

## EVOLUÇÃO DA MORFOLOGIA COSTEIRA A SUL DA EMBOCADURA DO RIO MONDEGO, DE 1975 A 2011

Filipa S. B. F. OLIVEIRA<sup>1</sup>; Fernando A. BRITO<sup>2</sup>

### RESUMO

No presente estudo avaliou-se a evolução morfológica da zona costeira nas frentes marítimas da Gala-Cova, Costa de Lavos e Leirosa, entre 1975 e 2011. A avaliação baseou-se na comparação de três levantamentos topo-hidrográficos, de 1975, 1978 e 2011, de elevado interesse pelo facto de abrangerem não só a parte emersa da praia mas também a parte submersa (a zona de rebentação, onde é rara a informação batimétrica dadas as dificuldades físicas inerentes à sua monitorização).

Relativamente à evolução da morfologia costeira na frente marítima da Gala-Cova, concluiu-se que as obras de proteção costeira executadas em 1975 e 1978-1979, as defesas longitudinais aderentes e o campo de esporões da Gala-Cova respectivamente, em conjunto com a alimentação artificial de  $174 \times 10^3 \text{ m}^3$  realizada em 1975-1976, limitaram a progressão do surto erosivo verificado no período 1975-1978 e promoveram a recuperação da praia no período 1978-2011. Efetivamente, em 2011 a linha de costa encontrava-se em média cerca de 25 m mais avançada do que 1975. Em oposição, imediatamente a sul da frente marítima da Gala-Cova, mais especificamente, a sotamar do último esporão do campo de esporões da Gala-Cova, o surto erosivo já verificado no período 1975-1978 foi fortemente intensificado no período 1978-2011.

Relativamente à frente marítima da Costa de Lavos, concluiu-se que a construção do esporão, em 1979, foi determinante na evolução da morfologia costeira observada entre 1975 e 2011. A barreira, na frente marítima do núcleo populacional, o esporão proporcionou um notável assoreamento e, assim, proteção contra a ação das ondas. Em oposição, a sotamar ocorreu um forte processo erosivo associado a notáveis recuo da linha de costa e rebaixamento da duna frontal.

Relativamente à evolução da morfologia costeira na frente marítima da Leirosa, essencialmente determinada pela presença do esporão construído em 1978, ela foi semelhante à da frente marítima da Costa de Lavos.

**Palavras-chave:** Batimetria; Défice sedimentar; Erosão costeira; Linha de costa; Praia; Costa oeste Portuguesa.

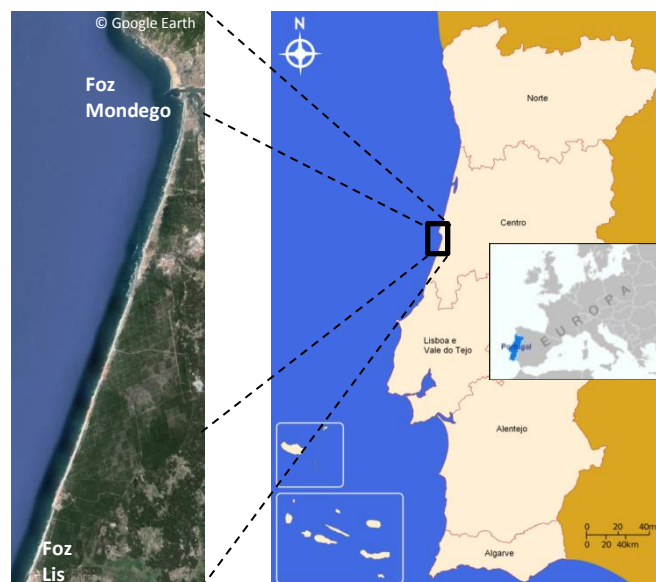
---

<sup>1</sup> Investigadora Auxiliar; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa; +351218443457; foliveira@lnec.pt

<sup>2</sup> Técnico Superior; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa; +351218443564; fmbrito@lnec.pt

## 1. INTRODUÇÃO

O objetivo do presente estudo foi avaliar a evolução morfológica das frentes marítimas da Gala-Cova, Costa de Lavos e Leirosa, pertencentes ao trecho costeiro localizado entre as embocaduras do rio Mondego e do rio Lis (Figura 1), após as intervenções antrópicas mais relevantes que influenciaram a sua evolução desde meados do século passado. Este estudo servirá de base ao estudo que se pretende realizar futuramente sobre a dinâmica costeira do mesmo trecho e previsão da sua evolução futura.



**Figura 1.** Localização da zona de estudo.

O sistema arenoso praia-duna que constitui o trecho costeiro aproximadamente retilíneo com comprimento 32 km e direção média atual  $19.6^{\circ}\text{N}$  localizado entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis inclui a frente oceânica dos núcleos urbanos da Gala-Cova, Costa de Lavos, Leirosa e Pedrogão, constituídos no século passado. O trecho evoluiu, desde meados do século passado, sob influência de intervenções humanas de diversos tipos (Simões e Castanho, 1978; Simões, 1979; Dias *et al.*, 1994; Cunha *et al.*, 1997; Vicente e Pereira, 1998; INAG, 1999). Entre estas intervenções destacam-se: i) a construção dos molhes da embocadura do rio Mondego (1961-1965); ii) a extração de areia na praia da Figueira da Foz (1973-1996); iii) as intervenções de regularização fluvial, para defesa contra as cheias, para regadio e para produção hidroelétrica (dispersas no tempo); iv) as intervenções de regularização portuária, para melhorar a utilização do porto (dispersas no tempo); v) as dragagens da embocadura para acesso ao porto (dispersas no tempo); vi) a alimentação artificial pontual 50 m a sul do enraizamento do molhe sul e 2.25 m acima do nível médio do mar (NMM), entre 1973-1976, com cerca de  $3 \times 10^5 \text{ m}^3$  de dragados provenientes da doca do Coxim ( $50\,110 \text{ m}^3$  em 1973,  $69\,830 \text{ m}^3$  em 1974,  $88\,640 \text{ m}^3$  em 1975 e  $85\,440 \text{ m}^3$  em 1976); vii) a construção das defesas longitudinais aderentes da Gala-Cova e Leirosa (1975); viii) a construção do campo de cinco esporões da Gala-Cova (1978-1979); ix) a construção do esporão da Leirosa (1978); x) a construção do esporão da Costa de Lavos (1979); e xi) o prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego (2008-2010).

O estudo de Simões e Castanho (1978) é o primeiro conhecido que descreve a erosão costeira verificada a sul do molhe sul da embocadura do rio Mondego, desde o início dos

anos 60, que se tornou muito grave nos anos 70. Os autores relatam que a situação era tal que com o contributo dos invernos marítimos de 1971-1972 a segurança de algumas edificações implantadas sobre a duna que constituía o cordão litoral a sul da embocadura ficou em perigo, tornando necessária a implementação de medidas de proteção de emergência, que se basearam na construção de enrocamentos longilitorais, designados por defesas longitudinais aderentes, posteriormente complementadas por esporões.

