



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 I – Regimes de agitação marítima

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

Lisboa • abril de 2017

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 227/2017 – **DHA/NPE**

A presente publicação é da exclusiva responsabilidade do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. A União Europeia não se responsabiliza pela eventual utilização das informações nela contidas



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 I – Regimes de agitação marítima

Autoria

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Rui Capitão

Investigador Auxiliar, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Liliana Pinheiro

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

Conceição Juana Fortes

Investigadora Principal, Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Colaboração

Branca Branco

Assistente Técnica, 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 227/2017

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 I - Regimes de agitação marítima

Resumo

Neste relatório faz-se um estudo dos regimes de agitação marítima na zona marítima adjacente ao Porto de Leixões. Mais concretamente, caracterizam-se os regimes de agitação marítima ao largo do Porto de Leixões e na zona do futuro prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões, com base em dados de agitação marítima recolhidos na boia-ondógrafo direcional de Leixões e em dados estimados por modelos de previsão ao largo de Leixões.

Palavras-chave: Regime de agitação marítima / Propagação de ondas / Porto de Leixões

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

Study I - Sea wave regimes

Abstract

In this report a study is made of the sea wave regimes at neighbouring area of Leixões harbour. In fact, the characterization of sea wave regimes is made offshore of Leixões harbour and on the site of the lengthening of the outer breakwater and maritime accessibilities of Leixões harbour. Both wave buoy data and hindcast wave data offshore of Leixões are used for this study.

Keywords: Wave regimes / Wave propagation / Leixões harbour

Índice

1	Introdução	1
1.1	Âmbito e objetivos.....	1
1.2	Organização do relatório.....	2
2	Zona de estudo	4
2.1	Descrição	4
2.2	Dados de base	5
3	Metodologia.....	8
3.1	Introdução	8
3.2	Caraterização dos regimes de agitação marítima ao largo	8
3.3	Transferências dos regimes de agitação marítima do largo para o Porto de Leixões	9
3.4	Caraterização dos regimes de agitação marítima local.....	12
4	Regimes de agitação marítima	13
4.1	Introdução	13
4.2	Regimes de agitação marítima ao largo	13
4.3	Regimes de agitação marítima (transferidos) para P	22
5	Conclusões.....	33
	Referências bibliográficas	36

Índice de figuras

Figura 2.1 – Localização da zona em estudo (Google Earth© 2017)	4
Figura 2.2 – Vista do Porto de Leixões (Google Earth© 2017).....	5
Figura 2.3 – Localizações relativas do ponto da boia de Leixões (ponto L), do ponto de cálculo do modelo de reconstrução WAM (ponto W), ambos ao largo de Leixões, e do ponto local, P - Google Earth© 2017	6
Figura 3.1 – Batimetrias e linha de costa e malhas do SWAN (principal e encaixada)	11
Figura 3.2 – Batimetrias e linha de costa e malhas do SWAN (encaixadas 1 e 2). Localização do ponto P	11
Figura 4.1 – Largo. Excerto da comparação das séries temporais das alturas de onda HS associadas ao inverno marítimo 2004-2005, provenientes dos pontos W e L	14
Figura 4.2 – Largo. Distribuição conjunta de HS –DIR. a) com dados ECMWF, ponto W; b) dados da boia, ponto L	14
Figura 4.3 – Largo. Distribuição conjunta de HS-TZ. Dados do ECMWF (ponto W).....	15
Figura 4.4 – Largo. Distribuição conjunta de HS-TZ. Dados da boia de Leixões (ponto L).....	15
Figura 4.5 – Largo. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados do ECMWF (ponto W)	16
Figura 4.6 – Largo. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados da boia de Leixões (ponto L).....	16
Figura 4.7 – Largo. Regime médio mensal de HS com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L).....	17
Figura 4.8 – Largo. Regime médio mensal de TZ com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L).....	17
Figura 4.9 – Largo. Regime médio mensal de DIR com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L).....	17
Figura 4.10 – Largo. Valores das alturas significativas máximas mensais e respetiva média mensal (média das alturas significativas máximas mensais): a) dados estimados do ECMWF (ponto W); b) dados medidos na boia de Leixões (ponto L).....	18
Figura 4.11 – Largo. Distribuição das alturas significativas máximas mensais para os dados ECMWF (W) e dados da boia de Leixões (L): a) com o período médio, TZ; b) com a direção, DIR.....	18
Figura 4.12 – Largo. Valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo. Dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L).....	19
Figura 4.13 – Ponto P. Excerto da comparação das séries temporais das alturas de onda HS associadas ao inverno marítimo 2004-2005, provenientes dos pontos W e L	23
Figura 4.14 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-DIR. a) com dados ECMWF (W); b) com dados da boia (L)	23
Figura 4.15 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-TZ. Dados do ECMWF (ponto W)	24
Figura 4.16 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-TZ. Dados da boia (ponto L)	24
Figura 4.17 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados do ECMWF (ponto W)	25
Figura 4.18 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados da boia de Leixões (ponto L)	25
Figura 4.19 – Ponto P. Regime médio mensal de HS com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L).....	26
Figura 4.20 – Ponto P. Regime médio mensal de TZ com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L).....	26
Figura 4.21 – Ponto P. Regime médio mensal de DIR com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L).....	26
Figura 4.22 – Ponto P. Valores das alturas significativas máximas mensais e respetiva média mensal (média das alturas significativas máximas mensais): a) a partir dos dados estimados pelo ECMWF (W); b) a partir dos dados da boia de Leixões (L).....	27
Figura 4.23 – Ponto P. Distribuição das alturas significativas máximas mensais para os dados ECMWF (W) e dados da boia de Leixões (L): a) com o período médio, TZ; b) com a direção, DIR.....	27
Figura 4.24 – Ponto P. Valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo. Dados obtidos a partir de estimativas do ECMWF (ponto W) e medições na boia de Leixões (ponto L)	28

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Localização e profundidade dos pontos de análise	6
Quadro 4.1 – Largo (fontes W e L). 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) e em dados medidos na boia de Leixões (2004 a 2013).....	13
Quadro 4.2 – Ponto P (fontes W e L). Estatísticas das séries totais de HS, TP e DIR, com base em dados estimados pelo ECMWF (de 1 de janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016 e com base em dados medidos na boia de Leixões (2004 a 2013).....	22

1 | Introdução

1.1 Âmbito e objetivos

Em 19 de setembro de 2016, a Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL) solicitou ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) uma proposta de estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões.

Este pedido de proposta surgiu na sequência da necessidade sentida pela APDL de 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 de até 300 m de comprimento, 40.2 m de boca e 14.0 m de calado. Além disso, é também pretensão da APDL a dragagem do canal de acesso, com fundos a -16.85 m (ZHL*).

A apresentação desta proposta do LNEC foi efetuada em 3 de outubro de 2016. A adjudicação da proposta ao LNEC ocorreu em 24 de outubro de 2016.

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 presentes estudos do LNEC têm como objetivo servir de base ao desenvolvimento do Projeto de Execução do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas 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, nomeadamente:
 - *Ensaios em modelo físico 2D de estabilidade e galgamento de várias 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.*

* ZHL – Zero Hidrográfico de Leixões, isto é, 1.674 m abaixo do Nivelamento Geral do País. As cotas são positivas acima deste nível de referência.

- Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas 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 e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões na dinâmica sedimentar na vizinhança do porto, que inclui a realização de estudos em modelo numérico.

O presente relatório insere-se nos *Estudos de agitação - Propagação de ondas curtas para o interior do porto, com modelo numérico*, do Estudo I, que descrevem as análises efetuadas em modelo numérico para a caracterização dos regimes de agitação marítima na zona adjacente ao Porto de Leixões. Em especial, neste relatório, caracterizam-se os regimes de agitação marítima ao largo do Porto de Leixões e na zona do futuro prolongamento do quebra-mar exterior deste porto.

A definição do regime de agitação marítima ao largo do Porto de Leixões baseia-se em dados obtidos na boia ao largo de Leixões, ao longo de um período de cerca de 10 anos (2004-2013). Estes dados, fornecidos pela APDL, incluem os seguintes parâmetros de onda: HS (altura de onda significativa), TZ (período de onda média) e DIR (direção de onda média), que são considerados valores ao largo da zona em estudo.

O regime de agitação marítima baseia-se, por outro lado, face à exiguidade de dados acima, em estimativas obtidas pelo modelo de *hindcast* WAM (WAMDI Group, 1988) do Centro Europeu de Previsão Meteorológica a Médio Prazo (ECMWF), num ponto distinto, também ao largo, ao longo de um período de aproximadamente 38 anos (1979-2016). Estas estimativas incluem os seguintes parâmetros de onda: HS (altura de onda significativa), Tm (período de onda média, equivalente a TZ, usado neste relatório[†]) e DIR (direção de onda média), igualmente considerados valores ao largo da zona em estudo. Estas estimativas foram fornecidas pelo LNEC.

O modelo espectral SWAN (Booij *et al.*, 1999 e Booij *et al.*, 2006) é usado para transferir o regime ao largo para a zona marítima adjacente ao Porto de Leixões, i.e., para um ponto próximo da zona do futuro prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, à cota batimétrica de -20 m (ZHL). Após essa transferência, calculam-se os regimes de agitação marítima nesse ponto, para os dois conjuntos de dados de agitação marítima. Estes regimes serão posteriormente utilizados nos estudos de agitação e de modelo físico do Estudo I, bem como nos Estudos II e III.

1.2 Organização do relatório

O presente relatório apresenta os principais resultados deste estudo de regimes e encontra-se estruturado em 5 capítulos, dos quais neste primeiro se faz uma apresentação do âmbito, objetivo e breve enquadramento do estudo. O capítulo 2 introduz e descreve o local de estudo. O Capítulo 3 apresenta a metodologia usada na determinação dos regimes de agitação marítima, isto é, o modo como são transferidos os dados do largo para a costa. O capítulo 4 descreve a determinação dos

[†] Doravante, utiliza-se somente o parâmetro TZ, como equivalente de Tm.

regimes de agitação marítima ao largo e a determinação dos correspondentes regimes de agitação marítima num ponto junto ao Porto de Leixões. No capítulo 5 faz-se a análise dos resultados e apresentam-se as principais conclusões e recomendações deste estudo.

Ao longo do relatório consideram-se as seguintes convenções e referenciais:

- todas as cotas são referidas ao Zero Hidrográfico de Leixões (ZHL, 1.674 m abaixo do Nivelamento Geral do País), e consideram-se positivas para cima;
- todas as profundidades são também referidas ao ZHL e consideram-se positivas para baixo.

2 | Zona de estudo

2.1 Descrição

A zona de estudo, designada por Porto de Leixões, fica situada a cerca de 2.5 milhas náuticas 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.

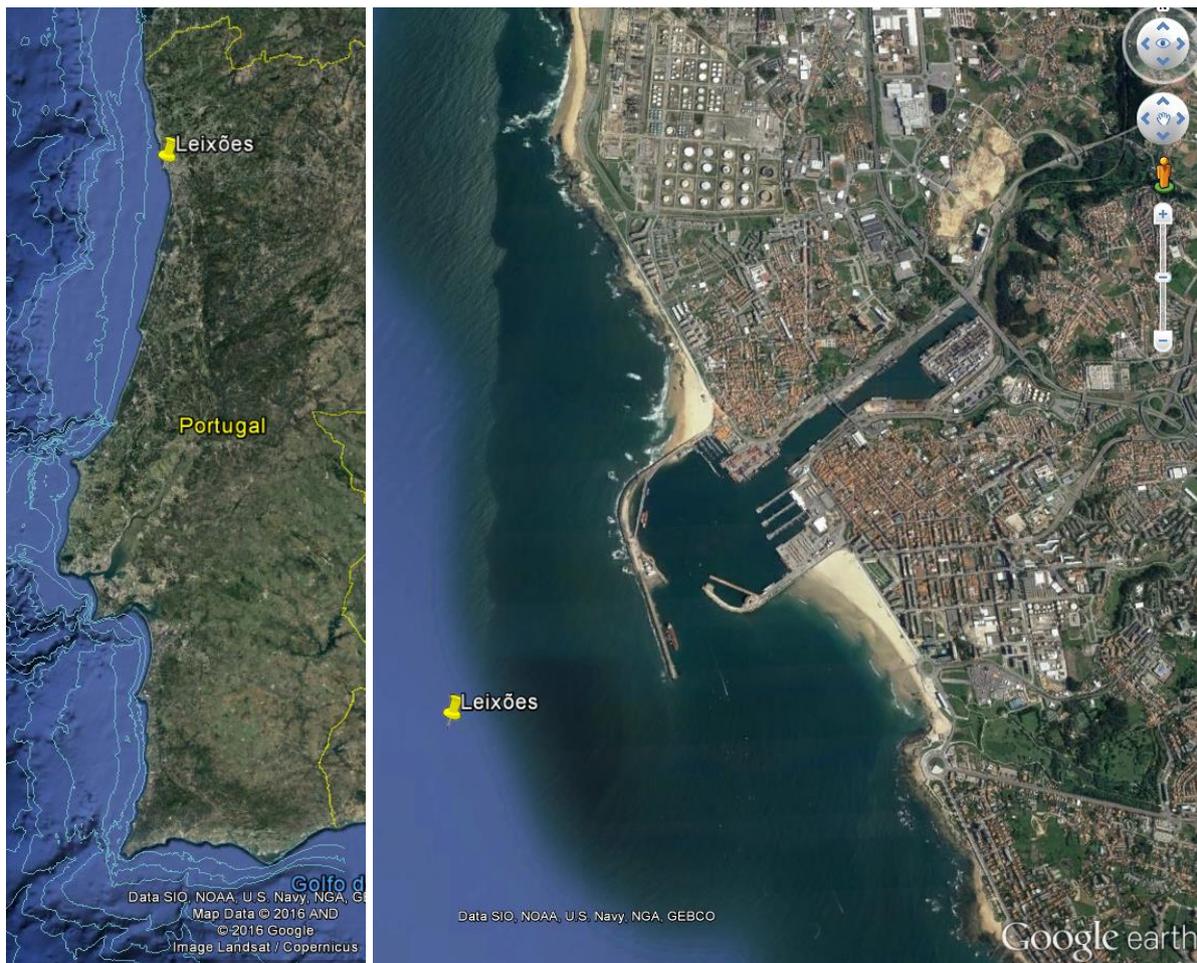


Figura 2.1 – Localização da zona em estudo (Google Earth© 2017)

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 -14 m ZH, 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 movimentou, em 2016, cerca de 18.3 milhões de toneladas de mercadorias (<http://www.apdl.pt/estatisticas/carga1>). 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, melações, produtos petrolíferos e ainda passageiros de navios de cruzeiro.



