

DO PROJETO AO MODELO FÍSICO E AO PROTÓTIPO: OTIMIZAÇÃO DA ESTABILIDADE SEDIMENTAR DA PRAIA ARTIFICIAL “LLANA BEACH” NA ILHA DO SAL

Francisco Sancho¹, A. Sanches do Valle², L. Gabriel Silva³, Paula Freire¹

¹ LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

² WW – Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A.

³ Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos

fsancho@lnec.pt, sanchesvalle@wwsa.pt, lgsilva@dgrm.mm.gov.pt

RESUMO

Foi executada, de agosto de 2015 a novembro de 2016, uma praia artificial num trecho da baía do Algodoeiro, na Ilha do Sal (Cabo Verde). A nova praia, de areia, veio criar condições balneares mais seguras e um areal mais extenso à praia natural, cuja natureza de fundo submerso rochoso não era propícia ao seu usufruto banhar seguro.

Devido ao previsto elevado custo da alimentação artificial (areia inicialmente prevista provir da costa ocidental africana), o projeto devotou particular detalhe à estabilidade da praia e à minimização de perdas da areia para fora das obras de contenção e para o largo. Foram para tal ensaiadas e otimizadas, em modelo físico tri-dimensional no LNEC, diversas características das obras e da areia de enchimento, avaliando as condições de equilíbrio e estabilidade da praia artificial. Os ensaios tiveram também por objetivo a caracterização dos galgamentos sobre o conjunto das obras propostas, em condições de agitação marítima mais adversas.

Neste estudo apresentam-se alguns dos aspetos mais relevantes e importantes do projeto, dos ensaios em modelo físico e das características do protótipo executado, reforçando-se a mais valia no trabalho em sinergia das equipas envolvidas. Compara-se qualitativamente o desempenho do protótipo com o previsto no modelo físico, sob condições de agitação marítima severa.

1 – INTRODUÇÃO

No presente trabalho, descrevem-se as partes principais dos estudos que levaram à construção de uma praia artificial em frente a um complexo turístico (Llana Beach Hotel) na Baía do Algodoeiro, na costa ocidental da Ilha do Sal, República de Cabo Verde (Figura 1), complementando os elementos apresentados por Sanches do Valle e Morgado (2013).

O projeto desta praia artificial resultou da solicitação do promotor do empreendimento “Llana Beach Hotel” para melhoria das condições balneares da praia a ele adjacente de forma a reduzir os riscos de acidente existentes associados ao facto da praia natural submersa ser inteiramente rochosa (e particularmente abrasiva e cortante).

Efetivamente, ao longo de toda a extensão da frente de praia ocorria um talude com uma inclinação da ordem de 8 a 10% na transição entre a plataforma da praia e o nível de baixa-mar, abaixo do qual deixava praticamente de existir areia sendo os fundos constituídos exclusivamente rochosos (Sanches do Valle e Morgado, 2013). A existência desta plataforma rochosa ao longo da frente de praia condicionava fortemente as condições de fruição banhar por parte dos utentes da praia, em particular dos hóspedes dos empreendimentos turístico-hoteleiros adjacentes.

Foi assim solicitado à empresa WW, Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas S.A. (doravante designada somente por WW) o projeto de uma praia artificial limitada por dois esporões de contenção, a sul e norte da mesma. Tendo em conta as particularidades de local de

estudo e da agitação marítima incidente, e o facto de se ter perspectivado que a areia para o enchimento da praia artificial poder vir a ser importada, o projeto foi auxiliado e complementado por ensaios em modelo físico reduzido tridimensional, realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), para o estudo das condições de equilíbrio e estabilidade da praia em termos de contenção de areia, procurando minimizar as perdas de areia para fora da zona de contenção. Foram também verificadas as condições do galgamento (Sancho e Silva, 2015b) sobre as obras de abrigo e complementares, para condições de onda extremas, e verificado qualitativamente o efeito deste fenómeno na estabilidade da praia.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo principal apresentar sumariamente o estudo prévio da praia artificial e suas condicionantes (apresentado em detalhe em Sanches do Valle e Morgado, 2013), enfatizar as condições de ensaio e principais resultados do estudo em modelo físico reduzido (Sancho e Freire, 2015a; Sancho e Silva, 2015b), mostrar o projeto final e alguns aspetos da construção, e apresentar elementos sobre a evolução pós-construção da praia artificial e das obras de contenção.

