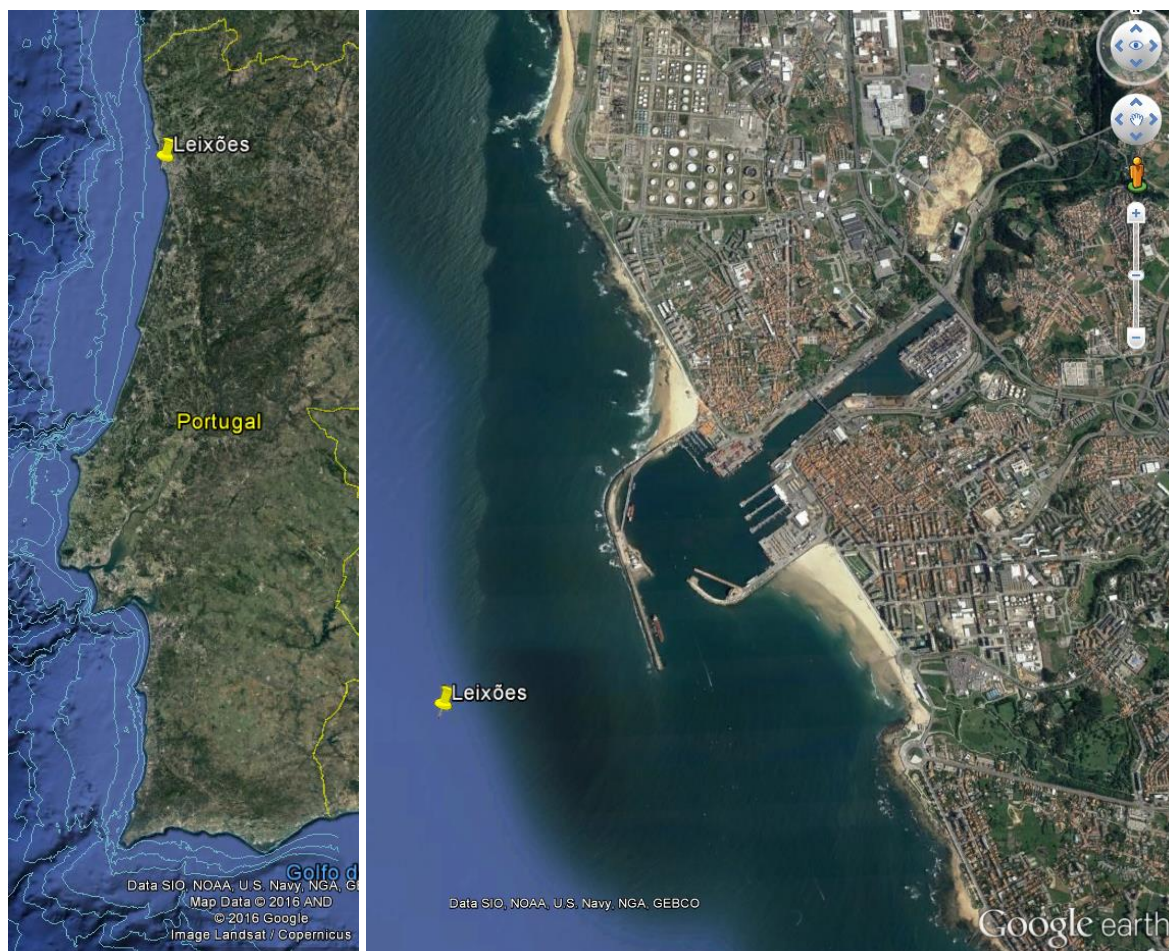


Figura 2.1 – Localização da zona em estudo (Google Earth© 2017)

O Porto de Leixões (<http://www.portosdeportugal.pt/douro-e-leixoes>) é a maior infraestrutura portuária da região norte de Portugal e uma das mais importantes do país. Com 5 quilómetros de cais, 55 hectares de terraplenos e 120 hectares de área molhada, o Porto de Leixões dispõe de boas acessibilidades marítimas, rodoviárias e ferroviárias, bem como de modernos equipamentos e avançados sistemas informáticos de gestão de navios.

Beneficiando de uma localização estratégica, de um *hinterland* rico em indústria e comércio, o Porto de Leixões tem uma posição privilegiada no contexto do sistema portuário europeu. Opera 365 dias por ano, tendo o principal canal de acesso ao porto uma profundidade de -15 m ZHL, usufruindo de

uma barra permanentemente aberta ao tráfego portuário, sem restrições de acesso por efeito das marés.

Este porto representa 25% do comércio internacional português e movimenta cerca de 18 milhões de toneladas de mercadorias por ano. Pelo porto passam cerca de três mil navios por ano e todo o tipo de cargas, das quais se destacam: têxteis, granitos, vinhos, madeira, automóveis, cereais, contentores, sucata, ferro e aço, álcool, aguardente, açúcares, óleos, melaços, produtos petrolíferos e ainda passageiros de navios de cruzeiro.

Na Figura 2.2 apresenta-se a zona em estudo.



Figura 2.2 – Porto de Leixões e praia de Matosinhos

2.2 Situação Atual e alternativas de prolongamento do quebra-mar exterior

As alternativas propostas para o prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões visam aumentar as condições de abrigo de forma a permitir a entrada de navios porta-contentores de até 300 m de comprimento, 40.2 m de boca e 14.0 m de calado. De acordo com instruções fornecidas pela APDL, os estudos realizados (IHRH, 2013) apontam para a necessidade de prolongamento do quebra-mar exterior entre 200 m e 300 m, com um ângulo de abertura de até 20°.

Na análise e definição das soluções, para além da Situação Atual, avaliaram-se seis alternativas de desenvolvimento, definidas pela APDL, três com ângulo de abertura de 20° (a situação que

previsivelmente afetará menos as condições de agitação na praia) e três com ângulo de abertura de 0°, diferindo entre si na extensão do prolongamento:

- Alternativa 1 (S1) – prolongamento de 300 m, ângulo de abertura de 20°;
- Alternativa 2 (S2) – prolongamento de 250 m, ângulo de abertura de 20°;
- Alternativa 3 (S3) – prolongamento de 200 m, ângulo de abertura de 20°;
- Alternativa 4 (S4) – prolongamento de 300 m, ângulo de abertura de 0°;
- Alternativa 5 (S5) – prolongamento de 250 m, ângulo de abertura de 0°;
- Alternativa 6 (S6) – prolongamento de 200 m, ângulo de abertura de 0°.



Figura 2.3 – Situação Atual, Alternativas 1 a 6

Quanto ao interior do Porto de Leixões, foi considerado em todas as alternativas de desenvolvimento a nova configuração portuária proposta pela APDL (2016). Para além disso considerou-se também a

dragagem do canal de acesso à cota -16.85 m (ZHL) e da bacia de rotação à cota -15.5 m (ZHL), também propostas da APDL, Figura 2.4.

Na Figura 2.4 apresentam-se apenas a Situação Atual, S0, e a alternativa 3, S3, uma vez que as restantes alternativas são em tudo semelhantes à alternativa 3 variando somente o comprimento do prolongamento do molhe e a inclinação do mesmo (Figura 2.3).

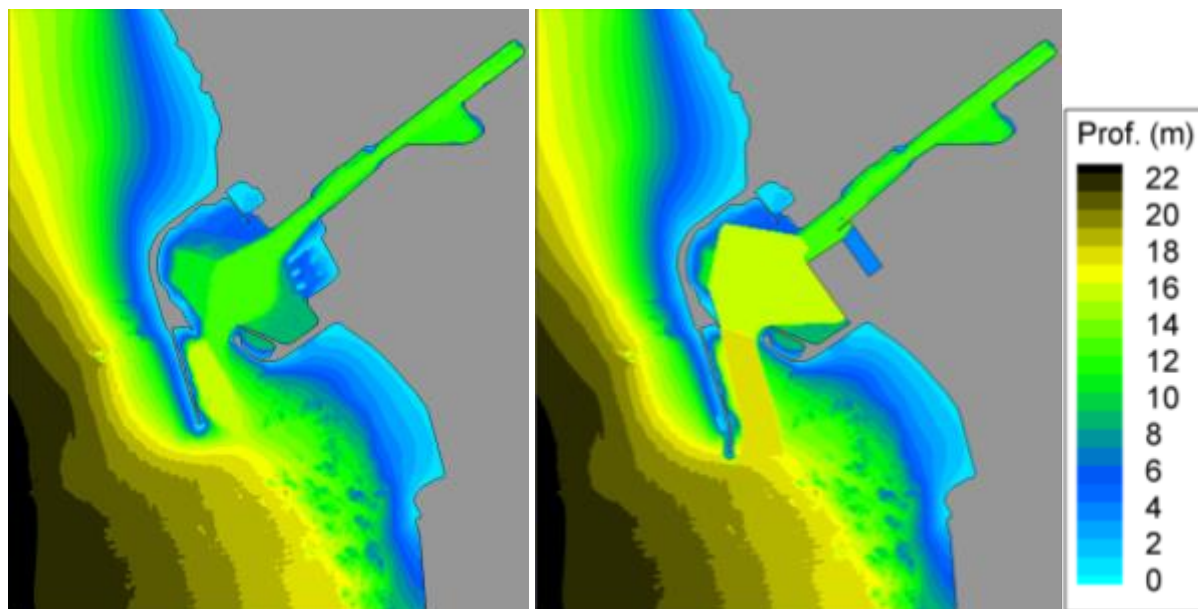


Figura 2.4 – Situação Atual e Alternativa 3. Configuração e batimetrias

3 | Objetivos do estudo e metodologia

3.1 Objetivos

O objetivo deste estudo foi avaliar, comparativamente, as características da agitação marítima que se obtêm na proximidade da praia de Matosinhos para diferentes condições de agitação marítima incidente, considerando sete configurações do porto: a Situação Atual (que considera a configuração atual da barra e do canal de acesso, ou também designada por S0) e as seis alternativas de desenvolvimento (S1 a S6), que consideram, Figura 2.3:

- a) Três comprimentos diferentes para o prolongamento do quebra-mar exterior (200 m, 250 m e 300 m) e inclinações de 0° e 20°;
- b) A nova configuração portuária e a dragagem do canal de acesso à cota -16.85 m (ZHL) e da bacia de rotação à cota -15.5 m (ZHL).

Os principais aspetos a analisar, para efeito da avaliação dos impactes das intervenções propostas, incluem as alturas de onda em frente à praia de Matosinhos, em toda a sua extensão e entre as cotas de -10 m ZHL e -0.5 m ZHL e ainda a posição da linha de rebentação face à linha de praia.

3.2 Metodologia

A metodologia seguida iniciou-se com o estabelecimento do regime de agitação marítima numa localização em frente ao quebra-mar exterior do Porto de Leixões (designado por ponto P), detalhado em Capitão *et al.* (2017). Com base nas séries temporais de agitação marítima no ponto P, foi determinado o regime geral observado que consiste nos valores dos parâmetros HS (altura significativa espectral), TZ (período de zero-ascendente) e DIR (direção média de pico).

Seguidamente, efetuou-se a caracterização da agitação marítima na proximidade da praia de Matosinhos. Procedeu-se à propagação até à praia de toda a gama possível de trios de valores (HS, TZ, DIR) do regime geral observado no ponto P, utilizando o modelo de declive suave LNEC, DREAMS (Fortes, 1993), considerando as sete configurações portuárias, Figura 2.4. Os resultados, em termos de índices de agitação (relação da altura de onda, H, num ponto e a altura de onda incidente, Ho) obtidos em diferentes localizações junto à praia para as sete configurações portuárias permitem avaliar as consequências na praia que o prolongamento do quebra-mar exterior poderá ter. Estas simulações permitiram construir matrizes de transferência, que relacionam as condições de agitação incidente com as condições de agitação num dado ponto, para cada alternativa de desenvolvimento.

Finalmente, com base nestas matrizes de transferência, efetua-se a transferência do regime observado de agitação marítima estabelecido em P, para pontos selecionados ao longo da praia de Matosinhos, para as 7 configurações portuárias.

Mais detalhadamente, efetuaram-se os seguintes procedimentos:

- Utilização do regime observado de agitação marítima no ponto P, i.e. no exterior do Porto de Leixões, Capitão *et al.* (2017), para definição das gamas de H, T e DIR a propagar com o modelo numérico DREAMS;
- Propagação de ondas regulares com o modelo matemático DREAMS, para a Situação Atual (S0) e para as configurações alternativas em estudo (S1 a S6) do Porto de Leixões:
 - Definição das características das ondas regulares incidentes (gamas de valores de H, T e DIR), com base nas condições de agitação definidas em P. As características consideradas foram: a) Períodos de onda, T, de 4 s a 18 s com intervalo de 1 s; b) Direções de onda à entrada do domínio de cálculo de 180° a 360°, com intervalo de 22.5°; c) Níveis de maré de +0.50 m (ZHL) a +4.0 m (ZHL), com intervalo de 0.5 m;
 - Definição dos domínios de cálculo e respetiva discretização por malhas de elementos finitos para as sete configurações estudadas;
 - Definição dos coeficientes de reflexão ao longo da fronteira do domínio em estudo, a utilizar nos cálculos com o modelo DREAMS, com base nas características dos vários troços em que se pode dividir essa fronteira e nas condições de agitação regular incidente;
 - Cálculos de propagação com o modelo DREAMS para as condições de agitação regular incidente. Os resultados numéricos (índices de agitação e direções) serão obtidos em diferentes pontos previamente selecionados na proximidade da praia;
 - Estabelecimento das matrizes de transferência em cada ponto com base nos anteriores resultados numéricos, que relacionam as condições de agitação marítima no exterior do porto com as características no interior do porto e na praia de Matosinhos;
- Comparação dos resultados obtidos com o modelo matemático DREAMS para Situação Atual (S0) e para as configurações alternativas em estudo (S1 a S6) propostas para o prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões.

4 | Caraterização da agitação marítima em frente ao Porto de Leixões

4.1 Introdução

O objetivo do presente capítulo é a apresentação genérica do regime de agitação marítima na zona exterior do Porto de Leixões, i.e., no ponto P (ver Figura 4.1). O estabelecimento deste regime foi descrito detalhadamente em Capitão *et al.* (2017).

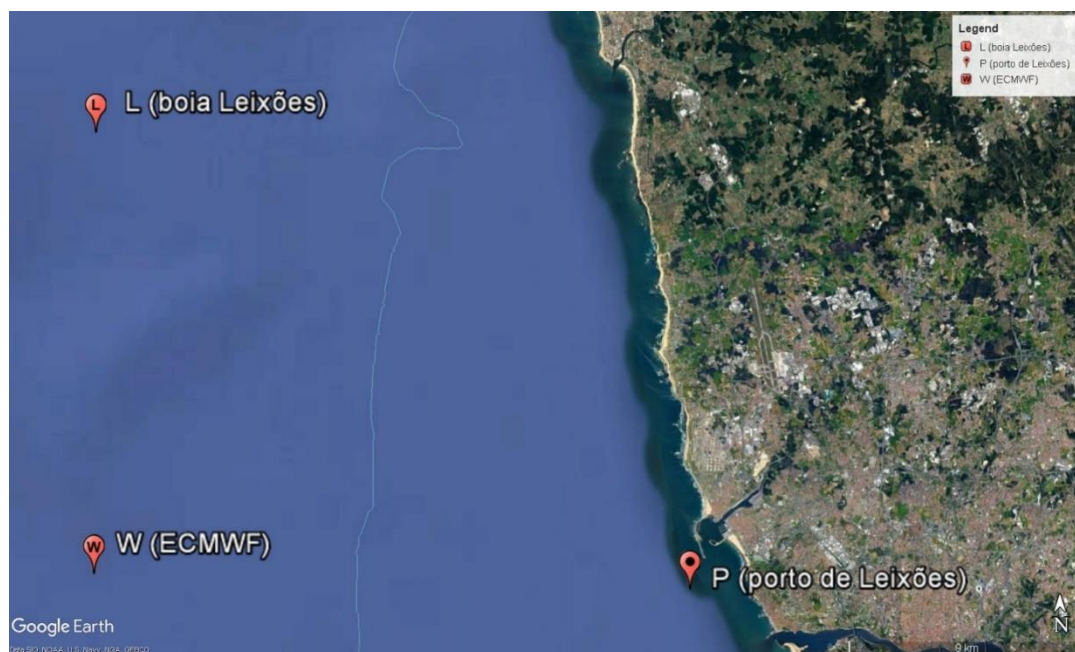


Figura 4.1 – Localizações relativas do ponto da bóia de Leixões (ponto L), do ponto de cálculo do modelo de reconstituição WAM (ponto W), ambos ao largo de Leixões, e do ponto local, P - Google Earth© 2017

O regime geral observado ao largo do Porto de Leixões, no ponto W, Quadro 4.1, foi determinado com base nas séries temporais de agitação marítima provenientes do modelo de previsão WAM (WAMDI Group, 1988) do Centro Europeu de Previsão Meteorológica a Médio Prazo (ECMWF), para um período de 38 anos consecutivos (1979-2016), de 6 em 6 horas. Estes dados foram transferidos para o ponto P, à entrada do Porto de Leixões, através da utilização do modelo SWAN (SWAN Team), definindo-se nesse ponto o regime de agitação marítima.

Quadro 4.1 – Coordenadas dos pontos de cálculo do estudo

Ponto	Latitude (°) WGS84	Longitude (°) WGS84	X (m) ETRS89 Datum73	Y (m) ETRS89 Datum73	Batimétrica (ZHL) (m)
W	41° 10' 00" N	8° 59' 00" O	-71354	166736	-81
P	41° 10' 5.70" N	8° 42' 51.59" O	-48777	166726	-21.1

Nas seguintes seções apresentam-se de forma resumida o regime de agitação marítima no ponto W e P.

4.2 Regime de agitação marítima no ponto W

Os valores de agitação marítima foram estimados pelo modelo numérico de reconstituição da agitação marítima WAM no ponto W, de coordenadas 41° 10' 00" N, 8° 59' 00" O, ver Figura 4.1, para um período de 38 anos consecutivos (1979-2016). Os resultados dessas estimativas, nesse ponto, consistem em valores de 6 em 6 horas dos parâmetros HS, TZ e DIR, entre outros. O total dos trios (HS, TZ e DIR) é 55032. Notar que todos os dados direcionais estão referidos ao Norte verdadeiro. No Quadro 4.2 são apresentadas estatísticas descritivas das séries de HS, TZ e DIR obtidas em W.

Quadro 4.2 – Estatísticas das séries totais de HS, TZ e DIR, com base em dados estimados pelo ECMWF (de 1 de janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016)

Parâmetros	HS	TZ	DIR
Média	2.05	9.1	291
Mediana	1.82	8.9	304
Moda	1.49	8.1	300
Desvio padrão	0.96	2.0	66
Curtose	2.46	-0.4	10.76
Assimetria	1.32	0.4	-3
Gama	9.42	12.3	360
Mínimo	0.40	4.4	0
Máximo	9.82	16.7	360
Número de registos	55032	55032	55032

Apresenta-se, de seguida, para este ponto, a rosa das direções, DIR (Figura 4.2). Apresentam-se também os histogramas conjuntos e marginais de HS-TZ (Figura 4.3) e HS-DIR (Figura 4.4), correspondentes ao período total de dados, de 1 de janeiro de 1979 e 31 de agosto de 2016.

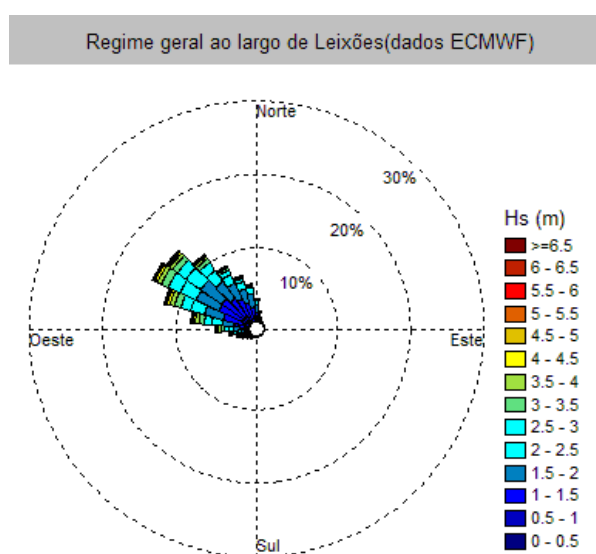


Figura 4.2 – Ponto W. Rosa de direções

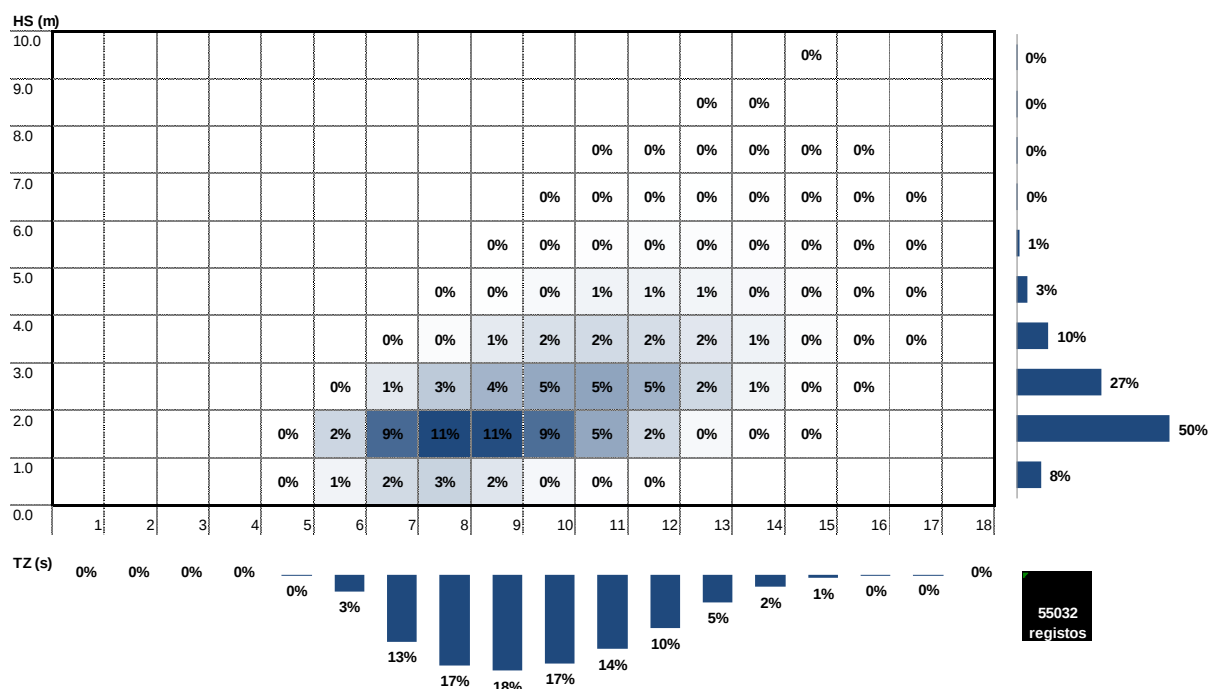


Figura 4.3 – Largo. Distribuição conjunta de HS-TZ. Dados do ECMWF (ponto W)

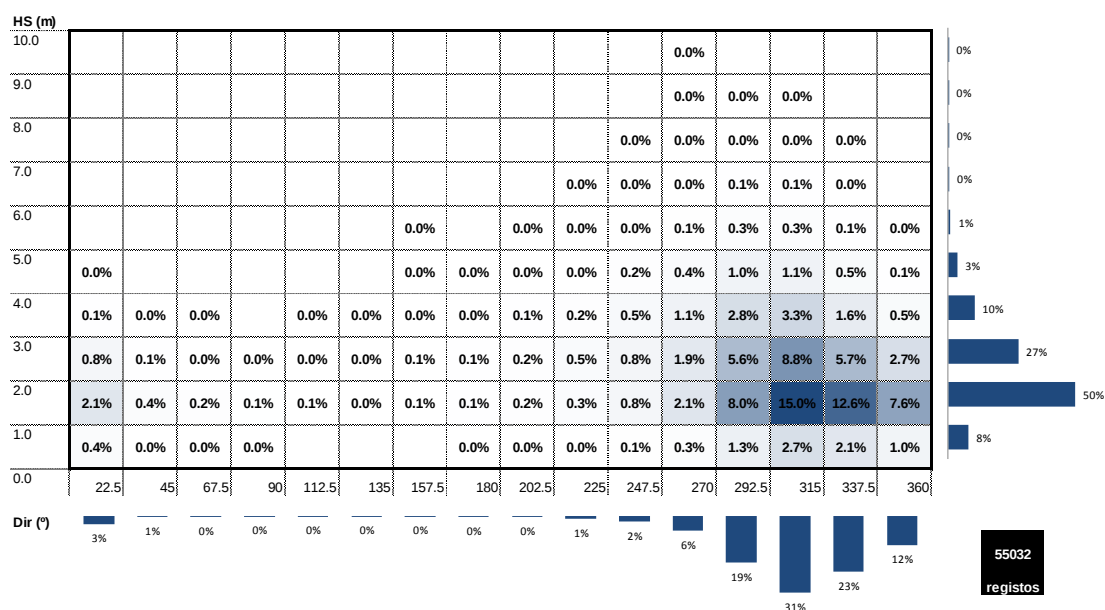


Figura 4.4 – Largo. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados do ECMWF (ponto W)

Das figuras anteriores, verifica-se que o regime observado em W é caracterizado por:

- Alturas significativas de onda, HS, entre 0.40 m e 9.82 m, sendo a média de 2.05 m. A maioria dos valores (> 5 %) encontra-se entre as gamas de 0.0 a 4.0 m, sendo a gama mais frequente entre 1.0 e 2.0 m;
- Períodos médios de onda, TZ, de 4.4 s a 16.7 s, com média igual a 9.1 s. A maioria dos valores encontra-se entre 6 s e 13 s, sendo as gamas com maior frequência entre 7 s e 10 s;

- Direções médias de onda, DIR, entre 0° e 360°, sendo o valor médio de 291°. A maioria dos valores de direções (> 5 %) verifica-se nas gamas entre 247.5° e 360° e as gamas mais frequentes são entre 270° e 337.5°.

4.3 Regime de agitação marítima no ponto P

A transferência dos valores de agitação marítima ao largo para o ponto P, junto ao Porto de Leixões, foi efetuada de acordo com a metodologia apresentada em Capitão *et al.* (2017), Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Ponto P. Estatísticas das séries totais de HS, TP e DIR, com base em dados estimados pelo ECMWF no ponto W e transferidos com o modelo SWAN (de 1 de janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016)

Parâmetros	HS_P	TZ_P	DIR_P
Média	1.63	8.7	295
Mediana	1.41	8.5	296
Moda	0.00	6.2	266
Desvio padrão	0.98	2.2	24
Curtose	2.52	-0.2	3
Assimetria	1.29	0.5	-1
Gama	8.98	13.4	160
Mínimo	0.00	3.9	182
Máximo	8.98	17.3	342
Número de registos	54959	54959	54959

Apresenta-se, de seguida, para este ponto, a rosa das direções, DIR (Figura 4.2). Apresentam-se também os histogramas conjuntos e marginais de HS-TZ (Figura 4.3) e HS-DIR (Figura 4.4), correspondentes ao período total de dados, de 1 de janeiro de 1979 e 31 de agosto de 2016.

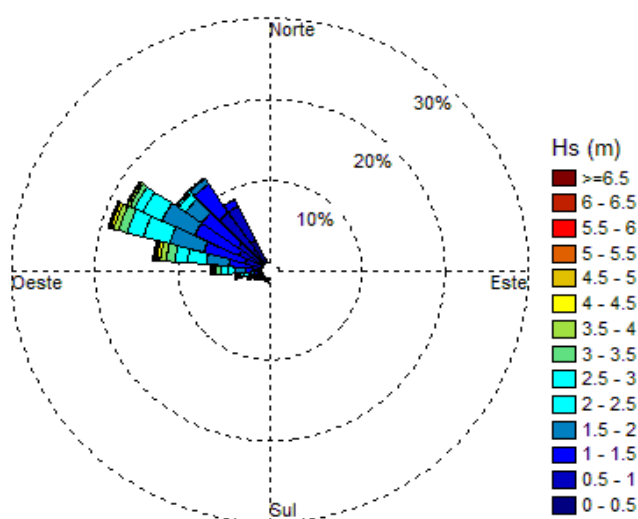


Figura 4.5 – Ponto P. Rosa de direções

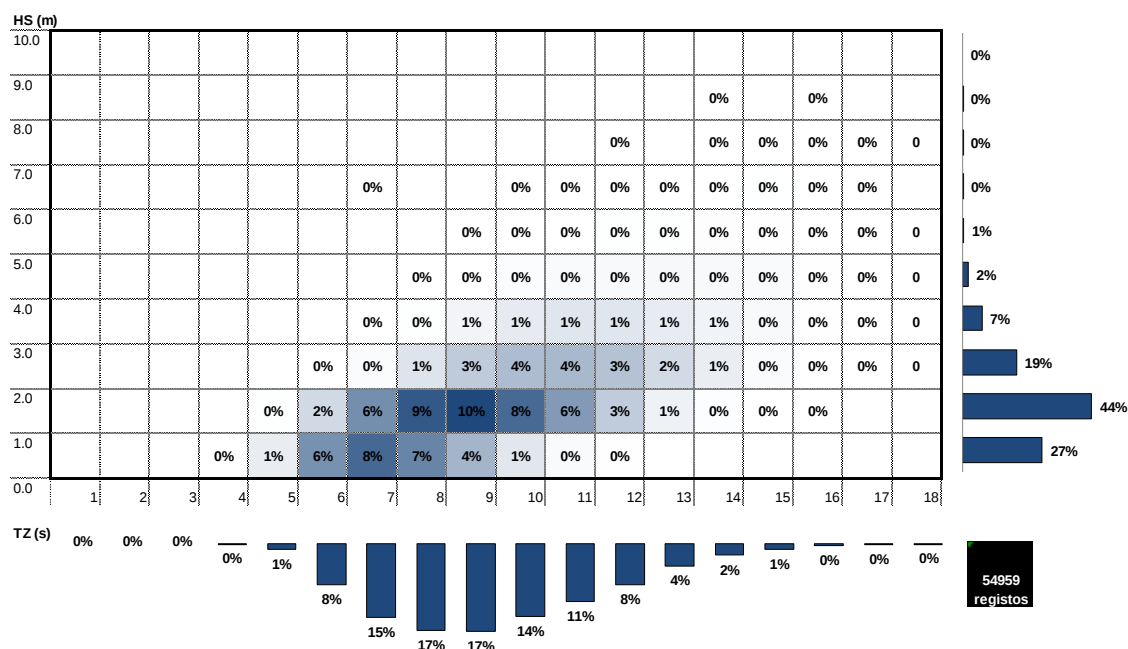


Figura 4.6 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-TZ. Dados do ECMWF no ponto W

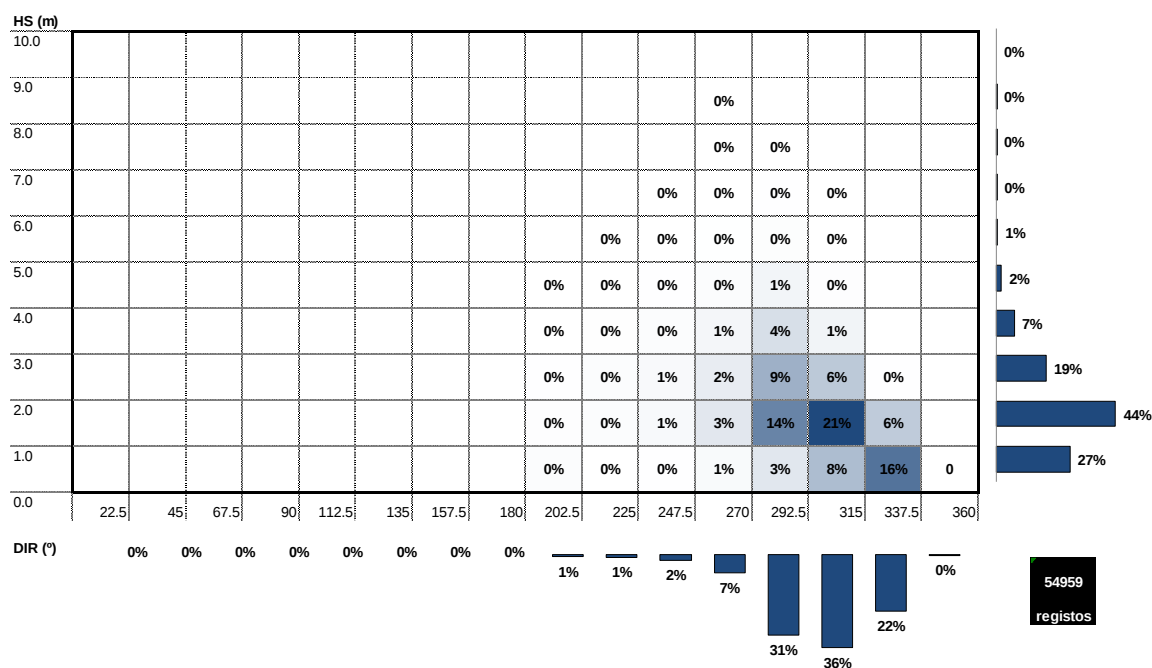


Figura 4.7 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados do ECMWF no ponto W

Das figuras anteriores, verifica-se que o regime observado em P é caracterizado por:

- As alturas significativas de onda, HS, estão entre 0.0 m e 8.98 m, sendo a média de 1.63 m. A maioria dos valores (número de registos > 5 %) encontra-se entre as gamas de 0.0 a 4.0 m, sendo a gama mais frequente entre 1.0 e 2.0 m;

- Os períodos médios de onda, TZ, apresentam valores entre 3.9 s e 17.3 s, com média igual a 8.7 s. A maioria dos valores encontra-se nas gamas entre 5 s e 12 s, sendo as gamas com maior frequência entre 6 s e 11 s;
- As direções médias de onda, DIR, estão dentro da gama 182° a 342°, sendo o valor médio de 295°. A maioria dos valores de direções (número de registos > 5 %) verifica-se nas gamas entre 247.5° e 337.5° e as gamas mais frequentes estão entre 270° e 337.5°.

5 | Caraterização da agitação marítima na praia de Matosinhos

5.1 Introdução

Neste capítulo, descrevem-se os estudos efetuados em modelo numérico de caraterização da agitação marítima na praia de Matosinhos, para as situações em estudo: a Situação Stual, S0, e as alternativas S1 a S6, Figura 2.3.

O modelo numérico utilizado foi o modelo DREAMS (Fortes, 1993) baseado na equação de declive suave de Berkhoff (1972) que permite efetuar estudos de penetração de agitação marítima em zonas portuárias ou abrigadas bem como estudos de ressonância portuária.

Recordando a metodologia descrita no capítulo 3, com base no regime de agitação marítima estabelecido no ponto P, efetuaram-se cálculos de propagação da gama de trios (H, T, D) caraterística dessa agitação marítima desde a zona exterior do Porto de Leixões até à praia de Matosinhos, considerando a Situação Atual (S0), e as alternativas S1 a S6. Com base nesses cálculos, foram construídas as matrizes de transferência (baseadas em índices de agitação) do ponto P para vários pontos em frente à praia de Matosinhos. Utilizando essas matrizes, o regime de agitação marítima definido em P foi transferido para um conjunto de pontos em frente à praia de Matosinhos, definindo-se para cada um deles o regime de agitação marítimo observado.

A comparação dos valores de direções, alturas e períodos da onda em diferentes pontos em frente à praia de Matosinhos para as seis alternativas permite avaliar as alterações induzidas na praia por cada configuração portuária, face à Situação Atual.

Nas seções seguintes, descrevem-se e apresentam-se o modelo DREAMS, as condições de aplicação desse modelo (batimetria e domínio de cálculo, condições de agitação incidente e de fronteira) para a Situação Atual, S0, e as alternativas, S1 a S6 e os resultados obtidos (em termos de índices de agitação e de alturas de onda e localização das linhas de rebentação para 3 condições de agitação incidente e dois níveis de maré, baixa-mar e preia-mar). É ainda efetuada uma análise comparativa dos resultados obtidos para as diferentes alternativas. Finalmente, apresentam-se os regimes nos diferentes pontos e comentam-se os resultados.

5.2 Descrição sumária do modelo numérico DREAMS

DREAMS é um modelo matemático de elementos finitos para o cálculo da propagação e deformação de ondas regulares em zonas costeiras, Fortes (1993). O modelo pode ser aplicado no estudo, quer da penetração num porto da agitação marítima de período curto, quer da ressonância de uma bacia portuária excitada por ondas de longo período nela incidentes. É baseado na equação elíptica de declive suave, Berkhoff (1972), que descreve os efeitos combinados da refração e difração de ondas monocromáticas propagando-se em fundos de inclinação suave como os que ocorrem geralmente em

portos, baías e zonas costeiras. O método numérico utilizado para a resolução da equação de declive suave é o Método dos Elementos Finitos (MEF). O modelo não tem em conta os efeitos da rebentação das ondas, da presença de correntes, nem de eventuais galgamentos das obras de abrigo.

As condições de fronteira podem ser de três tipos: condições de radiação que permitem a saída de perturbações geradas no domínio no sentido de propagação para o infinito; condições de geração e radiação combinadas, como as relativas a fronteiras abertas e condições de reflexão (total ou parcial), referentes aos contornos sólidos da zona em estudo (praias, falésias, molhes, etc.).

Os dados a fornecer ao modelo DREAMS são: as características da agitação incidente (período e direção da onda); os coeficientes de reflexão em cada troço da fronteira do domínio de cálculo, a batimetria e as características da malha de elementos finitos com que foi discretizado o domínio em estudo.

O modelo calcula índices de agitação H/H_0 , relação entre a altura de onda no ponto do domínio de cálculo, H , e a altura de onda à entrada do domínio de cálculo, H_0 , ou coeficientes de amplificação (em estudos de ressonância portuária) e direções de propagação da onda. O campo de velocidades horizontais na superfície livre e as cristas das ondas (linhas de igual fase) constituem resultados opcionais.

A validação do modelo matemático, Fortes (1993), foi feita com casos de teste clássicos da bibliografia, tais como o fundo plano inclinado, o baixio circular, os molhes semi-infinitos e a bacia retangular de Mei e com casos de teste reais. O modelo foi também validado com base nos estudos de ressonância e agitação nos Portos de Saint Quay-Portrieux e no Porto da Baleeira, tendo sido comparados, para este caso de teste, os resultados de DREAMS com resultados de outros modelos matemáticos, e/ou de modelos físicos.

Como limitações do modelo DREAMS, salientam-se:

- O modelo não tem em conta os efeitos da dissipação de energia por rebentação e atrito de fundo, os efeitos das correntes na propagação das ondas ou os galgamentos sobre estruturas;
- O modelo é linear pelo que não tem em conta efeitos não-lineares, tais como a interação de ondas e correntes, a interação de ondas devido à topografia do fundo, a transferência de energia entre componentes de onda, a geração de componentes de baixa frequência induzidas por grupos de ondas curtas e o efeito da dispersão por amplitude da onda (o efeito da amplitude da onda na celeridade);
- A aplicação do modelo está condicionada a fundos de declive suave, até 1:3.

5.3 Batimetria e domínio de cálculo

A batimetria utilizada no presente estudo tem duas fontes:

- “*IberianCoast+DigitizeCoastline-ETRS89.xyz*”: contém os pontos batimétricos, distanciados de 0.25', de uma batimetria de acesso público - EMODNET¹;
- “*2007_ETRS89.xyz*”: pontos do levantamento hidrográfico de março de 2007, que inclui somente sondagens entre -18 e -8 m (ZHL), cobrindo a zona de implantação dos emissários, fornecida pela APDL (levantamento efetuado pela GEOMYTSA).