Figura 2.2 – Vista do Porto de Leixões (Google Earth© 2017)

2.2 Dados de base

Pretende-se conhecer as características dos regimes da agitação marítima na zona marítima adjacente ao Porto de Leixões, mais concretamente ao largo do Porto de Leixões e na zona do futuro prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões. Para este efeito, é necessário dispor de dados de agitação marítima, de marés e de batimetria na zona de estudo.

Para avaliar as características da agitação marítima locais, idealmente seria importante a existência de registos de boia-ondógrafo, obtidos o mais próximo possível da zona de estudo. Neste local, como é dito atrás, há dados provenientes da boia-ondógrafo de Leixões, ao largo de Leixões, ponto L (boia Leixões), ao longo de um período de cerca de 10 anos (2004-2013), de 3 em 3 horas, ver Figura 2.3 e

Quadro 2.1, e há dados provenientes do modelo de previsão WAM (WAMDI Group, 1988) do Centro Europeu de Previsão Meteorológica a Médio Prazo (ECMWF), para um período de aproximadamente 38 anos consecutivos (1979-2016), no ponto W (ECMWF), de 6 em 6 horas, Figura 2.3 e Quadro 2.1.

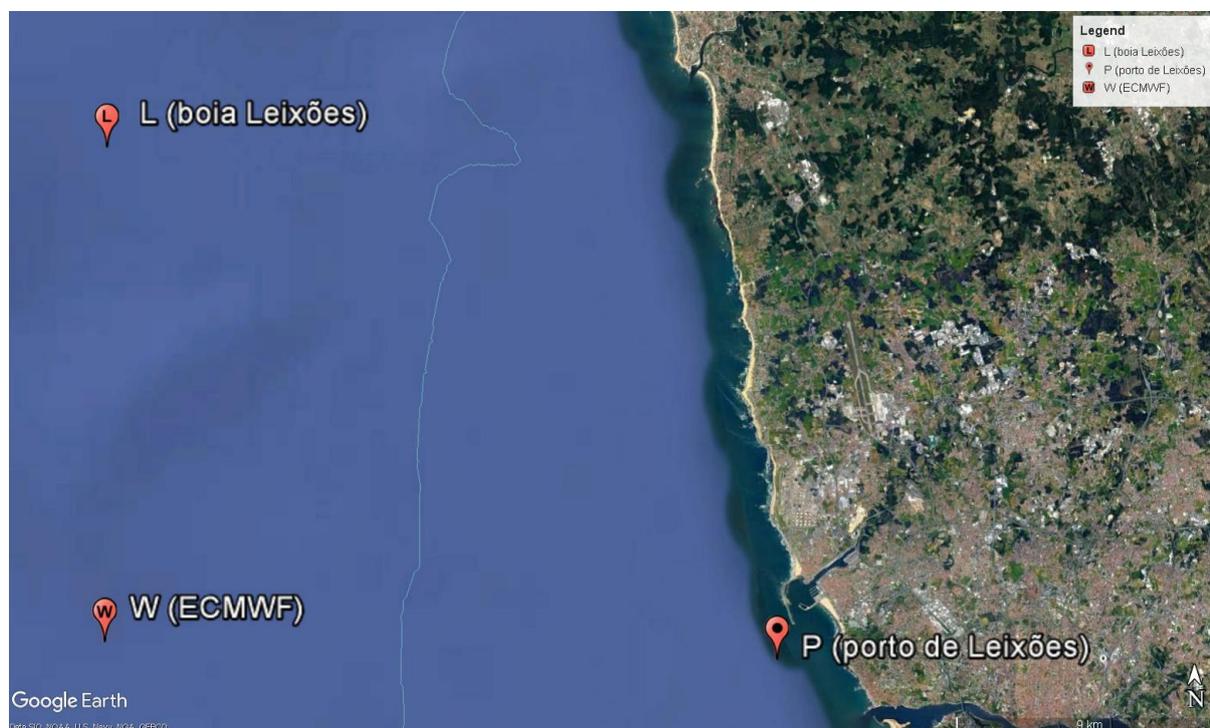


Figura 2.3 – Localizações relativas do ponto da boia de Leixões (ponto L), do ponto de cálculo do modelo de reconstituição WAM (ponto W), ambos ao largo de Leixões, e do ponto local, P - Google Earth© 2017

O Quadro 2.1 resume as características dos pontos L e W, correspondentes aos pontos onde existem dados de base relativos a agitação marítima, atrás referenciados.

Também se indica o ponto P, que foi escolhido com o objetivo de representar a zona do futuro prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, à cota batimétrica de, aproximadamente, -20 m (ZHL), e para o qual se estabelecerão os regimes de agitação marítima locais com base nas duas fontes de dados atrás referidas.

Quadro 2.1 – Localização e profundidade dos pontos de análise

Ponto	Latitude (°) WGS84	Longitude (°) WGS84	X (m) ETRS89 Datum73	Y (m) ETRS89 Datum73	Batimétrica (ZHL) (m)
L	41° 19' 00" N	8° 59' 00" W	-71188	183398	-84
W	41° 10' 00" N	8° 59' 00" W	-71354	166736	-81
P	41° 10' 5.70" N	8° 42' 51.59" W	-48777	166726	-21.1

Este trabalho assenta, ainda, nos seguintes elementos de base, fornecidos pela APDL:

- Dados batimétricos relativos aos seguintes elementos:
 - o “*IberianCoast+DigitizeCoastline-ETRS89.xyz*”: contém os pontos batimétricos, distanciados de 0.25', de uma batimetria de acesso público - EMODNET[‡];
 - o “*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);
- Dados de maré, obtidos com o modelo XTide, FLATER (1998).

As duas batimetrias foram integradas e, com recurso ao pacote de software Surfer™, foram geradas duas novas grelhas batimétricas regulares, com $\Delta x = \Delta y = 100$ m e $\Delta x = \Delta y = 10$ m, resultantes de uma interpolação espacial com o método "*Natural Neighbour*".

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

3 | Metodologia

3.1 Introdução

Um regime de agitação marítima pode ser estimado através da determinação de um conjunto de características estatísticas (distribuições e/ou parâmetros) de variáveis relevantes que definem um número finito de estados do mar medidos, tipicamente a altura de onda, o período de onda, e a direção de onda característica. Cada uma dessas variáveis é geralmente representada por um conjunto de parâmetros estatísticos.

Com base em dados de ondas existentes, e confiáveis, podem ser constituídos vários tipos de regimes de agitação: regime geral, regime médio e regime de extremos. Por exemplo, o regime de extremos é normalmente utilizado para o projeto de estruturas marítimas costeiras e em grandes profundidades (largo), enquanto o regime médio é preferível para calcular o transporte litoral de sedimentos. Qualquer destes regimes pode ser determinado através de dados locais ou transferido de outro local (do largo, por exemplo), consoante o caso. Na verdade, um problema comum que ocorre muitas vezes em vários estudos de engenharia costeira é a ausência de dados de ondas observadas em locais onde as obras costeiras têm de ser construídas. Assim, as metodologias para obter esses regimes variam de local para local.

Neste capítulo, descreve-se a metodologia para caracterizar os regimes de agitação marítima ao largo (pontos W e L) e local (ponto P) - ver Figura 2.3 e Quadro 2.1, na zona do futuro prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, utilizando modelação numérica. As etapas são:

- Fase I - Caracterização dos regimes de agitação marítima ao largo;
- Fase II - Transferência das características das ondas ao largo para a zona próxima do Porto de Leixões, com o modelo numérico SWAN (Booij *et al.*, 1999 e Booij *et al.*, 2006);
- Fase III - Caracterização dos regimes de agitação marítima locais em frente ao futuro prolongamento do molhe de Leixões, à cota batimétrica de aproximadamente -20 m (ZHL).

3.2 Caracterização dos regimes de agitação marítima ao largo

Como mencionado, utilizaram-se 2 conjuntos de dados para a caracterização dos regimes de agitação ao largo, nomeadamente:

- Dados provenientes da boia-ondógrafo de Leixões, ao largo de Leixões, ponto L, Figura 2.2, ao longo de um período de cerca de 10 anos (2004-2013, com falhas), de coordenadas 41° 19' 00" N, 8° 59' 00" W, na batimétrica de -84 m (ZHL). Estes dados consistem, entre outros, em valores, obtidos de 3 em 3 horas, de HS, TZ e DIR. O total dos trios de (HS, TZ e DIR) é 12150;
- Valores estimados pelo modelo numérico de reconstituição da agitação marítima WAM ponto W, de coordenadas 41° 10' 00" N, 8° 59' 00" W, ver Figura 2.3, para um período de

aproximadamente 38 anos consecutivos (1979-2016). Os resultados dessas estimativas, nesse ponto, consistem em valores de 6-6 horas dos parâmetros HS, Tm (equivalente a TZ, considerado neste relatório) e DIR, entre outros. O total dos trios (HS, TZ e DIR) é 55032. Note-se que este período compreende o período de 10 anos (2004-2013) de dados de boia, do conjunto acima referido.

Com base nestes dois conjuntos de dados, efetuaram-se cálculos com vista à determinação de:

- Regime geral observado, que engloba todos os valores de agitação marítima que ocorrem no período total de 38 anos possível pela utilização das duas fontes de dados acima referidas, isto é, de 1979 a 2016. Este regime corresponde a valores estatísticos e séries temporais de parâmetros de ondas relevantes (HS, TZ, DIR), histogramas (conjuntos, HS-TZ e HS- DIR, e marginais, HS e TZ) assim como rosas de vento das direções DIR;
- Regime médio de HS, que é calculado com a média dos valores máximos mensais ao longo do ano. Calculou-se também a distribuição conjunta das alturas significativas máximas mensais com o período e com a direção;
- Valores máximos anuais de HS, nos invernos marítimos (de outubro de um ano civil a março do ano civil seguinte).

3.3 Transferências dos regimes de agitação marítima do largo para o Porto de Leixões

A transferência dos regimes de agitação marítima será efetuada, como descrito no subcapítulo anterior, utilizando o modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999 e Booij *et al.*, 2006) desde o largo (ponto L ou ponto W) até à zona próxima do Porto de Leixões.

O modelo SWAN, acrónimo de *Simulating WAVes Nearshore*, é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da ação de onda. Trata-se de um modelo de domínio público (*freeware*), em constante desenvolvimento pela *Delft University of Technology*, da Holanda, que possui como uma das maiores vantagens a manutenção da estrutura dos ficheiros de dados e de resultados o que permite a fácil atualização de versões mais robustas e completas do modelo sempre que necessário. Este modelo propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refração e emolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por ação dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido ao atrito de fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos.

O campo de ondas na zona é caracterizado pelo espectro bidimensional de densidade espectral da ação de onda. A propagação da agitação, nos modos estacionário ou não estacionário, nos espaços geográfico e espectral, é realizada utilizando esquemas numéricos implícitos. A zona em estudo pode ser descrita com coordenadas cartesianas ou esféricas.

Os dados necessários para a execução do SWAN são as malhas batimétricas da zona a modelar e as condições de agitação na fronteira de entrada do domínio, para além de um conjunto de outros parâmetros de cálculo. De entre os vários resultados obtidos pelo SWAN destacam-se a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direções de pico e média, a dispersão direcional, o parâmetro de largura de banda e nível de água em qualquer parte do domínio computacional. Para a preparação dos dados, execução e visualização dos resultados do modelo SWAN utiliza-se a ferramenta SOPRO (Pinheiro *et al.*, 2007).

Os resultados do modelo SWAN foram obtidos em pontos das malhas batimétricas e, em particular no ponto P, Figura 3.2, para o qual foram definidos os regimes de agitação marítima, à semelhança do que se fez para o largo.