Mais tarde, com base em comparação cartográfica e de fotografias aéreas, Bettencourt e Ângelo (1992) determinaram a evolução da linha de costa, entre 1900-1958 e 1958-1985, para o troço Costa de Lavos–Leirosa, com aproximadamente 10.5 km de comprimento. Os autores concluíram que a linha de costa entre 1900-1958 se manteve estável, uma vez que verificaram uma variação média igual a zero. Para o período 1958-1985, os autores determinaram uma taxa média de recuo de  $0.7 \text{ m.ano}^{-1}$ , com valores máximos de  $1.4 \text{ m.ano}^{-1}$ . Contudo, é muito provável que o valor da taxa de recuo da linha de costa para este último período esteja subestimado uma vez que: i) o período se inicia antes da construção dos molhes da embocadura, quando as taxas de erosão eram presumivelmente bastante mais pequenas, ii) decorreram as intervenções de alimentação artificial acima mencionadas, e iii) limitou-se o recuo da linha de costa através da construção de defesas longitudinais aderentes e de esporões.

Relativamente à evolução morfológica mais recente da zona de estudo, foram realizados trabalhos de monitorização exclusivamente topográfica e relativa a períodos curtos (Mendes *et al.*, 2010; André e Cordeiro, 2013), que, devido a essas mesmas características, não permitem concluir sobre a evolução morfológica topo-hidrográfica de médio-longo prazo (escala de décadas) até data mais recente. É neste aspeto que reside a inovação e importância do presente estudo, que, recorrendo a levantamentos topo-hidrográficos de 1975, 1978 e 2011, pretende contribuir para melhorar o conhecimento da dinâmica sedimentar da zona de estudo.

Salienta-se que a caracterização detalhada do estado morfológico atual da zona costeira entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis, baseada nos dados topo-hidrográficos de 2011 utilizados na análise de evolução morfológica realizada no presente estudo, se encontra descrita em Oliveira (2014).

## 2. DADOS E MÉTODO

### 2.1 Dados

No âmbito do presente estudo utilizaram-se os seguintes dados: i) levantamento topo-hidrográfico realizado no período Maio-Agosto de 1975 pela Direção Geral de Portos (assim designado na altura). A informação é referida ao *Datum* vertical Zero Hidrográfico (ZH); ii) levantamento topo-hidrográfico realizado em Junho de 1978 pela Direção Geral de Portos (assim designado na altura). A informação é referida ao *Datum* vertical ZH; e iii) levantamento topo-hidrográfico realizado com pelo Instituto Geográfico Português e Instituto da Água, I.P. (assim designado na altura) com tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), numa faixa de captura de um quilómetro de largura ao longo da costa, cerca de 600 m em mar (batimetria) e 400 m em terra (topografia), com resolução de 2 m, durante o ano de 2011. Esta informação encontra-se no Sistema de Referência PT-TM06/ETRS89 e a referência vertical é o *Datum* Altimétrico de Cascais *Helmert* 38, ou seja, o NMM.

Salienta-se o grande interesse destes dados, pois uma vez que abrangem a quase totalidade da zona ativa submersa da praia, ao contrário da maioria dos dados usados para

fazer análises de evolução morfológica, em geral, baseados apenas na parte topográfica (dada a dificuldade em monitorizar a zona de rebentação), têm a vantagem de permitir fazer uma avaliação dos gradientes morfológicos, inferir sobre os fluxos sedimentares e, assim, avaliar de forma mais robusta a evolução morfológica do trecho em apreço.

## 2.2 Método

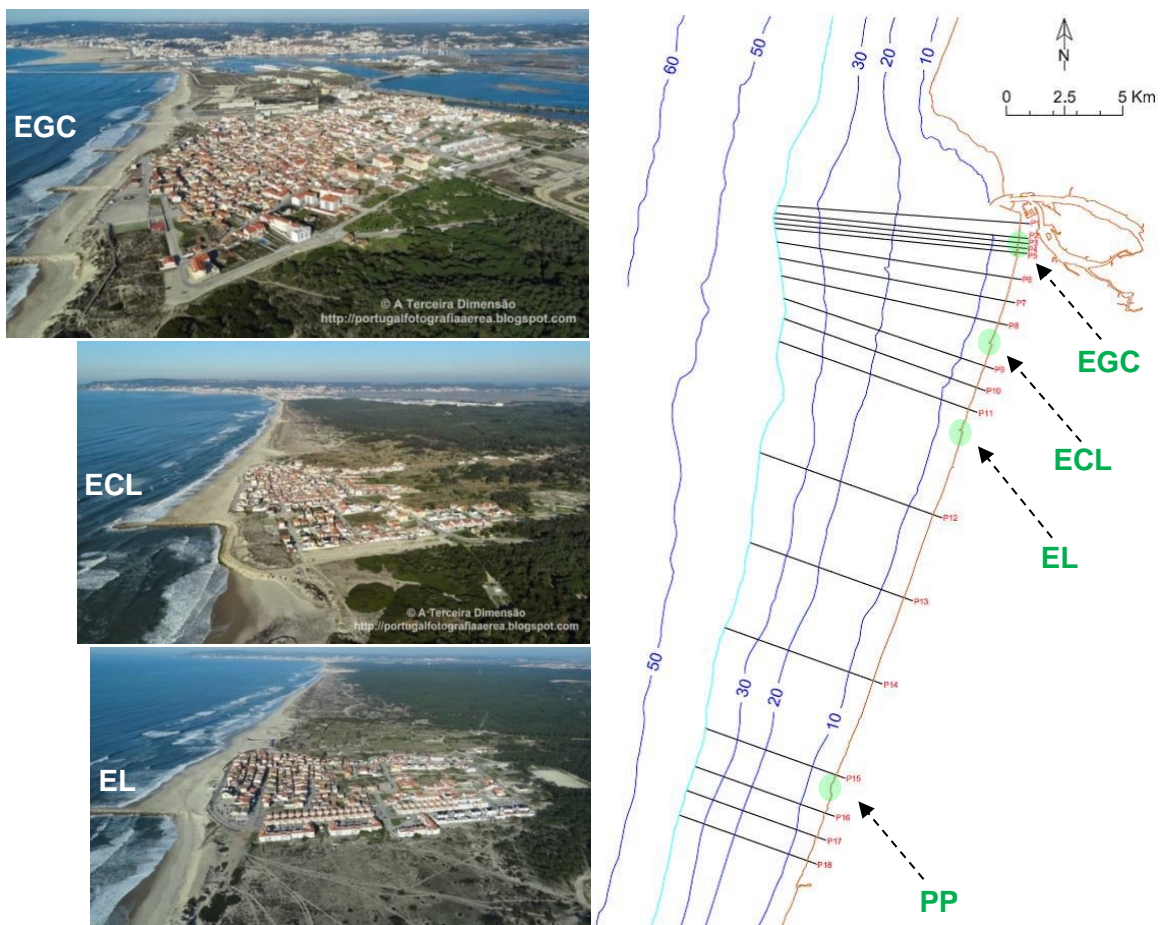
Neste estudo analisa-se a evolução morfológica costeira entre 1975, 1978 e 2011, com base na comparação de três levantamentos topo-hidrográficos cuja área comum abrange a faixa costeira entre a atual profundidade de 9 m abaixo do NMM e o atual interior do sistema dunar, em três zonas distintas, que incluem as frentes oceânicas dos núcleos urbanos da Gala-Cova, Costa de Lavos e Leirosa. A metodologia aplicada baseou-se nas seguintes fases fundamentais: i) recuperação e digitalização dos levantamentos de Maio-Agosto de 1975 e de Junho de 1978 existentes em formato papel; ii) georreferenciação dos levantamentos anteriores no sistema PT-TM06/ETRS89; iii) elaboração de um modelo digital de terreno (MDT) para cada levantamento, com recurso a software de mapeamento de superfícies; iv) comparação dos MDTs correspondentes às datas 1975-1978, 1978-2011 e 1975-2011 para identificação dos padrões de erosão/assoreamento ocorridos e quantificação das áreas e volumes associados; v) definição de um sistema cartesiano local, com origem no ponto de coordenadas ETRS89 (-72070 m; 21875 m) e eixo-x com orientação 19.6°N, que é a direção do alinhamento médio da isolinha de NMM em 2011, crescente no sentido S-N; vi) extração da isolinha de batimetria correspondente ao nível, 2.00 m acima do ZH (doravante aqui designada como isolinha de NMM) de cada MDT e sua georreferenciação no sistema local para comparação e avaliação da evolução (reco/avanço) da linha de costa; vii) extração e comparação de perfis transversais topo-hidrográficos de praia de cada MDT para identificação de padrões de erosão/assoreamento e cálculo dos correspondentes volumes.