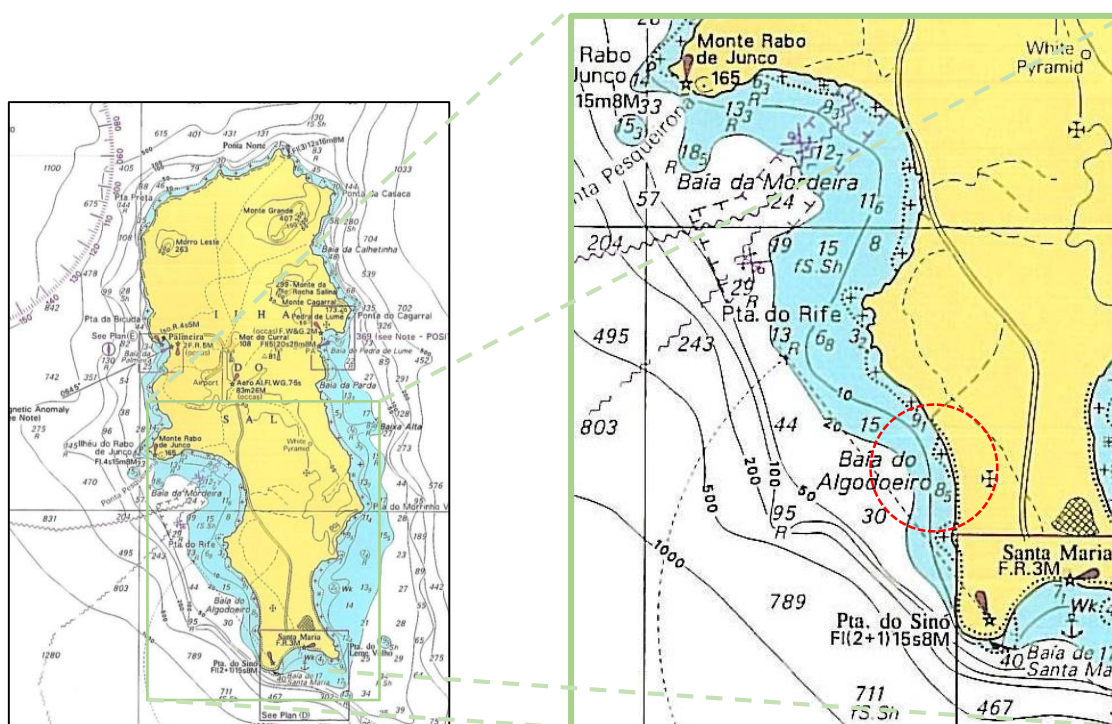


Figura 1 – Localização da zona de estudo (a vermelho, à direita)

2 – ESTUDOS E PROJETOS

Tendo em conta os objetivos pretendidos a solução a adotar passaria pela construção de uma obra, ou de um conjunto de obras, que garantisse a acumulação e a retenção de areia na praia adjacente ao empreendimento de forma a prolongar para o mar a praia já existente e cobrir até fundos da ordem de -2,00 m(ZT) a plataforma rochosa que se desenvolve abaixo do nível da baixa-mar.

Assim, numa primeira fase (Projeto Base), foram estudadas diferentes soluções constituídas tanto por dois quebramares convergentes, definindo uma lagoa interior, como por um quebramar destacado associado a um tómbolo no seu intradorso, as quais foram analisadas comparativamente em termos técnicos e económicos, com particular relevância no que se refere às condições de estabilidade da praia a criar, aos impactos sobre as zonas de praia adjacentes a barlar e a sotamar e às efetivas condições balneares de acesso ao mar.

No âmbito deste processo foram realizados diversos estudos de base, a saber:

- realização de levantamentos topo-hidrográficos da área em estudo e inspeção visual do trecho costeiro objeto da intervenção;
- caracterização do regime da maré;
- definição do clima de agitação marítima ao largo e estudo da sua propagação até à orla costeira adjacente aos empreendimentos;
- caracterização da agitação no local das futuras obras;
- definição de soluções com capacidade de retenção e de manutenção de areia;
- avaliação das condições de funcionamento dessas soluções em termos hidráulicos com recurso a modelos matemáticos que permitem simular a propagação das ondas na zona adjacente às obras e consequente configuração de equilíbrio das praias por elas criadas;
- avaliação das repercussões sobre a orla costeira a norte e a sul da zona de implantação das obras;
- avaliação do transporte longitudinal potencial de sedimentos no trecho costeira em referência.

Na sequência deste Projeto Base procedeu-se à realização do Estudo de Impacte Ambiental o qual foi objeto de apreciação por parte das entidades competentes no âmbito do Ministério do Ambiente, Habitação e Ordenamento do Território de Cabo Verde, tendo merecido um parecer técnico favorável.

De acordo com os estudos realizados, em que foram analisadas diversas hipóteses alternativas, concluiu-se que a solução a adotar deveria ser constituída por dois esporões semiconvergentes, perpendiculares à praia, definindo entre eles uma bacia abrigada permitindo a criação de uma praia por enchimento artificial de areia (Figura 2). A distância entre os respetivos enraizamentos, o seu comprimento e configuração em planta, foi definida de forma a garantir as condições de estabilidade da praia no seu interior.



Figura 2 – Configuração da praia artificial e estruturas de contenção de acordo com o Estudo Prévio (WW, 2013; Sanches do Valle e Morgado, 2013);

Os dois esporões, cujos enraizamentos estão afastados cerca de 210 m, têm um comprimento idêntico, da ordem de 147 m, o que dada a curvatura da sua zona terminal, implica que o eixo de rotação das respetivas cabeças esteja a uma distância da ordem de 130 m relativamente à linha de praia atual. A distância entre as cabeças dos esporões é da ordem de 75 m (distância medida no nível médio), sendo que os extremos de ambos os esporões ficarão implantados em fundos da ordem de -4,20 m(ZH). Entre os dois esporões foi previsto um esporão central, coroado a uma cota de +3,30 m(ZH), cuja única função era reduzir as oscilações planimétricas de equilíbrio da praia, função da direção da agitação marítima incidente. Por razões funcionais e de melhoria das condições de abrigo da praia a criar previu-se a construção de uma plataforma vertical na extremidade deste esporão central, também com a função de cais para pequenas embarcações.

A fim de garantir a contenção da areia da praia a criar e, ao mesmo tempo, reduzir o volume de areia necessário ao respetivo enchimento artificial, foram construídas, entre a cabeça de cada um dos esporões e a plataforma terminal do esporão central, duas soleiras submersas com o coroamento à cota -1,20 m(ZH).

3 – ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

Procurou-se com o estudo em modelo físico tridimensional reproduzir as condições de hidrodinâmica e dinâmica sedimentar expectáveis no protótipo, à escala reduzida; Face às condições locais do protótipo, trata-se de um problema em que predominam aspetos de hidrodinâmica e de transporte de sedimentos pela agitação marítima e correntes (longitudinais e transversais) associadas, sobre um fundo arenoso móvel.

Na escolha das escalas do modelo e do material móvel privilegiou-se a reprodução do equilíbrio sedimentar longitudinal, admitindo-se que a reprodução da estabilidade e equilíbrio da praia na direção transversal poderia vir a ser distorcida (Sancho e Freire, 2015a). A geometria do modelo reduzido foi estabelecida respeitando a lei de semelhança de Froude, adotando a escala geométrica 1/35. Esta escala geométrica resultou do compromisso entre as dimensões do tanque de ondas, as dimensões das obras a implantar, as características e capacidades do batedor de ondas e as condições de agitação marítima.