Para esse efeito, utilizou-se a metodologia de transferência acima referida, o que, em maior detalhe, consistiu nas seguintes etapas:

- Estabelecimento do domínio de cálculo do modelo SWAN e a respetiva discretização do domínio por malhas computacionais encaixadas;
- Estabelecimento das condições de fronteira com base nos dados de agitação marítima obtidos nos pontos W e L;
- Estabelecimento dos parâmetros de cálculo do modelo SWAN;
- Realização das simulações numéricas com o modelo SWAN, para a obtenção das características das ondas (HS, TZ, DIR) no domínio de cálculo e, em especial, no ponto P, na vizinhança do Porto de Leixões.

O domínio de cálculo foi discretizado em 3 malhas regulares, encaixadas, com diferentes dimensões e resolução, Figura 3.1 e Figura 3.2. A malha exterior, de maior dimensão, tem 37x22 km² e resolução de $\Delta x = \Delta y = 200$ m. A 2ª malha abrange uma área de 5.8x4.8 km² e tem de resolução $\Delta x = \Delta y = 100$ m; a 3ª malha, que abrange o ponto P, tem dimensões de 3x2.5 km² e resolução de $\Delta x = \Delta y = 20$ m. A batimetria utilizada para cada malha foi construída com base nos dados batimétricos referidos em 2.2.

As condições de cálculo do modelo SWAN foram:

- Utilização da versão SWAN 40.72, sem consideração da presença de campos de correntes ou de ventos;
- O espectro direcional foi discretizado em 31 intervalos de frequências, de 0.04 Hz a 1.0 Hz, com distribuição logarítmica. A discretização em direção abrangeu 360°, dividida em 90 intervalos;
- O nível de maré foi fornecido pelo modelo XTIDE (FLATER, 1998), durante o período de estudo;
- As condições de fronteira foram definidas com base nos dados da boia de Leixões (ponto L) ou nos dados estimados pelo EMCWF (ponto W);
- Os fenómenos físicos considerados foram a refração, difração, atrito de fundo e rebentação induzida pelo fundo;
- As simulações foram efetuadas para:
 - Os dados da boia de Leixões (2004-2016, 10 anos com falhas), de 3 em 3 horas;
 - Os dados estimados do ECMWF (1979-2016, 38 anos), de 6 em 6 horas.

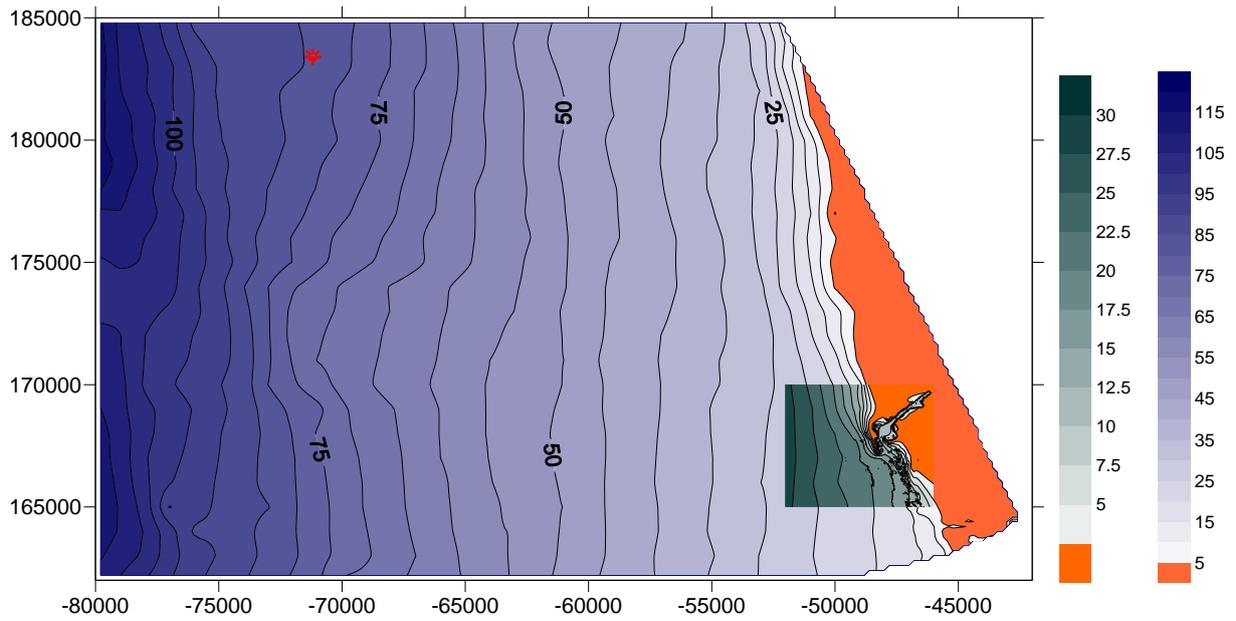


Figura 3.1 – Batimetrias e linha de costa e malhas do SWAN (principal e encaixada)

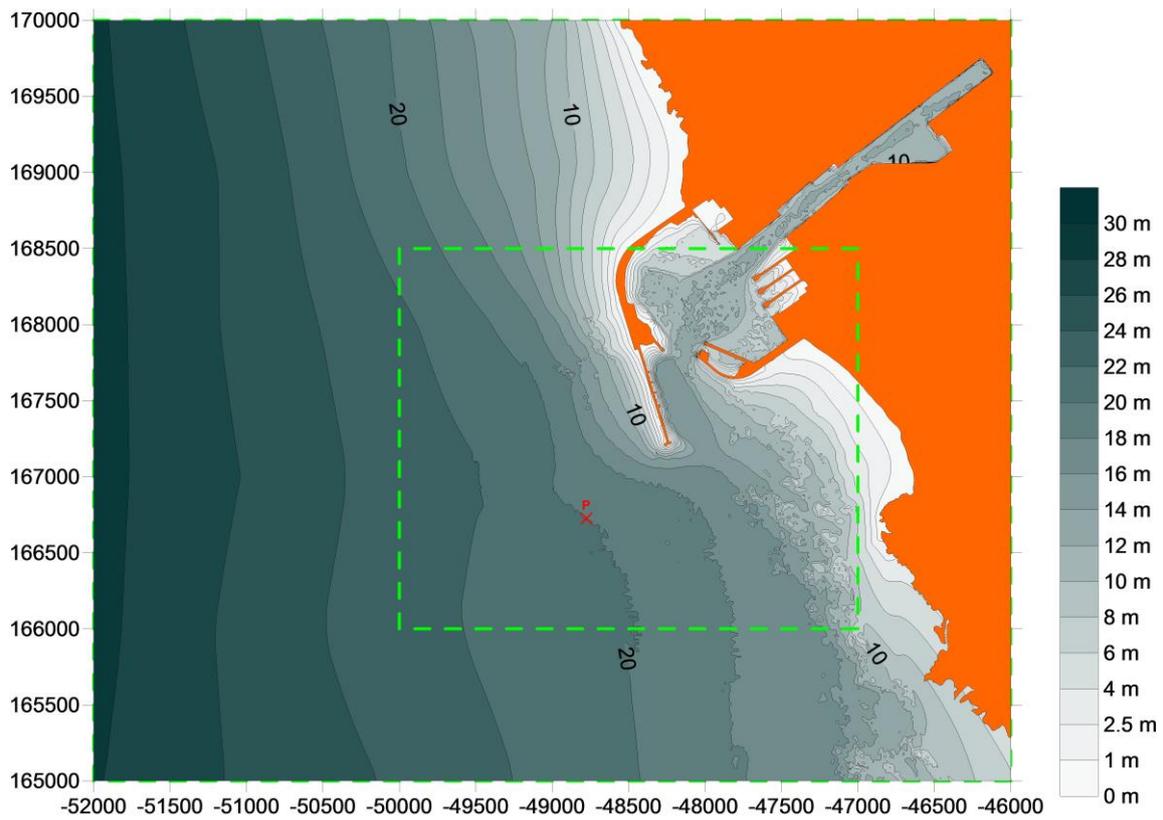


Figura 3.2 – Batimetrias e linha de costa e malhas do SWAN (encaixadas 1 e 2). Localização do ponto P

Excetuando os aspetos anteriormente referidos, as corridas foram realizadas com as formulações padrão SWAN.

Os resultados do modelo SWAN em cada um dos pontos são os valores de 6-6 horas dos parâmetros HS (altura significativa espectral), TZ (período médio), TP (período de pico) e DIR (direção média de pico) entre outros. Para a preparação dos dados de entrada, a execução automática do modelo SWAN e a visualização dos resultados utilizou-se o pacote de modelos numéricos SOPRO (Pinheiro *et al.*, 2007).

3.4 Caracterização dos regimes de agitação marítima local

Com base nas características locais da agitação marítima no ponto P, obtidas no anterior subcapítulo, definiram-se os regimes de agitação marítima locais. Estes regimes foram obtidos quer para os dados provenientes da boia de Leixões (ponto L, 10 anos, com falhas) quer para os dados estimados pelo ECMWF (ponto W, 38 anos, sem falhas).

4 | Regimes de agitação marítima

4.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os seguintes regimes de agitação marítima ao largo e na zona do futuro prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, para os dois tipos de dados de agitação marítima (medidos na boia de Leixões e estimados pelos modelos de *hindcast* do ECMWF):

- Regime geral observado:
 - Estatísticas descritivas das séries de HS, TZ e DIR;
 - Séries temporais de parâmetros de onda HS, TZ e DIR;
 - Histogramas conjuntos de HS-TZ, HS-DIR, e marginais de HS de TZ;
 - Rosas de vento da direção média, DIR, por setores de 45°.
- Regime médio de HS, TZ e DIR;
- Regime da média dos máximos mensais de HS e valores das alturas significativas máximas mensais, assim como a distribuição conjunta das alturas significativas máximas mensais com o período médio e com a direção;
- Valores máximos anuais de HS, correspondentes aos invernos marítimos.

4.2 Regimes de agitação marítima ao largo

Com base nos valores de agitação marítima ao largo, medidos na boia de Leixões, no período de 2004 a 2013 (10 anos, com falhas), e estimados pelo ECMWF no período de 1979 a 2016 (38 anos, sem falhas), apresenta-se no Quadro 4.1 estatísticas descritivas das séries de HS, TZ e DIR obtidas no ponto W (dados estimados por ECMWF) e no ponto L (dados da boia de Leixões), designadas neste quadro, respetivamente, por HS(W), TZ(W) e DIR(W) e HS(L), TZ(L) e DIR(L). Notar que todos os dados direcionais estão referidos ao Norte verdadeiro.

Quadro 4.1 – Largo (fontes W e L). 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) e em dados medidos na boia de Leixões (2004 a 2013)

Parâmetros	HS(W) m	TZ(W) s	DIR(W) °	HS(L) m	TZ(L) s	DIR(L) °
Média	2.05	9.1	291	1.92	7.1	303
Mediana	1.82	8.9	304	1.69	6.9	308
Moda	1.49	8.1	300	1.29	6.8	319
Desvio padrão	0.96	2.0	66	1.02	1.7	24
Curtose	2.46	-0.4	10.76	3.08	-2.0	5
Assimetria	1.32	0.4	-3	1.45	0.6	-1
Gama	9.42	12.3	360	8.54	11.5	268
Mínimo	0.40	4.4	0	0.28	3.1	91
Máximo	9.82	16.7	360	8.82	14.6	359
Número de registos	55032	55032	55032	12150	12150	12150

Apresenta-se também, para o ponto W e para o ponto L, um excerto de comparação das séries temporais das alturas de onda HS (Figura 4.1), assim como a rosa das direções, DIR (Figura 4.2), a primeira correspondente a somente um inverno marítimo, de 1 de outubro de 2004 a 31 de março de 2005 (como exemplo), por razão de legibilidade da figura, e a segunda para todos os dados existentes quer em W quer em L.

