

MONITORIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA, SEDIMENTAR E BATIMÉTRICA DO TRECHO COSTEIRO BARRA-VAGUEIRA: CORRELAÇÃO COM A AGITAÇÃO E INTERVENÇÕES COSTEIRAS

Bárbara MARINHO¹; Carlos COELHO²; Magnus LARSON³; Hans HANSON⁴

RESUMO

O troço costeiro Barra-Vagueira, localizado no distrito de Aveiro, na costa NW de Portugal, integra uma das principais zonas do litoral português fortemente afetadas pelo fenómeno erosivo. Este sector caracteriza-se pelo acentuado recuo da linha de costa e pela presença de um frágil e extenso cordão dunar, que separa o ambiente lagunar e o mar. Perante este cenário, como resultado das intervenções realizadas no âmbito de dois projetos desenvolvidos pela Administração do Porto de Aveiro (APA), entre 2009 e 2013, campanhas de monitorização ambiental foram levadas a cabo neste sector costeiro. Nesse contexto, foram definidos 12 perfis transversais de praia distanciados 1km entre si, desde uma seção localizada a 1000m a barlar do molhe Norte da Barra, até à praia da Vagueira. Assim, com base nos levantamentos topográficos anuais recolhidos para cada uma dessas seções, procedeu-se à análise do comportamento morfodinâmico dos perfis transversais ao longo do tempo, considerando as intervenções costeiras que ocorreram durante o período de monitorização: operações de dragagem na zona do canal da Barra, de deposição de areias e prolongamento do molhe Norte da Barra. Complementarmente, dados do clima de agitação da boia-ondógrafo de Leixões foram analisados no período compreendido entre campanhas de campo, correlacionando o efeito das ondas com a dinâmica sedimentar registada pelos levantamentos. Entre outros resultados, o estudo desenvolvido sobre a dinâmica sedimentar do trecho costeiro Barra-Vagueira permitiu tirar conclusões sobre: a influência da sazonalidade na morfologia do perfil, a zona do perfil suscetível de sofrer maiores variações de volumes, as zonas/perfis mais ou menos afetadas pelos processos erosivos, os intervalos compreendidos entre levantamentos que registaram as maiores acumulações de sedimentos e os períodos mais energéticos em termos de agitação, que conduziram a maiores perdas de sedimentos no setor costeiro em estudo.

Palavras-chave: Aveiro; clima de agitação; alimentação artificial; dinâmica sedimentar; perfis transversais.

¹ Mestre e Aluna de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro; Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal; barbamarinho@ua.pt, Telefone: +351 234 370 098.

² Doutor e Professor Auxiliar; Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro; Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal; ccoelho@ua.pt, Telefone: +351 234 370 098.

³ Doutor e Professor Titular; Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, LTH, Box 118, SE-221 00 Lund, Suécia; magnus.larson@tvrl.lth.se, Telefone: +46 46 222 87 29.

⁴ Doutor e Professor Titular; Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, LTH, Box 118, SE-221 00 Lund, Suécia; hans.hanson@tvrl.lth.se, Telefone: +46 46 222 89 87.

1. INTRODUÇÃO

Parte do conhecimento adquirido para dimensionamento de alimentações artificiais de praia advém de resultados de experiências anteriores, provenientes de observações sistemáticas da morfologia e batimetria de áreas intervencionadas. Os objetivos de campanhas de monitorização destas áreas centram-se no acompanhamento da funcionalidade do projeto executado, bem como na avaliação da sua performance envolvendo trabalhos de recolha, análise e interpretação de dados de campo. Este tipo de campanhas requer levantamentos batimétricos de perfis de praia e uma avaliação desses dados de modo a registar a evolução e estabilidade da alimentação realizada. Idealmente, planos de monitorização envolvem uma série de levantamentos batimétricos para um conjunto de secções transversais à costa localizadas ao longo do comprimento da área do projeto, estando o número destas secções transversais dependente da magnitude do projeto e da presença de estruturas que controlam ou condicionam o transporte sedimentar longitudinal (por exemplo, esporões). Geralmente, os levantamentos de campo iniciam-se em zona terrestre onde não são esperadas alterações a longo prazo na forma da praia/duna e prolongam-se até uma profundidade no mar em que as diferenças entre o perfil de praia de equilíbrio (após alimentação) e o perfil inicial são mínimas (Mark *et al.*, 2003 e Haney *et al.*, 2007).

O presente estudo teve como principal objetivo a análise da evolução morfológica, sedimentar e batimétrica do trecho costeiro Barra-Vagueira tendo por base um conjunto de dados topográficos fornecidos pela Administração do Porto de Aveiro (APA) sobre a área de estudo, no período compreendido entre 2009 e 2013. Foram analisados e comparados vários levantamentos topográficos anuais para 12 perfis transversais de praia distanciados 1km entre si, desde uma seção localizada a 1000m a barlar do molhe Norte da Barra, até à praia da Vagueira, considerando as intervenções costeiras que decorreram durante o período de monitorização. Complementarmente, uma análise estatística dos dados do clima de agitação de Leixões (obtida através dos registos da boia-ondógrafo de Leixões) no período compreendido entre campanhas de campo foi também efetuada, correlacionando o efeito das ondas com a dinâmica sedimentar registada pelos levantamentos. Como resultado foram reconhecidos padrões de comportamento temporal e espacial que ajudam a identificar características do perfil de praia em resposta às operações realizadas.

2. ÁREA DE ESTUDO: TRECHO COSTEIRO BARRA-VAGUEIRA

O trecho costeiro Barra-Vagueira, com cerca de 10km de extensão, localiza-se na costa NW de Portugal, e está aproximadamente centrado no trecho do litoral arenoso compreendido entre Espinho e o Cabo-Mondego (Figura 1). A topografia deste troço costeiro é regular, com batimétricas aproximadamente paralelas à linha de costa, verificando-se uma exceção deste padrão na zona de proximidade da ligação da Ria de Aveiro ao mar, através do canal artificial fixado pelos molhes que permitem o acesso ao Porto de Aveiro (Rosa *et al.*, 2012).

Atualmente, a zona costeira em estudo, marcada pela presença de um extenso e frágil cordão dunar, praias arenosas de cotas baixas e desenvolvimento paralelo à laguna de Aveiro, enquadra-se numa unidade de litoral fortemente afetada pelo fenómeno de erosão costeira. O elevado défice de fornecimento de sedimentos, resultante do progressivo enfraquecimento das fontes aluvionares é a principal causa de erosão (Coelho *et al.*, 2009). Com a reduzida quantidade de sedimentos disponível para transporte, as areias das praias tornaram-se um dos alimentos da deriva litoral, o que tem contribuído para um acentuado

reco da posição da linha de costa. Este facto, que resulta no perigo eminente de rotura da restinga que separa a laguna de Aveiro do mar, associado à elevada exposição das frentes urbanas costeiras faz com que este troço seja classificado como uma área de risco elevado.