Para a avaliação da evolução de perfis transversais da zona ativa da praia, que, à semelhança da avaliação da evolução da linha de costa, teve como objetivo complementar a análise tri-dimensional da evolução morfológica efetuada com base na comparação dos MDTs, utilizaram-se oito perfis transversais topo-hidrográficos dos dezoito definidos no âmbito da caracterização da morfologia costeira recente do trecho entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis (Oliveira, 2014). Note-se que a localização desses dezoito perfis (Figura 2) foi definida tendo em vista capturar eventuais variações morfológicas longilitorais, e tendo em consideração os cinco sub-trechos litorais, limitados pelas estruturas costeiras transversais, construídas (esporões) e natural (promontório), que são (Figura 2): i) o molhe sul da embocadura do rio Mondego; ii) o campo de esporões da Gala-Cova, doravante designado por campo de EGC; iii) o esporão da Costa de Lavos, doravante designado por ECL; iv) o esporão da Leirosa, doravante designado por EL; v) o promontório de Pedrogão, doravante designado por PP; e vi) o molhe norte da embocadura do rio Lis.

Esses dezoito perfis foram definidos com a seguinte localização (Figura 2): i) a meio do sub-trecho entre o molhe sul da embocadura do rio Mondego e o esporão mais a norte do campo de EGC (sub-trecho com cerca de 950 m de comprimento) - perfil P1; ii) a meio de cada um dos quatro sub-trechos limitados pelos cinco esporões que constituem o campo de EGC (sub-trechos com comprimento aproximado de 215, 225, 210 e 205 m, de norte para sul respetivamente) - perfis P2 a P5; iii) equidistantes no sub-trecho entre o esporão mais a sul do campo de EGC e o ECL (sub-trecho com cerca de 3970 m de comprimento) - perfis P6 a P8; iv) equidistantes no sub-trecho entre o ECL e o EL (sub-trecho com cerca de 3950

m de comprimento) - perfis P9 a P11; v) equidistantes no sub-trecho entre o EL e o PP (sub-trecho com cerca de 16305 m de comprimento) - perfis P12 a P14; vi) a uma distância de 600 m do PP, na zona a barlar - perfil P15; vii) equidistantes no sub-trecho entre o PP e o molhe norte da embocadura do rio Lis (sub-trecho com cerca de 4355 m de comprimento) - perfis P16 a P18.

Dos dezoito perfis transversais definidos no estudo anterior, os oito que se usaram neste estudo foram os situados nas áreas comuns aos levantamentos topo-hidrográficos existentes, ou seja, os perfis: P1, P2, P3, P4 e P5, localizados na frente marítima da Gala-Cova; P8 e P9, localizados na frente marítima da Costa de Lavos; e P11, localizado na frente marítima da Leirosa.



**Figura 2.** Localização dos perfis topo-hidrográficos P1 a P18 e vista aérea das frentes marítimas da Gala-Cova, Costa de Lavos e Leirosa.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Análise tri-dimensional da evolução morfológica

##### 3.1.1 Frente marítima da Gala-Cova

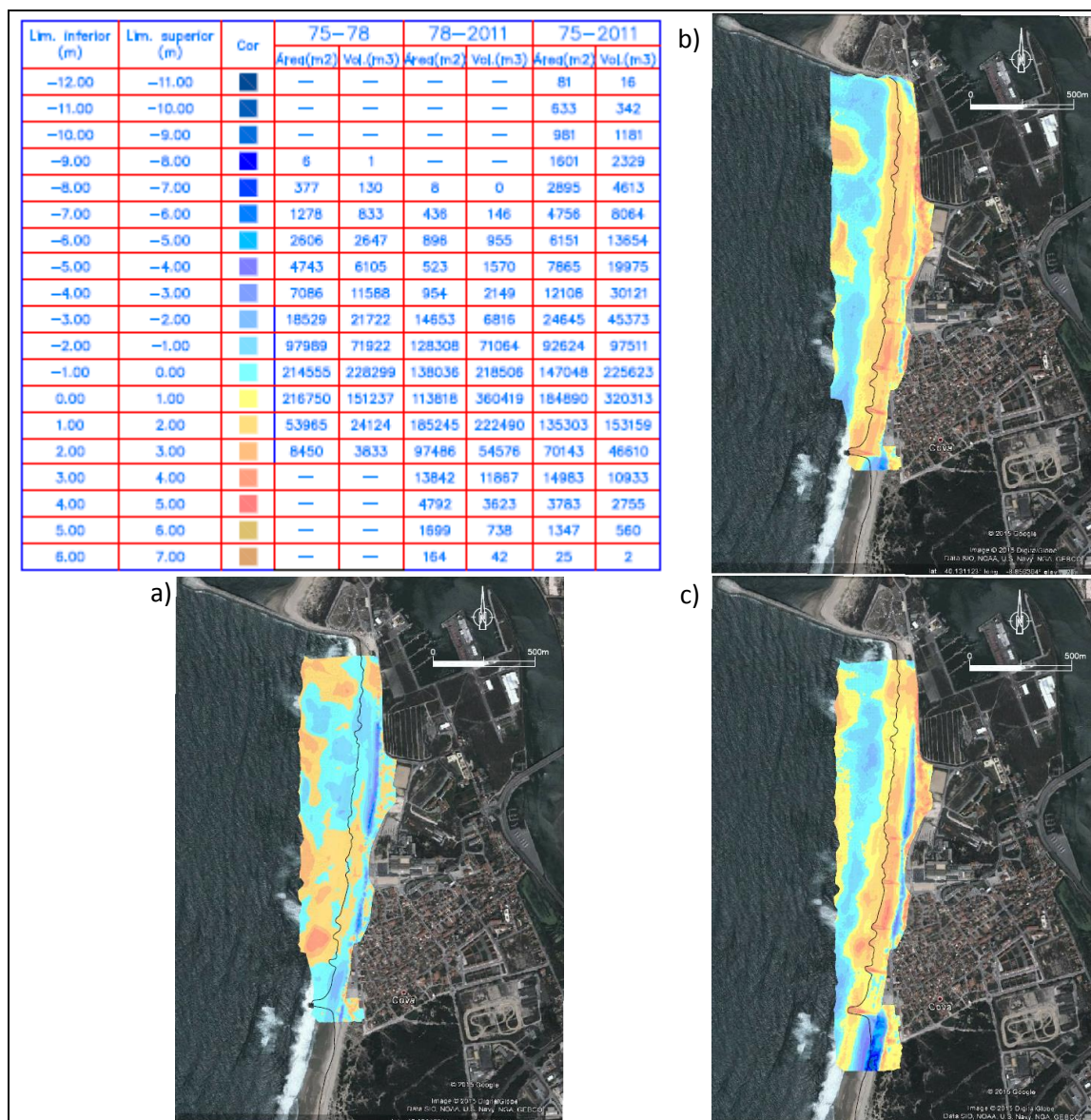
Da comparação dos MDTs construídos a partir dos levantamentos topo-hidrográficos de 1975 e 1978 na área que lhes é comum, cerca de  $626 \times 10^3 \text{ m}^2$ , observaram-se os seguintes resultados (Figura 3.a):