As duas batimetrias foram integradas e, com recurso ao software SurferTM, foi gerada uma nova grelha batimétrica regular, com $\Delta x = \Delta y = 10$ m, resultante de uma interpolação espacial com o método "Natural Neighbour". As batimetrias e linha de costa da Situação Atual utilizadas estão representadas na Figura 2.4.

No caso das alternativas S1 a S6 procedeu-se às seguintes alterações:

- Estabelecimento de um canal de acesso a -16.85m (ZHL);
- Estabelecimento de uma bacia de manobra a -15.5 m (ZHL);
- Geometria de um novo terminal de contentores;
- Geometria de um novo porto de pesca;
- Encurtamento do molhe antigo, no interior do porto, em 50m.

Procedeu-se ainda ao prolongamento do quebra-mar exterior:

- em 300 m, com um ângulo de abertura de 20° - Alternativa 1 (S1);
- em 250 m, com um ângulo de abertura de 20° - Alternativa 2 (S2);
- em 200 m, com um ângulo de abertura de 20° - Alternativa 3 (S3);
- em 300 m, com um ângulo de abertura de 0° - Alternativa 4 (S4);
- em 250 m, com um ângulo de abertura de 0° - Alternativa 5 (S5);
- em 200 m, com um ângulo de abertura de 0° - Alternativa 6 (S6).

5.4 Condições de agitação e características das malhas de elementos finitos

5.4.1 Condições de agitação

As condições de agitação marítima para as quais foram efetuados os cálculos com o modelo DREAMS tiveram por base os regimes de agitação marítima em P apresentados da Figura 4.5 à Figura 4.7. Os cálculos com o modelo DREAMS (por se tratar de um modelo linear, i.e., não variar com a altura de onda incidente) foram efetuados para as seguintes condições de agitação regular:

- Períodos de onda, T, de 4 s a 18 s com intervalo de 1 s;
- Direções de onda à entrada do domínio de cálculo de 180° a 360°, com intervalo de 22.5°;
- Nível de maré de +0.5 m (ZHL) a +4.0 m (ZHL), com intervalo de 0.5 m.

¹ http://www.emodnet-hydrography.eu/content/content.asp?menu=0310000_000000

5.4.2 Definição das malhas de elementos finitos e das condições de fronteira

Para as configurações indicadas em 2.2, os sete domínios de cálculo foram discretizados por malhas de elementos finitos. O espaçamento em x e em y variou ao longo do domínio, tendo em conta a profundidade local, de forma a garantir uma média de 20 pontos por comprimento de onda, considerando uma onda incidente com período de 8 s.

É de salientar que os resultados obtidos na propagação de ondas com períodos de 4 s com estas malhas poderão apresentar limitações, uma vez que o número médio de pontos por comprimento de onda é apenas de cerca de 4. Verificou-se que, para 5 s, já se obtinham resultados fiáveis com apenas uma média de 6 pontos por comprimento de onda. Concluiu-se que não se justificava a geração de uma nova malha para o período de 4 s, uma vez que representam menos de 0.5% dos registos e o esforço de cálculo exigido seria maior.

Na Figura 5.1 apresentam-se os diversos troços em que se divide a linha de costa do domínio computacional considerado.

As condições de fronteira de entrada e de saída da agitação marítima foram impostas nos troços GR1, GR2 e GR3 ou seja de geração/radiação de acordo com a direção incidente. Nos restantes troços, foram estabelecidas condições de fronteira com reflexão parcial. Os valores dos coeficientes de reflexão, a atribuir a estes troços foram determinados com base nas características de cada um tais como o tipo de fronteira (rocha, praia, parede, rampa, quebra-mar, enrocamento etc.) e as características da onda (altura e comprimento). No caso de quebra-mares de talude foram tidos em conta a porosidade, diâmetro do material, declive do talude e profundidade no pé do talude, através do procedimento descrito em Seelig e Ahrens (1995).

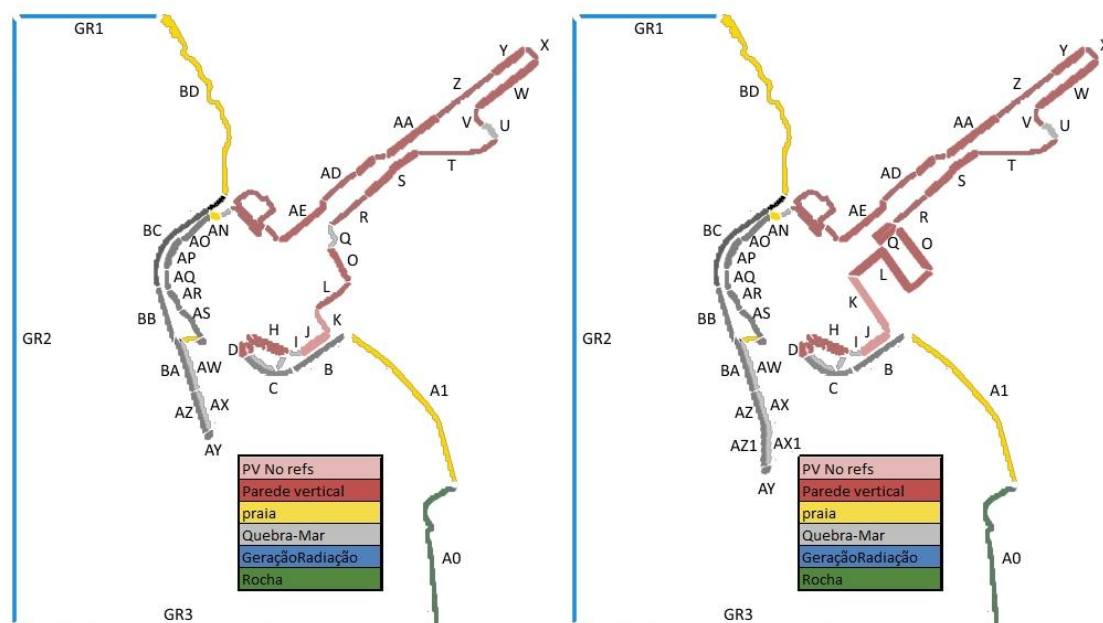


Figura 5.1 – Domínio de cálculo do modelo DREAMS. Troços de fronteiras

Quadro 5.1 – Características dos troços da fronteira da bacia portuária

Troço	Tipo	Troço	Tipo
GR1	Geração-Radiação	AB	Parede vertical
GR2	Geração-Radiação	AC	Parede vertical
GR3	Geração-Radiação	AD	Parede vertical
A0	Rocha	AE	Parede vertical
A1	Praia	AF	Parede vertical
B	Quebra-mar	AG	Parede vertical
C	Quebra-mar	AH	Parede vertical
D	Parede vertical	AI	Parede vertical
E	Parede vertical	AJ	Parede vertical
F	Quebra-mar	AK	Parede vertical
G	Quebra-mar	AL	Parede vertical
H1	Parede vertical	AM	Quebra-mar
H2	Parede vertical	AN	Praia
H3	Parede vertical	AO	Quebra-mar
I	Quebra-mar	AP	Quebra-mar
J	Parede vertical NOREF ²	AQ	Quebra-mar
K	Parede vertical NOREF	AR	Quebra-mar
L	Parede vertical	AS	Quebra-mar
O	Parede vertical	AT	Parede vertical
Q	Quebra-mar	AU	Parede vertical
R	Parede vertical	AV	Praia
S	Parede vertical	AW	Quebra-mar
T	Parede vertical	AX	Quebra-mar
U	Quebra-mar	AY	Parede vertical
V	Parede vertical	AZ	Quebra-mar
W	Parede vertical	BA	Quebra-mar
X	Parede vertical	BB	Parede vertical
Y	Parede vertical	BC	Quebra-mar
Z	Parede vertical	BD	Praia
AA	Parede vertical		

Do Quadro 5.2 ao Quadro 5.5, apresentam-se os valores dos coeficientes de reflexão utilizados nos cálculos, para cada configuração da bacia portuária e para as condições de agitação marítima admitidas.

Foram calculados coeficientes para cada troço e para cada período de 5 s a 19 s com intervalo de 2 s. Os coeficientes para os restantes períodos intermédios foram obtidos por interpolação linear.

² NOREF são blocos de betão simples de geometria patenteada pela CONSULMAR em 2002, que permitem a constituição de um paramento acostável descontínuo, com cavidades, conferindo assim porosidade ao cais e aumentando a sua capacidade de dissipação de energia da agitação incidente.

Quadro 5.2 – Coeficientes de reflexão nos troços A-L da fronteira dos domínios de cálculo

T (s)	Troços																	
	GR1	GR2	GR3	A0	A1	B	C	D	E	F	G	H1	H2	H3	I	J	K	L
5	0.00	0.00	0.00	0.57	0.01	0.06	0.04	0.90	0.90	0.21	0.21	0.90	0.90	0.90	0.12	0.70	0.70	0.90
7	0.00	0.00	0.00	0.70	0.01	0.14	0.09	0.90	0.90	0.36	0.36	0.90	0.90	0.90	0.23	0.70	0.70	0.90
9	0.00	0.00	0.00	0.78	0.02	0.24	0.14	0.90	0.90	0.49	0.49	0.90	0.90	0.90	0.34	0.70	0.70	0.90
11	0.00	0.00	0.00	0.82	0.03	0.33	0.20	0.90	0.90	0.58	0.58	0.90	0.90	0.90	0.43	0.70	0.70	0.90
13	0.00	0.00	0.00	0.85	0.04	0.42	0.26	0.90	0.90	0.66	0.66	0.90	0.90	0.90	0.51	0.70	0.70	0.90
15	0.00	0.00	0.00	0.87	0.05	0.50	0.32	0.90	0.90	0.72	0.72	0.90	0.90	0.90	0.58	0.70	0.70	0.90
17	0.00	0.00	0.00	0.88	0.07	0.56	0.38	0.90	0.90	0.76	0.76	0.90	0.90	0.90	0.63	0.70	0.70	0.90
19	0.00	0.00	0.00	0.89	0.08	0.62	0.43	0.90	0.90	0.80	0.80	0.90	0.90	0.90	0.68	0.70	0.70	0.90

Quadro 5.3 – Coeficientes de reflexão nos troços O-AG da fronteira dos domínios de cálculo

T (s)	Troços																	
	O	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
5	0.90	0.22	0.90	0.90	0.90	0.12	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
7	0.90	0.40	0.90	0.90	0.90	0.23	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
9	0.90	0.54	0.90	0.90	0.90	0.33	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
11	0.90	0.65	0.90	0.90	0.90	0.42	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
13	0.90	0.72	0.90	0.90	0.90	0.50	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
15	0.90	0.78	0.90	0.90	0.90	0.57	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
17	0.90	0.82	0.90	0.90	0.90	0.62	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
19	0.90	0.85	0.90	0.90	0.90	0.67	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

Quadro 5.4 – Coeficientes de reflexão nos troços AF-AW da fronteira dos domínios de cálculo

T (s)	Troços																	
	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW
5	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.18	0.02	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.90	0.90	0.07	0.12
7	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.33	0.03	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.90	0.90	0.12	0.23
9	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.46	0.05	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.90	0.90	0.19	0.33
11	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.56	0.08	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.90	0.90	0.26	0.42
13	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.63	0.11	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.90	0.90	0.32	0.50
15	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.70	0.14	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.90	0.90	0.39	0.57
17	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.74	0.17	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.90	0.90	0.45	0.62
19	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.78	0.20	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.90	0.90	0.51	0.67

Quadro 5.5 – Coeficientes de reflexão nos troços AF-AW da fronteira dos domínios de cálculo

T (s)	Troços						
	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD
5	0.85	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
7	0.74	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
9	0.63	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
11	0.53	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
13	0.46	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
15	0.39	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
17	0.34	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
19	0.30	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

A título de exemplo apresenta-se, na Figura 5.2, os coeficientes de reflexão obtidos para as praias e para as estruturas portuárias de acordo com o período da onda incidente.

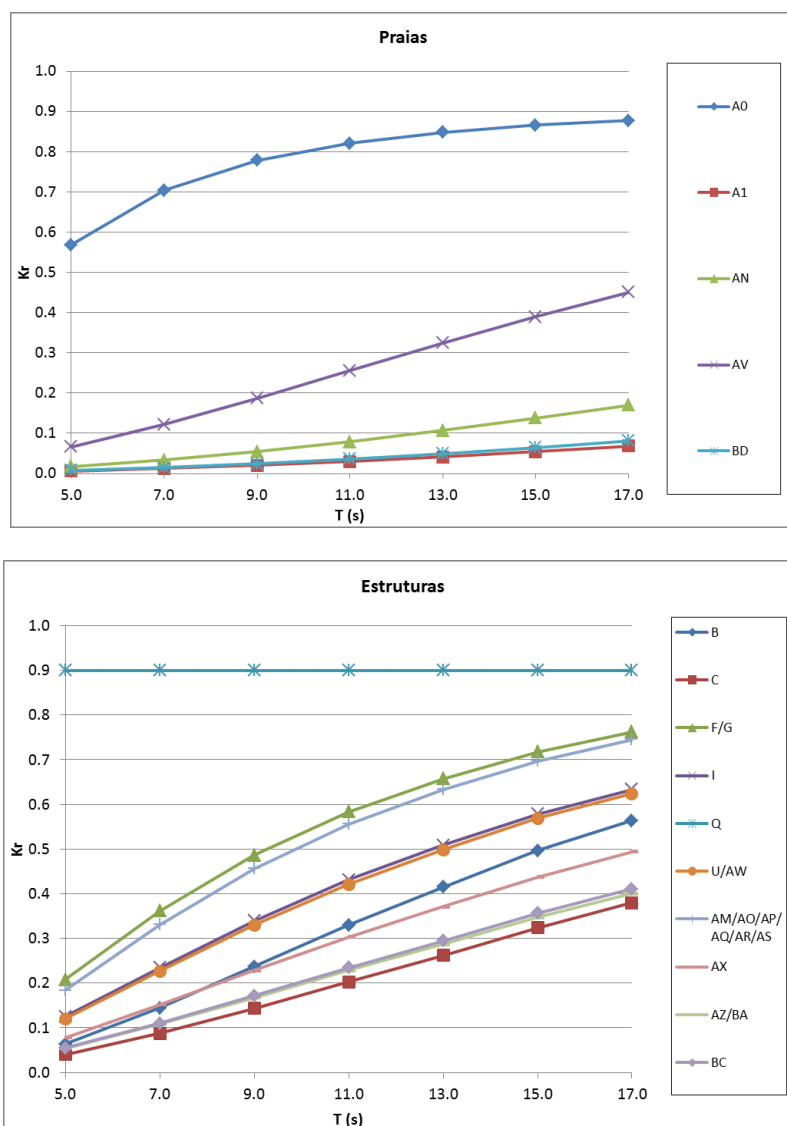


Figura 5.2 – Coeficientes de reflexão nas fronteiras de praia e de estruturas portuárias

5.5 Resultados

5.5.1 Introdução

Para as condições referidas nas secções 5.3 e 5.4 e com os valores dos coeficientes de reflexão apresentados do Quadro 5.2 ao Quadro 5.5, efetuaram-se os cálculos sistemáticos de ondas regulares com o modelo numérico DREAMS, para os sete domínios de cálculo referidos anteriormente (ver Figura 5.1). Os resultados deste modelo consistem em valores dos índices de agitação e de direção de onda em todo o domínio de cálculo.

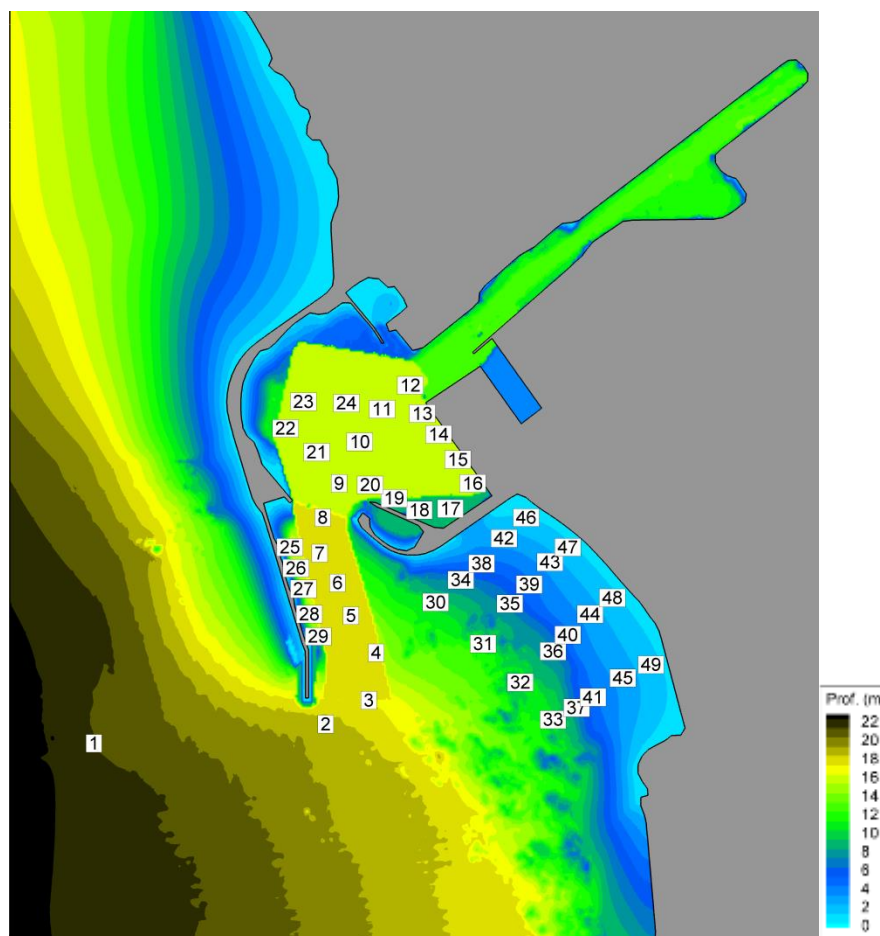


Figura 5.3 – Localização dos 49 pontos de controlo no interior do Porto de Leixões e na praia de Matosinhos

Foram selecionados 49 pontos de controlo no interior do Porto de Leixões e junto à praia de Matosinhos, onde foram extraídas as características da agitação marítima (índices de agitação e direção).

Com base nos resultados desses índices de agitação e de direção de onda nos 49 pontos de controlo, são construídas as correspondentes matrizes de transferência (que relacionam as características de agitação no exterior com as correspondentes no interior do porto). Estas matrizes permitem a transferências dos valores de altura de onda significativa, período médio e direção média de onda, que caracterizam o regime de agitação estabelecido em P, para cada um dos 49 pontos de controlo no interior do porto, e o estabelecimento dos regimes de agitação marítima em cada um

desses pontos para a Situação Atual (S0) e para cada alternativa (S1 a S6). Note-se que apenas 20 pontos se localizam na zona da praia de Matosinhos (pontos P30 a P49).

Desses 20 pontos de controlo na zona da praia de Matosinhos, seleccionaram-se 7 pontos para análise e apresentação de resultados neste relatório, Figura 5.4, pois permitem analisar as condições de agitação que se verificam nessa zona.

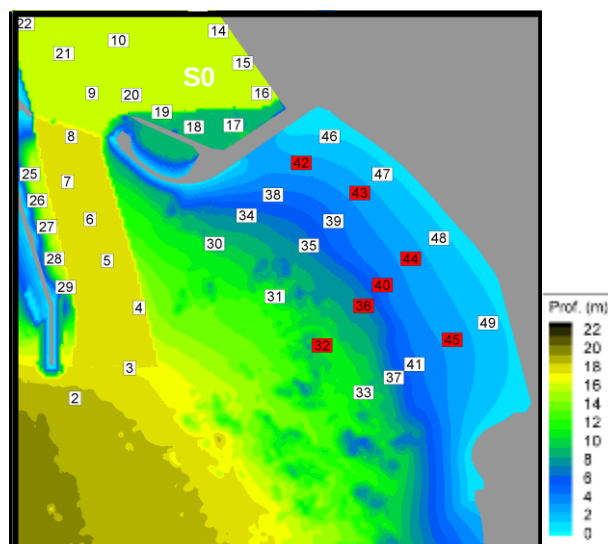


Figura 5.4 – Localização dos pontos de análise (vermelho), em frente à praia para as 7 configurações testadas

No Quadro 5.6 apresentam-se os pontos analisados, profundidade e respetivos limites de rebentação.

Quadro 5.6 – Pontos analisados, profundidade e respetivos limites de rebentação

Ponto	Profundidade (ZHL) (m)	Hs _{reb} BM (m)	Hs _{reb} PM (m)
32	10.00	8.2	10.9
36	6.00	5.1	7.8
40	4.00	3.5	6.2
42	2.00	2.0	4.7
43	2.00	2.0	4.7
44	2.00	2.0	4.7
45	2.00	2.0	4.7

Primeiramente, para uma análise com base nos índices de agitação, escolheram-se algumas condições de agitação que melhor representam as condições frequentes e também as mais adversas, no que respeita à praia de Matosinhos. Assim, com base no regime no ponto P apresentado na secção 4.3, escolheram-se:

- 3 alturas de onda: 1, 2 e 4 m, sendo 1 e 2 m as mais frequentes e os 4 m a maior das alturas dentro da gama mais frequente;

- 3 períodos de onda: 10 s, 14 s e 18 s, sendo que 10 s é o período médio e os períodos maiores representam condições mais adversas, por um lado, e que proporcionam melhores condições de surf, por outro;
- 3 direções de onda: OSO (247.5°), O (270°) e ONO (292.5°), sendo que a primeira representa condições com menos abrigo e maior incidência sobre a praia, a segunda pouco frequente, mas ainda assim com uma grande incidência sobre a praia e a última muito frequente e com alguma incidência sobre a praia. As direções superiores a 292.5°, embora muito frequentes, conferem um grande abrigo à praia, mesmo com o molhe já existente;
- 2 níveis de maré: baixa-mar (+0.5 m ZHL) e preia-mar (+4.0 m ZHL).

Assim, apresentam-se, para a Situação Atual, S0, e para as alternativas, S1 a S6:

- Os diagramas de índices de agitação obtidos para diferentes condições de agitação incidente;
- Os índices de agitação em 7 dos 49 pontos de controlo, para todas as condições de agitação simuladas;
- As alturas de onda obtidas a partir dos índices de agitação, numa linha paralela à praia de Matosinhos sobre a batimétrica dos -2.0 m (ZHL), para ondas incidentes de $H_o=1$ m, $H_o=2$ m e $H_o=4$ m;
- A localização das linhas de rebentação, para condições de agitação escolhidas.

Seguidamente apresentam-se, nos pontos P32, P36, P40, P42, P43, P44, e P45 (Figura 5.3):

- Os regimes de agitação marítima;
- O número médio de dias do ano em que a altura de onda pertence a diferentes classes de altura de onda;
- Os valores médios da altura significativa nas diferentes alternativas, para todo o período considerado, para o período do Inverno e para o período de Verão;
- A percentagem de diminuição da média da altura significativa de onda, $H_{s_{med}}$, verificada nas 6 alternativas de prolongamento face à situação de referência;
- O valor máximo da altura significativa para o período de Inverno e para o de Verão;
- A diminuição de H_s verificada nas 6 alternativas de prolongamento face à situação de referência.

5.5.2 Índices de agitação

Para as diferentes alternativas e para as condições de agitação marítima testadas, os resultados do modelo DREAMS são apresentados sob a forma de:

- Diagramas dos valores dos índices de agitação;
- Valores médios do índice de agitação (H/H_o), nos 7 pontos de controlo escolhidos, em função do período de onda e da direção da onda. Estes valores são calculados com os valores dos índices de agitação contidos numa área de $10 \times 10 \text{ m}^2$ em redor do ponto de controlo e é feita uma média em cada ponto dos valores dos índices.

Para efeitos de apresentação de resultados selecionaram-se 3 condições de agitação incidente, consideradas representativas das condições de agitação frequentes, para os níveis de maré de +0.5 m (ZHL) e +4.0 m (ZHL):

- Período $T=10$ s e direção de ONO (292.5°);
- Período $T=14$ s e direção de onda O (270°);
- Período $T=18$ s e direção de OSO (247.5°).

Da Figura A.1 à Figura A.6 do Anexo I apresentam-se os diagramas de valores dos índices de agitação para as condições de agitação incidente escolhidas, para baixa-mar e preia-mar, para as 7 configurações testadas, S0 a S6.

Da Figura 5.5 à Figura 5.11 apresentam-se os valores médios dos índices de agitação, H/H_0 , obtidos nos pontos selecionados em frente à praia (pontos P42, P43, P44, P45, P32, P36 e P40), para as sete configurações, em função da direção e do período da onda incidente.

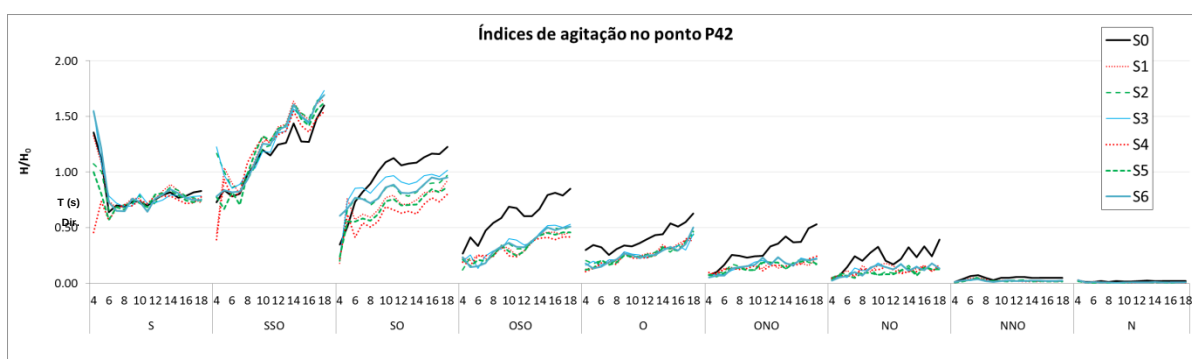


Figura 5.5 – P42. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

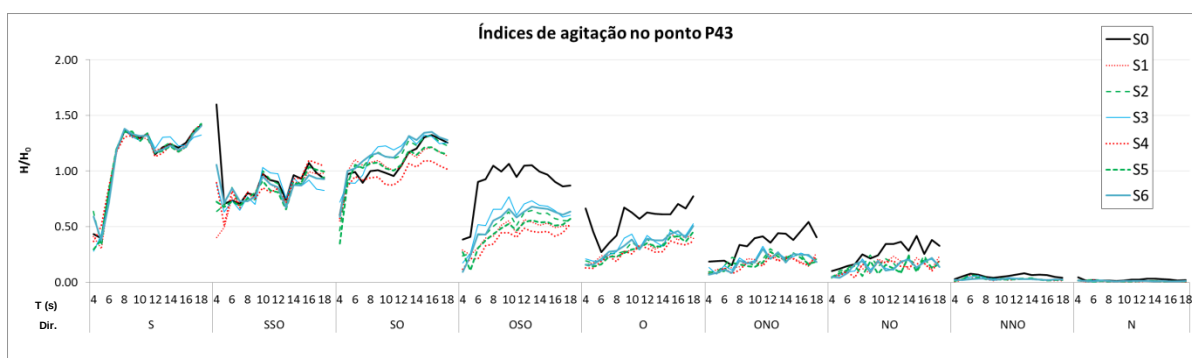


Figura 5.6 – P43. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

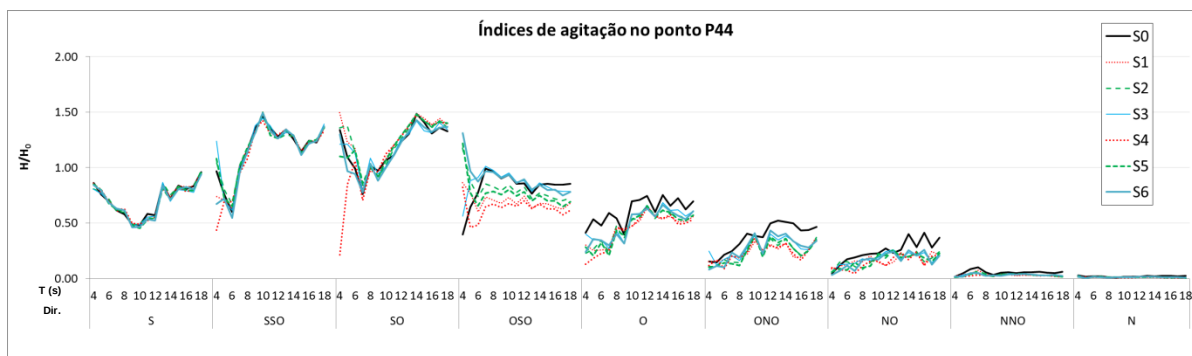


Figura 5.7 – P44. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

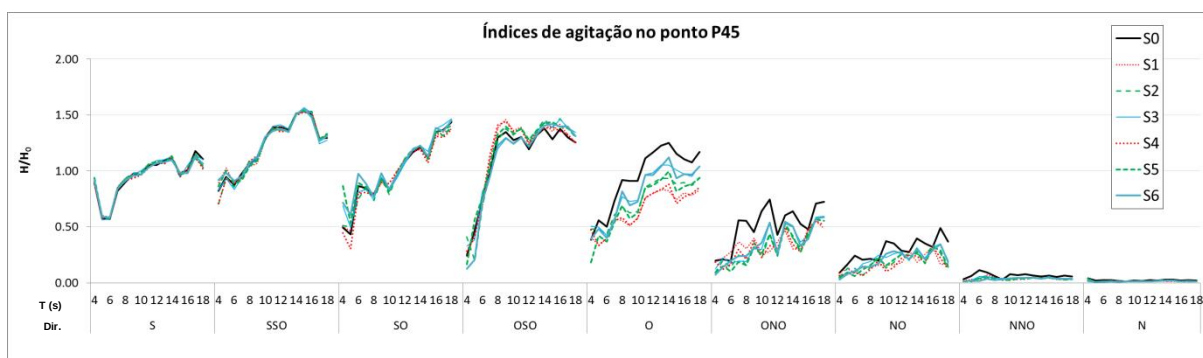


Figura 5.8 – P45. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

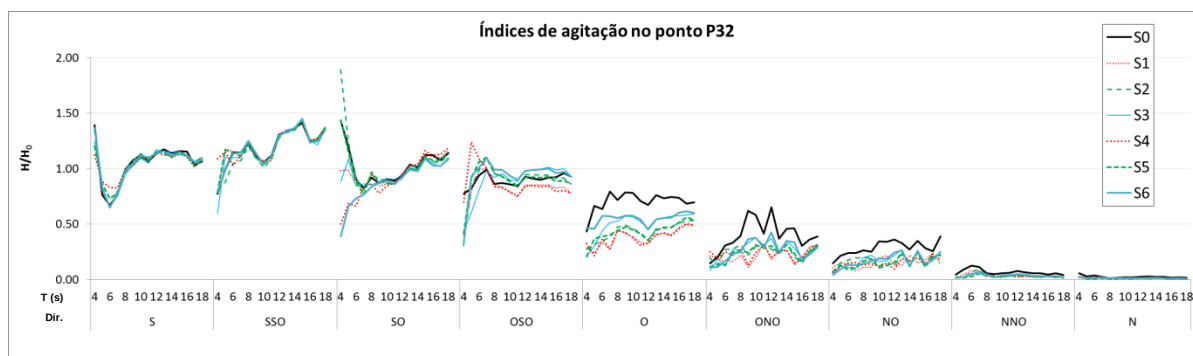


Figura 5.9 – P32. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

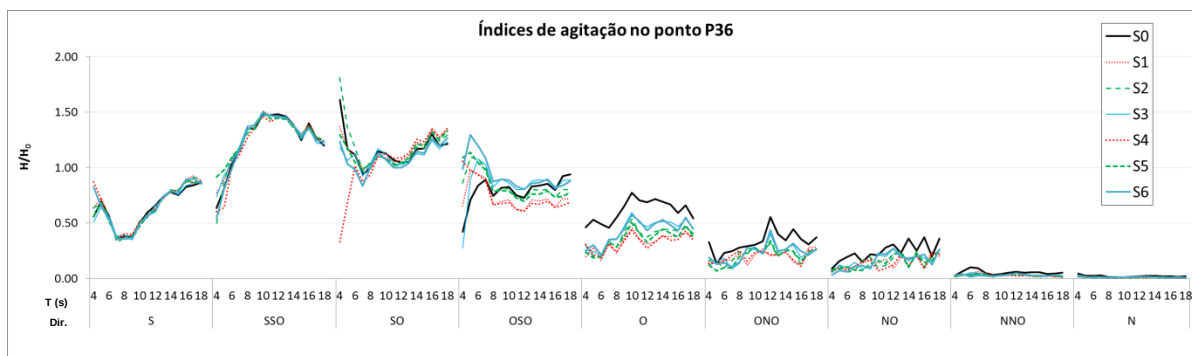


Figura 5.10 – P36. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

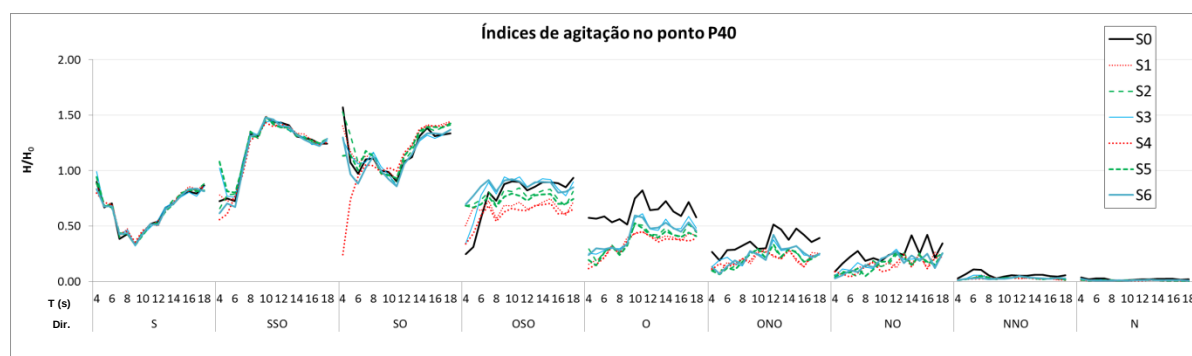


Figura 5.11 – P40. Índices de agitação médios, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

Nos pontos analisados em frente à praia de Matosinhos verificou-se que:

- Para as diferentes condições da onda incidente, os valores dos índices de agitação variam significativamente com a direção da agitação incidente, estando esses pontos, como seria de esperar, mais abrigados de agitação vinda de N e reduzindo-se esse abrigo à medida que a agitação roda para S. Apenas para as direções compreendidas entre S e O, os índices de agitação são, para alguns períodos e direções, superiores a 1;
- O efeito do prolongamento do molhe é mais relevante para as direções de agitação incidente entre OSO a ONO e a redução do índice de agitação, quando ocorre, é, em geral, superior para a alternativa S1;
- Em geral, os valores mais elevados dos índices de agitação ocorrem no ponto P45, o ponto da praia mais a sul, pois é a zona onde se sente menos o efeito do quebra-mar, para qualquer das 6 alternativas;
- No ponto P42, a influência do prolongamento do quebra-mar é significativa para SO, não sendo relevante para as demais direções de incidência da agitação, i.e., para a maioria das direções não existem diferenças muito significativas entre as configurações alternativas, como o que se passa no caso de SO. De igual modo, para os restantes pontos, a direção de maior influência na alteração dos índices com a ampliação do molhe vai rodando para Norte à medida que o ponto se localiza mais para sul até ser mais relevante, no ponto P45, para O;
- Em geral, pode-se observar uma variação de H/H_0 com o período da onda. No entanto, não existe uma tendência geral com o aumento do período de onda e o comportamento depende da direção de onda incidente, do período e da localização do ponto.

5.5.3 Alturas de onda

Nesta secção analisam-se as alturas de onda obtidas a partir dos índices de agitação, para ondas incidentes de $H_0=1$ m, $H_0=2$ m e $H_0=4$ m. A título de exemplo apresentam-se os resultados para o ponto P42, Figura 5.12. Da Figura A.7 à Figura A.13 do Anexo II analisam-se essas alturas relativamente aos limites de rebentação, H_{reb} , dadas por:

$$H_{reb} = 0.78(h + NM) \quad (1)$$

em que h é a profundidade do ponto em relação ao ZHL e NM é o nível de maré em relação ao ZHL.

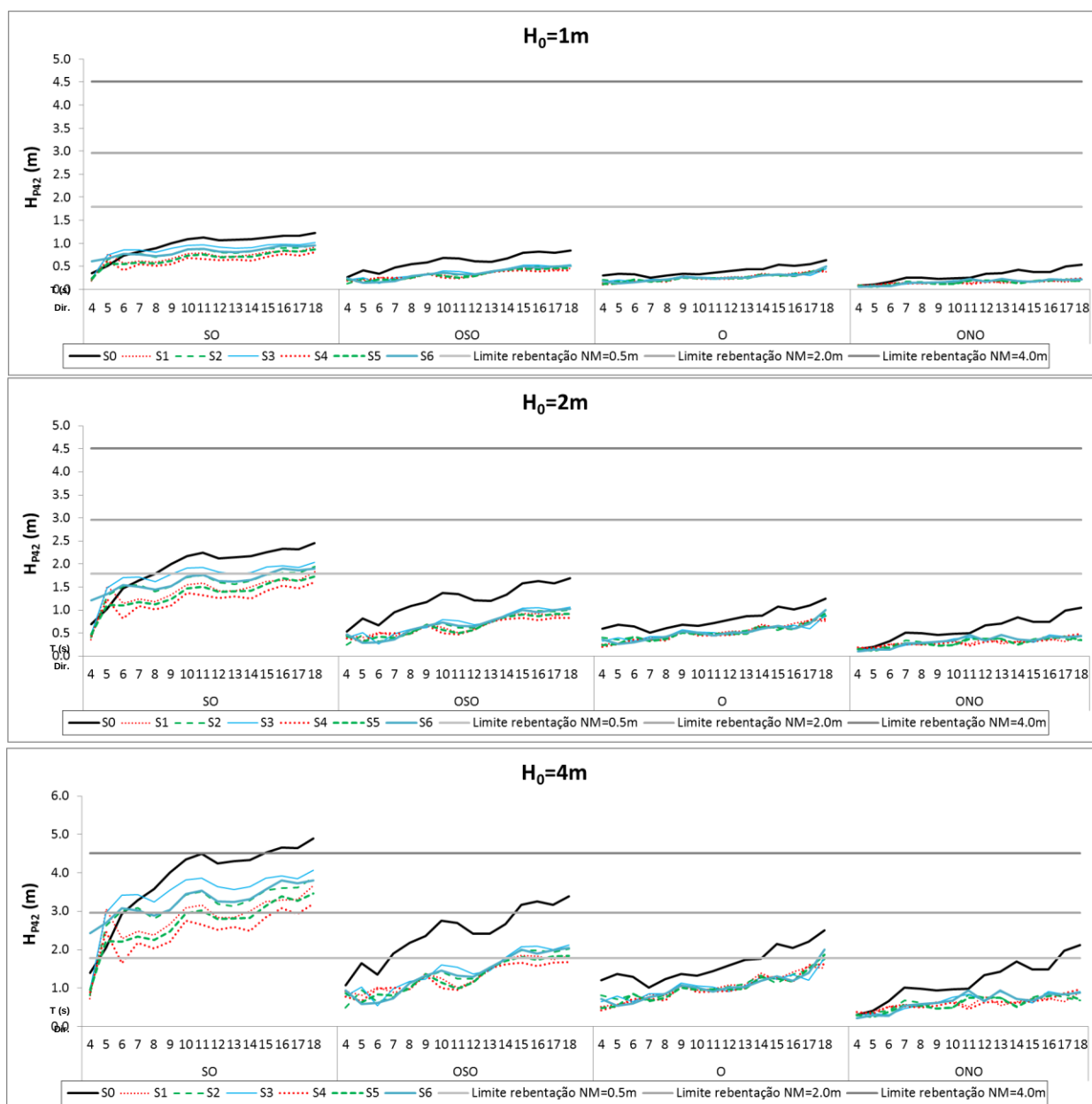


Figura 5.12 – P42. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_0=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

Nos pontos analisados em frente à praia de Matosinhos verificou-se que:

- Com o aumento da altura de onda, a tendência de alteração da altura de onda nos pontos em frente à praia mantém-se. Isto é, em geral, para $H_0=1.0$ m as diferenças face à Situação Atual são pouco significativas, tornando-se maiores à medida que a altura de onda incidente aumenta, para qualquer dos pontos;
- Para a direção de onda incidente de SO, a diferença entre as configurações alternativas obtida no ponto 42 (ponto mais a norte) é mais pronunciada, sendo pouco relevante para as demais direções analisadas. Para os restantes pontos, também existe uma direção para a

qual a influência da ampliação do quebra-mar é mais pronunciada, por exemplo, para os pontos P36, P40, P43 e P44 essa direção é OSO e para os pontos P45 e P32 é O;

- Concretamente, para uma altura de onda incidente de 2 m proveniente de SO em baixa-mar, esta rebentaria para a Situação Atual antes de atingir ponto P42 (admitindo que o período é superior a 10 s). No entanto, para as alternativas S1, S4 e S5, a mesma onda, não teria ainda atingido o limite de rebentação, no ponto P42.