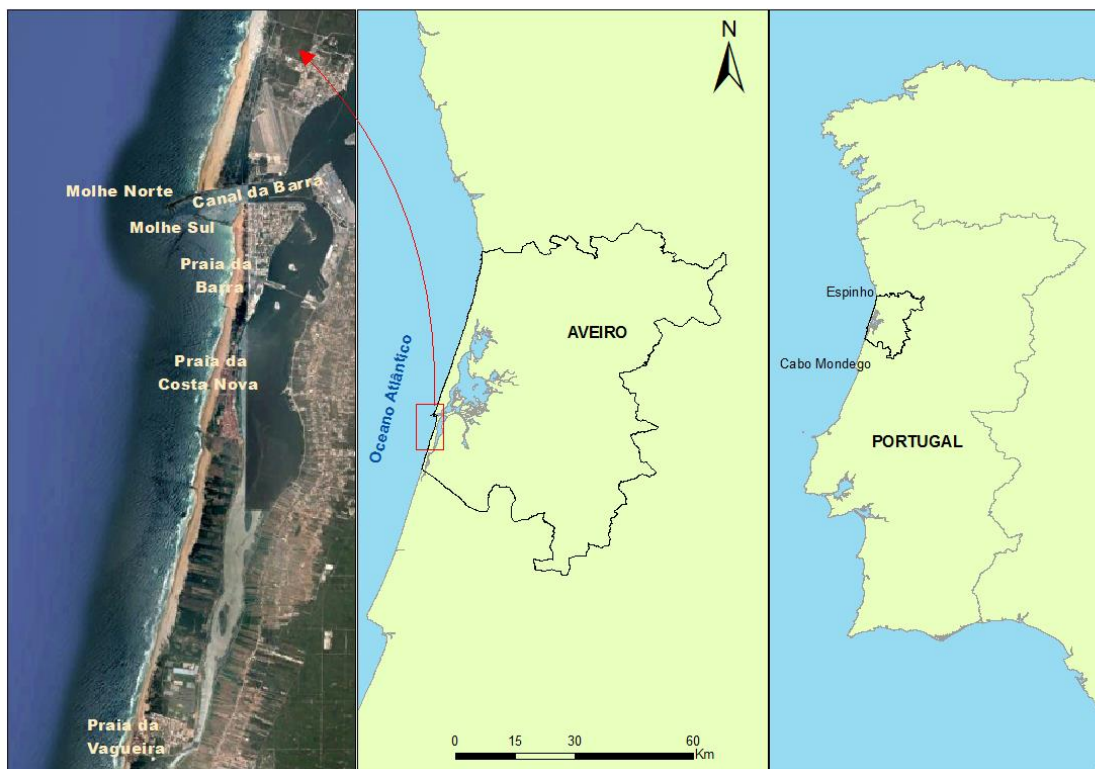


Figura 1 – Localização da zona de estudo.

Em termos de dinâmica sedimentar, verifica-se que a norte do molhe norte do Porto de Aveiro a deriva litoral encontra-se saturada, apresentando uma acumulação de areias na face norte do quebramar norte. Em contraste, a sul do molhe sul, devido ao escasso fornecimento natural de sedimentos resultantes do défice sedimentar e da interrupção do transporte sedimentar longitudinal induzida pelos quebramares do Porto de Aveiro, é possível visualizar uma erosão acentuada atestada pelo significativo recuo da linha de costa (ver Figura 1). De acordo com o SNIRLit (2015), este trecho apresenta um balanço geral sedimentar negativo, controlado pelo campo de esporões da Costa Nova e pela obra aderente e campo de esporões da praia da Vagueira. A Figura 1 ilustra a descontinuidade da linha de costa no canal da Barra.

Perante este cenário, com o objetivo de controlar a erosão costeira ao longo do trecho Barra-Vagueira e reforçar o cordão dunar existente, foram realizadas pela APA alimentações artificiais de areias neste sector. Estas operações decorreram no âmbito de dois projetos: “Dragagem do canal da Barra e reforço do cordão dunar” (2009-2012) e “Reconfiguração da Barra do Porto de Aveiro” (2012-2013). A primeira empreitada de intervenção envolveu trabalhos de dragagem na ordem dos 1×10^6 m³ de areia na região do canal da Barra (até à cota -12.5 m) e a deposição do material resultante no trecho sul, na parte submersa adjacente às praias da Costa Nova, entre as batimétricas -2 m (Z.H.) e -5 m (Z.H.), limitada

pelo 3º e 5º esporão (zona 2, ver Figura 2). No segundo projeto, que correspondeu ao prolongamento do molhe norte numa extensão de 200 metros, para melhoria das condições do canal de navegação da Barra, duas áreas de deposição de sedimentos foram definidas: (1) a Sul do quebramar Sul (zona 1), e (2) entre o 3º e o 5º esporão da Costa Nova (zona 2). O material depositado nestas áreas resultou de operações de dragagem do canal da Barra e da construção do prolongamento do molhe norte. Na Tabela 1 é possível consultar as quantidades do material dragado, a respetiva proveniência e as datas da deposição de areias resultantes das duas empreitadas (Porto de Aveiro, 2012; Porto de Aveiro, 2013).

Tabela 1. Datas, quantidades e proveniência do material dragado entre 2009 e 2013 (Porto de Aveiro, 2013).

Quantidades do material dragado (m ³)	Proveniência do material dragado	Data da dragagem/deposição
999 224	Canal de navegação	19/04/2009 a 15/05/2009; 20/09/2009 a 27/10/2009
169 218	Construção do molhe	13/06/2012 a 22/06/2012
66 725	Construção do molhe	05/2013
1 259 834	Canal de navegação	28/06/2013 a 30/06/2013; 1/07/2013 a 22/07/2013
97 724	Canal de navegação	5/10/2013 a 18/19/2013
101 573	Canal de navegação	11/2013

Considerando todas as intervenções levadas a cabo neste sector costeiro, a Administração do Porto de Aveiro (APA) desenvolveu um programa de monitorização para a área de estudo. Entre outros trabalhos, o programa de monitorização compreendeu o levantamento hidrográfico da área de dragagem, levantamento topo-hidrográfico das áreas de deposição e levantamentos transversais batimétricos para 12 perfis de praia, espaçados aproximadamente 1km entre si, desde uma secção localizada a 1000 metros da face norte do molhe norte até à Praia da Vagueira. Os levantamentos topo-hidrográficos transversais iniciaram-se em Setembro de 2009, antes do segundo período de alimentação realizada em 2009 e continuaram até Novembro de 2013, com frequência aproximadamente anual. A Tabela 2 apresenta as datas de realização dos levantamentos batimétricos, identificando também os perfis afetados pelas campanhas de monitorização de cada ano.