Relativamente ao material sedimentar, é reconhecido que não é possível reproduzir em modelo físico à escala reduzida a complexidade dos fenómenos associados ao transporte sedimentar (e.g., Vicente, 1991; Van Rijn *et al.*, 2011). A escolha do material sedimentar e da escala baseia-se na ideia fundamental de que as magnitudes relativas dos processos dominantes sejam as mesmas no modelo e no protótipo. Assim, os critérios de semelhança hidro-sedimentar definidos por diversos autores (e.g., LNH, 1967; Noda, 1972; Vellinga, 1982; Dean, 1985; Kamphuis, 1985; Van Rijn *et al.*, 2011) apresentam conceções bastante diversas e conduzem frequentemente, na sua aplicação, a resultados discordantes (Sancho e Freire, 2015a). De acordo com Alsina *et al.* (2007) e Sancho *et al.* (2009), não é possível obter perfeita similitude simultaneamente no transporte em suspensão e por arrastamento, mantendo a escala de densidades dos sedimentos unitária. Assim, recorre-se por vezes em estudos em modelo reduzido, principalmente em modelos com escalas mais pequenas, ao uso de material móvel com densidade diferente (menor) da dos sedimentos do protótipo, que possibilita o cumprimento dos critérios de semelhança selecionados e o uso de material móvel com diâmetros medianos mais próximos dos valores de protótipo. Pelas mesmas razões, tem-se optado quer por modelos em que as escalas horizontais e verticais são iguais (modelos não distorcidos), quer por modelos distorcidos (em que a distorção, δ , é igual ao quociente da escala vertical pela escala horizontal, $\delta=[h]/[L]$).

No presente caso, e tendo em atenção a experiência do LNEC em ensaios em modelo reduzido com material de baixa densidade, escolheu-se primeiramente baquelite granulada com diâmetro mediano $D_{50}=0,45$ mm e massa volúmica igual a 1350 kg/m^3 como material móvel do modelo, representando uma areia em protótipo com D_{50} entre 0,2 e 0,3 mm. A escolha deste material sedimentar foi baseada na aplicação de critérios de semelhança física apresentados em Sancho e Freire (2015a) e considerando que este material possibilita uma aceitável simulação da movimentação das areias e da configuração morfológica da praia, quer em planta, quer em perfil. A escolha desta baquelite em conjugação com a escala do modelo, implicou que o parâmetro da distorção de escala δ resultasse aproximadamente igual a 1,85. De acordo ainda com os cálculos daqueles autores, a relação de escala morfológica temporal é da ordem de 1/100, correspondendo assim a cada hora de ensaios no modelo físico um tempo morfológico na natureza de aproximadamente 4,3 dias.

Adicionalmente aos ensaios com baquelite, realizou-se um conjunto de ensaios adicionais com areia no modelo reduzido, com $D_{50}=0,256$ mm, representando no protótipo areia com diâmetro mediano entre 0,5 mm e 0,6 mm, presentes em parte da zona de estudo. A escolha desta areia resultou da aplicação, para a relação de escalas, do critério de Van Rijn *et al.* (2011), apropriado para sedimentos com o mesmo peso específico, e considerando a distorção de escalas vertical e horizontal acima indicada ($\delta=1,85$).

Realizou-se ainda um conjunto de ensaios de galgamento, que tiveram por objetivo verificar a partir de que condições de agitação marítima se processava a inundação das plataformas de utilização, nomeadamente, do cais localizado entre as cabeças dos dois esporões de retenção da praia, norte e sul, e da plataforma multifuncional. Nestes ensaios, as condições de níveis de maré e de agitação marítima reproduzidas estiveram de acordo com as instruções prestadas pelo projetista, às quais se associaram condições de agitação marítima propostas pelo LNEC para que a caracterização pretendida pudesse abarcar o maior número de condições possível.

No modelo físico reproduziram-se os fenómenos de propagação das ondas desde a batimétrica -12 m(ZT) (à escala do protótipo) até à cota +2 m (Figura 3). Assim, o batedor (ou gerador) de ondas foi colocado em fundo horizontal à profundidade -12 m(ZT) – 34,3 cm no modelo físico –, reproduzindo-se o relevo do terreno entre aquela batimétrica e a zona superior da praia. As profundidades no modelo físico em condições de ensaio foram 35,4 e 33,0 cm, respetivamente para as condições de Preia-mar (PM; +0,40 m(ZT)) e Baixa-mar (BM; -0,45 m(ZT)). Os rumos da agitação marítima incidente foram determinados pelo projetista sobre a batimétrica -12 m(ZT), tendo sido consideradas duas direções dominantes para os ensaios: 220° e 300°, conduzindo à configuração do modelo e batedores ilustrada na Figura 3.