- i) Entre 1975 e 1978 as áreas de erosão e assoreamento foram respetivamente  $347 \times 10^3$  e  $279 \times 10^3$  m<sup>2</sup> e os volumes de erosão e assoreamento foram respetivamente  $343 \times 10^3$  e  $179 \times 10^3$  m<sup>3</sup>, ou seja, desde o molhe sul da embocadura do rio Mondego até ao último esporão da Gala-Cova predominou a erosão (66% do volume total de areia mobilizado no período em apreço), numa área correspondente a 55% da área total. Note-se que este resultado contempla as operações anuais de alimentação artificial efetuadas 50 m a sul do enraizamento do molhe e 2.25 m acima do NMM durante o período em apreço, mais especificamente em 1975 e 1976, com cerca de  $174 \times 10^3$  m<sup>3</sup> de dragados ( $88\,640$  m<sup>3</sup> em 1975 e  $85\,440$  m<sup>3</sup> em 1976). Para além disso, há que notar que as defesas longitudinais da Gala-Cova foram construídas em 1975, o que terá limitado o recuo da linha de costa e o processo erosivo no topo de praia na frente marítima do núcleo populacional. Por este motivo, conclui-se que o balanço sedimentar ocorrido foi negativo e da ordem de grandeza de  $350 \times 10^3$  m<sup>3</sup>.
- ii) A erosão ocorrida no período em apreço deu-se predominantemente no topo de praia onde a crista da duna frontal alcançou um rebaixamento máximo de cerca de 9 m. As áreas onde se verificou assoreamento concentram-se nas zonas imediatamente adjacente ao molhe sul e em frente ao setor norte do núcleo populacional Gala-Cova. A primeira estará provavelmente relacionada com a alimentação artificial realizada, uma vez que os sedimentos foram depositados pontualmente a cerca de 50 m sul do enraizamento do molhe sul.

Da comparação dos MDTs construídos a partir dos levantamentos topo-hidrográficos de 1978 e 2011 na área que lhes é comum, cerca de  $701 \times 10^3$  m<sup>2</sup>, observaram-se os seguintes resultados (Figura 3.b):

- i) Entre 1978 e 2011 as áreas de erosão e assoreamento foram respetivamente  $284 \times 10^3$  e  $417 \times 10^3$  m<sup>2</sup> e os volumes de erosão e assoreamento foram respetivamente  $301 \times 10^3$  e  $654 \times 10^3$  m<sup>3</sup>.
- ii) A área correspondente a assoreamento, 59% da área total, localiza-se predominantemente no topo de praia, em oposição ao verificado no período de 1975-1978, e o volume correspondente ao assoreamento foi cerca de 68% do volume total mobilizado na área em análise.
- iii) O assoreamento verificado na faixa longitudinal, com largura aproximada de 200 m, intersetada pela isolinha de NMM em 2011 (linha assinalada a preto na Figura 3.b), dever-se-á à retenção de areia a barlar de cada esporão do campo de EGC, construído no início do período em análise, mais precisamente em 1978-1979. Seria interessante a comparação com outros levantamentos intermédios, entre 1978 e 2011, que possibilitasse a determinação do tempo de enchimento entre esporões, ou seja, do tempo que levou a estabilizar o assoreamento verificado.

Da comparação dos MDTs construídos a partir dos levantamentos topo-hidrográficos de 1975 e 2011 na área que lhes é comum, cerca de  $711 \times 10^3$  m<sup>2</sup>, observaram-se os seguintes resultados (Figura 3.c):



**Figura 3.** Evolução morfológica entre 1975-1978 (a), 1978-2011 (b) e 1975-2011 (c) na frente marítima da Gala-Cova.

- i) Entre 1975 e 2011 as áreas de erosão e assoreamento foram respetivamente  $301 \times 10^3$  e  $410 \times 10^3$  m<sup>2</sup> e os volumes de erosão e assoreamento foram respetivamente  $449 \times 10^3$  e  $534 \times 10^3$  m<sup>3</sup>. O volume correspondente ao assoreamento foi cerca de 54% do volume total mobilizado na área em análise, ou seja, o balanço sedimentar entre 1975 e 2011 resultou em assoreamento. Contudo, mais uma vez se realça que cerca de  $174 \times 10^3$  m<sup>3</sup> de sedimentos (33% do volume de assoreamento) foram introduzidos no sistema através de operações de alimentação artificial entre 1975 e 1976. Tendo em conta este facto, o balanço sedimentar é negativo, com valor aproximado de  $90 \times 10^3$  m<sup>3</sup>. Note-se no entanto que a área comum aos levantamentos de 1975 e 2011 (Figura 3.c) inclui uma zona, com comprimento longitudinal de cerca de 250 m, a sotamar do último esporão (o mais a sul) da Gala-Cova, onde se observa um foco de forte erosão. Esta zona é responsável por este balanço negativo, que não se constatou na análise da evolução entre 1978 e 2011, precisamente porque não foi abrangida na sua totalidade no levantamento de 1978.

- ii) A área correspondente a assoreamento, 57% da área total, localiza-se predominantemente: a) numa faixa longitudinal, com largura aproximada de 200 m, intersetada pela isolinha de NMM em 2011 (linha assinalada a preto na Figura 3.c); b) na zona dunar, provavelmente resultante de transporte eólico; e c) num banco submerso adjacente ao molhe, provavelmente resultante de um mecanismo de circulação local devido ao efeito de difração e ao decaimento do *wave setup* (sobreelevação do nível do mar devida à rebentação).
- iii) A erosão ocorreu predominantemente: a) na duna frontal existente em 1975, onde a gravidade do surto erosivo exigiu a implementação de defesas longitudinais aderentes (prisma de enrocamento aderente à duna) como medida de emergência e posterior reforço, de 1 m, devido ao efeito dos temporais ocorridos em 1978; b) a sotamar do último esporão (o localizado mais a sul) do campo de EGC, onde se verificou um rebaixamento máximo da duna frontal de cerca de 12 m; e c) ao longo da zona de rebentação, numa faixa longitudinal abaixo da atual isolinha do ZH.

### 3.1.2 Frente marítima da Costa de Lavos

Da comparação dos MDTs construídos a partir dos levantamentos topo-hidrográficos de 1975 e 2011 na área que lhes é comum, cerca de  $1367 \times 10^3 \text{ m}^2$ , observaram-se os seguintes resultados (Figura 4):

- i) Entre 1975 e 2011 as áreas de erosão e assoreamento foram respetivamente  $616 \times 10^3$  e  $751 \times 10^3 \text{ m}^2$  e os volumes de erosão e assoreamento foram respetivamente  $1286 \times 10^3$  e  $1136 \times 10^3 \text{ m}^3$ , ou seja, apesar de ter predominado área de assoreamento, o balanço sedimentar resultou em erosão, que foi 53% do volume total mobilizado na área em análise.
- ii) A evolução morfológica ocorrida resulta claramente da implementação do esporão da Costa de Lavos em 1979, cujo efeito foi: a) acumulação de sedimentos a barlar, predominantemente acima da isolinha de NMM em 2011 (linha assinalada a preto na Figura 4), na frente marítima no núcleo populacional da Costa de Lavos, que alcançou um incremento máximo de aproximadamente 8 m; e b) intensa erosão a sotamar, predominantemente ao longo da duna frontal, que alcançou um valor máximo de rebaixamento de aproximadamente 12 m.