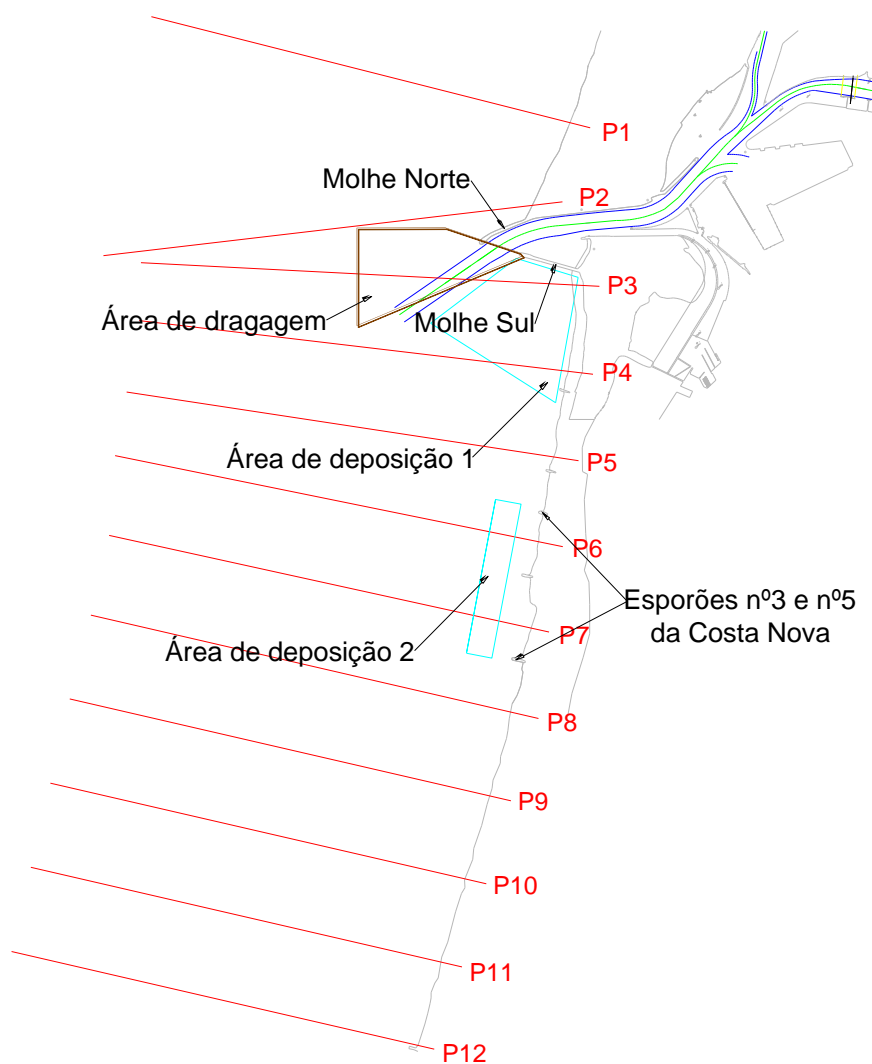
A Figura 2 mostra a localização em planta das várias secções transversais definidas ao longo do troço costeiro em estudo. Na Figura 3 apresentam-se os levantamentos batimétricos realizados para os 12 perfis transversais, sendo que dois localizam-se a norte do Porto de Aveiro (P1 e P2), um intercepta a zona do canal de navegação (P3) e os restantes situam-se a sul do molhe sul (P4 a P12). Em cada perfil também é identificada a localização do intervalo comum que intersecta todos os levantamentos realizados.

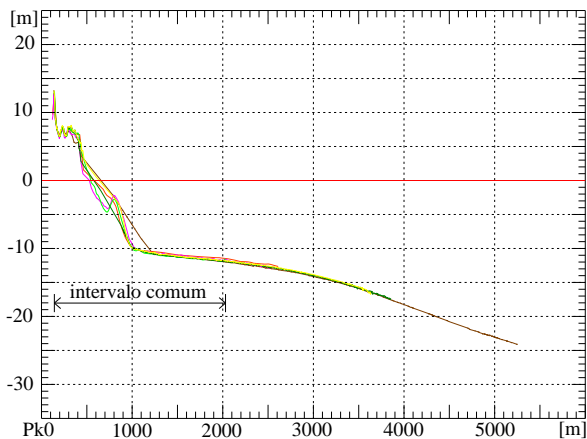
3. ANÁLISE DOS DADOS DE CAMPO – INTERVENÇÕES COSTEIRAS

Para análise da resposta de cada perfil transversal face aos trabalhos de dragagem e alimentação realizados no trecho costeiro Barra-Vagueira procedeu-se a uma avaliação preliminar da dinâmica sedimentar tendo por base a evolução dos perfis no tempo.

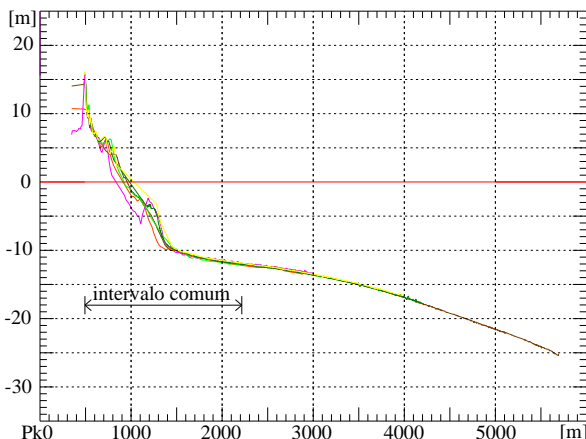
Tabela 2. Datas dos levantamentos realizados durante o período de monitorização.

Datas dos levantamentos	Perfis
20 de Setembro de 2009	P1 a P12
29 de Outubro de 2009	P5 a P8 (área de deposição)
1 de Dezembro de 2010	P1 a P12
1 de Novembro de 2011	P1 a P12
1 de Novembro de 2012	P1 a P12
26 de Junho de 2013	P1 a P12
26 de Novembro de 2013	P1 a P12

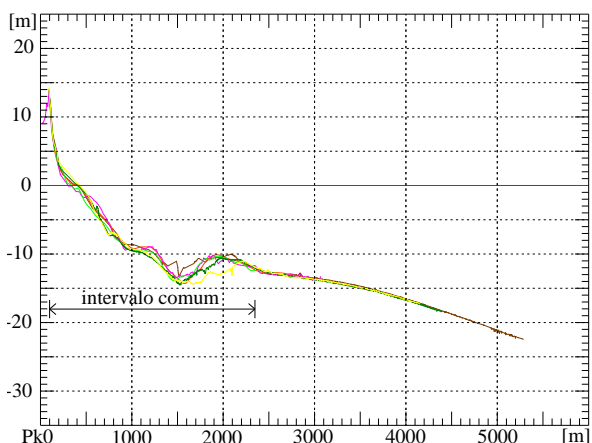
**Figura 2.** Localização em planta dos perfis transversais e das áreas de dragagem e de deposição.