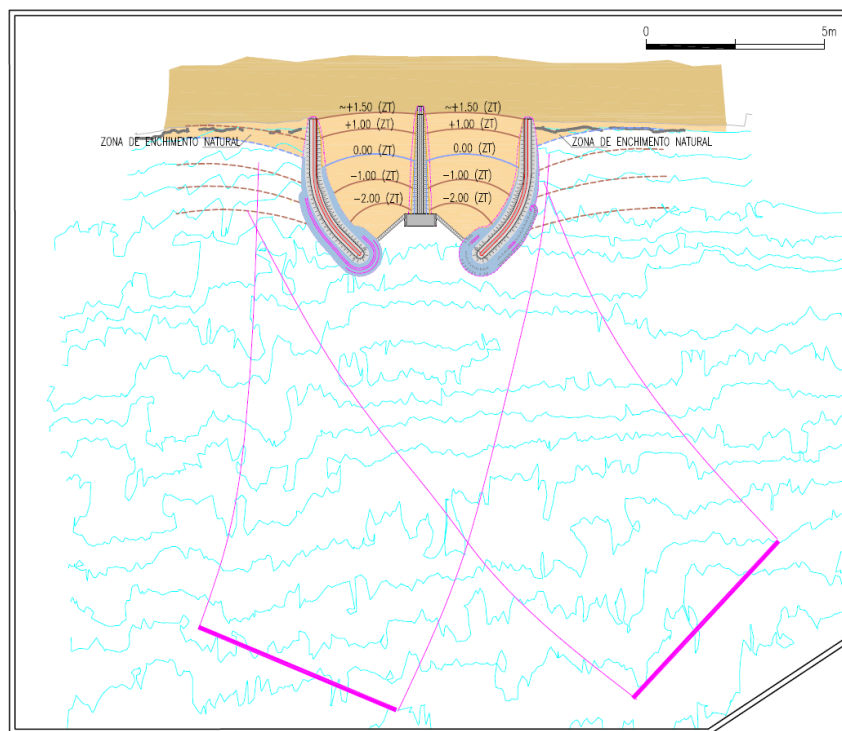


Figura 3 – Geometria do modelo físico

Para cada condição de agitação, utilizaram-se ondas irregulares com um espectro empírico Jonswap (definido pelo valor padrão da largura de banda). A duração relativa de cada condição de agitação teve em consideração a frequência de ocorrência na natureza das condições de agitação similares (à escala), bem como da duração total das condições de agitação com $H_s \geq 3$ m, que somam menos de 1 dia. No Quadro 1 apresentam-se as condições de agitação marítima ensaiadas, sendo que as percentagens de ocorrência foram obtidas pelo agrupamento de condições de agitação similares tendo em atenção a distribuição conjunta H_s - T_m , fornecidas pelo projetista. Atente-se ainda que o somatório de tempos foi suficientemente longo (cerca de 8 horas no modelo físico, correspondendo a 34 dias no protótipo) para permitir a estabilização da praia. Cada um destes dois conjuntos de condições de agitação, respetivamente para o rumo 220° e 300°, foi repetido em condições de preia-mar e baixa-mar, por essa ordem.

Quadro 1 – Condições de agitação marítima para os ensaios

Dir (°)	Protótipo			Modelo		
	Hs (m)	Tm (s)	% ocorrência	H (m)	Tm (s)	Duração (min)
220	1.0	7.0	78.86	0.029	1.18	120
	2.0	7.0	5.94	0.057	1.18	120
	3.0	7.0	0.11	0.086	1.18	5
	1.0	10.0	12.23	0.029	1.69	120
	2.0	10.0	2.74	0.057	1.69	120
	3.0	10.0	0.11	0.086	1.69	5
300	1.0	7.0	78.86	0.029	1.18	120
	2.0	7.0	5.94	0.057	1.18	120
	1.0	10.0	12.23	0.029	1.69	120
	2.0	10.0	2.74	0.057	1.69	120

A modelação passou pelas fases habituais de calibração e exploração do modelo físico. A última compreendeu a realização de ensaios para várias alternativas (Figura 4), nomeadamente:

- 1) Projeto Base ou Alternativa 0, com soleira de contenção da praia em geotubo; fundo com baquelite granular;
- 2) Alternativa 1, com soleira de contenção da praia em enrocamento; fundo com baquelite granular;
- 3) Alternativa 2, com soleira de contenção da praia em enrocamento e redesenho do cais do septo central; fundo com baquelite granular;
- 4) Alternativa 3, igual à anterior, mas usando areia no fundo;
- 5) Alternativa 4, com uma plataforma multifuncional e cais centrais formando uma pequena “ilha”, ou seja, em que o septo central estreito é substituído por uma plataforma larga e as soleiras de contenção estão alinhadas paralelamente à costa; fundo com areia.

A condição inicial da forma da praia, para cada conjunto de ensaios, foi a configuração resultante do ensaio anterior ou a configuração de projeto quando aquela se afastava significativamente desta ou tivesse ocorrido perda (transposição) significativa de sedimentos da praia.

Para cada uma das configurações acima indicadas e conjuntos de ensaios analisaram-se os seguintes aspetos relativos à praia artificial, de forma qualitativa e/ou quantitativa: evolução da praia; eficácia dos molhes e do septo central no equilíbrio longitudinal da praia; orientação da praia face à agitação marítima incidente; evolução da posição e configuração da linha de água; eficácia das soleiras submersas na contenção das areias da praia e redução das perdas de areia para o largo; evolução dos perfis de praia, na zona submersa e emersa; reflexão da agitação marítima nas estruturas, em particular, no cais do septo central; galgamentos da agitação marítima nos molhes exteriores e no septo central; avaliação dos acréscimos ou reduções do volume de areia na praia; intensidade das correntes sobre a soleira da praia; redistribuição sedimentar e eventual segregação do material móvel por diferentes zonas da praia.

No que concerne à análise dos resultados, apreciou-se: i) a configuração da linha de costa, por comparação da posição das linhas de água para cada condição de agitação; ii) a comparação entre perfis obtidos na mesma posição ao longo de cada ensaio e entre ensaios distintos; iii) o volume de areia acrescentado (em caso de acreção) e retirado (em caso de erosão) contido em cada metade da praia artificial; iv) o galgamento provocado pelas ondas sobre as estruturas marítimas, medindo a extensão de galgamento ao longo do cais e septo centrais.

A caracterização dos galgamentos foi qualitativa, em resultado da observação do modelo durante a atuação das diversas condições de agitação marítima reproduzidas e tendo por base o critério de classificação que se apresenta no Quadro 2 (critério de classificação de galgamentos em uso no LNEC, em ensaios com ondas irregulares).



Figura 4 – Imagens da configuração da soleira: Alternativa 0 (esq. superior); Alternativa 1 (dir. superior); Alternativa 2 (esq. inferior) e Alternativa 4 (dir. inferior)

Quadro 2 – Critério de classificação de galgamentos em ensaios com agitação irregular

GRAU	DESIGNAÇÃO	DESCRIÇÃO
0	Inexistentes	Não há galgamentos
1	Início	As ondas de maior altura provocam a passagem de "salpicos"
2	Ligeiros	Passagem frequente de "salpicos"
3	Moderados	As ondas de maior altura provocam a passagem de lâminas de água
4	Importantes	Há frequentes galgamentos constituídos por lâminas de água; as ondas de maior altura provocam a passagem de grandes massas de água
5	Sérios	Há frequentes galgamentos constituídos por grandes massas de água

4 – RESULTADOS

4.1 – EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA

Dada o elevado número de resultados obtidos em modelo físico para as diferentes configurações (Sancho e Freire, 2015a, Sancho e Silva, 2015b), neste artigo apresenta-se sobretudo os resultados relativos à configuração final, mais próxima da executada no protótipo. Os resultados relativos às alternativas intermédias permitiram ir otimizando a configuração das obras e da praia, ganhando ao mesmo tempo maior sensibilidade e confiança sobre o comportamento sedimentar do modelo físico.