Para analisar o efeito do prolongamento do quebra-mar na praia, analisou-se ainda uma linha paralela à costa sobre a batimétrica dos -2.0m (ZHL), sobre a qual se extraíram 100 pontos, Figura 5.13.

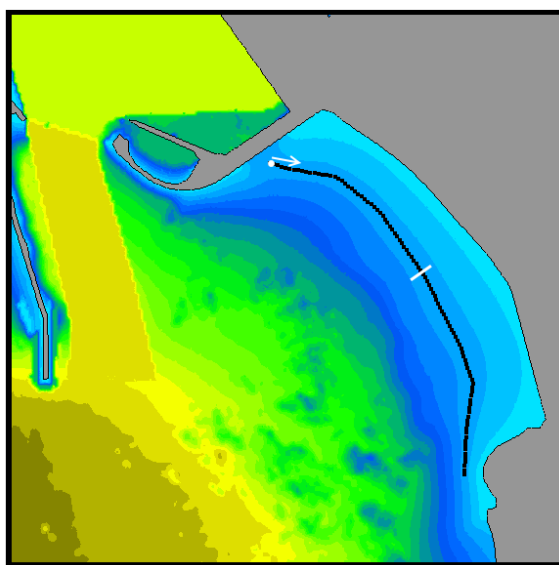


Figura 5.13 – Linha de 100 pontos extraídos sobre a batimétrica -2.0m (ZHL), em frente à praia

Da Figura 5.14 à Figura 5.16 apresentam-se as alturas de onda obtidas para as 7 configurações, S0 a S6, com NM=+0.5 m (ZHL), e do Quadro 5.7 ao Quadro 5.9 faz-se uma análise comparativa das 7 configurações S0 a S6, tendo em conta a redução média da altura de onda.

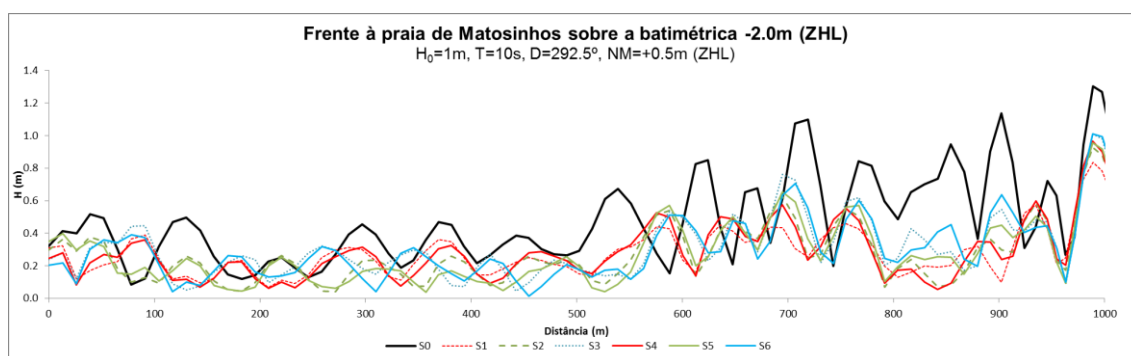


Figura 5.14 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0\text{ m}$, $T=10\text{ s}$, $D=292.5^\circ$ e $NM=+0.5\text{ m}$ (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6

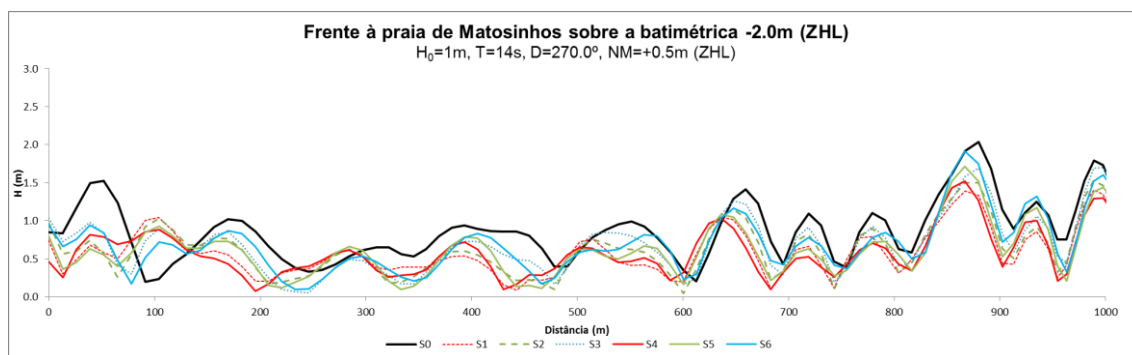


Figura 5.15 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=14.0$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6

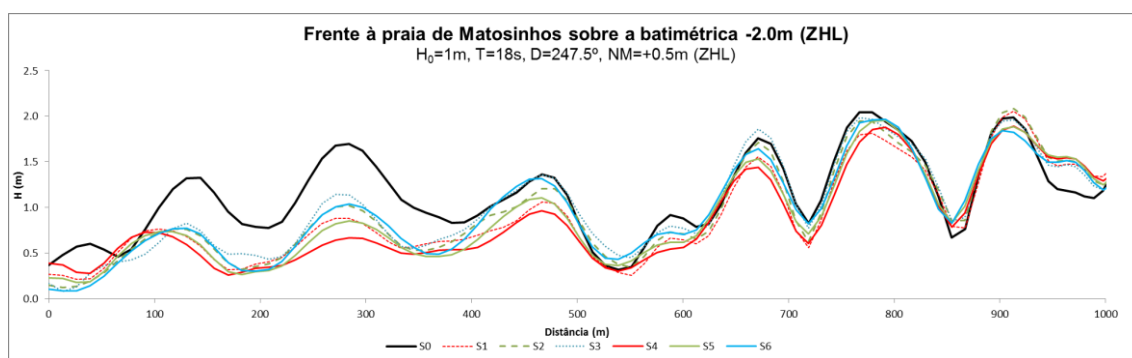


Figura 5.16 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=18$ s, $D=247.5^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6

Quadro 5.7 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0m (ZHL), com $NM=+0.5$ m (ZHL), em frente à praia

Onda Incidente		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
$H=1$ m $T=10$ s $D=292.5^\circ$	H_{med} (m)	0.51	0.30	0.30	0.34	0.31	0.30	0.34
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		41%	42%	33%	39%	41%	33%
$H=1$ m $T=14$ s $D=270^\circ$	H_{med} (m)	0.96	0.69	0.74	0.81	0.68	0.72	0.80
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		28%	23%	16%	29%	25%	17%
$H=1$ m $T=18$ s $D=247.5^\circ$	H_{med} (m)	1.21	1.02	1.06	1.10	0.97	1.01	1.06
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		16%	12%	9%	19%	16%	12%

Da análise dos resultados nota-se que existem duas zonas com características diferentes, os primeiros 500 m sobre a linha, mais abrigados para direções de agitação mais rodadas a NO, e os restantes 500 m sobre a linha, menos abrigados para estas direções (Figura 5.13). Por essa razão, apresentam-se os resultados, em separado, nesses dois troços.

Quadro 5.8 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0 m (ZHL), nos primeiros 500 m (ver Figura 5.13), em frente à praia, com NM=+0.5 m (ZHL)

Onda Incidente		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
H=1m T=10s D=292.5°	H _{med} (m)	0.31	0.21	0.18	0.21	0.20	0.16	0.19
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		32%	41%	31%	35%	47%	37%
H=1m T=14s D=270°	H _{med} (m)	0.72	0.49	0.50	0.53	0.48	0.48	0.52
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		32%	31%	27%	33%	33%	27%
H=1m T=18s D=247.5°	H _{med} (m)	1.01	0.62	0.67	0.72	0.55	0.59	0.67
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		38%	34%	28%	45%	41%	33%

Quadro 5.9 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0m (ZHL), nos últimos 500 m (ver Figura 5.13), com NM=+0.5 m (ZHL), em frente à praia

Onda Incidente		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
H=1m T=10s D=292.5°	H _{med} (m)	0.67	0.37	0.39	0.44	0.40	0.41	0.45
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		45%	42%	34%	40%	38%	32%
H=1m T=14s D=270°	H _{med} (m)	1.15	0.85	0.93	1.02	0.83	0.91	1.00
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		26%	19%	11%	27%	21%	12%
H=1m T=18s D=247.5°	H _{med} (m)	1.36	1.32	1.36	1.39	1.30	1.33	1.36
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		3%	0%	-2%	5%	2%	1%

Nos pontos analisados em frente à praia de Matosinhos, com NM=+0.5 m (ZHL), verificou-se que:

- A altura de onda média diminui com o aumento do prolongamento do molhe, como seria de esperar, e as diferenças são maiores para as direções mais rodadas a norte, para as quais o quebra-mar confere maior abrigo;
- A redução de Hs varia entre 33% e 42%, para ondas de direção 292.5°, entre 16% e 29%, para ondas de direção 270° e entre 9% e 19%, para ondas de direção 247.5°;
- Em geral, as diferenças entre a S3 e a S2 são maiores do que entre a S2 e a S1, e as diferenças entre a S6 e a S5 são maiores do que entre a S5 e a S4, ou seja, o prolongamento de 200 m para 250 m tem maior efeito do que o prolongamento de 250 m para 300 m;
- Relativamente ao ângulo de abertura do prolongamento, em geral, um ângulo de abertura de 0° leva a maiores reduções das alturas de onda (principalmente para as direções de 270° e 247.5°), embora as diferenças sejam ténues, exceto para os pontos localizados nos 500 m mais a sul (menos abrigados) e para uma direção de 292.5°, em que o ângulo de abertura de 20° é o que leva a maiores reduções das alturas de onda;

- Nos pontos em frente à praia localizados nos 500 m mais a norte, ou seja, os pontos mais abrigados pelo quebra-mar, a redução de H_s varia entre 27% e 47% e as diferenças entre alternativas são ainda menos visíveis;
- Nos pontos em frente à praia localizados nos 500 m mais a sul, ou seja, os pontos menos abrigados pelo quebra-mar, a redução de H_s varia entre 11% e 45%, para direções de 270° e 292.5° , sendo praticamente nula para direções de 247.5° .

Da Figura 5.17 à Figura 5.19 apresentam-se as alturas de onda obtidas para as 7 configurações, S0 a S6, com $NM=+4.0$ m (ZHL), e do Quadro 5.10 ao Quadro 5.12 faz-se uma análise comparativa das 7 configurações, tendo em conta a redução média da altura de onda.

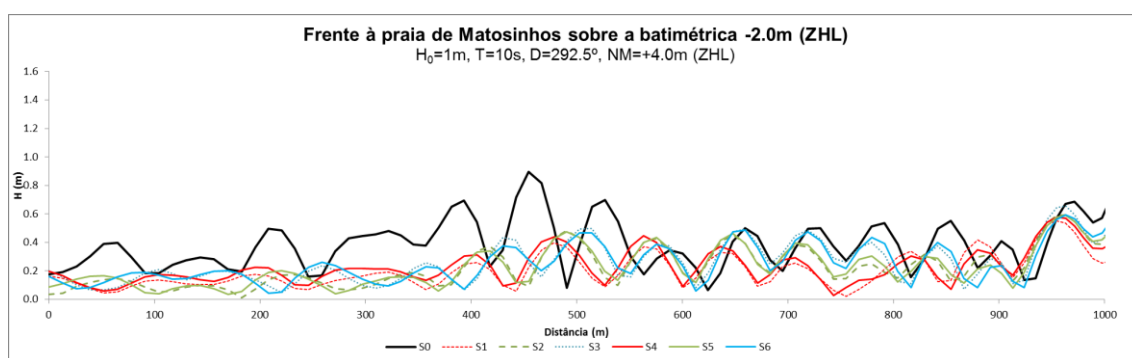


Figura 5.17 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0 m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=10$ s, $D=292.5^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6

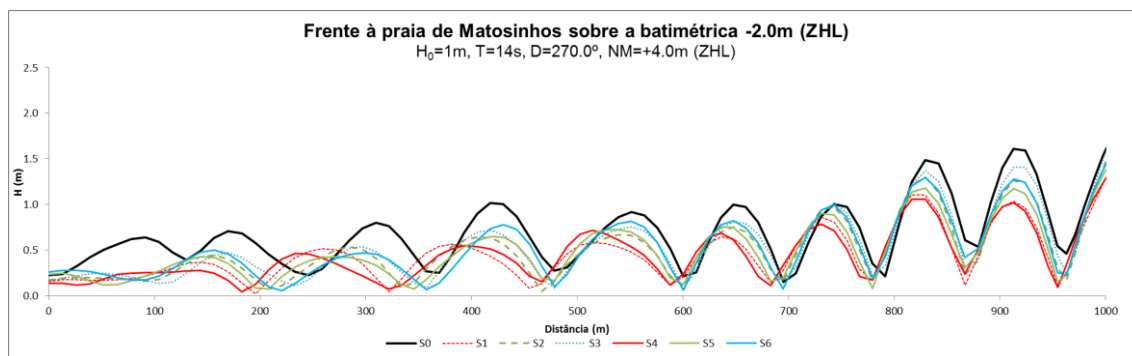


Figura 5.18 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0 m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=14$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6

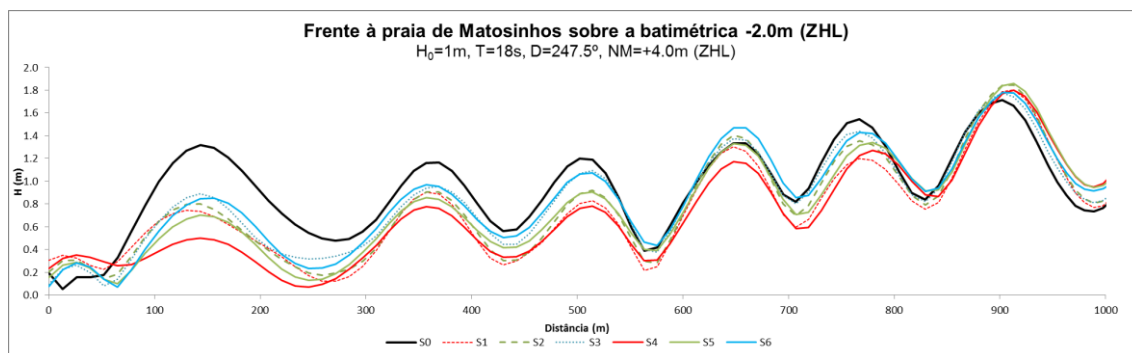


Figura 5.19 – Altura de onda sobre a linha da batimétrica -2.0 m (ZHL), em frente à praia para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=18.0$ s, $D=247.5^\circ$ N e $NM=+4.0$ m (ZHL), para as 7 configurações, S0 a S6

Quadro 5.10 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0 m (ZHL), em frente à praia, com $NM=+4.0$ m (ZHL)

Onda Incidente		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
$H=1\text{m}$ $T=10\text{s}$ $D=292.5^\circ$	$H_{\text{med}} \text{ (m)}$	0.45	0.25	0.28	0.32	0.28	0.28	0.32
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}} \text{ (\%)}$		46%	39%	30%	39%	38%	31%
$H=1\text{m}$ $T=14\text{s}$ $D=270^\circ$	$H_{\text{med}} \text{ (m)}$	0.78	0.54	0.61	0.65	0.55	0.60	0.64
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}} \text{ (\%)}$		30%	22%	16%	29%	22%	17%
$H=1\text{m}$ $T=18\text{s}$ $D=247.5^\circ$	$H_{\text{med}} \text{ (m)}$	1.01	0.85	0.88	0.92	0.82	0.88	0.94
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}} \text{ (\%)}$		16%	13%	9%	19%	13%	7%

Quadro 5.11 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0 m (ZHL), nos primeiros 500 m (ver Figura 5.13), em frente à praia

Onda Incidente		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
$H=1\text{m}$ $T=10\text{s}$ $D=292.5^\circ$	$H_{\text{med}} \text{ (m)}$	0.39	0.15	0.16	0.19	0.19	0.16	0.19
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}} \text{ (\%)}$		60%	59%	50%	50%	58%	50%
$H=1\text{m}$ $T=14\text{s}$ $D=270^\circ$	$H_{\text{med}} \text{ (m)}$	0.53	0.31	0.32	0.33	0.31	0.33	0.34
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}} \text{ (\%)}$		41%	39%	37%	42%	38%	35%
$H=1\text{m}$ $T=18\text{s}$ $D=247.5^\circ$	$H_{\text{med}} \text{ (m)}$	0.78	0.49	0.51	0.58	0.42	0.49	0.58
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}} \text{ (\%)}$		38%	35%	26%	47%	38%	26%

Quadro 5.12 – Quadro resumo das alturas de onda sobre a batimétrica de -2.0m (ZHL), nos últimos 500 m (ver Figura 5.13), em frente à praia, com NM=+4.0 m (ZHL)

Onda Incidente		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6
H=1m T=10s D=292.5°	H_{med} (m)	0.51	0.32	0.37	0.42	0.34	0.37	0.41
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		37%	27%	18%	32%	26%	19%
H=1m T=14s D=270°	H_{med} (m)	0.96	0.72	0.83	0.89	0.73	0.81	0.87
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		25%	14%	7%	24%	16%	10%
H=1m T18s D=247.5°	H_{med} (m)	1.18	1.12	1.16	1.18	1.13	1.18	1.21
	$1 - \frac{\bar{H}}{H_{S0}}$ (%)		5%	1%	0%	4%	0%	-3%

Nos pontos analisados em frente à praia de Matosinhos, com NM=+4.0 m (ZHL), verificou-se que:

- A altura de onda média é inferior relativamente à baixa-mar;
- As diferenças (em percentagem) entre configurações alternativas são maiores do que em baixa-mar;
- As reduções de altura de onda média obtidas na praia são mais significativas para a direção de 292.5°, mas é para esta direção que o efeito do prolongamento é menos importante;
- Relativamente aos pontos em frente à praia localizados nos 500 m mais a norte, ou seja, os pontos mais abrigados pelo quebra-mar para as direções de incidência rodadas a NO-N, as diferenças são maiores para a direção de 292.5° e é para esta direção que as reduções são mais significativas, entre 50% a 60%;
- Relativamente aos pontos em frente à praia localizados nos 500 m mais a sul, ou seja, os pontos menos abrigados pelo quebra-mar, o comportamento é semelhante, com as maiores diferenças a ocorrerem para a direção de 292.5° para a alternativa S1, embora nunca ultrapassando os 37% de redução de altura de onda.

5.5.4 Rebentação

Da Figura A.14 à Figura A.22 do Anexo III apresentam-se as linhas de rebentação, representadas a branco, para as condições de agitação escolhidas e para as 7 configurações testadas: S0 a S6. Com base nos resultados apresentados, conclui-se que:

Para alturas de onda de 1.0 m:

- Para ondas de ONO (D=292.5°), com H=1.0 m e T=10 s, em baixa-mar, a linha de rebentação presente ao longo de toda a praia, praticamente desaparece em qualquer das alternativas S1 a S6;
- Para ondas de O (D=270°), com H=1.0 m e T=14.0 s, em baixa-mar, a linha de rebentação mantém-se praticamente inalterada, em qualquer das alternativas S1 a S6, havendo um ligeiro avanço em direção à costa, principalmente nas alternativas S1 e S4;

- Para ondas de OSO ($D=247.5^\circ$), com $H=1.0$ m e $T=18$ s, em baixa-mar, a linha de rebentação mantém-se praticamente inalterada, em qualquer das alternativas S1 a S6, havendo um ligeiro avanço em direção à costa, principalmente nas alternativas S1 e S4 e na metade norte da praia.

Para alturas de onda de 2.0 m:

- Para ondas de ONO ($D=292.5^\circ$) e $T=10$ s, de O ($D=270^\circ$) e $T=14.0$ s e de OSO ($D=247.5^\circ$), e $T=18$ s, em baixa-mar, a linha de rebentação desloca-se para mais perto da costa. Não se evidenciam diferenças significativas entre as alternativas S1 a S6.

Para alturas de onda de 4.0 m:

- Para ondas de ONO ($D=292.5^\circ$), com $H=4.0$ m e $T=10.0$ s, em baixa-mar, nota-se uma maior influência nos 500 m de praia mais a norte. Não se evidenciam diferenças assinaláveis entre as alternativas S1 a S6;
- Para ondas de O ($D=270^\circ$), com $H=4.0$ m e $T=14.0$ s, em baixa-mar, não se evidenciam diferenças entre as configurações S0 e S1 a S6;
- Para ondas de OSO ($D=247.5^\circ$), com $H=4.0$ m e $T=18.0$ s, em baixa-mar, não se evidenciam diferenças entre as configurações S0 e S1 a S6.

No cômputo geral, do que se refere à linha de rebentação na praia de Matosinhos, verificou-se em geral, para baixa-mar, a alteração da posição da linha de rebentação entre a Situação Atual, S0 e as diferentes alternativas S1 a S6, que se aproxima mais da linha de costa. A diferença entre alternativas não é relevante.

Da Figura A.23 à Figura A.25 apresentam-se as linhas de rebentação, em preia-mar, representadas a branco, para as condições de agitação escolhidas e para as 7 configurações testadas: S0 a S6. No cômputo geral, para preia-mar, no que se refere à linha de rebentação na praia de Matosinhos, verificou-se que:

- Para $H=1.0$ m e 2.0 m não existe rebentação no domínio de cálculo, por esse motivo não se apresentam as figuras respetivas;
- Para ondas de ONO ($D=292.5^\circ$), com $H=4.0$ m e $T=10$ s, não se evidenciam diferenças significativas entre S0 e as alternativas S1 a S6 (e inclusive entre alternativas);
- Para ondas de O ($D=270^\circ$), com $H=4.0$ m e $T=14$ s, apenas as alternativas com um maior prolongamento do molhe, S1 e S4, representam uma alteração significativa nos 500 m a norte da praia, onde praticamente deixa de haver rebentação da onda;
- Para ondas de OSO ($D=247.5^\circ$), com $H=4.0$ m e $T=18$ s, em preia-mar, atualmente existe rebentação em toda a extensão da praia, enquanto o prolongamento do molhe leva a uma alteração significativa nos 500 m norte da praia, onde se reduz a zona onde existe rebentação da onda, redução esta que aumenta com o aumento do prolongamento do molhe.

5.5.5 Análise estatística

5.5.5.1 Regime geral

Com base nas matrizes de transferência, transferiu-se o regime de agitação no ponto P para os 49 pontos selecionados no interior do porto e estabeleceram-se aí os regimes de agitação, para as 7 configurações em análise. Estes regimes correspondem a um período de 38 anos consecutivos (1979-2016) e consistem nos valores de 6 em 6 horas dos parâmetros HS, TZ e DIR, entre outros. O total dos trios (HS, TZ e DIR) é 55032.

No ponto P1 apresenta-se a rosa dos ventos e os histogramas conjuntos HS-DIR e HS-TZ, no Anexo IV. Apresenta-se, de seguida, para o ponto P42, os histogramas marginais de Hs (Figura 5.20) correspondentes ao período total de dados, de 1 de janeiro de 1979 e 31 de agosto de 2016, para as 7 configurações em análise. As correspondentes figuras para os pontos P32, P36, P40, P42, P43, P44 e P45 são apresentadas em Anexo IV.

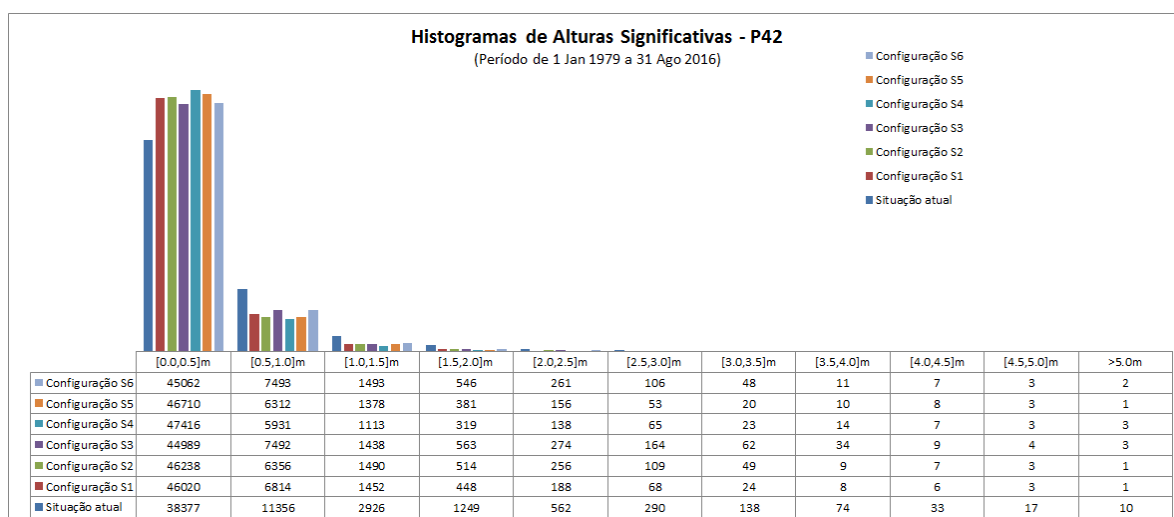


Figura 5.20 – P42. Histogramas marginais de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Cenários S0 a S6

Com base na Figura 5.20 e nas figuras do Anexo IV, verifica-se que, em geral:

- Para qualquer ponto, as alturas de onda significativas mais frequentes são as da classe até 0,5 m;
- A redução de altura de onda em frente à praia devido ao prolongamento do quebra-mar é evidente, para as seis alternativas, na medida em que aumenta o número de registos inferiores a 0,5 m e diminuem os registos superiores a 0,5 m, qualquer que seja a alternativa considerada;
- Os cenários S1 e S4 são os que, em geral, conduzem a maiores reduções de altura de onda em frente à praia, i.e., são os que apresentam o maior número de ocorrências nas classes de altura significativa de onda dos 0,0 m aos 0,5 m e o menor número de ocorrências nas classes de altura mais elevadas;

- A redução de altura de onda em frente à praia diminui do cenário S1 para S3 e de S4 para S6, devido ao menor comprimento do quebra-mar;
- Parece existir uma maior redução de altura de onda quando o ângulo de abertura do molhe é de 0°.

Dos regimes obtidos em cada ponto, determinou-se o nº médio de dias por ano em que as alturas significativas estão numa determinada gama de valores.

O número médio de dias/ano é obtido através de:

$$\bar{N} = \frac{N_{registos}}{4 \times 37,67} \quad (2)$$

em que 4 é o nº de registos por dia e 37.67 é o nº de anos em que existem registos (de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de Agosto 2016) e $N_{registos}$ é o nº de registos cuja altura de onda é inferior a um determinado limiar definido *a priori*.

Da Figura 5.21 à Figura 5.22, apresenta-se o número médio de dias por ano em que a altura de onda se encontra em diferentes classes de altura de onda significativa, para as configurações S0 a S6 e para os pontos P32, P36, P40, P42, P43, P44 e P45. Nessas figuras apresenta-se a sombreado azul a zona de possível rebentação (tendo em conta a profundidade do ponto e o nível de maré, ver Quadro 5.6).



Figura 5.21 – P32, P36 e P40. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6

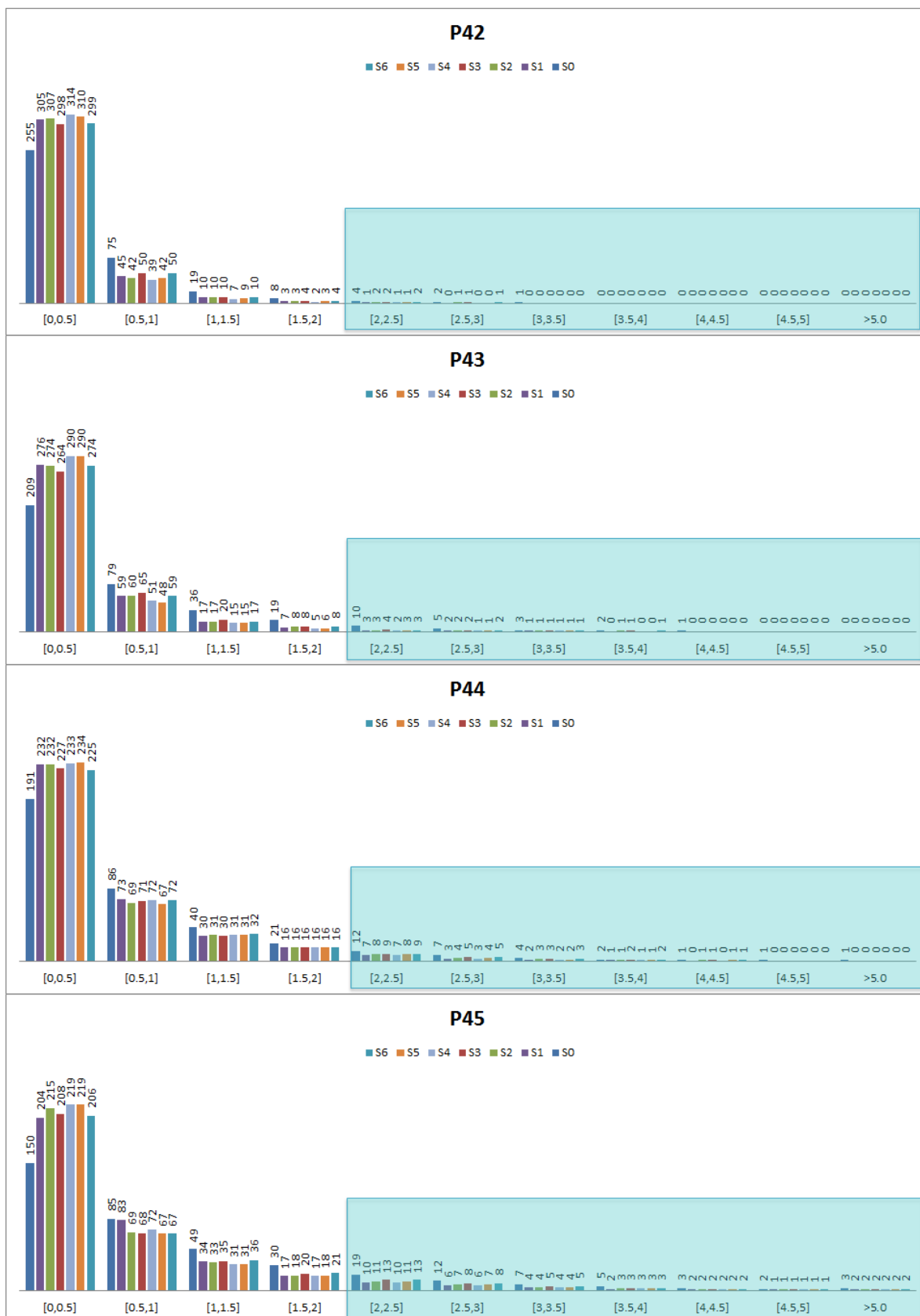


Figura 5.22 – P42 a P45. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6

Para complementar a análise efetuada apresenta-se na Figura 5.23 o número médio de dias por ano em que a altura de onda se encontra nas diferentes classes de altura, para as configurações S0 a S6 para os pontos P48 e P49. Estes pontos encontram-se sobre a batimétrica -0.5 m ZHL, fazendo com que as ondas rebentem com alturas de 0.8 m a 3.0 m, em baixa-mar e preia-mar, respetivamente.



- As diferenças entre as alternativas S1 a S6 não são significativas.

Da Figura 5.21 à Figura 5.23, conclui-se que:

- As alternativas correspondentes ao prolongamento do molhe (qualquer que seja a inclinação) conduzem a um menor número de dias com alturas de onda superiores a 0.5 m, nas diferentes classes, nos pontos em análise, face à Situação Atual;
- O número de dias com alturas de onda superiores a 2.0 m diminui com o prolongamento do molhe, não diferindo muito entre alternativas (S1 a S6). A exceção ocorre no ponto P32, para as alternativas S3 e S6, que conduzem a um pequeno aumento do número de dias com alturas de onda entre 0.5 m e 1 m relativamente à Situação Atual S0;
- Em todos os pontos, o número de dias com alturas de onda nas diferentes classes superiores a 0.5 m aumenta, em geral, com a diminuição do comprimento do molhe;
- Em todos os pontos a diferença do número de dias com alturas de onda superiores a 0.5 m para a situação de 0° e 20° é pequena;
- Para os pontos P32, P36, P40, P44 e P48, dispostos perpendicularmente à praia, o prolongamento do molhe levou a um aumento dos dias com alturas de onda inferiores a 0.5 m, aumentando esse nº de dias com o aumento do prolongamento do molhe, diferença que se reduz à medida que o ponto se aproxima da praia;
- Nos pontos P42 a P45, dispostos paralelamente à praia, o prolongamento do molhe levou a um aumento dos dias com alturas de onda inferiores a 0.5 m, mas a solução onde ocorre a maior diferença do número de dias difere de ponto para ponto.

5.5.5.2 Alturas significativas médias e máximas

Para o ponto P42, apresentam-se os valores médios e máximos das séries de Hs obtidas para o período de 1979 a 2016 analisado, nomeadamente:

Valores médios:

- Os valores médios da altura significativa nas diferentes configurações S0 a S6, para todo o período considerado, para o período do Inverno e para o período de Verão, Figura 5.24;
- A percentagem de diminuição da média da altura significativa de onda, $H_{s_{med}}$, verificada nas 6 alternativas de prolongamento face à situação de referência, Figura 5.25.

Valores máximos

- O valor máximo da altura significativa, $H_{s_{max}}$, nas diferentes configurações S0 a S6, para o período de Inverno e para o de Verão, Figura 5.26;
- A diminuição de $H_{s_{max}}$ verificada nas 6 alternativas de prolongamento face à situação de referência, Figura 5.27.

As correspondentes figuras para os restantes pontos são apresentadas no Anexo V.

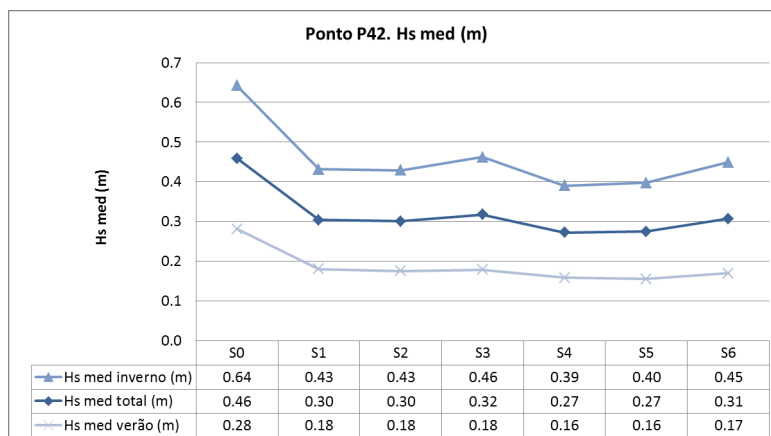


Figura 5.24 – P42. Altura significativa média. Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6

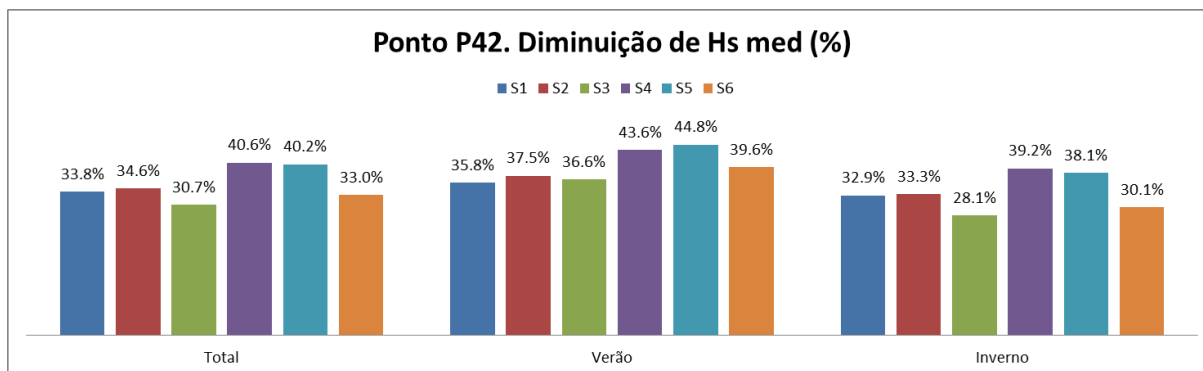


Figura 5.25 – P42. Diminuição de H_{smed} (%). Alternativas S1 a S6

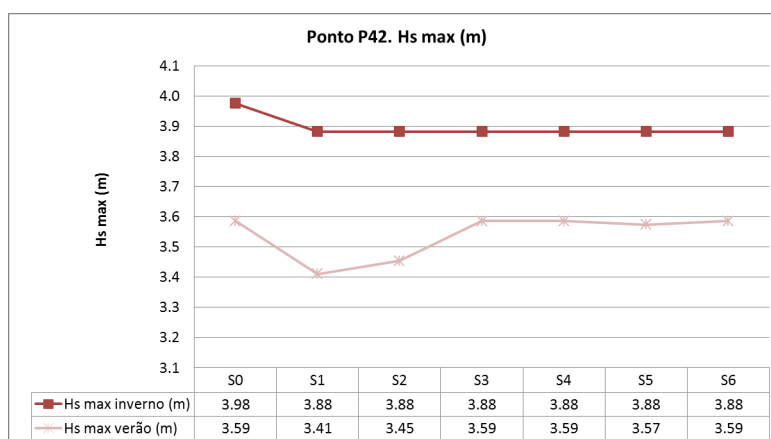


Figura 5.26 – P42. Altura significativa máxima. Inverno e Verão. Configurações S0 a S6

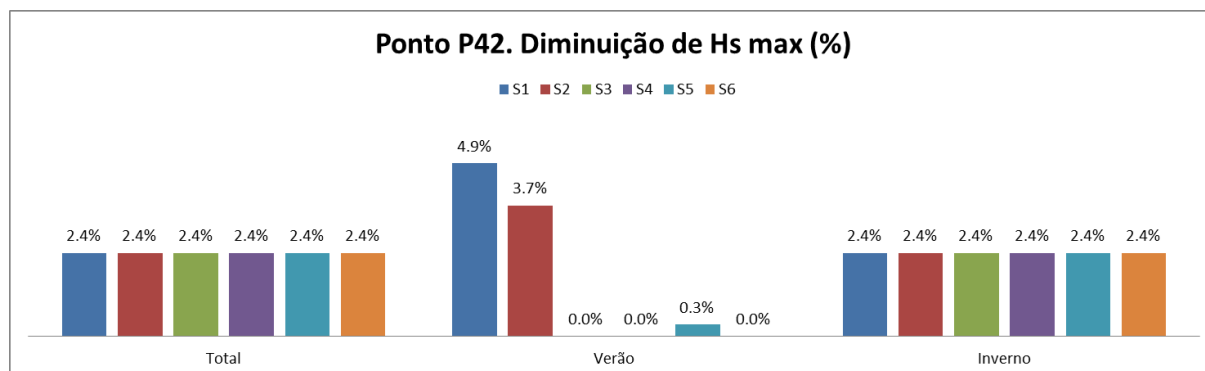


Figura 5.27 – P42. Redução da altura significativa máxima. Alternativas S1 a S6

Da Figura 5.24 à Figura 5.27 e das figuras do Anexo V, pode concluir-se que:

Em termos médios

- De P32 para P40 (perpendicular à costa), o abrigo do quebra-mar torna-se mais significativo, i.e., os valores de $H_{s_{med}}$, vão diminuindo à medida que se aproximam da costa, sendo muito semelhante entre P36 para P40, qualquer que seja a alternativa considerada;
- De P42 a P45 (paralelo à costa de Norte para Sul), o abrigo do quebra-mar torna-se menos significativo, i.e., os valores de $H_{s_{med}}$, vão aumentando, como seria de esperar, qualquer que seja a alternativa considerada;
- A redução de $H_{s_{med}}$ aumenta, em geral, com o comprimento do molhe e com o ângulo de abertura, quer considerando o total dos dias analisados, quer considerando o período de inverno;
- No período de verão o comportamento é semelhante, embora todos as alternativas apresentem reduções da mesma ordem de grandeza.