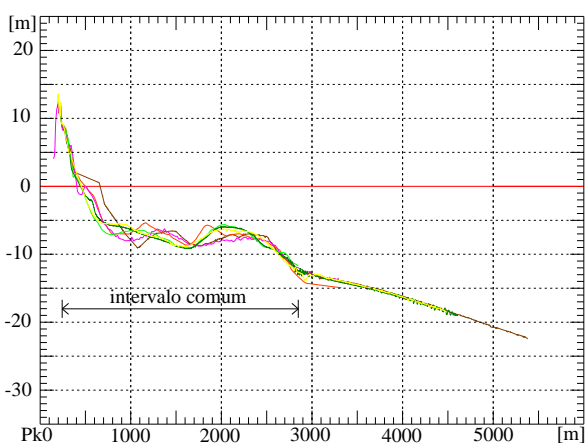
a) Perfil P1



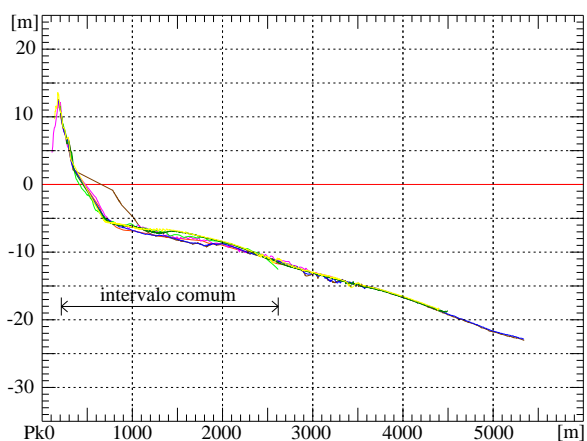
b) Perfil P2



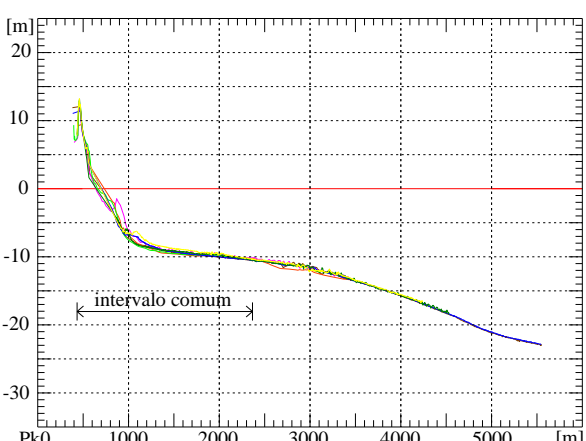
c) Perfil P3



d) Perfil P4



e) Perfil P5



f) Perfil P6

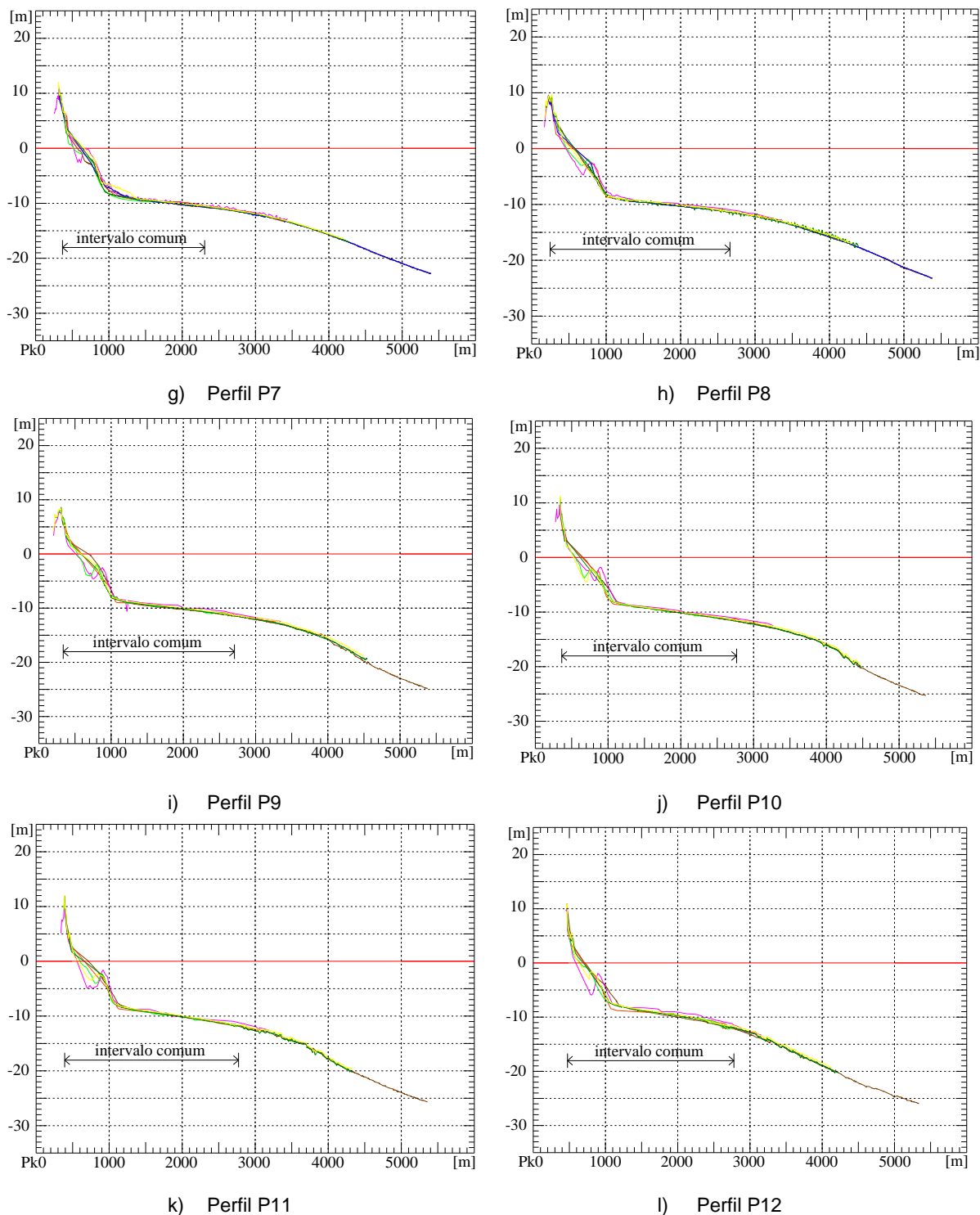


Figura 3. Levantamentos topográficos dos 12 perfis transversais de praia (Porto de Aveiro, 2012).

Assim, o primeiro passo consistiu na definição de um intervalo transversal comum às várias medições topográficas de cada perfil de modo a tornar possível a comparação da morfologia ao longo do tempo. Cada perfil foi dividido em duas secções (secção acima e abaixo do Z.H.) e analisado o seu comportamento, em termos de movimentação sedimentar (erosão ou assoreamento). Os resultados obtidos são apresentados em seguida, seccionados em 2

intervalos de tempo: Setembro 2009 a Novembro 2011 e Novembro 2011 a Novembro de 2013. Esta separação foi adotada devido aos trabalhos de dragagem e alimentação realizados na área de estudo durante o segundo período (2011-2013), pelo que o primeiro período foi apenas solicitado pela agitação marítima.