Assim, para a alternativa 4, apresenta-se na Figura 5a a variação da posição da linha de costa para as condições do ensaio com rumo 300° e em PM, à escala do protótipo. Verificou-se que a praia se apresentava muito estável ao longo de todo o ensaio, sendo a zona junto ao esporão sul a que mostrou maior variabilidade. Em termos globais, e comparando a posição da linha de costa inicial e final, o deslocamento médio da praia foi pouco significativo, inferior a 1 m. A maior variação ocorreu na extremidade sul, com acreção, com a contrapartida de ligeira recuo da linha de costa na zona central. Relativamente à movimentação em perfil transversal, verificou-se que ocorreu fraca mobilização dos sedimentos abaixo do -1,5 m (ZT), e em todos os perfis houve um balanço entre a erosão e a acreção num mesmo perfil, compatível com pequeno transporte longitudinal.

Em condições de baixa-mar (não ilustradas), e para o mesmo rumo, formaram-se dois setores distintos da praia (norte e sul). Verificou-se que a tendência geral da evolução daqueles dois setores foi distinta, embora com valores de deslocamento médio absoluto idênticos: a norte ocorreu uma tendência média para o recuo, enquanto a sul ocorreu tendência de acreção.

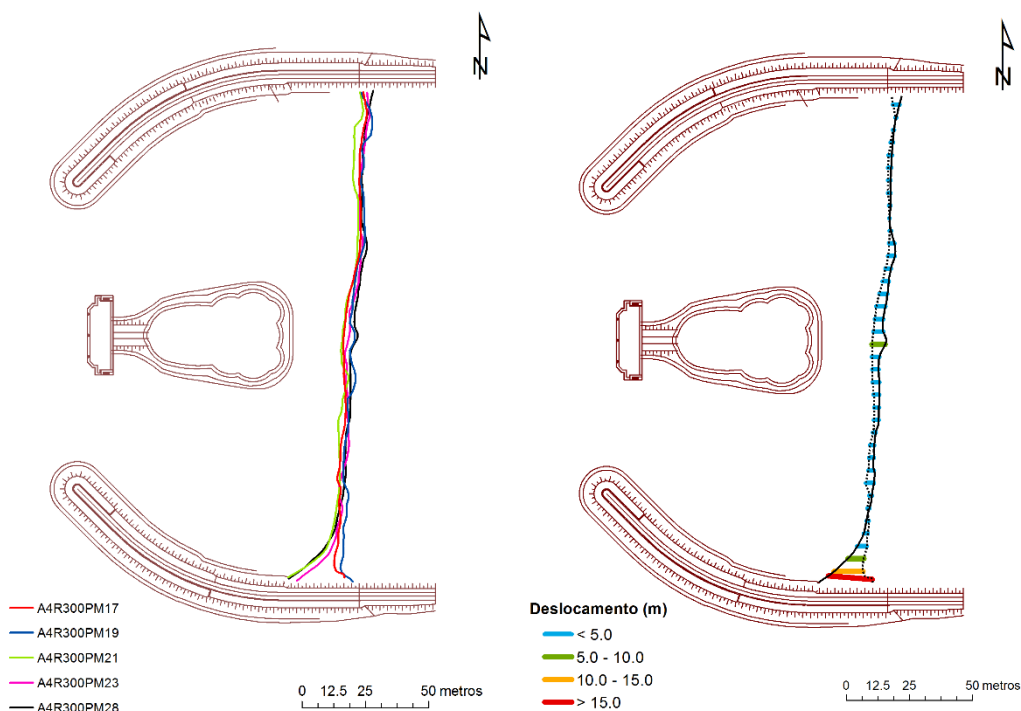


Figura 5 – Alternativa 4; a) evolução da posição das linhas de costa, após diferentes condições de agitação do ensaio; b) deslocamento da linha de costa entre a posição inicial (tracejado) e final (cheio)

Sobre a dinâmica sedimentar e estabilidade da praia, concluiu-se que:

- Era viável a construção de uma praia artificial de acordo com o projeto (e as alterações introduzidas), desde que se admitisse a perda irreversível de algum material sedimentar e,

portanto, da espessura da praia, levando à sua eventual realimentação para reposição da situação inicial (ou próxima desta) com periodicidade a determinar em função das perdas que fossem aceitáveis;

- b) Seria desejável a execução da praia artificial com uma areia de grão médio a grosseiro, com características próximas das da areia atualmente existente, em detrimento de uma areia fina. No primeiro caso a praia seria muito mais estável e teria, a longo prazo, reduzidas perdas de sedimentos (da ordem de 1% ou menos do volume inicial, por ano). No segundo caso, as perdas de sedimentos seriam muito superiores (da ordem de 5% do volume inicial, por ano), obrigando a maior frequência de operações de manutenção (realimentação) da praia;
- c) Os esporões e septo central são eficazes na proteção da praia e contribuem para o seu equilíbrio longitudinal;
- d) A praia sofre rotações da sua linha de água em consonância com a agitação marítima incidente;
- e) As soleiras submersas ajudam a conter a praia artificial, embora permitam a transposição de algum material sedimentar colocado em suspensão para o largo. Verificou-se ainda uma tendência de erosão na imediação da soleira. Previu-se que esta zona ficaria mais desguarnecida de sedimentos do que as restantes zonas, a menores profundidades;
- f) Existe uma ligeira tendência de avanço da linha de água (acrecção) na zona adjacente ao molhe setentrional na praia exterior a Norte, e tendência variável de ligeira acreção ou erosão na praia a Sul do molhe meridional, consoante a direção, intensidade e persistência da agitação marítima.

4.2 – GALGAMENTOS

Para melhor caracterização dos galgamentos, o modelo foi seccionado de acordo com o esquema apresentado na Figura 6.