Em termos máximos

- Há, em geral, uma redução do valor de $H_{s_{max}}$ para todas as alternativas estudadas, relativamente à Situação Atual;
- As maiores reduções ocorrem para S1 e S4;
- De P42 a P45 existe um aumento progressivo do valor de $H_{s_{max}}$, embora a redução entre configurações varie de ponto para ponto.

6 | Considerações finais

Este relatório descreve os estudos em modelo numérico de diferentes soluções do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões e a comparação, face à Situação Atual, das características da agitação marítima na praia de Matosinhos.

Uma análise aos índices de agitação em 7 pontos localizados em frente à praia de Matosinhos indica que o efeito do prolongamento do molhe é mais relevante para as direções de agitação incidente entre OSO e ONO. As alternativas com maior redução dos índices de agitação são as alternativas S1 e S4, seguidas de S2 e S5 e, finalmente, de S3 e S6. Analisando as alturas de onda, verificou-se que, para os pontos mais a norte da praia, a diferença de altura obtida entre configurações é mais pronunciada. Para os pontos mais a sul, apenas se verifica alteração nos índices para direções entre O e NO, sendo pouco relevante para as demais direções analisadas.

Do mesmo modo, a análise das alturas de onda numa linha de pontos paralela à costa sobre a batimétrica dos -2.0m (ZHL), para 3 condições de agitação específicas, mostra que existem duas zonas com características diferentes, os 500 m mais a norte sobre a linha, mais abrigados para direções de agitação mais rodadas a NO, e os 500 m mais a sul sobre a linha, menos abrigados para estas direções. A altura de onda média diminui com o aumento do prolongamento do molhe e as diferenças são maiores para as direções mais rodadas a norte, para as quais o quebra-mar confere maior abrigo. O prolongamento de 200 m (S3 ou S6) para 250 m (S2 ou S5) tem maior efeito do que o prolongamento de 250 m (S2 ou S5) para 300 m (S1 ou S4). Não é clara a influência do ângulo de abertura nas reduções das alturas de onda em frente à praia. Com efeito, as diferenças obtidas, para as condições analisadas são ténues, exceto para os pontos localizados nos 500 m mais a sul da praia e para direção de onda incidente de ONO, em que o ângulo de abertura de 20° é o que leva a maiores reduções das alturas de onda. Verificou-se que a altura de onda média é inferior em preia-mar relativamente à baixa-mar e as diferenças (em percentagem) entre as alternativas e a Situação Atual são maiores do que em baixa-mar, chegando a 62%, contra 38% em baixa-mar.

No que se refere às linhas de rebentação em frente à praia de Matosinhos, observa-se uma alteração da posição da linha de rebentação, que, em geral se aproxima da praia, para qualquer das alternativas relativamente à Situação Atual, mas a diferença entre as alternativas não é relevante. Em preia-mar, apenas para alturas da ordem de 4 m se verifica rebentação e as alternativas S1 e S4 são as que levam a uma alteração mais significativa nos 500 m norte da praia, principalmente para a direção de 270°, mas as restantes alternativas também evidenciam algumas diferenças no posicionamento da linha de rebentação face à Situação Atual.

Uma análise aos regimes de agitação nos diversos pontos de controlo permitiu verificar que as alternativas correspondentes ao prolongamento do molhe, qualquer que seja o comprimento e ângulo de abertura, conduzem a um menor número de dias com alturas de onda superiores a 0.5 m, nas diferentes classes, nos pontos em análise, face à Situação Atual, aumentando, em geral, com a

diminuição do comprimento do molhe. O número de dias com alturas de onda superiores a 2.0 m também diminui com o prolongamento do molhe. As diferenças entre as alternativas S1 a S6 não são significativas. O ângulo de abertura tem uma influência reduzida nos resultados.

Em suma:

- As alternativas analisadas levam a uma redução das alturas de onda na praia de Matosinhos, principalmente para direções de onda de ONO, O e SO, atualmente menos abrigadas. As direções mais rodadas a norte afetam mais as alturas de onda na metade sul da praia, enquanto as direções mais rodadas a sul afetam mais as alturas de onda na metade norte da praia;
- A posição da linha de rebentação, em geral, ou mantém-se inalterada ou aproxima-se da praia (o que ocorre especialmente na metade norte da praia e para incidências mais rodadas a sul);
- O número de dias por ano em que as ondas são superiores a 0.5 m sofre uma redução, qualquer que seja a alternativa analisada;
- Existe uma redução significativa no número de dias em que as ondas rebentam, nos 7 pontos analisados, para qualquer das alternativas;
- As diferenças entre as alternativas S1 a S6, não são significativas;
- O ângulo de abertura tem uma influência reduzida nos resultados.

Lisboa, LNEC, abril de 2017

VISTO

AUTORIA

A Diretora de Departamento de Hidráulica e
Ambiente



Helena Alegre



Liliana Pinheiro

Bolseira de Pós-Doutoramento



Conceição Fortes

Investigadora Principal

Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas
Marítimas



Maria da Graça Neves

Investigadora Auxiliar com Agregação

Referências bibliográficas

- APDL, 2016 – **Pedido de apresentação de proposta. Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e do novo terminal de contentores do Porto de Leixões**, julho.
- BERKHOFF, 1972 – **Computation of combined refraction-diffraction**. Proc. 13th International Conference in Coastal Engineering, Vancouver, Canada, Vol. 2, pp. 471-490.
- CAPITÃO, R.; PINHEIRO, L.V.; FORTES, C.J.E.M., 2017 – **Estudos em Modelo Físico e Numérico do Prolongamento do Quebra-Mar Exterior e das Acessibilidades Marítimas do Porto de Leixões. Estudo I – Regimes de agitação marítima**. LNEC - Proc. 0603/121/20692. Relatório 227/2017 – DHA/NPE.
- FORTES, C.J.E.M., 1993 – **Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos)**. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Lisboa, Portugal.
- IHRH, 2013 – **Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Projeto de criação de um novo terminal para contentores no porto de Leixões**. Relatório final.
- PINHEIRO, L.V.; FORTES, C.J.E.M.; NEVES, M.G., 2017 – **Estudos em Modelo Físico e Numérico do Prolongamento do Quebra-Mar Exterior e das Acessibilidades Marítimas do Porto de Leixões. Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos. Parte 1**. LNEC - Proc. 0603/121/20692. Relatório 258/2017 – DHA/NPE.
- SEELIG; AHRENS, 1995 – **Wave reflection and energy dissipation by coastal structures. Wave forces on inclined and vertical wall structures**, ASCE, pp. 28-55.
- SWAN Team: BOOIJ, N.; HAAGSMA, I.J.G.; HOLTHUIJSEN, L.H.; KIEFTENBURG, A.T.M.M.; RIS, R.C.; VAN DER WESTHUYSEN, A.J.; ZIJLEMA, M., 2006 – **SWAN Technical Documentation, Cycle III, version 40.51**. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- WAMDI Group, 1988 – **The WAM model-a third generation ocean wave prediction model**. J. Phys. Oceanography. 18: 1775–1810.

Anexos

ANEXO I

Diagramas de valores dos índices de agitação

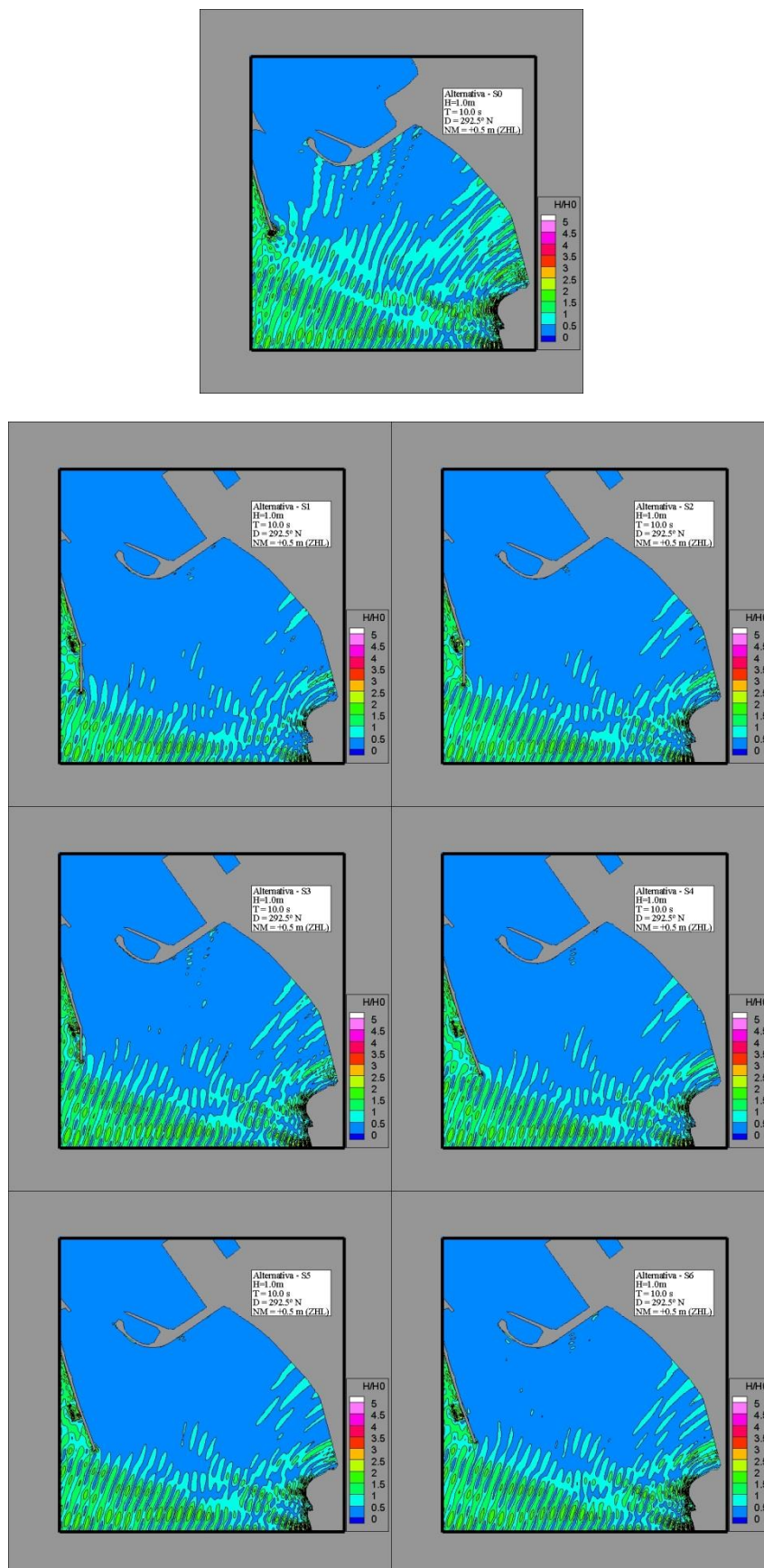


Figura A.1 – Índices de agitação para a condição de agitação: T=10 s, D=292.5° e NM=+0.5 m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6

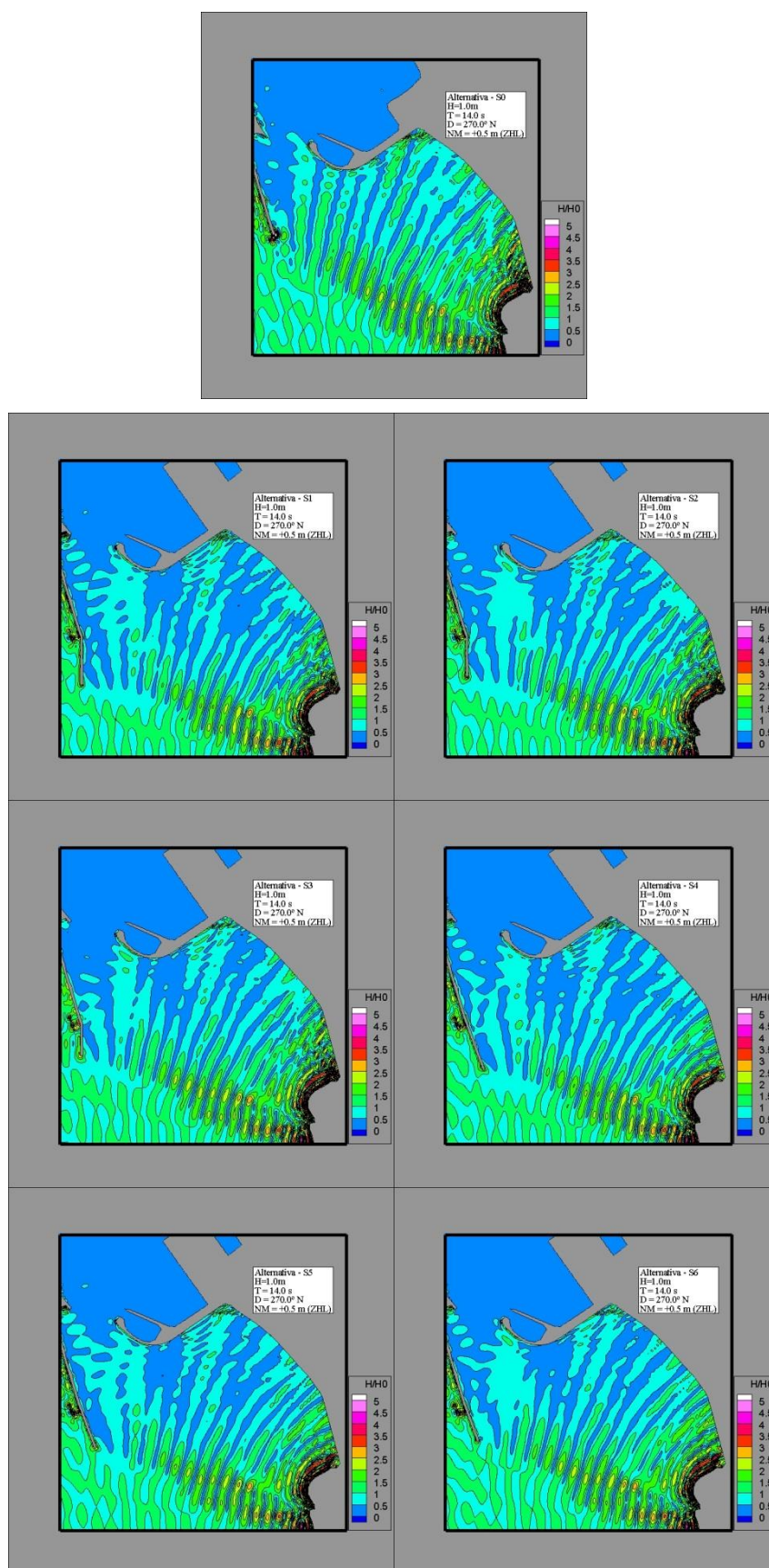


Figura A.2 – Índices de agitação para a condição de agitação: T=14 s, D=270° e NM=+0.5 m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6

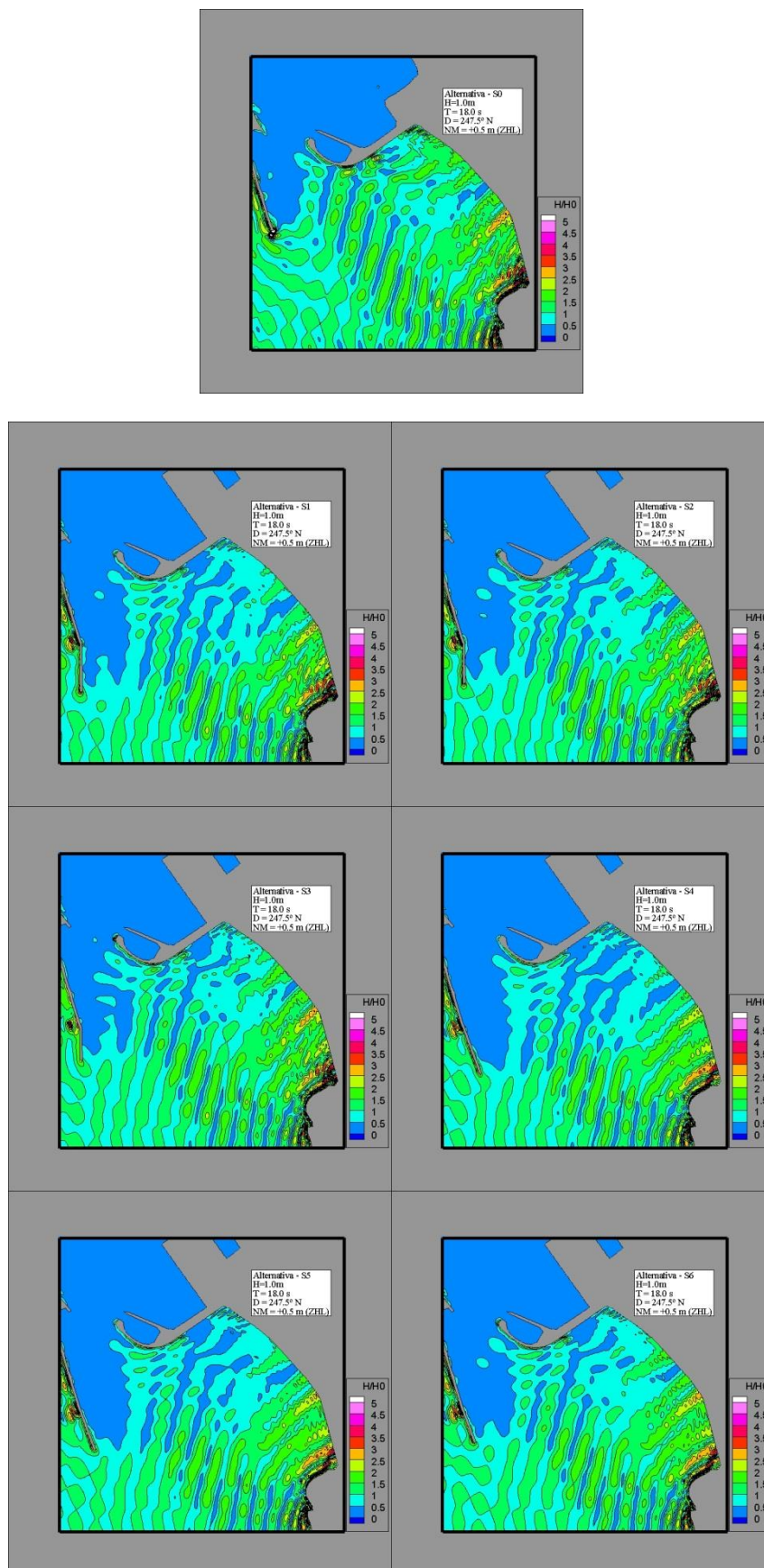


Figura A.3 – Índices de agitação para a condição de agitação: $T=18$ s, $D=247.5^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6

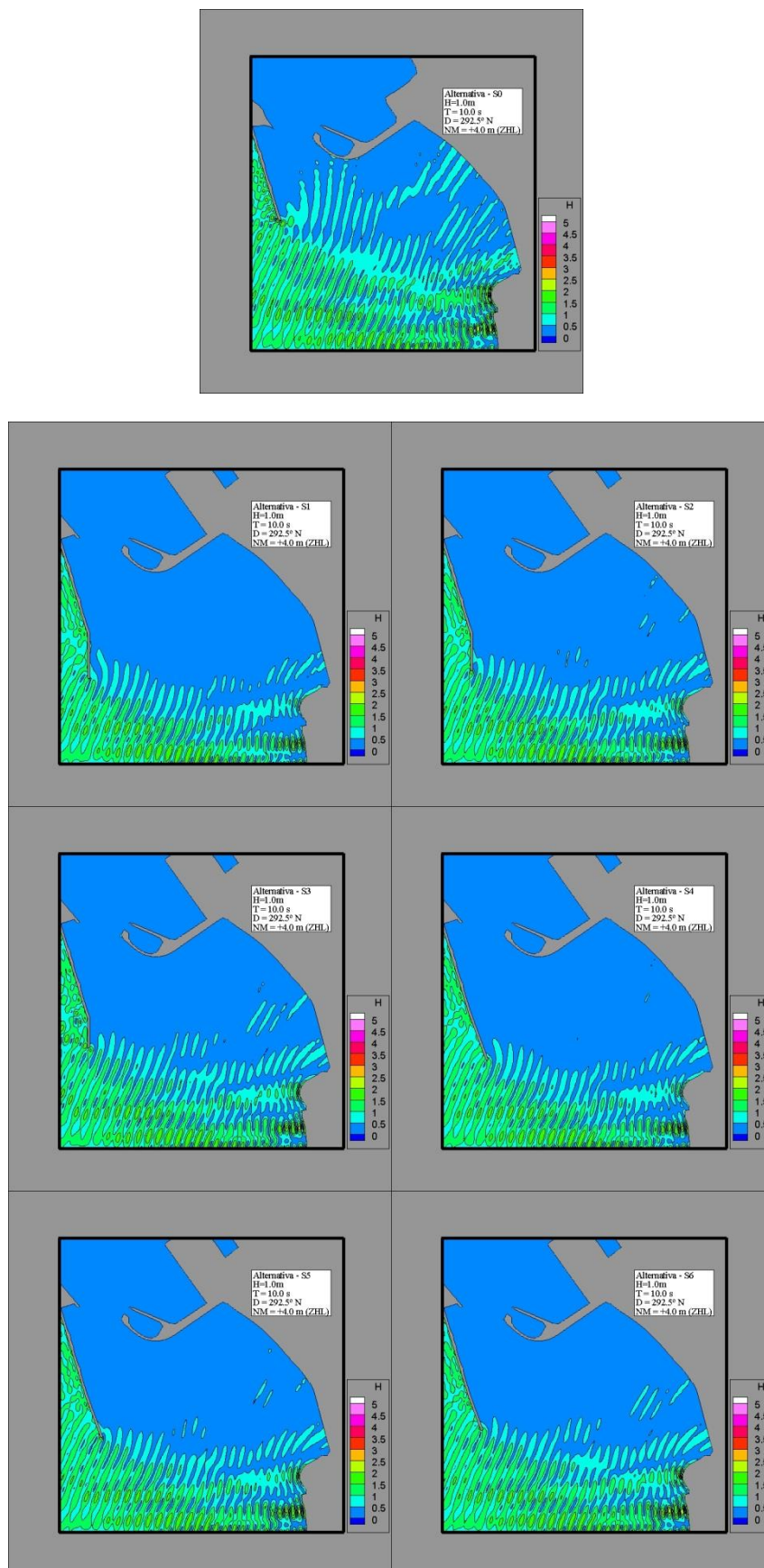


Figura A.4 – Índices de agitação para a condição de agitação: $T=10$ s, $D=292.5^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6

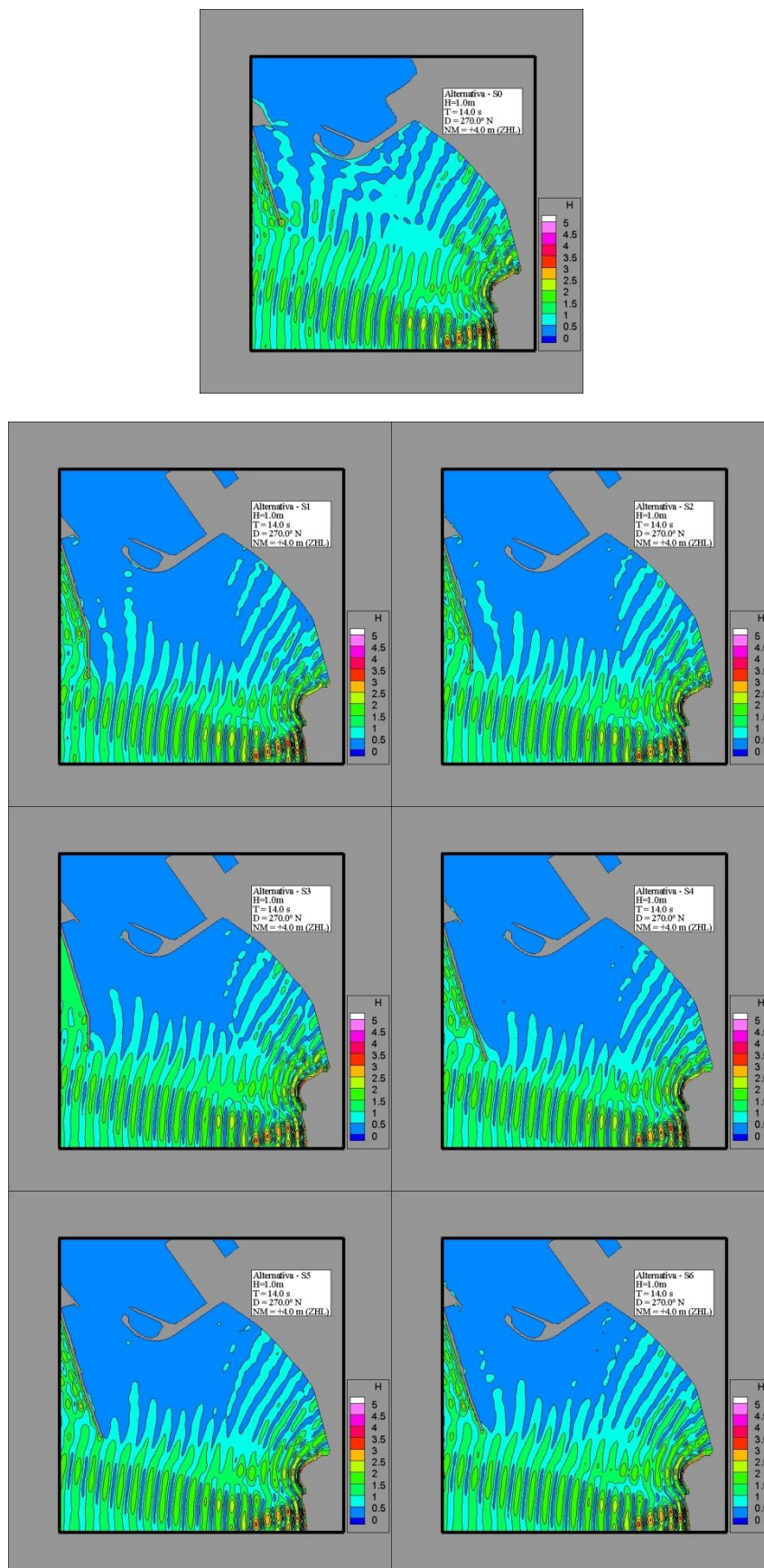


Figura A.5 – Índices de agitação para a condição de agitação: $T=14$ s, $D=270^\circ$ e $NM=+4.0$ m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6

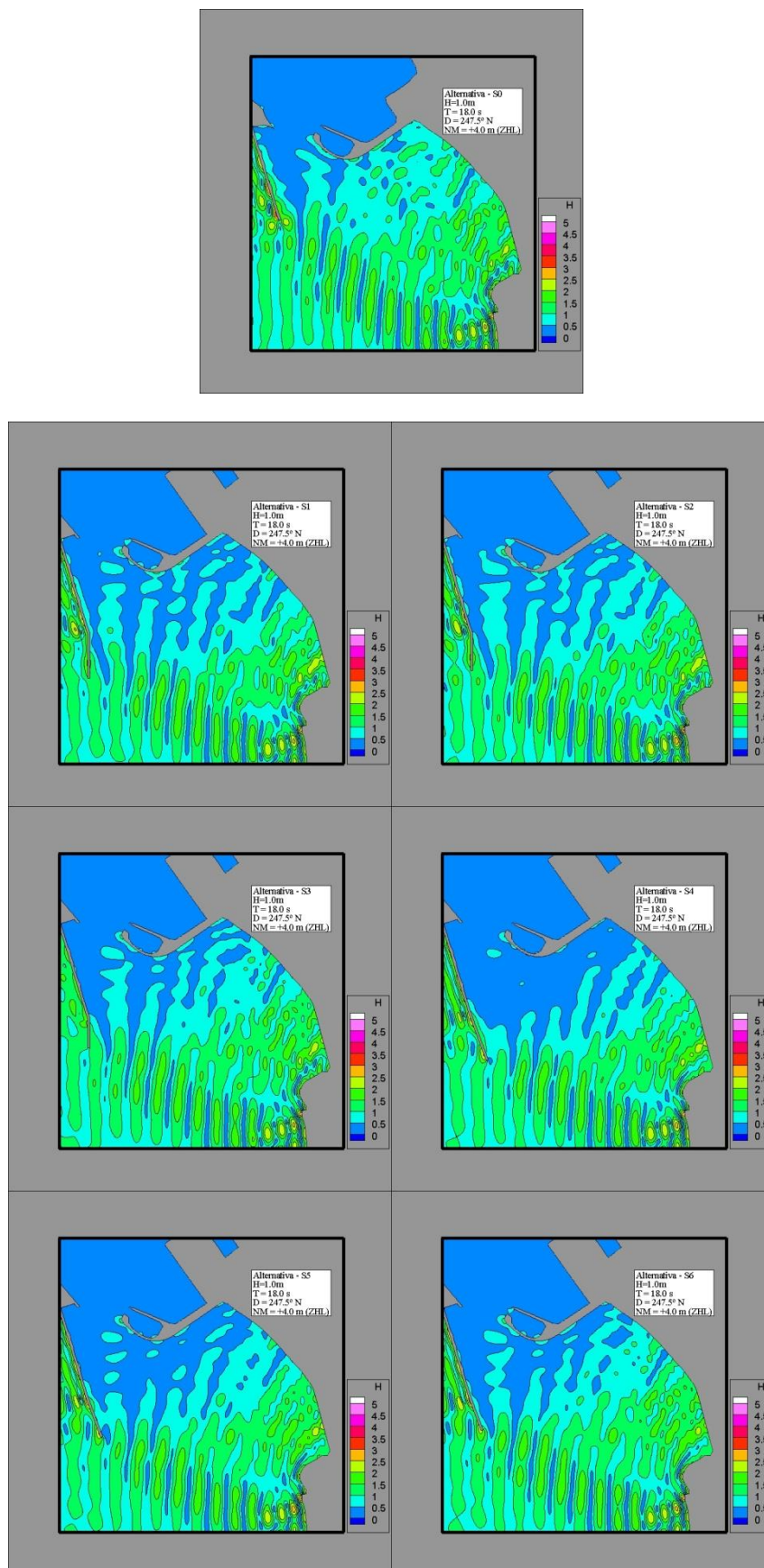


Figura A.6 – Índices de agitação para a condição de agitação: T=18 s, D=247.5° N e NM=+4.0 m (ZHL) para as 7 configurações testadas: S0 a S6

ANEXO II

Alturas de onda para uma onda incidente de 1.0 m, 2.0 m e 4.0 m

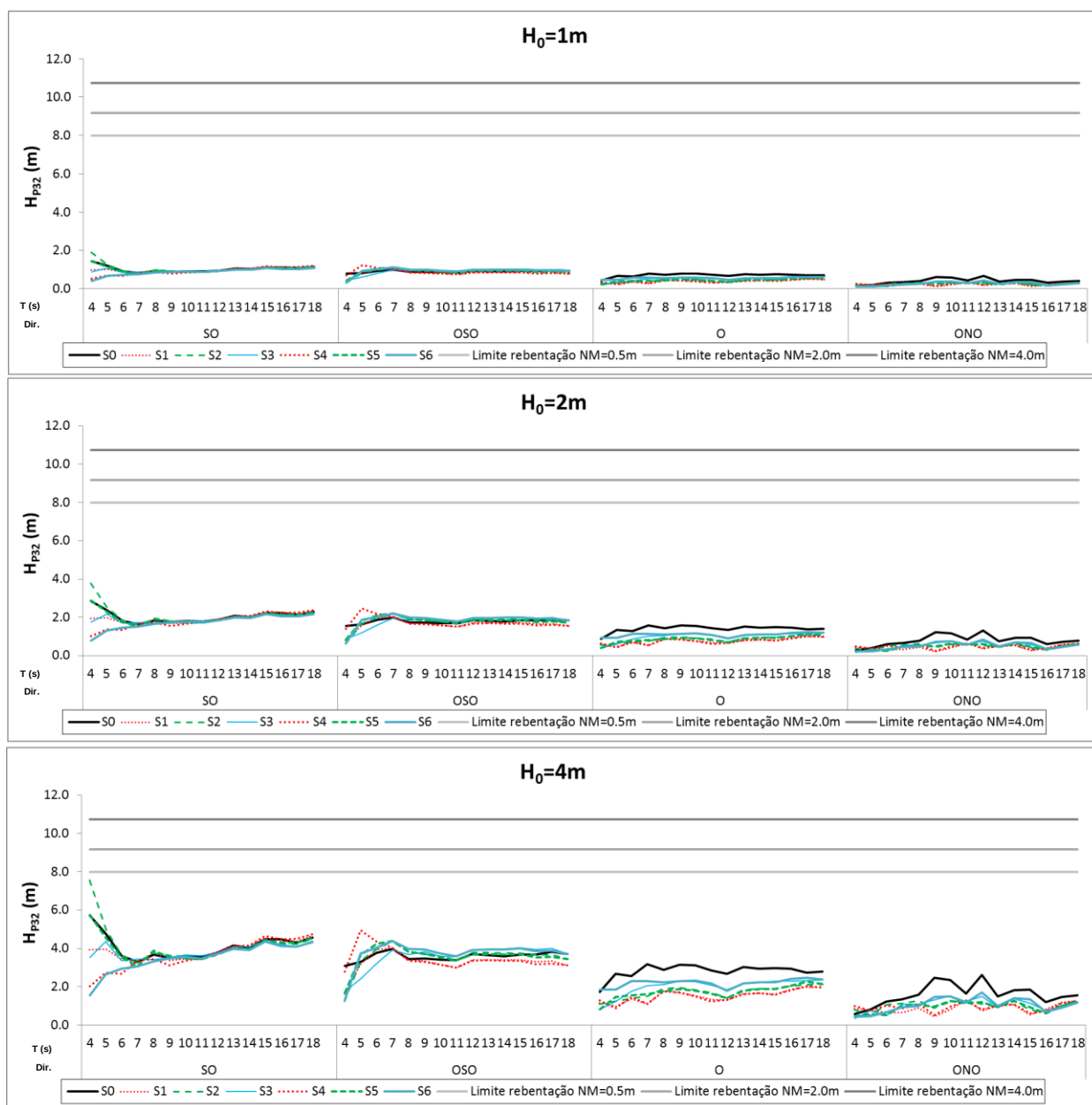


Figura A.7 – P32. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_0 = 1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

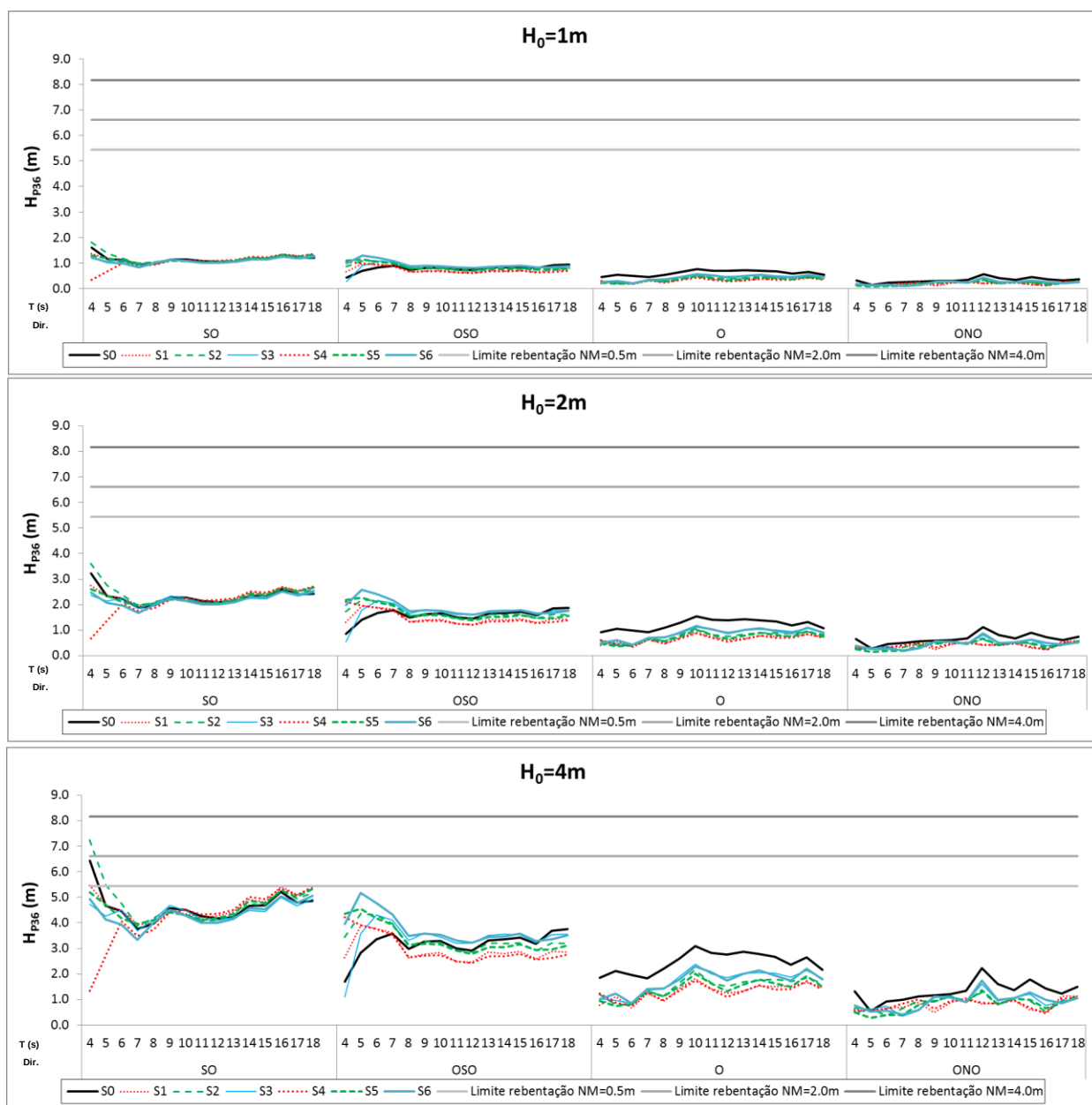


Figura A.8 – P36. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_0=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