3.1 Período de monitorização: Setembro de 2009 a Novembro de 2011

Através da análise individual realizada para cada perfil transversal e da compilação dos resultados na Tabela 3, é possível elaborar algumas considerações acerca do comportamento transversal e longitudinal do troço abrangido pelos levantamentos:

- Quase todos os perfis transversais apresentam um saldo sedimentar negativo, com a exceção dos perfis que intercetam a área de deposição dos sedimentos (P6 e P7) e o perfil localizado imediatamente a sul (P8), indicando tendência de erosão;
- O Perfil P5 apresenta uma redução substancial de área entre os levantamentos batimétricos de Setembro de 2009 e Outubro de 2009 (cerca de 2 066 m²). Esta perda significativa de sedimentos pode estar associada a erros de levantamentos;
- Os perfis situados a norte da zona de deposição de areias apresentam no final de 2011, em comparação com 2009, substancial erosão (média de 906 m² por perfil);
- Para perfis em que o balanço sedimentar acima e abaixo do zero hidrográfico é negativo, a maior percentagem de perda de sedimentos ocorre na parte submersa (à exceção do P4 e P10). Esta percentagem varia entre 69% e 93%, consoante o perfil e o ano de monitorização em questão;
- No caso de perfis com balanços sedimentares positivos acima e abaixo do Z.H. (apenas o P7), a maior percentagem de ganho de sedimentos ocorre na zona submersa e corresponde a 63% do acréscimo total;
- Nos casos mencionados nos dois pontos anteriores, a parte submersa do perfil assume-se mais dinâmica do que a zona emersa, uma vez que sofre maiores variações sedimentares;
- Os perfis intercetados pela zona de deposição do material dragado (P6 e P7) e o perfil localizado imediatamente a sul (P8), não apresentam balanço sedimentar negativo, correspondendo a um aumento de 974 m² no total dos 3 perfis. O P7 é o perfil que regista maior acumulação sedimentar (aumento de 607 m²).
- O período de tempo que decorreu entre Dezembro de 2010 e Novembro de 2011 foi em termos gerais o mais positivo, proporcionando uma acumulação sedimentar total no troço costeiro em estudo na ordem de 411 m². Contrariamente, o primeiro ano de monitorização (2009/2010) foi o ano que registou maior erosão (cerca de 5 565 m² de área perdida).
- Zona emersa vs zona submersa do perfil transversal: No período entre 2009/2010 verifica-se que os perfis P1 a P5 (exceto o P2) e P11 apresentaram abaixo do Z.H. maior erosão comparativamente com a parte emersa do perfil, enquanto a partir do P6 e até ao P12 (à exceção do P11) a situação inverte-se, registando-se na zona submersa acumulação de sedimentos. No segundo ano de observação (2010/2011) verifica-se que na generalidade dos casos (à exceção do P1, P4 e P8) a parte submersa do perfil sofre erosão ao passo que a zona superior do perfil apresenta acumulação (exceto o P5 que detém um balanço negativo em ambas as partes).
- Finalmente, avaliando o comportamento dos perfis, comparando as suas características iniciais em 2009 com as de 2011, conclui-se que a área abaixo do Z.H. é a mais afetada pelo fenómeno erosivo (exceto P4, P7, P8 e P10).

- Durante o período de monitorização (2009/2011), a quantidade total de sedimentos perdidos no sistema costeiro foi na ordem dos 5 245 m².

Tabela 3. Variação da área do perfil transversal entre Setembro de 2009 e Novembro de 2011 (valores negativos significam redução de área).

Perfil	Variação de área (m ²)			Taxa de variação mensal (m ² /mês)			Elevação média (m ² /m)
	Acima Z.H.	Abaixo Z.H.	Total	Acima Z.H.	Abaixo Z.H.	Total	
P1	-61	-768	-829	-2.42	-30.74	-33.16	-0.44
P2	-151	-460	-611	-6.05	-18.4	-24.45	-0.35
P3	-72	-599	-671	-2.86	-23.96	-26.82	-0.3
P4	-256	-110	-366	-10.24	-4.4	-14.64	-0.14
P5	-241	-1812	-2053	-9.63	-72.49	-82.12	-0.85
P6	73	-7	67	2.93	-0.27	2.66	0.03
P7	225	382	607	8.98	15.29	24.27	0.31
P8	-240	540	301	-9.59	21.62	12.02	0.12
P9	-23	-203	-226	-0.91	-8.14	-9.05	-0.1
P10	-88	-85	-173	-3.51	-3.41	-6.92	-0.07
P11	-125	-631	-756	-5	-25.25	-30.24	-0.32
P12	-165	-369	-534	-6.58	-14.76	-21.35	-0.23
Total	-1 122	-4 123	-5 245	-44.89	-164.9	-209.79	-2.33

3.2 Período de monitorização: Novembro de 2011 a Novembro de 2013

A mesma análise foi realizada para o segundo período de monitorização (Tabela 4):

- O período compreendido entre 2011 e 2012 foi um período essencialmente marcado pela erosão em quase todos os perfis (à exceção de P2 e P5). Este facto deve-se provavelmente ao efeito dos trabalhos de extensão do molhe norte que decorreram durante esse intervalo, contribuindo para a acumulação de sedimentos na face norte do molhe construído (em P2) e erosão generalizada dos perfis situados a sul;
- Contrariamente, os intervalos de monitorização seguintes mostram saldos sedimentares positivos (períodos que sentiram o efeito da sazonalidade e que foram alvo de várias alimentações, ver Tabela 1). Entre 2012 e Junho de 2013 verificou-se um acumular elevado de sedimentos (tendo-se identificado apenas erosão nos perfis P3 e P6). O período entre Junho de 2013 e Novembro de 2013, por ter sido mais curto (5 meses), foi o que apresentou taxas de assoreamento médias mensais superiores para a maioria dos perfis.
- Em termos gerais (entre 2011 e 2013), a maioria dos perfis transversais (com exceção do P3, P4, P8 e P10) mostra um balanço sedimentar positivo. Este saldo deve-se essencialmente aos trabalhos de dragagem e de deposição de areias, bem como de prolongamento do molhe norte. Como o perfil P3 intercepta o canal de navegação da Barra é esperado que o seu saldo sedimentar seja negativo, uma vez que abrange a zona onde decorrem as operações de dragagem;
- Os perfis P2, P5, P6, P7 e P11 apresentam elevadas taxas de assoreamento mensais (média de 35 m²/mês) entre 11/2011 e 11/2013.
- O perfil P2 é o que apresenta a maior acumulação de sedimentos, revelando um aumento de área total de 1 938 m².

- Durante o período de monitorização 2011-2013, a quantidade total de sedimentos acumulados no sistema costeiro foi na ordem dos 2 605 m².

Tabela 4. Variação da área do perfil transversal entre Novembro de 2011 e Novembro de 2013.