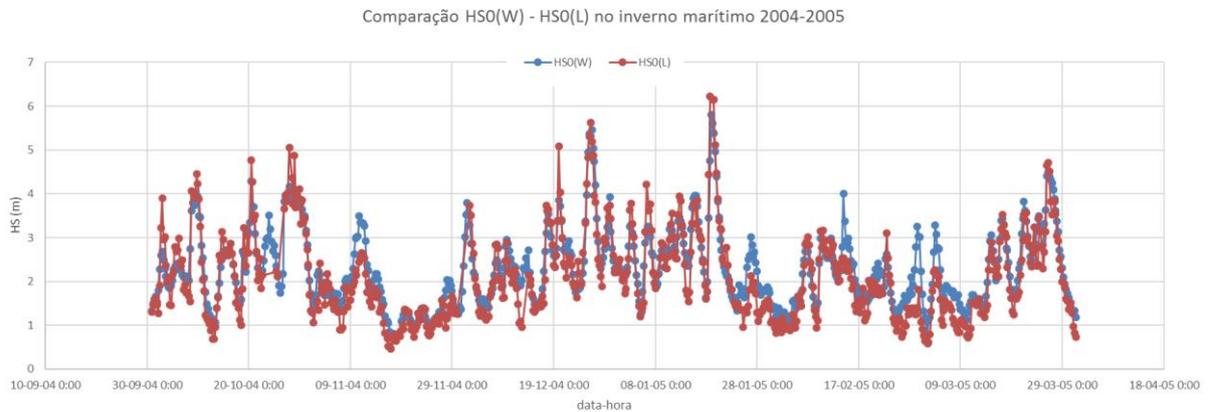


Figura 4.1 – Largo. Excerto da comparação das séries temporais das alturas de onda HS associadas ao inverno marítimo 2004-2005, provenientes dos pontos W e L

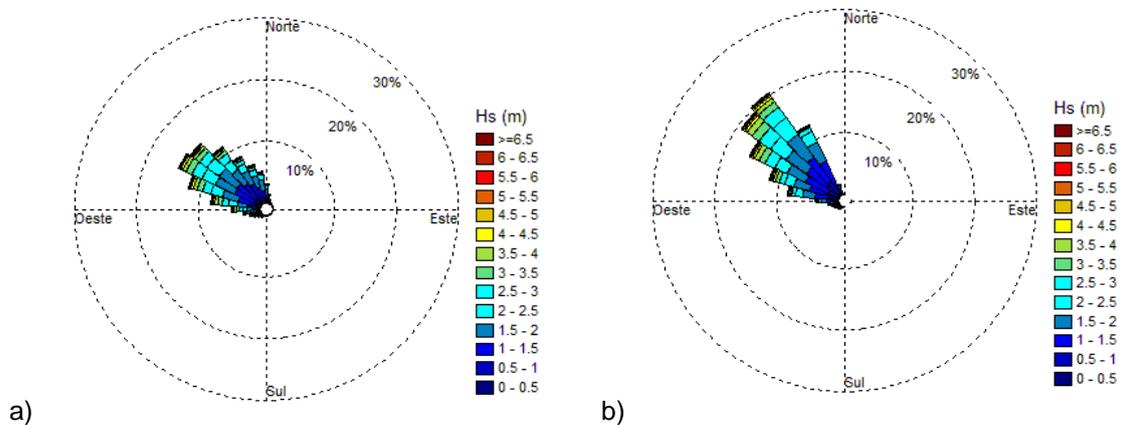


Figura 4.2 – Largo. Distribuição conjunta de HS –DIR. a) com dados ECMWF, ponto W; b) dados da boia, ponto L

Apresentam-se os histogramas conjuntos e marginais de HS-TZ (Figura 4.3 e Figura 4.4) e HS-DIR (Figura 4.5 e Figura 4.6), para o largo, com base nos dados estimados pelo ECMWF (ponto W) e nos dados medidos na boia de Leixões (ponto L).

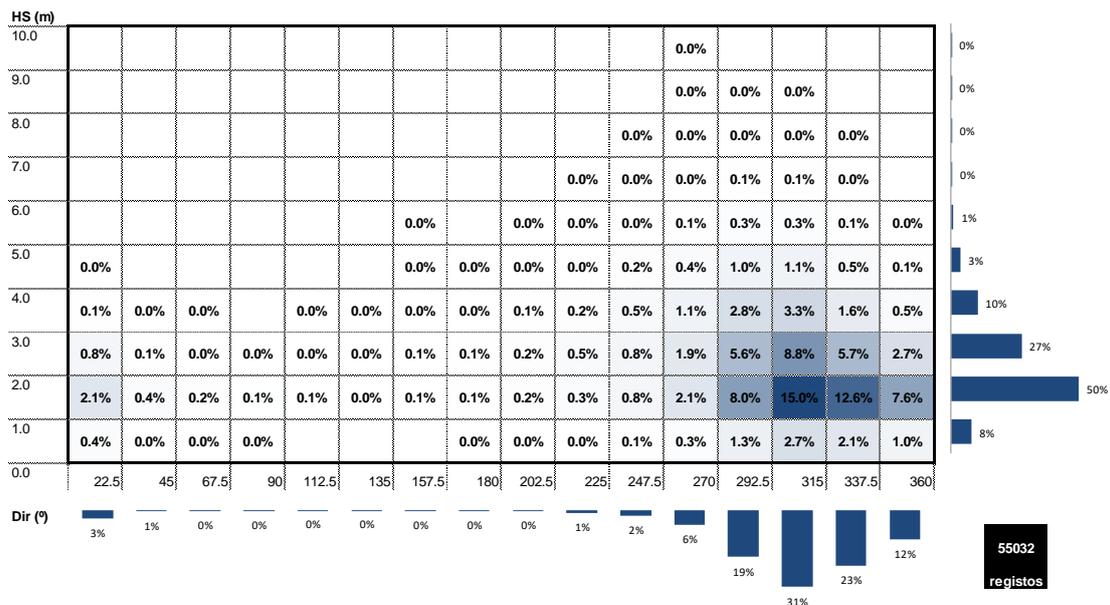


Figura 4.5 – Largo. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados do ECMWF (ponto W)

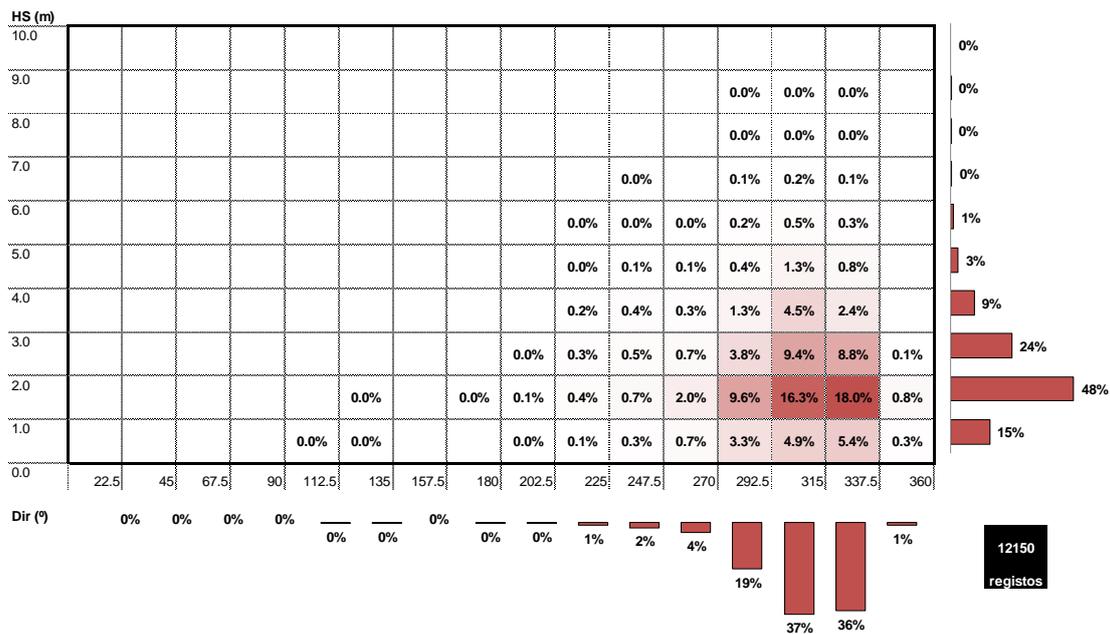


Figura 4.6 – Largo. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados da boia de Leixões (ponto L)

Na Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 apresenta-se o regime médio de HS, de TZ e de DIR ao largo, com base nos dados estimados pelo ECMWF (ponto W) e medidos na boia (ponto L), isto é a média mensal dos referidos parâmetros nos dois pontos ao largo.

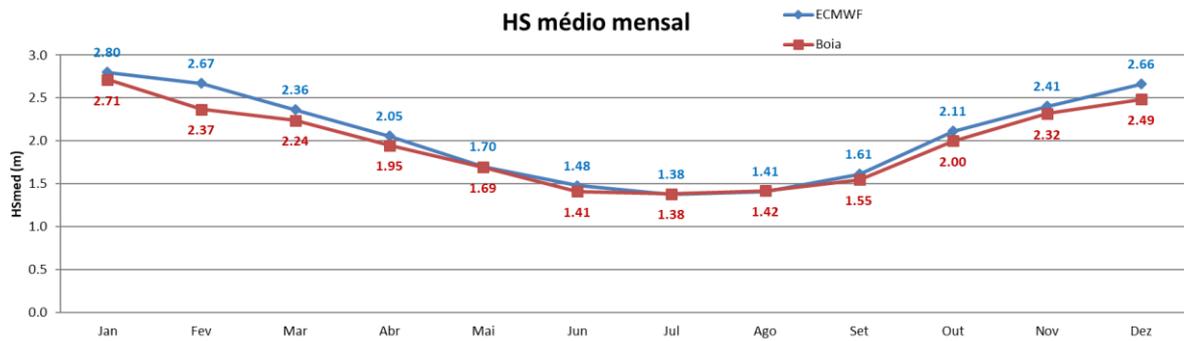


Figura 4.7 – Largo. Regime médio mensal de HS com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L)

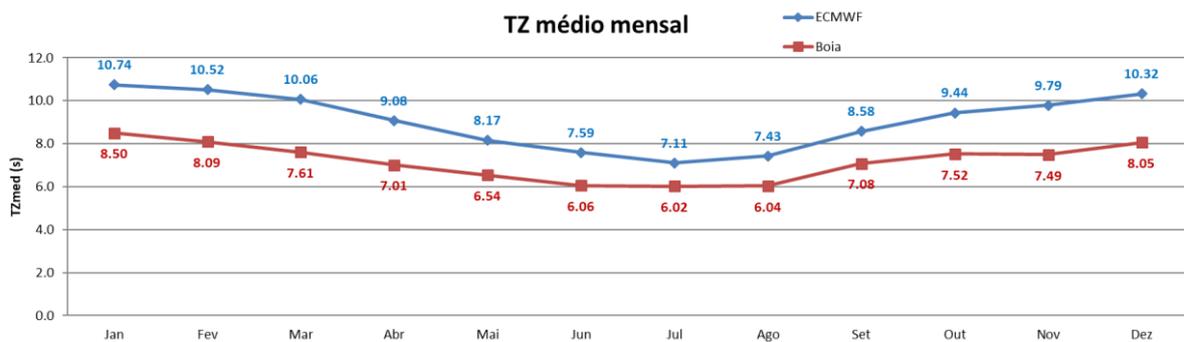


Figura 4.8 – Largo. Regime médio mensal de TZ com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L)

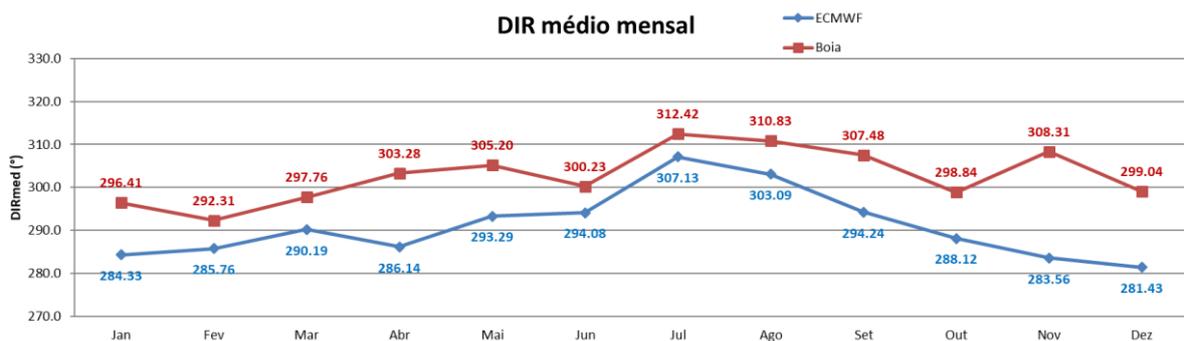


Figura 4.9 – Largo. Regime médio mensal de DIR com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L)

Na Figura 4.10, para o largo, com base nos dados estimados pelo ECMWF (ponto W) e nos dados da boia (ponto L), apresenta-se a distribuição da média dos máximos mensais (média das alturas significativas máximas mensais), assim como os valores das alturas significativas máximas mensais.