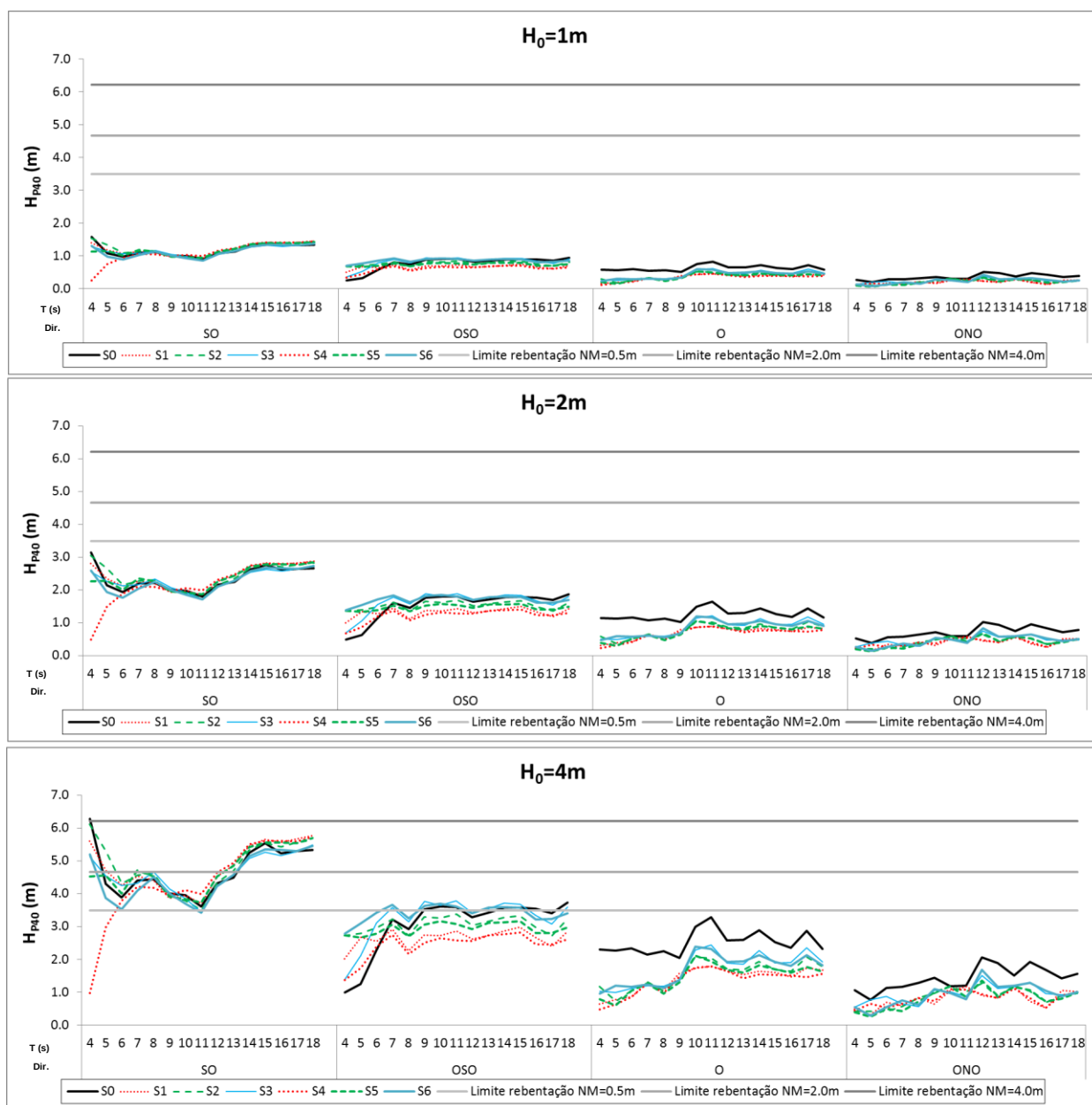


Figura A.9 – P40. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_0=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

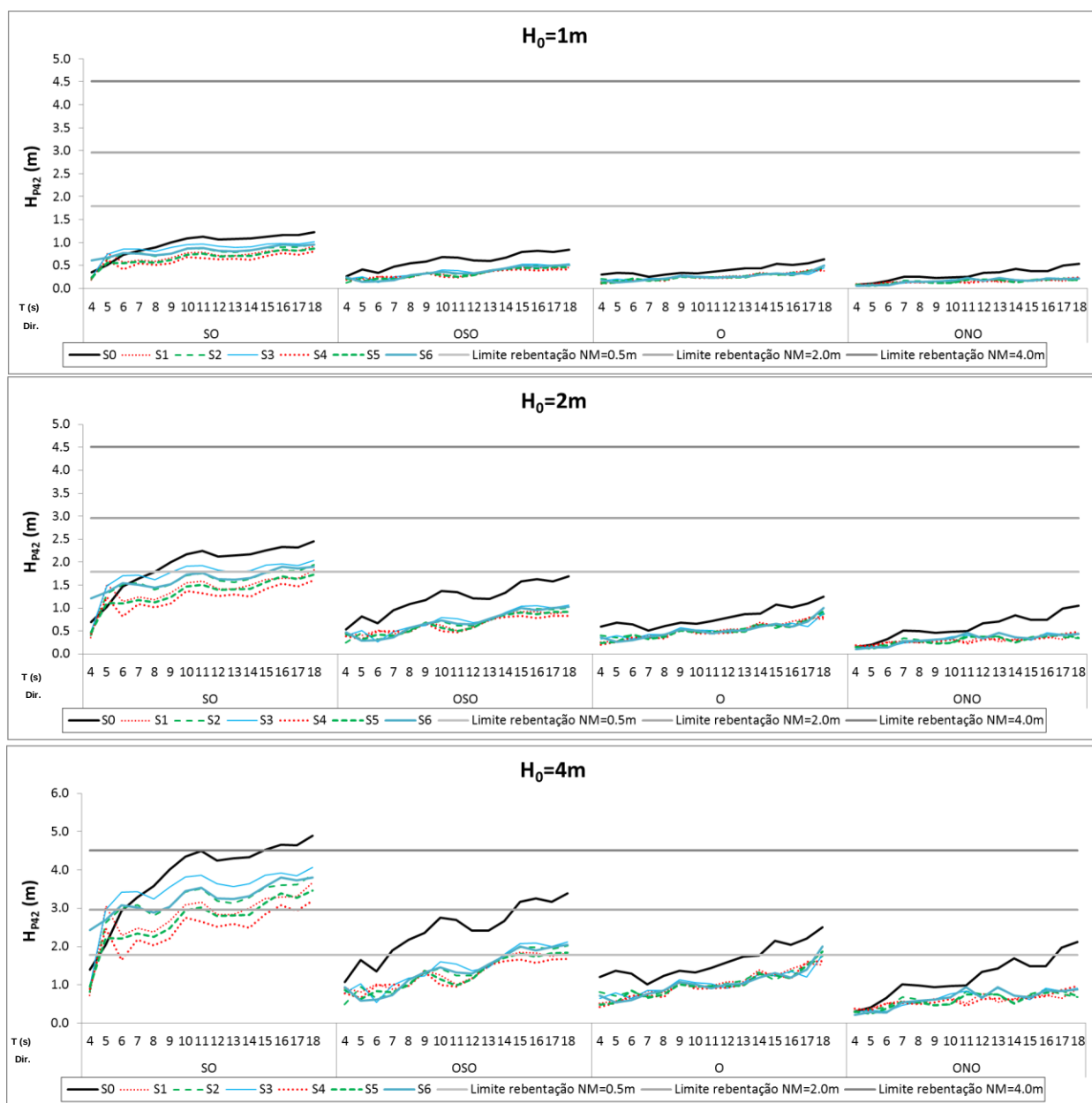


Figura A.10 – P42. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_0=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

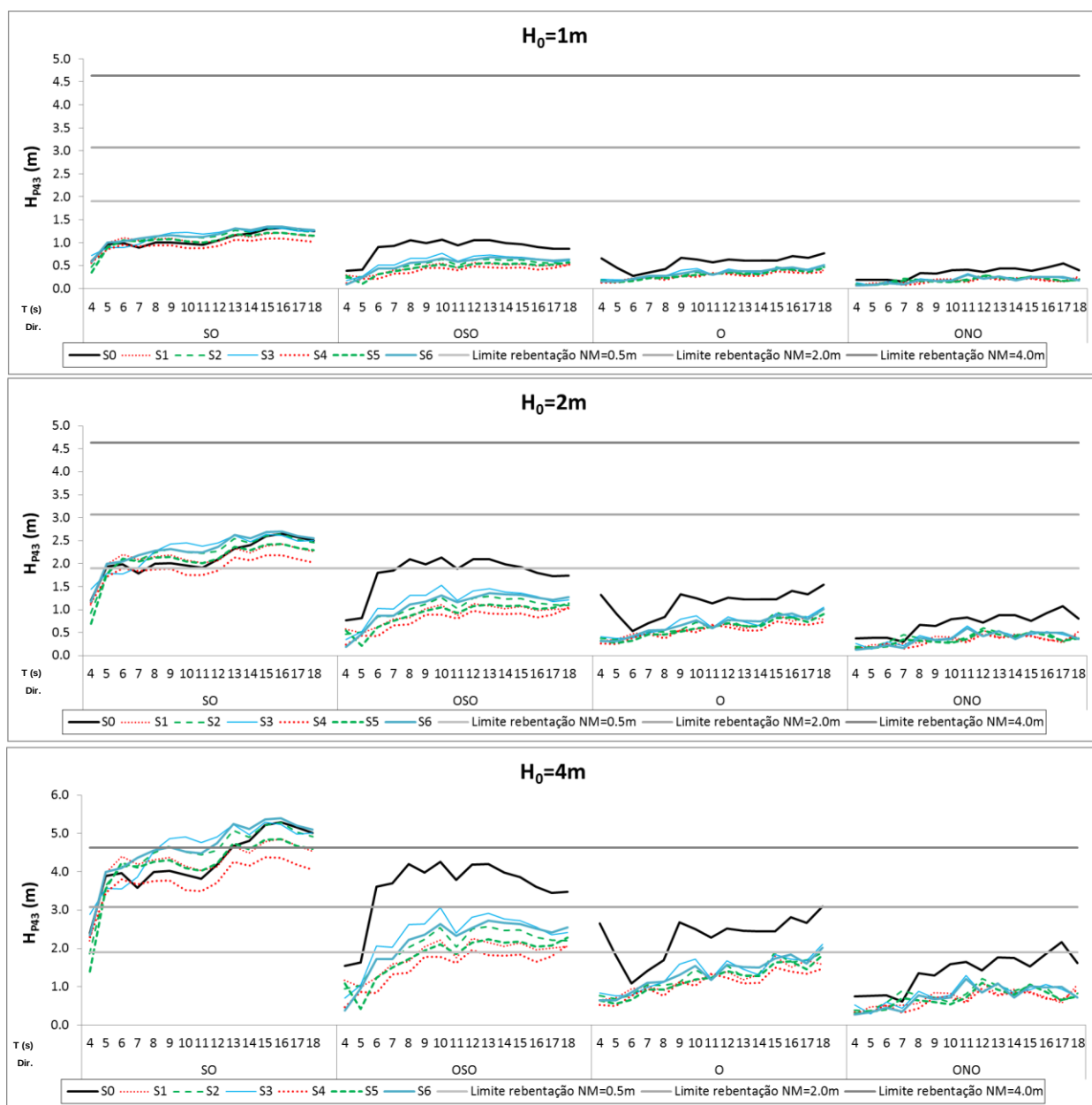


Figura A.11 – P43. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_0=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

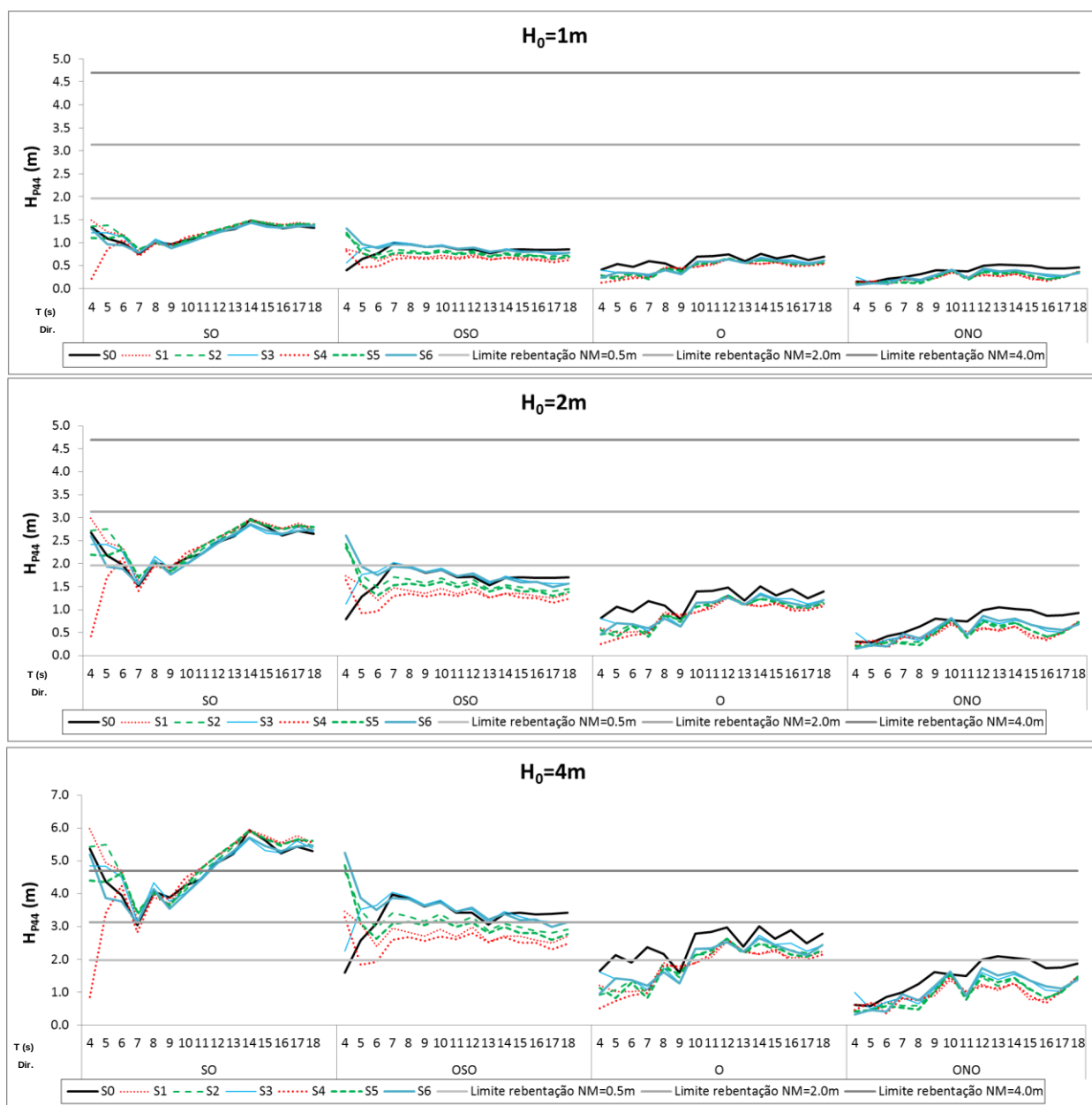


Figura A.12 – P44. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_0=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

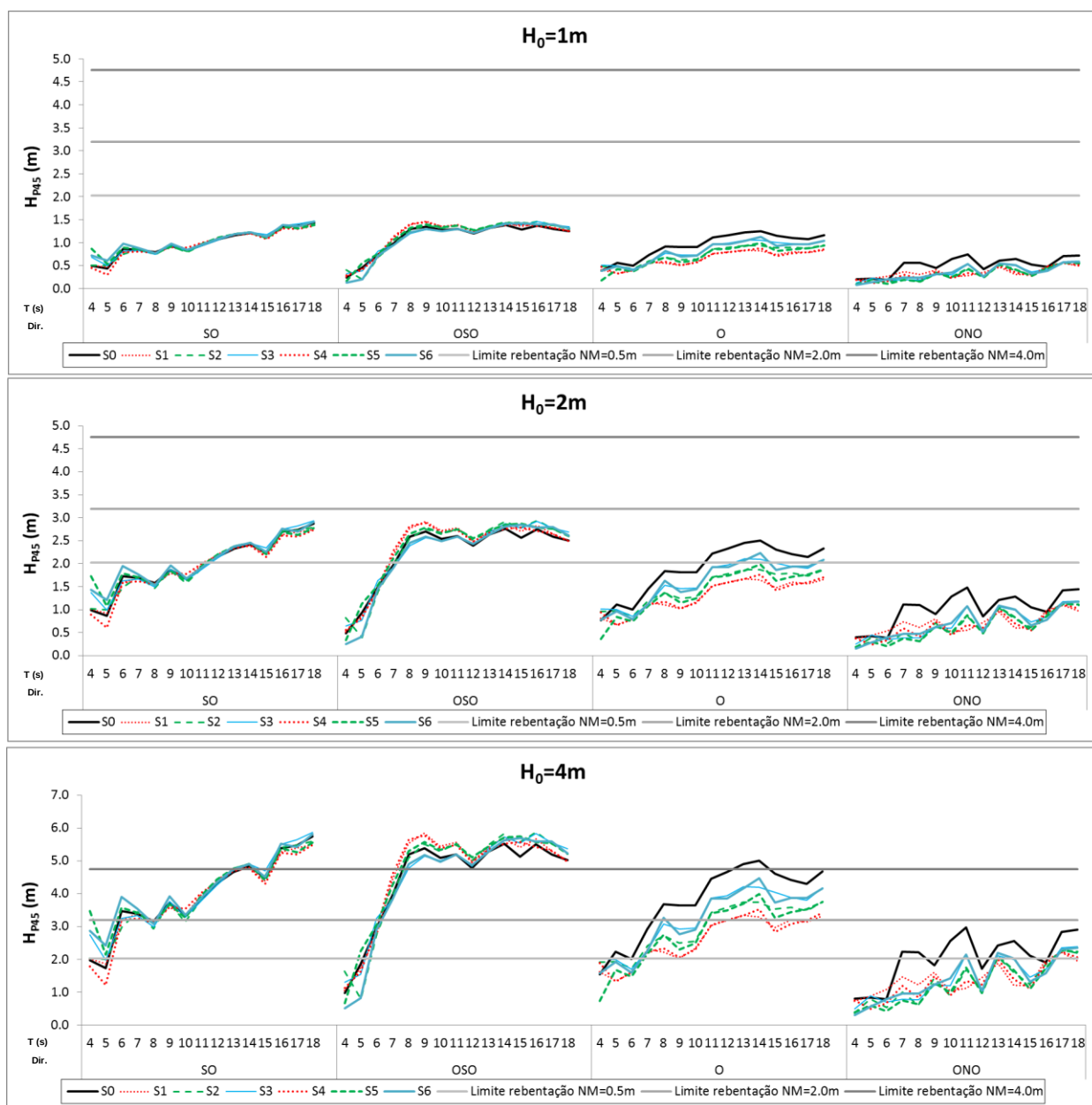


Figura A.13 – P45. Altura de onda, para uma onda incidente de $H_0=1.0$ m, 2.0 m e 4.0 m, para as 7 configurações testadas: S0 a S6

ANEXO III

Linha de rebentação

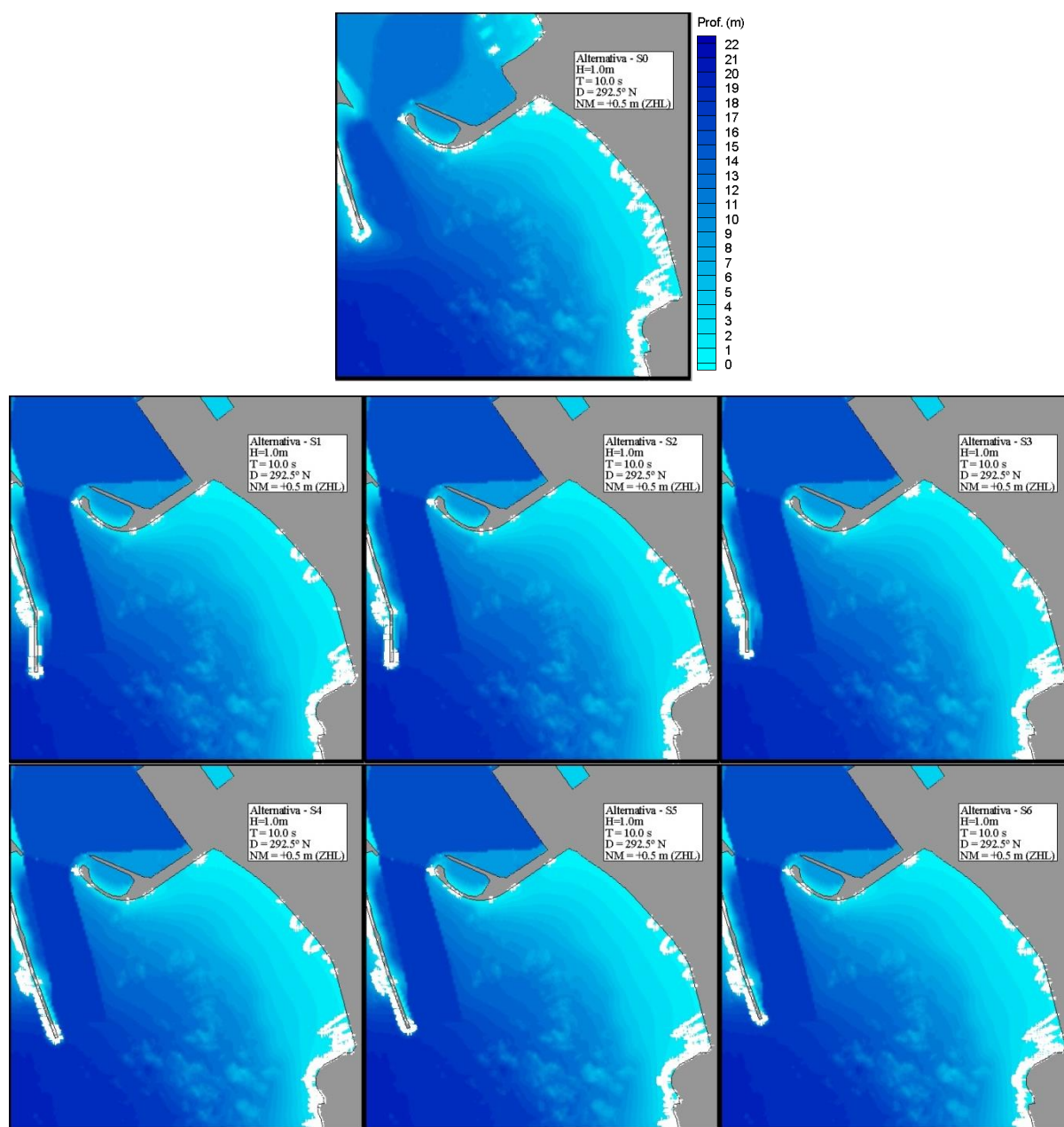


Figura A.14 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: $H=1.0$ m, $T=10.0$ s, $D=292.5^\circ$ e $NM=+0.5$ m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

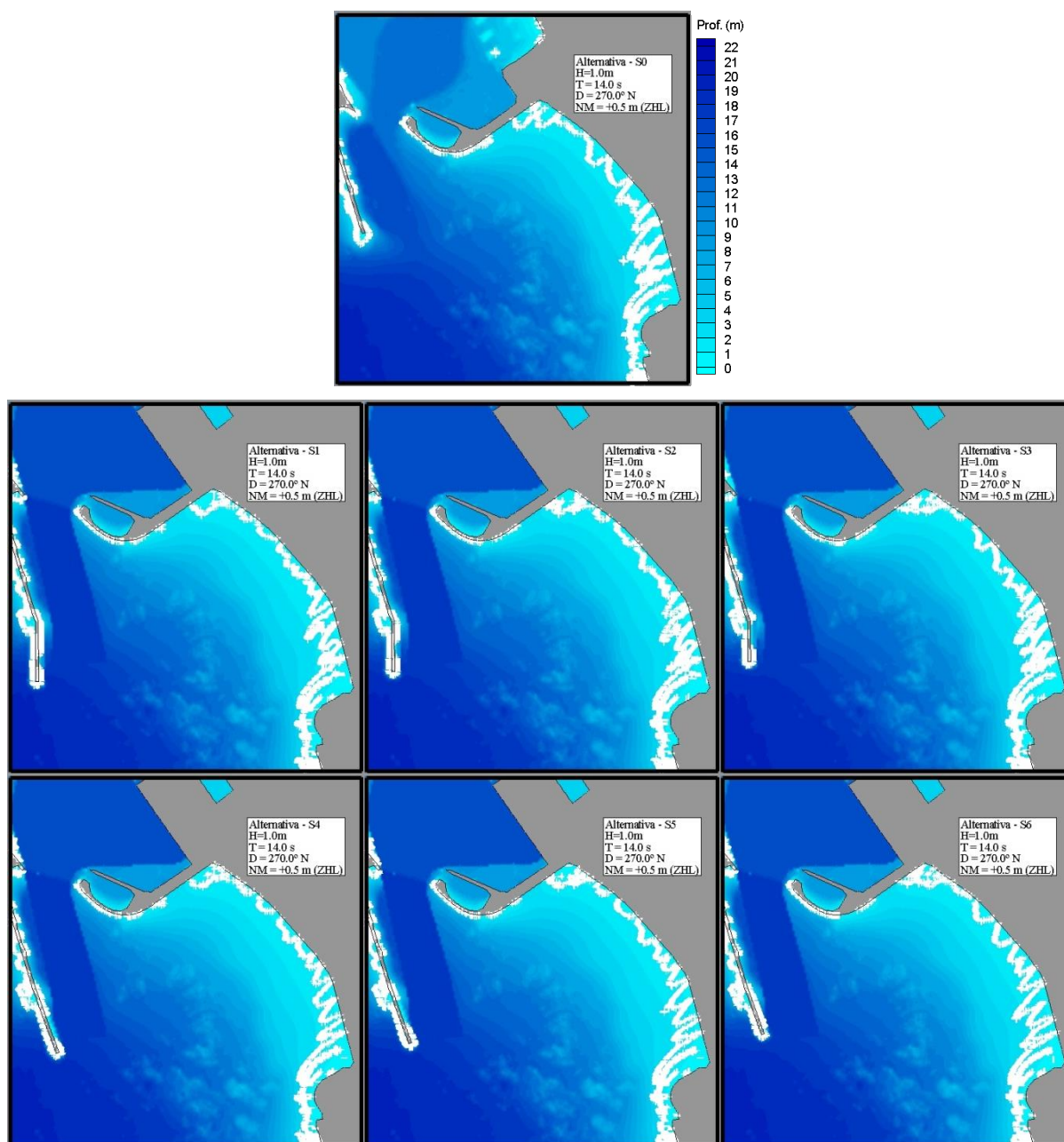


Figura A.15 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=1.0 m, T=14 s, D=270° e NM=+0.5 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

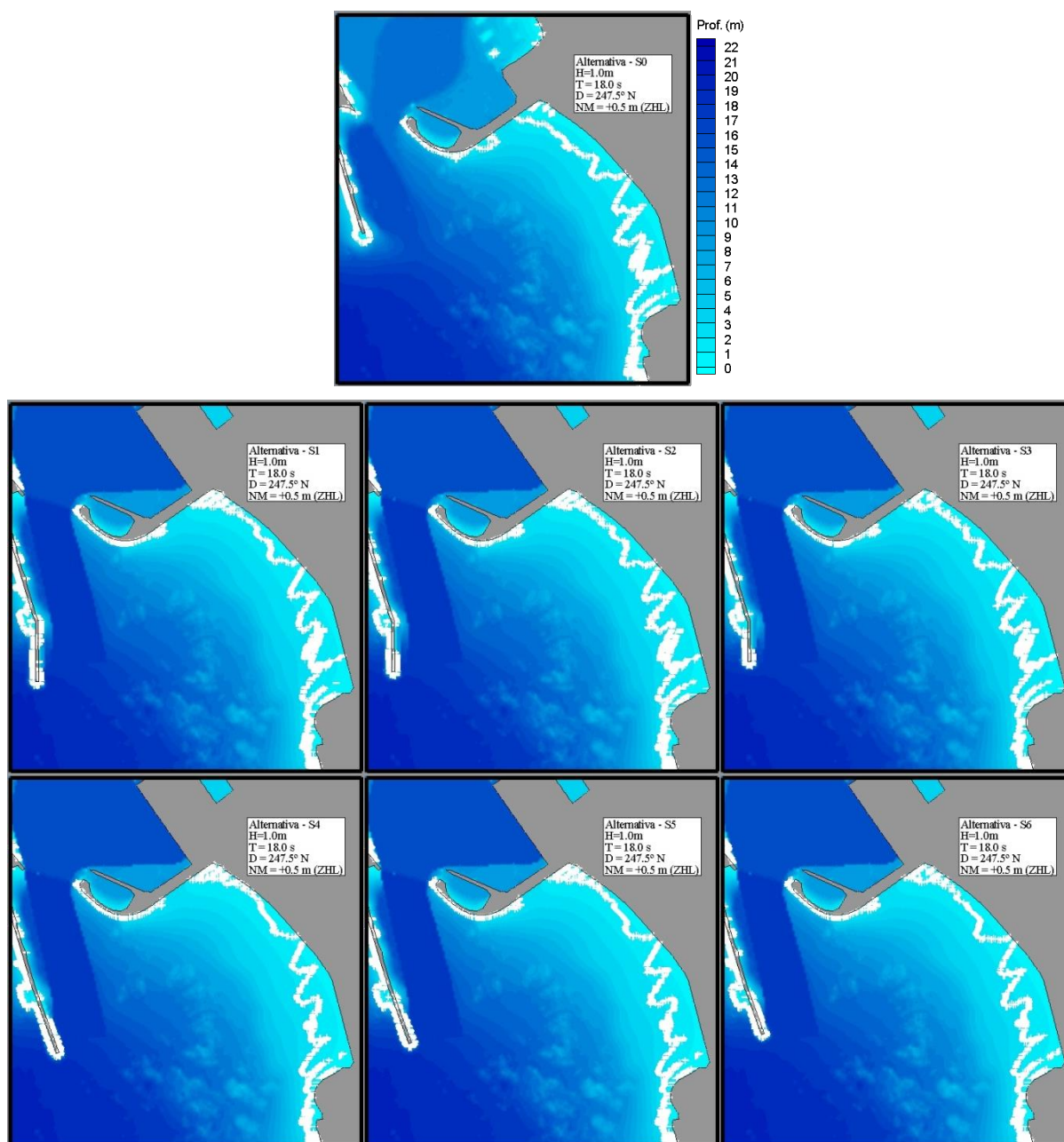


Figura A.16 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=1.0 m, T=18 s, D=247.5 e NM=+0.5 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

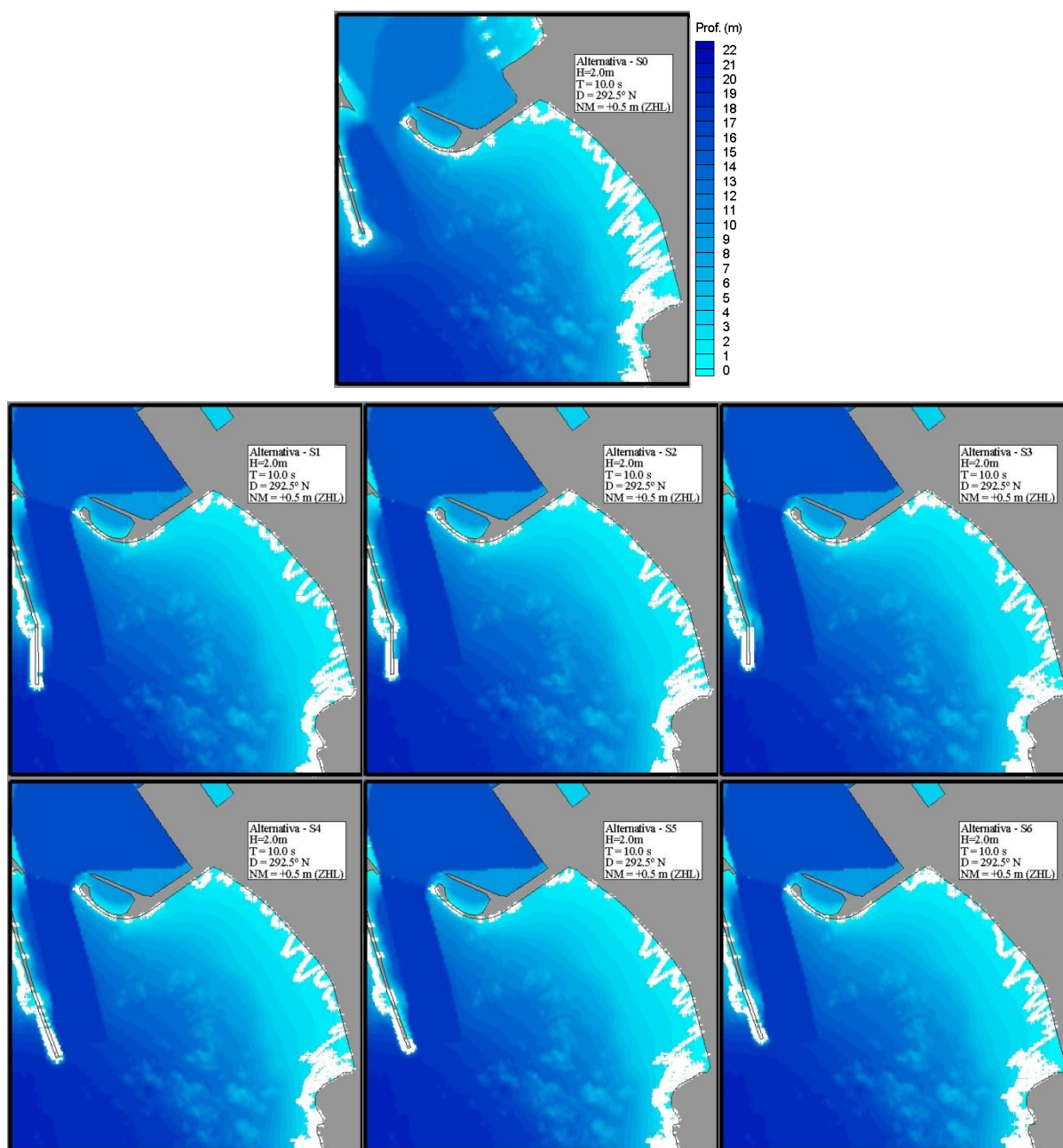


Figura A.17 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=2.0 m, T=10 s, D=292.5° e NM=+0.5 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

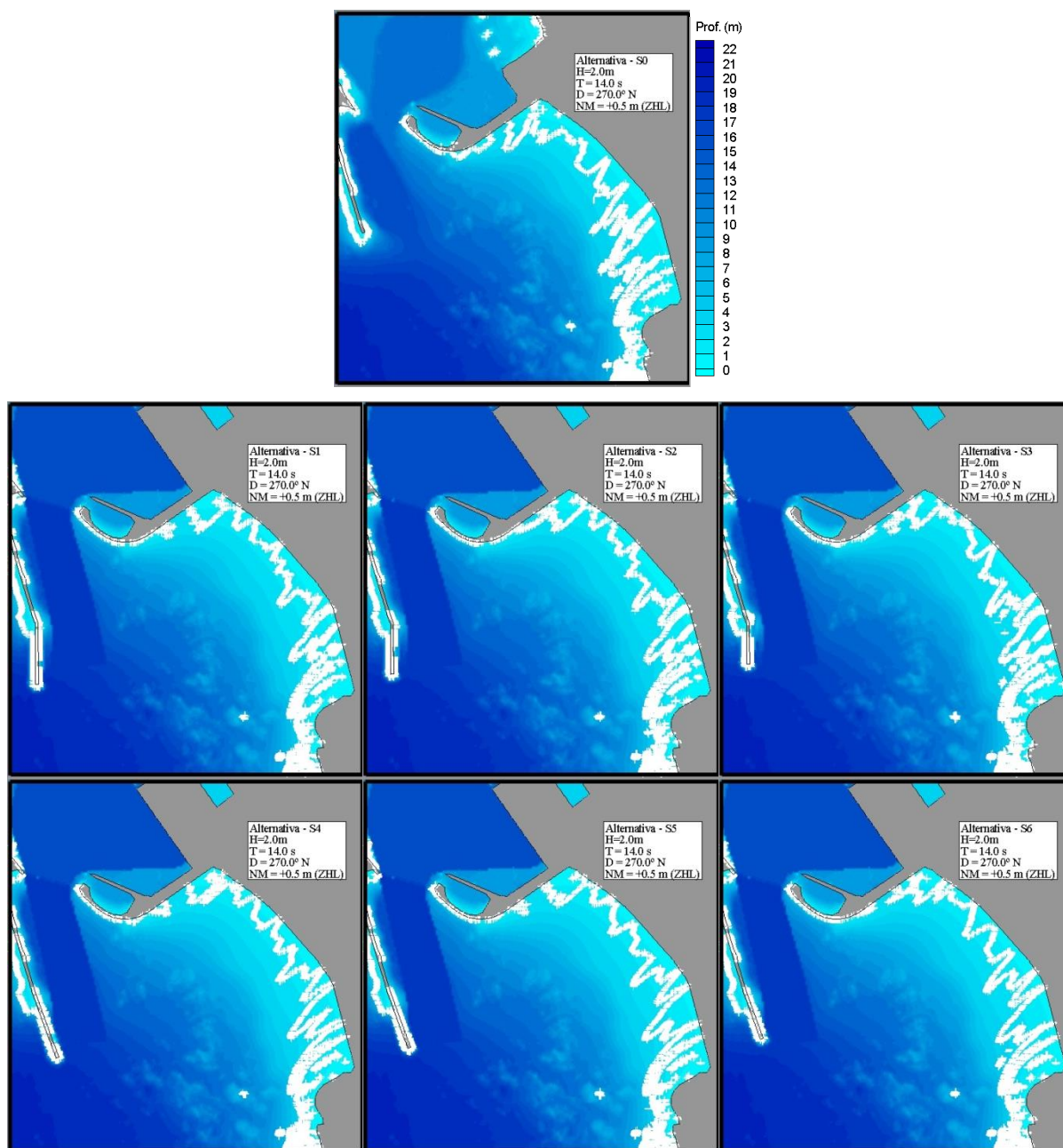


Figura A.18 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=2.0 m, T=14 s, D=270° e NM=+0.5 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