Perfil	Variação de área (m ²)			Taxa de variação mensal (m ² /mês)			Elevação média (m ² /m)
	Acima Z.H.	Abaixo Z.H.	Total	Acima Z.H.	Abaixo Z.H.	Total	
P1	214	135	349	8.55	5.41	13.96	0.18
P2	448	1 490	1 938	17.92	59.61	77.53	1.13
P3	228	-1 468	-1 239	9.14	-58.71	-49.57	-0.55
P4	-4	-790	-794	-0.17	-31.60	-31.76	-0.30
P5	99	1 021	1 120	3.97	40.82	44.79	0.47
P6	0	595	595	0.00	23.82	23.81	0.31
P7	94	591	686	3.77	23.66	27.43	0.35
P8	221	-390	-169	8.85	-15.61	-6.76	-0.07
P9	-116	177	61	-4.64	7.08	2.44	0.03
P10	-159	-512	-671	-6.38	-20.48	-26.86	-0.28
P11	-72	714	643	-2.88	28.58	25.70	0.27
P12	-78	165	87	-3.14	6.61	3.47	0.04
Total	875	1 730	2 605	35.00	69.19	104.19	1.57

4. CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DE AGITAÇÃO

Caracterizar e avaliar o regime de agitação marítima nos diversos períodos que separam os vários levantamentos batimétricos serve para compreender melhor a influência da agitação marítima (principal agente natural modelador da costa) no transporte sedimentar. De forma geral, a costa ocidental portuguesa, onde se insere a região litoral de Aveiro, está muito exposta à ondulação gerada no Atlântico Norte. As ondas de NW são as mais frequentes na costa ocidental portuguesa, ocorrendo durante cerca de 80% do ano. Já a altura das ondas é superior a 1 m em cerca de 85% do ano (Pires, 1989).

Para caracterizar o regime de agitação no período das campanhas de monitorização, utilizaram-se os dados recolhidos pela boia-ondógrafo de Leixões, localizada na costa norte de Portugal, a cerca de 78km de Aveiro (Lat = 41° 19' 00" N; Long = 8° 59' 00" W), a uma profundidade de 83 metros (IH, 2015).

Para efeitos de tratamento estatístico considerou-se que registos com intervalos de recolha inferiores às 3 horas habituais e com alturas de ondas máximas superiores a 5 metros correspondem a registos de temporal. Quando a interrupção entre esses registos é superior à duração de um ciclo de maré (12.42 horas), definiu-se que essa mesma interrupção corresponde à divisão de 2 tempestades. Considerou-se ainda que, o temporal seria persistente se pelo menos 10 registos de temporal ocorrerem durante um período igual ou superior a 8 horas (Coelho, 2005).

O número de registos disponibilizados pelo IH, respeitantes ao período da campanha de monitorização é bastante satisfatório. A Figura 4 representa graficamente os registos de altura de onda significativa adquiridos em intervalos de 3 horas (situação normal de aquisição de dados) desde Janeiro de 2009 até Dezembro de 2013 com a indicação simultânea dos marcos dos levantamentos topo-hidrográficos.

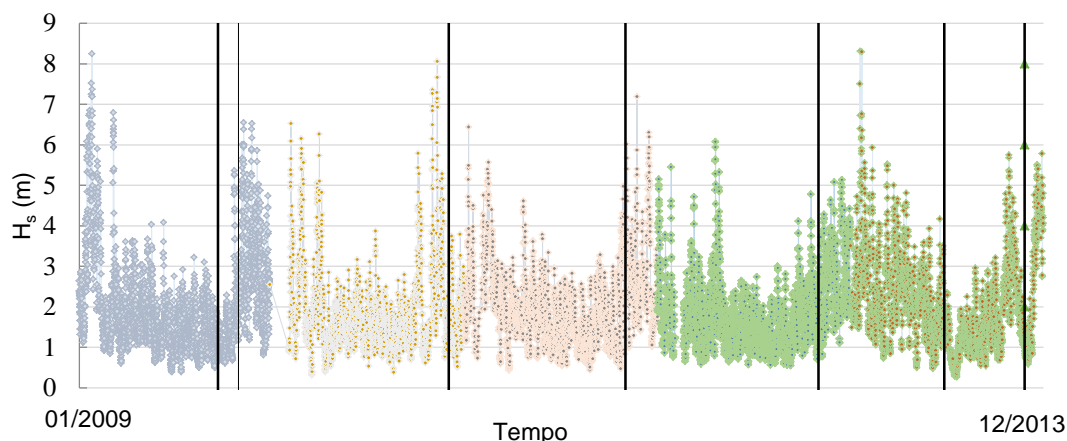


Figura 4. Registos de altura de onda significativa entre Janeiro de 2009 e Dezembro de 2013, com indicação dos marcos dos levantamentos topográficos (linhas verticais).

Tendo em consideração todos os levantamentos efetuados é possível definir 6 intervalos de tempo que interessam caracterizar em termos do clima de agitação, nomeadamente de 20 de Setembro 2009 a 29 de Outubro 2009 ($\Delta T1$), 29 de Outubro de 2009 a 1 de Dezembro de 2010 ($\Delta T2$), 1 de Dezembro de 2010 a 1 de Novembro de 2011 ($\Delta T3$), 1 de Novembro de 2011 a 1 de Novembro de 2012 ($\Delta T4$), 1 de Novembro de 2012 a 26 de Junho de 2013 ($\Delta T5$) e 26 de Junho de 2013 a 26 de Novembro de 2013 ($\Delta T6$). Como as durações dos intervalos entre as datas dos levantamentos são diferentes torna-se necessário ter algum cuidado na interpretação dos resultados. A Tabela 5 apresenta o número de registos analisados em situação normal e de temporal persistente para cada intervalo de tempo.

Tabela 5. Número de registos de ondas para os vários intervalos de tempo entre levantamentos.

	$\Delta T1$	$\Delta T2$	$\Delta T3$	$\Delta T4$	$\Delta T5$	$\Delta T6$	TOTAL
Meses	1	13	11	12	8	5	50
STP	32	902	221	515	553	124	2347
SN	300	2779	2502	2708	1787	1215	11291

*STP=Situação de tempestade persistente e SN= Situação normal

O intervalo $\Delta T2$ (maior período entre levantamentos) é o que detém maior número de registos em situação normal e de temporal persistente. Já o intervalo $\Delta T1$ como tem duração de 1 mês aproximadamente, é o que detém menos registos. No total foram analisados 2347 registos em situação de temporal persistente e 11291 registos em situação normal (intervalos de 3 horas). A análise efetuada apresenta-se em seguida dividida por rumos, alturas significativas e períodos de onda.

4.1 Distribuição da direção de onda

A Tabela 6 mostra os resultados do tratamento estatístico efetuado sobre os registos da direção média da onda (associada ao período de pico) em situação de temporal persistente (STP) e em situação normal (SN) no período compreendido entre 20 de Setembro 2009 e 26 de Novembro de 2013.

Em termos gerais de distribuição de rumos verifica-se, desde a data de início dos levantamentos até Novembro de 2013, que a ondulação proveniente do sector NW é o que

apresenta maior frequência de ocorrência (cerca de 45% dos registos), seguindo-se os quadrantes WNW e NNW com 27.7% e 12.4% das observações, respetivamente. Contudo, em cenário de temporal estes sectores assumem outro relevo já que as percentagens de ocorrência dos sectores NW e WNW aumentam para 60.5% e 28.0%, respectivamente, e o quadrante NNW diminui o seu significado para 1.2%.

Tabela 6. Distribuição da direção da onda em SPT e SN (entre $\Delta T1 - \Delta T6$).