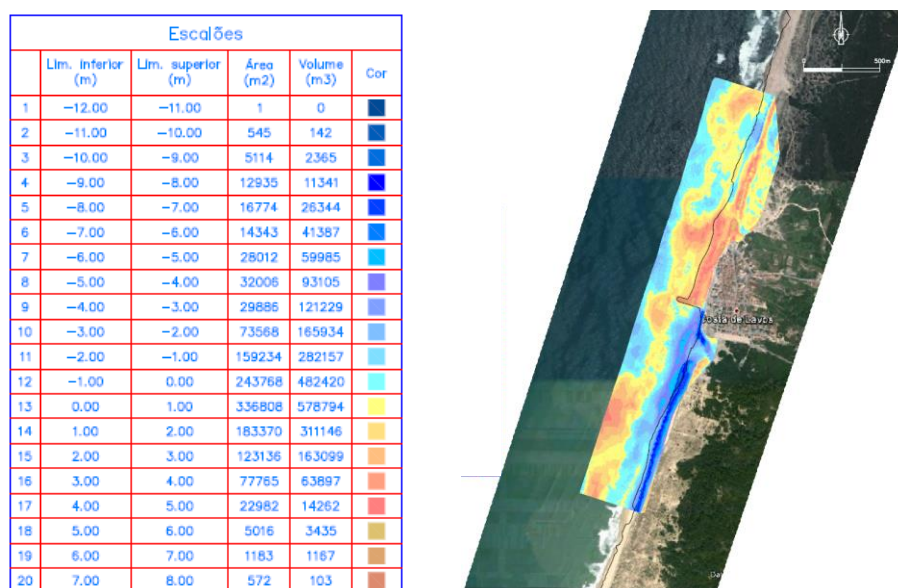
### 3.1.3 Frente marítima da Leirosa

Da comparação dos MDTs construídos a partir dos levantamentos topo-hidrográficos de 1975 e 2011 na área que lhes é comum, cerca de  $877 \times 10^3 \text{ m}^2$ , observaram-se os seguintes resultados (Figura 5):

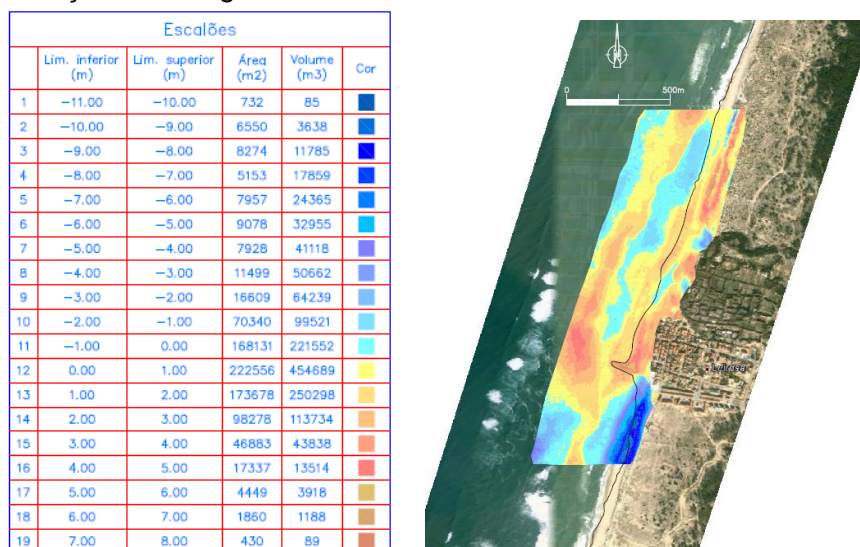
- i) Entre 1975 e 2011 as áreas de erosão e assoreamento foram respetivamente  $312 \times 10^3$  e  $565 \times 10^3 \text{ m}^2$  e os volumes de erosão e assoreamento foram respetivamente  $568 \times 10^3$  e  $881 \times 10^3 \text{ m}^3$ . No entanto, deve notar-se que a área a barlar do esporão da Leirosa é superior ao dobro da área a sotamar.
- ii) Tal como para o caso anterior (da frente marítima da Costa de Lavos), a evolução morfológica ocorrida resulta claramente da presença do esporão da Leirosa construído em 1978. O seu efeito foi: a) acumulação de sedimentos a barlar, predominantemente



acima da isolinha de NMM em 2011 (linha assinalada a preto na Figura 5), na frente marítima no núcleo populacional da Leirosa, que alcançou um incremento máximo de aproximadamente 8 m; e b) intensa erosão a sotamar, predominantemente ao longo da duna frontal, que alcançou um valor máximo de rebaixamento de aproximadamente 11 m.



**Figura 4.** Evolução morfológica entre 1975-2011 na frente marítima da Costa de Lavos.



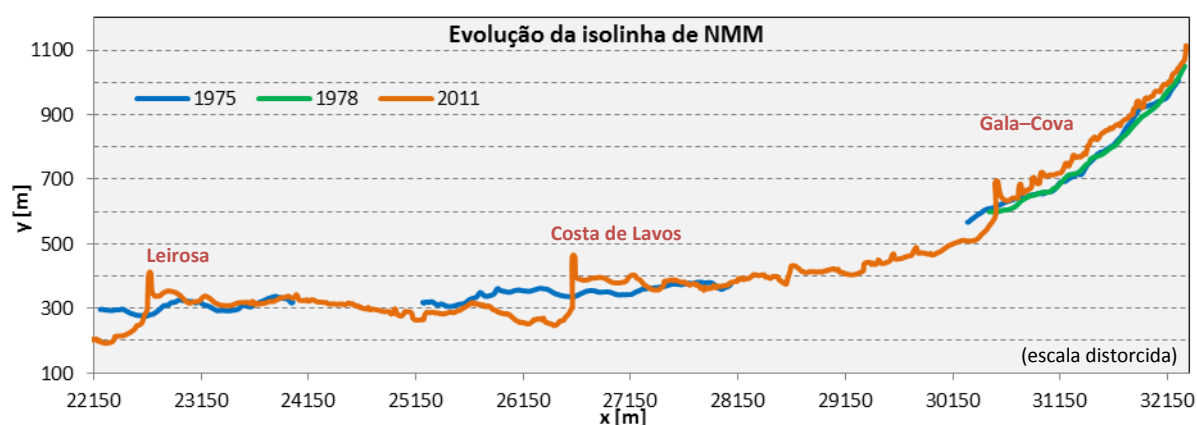
**Figura 5.** Evolução morfológica entre 1975-2011 na frente marítima da Leirosa.

### 3.2 Evolução da linha de costa

Compararam-se as isolinhas de NMM nas áreas comuns aos levantamentos topo-hidrográficos de 1975, 1978 e 2011 (Figura 6 e Tabela 1).