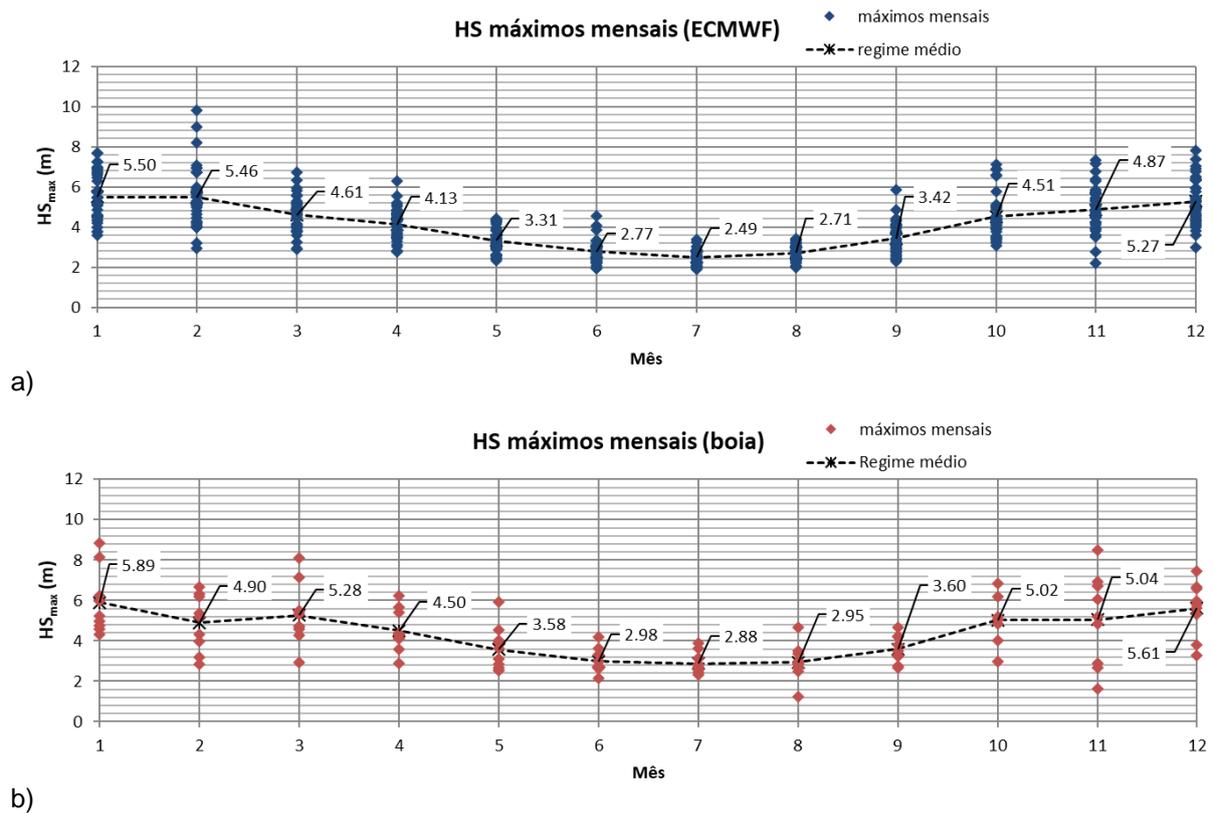


Figura 4.10 – Largo. Valores das alturas significativas máximas mensais e respetiva média mensal (média das alturas significativas máximas mensais): a) dados estimados do ECMWF (ponto W); b) dados medidos na boia de Leixões (ponto L)

Apresenta-se, também, a correspondente distribuição conjunta das alturas significativas máximas mensais com o período médio, TZ, e com a direção média, DIR, Figura 4.11, assim como as retas e coeficiente de correlação linear possíveis (quando possível) de aplicar a estes parâmetros.

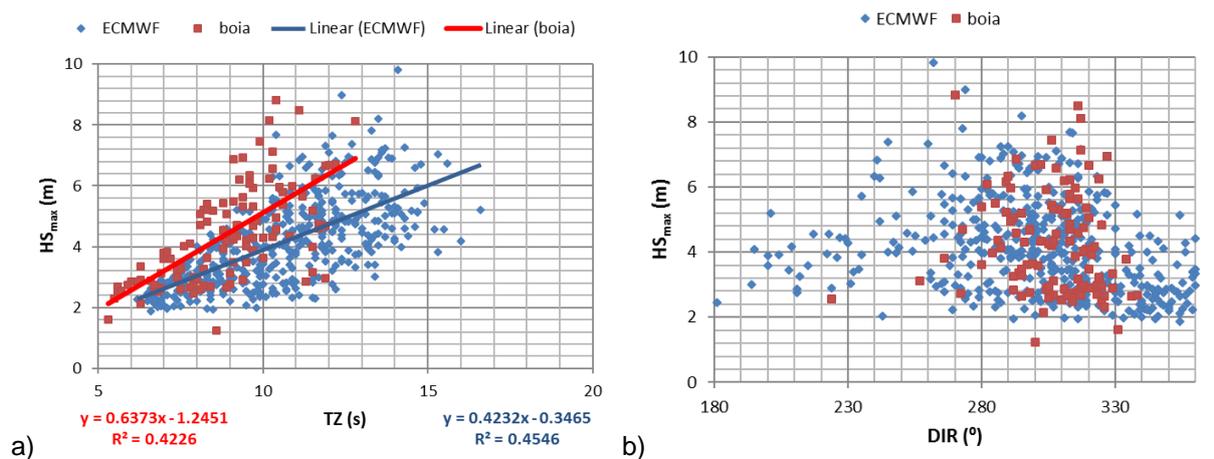


Figura 4.11 – Largo. Distribuição das alturas significativas máximas mensais para os dados ECMWF (W) e dados da boia de Leixões (L): a) com o período médio, TZ; b) com a direção, DIR

Finalmente, na Figura 4.12, mostra-se a evolução anual dos valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo, compatibilizadas as duas fontes de dados: estimativas ECMWF (W) e boia de Leixões (L).

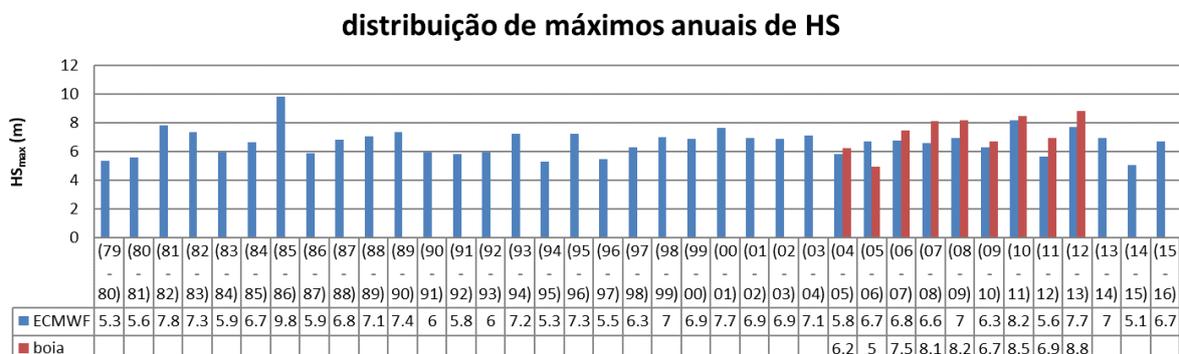


Figura 4.12 – Largo. Valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo. Dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L)

Das figuras anteriores e do Quadro 4.1, o regime observado ao largo pode ser resumido no seguinte:

Dados estimados pelo ECMWF (ponto W)

Em termos de regime geral observado (ver Quadro 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.5):

- alturas significativas de onda, HS, entre 0.40 m e 9.82 m, sendo a média de 2.05 m. A maioria dos valores (isto é, classes de HS com ocorrências >5%) encontra-se entre as gamas de 0.0 m 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 (isto é, classes de DIR com ocorrências >5%) verifica-se nas gamas entre 247.5° e 360° e as gamas mais frequentes são entre 270° e 337.5°.

Em termos de regime médio (ver da Figura 4.7 à Figura 4.9, curvas a azul):

- Os valores médios mensais das alturas significativas, HS, variam entre 1.38 m e 2.80 m, verificando-se os menores valores nos meses de verão marítimo (abril a setembro) e os maiores nos meses de inverno marítimo (outubro a março), como seria de esperar;
- Os valores médios mensais do período médio, TZ, variam entre 7.1 s e 10.7 s, verificando-se igualmente menores valores nos meses de verão marítimo e maiores nos meses de inverno marítimo;
- Os valores médios mensais das direções médias, DIR, variam entre 281° e 307° (aproximadamente entre W e NW). Verifica-se uma ligeira tendência de a direção rodar para NW nos meses de verão marítimo e para W nos meses de inverno marítimo.

Quanto às médias dos máximos mensais de HS (médias das alturas significativas máximas mensais), Figura 4.10 e Figura 4.11 (pontos a azul), estas variam entre 2.49 m e 5.50 m, verificando-se os menores valores nos meses de verão marítimo (abril a setembro) e os maiores no inverno marítimo (outubro a março), como seria de esperar.

Se se considerar, porém, os valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo, Figura 4.12, verifica-se que aqueles variam entre 5.1 m e 9.8 m, a que estão associados períodos médios, TZ, entre 10.3 s e 15.3 s, e direções médias, DIR, entre 241° e 327°.

Dados da boia (ponto L)

Em termos de regime geral observado (ver Quadro 4.1, Figura 4.2, Figura 4.4 e Figura 4.6):

- alturas significativas de onda, HS, entre 0.28 m e 8.82 m, sendo a média de 1.92. A maioria dos valores ((isto é, classes de HS com ocorrências >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 3.1 s a 14.6 s, com média igual a 7.1 s. A maioria dos valores (>5%) encontra-se entre 4 s e 10 s, sendo as gamas com maior frequência entre 5 s e 8 s;
- direções médias de onda, DIR, entre 91° e 359°, sendo o valor médio de 303°. A maioria dos valores de direções (isto é, classes de DIR com ocorrências >5%) verifica-se nas gamas entre 270° e 337.5°, sendo as gamas mais frequentes as compreendidas entre 292.5° e 337.5°.

Em termos de regime médio (ver da Figura 4.7 à Figura 4.9, curvas a castanho-avermelhado):

- Os valores médios mensais das alturas significativas, HS, variam entre 1.38 m e 2.71 m, verificando-se os menores valores nos meses de verão marítimo (abril a setembro) e os maiores nos meses de inverno marítimo (outubro a março), como seria de esperar;
- Os valores médios mensais dos períodos médios, TZ, variam entre 6.0 s e 8.5 s, verificando-se os menores valores no verão marítimo e os maiores no inverno marítimo;
- Os valores médios mensais das direções médias, DIR, variam entre 292° e 312° (aproximadamente entre WNW e NW). Também para esta fonte de dados, verifica-se uma tendência, embora mais ténue do que para os dados ECMWF, de a direção rodar para NW nos meses de verão marítimo e para W nos meses de inverno marítimo.

Quanto às médias dos máximos mensais de HS (médias das alturas significativas máximas mensais), Figura 4.10 e Figura 4.11 (pontos a castanho-avermelhado), estas variam entre 2.88 m e 5.89 m, verificando-se os menores valores nos meses de verão marítimo e os maiores nos meses de inverno marítimo, como seria de esperar.

Em termos de valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo, Figura 4.12, verifica-se que variam entre 5.0 m e 8.8 m, a que estão associados períodos médios, TZ, entre 9.4 s e 12.8 s e direções médias, DIR, entre 270° e 359°.

A partir da análise de resultados anteriores sobre características relevantes dos regimes de agitação marítima ao largo, e comparando os respetivos regimes obtidos com cada uma das fontes de dados de agitação marítima (para os pontos W e L, representados nas figuras e quadros a azul e a castanho-avermelhado, respetivamente), destacam-se as seguintes considerações:

Em termos de regime geral observado:

- os resultados obtidos de HS, TZ e DIR não evidenciam diferenças significativas entre os dados estimados pelo modelo ECMWF e os medidos na boia, isto é, em geral:
 - Os valores estatísticos são da mesma ordem de grandeza (ver Quadro 4.1);
 - Os histogramas HS-TZ e HS-DIR apresentam uma distribuição de valores, nas diferentes classes, bastante semelhante - ver da Figura 4.3 à Figura 4.6;
 - As gamas de HS mais frequentes (0 m a 4 m) são muito idênticas entre as duas fontes de dados, assim como a gama mais frequente (1 a 2 m) - ver Figura 4.3 e Figura 4.4;
 - As gamas de DIR entre 270° e 337.5° são as mais frequentes em ambas as fontes de dados. Mais ainda a gama de DIR mais frequente é a mesma para os dois conjuntos de dados (entre 292.5° e 315°) - ver Figura 4.4 e Figura 4.6;
- Há, no entanto, algumas diferenças a assinalar, nomeadamente (ver Quadro 4.1):
 - Em geral, as gamas de valores de HS, TZ e DIR associadas aos dados estimados pelo ECMWF são mais extensas do que as correspondentes com dados de boia;
 - As gamas de períodos médios, TZ, associadas aos dados estimados pelo ECMWF apresentam um “deslocamento” superior a cerca de 2 s em relação às gamas correspondente aos dados medidos na boia. Este comportamento é especialmente visível ao compararem-se os valores de TZ mais frequentes (isto é, classes de TZ com ocorrências >5%) com base nos dados estimados pelo ECMWF, entre 6 s e 13 s (com a gama mais frequente entre 8 s e 9 s), e os obtidos na boia, entre 4 s e 10 s (e gama mais frequente a 6 s e 7 s);
 - As gamas de direções médias, DIR, mais frequentes (isto é, classes de DIR com ocorrências >5%) com base nos dados estimados pelo ECMWF são entre 247.5 e 360° enquanto que no caso dos dados da boia, esse intervalo é mais estreito, entre 292.5 e 337.5°.