Rumo	$\Delta T1$		$\Delta T2$		$\Delta T3$		$\Delta T4$		$\Delta T5$		$\Delta T6$	
	STP (%)	SN (%)	STP (%)	SN (%)	STP (%)	SN (%)	STP (%)	SN (%)	STP (%)	SN (%)	STP (%)	SN (%)
NNW	0.0	3.7	0.6	12.8	0.5	11.7	5.0	11.7	0.7	13.2	1.6	15.3
NW	100.0	36.3	54.5	36.6	41.2	49.2	83.3	47.9	53.2	44.2	66.1	52.5
WNW	0.0	40.0	31.5	29.0	44.8	26.1	9.7	27.5	35.6	28.3	21.0	23.8
W	0.0	9.0	8.5	13.6	6.3	7.5	1.9	7.5	7.6	9.9	8.9	4.0
WSW	0.0	9.7	2.5	3.5	2.3	2.6	0.0	3.0	2.9	2.4	2.4	3.0
SW	0.0	1.3	1.9	3.6	4.5	2.2	0.0	2.1	0.0	1.5	0.0	1.0
SSW	0.0	0.0	0.4	0.8	0.5	0.6	0.0	0.3	0.0	0.6	0.0	0.3

Relativamente ao intervalo $\Delta T1$, por ser o período mais curto e decorrer essencialmente num período de transição verão-inverno (período em que a distribuição de rumos está mais rodada a sul) a importância do quadrante NW é mais reduzida e o conjunto dos quadrantes WSW, SW e SSW ultrapassa 10% dos registos. O maior período entre levantamentos ($\Delta T2$) regista a segunda menor percentagem de ondas provenientes do sector NW (36.6% das observações desse intervalo), ao mesmo tempo que apresenta maior frequência do conjunto dos sectores WSW, SW e SSW (7.8% dos registos). A representatividade do sector de NW é mais significativa no período $\Delta T6$ (52.5% das observações), uma vez que se refere maioritariamente a meses de verão (Julho, Agosto, Setembro) e de transição (Outubro e Novembro).

Na situação de temporal persistente, à exceção do intervalo $\Delta T1$ que conta com apenas 32 registos correspondentes a uma tempestade de duração igual a 21 horas (altura de onda significativa média igual a 5.1 m), o intervalo com maior predominância do sector NW é o intervalo $\Delta T4$ (83.3% dos registos). O intervalo $\Delta T3$ é o único intervalo que assume o sector WNW como dominante (44.8% dos registos), excedendo assim a percentagem de ondas oriundas de NW (cerca de 41.2% dos registos).

4.2 Distribuição das alturas e períodos de onda

Para uma melhor comparação da distribuição das alturas significativas em situações normais e de tempestades persistentes apresenta-se a Tabela 7, que indica para ambos os casos, a percentagem de ocorrência das várias classes de alturas nos diferentes períodos de monitorização.

De forma global, verifica-se que apenas 6 registos ultrapassam 7.5 m de altura significativa (4 registos em 11/2010 e 2 registos em 01/2013). A classe de alturas dominante situa-se entre 1.5 m e 2.5 m, com 37.6% dos registos e logo a seguir destaca-se o grupo de ondas entre 0.5 m e 1.5 m, correspondendo a 37.4% das ocorrências. O número de registos nas 3 primeiras classes (até 2.5 m de altura significativa) representa 76.0% do total das ocorrências. Contrariamente, em situação de temporal persistente, as ondas com altura

significativa inferior a 2.5 m não têm qualquer representatividade, adquirindo apenas significado a partir dos 3.5 m. As classes mais frequentes são as de 4.5 m a 5.5 m, 3.5 m a 4.5 m e 5.5 m a 6.5 m respetivamente com 48.4%, 27.8% e 16.3% dos 2347 registos.

Tabela 7. Distribuição da altura de onda significativa em STP e SN (entre $\Delta T1$ – $\Delta T6$).

H_s (m)		$\Delta T1$		$\Delta T2$		$\Delta T3$		$\Delta T4$		$\Delta T5$		$\Delta T6$	
		STP (%)	SN (%)	STP (%)	SN (%)	STP (%)	SN (%)	STP (%)	SN (%)	STP (%)	SN (%)	STP (%)	SN (%)
≥ 7.5		0.0	0.0	3.1	0.1	0.0	0.0	0.6	0.0	3.0	0.1	0.0	0.0
6.5	- 7.5	0.0	0.0	7.8	0.4	0.0	0.0	1.9	0.0	4.2	0.2	0.0	0.0
5.5	- 6.5	6.2	0.0	22.6	1.3	4.1	0.1	16.7	0.6	12.1	1.2	11.3	0.2
4.5	- 5.5	93.8	2.7	43.1	3.5	68.3	1.2	48.3	1.7	49.4	3.7	36.3	1.1
3.5	- 4.5	0.0	2.0	22.1	6.4	25.8	4.4	31.5	3.5	30.9	10.9	50.8	3.5
2.5	- 3.5	0.0	4.3	1.2	12.7	1.8	14.1	1.0	12.9	0.4	28.3	1.6	11.9
1.5	- 2.5	0.0	29.0	0.1	36.3	0.0	41.8	0.0	40.3	0.0	37.1	0.0	29.0
0.5	- 1.5	0.0	62.0	0.0	38.5	0.0	37.8	0.0	40.9	0.0	17.7	0.0	49.7
≤ 0.5		0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	4.8

Os intervalos $\Delta T2$ e $\Delta T5$ são os que apresentam uma gama de alturas mais alargada (com registos até 8.5 m), sendo o intervalo $\Delta T5$ o que apresenta maior percentagem de ondas com altura superior a 3.5 m (cerca de 16.1%). Em contraste, nos períodos $\Delta T1$, $\Delta T3$ e $\Delta T6$ não se registaram ondas com alturas superiores a 6.5 m, sendo que mais de 94% dos registos apresentam alturas significativas inferiores a 3.5 m. Os períodos $\Delta T1$ e $\Delta T4$ não apresentam registos com alturas inferiores a 0.5 m. A classe de alturas dos 1.5 m a 2.5 m é a mais representativa apenas nos intervalos $\Delta T3$ e $\Delta T5$ correspondendo respetivamente a 41.8% e 37.1% dos registos. Os intervalos com maior percentagem de registos nas 3 primeiras classes são os períodos $\Delta T1$, $\Delta T6$ e $\Delta T4$ com 91%, 83.5% e 81.1%. Contrariamente, o intervalo $\Delta T5$ por corresponder maioritariamente a um período de inverno e de transição é o que apresenta nas 3 primeiras classes a percentagem mais baixa de registos (55.6% das ocorrências).

O temporal de maior duração (aproximadamente 125 horas) decorreu entre 12 e 17 de Dezembro de 2011 (intervalo $\Delta T4$). Durante esse temporal, a bóia de Leixões registou 203 valores de altura de onda significativa, respetivos períodos e direções da ondulação. O valor médio da altura significativa obtido foi de 5.04 m e o valor máximo registado foi de 7.68 m. O recorde de altura de onda significativa ocorre a 19 de Janeiro de 2013 e atinge 9.05 m. Novembro de 2010 (intervalo $\Delta T2$) é o mês que detém o maior valor da altura de onda significativa média, com respetivamente 5.87 m.