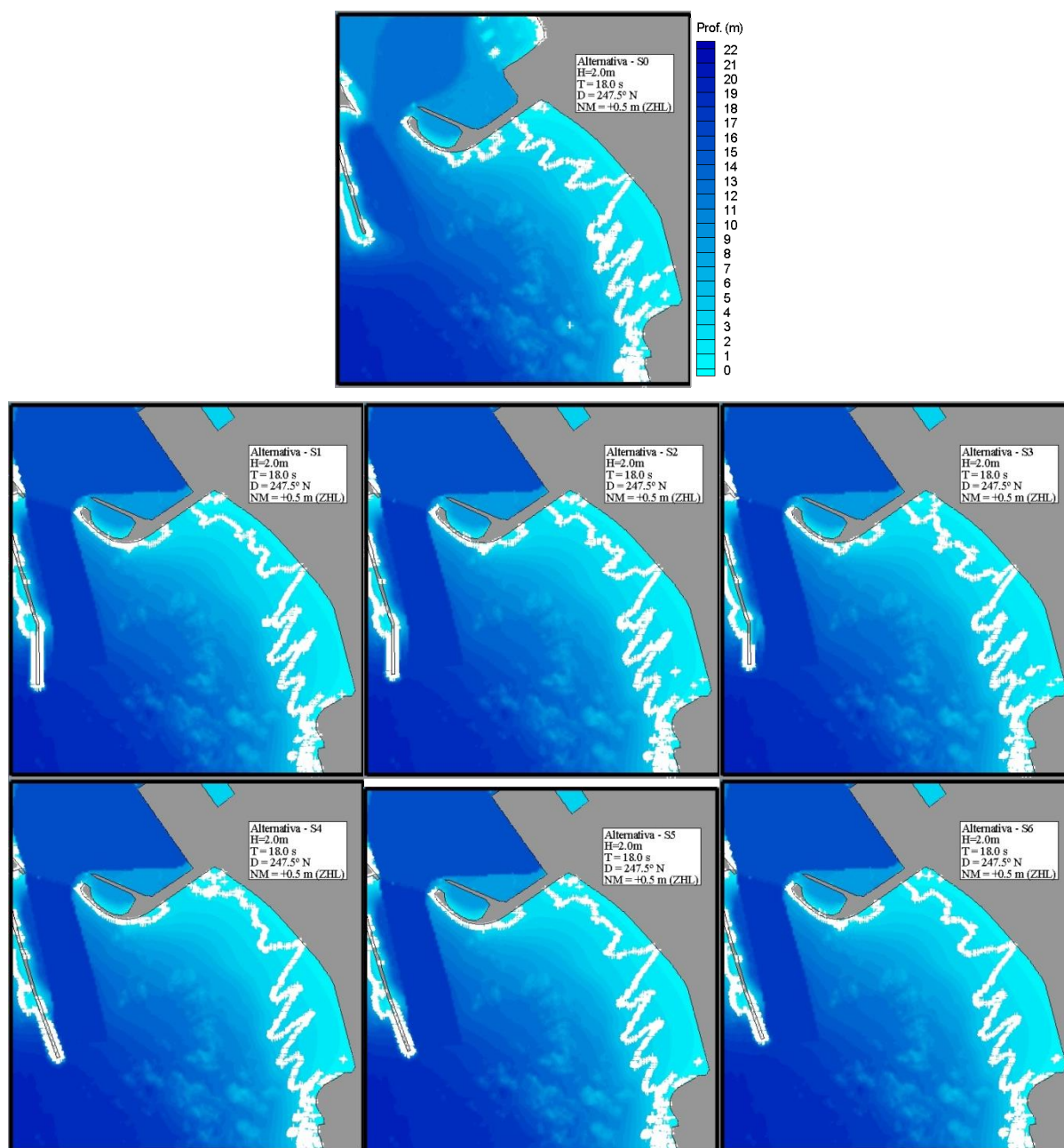


Figura A.19 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=2.0 m, T=18 s, D=247.5 e NM=+0.5 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

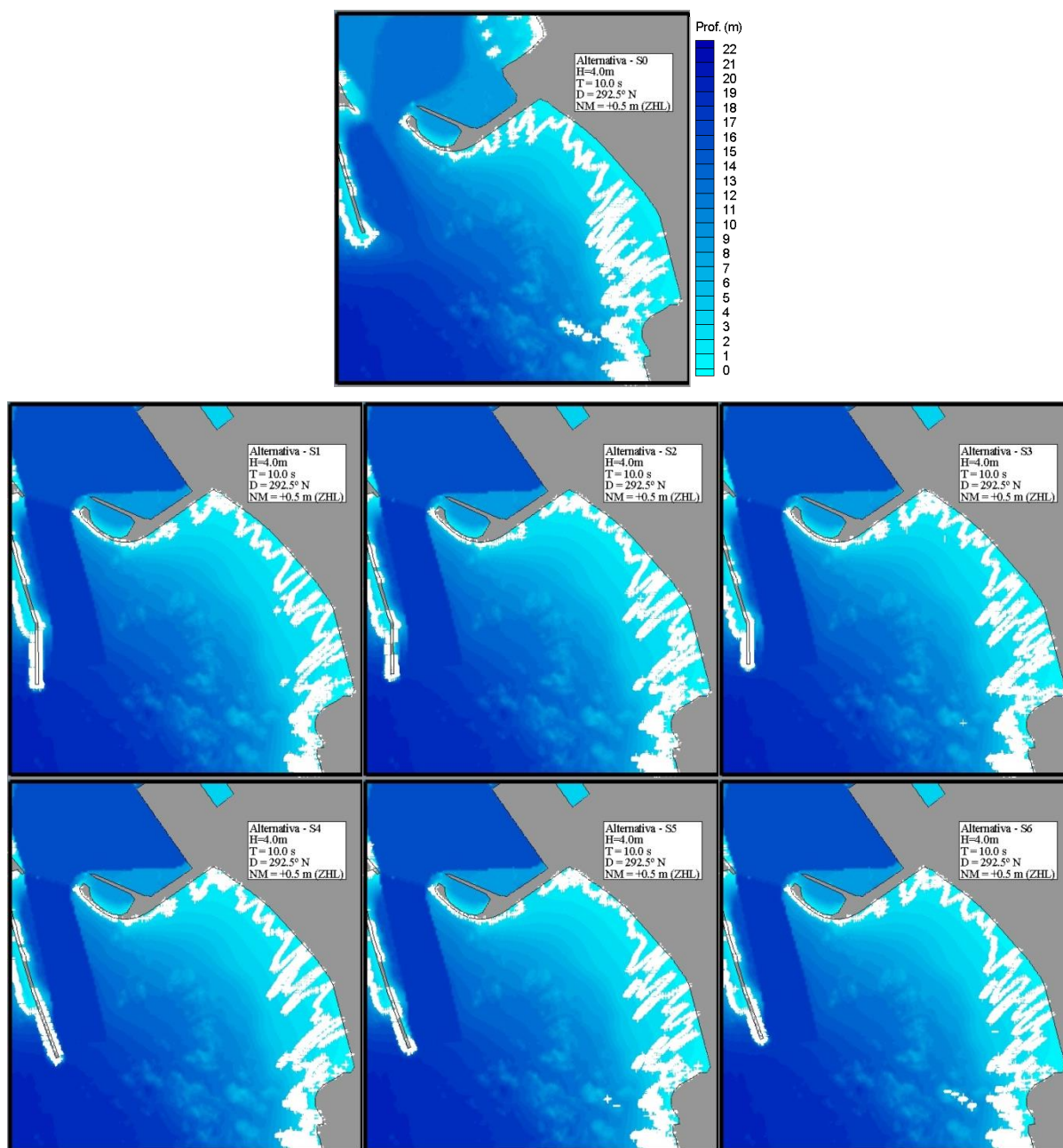


Figura A.20 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=4.0 m, T=10 s, D=292.5° e NM=+0.5 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

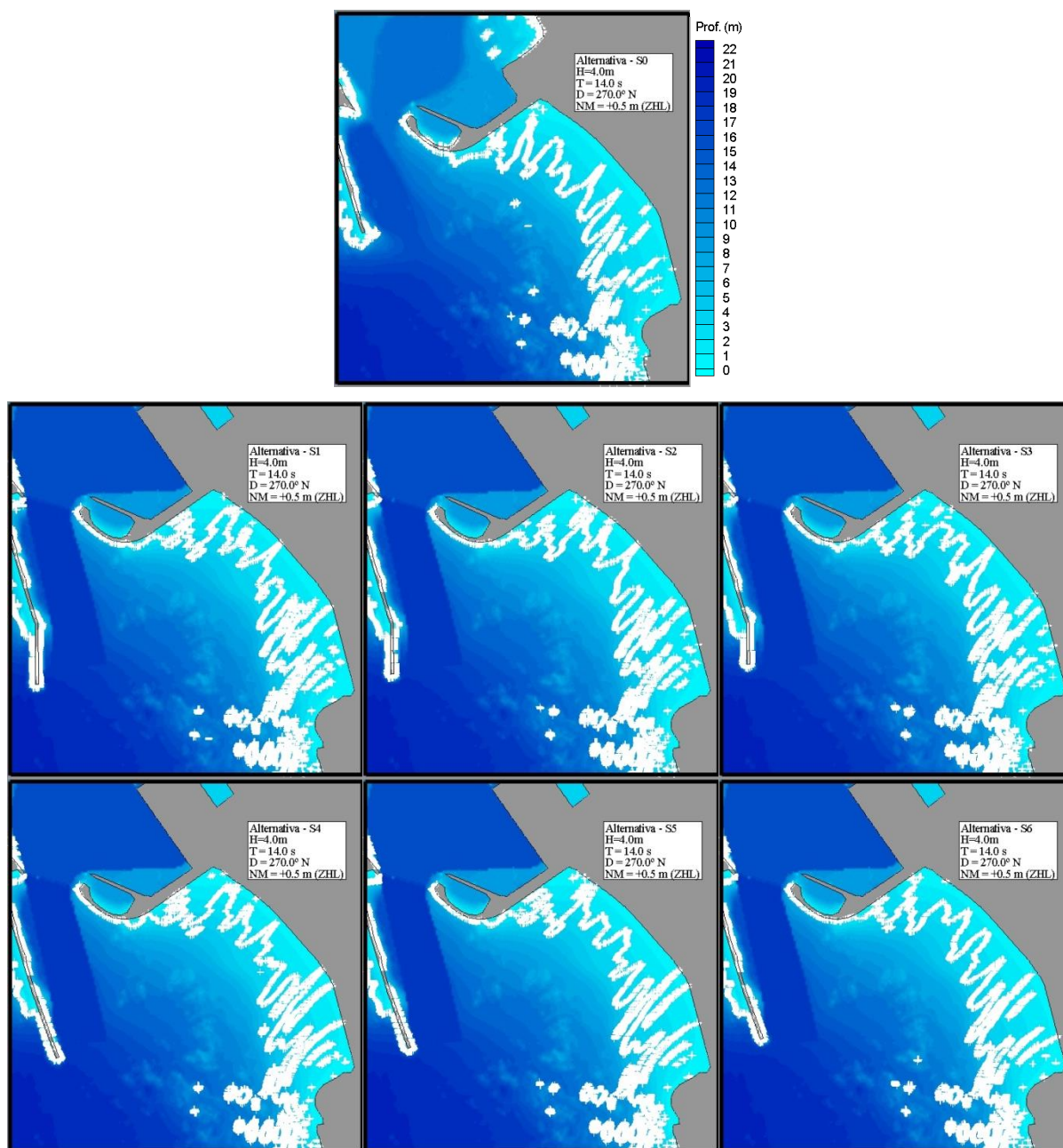


Figura A.21 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=4.0 m, T=14 s, D=270° e NM=+0.5 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

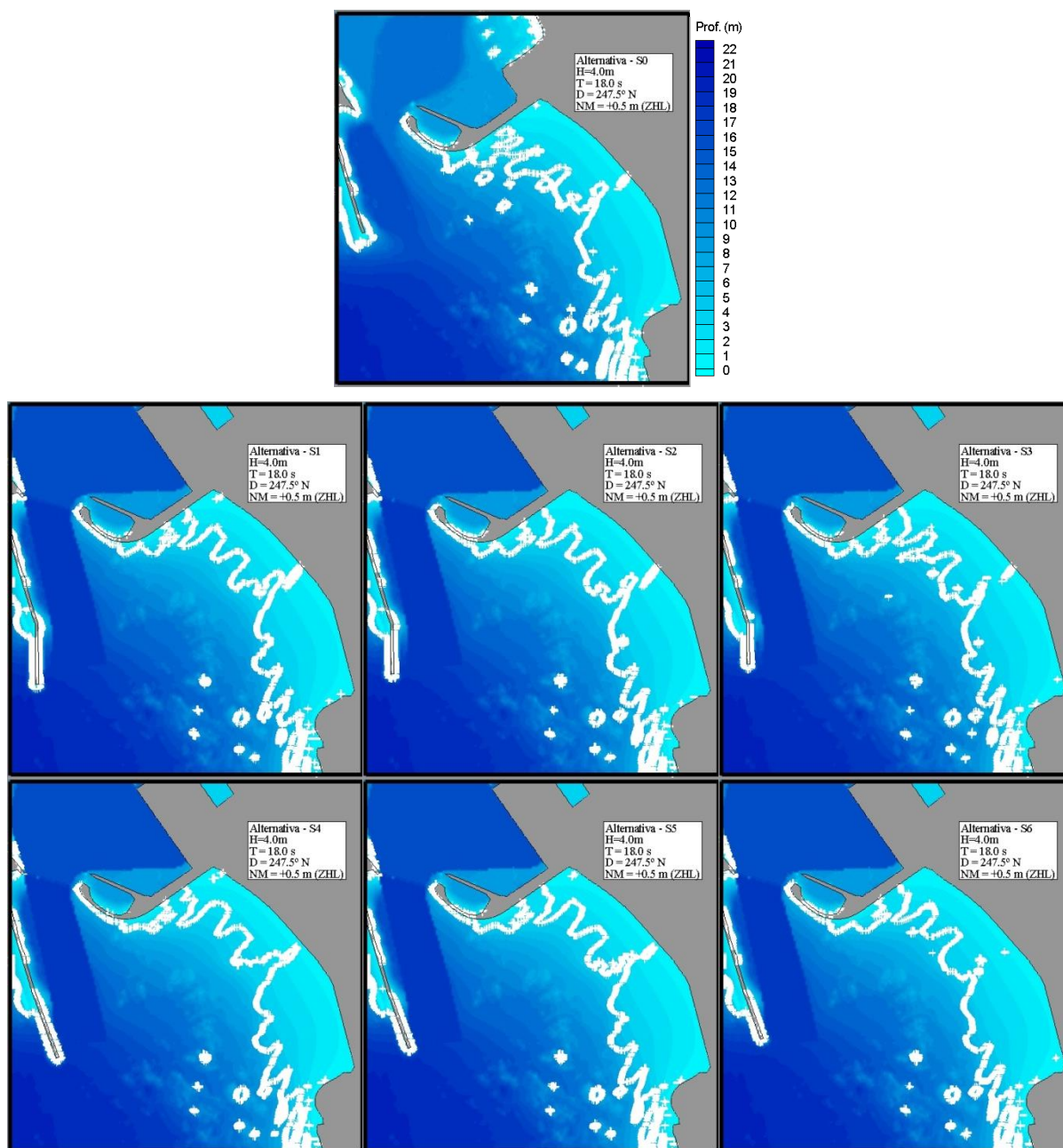


Figura A.22 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=4.0 m, T=18.0 s, D=247.5° N e NM=+0.5 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

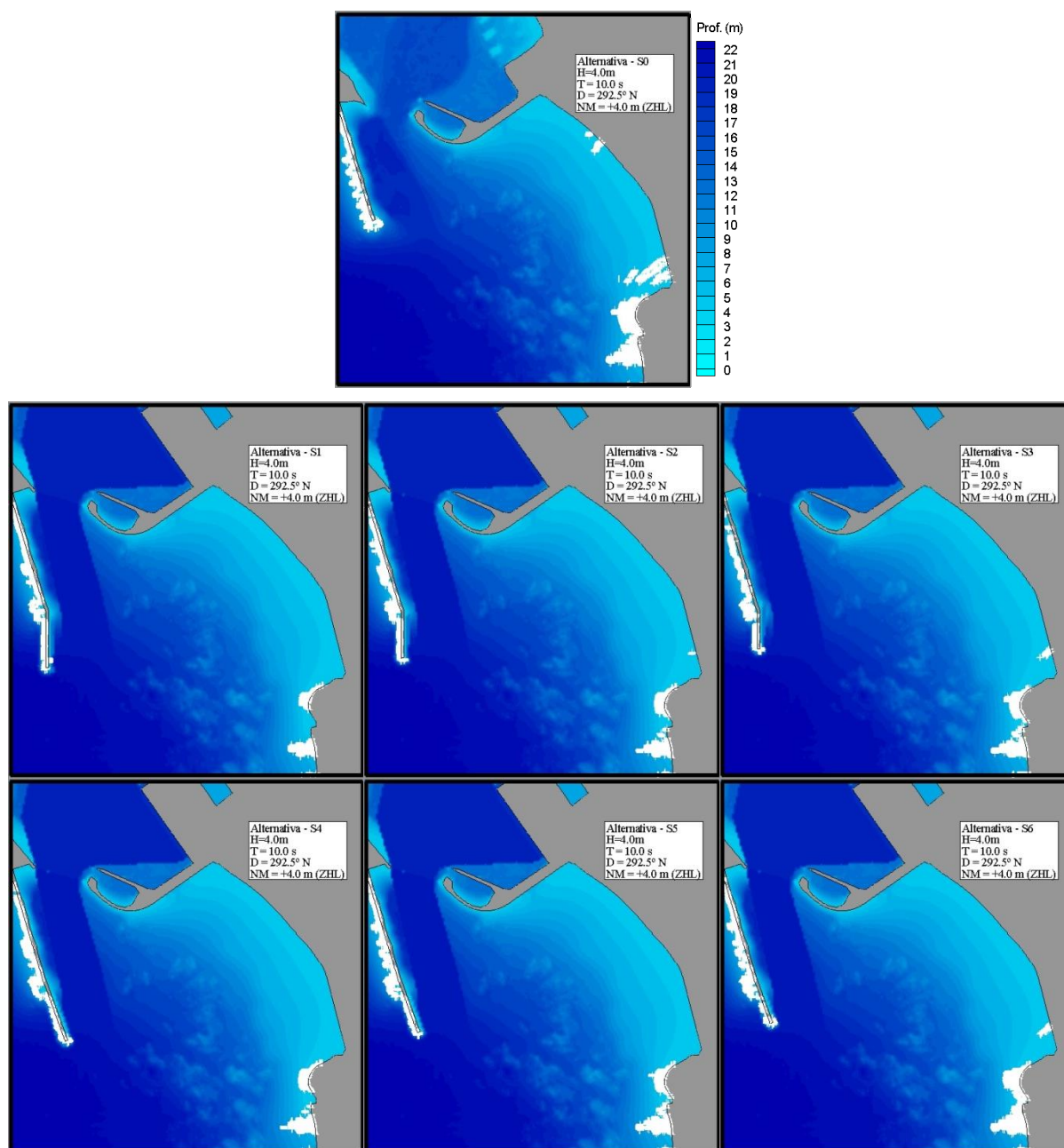


Figura A.23 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=4.0 m, T=10.0 s, D=292.5° N e NM=+4.0 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

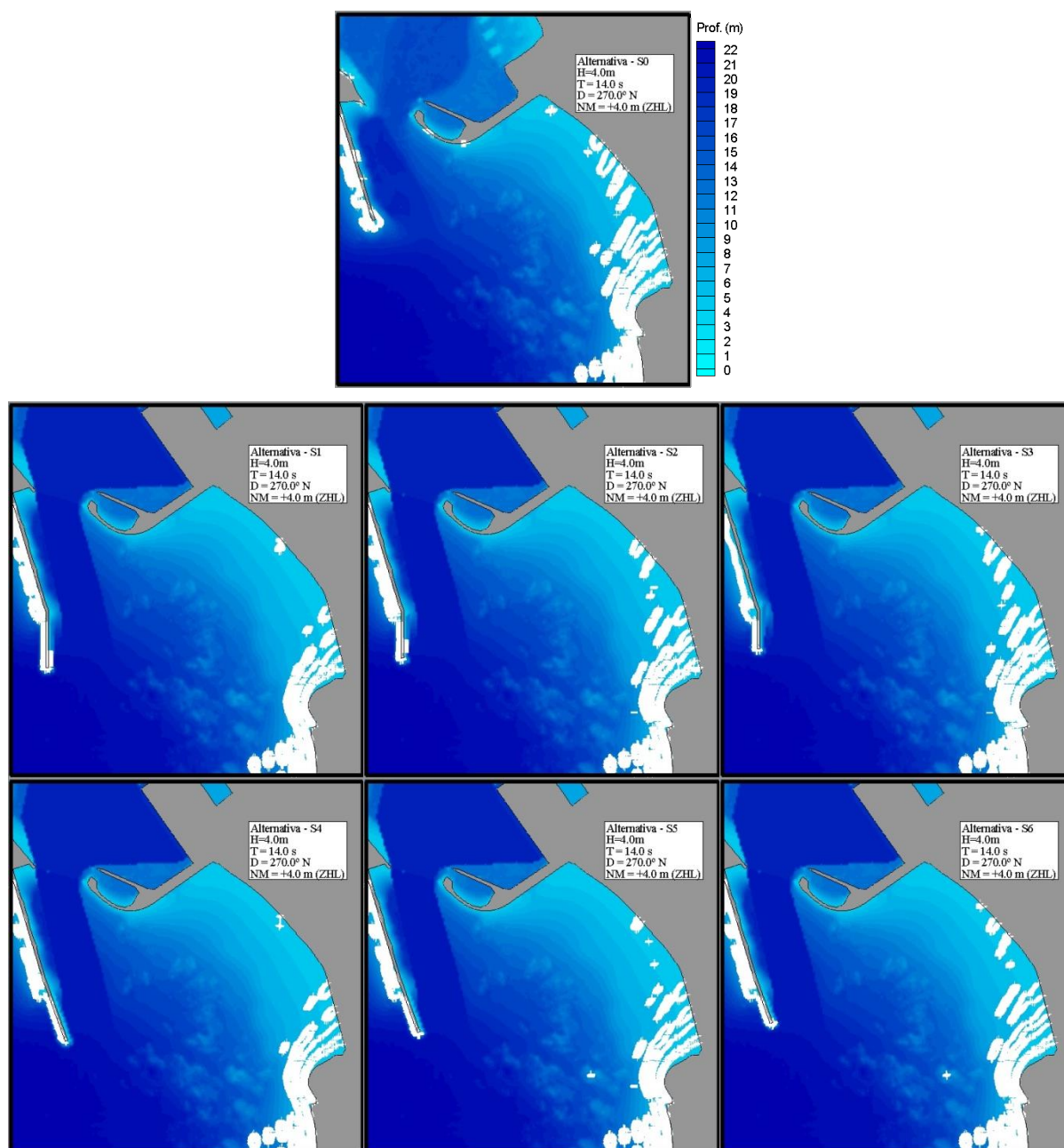


Figura A.24 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=4.0 m, T=14 s, D=270° e NM=+4.0 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

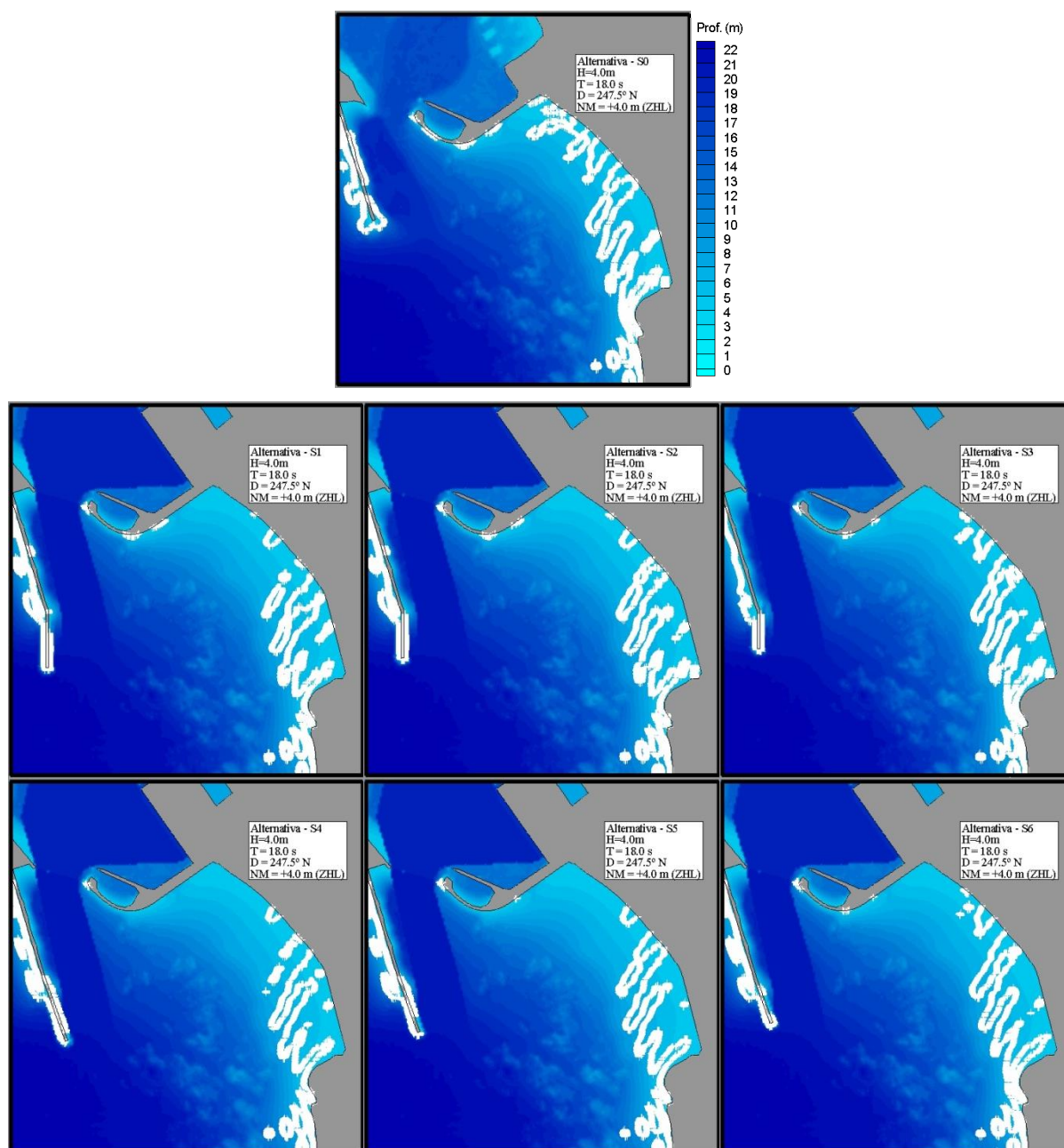


Figura A.25 – Linhas de rebentação (branco) para a condição de agitação: H=4.0 m, T=18.0 s, D=247.5° e NM=+4.0 m (ZHL), para as 7 configurações testadas: S0 a S6

ANEXO IV

Regimes de agitação nos pontos P1, P32, P36, P40, P42, P43, P44 e P45

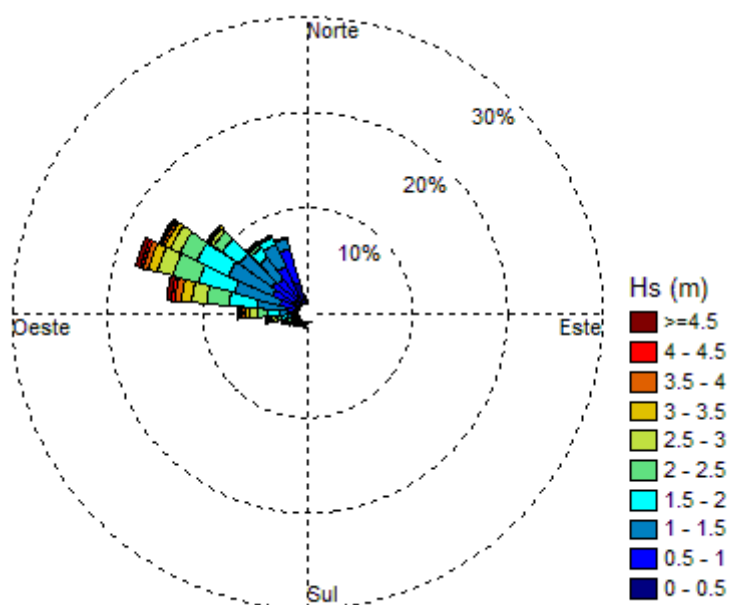


Figura A.26 – Regime geral no ponto P1 transferido a partir dos dados do ECMWF (de 1 Janeiro de 1979 a 31 agosto de 2016). Situação Atual

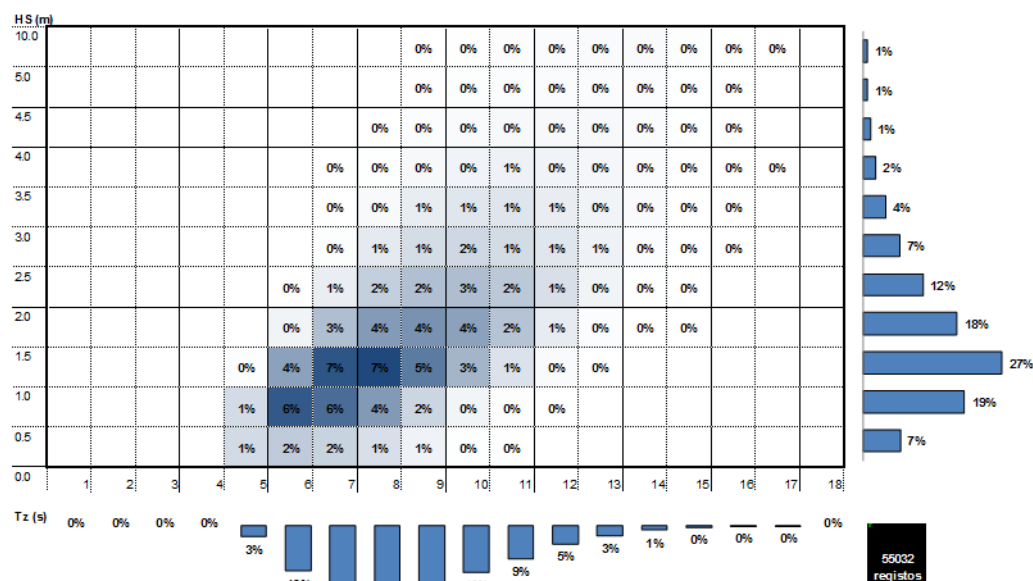


Figura A.27 – P1. Distribuição conjunta de HS-TZ. Situação Atual

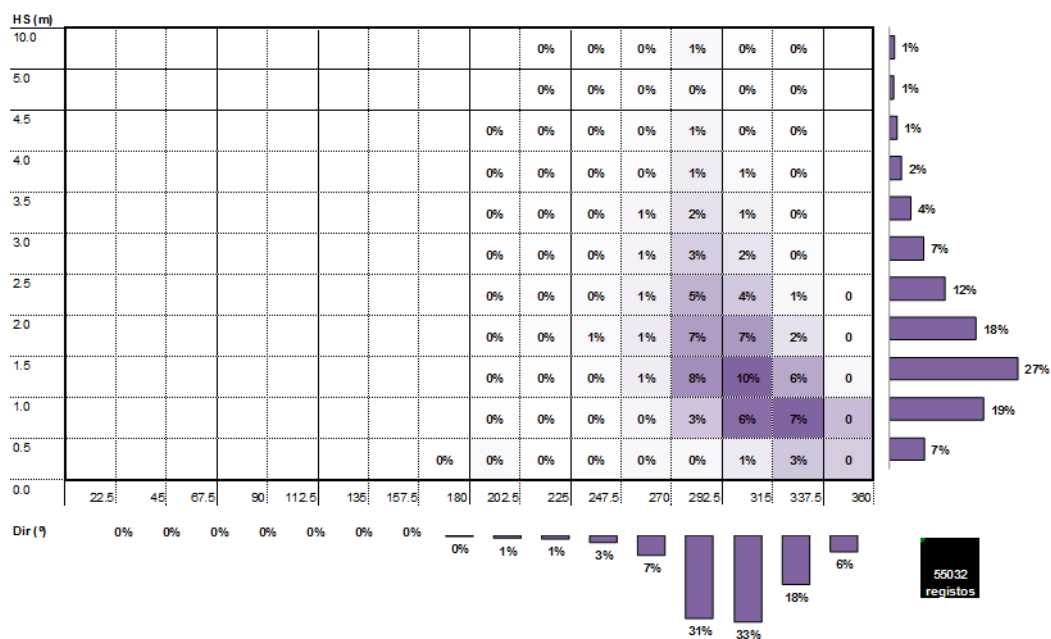


Figura A.28 – P1. Distribuição conjunta de HS-DIR. Situação Atual

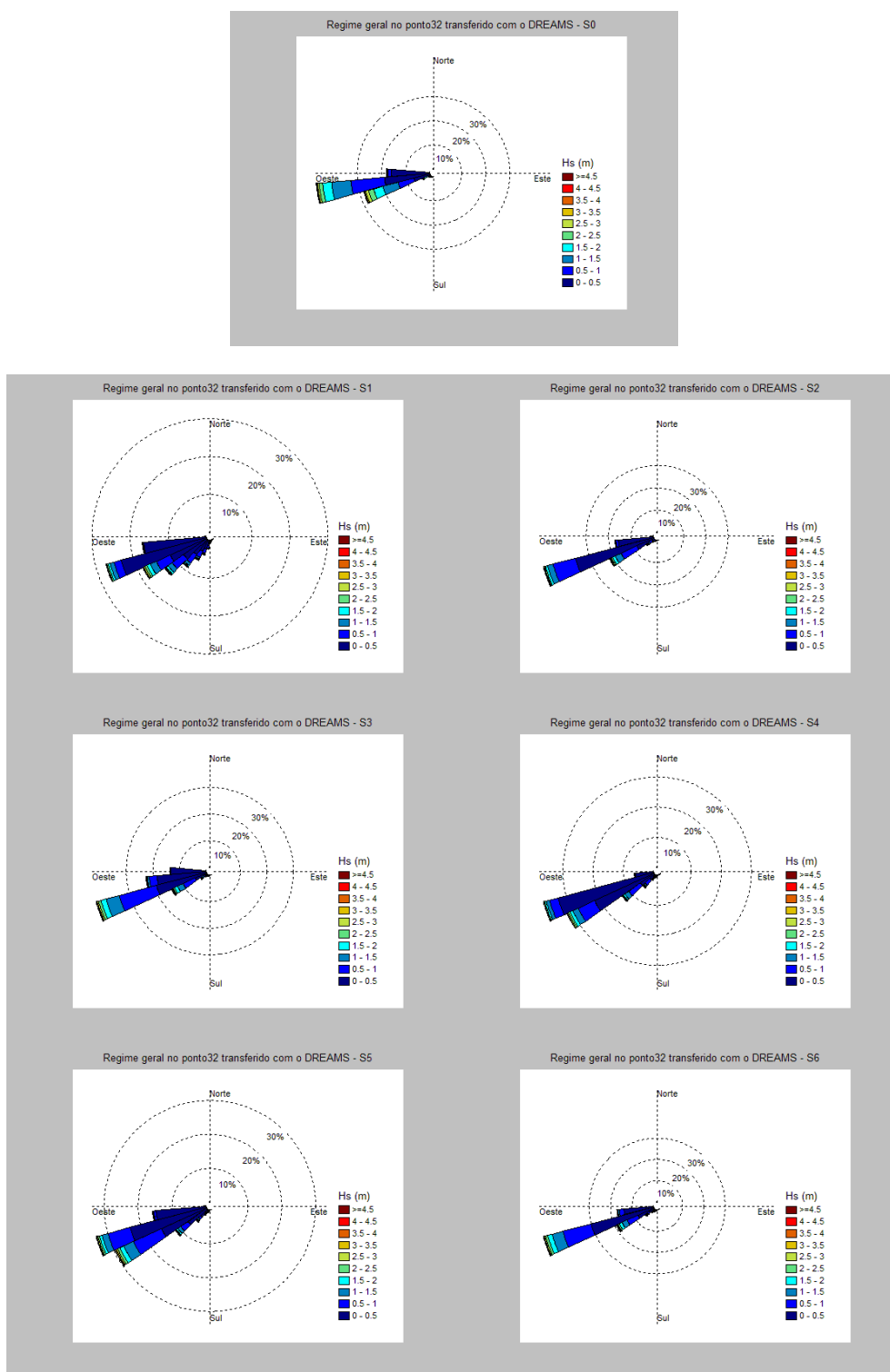


Figura A.29 – Regime geral no ponto P32 transferido a partir dos dados do ECMWF (de 1 Janeiro de 1979 a 31 agosto de 2016). Situação Atual

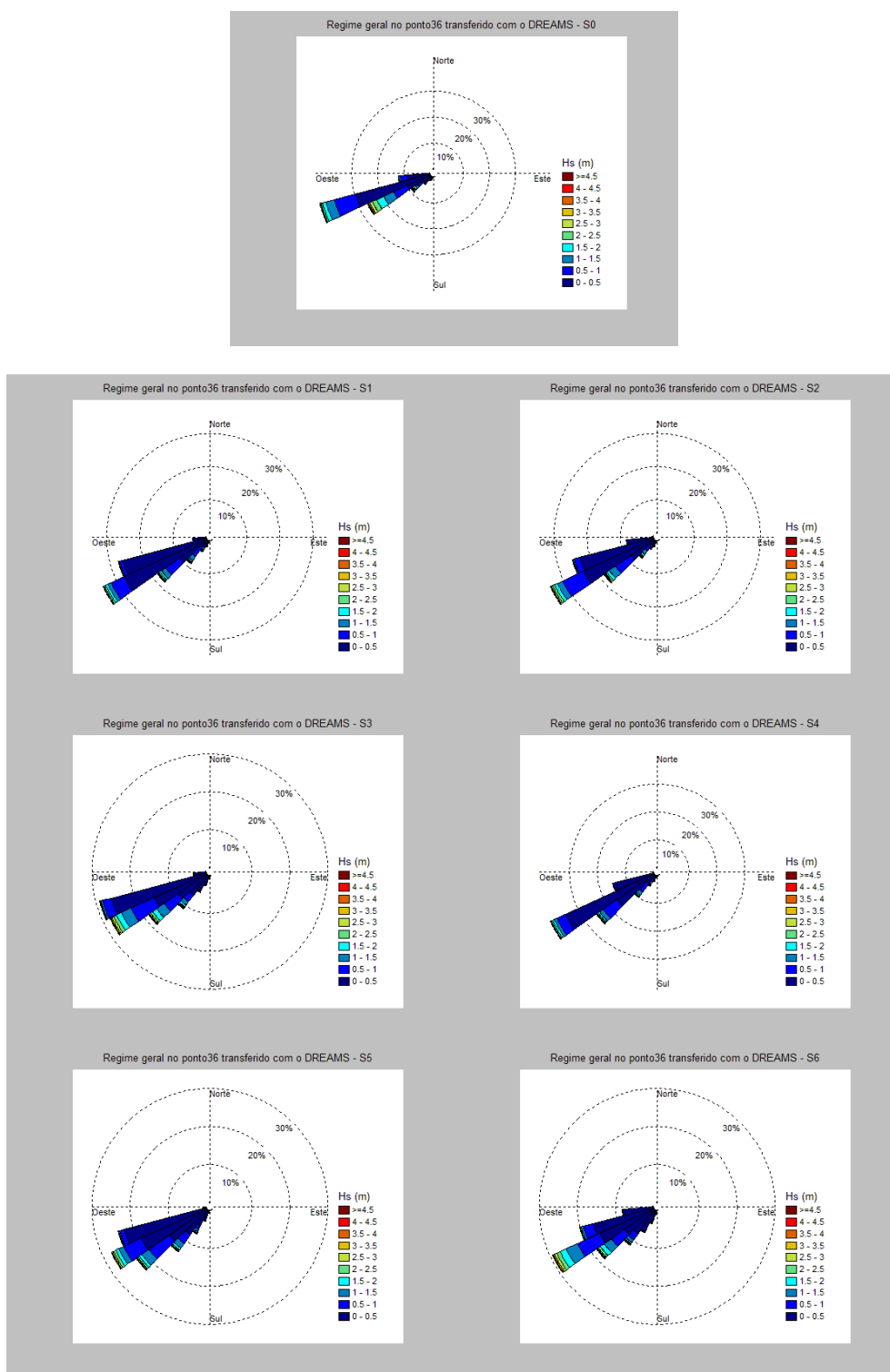


Figura A.30 – Regime geral no ponto P36 transferido a partir dos dados do ECMWF (de 1 Janeiro de 1979 a 31 agosto de 2016). Situação Atual