Figura 6 – Discretização do modelo para efeito da realização de ensaios de galgamentos

Apresenta-se, no Quadro 3, os graus de galgamento correspondentes a cada uma das condições de agitação marítima e de nível de maré reproduzidas e a cada uma das zonas e sectores identificados.

Como esperado, os galgamentos associados ao nível de maré de preia-mar foram mais volumosos que os associados ao nível de baixa-mar. Todavia, os galgamentos associados ao nível de baixa-mar apresentaram um efeito visual mais evidente. Esta constatação deveu-se ao facto de o bordo livre do cais ser maior com o nível de baixa-mar e implicar uma maior perturbação no escoamento líquido, com maior dissipação de energia e projecção de jatos de água a maior distância.

Na Figura 7 apresenta-se duas imagens de ocorrência de galgamentos sobre a plataforma multifuncional da Alternativa 4, a mais próxima da solução final construída. Estas imagens permitem visualizar a forma como se processava o alagamento e enxovalhamento da zona

poente da plataforma multifuncional (através da abertura existente no murete) e mostrar o funcionamento eficaz do murete situado no alinhamento interior do cais na redução dos galgamentos, para algumas das condições de agitação. A imagem direita ilustra ainda a ocorrência de uma pequena lâmina de água varrendo a plataforma central, em consequência dos galgamentos operados. Os ensaios também permitiram concluir que o efeito de galgamento da plataforma pelas ondas incidentes se faria sentir até uma distância da ordem de 20 a 25 m.

Quadro 3 – Resultados de classificação de galgamentos observados (em escala de 0 a 5)

NÍVEL DE MARÉ	Tm (s)	Hs (m)	ZONA A		ZONA B		ZONA C	
			Face exterior	Face interior (murete)	Sector norte	Sector sul	Sector norte	Sector sul
BM	7	1.0	2-3	0	0	0	0	0
		2.0	3-4	3	0	0	0	0
		3.0	4	3	0	0	0	0
		3.5	4	3	0-1	0	0	0
	10	1.0	2-3	0	0	0	0	0
		2.0	4	3	0	0	0	0
		3.0	4-5	3-4	1	0-1	0	0
		3.5	4-5	3-4	a)	a)	0	0
PM	7	1.0	3	0	0	0	0	0
		2.0	3-4	3	0	0	0	0
		3.0	4	3-4	1-2	0	0	0
		3.5	4	4	a)	a)	0	0
	10	1.0	3	0	0	0	0	0
		2.0	4-5	3-4	3	0-1	0	0
		3.0	4-5	4	3-4	1	0	0
		3.5	4-5	4-5	3-4	b)	0	0



Figura 7 – Aspeto de galgamentos em alguns ensaios

De referir que a cota de coroamento, não só do corpo deste esporão como da própria plataforma terminal (cais), é de apenas +3,30 m(ZH), enquanto que a cota de coroamento das zonas terminais dos dois esporões de abrigo é de +5,00 m(ZH). De acordo com os estudos realizados concluiu-se que mesmo com esta cota de coroamento os esporões de abrigo poderão, em situações de tempestades mais gravosas, ser galgados, e que os valores máximos do caudal médio de galgamento apenas se registam em situações de temporal com uma altura de onda significativa de $H_s = 3,90$ m e período médio de $T_m = 10$ s, cuja probabilidade de ocorrência é relativamente baixa; no caso de temporais com ondas de período igual ou inferior a $T_m = 8$ s os níveis de galgamento das obras são relativamente reduzidos. Esta conclusão foi confirmada nos ensaios em modelo físico reduzido, tendo-se concluído que tais situações de galgamento não afetam a estabilidade da praia.

Importa salientar que as condições de galgamento observadas no modelo não foram influenciadas por condições de vento locais, questão que se referiu dever ser tida em consideração na análise dos resultados obtidos.

Perante os resultados obtidos e independentemente da frequência da ocorrência das condições de agitação marítima reproduzidas nos ensaios de galgamentos, alertou-se para a compatibilização dos possíveis galgamentos com os usos e utilizadores da plataforma, devendo a segurança de pessoas e bens serem prioritárias.

5 – PROJETO FINAL, CONSTRUÇÃO E ACOMPANHAMENTO DO PROTÓTIPO

5.1 – PROJETO FINAL

Tal como já referido o septo ou esporão central inicial (Alternativas 0 a 3) tinha por único objetivo reduzir as oscilações planimétricas de equilíbrio da praia, função da direção da agitação marítima incidente, isto é, evitar que a praia se desloque para um ou outro lado em função da persistência de agitação marítima dos sectores NW ou SW. Como ficou comprovado nos ensaios em modelo físico reduzido realizados no LNEC tal esporão não contribui para garantir a estabilidade global da praia.

Como era expectável os ensaios em modelo físico permitiram também verificar que a plataforma terminal (cais) do esporão central seria frequentemente galgada quando da ocorrência de estados de agitação com uma altura significativa igual ou superior a 2,0 m.

Mau grado estas conclusões obtidas a partir dos ensaios em modelo reduzido e das reservas colocadas pelo projetista, estando já as obras a decorrer, o promotor do empreendimento decidiu considerar a hipótese de substituir o esporão central por uma plataforma no intradorso do cais para aí instalar um restaurante, um bar, um solário e uma piscina, conjunto esse designado por “Bikini Beach Club” (Figura 8).

A questão que se pôs à partida foi saber se a localização de tais equipamentos seria segura, tanto em termos de bens como muito especialmente dos seus utentes, em situações de agitação marítima extremas, isto é, quando da ocorrência de temporais marítimos mais severos. Assim, a fim de avaliar as condições de segurança da plataforma do “Bikini Beach Club”, bem como das eventuais repercussões desta plataforma na estabilidade global da praia, foi decidido promover a realização de uma série de ensaios complementares em modelo físico (já descritos na secção 4.2).