Em termos de regime médio:

- A evolução e os próprios valores médios mensais de HS, Figura 4.7, são muito semelhantes. No entanto, os valores obtidos com os dados ECMWF são ligeiramente superiores aos correspondentes obtidos com base nos dados da boia, principalmente nos meses de inverno marítimo;

- Os valores médios mensais de TZ, Figura 4.8, apresentam idêntica evolução ao longo do ano para os dois conjuntos de dados de agitação marítima; porém, os valores estimados pela fonte ECMWF são repetidamente superiores aos correspondentes aos dados da boia;
- Os valores médios mensais de DIR, Figura 4.9, apresentam similar evolução ao longo do ano para os dois conjuntos de dados, sendo que os valores estimados pelo ECMWF apresentam valores reiteradamente mais rodados para oeste (linha azul) do que os correspondentes aos dados da boia (linha castanho-avermelhado).

No tocante às médias dos máximos mensais de HS (médias das alturas significativas máximas mensais), Figura 4.10 e Figura 4.11, quer a evolução ao longo do ano quer as próprias médias são muito semelhantes e da mesma ordem de grandeza, apesar de os dados da boia (variam entre 2.88 m e 5.89 m) apresentarem valores ligeiramente superiores aos verificados com os dados estimados ECMWF (variam entre 2.49 m e 5.50 m). As diferenças são, porém, pouco relevantes.

Finalmente, no que respeita a valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo, Figura 4.12, à exceção de um ano marítimo (2005-2006), verifica-se, no período comum (2004-2013), um padrão de subestimação das alturas máximas anuais com base nas estimativas ECMWF quando comparadas com os valores medidos na boia, assumindo-se, neste caso, que ambas as fontes de dados correspondem ao mesmo domínio de agitação marítima (largo).

4.3 Regimes de agitação marítima (transferidos) para 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 no capítulo 3.3. Assim, no Quadro 4.2 apresentam-se, para P, as estatísticas descritivas da série total dos 54959 registos estimados pelo ECMWF e dos 12150 registos medidos na boia de Leixões. Os parâmetros correspondentes são designados neste quadro, respetivamente para as fontes “W” e “L”, por HS_P(W), TZ_P(W) e DIR_P(W) e HS_P(L), TZ_P(L) e DIR_P(L). Os dados direcionais estão referidos ao Norte verdadeiro.

Quadro 4.2 – Ponto P (fontes W e L). Estatísticas das séries totais de HS, TP e DIR, com base em dados estimados pelo ECMWF (de 1 de janeiro de 1979 a 31 de agosto de 2016 e com base em dados medidos na boia de Leixões (2004 a 2013)

Parâmetros	HS_P(W) m	TZ_P(W) s	DIR_P(W) o	HS_P(L) m	TZ_P(L) s	DIR_P(L) o
Média	1.63	8.7	295	1.60	7.0	298
Mediana	1.41	8.5	296	1.42	6.7	301
Moda	0.00	6.2	266	0.00	6.2	278
Desvio padrão	0.98	2.2	24	0.83	1.7	20
Curtose	2.52	-0.2	3	3.18	0.5	3
Assimetria	1.29	0.5	-1	1.49	0.8	-1
Gama	8.98	13.4	160	7.41	12.1	155
Mínimo	0.00	3.9	182	0.00	3.2	182
Máximo	8.98	17.3	342	7.41	15.3	337
Número de registos	54959	54959	54959	12146	12146	12146

Apresenta-se, de seguida, para o ponto P, e para dados provenientes dos pontos W e L, um excerto de comparação das séries temporais das alturas de onda HS (Figura 4.13), assim como a rosa das direções, DIR (Figura 4.14), a primeira correspondente a somente um inverno marítimo, de 1 de outubro de 2004 a 31 de março de 2005 (como exemplo), por razão de legibilidade da figura, e a segunda para todos os dados, provenientes quer de W quer de L.

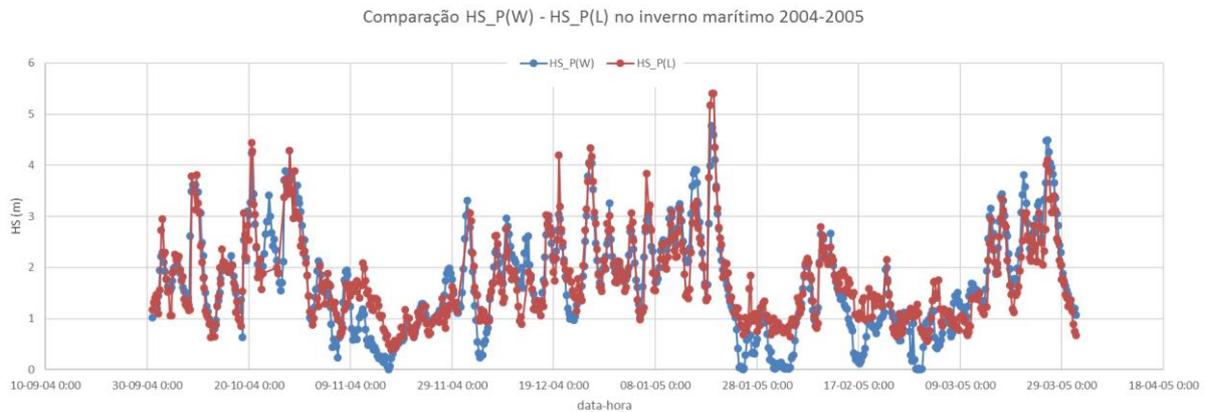


Figura 4.13 – Ponto P. Excerto da comparação das séries temporais das alturas de onda HS associadas ao inverno marítimo 2004-2005, provenientes dos pontos W e L

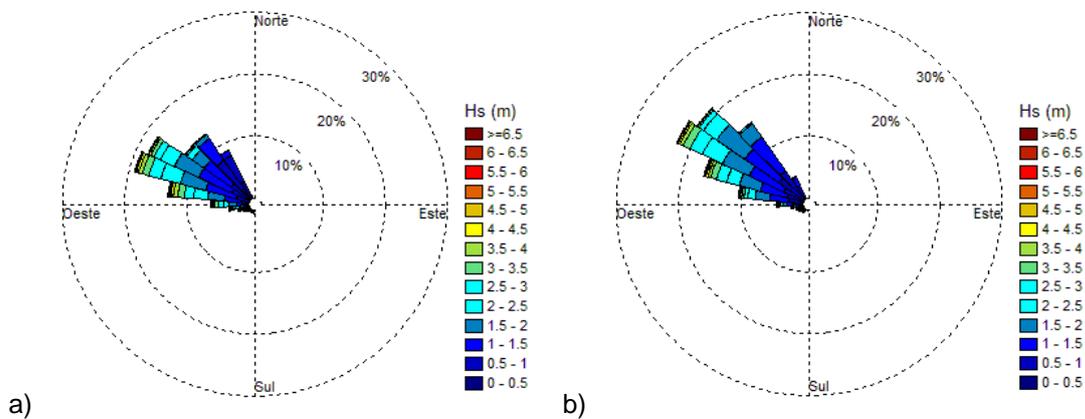


Figura 4.14 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-DIR. a) com dados ECMWF (W); b) com dados da boia (L)

Apresenta-se também, para o ponto P, e para dados provenientes de W e L, os histogramas conjuntos e marginais de HS-TZ (Figura 4.15 e Figura 4.16) e HS-DIR (Figura 4.17 e Figura 4.18).

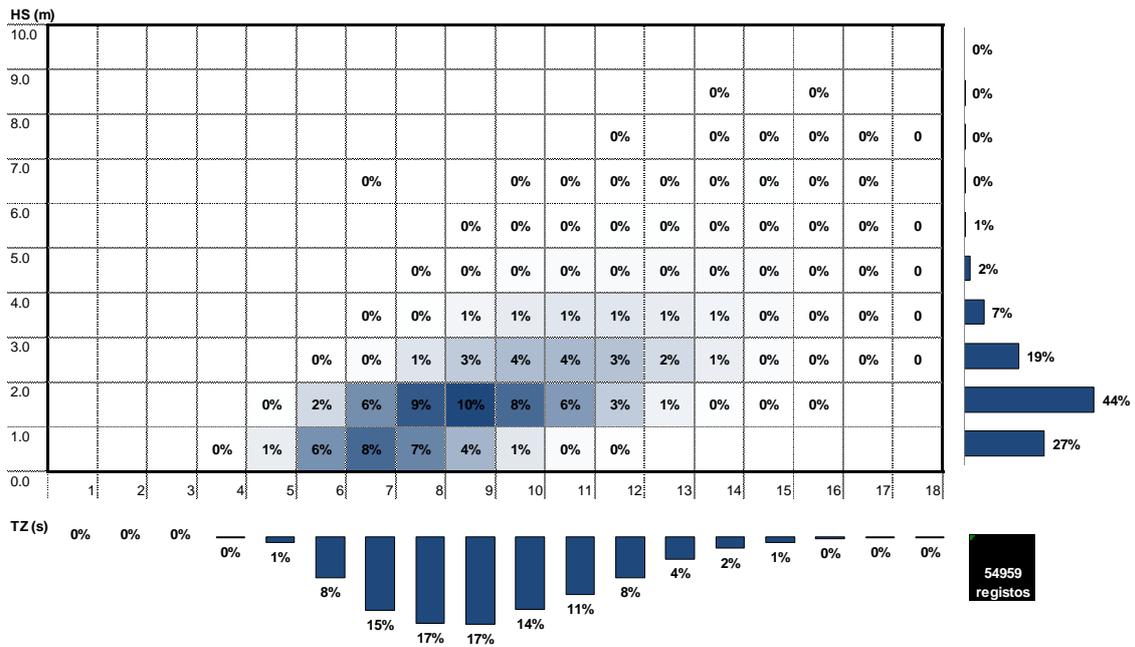


Figura 4.15 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-TZ. Dados do ECMWF (ponto W)

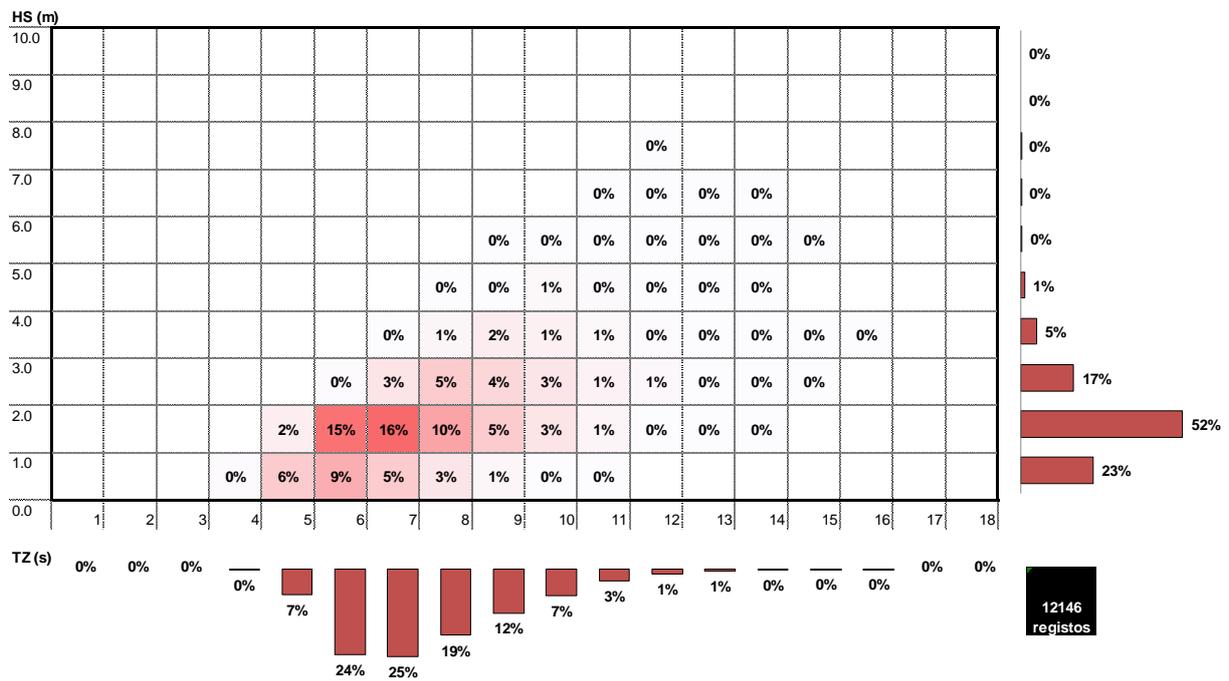


Figura 4.16 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-TZ. Dados da boia (ponto L)