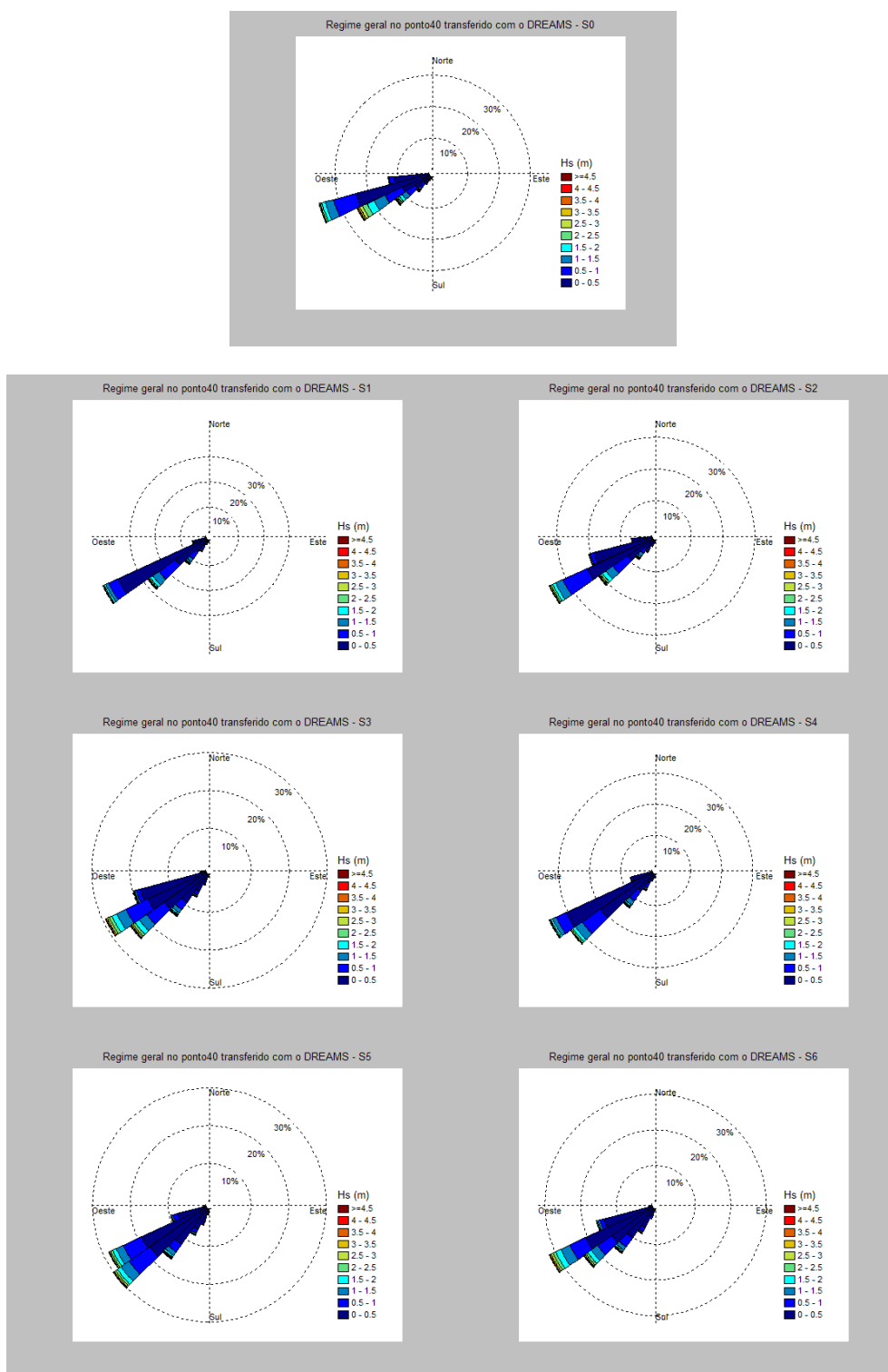


Figura A.31 – Regime geral no ponto P40 transferido a partir dos dados do ECMWF (de 1 Janeiro de 1979 a 31 agosto de 2016). Situação Atual

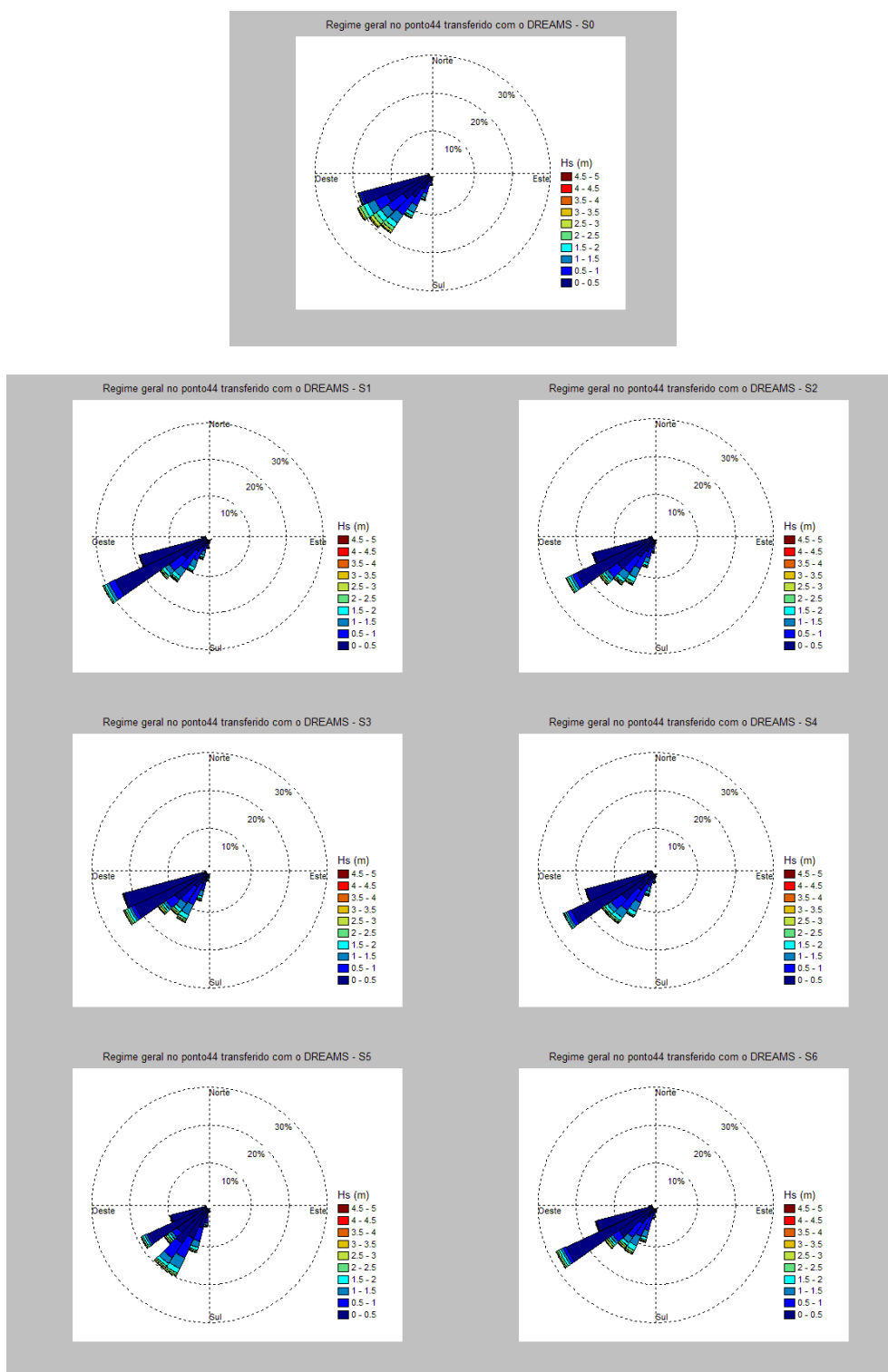


Figura A.32 – Regime geral no ponto P44 transferido a partir dos dados do ECMWF (de 1 Janeiro de 1979 a 31 agosto de 2016). Situação Atual

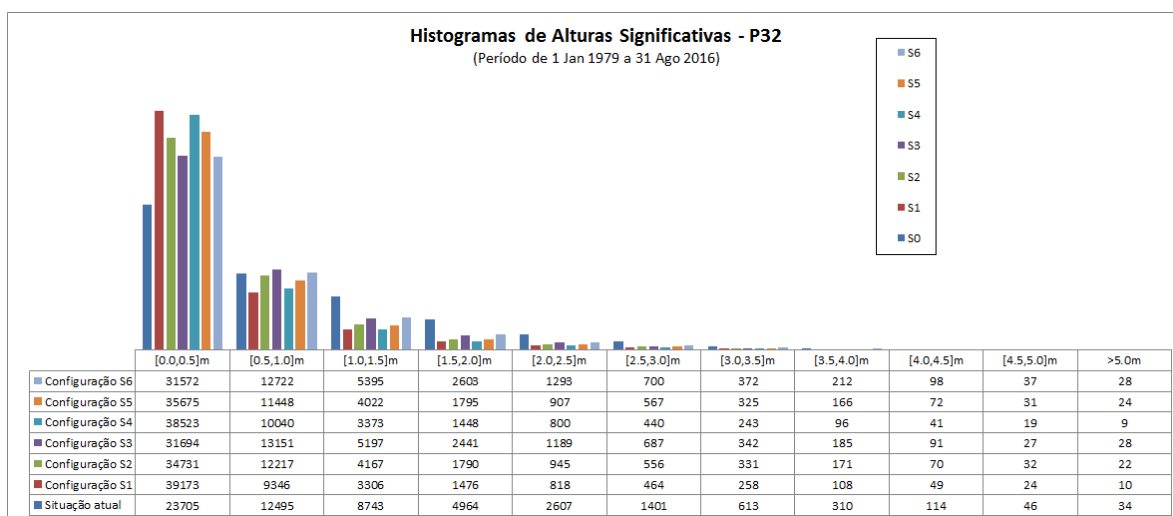


Figura A.33 – P32. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6

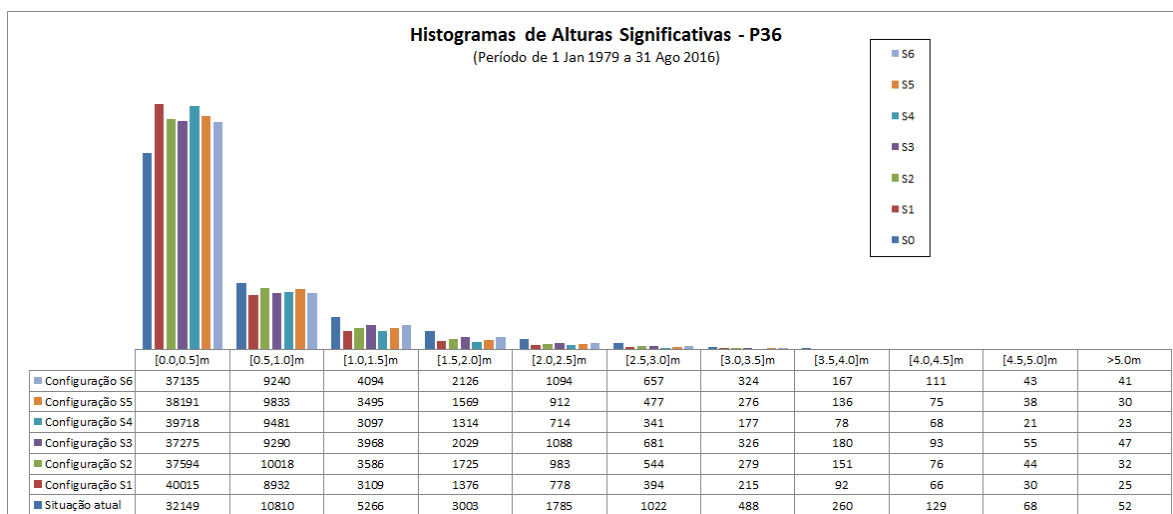


Figura A.34 – P36. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6

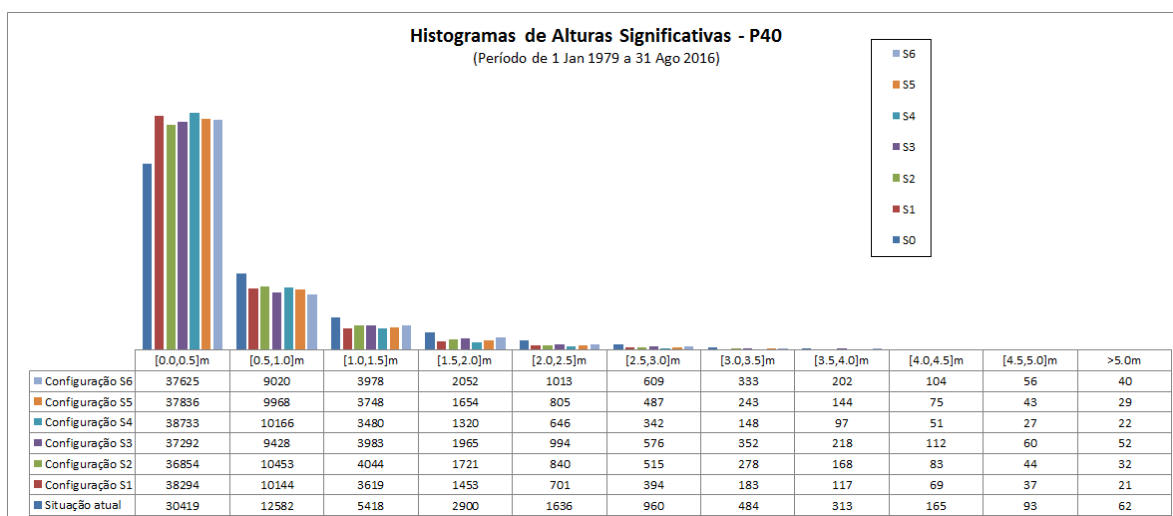


Figura A.35 – P40. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6

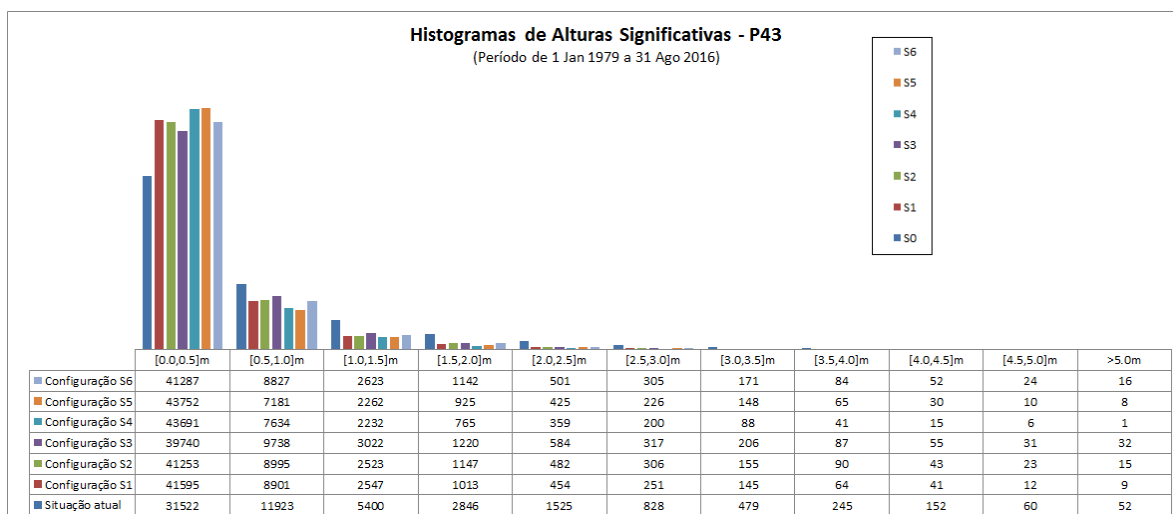


Figura A.36 – P43. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6

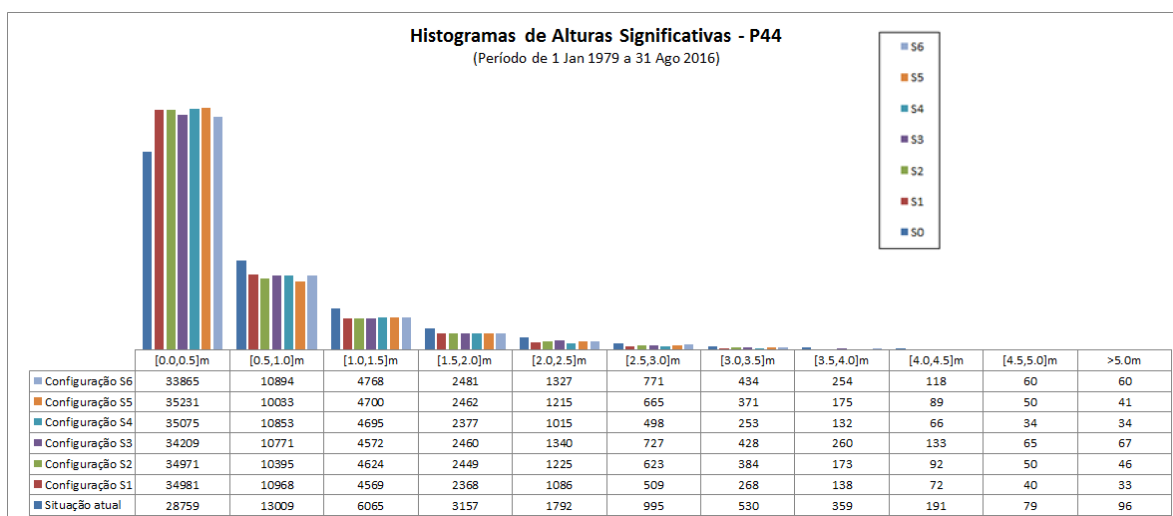


Figura A.37 – P44. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6

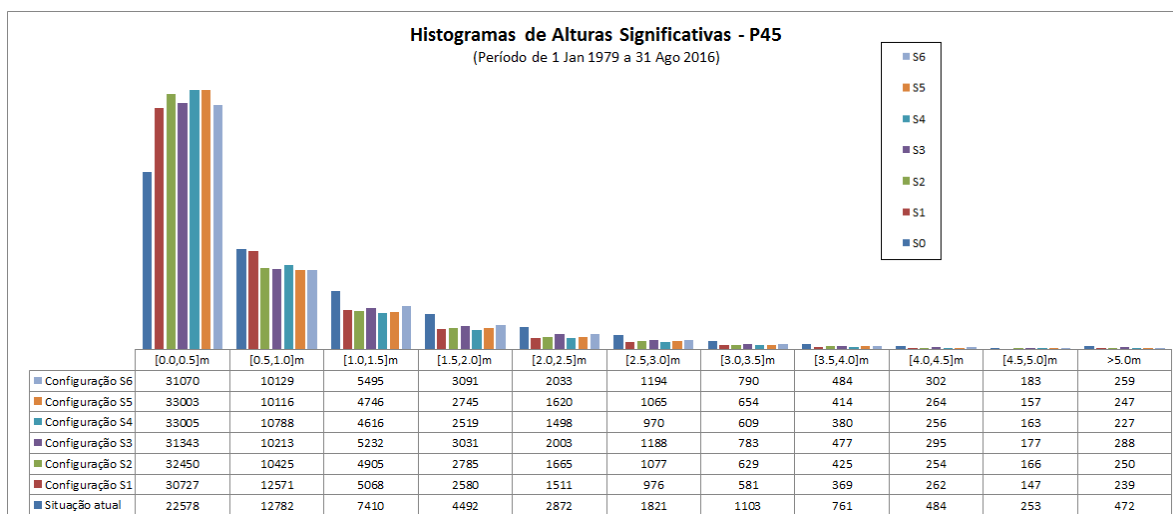


Figura A.38 – P45. Histogramas de alturas significativas. Período de 1 de Janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016. Configurações S0 a S6



Figura A.39 – P30, P31, P32 e P33. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6



Figura A.40 – P34, P35, P36 e P37. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6



Figura A.41 – P38, P39, P40 e P41. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6



Figura A.42 – P42, P43, P44 e P45. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa. Configurações S0 a S6



Figura A.43 – P46, P47, P48 e P49. Configurações S0 a S6. Número médio de dias associados a classes de alturas de onda significativa