Figura 8 – Configuração final da praia artificial, de acordo com o Projeto final incluindo a plataforma do Bikini Beach Club, após o início da exploração balnear (Dez 2016)

Na sequência dos ensaios realizados concluiu-se e propôs-se, entre outros aspetos, o seguinte:

- A nova configuração do septo central, tanto relativamente à posição da estrutura terminal (cais) como à criação da plataforma onde foi implantado o “Bikini Beach Club”, não iria alterar as condições de equilíbrio e de estabilidade da praia.
- Face aos riscos de ocorrência de galgamentos em situações de temporal marítimo extremas, foi proposto que a plataforma onde foi implantado o “Bikini Beach Club” ficasse afastada do intradorso da plataforma do cais no mínimo de 20.0 m;
- Deveriam ser reconfiguradas as retenções marginais de cada um dos lados da ligação entre a plataforma do “Bikini Beach Club” e a plataforma terminal (cais).
- Por razões de segurança, a fim de minimizar os riscos de enxovalamento da zona mais avançada da plataforma do “Bikini Beach Club” deveria ser prevista a construção na sua periferia de um murete de betão armado com uma altura de 0.9/1.0 m.

Igualmente, foi recomendado que durante a fase de exploração do empreendimento deveria haver uma contínua monitorização das previsões do estado do mar (mensal e semanal) recorrendo aos sites especializados disponíveis e credíveis (Instituto Hidrográfico de Portugal, Windguru, etc.) no sentido de, atempadamente, prever a ocorrência de situações de temporal e acautelar os riscos relativamente aos utentes e equipamentos perecíveis. Estas propostas e medidas revelaram-se extremamente pertinentes tendo em conta o comportamento das obras na sequência dos temporais que já se registaram desde a sua construção (17 e 18 de Fevereiro de 2017 e 3 de Abril de 2017).

5.2 – CONSTRUÇÃO E ACOMPANHAMENTO PÓS-OBRA

As obras de construção da praia artificial do “LLANA BEACH HOTEL” foram iniciadas em Maio de 2015, tendo numa primeira fase sido construídos os esporões Norte e Sul e só posteriormente sido construída a plataforma onde foi implantado o “Bikini Beach Club” e a estrutura terminal (cais) do septo central e o enchimento com areia da praia criada no interior da bacia definida pelos dois esporões, trabalhos estes que foram concluídos em Novembro de 2016, data em que foi iniciada a utilização balnear da praia. De referir que durante o Inverno (Novembro de 2015 e Março de 2016) os trabalhos estiveram suspensos.

Nas Figura 9 seguir apresenta-se, a título de exemplo, imagens do início da construção do esporão Norte. Nestas fotografias é perfeitamente visível a bancada rochosa existente abaixo do nível da baixa-mar.

De referir que a areia utilizada para o enchimento artificial da praia não tinha as características definidas no projeto e consideradas nos ensaios em modelo físico, dado ter sido uma areia bastante mais fina que a prevista e, dada a sua origem eólica, relativamente monogranular. A areia utilizada resultou de uma grande escavação realizada pelo empreiteiro (SANJOSE Cabo Verde) numa zona próxima no âmbito de outro projeto, pelo que, por razões económicas, foi dispensada a importação de areia do exterior de Cabo Verde. Nas Figura 10 apresentam-se algumas imagens do processo de enchimento artificial com areia da praia.



Figura 9 – Início da construção do esporão Norte. Zona do enraizamento (Junho, 2015)



Figura 10 – Fase da alimentação artificial da praia e de construção da plataforma do “Bikini Beach Club” (Julho, 2016)

Na Figura 11 apresenta-se uma fotografia panorâmica da situação da praia em Julho de 2017, isto é, cerca de um ano após o início da sua alimentação artificial (Figura 8). A praia tem mantido uma relativa estabilidade, não se verificando perdas importantes de areia, apesar da areia utilizada na alimentação artificial ter uma pequena granulometria, isto é, ser bastante fina.

Uma situação que se tem registado é uma relativa acumulação de areia na berma da praia em prejuízo da areia existente na zona submersa. De referir também o efeito de tómbolo provocado pela plataforma do septo central, efeito este que era expectável. Com o decorrer do tempo tem-se verificado uma acumulação sedimentar a barlamar do esporão Norte com a consequente melhoria das condições balneares da praia frente ao “Dunas Beach Resort”.



Figura 11 – Vista panorâmica da praia artificial (Julho 2017)

Um aspeto que merece uma referência especial é o aumento significativo da vida marinha na área da praia, potenciado pelo abrigo proporcionado pelas estruturas em talude de enrocamentos e de acrópodes dos mantos de proteção dos esporões.

Estas obras, desde a sua conclusão, já foram atingidas por dois temporais de elevada magnitude (17 e 18 de Fevereiro de 2017 e 3 de Abril de 2017). Apesar da enorme violência da agitação marítima incidente sobre as obras, bem patenteada na Figura 12, não se registaram quaisquer danos estruturais em qualquer das obras marítimas, incluindo a praia. Esta conclusão assenta nas inspeções subaquáticas realizadas logo após os temporais, com filmagem das zonas submersas de todas as obras.