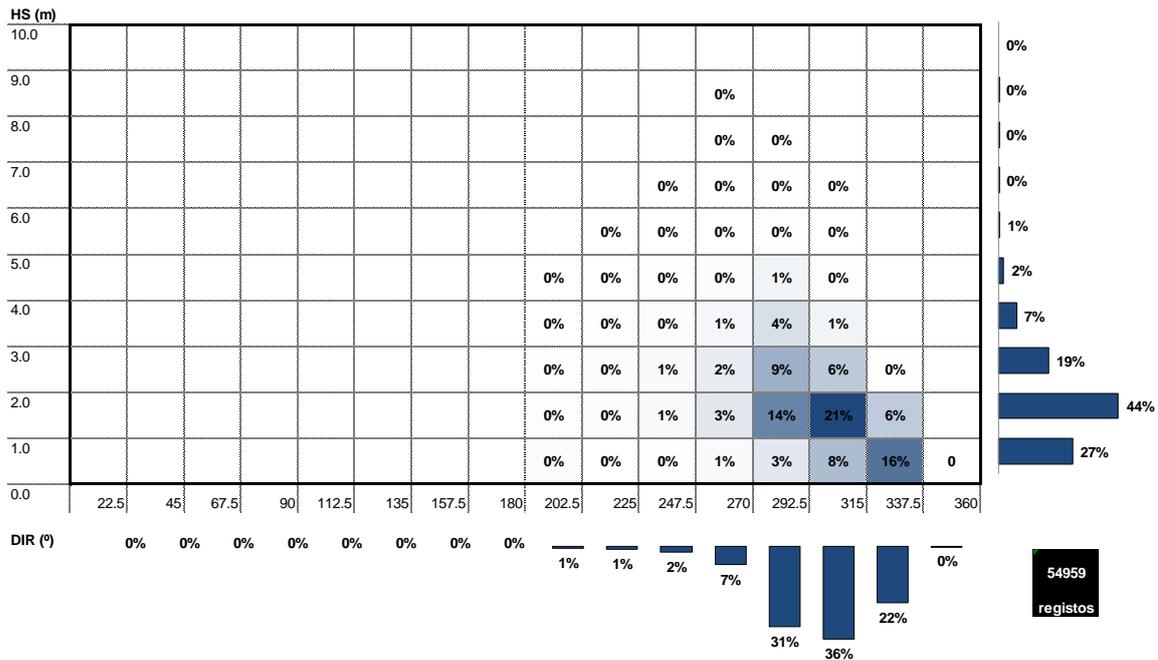


Figura 4.17 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados do ECMWF (ponto W)

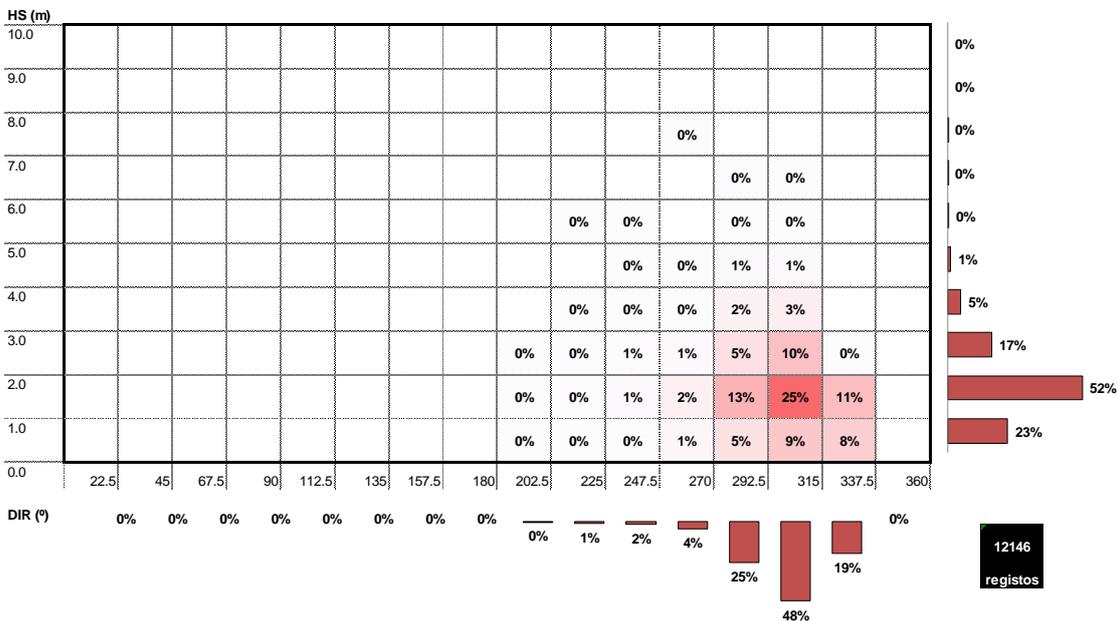


Figura 4.18 – Ponto P. Distribuição conjunta de HS-DIR. Dados da boia de Leixões (ponto L)

Apresenta-se, de seguida, para o ponto P, e para as duas fontes de dados de base, o regime médio de HS, TZ e DIR (Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21, respetivamente), isto é a média mensal dos referidos parâmetros para as duas fontes de dados.

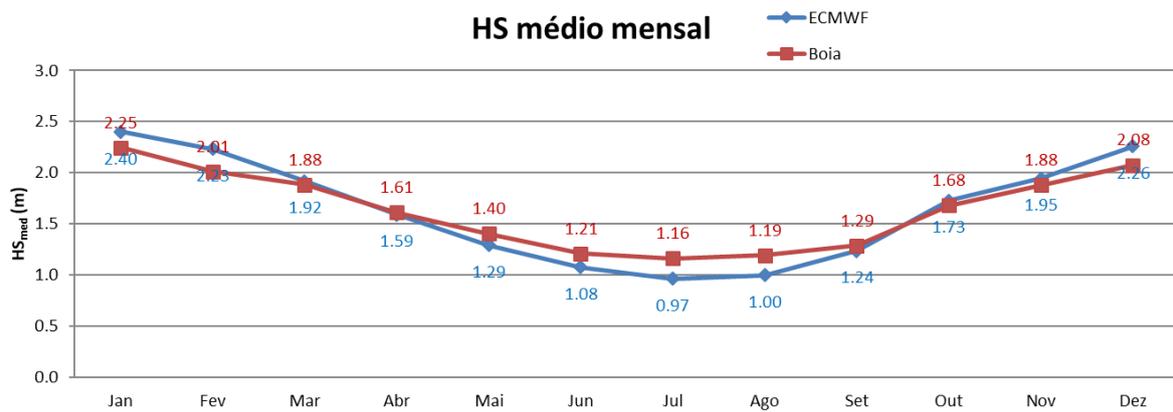


Figura 4.19 – Ponto P. Regime médio mensal de HS com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L)

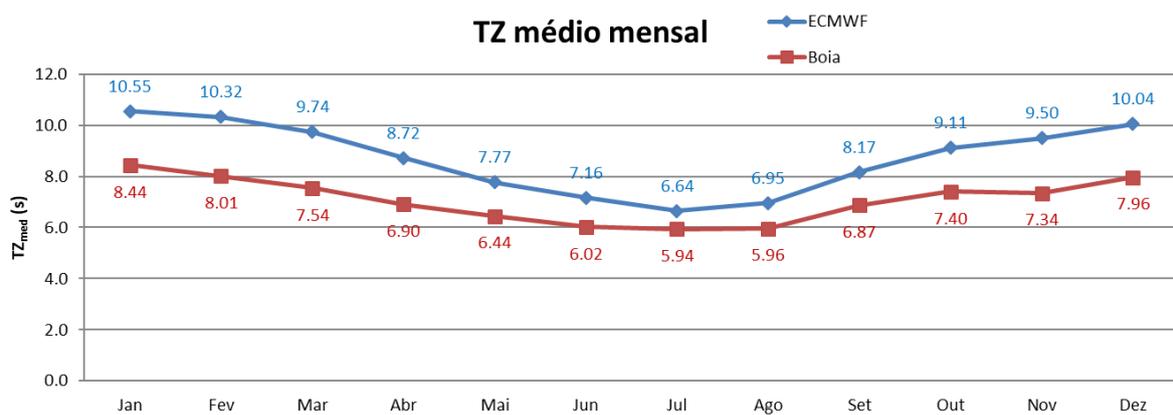


Figura 4.20 – Ponto P. Regime médio mensal de TZ com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L)

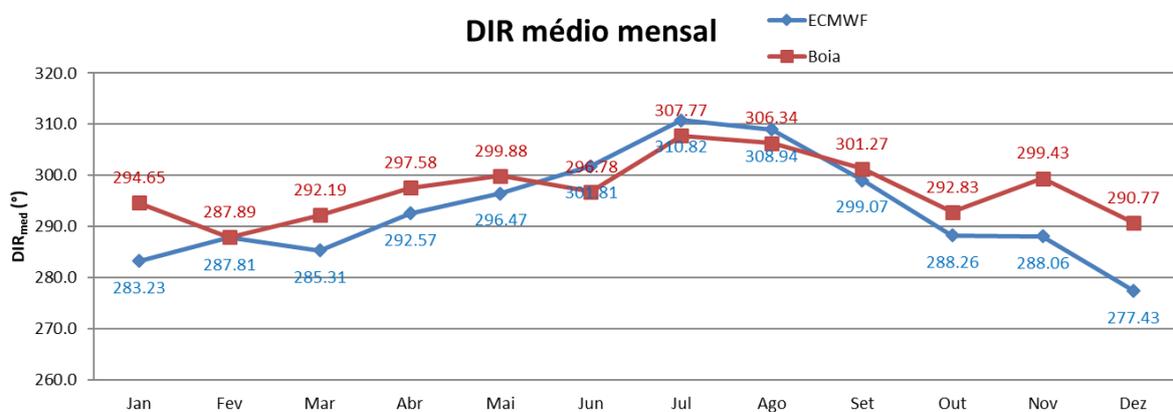


Figura 4.21 – Ponto P. Regime médio mensal de DIR com base em dados estimados do ECMWF (ponto W) e da boia de Leixões (ponto L)

Finalmente, para o mesmo ponto P, apresenta-se, na Figura 4.24, a evolução anual dos valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo, compatibilizadas as duas fontes de dados: estimativas ECMWF (W) e boia de Leixões (L).

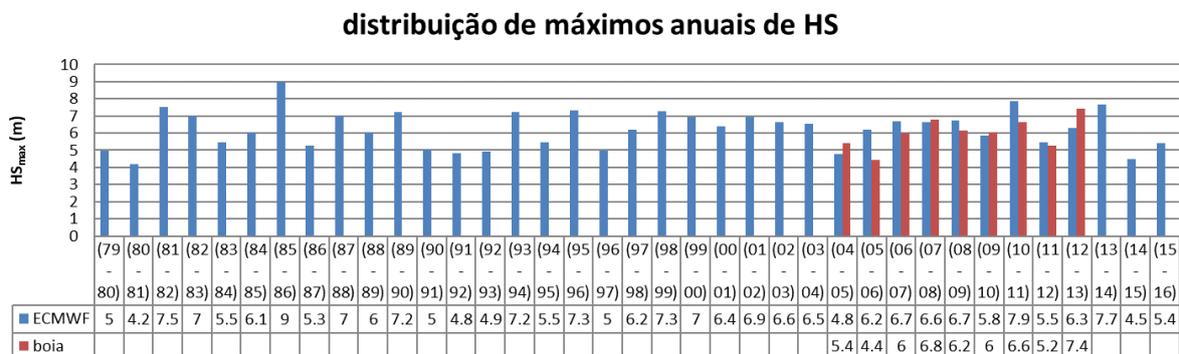


Figura 4.24 – Ponto P. Valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo. Dados obtidos a partir de estimativas do ECMWF (ponto W) e medições na boia de Leixões (ponto L)

Das figuras anteriores e do Quadro 4.2, o regime observado em P é resumido no seguinte:

Com base na transferência de dados estimados pelo ECMWF (ponto W)

Em termos de regime geral observado (ver Quadro 4.2, Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.17):

- 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 (>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 (>5%) verifica-se nas gamas entre 247.5° e 337.5° e as gamas mais frequentes estão entre 270° e 337.5°.

Em termos de regime médio (ver da Figura 4.19 à Figura 4.21, curvas a azul):

- Os valores médios mensais das alturas significativas, HS, Figura 4.19, variam entre 0.97 m e 2.40 m, verificando-se os menores valores nos meses de verão marítimo (abril a setembro) e os maiores nos meses de inverno marítimo (outubro a março), como seria de esperar;
- Os valores médios mensais do período médio, TZ, Figura 4.20, variam entre 6.6 s e 10.6 s, verificando-se igualmente menores valores nos meses de verão marítimo e maiores nos meses de inverno marítimo;

- Os valores médios mensais das direções médias, DIR, Figura 4.21, variam entre 277° e 311° (aproximadamente entre W e WNW). Verifica-se uma ligeira tendência de a direção rodar para WNW nos meses de verão marítimo e para W nos meses de inverno marítimo.

Em termos das médias dos máximos mensais de HS (média das alturas significativas máximas mensais), Figura 4.22 e Figura 4.23, estas variam entre 1.87 m e 5.14 m, verificando-se os menores valores nos meses de verão marítimo e os maiores nos de inverno marítimo.

Em termos de valores máximos anuais de altura significativa, HS, Figura 4.24, por inverno marítimo, verifica-se que estes variam entre 4.2 m e 9.0 m, a que estão associados períodos médios, TZ, entre 9.7 s e 17.1 s e direções médias, DIR, entre 246° e 302° .