Os resultados evidenciam que no período 1975-1978, no sub-trecho entre o molhe sul da embocadura do rio Mondego e o esporão mais a sul do campo de EGC, que se designou por frente marítima da Gala-Cova, verificou-se uma tendência predominante de recuo ( $\Delta y = \Delta NMM$  é negativo/positivo conforme se trate de recuo/avanço respetivamente), com valor médio para o total do trecho de 6 m (Tabela 1). No entanto, observa-se que esta tendência não foi generalizada em todo o sub-trecho, muito provavelmente devido às

operações de alimentação artificial pontuais efetuadas, entre 1975-1976, a 50 m a sul do enraizamento do molhe sul e 2.25 m acima do NMM. Neste período de análise de aproximadamente 3 anos, a isolinha de NMM teve a seguinte evolução, de norte para sul: avançou na zona imediatamente adjacente ao enraizamento do molhe, numa extensão com cerca de 170 m, onde se verificou o maior avanço em todo o trecho, cerca de 17 m; seguiu-se uma zona de recuo, com cerca de 610 m, na qual se observou o máximo recuo, 31 m; avançou novamente numa zona com cerca de 310 m de extensão; seguiu-se uma outra zona com extensão semelhante à anterior mas onde se verificou estabilidade da isolinha de NMM; e, finalmente, uma última zona localizada a barlamar do último esporão (inexistente neste período), com extensão aproximada das últimas duas, onde se verificou recuo da isolinha de NMM.



**Figura 6.** Isolinha de NMM em 1975, 1978 e 2011, nas frentes marítimas da Gala-Cova, Costa de Lavos e Leirosa.

**Tabela 1.** Evolução da isolinha de NMM relativamente à linha de base, entre 1975, 1978 e 2011, nas frentes marítimas da Gala-Cova, Costa de Lavos e Leirosa.

Frente marítima	Período	$\Delta$ NMM [m]		
		Média	Máx.	Min.
Gala-Cova	1975-1978	-6	17	-31
Gala-Cova	1978-2011	41	96	-43
Gala-Cova	1975-2011	25	80	-74
Costa de Lavos	1975-2011	-17	129	-104
Leirosa	1975-2011	-3	133	-103

No período 1978-2011, ainda no sub-trecho designado por frente marítima da Gala-Cova, ocorreu um avanço generalizado da isolinha de NMM com valor médio de 41 m (Tabela 1). Note-se que a evolução deste sub-trecho neste período é influenciada pela construção do campo de EGC logo no início, em 1978-1979. Verificou-se avanço da isolinha de NMM em todo o trecho entre o molhe sul e o último esporão do campo de EGC (com valor máximo de 96 m) e recuo a sotamar deste último.

A análise da evolução da isolinha de NMM no período 1975-2011, ainda no sub-trecho da frente marítima da Gala-Cova, permite constatar que o recuo máximo a sotamar do último esporão do campo de EGC foi cerca de 74 m. Esta constatação foi possível pelo facto do levantamento de 1975 se prolongar mais a sul do que o levantamento de 1978. Verifica-se

ainda que em 2011, neste sub-trecho com exceção da zona a sotamar do último esporão do campo de EGC, a isolinha de NMM se encontra mais avançada do que em 1975 e em 1978.

Relativamente à evolução da isolinha de NMM nas frentes marítimas da Costa de Lavos e da Leirosa no período 1975-2011, os resultados evidenciam um avanço de quase 50 m a barlamar de cada esporão, ao longo de uma extensão com cerca de 700 m para a frente marítima da Costa de Lavos e cerca de metade para a frente marítima da Leirosa, e um recuo, de aproximadamente 100 m, a sotamar de cada um destes esporões. Note-se que o valor da grandeza média da  $\Delta NMM$  que consta na Tabela 1 deve ser interpretado com prudência uma vez que depende bastante da extensão das zonas a sotamar e barlamar abrangidas pelos levantamentos.

### 3.3 Evolução de perfis transversais da zona ativa

A evolução do perfil P1 (Figura 7.a), localizado a meio do sub-trecho entre o molhe sul da embocadura do rio Mondego e o esporão mais a norte do campo de EGC, revela que entre 1975 e 1978 o perfil transversal de praia sofreu elevada erosão, cerca de  $520 \text{ m}^3/\text{m}$ , que teve como consequência o rebaixamento do perfil na quase totalidade da sua extensão com valor entre 0-2 m à exceção da crista da duna frontal que sofreu um rebaixamento de cerca de 6 m. Note-se que durante este período e em 1973 e 1974 foram efetuadas operações de alimentação artificial de sedimentos ( $50\,110 \text{ m}^3$  em 1973,  $69\,830 \text{ m}^3$  em 1974,  $88\,640 \text{ m}^3$  em 1975 e  $85\,440 \text{ m}^3$  em 1976) 50 m a sul do enraizamento do molhe sul e 2.25 m acima do NMM, que certamente contribuíram para a atenuação da erosão verificada neste perfil. Entre 1978 e 2011, um período temporal muito superior, a tendência foi contrária, ou seja, verificou-se assoreamento na grande maioria da extensão do perfil de praia (com exceção da extensão entre as profundidades -2 e -1 m ZH no levantamento mais recente). Constata-se que em 2011 a parte superior do perfil entre o ZH e a base interior (do lado terra) da duna frontal tem uma geometria próxima da que tinha em 1975, ou seja, que houve recuperação relativamente à erosão sofrida entre 1975 e 1978. A zona do perfil ao nível do ZH foi a que permaneceu mais constante ao longo do tempo. Abaixo do ZH, o perfil em 2011 permanece rebaixado relativamente à geometria observada em 1975. No entanto, os volumes de erosão e assoreamento ocorridos na totalidade do perfil entre 1975 e 2011, cerca de 200 e  $240 \text{ m}^3/\text{m}$  respetivamente, indicam que houve um balanço sedimentar positivo. Esse pequeno ganho sedimentar significa que o assoreamento da parte superior do perfil foi superior à erosão verificada abaixo do ZH.

A evolução dos quatro perfis P2 a P5, localizados a meio de cada um dos quatro sub-trechos limitados pelos cinco esporões do campo de EGC, dos quais apenas o segundo sub-trecho, a contar de norte para sul, não se encontra protegido com uma defesa longitudinal aderente, pode ver-se na Figura 10.b-e. Note-se que as defesas longitudinais aderentes foram construídas em 1975, daí que já influenciaram a evolução dos perfis transversais P2, P4 e P5, e que os esporões foram construídos em 1978-1979, daí que só afetaram a evolução dos quatro perfis a partir de 1978.