O intervalo $\Delta T2$ é o que apresenta maior percentagem de ondas com alturas significativas superiores a 6.5 m (cerca de 10.9% dos registos) e menor percentagem de ondas com alturas entre 3.5 m e 6.5 m (cerca de 87.8% dos registos desse intervalo). No intervalo $\Delta T3$ e $\Delta T6$, ondas com alturas entre 3.5 m e 6.5 m representam mais de 98% das ocorrências de tempestade persistente.

Relativamente à distribuição dos períodos de onda, entre 20 de Setembro 2009 e 26 de Novembro 2013, a análise dos registos dos permitiu concluir que a classe dominante situa-se entre os 8 s e 9 s com uma frequência de 16.9%, seguindo-se as classes dos 9 s a

10 s e dos 7 s a 8 s, ambos com aproximadamente 16.3% dos 11291 registos. Contudo, enquanto em situações normais a percentagem de ondas com períodos inferiores a 12 s ultrapassa os 90%, em situações de tempestade persistente o valor é de 43.3%. Neste último caso não há registos de ondas com períodos inferiores a 8 s, sendo a classe mais frequente a dos 11 s a 12 s (cerca de 22.4%).

4.3 Correlação com a dinâmica sedimentar dos perfis

Tendo em consideração as características do clima de ondas de Leixões apresentadas anteriormente, é possível destacar algumas correlações entre a dinâmica dos sedimentos e o regime de agitação:

- A acentuada erosão dos perfis P1 a P4 e acumulação nos perfis P6 a P8 são coincidentes com o período de maior percentagem de ondas de SW (09/2009 – 12/2010);
- A ocorrência da tempestade que marcou o período limitado pelos levantamentos de 2009 (Setembro e Outubro) não justifica a redução substancial de área registada pelo Perfil P5 (prováveis erros de levantamentos);
- Nota-se a presença de barras submersas em praticamente todos os perfis dos levantamentos de 11/2010, coincidente com o período compreendido entre 10/2009 e 12/2010, o que apresenta maior percentagem de ondas com alturas superiores a 4.5 metros (período com maior número de registos em situação de tempestade persistente);
- Acumulação de sedimentos nos perfis P1 e P2 e erosão dos perfis P6 e P7 é coincidente com um dos períodos menos energéticos e com menor percentagem de ondas do quadrante SW (12/2010 – 11/2011);
- Acreção de sedimentos nos perfis P1 e P2 decorre no período em que a percentagem de ondas com direções NNW, WNW e NW assume o seu valor máximo (91.6%), favorecendo o transporte de sedimentos no sentido norte-sul.

5. CONCLUSÕES

Com base num conjunto de dados topográficos recolhidos no âmbito de campanhas de monitorização para 12 perfis transversais de praia, foi desenvolvido um estudo sobre a evolução sedimentar e batimétrica do trecho costeiro Barra-Vagueira com base em levantamentos realizados entre Setembro de 2009 e Novembro de 2013 pela APA.

O estudo realizado permitiu concluir que entre 2009 e 2011 quase todos os perfis sofreram erosão, apresentando áreas que representam um balanço sedimentar global negativo. As exceções a este cenário foram os perfis intercetados pela zona de deposição (P6 e P7) e o perfil localizado imediatamente a sul (P8), contribuindo estes últimos para uma aumento de área transversal de 974 m². Os perfis localizados a norte da zona de deposição foram os mais afetados pela erosão, mostrando perdas substanciais de areia no primeiro ano de monitorização. Concluiu-se também que a parte mais dinâmica do perfil corresponde à área submersa, tendo-se registado nesta zona maiores variações na área do perfil (ganhos e perdas). No período entre 11/2011 e 11/2013, a maioria dos perfis (exceto P3, P4, P8 e P10) apresentam um aumento de área total, tendo-se registado maiores taxas de acumulação mensais entre Junho e Novembro de 2013 (associadas aos trabalhos de alimentação realizados neste período). No total de área dos perfis (entre 2011 e 2013), registou-se o acréscimo de 2 605 m² de areia (P1 a P12).

De um modo geral verificou-se que os trabalhos de extensão do molhe bem como das operações de dragagem e deposição de areias tiveram fortes influências no comportamento geral dos perfis, nomeadamente no período entre 2011 e 2012, em que se observou uma erosão generalizada dos perfis por efeito do prolongamento, e no período entre 2012 e 2013 por efeito contrário das alimentações. Relativamente ao impacto da agitação marítima, alguns padrões relacionados com a dinâmica sedimentar da área de estudo foram identificados: situação de acentuada erosão nos perfis a norte e acumulação nos perfis P6 a P8 coincidente com o período de maior percentagem de ondas de SW (09/2009-12/2010); observação de barras submersas em quase todos os perfis no levantamento de 2010 que coincide com o período que verificou maior número de registos em situação de tempestade persistente; acumulação de sedimentos nos perfis a norte como resultado do período com menor percentagem de ondas de SW (12/2010-11/2011).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Coelho C. (2005). *Riscos de exposição de frentes urbanas para diferentes intervenções de defesa costeira*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro. Aveiro.

Coelho C., Conceição T., Ribeiro B. (2009). Coastal Erosion Due to Anthropogenic Impacts on Sediment Transport in Douro River - Portugal. Em *Proceedings of Coastal Dynamics 2009: Impacts of Human Activities on Dynamic Coastal Processes*. Singapore. Paper 72.

Haney, R., Kouloheras, L., Malkoski, V., Mahala, J. and Unger, Y. (2007). Beach Nourishment: MassDEP's Guide to Best Management Practices for Projects in Massachusetts. Massachusetts Department of Environmental Protection 1 Winter Street Boston, MA.

IH (2015). Instituto Hidrográfico. <http://www.hidrografico.pt> (acedido a 24 de Junho de 2015).

Mark G., Bruce E., Todd W., Randall W. (2003). Beach Fill Design. Coastal Engineering Manual, Part V: Coastal Project Planning and Design, Chapter 4, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.

Pires H.N.O. (1989). Alguns Aspectos do Clima de Agitação Marítima de Interesse para a Navegação na Costa de Portugal., Clima de Portugal, Fascículo XXXVII, vol. 2, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (INMG), Lisboa, Portugal.

Porto de Aveiro (2012). Relatório de Monitorização da Evolução Sedimentar e Batimétrica. Campanha de Monitorização Ambiental no Âmbito do Projecto "Dragagem da Barra com Reforço do Cordão Dunar", Ano 4 – 2012.

Porto de Aveiro (2013). Relatório Acompanhamento ambiental. Empreitada de Reconfiguração da Barra do Porto de Aveiro, Novembro de 2012.

Rosa L., Barata A., Geadas Cabaço J., Teles M. (2012). Intervenções de Dragagem na Barra de Aveiro (Portugal) e de Protecção da Zona Costeira a Sul. *Revista de Gestão Costeira Integrada*.

SNIRLit, (2015). Sistema Nacional de Informação dos Recursos do Litoral. <http://geo.snirh.pt/snirlit/site/> (acedido a 24 de Junho de 2015).