Com base na transferência de dados da boia (ponto L)

Em termos de regime geral observado (ver Quadro 4.2, Figura 4.14, Figura 4.16 e Figura 4.18):

- As alturas significativas de onda, HS, estão compreendidas entre 0.0 m e 7.41 m, sendo a média de 1.6 m. A maioria dos valores (>5%) encontra-se entre as gamas de 0.0 a 4.0 m, sendo a gama mais frequente a de 1.0 a 2.0 m;
- Os períodos médios de onda, TZ, apresentam valores entre 3.2 s e 15.3 s, com média igual a 7.0 s. A maioria dos valores encontra-se na gama entre 4 s e 10 s, sendo as gamas com maior frequência entre 5 s e 8 s;
- As direções médias de onda, DIR, estão compreendidas entre 182° e 337° , sendo o valor médio de 298° . A maioria dos valores de direções (>5%) observa-se nas gamas entre 270° e 337.5° e a gama mais frequente é entre 292.5° e 315° .

Em termos de regime médio (ver da Figura 4.19 à Figura 4.21, curvas a castanho-avermelhado):

- Os valores médios mensais das alturas significativas, HS, variam entre 1.16 m e 2.25 m, verificando-se os menores valores nos meses de verão marítimo (abril a setembro) e os maiores nos meses de inverno marítimo (outubro a março), como seria de esperar;
- Os valores médios mensais dos períodos médios, TZ, variam entre 5.9 s e 8.4 s, verificando-se os menores valores no verão marítimo e os maiores no inverno marítimo;
- Os valores médios mensais das direções médias, DIR, variam entre 288° e 308° (aproximadamente entre WNW e NW). Também para esta fonte de dados, verifica-se uma tendência, embora mais ténue do que para os dados ECMWF, de a direção rodar para NW nos meses de verão marítimo e para W nos meses de inverno marítimo.

Quanto às médias dos máximos mensais de HS (médias das alturas significativas máximas mensais), Figura 4.22 e Figura 4.23 (pontos a castanho-avermelhado), estas variam entre 2.32 m e 4.98 m, verificando-se os menores valores nos meses de verão marítimo e os maiores nos meses de inverno marítimo, como seria de esperar.

Em termos de valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo, Figura 4.24, verifica-se que variam entre 4.4 m e 7.4 m, a que estão associados períodos médios, TZ, entre 10.6 s e 13.7 s e direções médias, DIR, entre 269° e 299°.

A partir da análise de resultados anteriores sobre os regimes de agitação marítima no ponto P, e comparando os regimes transferidos com base em cada uma das fontes de dados de agitação marítima (para os pontos W e L, representados nas figuras e quadros a azul e a castanho-avermelhado, respetivamente), destacam-se os seguintes aspetos principais:

Em termos de regime geral observado, no ponto P:

- os resultados obtidos de HS, TZ, e mesmo de DIR, não evidenciam diferenças significativas entre os resultados obtidos em P a partir dos dados ECMWF e da boia, isto é, em geral:
 - Os valores estatísticos são da mesma ordem de grandeza (ver Quadro 4.2);
 - Os histogramas HS-TZ e HS-DIR apresentam uma distribuição de valores, nas diferentes classes, bastante semelhante - ver da Figura 4.15 à Figura 4.18;
 - As gamas de HS mais frequentes (0 m a 4 m) são muito idênticas entre as duas fontes de dados, assim como a gama mais frequente (1 a 2 m) – ver Figura 4.15 e Figura 4.16;
 - As gamas de direções médias, DIR, mais frequentes (>5%), associadas quer aos dados estimados pelo ECMWF quer aos dados da boia, são semelhantes e variam entre 247.5° e 337.5°. A gama de DIR mais frequente é aproximadamente a mesma para os dois conjuntos de dados (de 292.5° a 315°) – ver Figura 4.16 e Figura 4.18;
- Há, no entanto, algumas diferenças a assinalar, nomeadamente (ver Quadro 4.2):
 - Em geral, as gamas de valores de HS, TZ e DIR no ponto P, transferidos dos dados estimados pelo ECMWF, são mais alargadas do que as apresentadas com os dados de boia;
 - As gamas de períodos médios, TZ, associadas aos dados estimados pelo ECMWF são ligeiramente mais extensas do que as associadas aos dados da boia, entre 3.9 s a 17.3 s no caso ECMWF, e entre 3.2 s e 15.3 s no caso da boia.

Em termos de regime médio, no ponto P (ver Figura 4.19 a Figura 4.21)

- Os valores médios mensais de HS são muito semelhantes. No entanto, os valores de P com base nos dados estimados pelo ECMWF são inferiores nos meses de verão marítimo e superiores nos meses de inverno marítimo;
- Os valores médios mensais de TZ apresentam a mesma evolução ao longo do ano para os dois conjuntos de dados de agitação marítima; no entanto, os valores estimados pelo ECMWF são sempre superiores aos correspondentes aos dados da boia;
- Os valores médios mensais de DIR apresentam a mesma evolução para os dois conjuntos de dados e são bastante semelhantes. Em geral, nos meses de verão marítimo os valores

provenientes de ECMWF são mais rodados a norte do que os valores transferidos da boia, enquanto que nos restantes meses passa-se o contrário.

No tocante às médias dos máximos mensais de HS (médias das alturas significativas máximas mensais), Figura 4.22 e Figura 4.23, apesar de se notar significativa variabilidade das amostras de máximos mensais das duas fontes de dados, quer a evolução ao longo do ano quer as próprias médias são bastante idênticas e da mesma ordem de grandeza.

Em termos de valores máximos anuais de altura significativa, HS, por inverno marítimo, Figura 4.24, verifica-se, no período comum (2004-2013), que os valores de HS provenientes dos dois conjuntos de dados são da mesma ordem de grandeza.

Comparando os regimes ao largo e no ponto P, verifica-se:

Regime geral observado (ver Quadro 4.1 e Quadro 4.2):

- Os valores de HS no ponto P sofrem uma pequena redução quando comparados com o largo, devido aos fenómenos da refração e difração das ondas, consequência da variação da batimetria dos fundos. Com efeito, os valores de HS que ao largo atingiam 9.82 m, no ponto W, e 8.82 m no ponto L, passam a ser, no ponto P, no máximo 8.98 m e 7.41 m, respetivamente;
- A gama de valores de TZ alargou-se ligeiramente desde o largo até junto à costa, passando de 4.4 s a 16.7 s (em W, ao largo) para 3.9 s a 17.3 s (no ponto P), isto para o caso dos dados do ECMWF, os mais numerosos e representativos. O mesmo se passa com os dados da boia (de 3.1 s a 14.6 s para 3.2 s a 15.3 s);
- A direção DIR sofre uma rotação no sentido de as ondas se apresentarem mais perpendiculares à batimetria, i.e., verifica-se uma rotação das gamas das direções, de 0° a 360° (em W, ao largo), para 182° a 342° (no ponto P), isto para o caso dos dados do ECMWF, os mais numerosos e representativos. Situação idêntica passa-se com os dados da boia.

Em termos de valores médios mensais, há, conseqüentemente, também uma ligeira redução das alturas significativas de onda, HS, desde o largo (entre 1.38 m e 2.8 m) até junto ao ponto P (0.97 m e 2.25 m) (ver Figura 4.7 e Figura 4.19), mas os períodos, TZ, não variam significativamente (ver Figura 4.8 e Figura 4.20, i.e., ao largo, valores entre 7.0 s e 10.7 s e no ponto P, valores entre 6.6 s e 10.5 s, considerando ECMWF). Quanto às direções verifica-se um ligeiro estreitamento da gama de direções de onda no ponto P e rotação para W, relativo ao largo, em qualquer dos conjuntos de ondas (ver Figura 4.9 e Figura 4.21, i.e., ao largo, valores entre 281° e 307° e no ponto P, valores entre 277° e 308°). Situação semelhante passa-se com os dados da boia.

Em termos das médias dos máximos mensais de HS (média das alturas significativas máximas mensais), Figura 4.22 e Figura 4.23, verifica-se uma redução também dos valores de HS do largo (2.49 m e 5.50 m) para o ponto P (1.87 m e 5.14 m), com base em dados de ECMWF. O mesmo comportamento ocorre quando se considera os dados da boia. Verifica-se também quer ao largo quer junto à costa que os menores valores de HS são nos meses de verão marítimo e os maiores nos de inverno marítimo.

Em termos de valores máximos anuais de HS, verifica-se igualmente uma ligeira redução desde o largo (5.07 m a 9.82 m) até ao ponto P (4.17 m e 8.98 m) (ver Figura 4.12 e Figura 4.24), assim como o aumento dos valores de TZ associados àqueles máximos (largo: 10.3 s e 15.3 s; Ponto P: 9.7 s e 17.1 s) e um estreitamento das direções de onda no ponto P (largo: 241° e 327°; Ponto P: 246° e 302°), com base em dados de ECMWF. Esta constatação também é notória no caso dos valores transferidos com base nos dados provenientes da boia.

Em geral, os regimes de agitação com base nas duas fontes de dados são mais próximos no ponto P do que ao largo.

5 | Conclusões

O presente trabalho consistiu na caracterização dos regimes de agitação marítima na zona adjacente ao Porto de Leixões. Assim, caracterizaram-se os regimes de agitação marítima ao largo do Porto de Leixões e na zona do futuro prolongamento do quebra-mar exterior.

A definição do regime de agitação marítima ao largo do Porto de Leixões baseou-se em dados obtidos de duas fontes distintas: dados medidos na boia de Leixões, ao longo de um período de cerca de 10 anos (2004-2013) e dados estimados pelo modelo de *hindcast* WAM (WAMDI Group, 1988) do Centro Europeu de Previsão Meteorológica a Médio Prazo (ECMWF), num ponto também ao largo, ao longo de um período de 38 anos (1979-2016).

Para obter a caracterização local da agitação marítima, usaram-se os dados referidos e uma metodologia de transferência que utiliza o modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999 e Booij *et al.*, 2006). Este foi, assim, usado para transferir o regime ao largo para o designado ponto P, definidor da zona do futuro prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões, à cota batimétrica aproximada de -20 m (ZHL). Após essa transferência, calcularam-se os regimes de agitação marítima nesse ponto, para os dois conjuntos de dados de agitação marítima. Estes regimes serão posteriormente utilizados nos estudos de agitação em modelo físico do Estudo I, bem como nos Estudos II e III.

Da análise dos regimes gerais observados obtidos quer ao largo (pontos W e L) quer junto ao Porto de Leixões (ponto P), pôde concluir-se o seguinte:

- Os valores de HS no ponto P sofrem uma pequena redução quando comparados com o largo, devido aos fenómenos da refração e difração das ondas, consequência da variação da batimetria dos fundos. Em especial, os valores de HS máximos que ao largo atingiram 9.82 m, no ponto W, e 8.82 no ponto L, sofrem uma redução de aproximadamente 1 m, em P, obtendo-se neste ponto valores máximos de 8.98 m e 7.41 m, respetivamente;
- Do largo até junto à costa os valores de TZ mantiveram-se dentro de uma gama aproximada de 4 s a 17 s, para o caso dos dados ECMWF. A gama é ligeiramente menos extensa para os dados da boia (de 3 s a 15 s);
- A direção DIR sofre, como esperado, uma rotação no sentido de as ondas se apresentarem mais perpendiculares à batimetria, i.e., há uma rotação das gamas das direções, de 0° a 360° (em W, ao largo), para 180 a 342° (no ponto P), isto para o caso dos dados do ECMWF, os mais numerosos e representativos. Situação idêntica passa-se com os dados da boia.

Em termos de valores médios, há, conseqüentemente, também uma ligeira redução das alturas significativas de onda, HS, desde o largo até junto à costa, mas os períodos, TZ, não variam

significativamente. Quanto às direções de onda, verifica-se um ligeiro estreitamento da gama de direções de onda no ponto P e rotação para W, relativo ao largo, em qualquer dos conjuntos de dados.

Em termos de valores máximos anuais de HS, verifica-se igualmente uma ligeira redução desde o largo até junto à costa, assim como o aumento dos valores de TZ associados àqueles máximos e um estreitamento das direções no ponto P.

Lisboa, LNEC, abril de 2017

VISTO

 Diretora do Departamento de Hidráulica e
Ambiente



Helena Alegre

AUTORIA



Rui Capitão
Investigador Auxiliar



Liliana Pinheiro
Bolsista de Pós-Doutoramento



Conceição Juana Fortes
Investigadora Principal
Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas
Marítimas

Referências bibliográficas

- BOUIJ, 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.
- BOUIJ, N.; RIS, R.C.; HOLTHUIJSEN, L.H., 1999 – **A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model Description and Validation**. Journal of Geophysical Research, 104 (C4), 7649-7666.
- FLATER D., 1998 – **Xtide: harmonic tide clock and tide predictor**. <http://www.flaterco.com/xtide/>
- IHRH, 2013 – **Projeto de criação de um novo terminal para contentores no Porto de Leixões**. Relatório final, janeiro, Porto.
- PINHEIRO, L.; SANTOS, J.A.; FORTES, C.J.E.M.; CAPITÃO, R., 2007 – **SOPRO – Pacote integrado de modelos para avaliação dos efeitos das ondas em portos**. Revista da Tecnologia da Água, Edição I, Março.
- WAMDI Group, 1988 – **The WAM model-a third generation ocean wave prediction model**. J. Phys. Oceanogr. 18: 1775–1810.