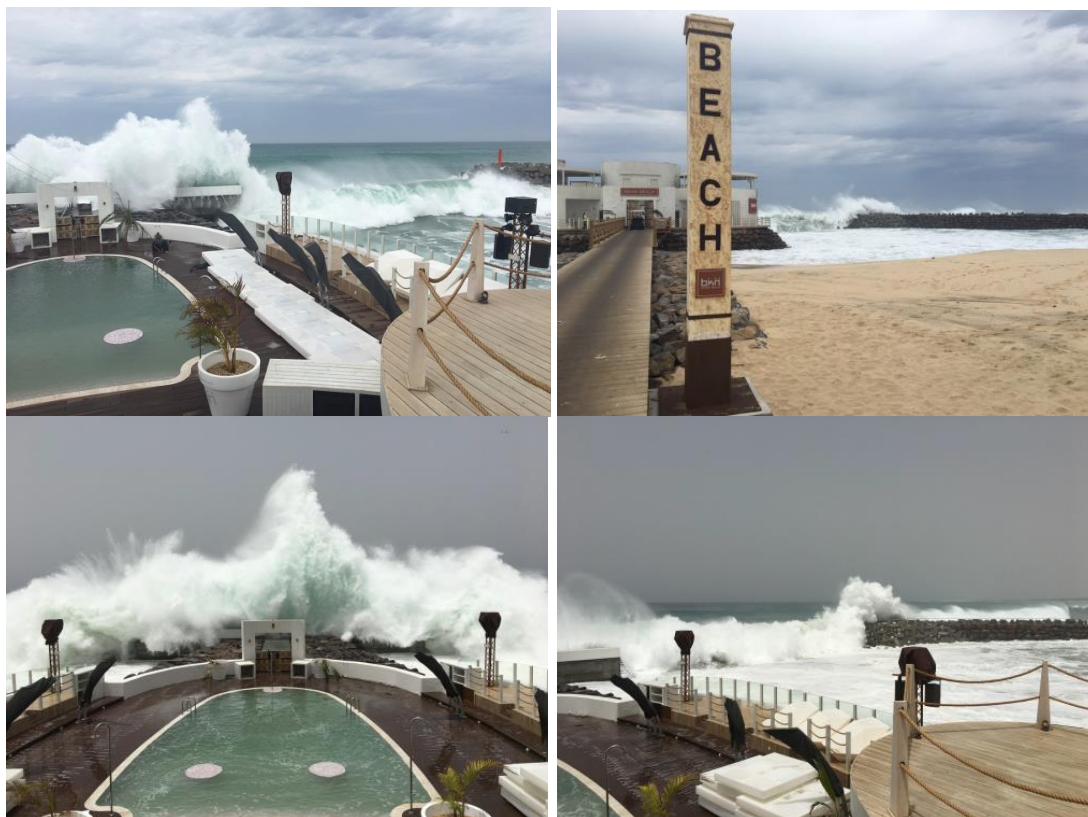


Figura 12 – Ação das ondas durante: o temporal de 17 e 18 de Fevereiro de (2017) (imagens superiores); o temporal de 3 de Abril de 2017 (imagens inferiores)

6 – CONCLUSÕES

No presente artigo pretendeu-se fazer a apresentação de um exemplo onde a engenharia costeira desempenha um papel importante no fomento da qualidade da utilização da orla marítima, bem como no desenvolvimento regional que, teoricamente, contribuirá para a melhoria da qualidade de vida das populações locais.

Pretendeu-se ainda mostrar de que forma todas as componentes de base de um empreendimento se deverão articular, tendo como foco o estudo, a otimização, a segurança, a preservação ambiental e o desenvolvimento socioeconómico. No caso particular de obras marítimas, esta articulação pode ainda ser decisivamente enriquecida com o recurso a ensaios em modelo reduzido, que, embora associados a algum nível de incerteza, continuam a ser uma ferramenta fundamental para a prossecução de empreendimentos costeiros e portuários, tendo em conta a avaliação da sua eficácia e a sua otimização, ou ainda para justificar formas de utilização que garantam a sustentabilidade dos ambientes onde esses empreendimentos são implementados.

A modelação física das alternativas intermédias permitiu ir otimizando a configuração das obras e da praia, ganhando ao mesmo tempo maior sensibilidade e confiança sobre o comportamento sedimentar do modelo físico. Foi também possível melhorar a solução da soleira de contenção

da praia inicialmente projetada e prever com relativo rigor a dinâmica sedimentar expectável da praia, para dois tipos de granulometria dos sedimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao “THE RESORT GROUP”, ao Grupo SANJOSE Portugal e à Construtora São José Cabo Verde a autorização para publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Dean, R.G., 1985. Physical modelling of littoral processes. In Physical Modelling in Coastal Engineering (Edt. Robert A. Dalrymple).

Kamphuis, J.W., 1985. On Understanding Scale Effect in Coastal Mobile Bed Models. In Physical Modelling in Coastal Engineering (Edt. Robert A. Dalrymple): 141-162.

LNH, 1967. Note sur les conditions d'établissement des échelles de similitude des modèles réduits à fond mobile. Laboratoire National d'Hydraulique, Division Hydraulique Maritime, Chatou, France.

Noda, E.K., 1972. Equilibrium Beach Profile Scale-Model Relationship. ASCE J. Waterways, Harbours and Coastal Engng. Div., 98 (WW4), 511–528.

Sanches do Valle, A., e Morgado, J., 2013. Llana Beach Hotel (Ilha do Sal – Cabo Verde): Projecto para a melhoria das condições balneares da praia. 8^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, LNEC, 10 e 11 de Outubro de 2013.

Sancho, F. E., Freire, P., 2015a. Ensaio em modelo físico tridimensional de uma praia artificial na Ilha do Sal, República de Cabo Verde - Volume I: Estabilidade sedimentar da praia. Relatório 332/2015 – DHA/NEC, Out 2015, LNEC, Lisboa.

Sancho, F. E., Silva, L.G., 2015b. Ensaio em modelo físico tridimensional de uma praia artificial na Ilha do Sal, República de Cabo Verde - Volume II: Galgamento e otimização da configuração das obras. Relatório 416/2015 – DHA/NEC, dez 2015, LNEC, Lisboa.

Sancho, F., Freire, P., Oliveira, F.S.B.F., 2009. Modelação física da evolução do perfil de praia a diferentes escalas. 6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009.

Van Rijn, L.C., Tonnon, P.K., Sánchez-Arcilla, A., Cáceres, I., Grüne, J., 2011. Scaling laws for beach and dune erosion processes. Coastal Engineering, Volume 58, Issue 7, pp. 623-636, doi:10.1016/j.coastaleng.2011.01.008.

Vellinga, P., 1982. Beach and dune erosion during storm surges. Delft Hydraulic Laboratory, publication n. 276.

Vicente, C., 1991. Aperfeiçoamento de métodos de modelação matemática e física aplicáveis a problemas de dinâmica costeira. Programa de Investigação. LNEC, Lisboa.

WW, 2012. Llana Beach Hotel: Estudos e projectos de intervenções para melhoria das condições balneares. Projeto Base (Julho, 2012) e Projeto de Execução (Novembro, 2012). Relatórios da WW, Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A.