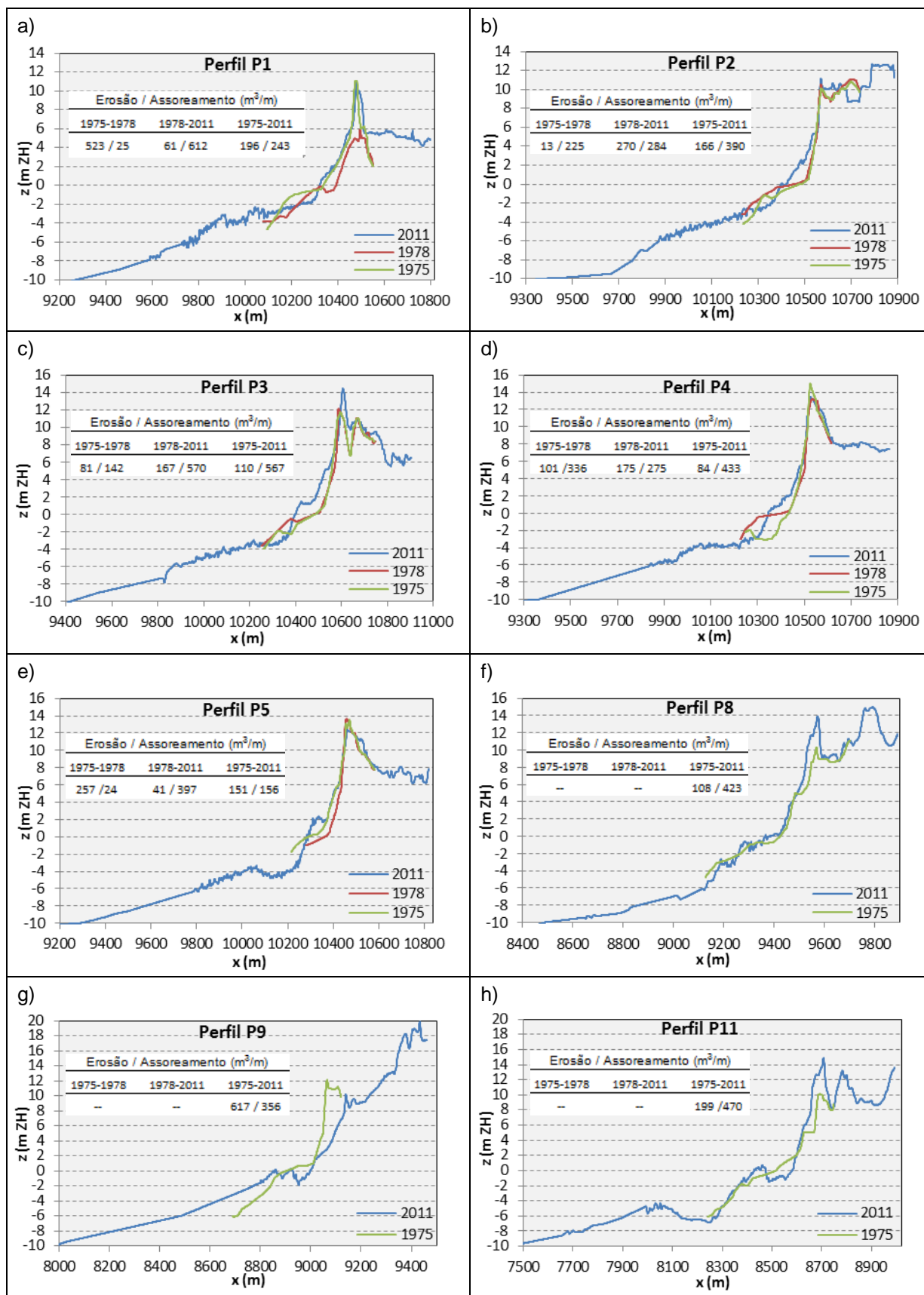
Entre 1975 e 1978 os perfis transversais P2 e P4 apresentaram uma evolução morfológica com as seguintes semelhanças: estabilidade acima do ZH, com exceção da crista da duna frontal do perfil P4 que rebaixou cerca de 2 m, e assoreamento abaixo do ZH. Este comportamento dever se á à presença da defesa longitudinal aderente, que terá fixado o respetivo perfil acima do nível 6 m ZH, e ao enchimento artificial anual realizado a barlamar, entre 1973 e 1976, que terá sido transportado por ação das correntes litorais induzidas pelas

ondas, predominantemente de norte para sul. Durante este período, o perfil P3 teve um comportamento semelhante aos perfis P2 e P4 na zona abaixo do ZH, mas a duna frontal sofreu erosão, verificando-se um rebaixamento da crista de quase 3 m. Note-se que neste período e na extensão transversal avaliada, o balanço sedimentar em P3 é positivo (predomina assoreamento), tal como em P2 e P4, no entanto, ele é apenas cerca de 30% do balanço sedimentar verificado nestes dois últimos perfis (com excedente superior a 200 m<sup>3</sup>/m). Para o mesmo período, o perfil P5 evidencia erosão abaixo do nível 6 m ZH, uma evolução mais aproximada da ocorrida no perfil P1, mas diferenciada devido à presença da defesa longitudinal aderente, que terá protegido a erosão da duna frontal.

Entre 1978 e 2011 os perfis P2 e P4 apresentam novamente uma evolução muito semelhante entre si: erosão abaixo do ZH e assoreamento acima deste nível, mais precisamente, acumulação de cerca de 280 m<sup>3</sup>/m de areia entre o ZH e o nível 6 m ZH. Neste mesmo período, a evolução do perfil P3 foi semelhante à dos anteriores em termos qualitativos: verificou-se erosão abaixo do nível -1 m ZH e acumulação acima deste nível, incluindo a duna frontal, que alcançou um aumento de altura da crista superior a 3 m (Figura 10.c). Para este perfil, o ganho sedimentar foi cerca de 400 m<sup>3</sup>/m, quatro vezes superior ao verificado no perfil P4 (Figura 10.d). Ainda para o mesmo período, para o perfil P5, verificou-se assoreamento em toda a extensão do perfil em frente à defesa longitudinal aderente analisada, ou seja desde o nível -1 m ZH até ao 6m ZH, correspondendo a um ganho sedimentar de cerca de 360 m<sup>3</sup>/m. Estes resultados evidenciam que o campo de EGC veio robustecer o perfil de praia localizado a meio dos respetivos sub-trechos por eles definidos para elevações do perfil aproximadamente acima do ZH, independentemente do sub-trecho ser superiormente limitado ou não por defesa longitudinal aderente.

A evolução dos perfis P8 e P9, localizados aproximadamente a cerca de 1 km a barlar e sotamar do ECL respetivamente, pode ser vista na Figura 10.f-g. O levantamento de 1978 não abrangeu a localização destes perfis e por essa razão apenas se comparam os perfis entre 1975 e 2011. Os resultados revelam que o perfil P8 sofreu erosão abaixo do nível -2 m ZH e assoreamento, aproximadamente um total de 420 m<sup>3</sup>/m, acima deste mesmo nível, incluindo a zona da duna frontal, cuja crista teve um aumento de altura superior a 4 m (Figura 10.f). Neste perfil o balanço sedimentar na extensão transversal analisada foi claramente de ganho sedimentar. O perfil P9 sofreu elevada erosão em todo o perfil acima do ZH, correspondente a um volume aproximado de 620 m<sup>3</sup>/m e um rebaixamento da crista da duna frontal superior a 9 m (Figura 10.g). Abaixo do ZH verificou-se um assoreamento do perfil visível até ao nível -6 m ZH, que corresponde ao limite do levantamento de 1975. No entanto, neste perfil o balanço sedimentar na extensão transversal analisada foi claramente de perda sedimentar.

Avaliou-se ainda a evolução do perfil transversal abrangido pela área comum aos levantamentos de 1975 e 2011 na frente marítima do núcleo populacional da Leirosa. Trata-se do perfil P11, localizado aproximadamente a cerca de 1 km a barlar do EL. Os resultados revelam a ocorrência de assoreamento acima do NMM (Figura 10.h). Em 2011, abaixo do NMM, o perfil evidencia a existência de uma barra submersa com crista ao nível do ZH. Na zona do perfil que abrange o sistema barra-fossa, localizada entre os níveis -2 m ZH e NMM, verifica-se assoreamento e erosão relativamente ao perfil de 1975. Contudo, nesta zona o balanço sedimentar é praticamente nulo e na zona do perfil abaixo do nível -2 m ZH verificou-se estabilidade. Assim, o balanço sedimentar na extensão transversal analisada foi claramente de ganho sedimentar.