ANEXO V

Valores médios e máximos de HS

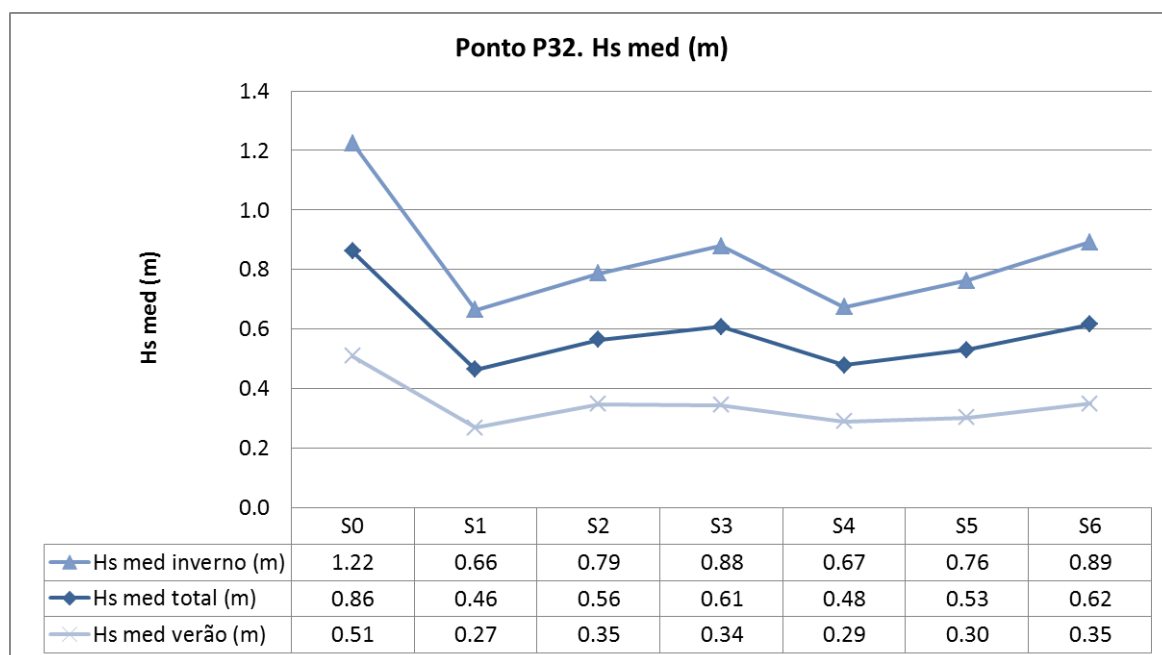


Figura A.44 – P32. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6

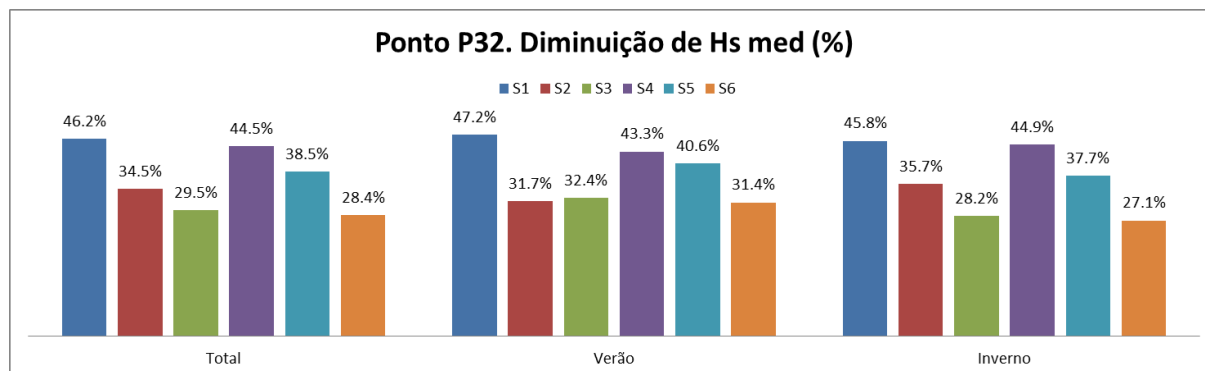


Figura A.45 – P32. Diminuição de H_{smed} . Alternativas S1 a S6

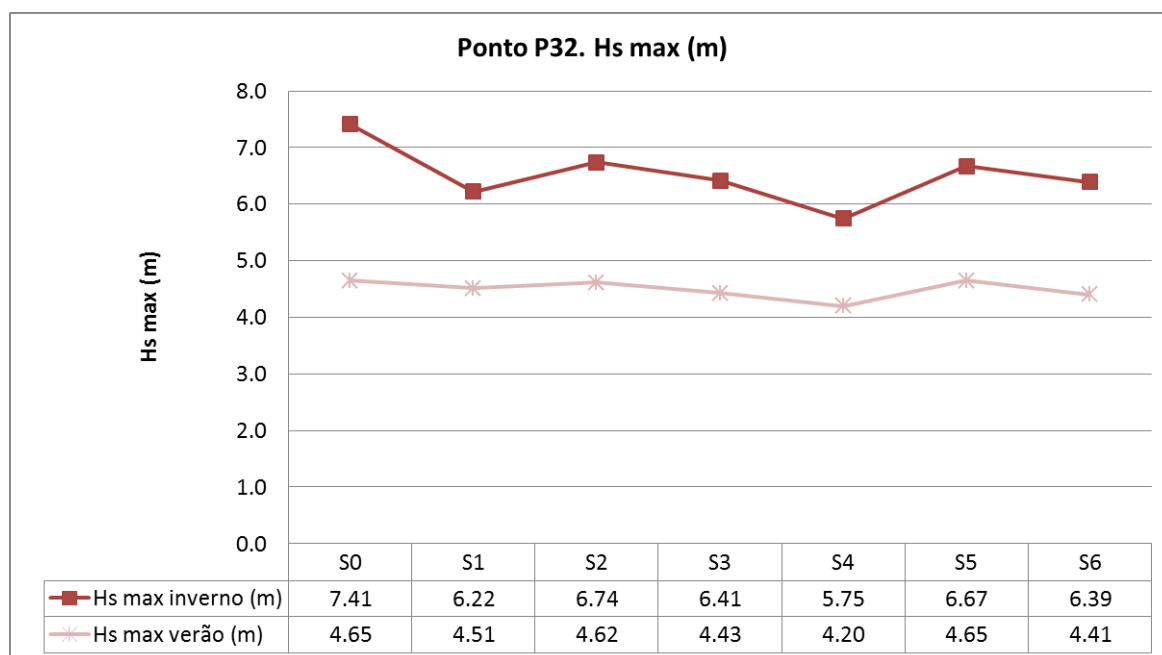


Figura A.46 – P32. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6

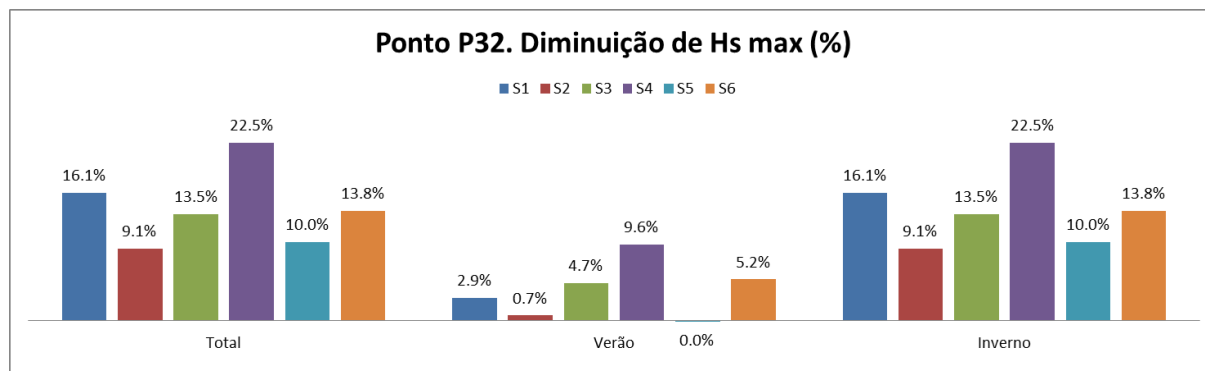


Figura A.47 – P32. Diminuição de Hs_{max}. Alternativas S1 a S6

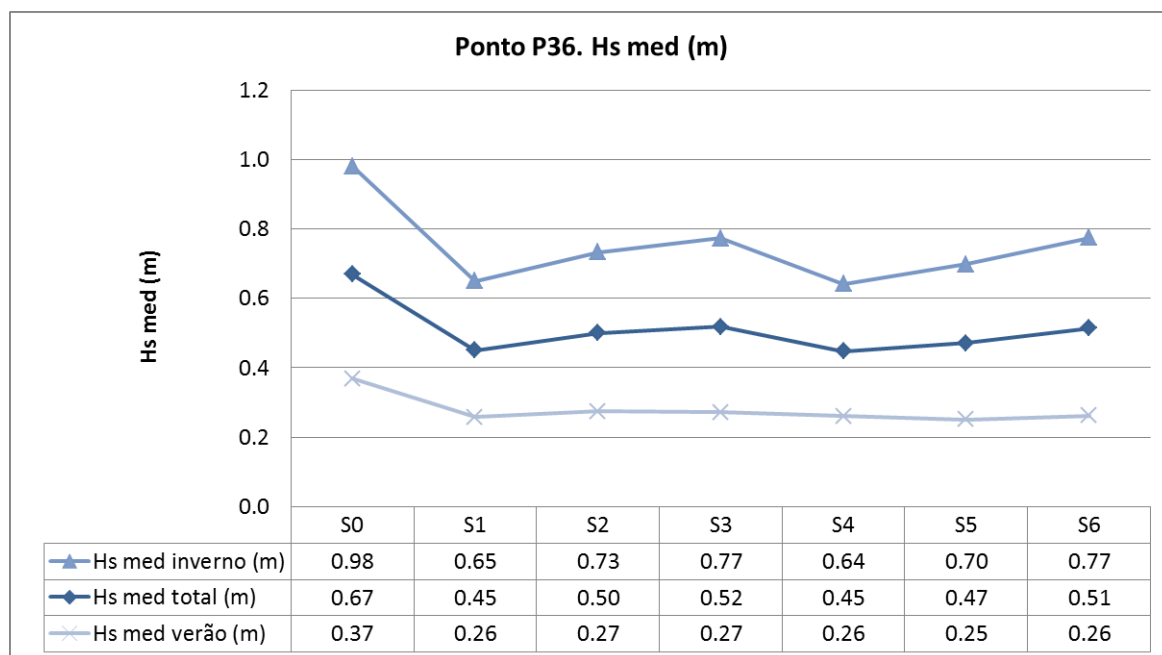


Figura A.48 – P36. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6

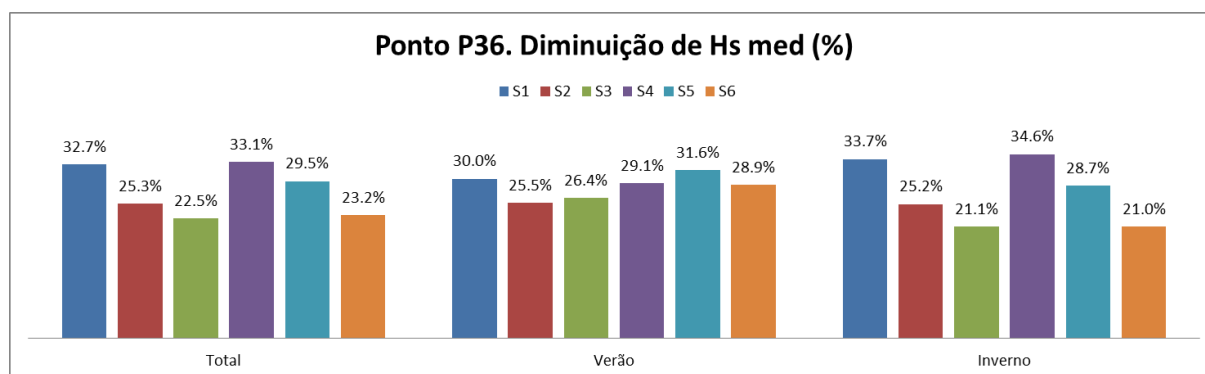


Figura A.49 – P36. Diminuição de H_{smed} . Alternativas S1 a S6

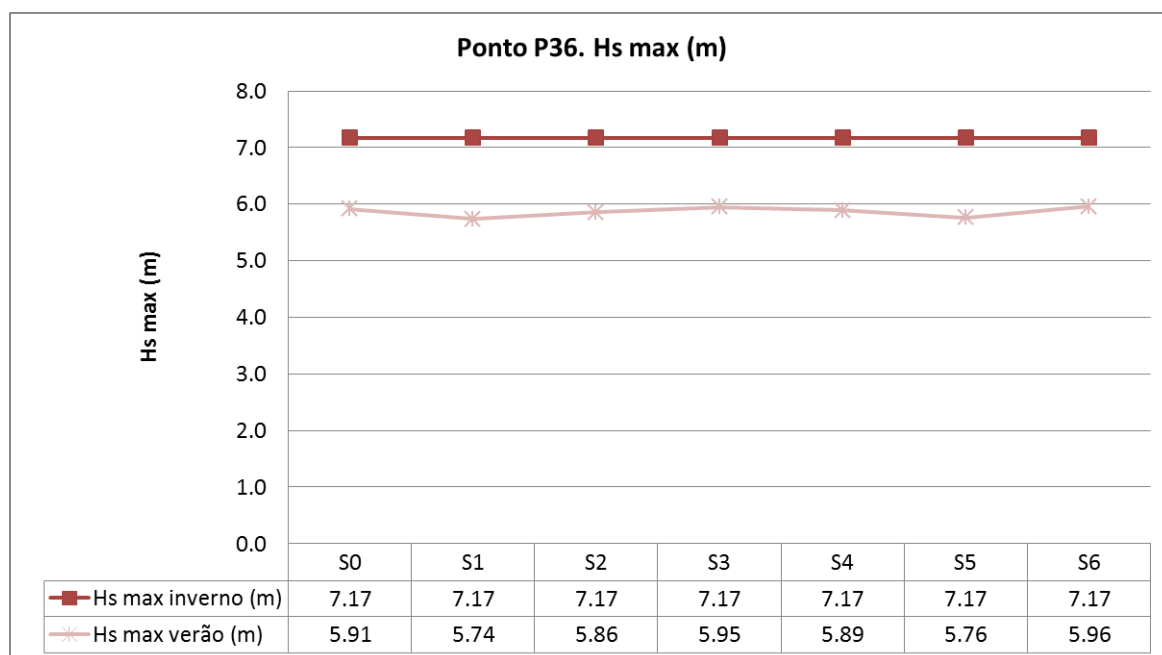


Figura A.50 – P36. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6

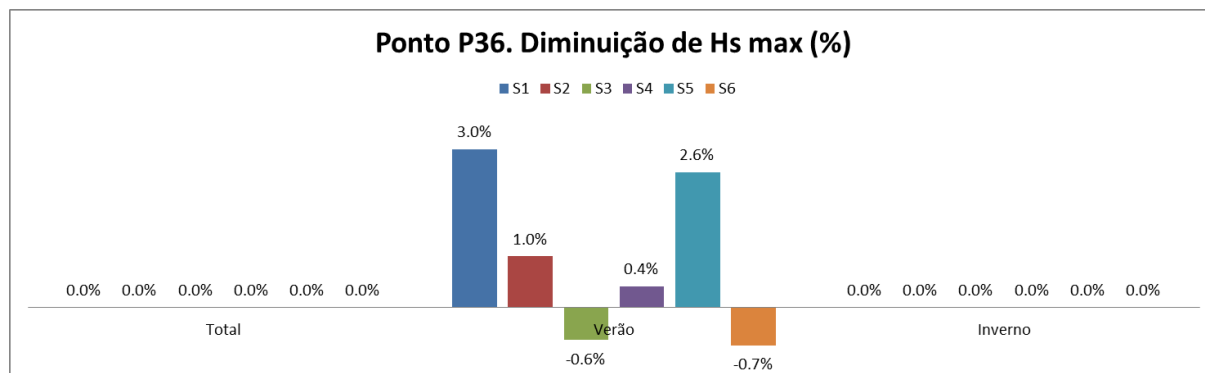


Figura A.51 – P36. Diminuição de $H_{s\max}$. Alternativas S1 a S6

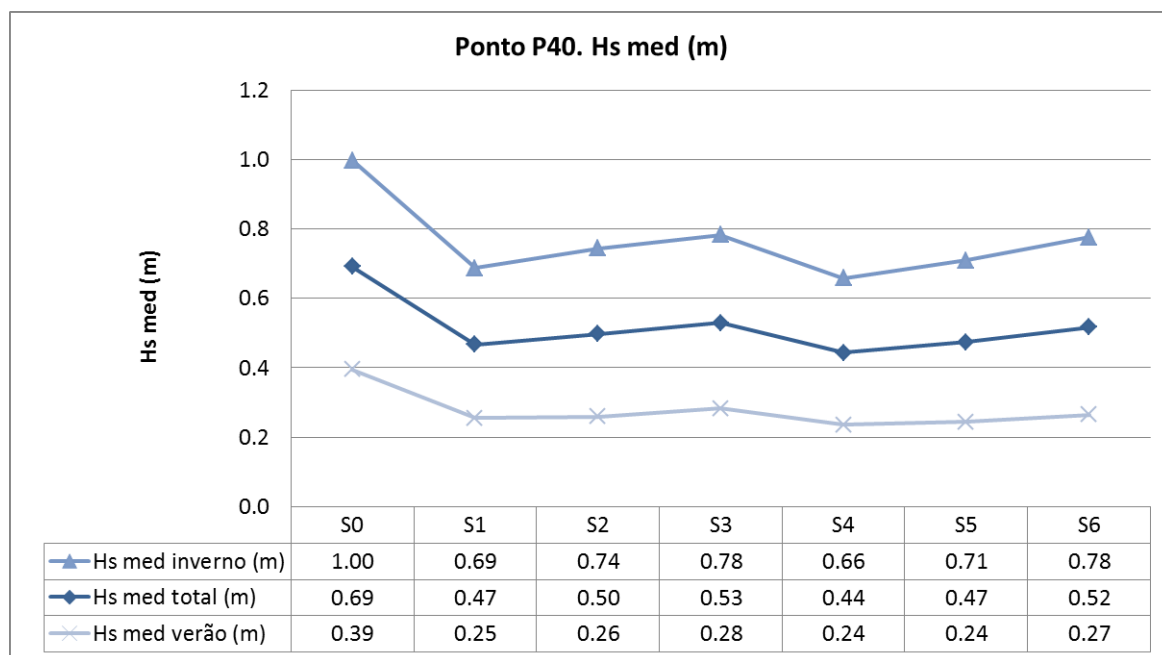


Figura A.52 – P40. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6

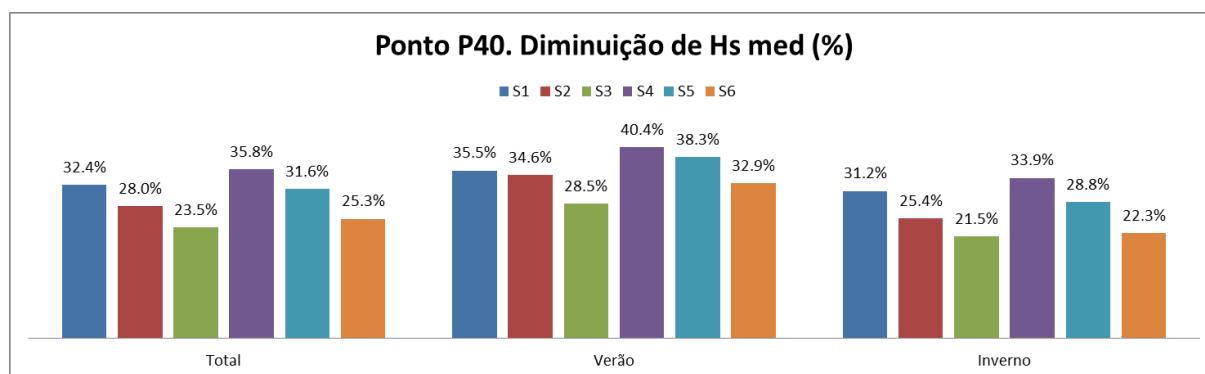


Figura A.53 – P40. Diminuição de $H_{s\text{med}}$. Alternativas S1 a S6

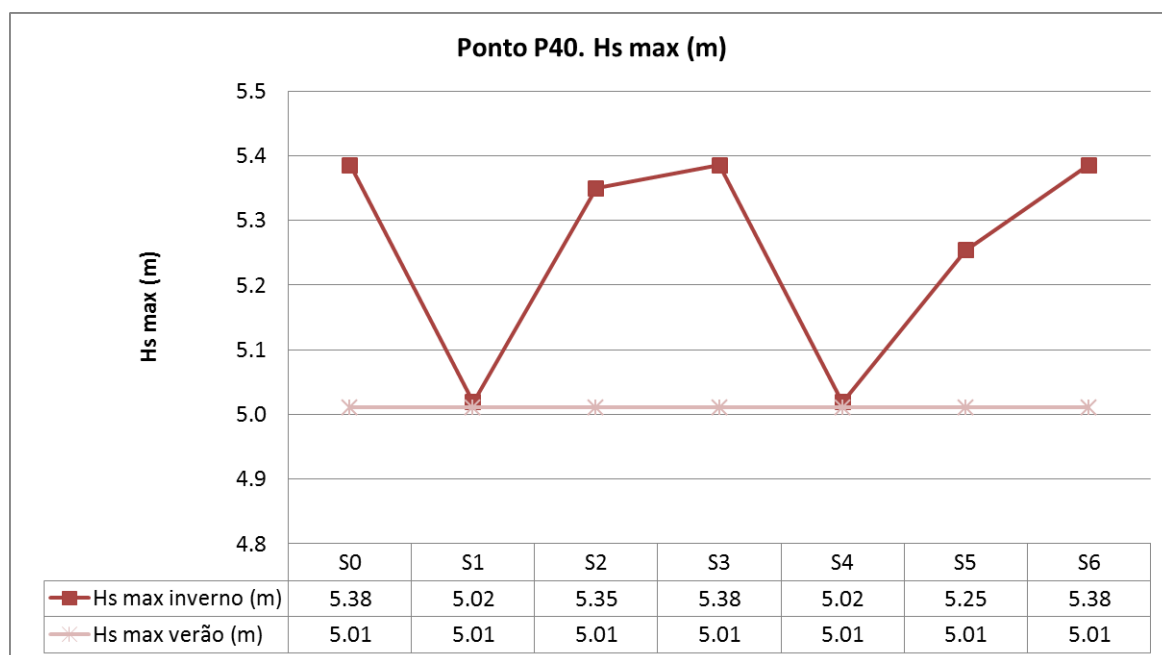


Figura A.54 – P40. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6

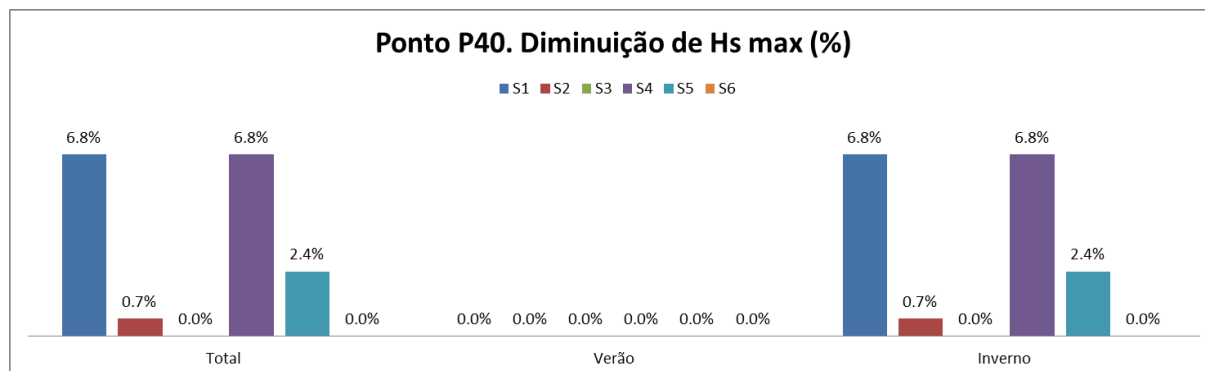


Figura A.55 – P40. Diminuição de $H_{s\max}$. Alternativas S1 a S6

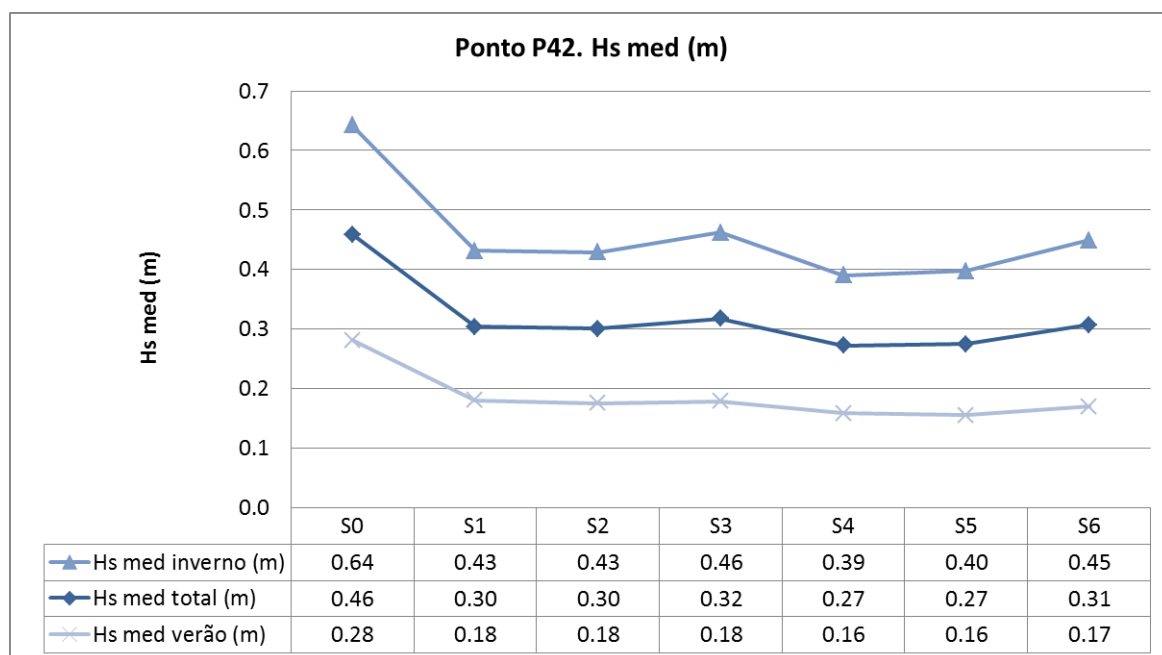


Figura A.56 – P42. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6

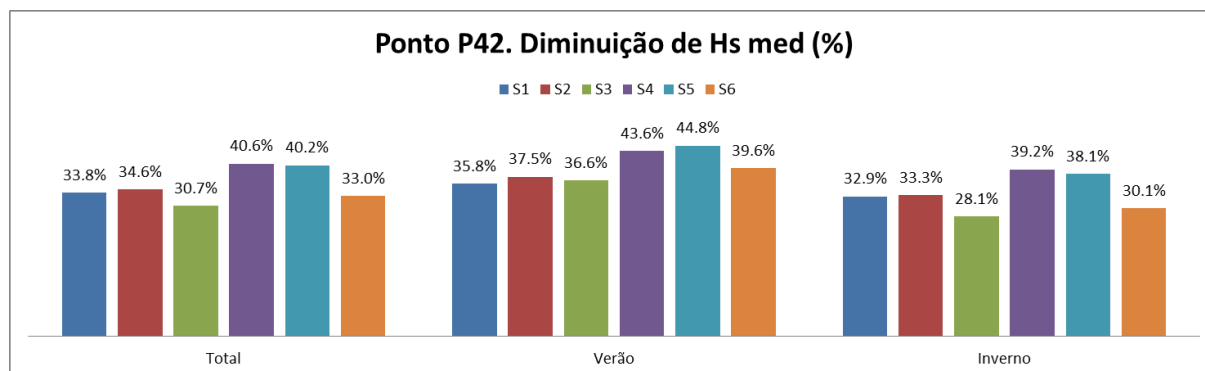


Figura A.57 – P42. Diminuição de Hs_{med}. Alternativas S1 a S6

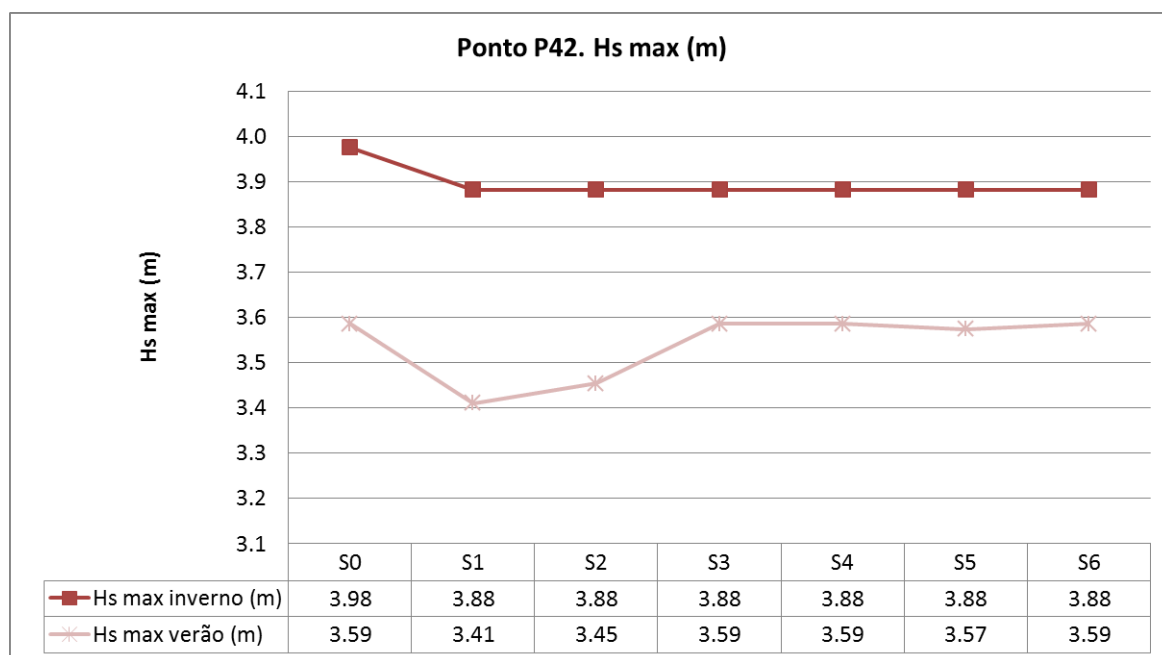


Figura A.58 – P42. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6

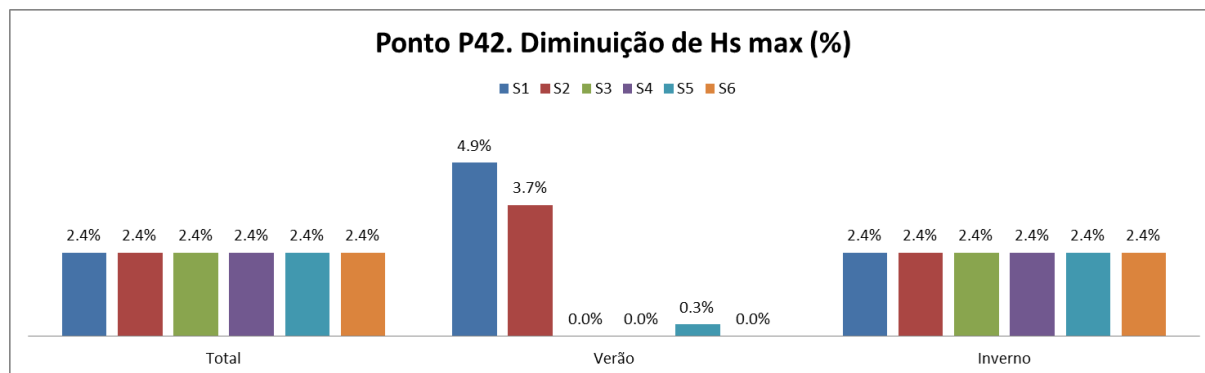


Figura A.59 – P42. Diminuição de Hs_{max}. Alternativas S1 a S6

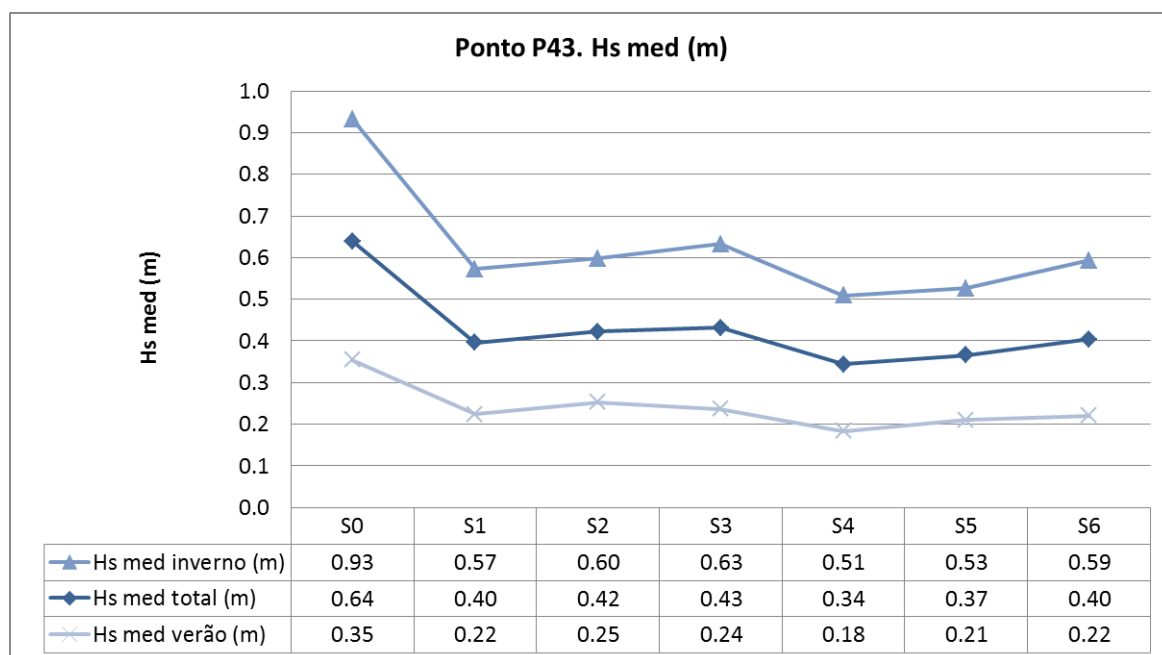


Figura A.60 – P43. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6

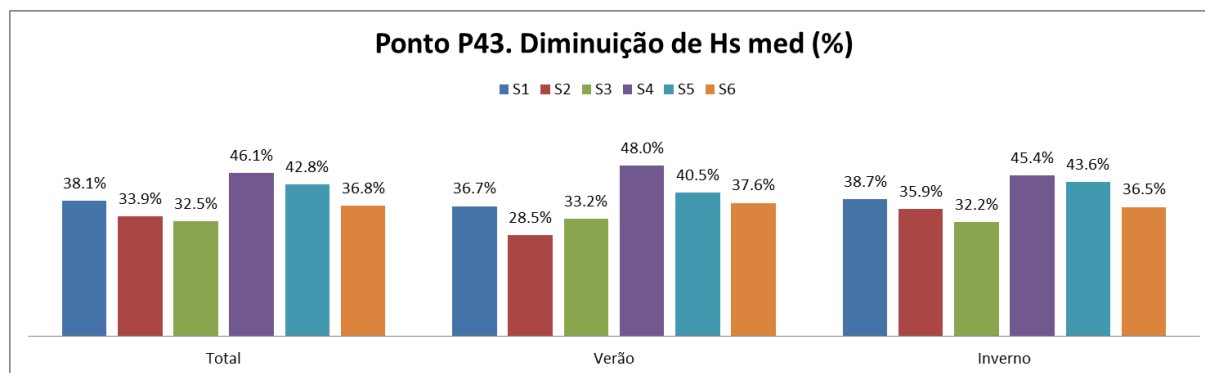


Figura A.61 – P43. Diminuição de H_{smed} . Alternativas S1 a S6

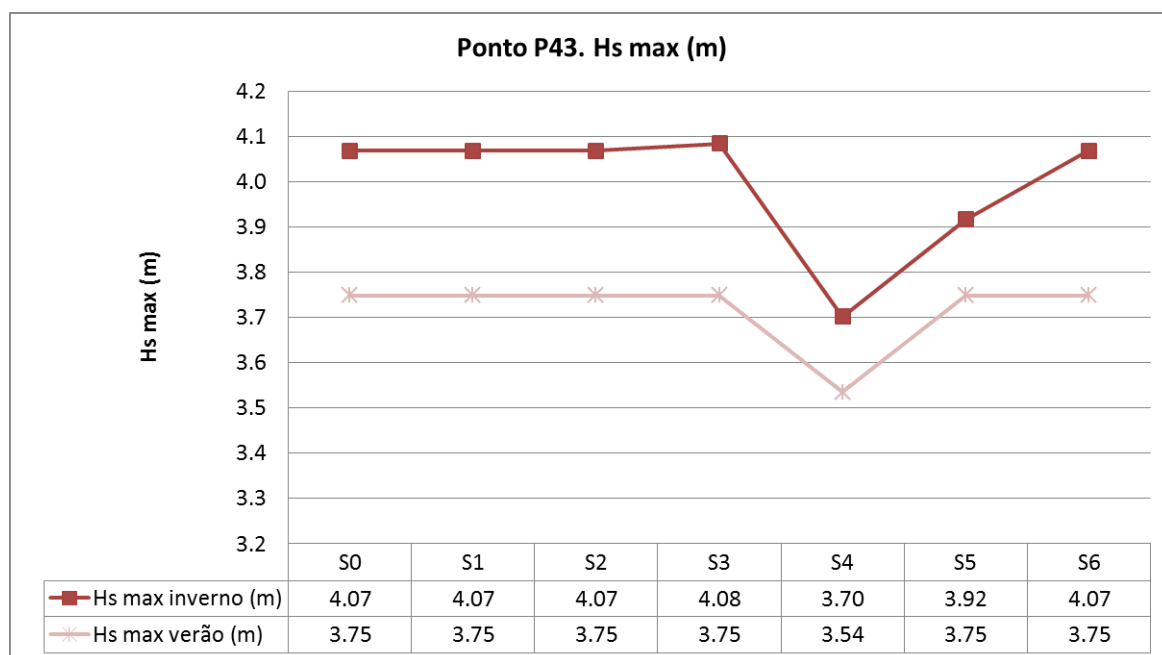


Figura A.62 – P43. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6

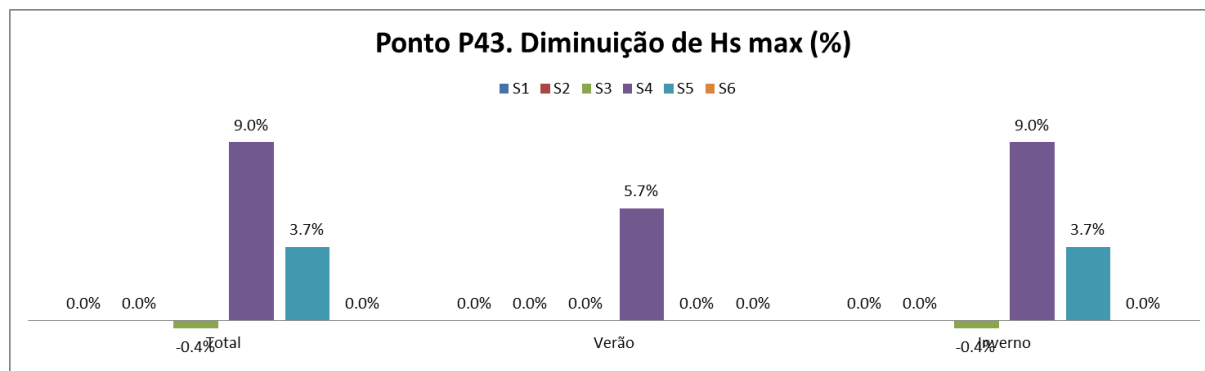


Figura A.63 – P43. Diminuição de Hs_{max}. Alternativas S1 a S6

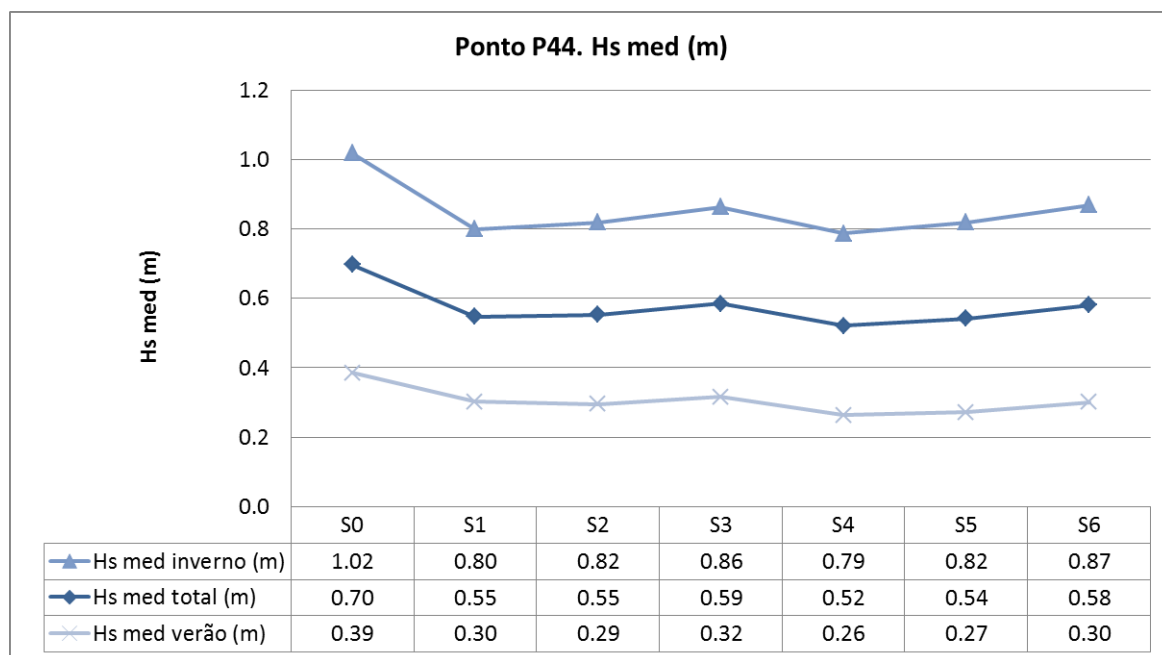


Figura A.64 – P44. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S6

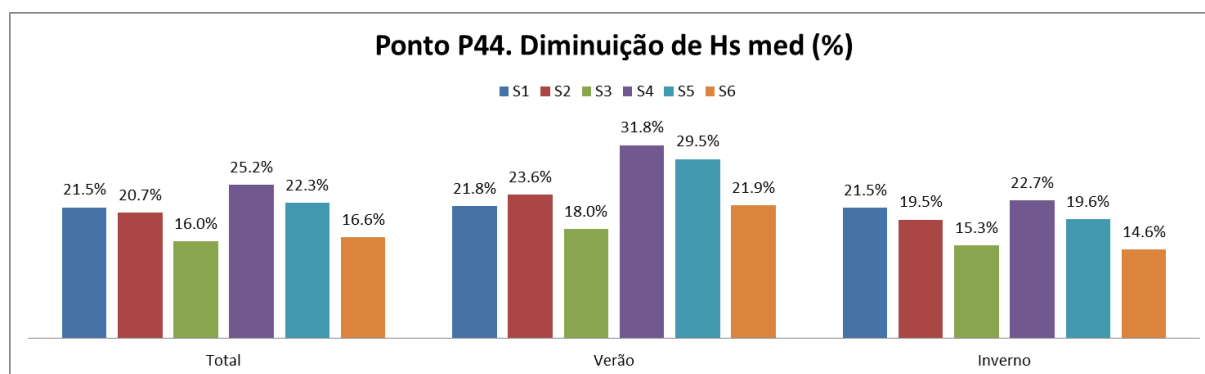


Figura A.65 – P44. Diminuição de Hs_{med}. Alternativas S1 a S6

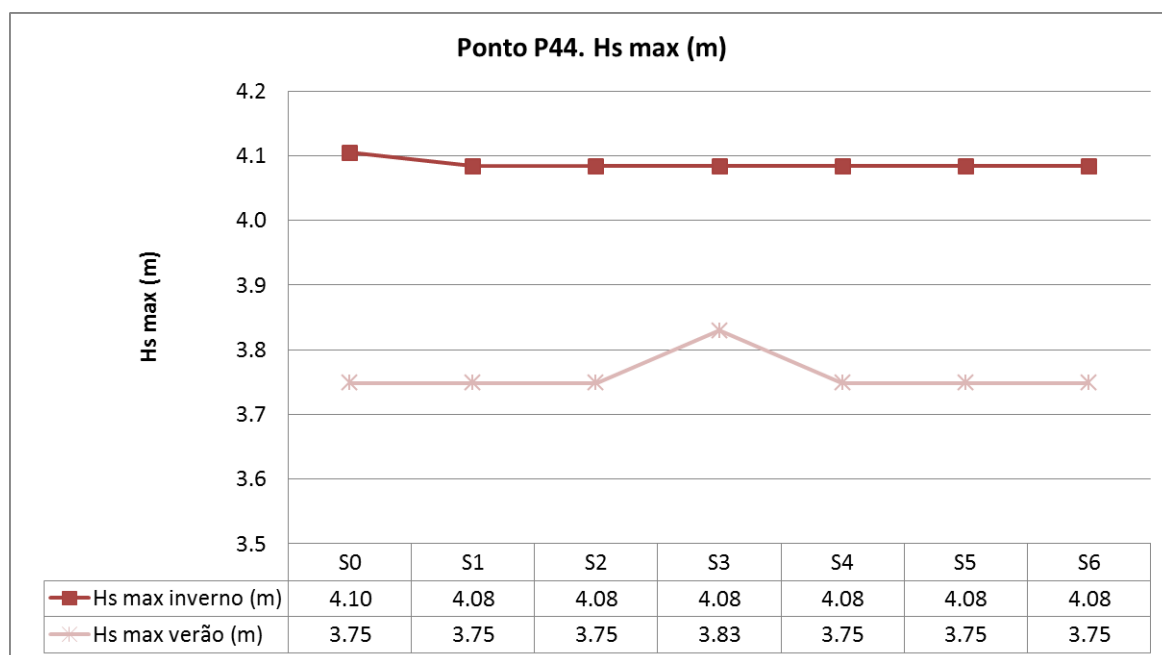


Figura A.66 – P44. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6

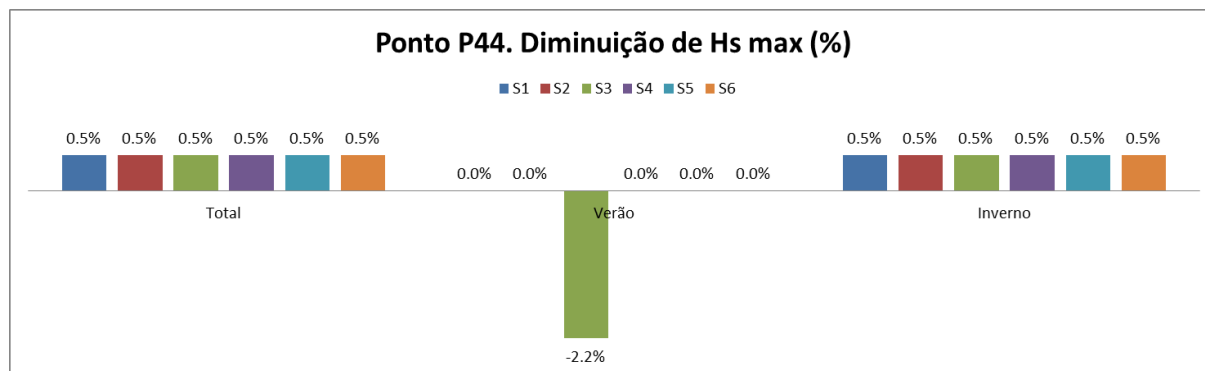


Figura A.67 – P44. Diminuição de $H_{s\max}$. Alternativas S1 a S6

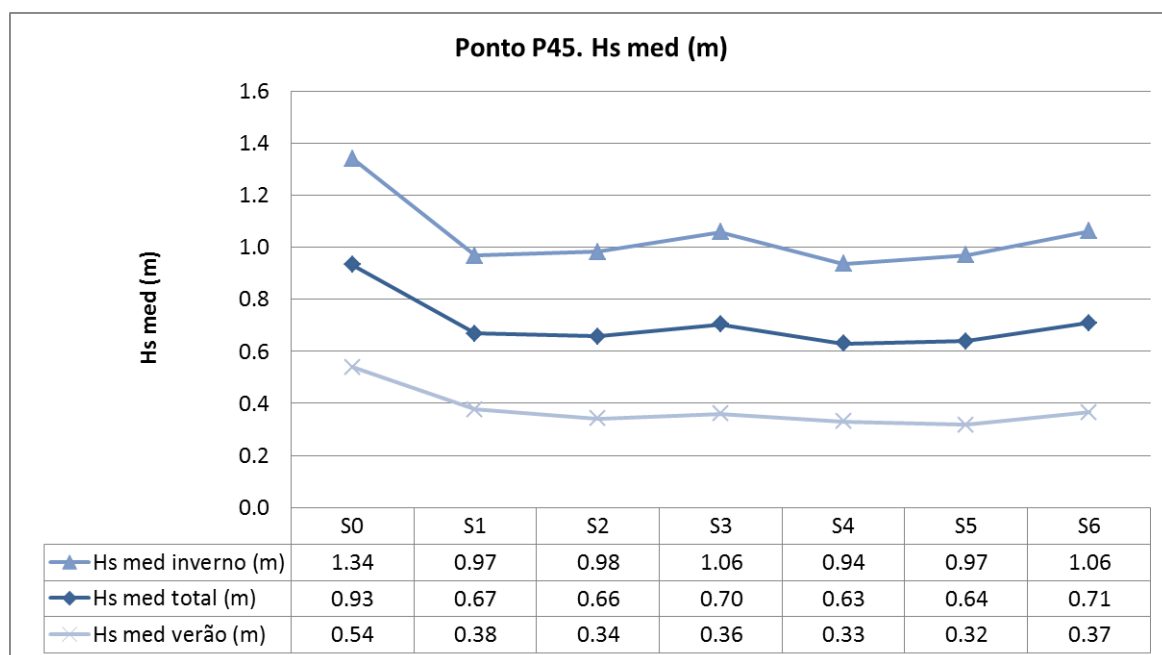


Figura A.68 – P45. Valor médio de HS: Período Total, Inverno e Verão. Configurações S0 a S5

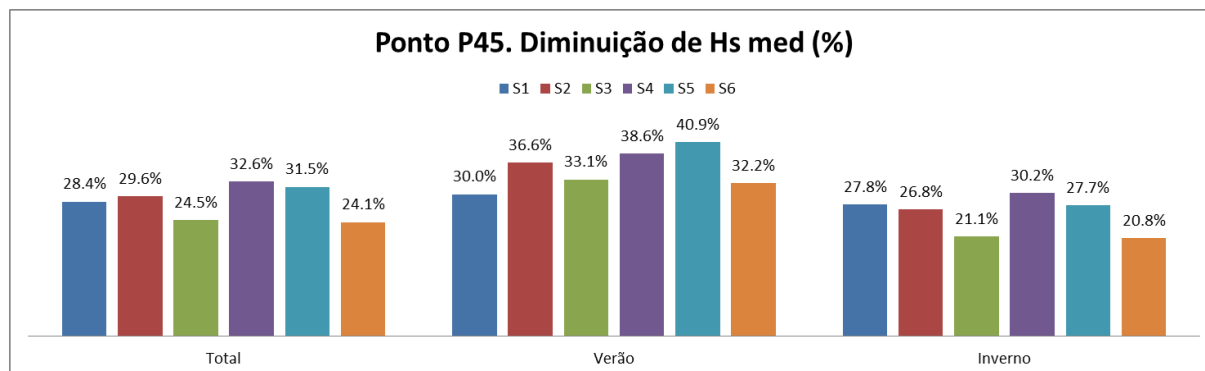


Figura A.69 – P45. Diminuição de H_{smed} . Alternativas S1 a S6

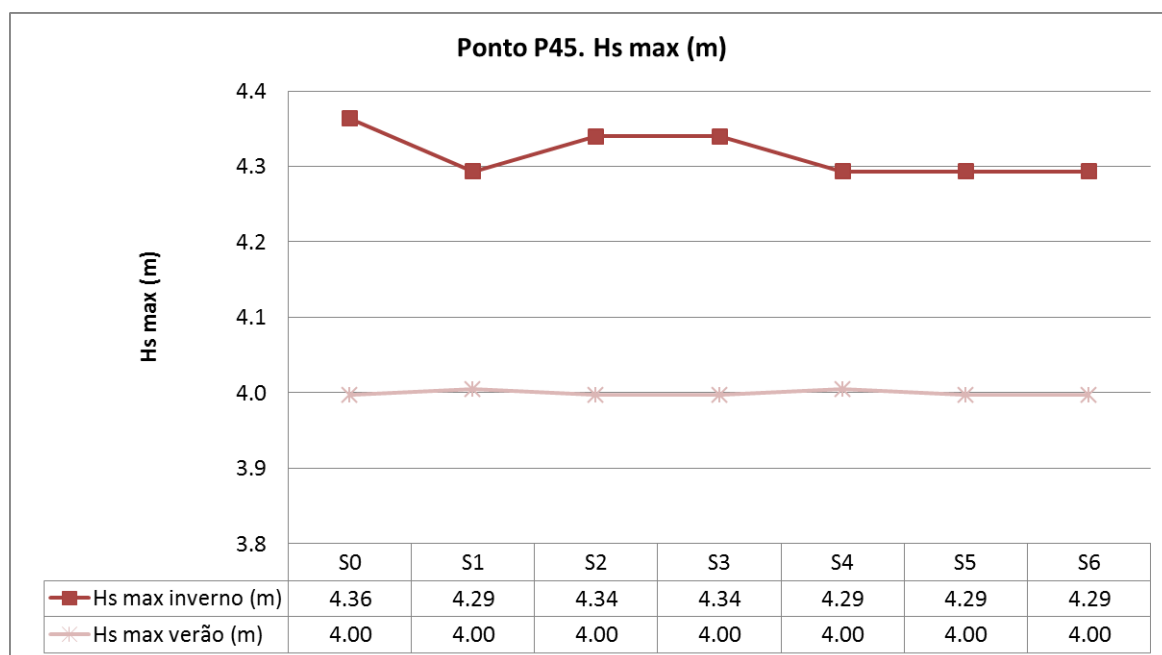


Figura A.70 – P45. Valor máximo de Hs. Configurações S0 a S6

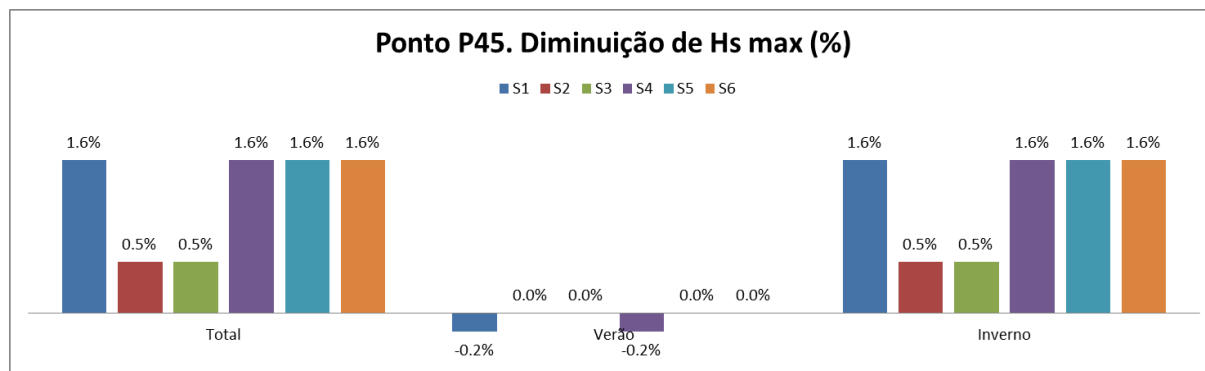


Figura A.71 – P45. Diminuição de $H_{s\max}$. Alternativas S1 a S6