**Figura 7.** Perfis transversais topo-hidrográficos P1 a P5, P8, P9 e P11 em 1975, 1978 e 2011 (a-h).

#### 4. CONCLUSÕES

Do presente estudo retiraram-se as seguintes conclusões relativas à evolução morfológica das frentes marítimas dos núcleos populacionais da Gala-Cova, Costa de Lavos e Leirosa:

##### a) Frente marítima da Gala-Cova

Em 1975-1978 o défice sedimentar foi cerca de  $350 \times 10^3 \text{ m}^3$ , tendo em conta as operações anuais de alimentação artificial efetuadas, no total de  $174 \times 10^3 \text{ m}^3$  de sedimentos, e a limitação do recuo da linha de costa e do processo erosivo proporcionados pelas defesas longitudinais aderentes (prisma de enrocamento aderente à duna), construídas em 1975 em resposta ao surto erosivo verificado e reforçadas, em 1 m, posteriormente, em 1978, devido aos temporais ocorridos no mesmo ano. A erosão ocorreu predominantemente no topo de praia, a norte da zona intervencionada com defesas longitudinais, onde a crista da duna frontal alcançou um rebaixamento máximo de aproximadamente 9 m. A variação da linha de costa ao longo do trecho foi bastante irregular, evidenciando zonas de recuo e avanço. No entanto, o valor médio da variação foi 6 m de recuo e o máximo recuo foi 31 m. A análise da evolução dos perfis transversais de praia revela que as defesas longitudinais aderentes impediram a intensificação do surto erosivo.

Em 1978-2011 o balanço sedimentar foi positivo, cerca de  $350 \times 10^3 \text{ m}^3$ . Este assoreamento, que se verificou predominantemente no topo de praia, numa faixa longitudinal com largura aproximada de 200 m, deveu-se à retenção de areia a barlar de cada esporão do campo de EGC. Neste período ocorreu um avanço generalizado da linha de costa com valor médio de 41 m e o máximo avanço foi 96 m.

A sotamar do último esporão do campo de EGC, i.e., a sul da frente marítima da Gala-Cova, ocorreu um foco de forte erosão, onde se verificou um rebaixamento máximo da duna frontal de aproximadamente 12 m e um recuo máximo da linha de costa de 74 m.

Em suma, as obras de proteção costeira executadas em 1975 e 1978-1979, ou seja, as defesas longitudinais aderentes e o campo de EGC respetivamente, em conjunto com a alimentação artificial de  $174 \times 10^3 \text{ m}^3$  realizada em 1975-1976, limitaram a progressão do surto erosivo verificado no período 1975-1978 e permitiram que a praia recuperasse durante o período 1978-2011. Efetivamente, em 2011 a linha de costa encontrava-se em média cerca de 25 m mais avançada do que 1975. Contudo, imediatamente a sul da frente marítima da Gala-Cova, especificamente, a sotamar do último esporão do campo de EGC, o surto erosivo já verificado no período 1975-1978 foi fortemente intensificado no período 1978-2011.

##### b) Frente marítima da Costa de Lavos

As alterações morfológicas ocorridas em 1975-2011 revelam o efeito da presença do ECL, construído em 1979. A grande retenção de sedimentos verificada a barlar do esporão, que alcançou um valor máximo de acumulação de 8 m, ocorreu predominantemente acima do NMM em 2011. A intensa erosão verificada a sotamar do esporão concentrou-se no topo de praia, especificamente na duna frontal, que apresentou um rebaixamento máximo de aproximadamente 12 m. A variação da linha de costa revela um avanço aproximado de 50 m imediatamente a barlar do esporão e de um recuo com o dobro deste valor, 100 m, imediatamente a sotamar. A análise da evolução dos perfis transversais de praia, localizados a cerca de 1 km a barlar e sotamar do esporão, indicia a existência de uma tendência inversa na parte submersa da praia aos processos de assoreamento e erosão observados na parte superior do perfil. Esta característica poderá resultar de processos

hidro-sedimentares locais, induzidos pela presença do esporão, combinados com fenómenos sazonais de transferência transversal de sedimentos no perfil de praia.

c) Frente marítima da Leirosa

A evolução morfológica ocorrida em 1975-2011 resulta claramente da presença do esporão construído em 1978. À semelhança do ocorrido na frente marítima da Costa de Lavos, o esporão causou acumulação de sedimentos a barlamar, predominantemente acima do NMM em 2011, e intensa erosão a sotamar, predominantemente ao longo da duna frontal, que alcançou um rebaixamento máximo de cerca de 11 m. A variação da linha de costa revela um avanço aproximado de 50 m imediatamente a barlamar do esporão e de um recuo com o dobro deste valor, 100 m, imediatamente a sotamar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

André, J.N., Cordeiro, M.F.N. (2013). Alteração da linha de costa entre a Figueira da Foz e S. Pedro de Moel após o prolongamento do molhe norte do Mondego. *Atas do VI Congresso Nacional de Geomorfologia*, Coimbra, pp. 6-10.

Bettencourt, P., Ângelo, C. (1992). Faixa costeira Centro Oeste (Espinho - Nazaré): enquadramento geomorfológico e evolução recente. *Geonovas, nº especial 1 (A Geologia e o Ambiente)*, Lisboa, pp 7-30.

Cunha, P.P., Dinis, J.L., Reis, R.P. (1997). *Avaliação das modificações antrópicas actuais nos sub-ambientes sedimentares do estuário do Mondego*. Relatório final do projeto de investigação PEAM/C/GEN/247/93. Fac. Ciências e Tecnologia, Univ. Coimbra, 152 p.

Dias, J.M.A., Ferreira, O., Pereira, A.R. (1994). *Estudo Sintético de Diagnóstico da Geomorfologia e da Dinâmica Sedimentar dos Troços Costeiros entre Espinho e Nazaré*. Edição electrónica (2005): w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks.

Instituto da Água (1999). *Carta de Risco do Litoral. Trecho 2: Foz do Douro–Nazaré*. Ministério do Ambiente, CD-ROM.

Mendes, S., André, J.N., Cunha, P.P., Gomes, A.A. (2010). Monitorização da morfologia costeira das praias de Quiaios à Leirosa, de Setembro a Dezembro de 2009, na fase final do prolongamento do molhe portuário Norte da Figueira da Foz. *VI Seminário Latino Americano de Geografia Física. II Seminário Ibero Americano de Geografia Física*. Univ. Coimbra, 8 p.

Oliveira, F.S.B.F. (2014). *Caracterização morfológica do trecho litoral entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis*. Relatório 2014 - DHA/NEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

Simões, J.A.M.P., Castanho, J.P. (1978). *Estudo da erosão litoral a sul da embocadura do rio Mondego*. Relatório do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Serviço de Hidráulica, Divisão de Portos e Praias. Lisboa, Março de 1978, 69 p.

Simões, J.A.M.P. (1979). *Estudo da erosão litoral a sul da embocadura do rio Mondego. Defesa do troço Hospital da Gala-Cova*. Relatório do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Serviço de Hidráulica, Divisão de Portos e Praias. Lisboa, Março de 1979, 27 p.

Vicente, C.M., Pereira, M.C. (1998). *Análise da dinâmica costeira do trecho Cabo Mondego – estuário do Mondego. Erosões em Buarcos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 88/1998 – DHA/NE, 185 p.