



4^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DE REQUALIFICAÇÃO DA PRAIA FORMOSA

Francisco Sancho, Filipa S.B.F. Oliveira, Paula Freire

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente
Av. do Brasil, 101. 1700-066 Lisboa
fsancho@lnec.pt, foliveira@lnec.pt, pfreire@lnec.pt

RESUMO

Apresenta-se o estudo de viabilidade técnica de construção de uma praia artificial de areia na *Praia Formosa*, Região Autónoma da Madeira. Neste estudo abordam-se aspectos relacionados com a implementação e auto-manutenção de um perfil de praia, constituído por areia, sobre o actual fundo de sedimentos (muito grosseiros na parte emersa e de areias vasosas finas na zona submersa). Apresentam-se as metodologias de estudo, envolvendo a análise de dados, e modelação matemática e física (em modelo reduzido) das várias soluções estudadas.

O trabalho inclui a caracterização do clima de agitação marítima em frente à praia, o cálculo das taxas de transporte de sedimentos ao longo do perfil transversal em três sectores da praia, a avaliação da evolução média anual da forma plana da praia e a simulação da dinâmica sedimentar. Propõem-se duas soluções para a requalificação da actual praia, recorrendo à alimentação artificial. Analisa-se o desempenho das soluções propostas, concluindo-se em favor da viabilidade técnica de construção de uma nova praia, de areia grosseira, complementada com a construção de um esporão terminal na ponta Este e de uma soleira submersa, ao longo de todo o seu comprimento.

1 – Introdução e Objectivos

A crescente actividade turística na Ilha da Madeira tem propulsionado a requalificação ambiental da orla costeira. Em particular, a praia Formosa, situada no concelho do Funchal, é alvo de um projecto de requalificação paisagística, do qual se apresenta aqui o estudo técnico da viabilidade de construção de uma praia de areia (branca).

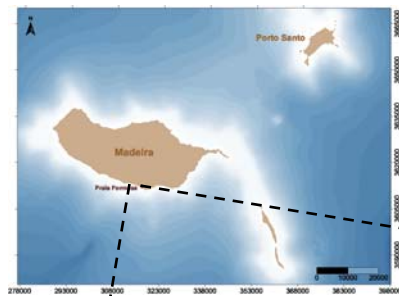
A praia Formosa (Figura 1) está localizada na costa Sul da Ilha da Madeira, de características vulcânicas e de declive muito acentuado, encontrando-se profundidades da ordem de 1000 m a menos de 5 km da linha de costa. A costa Sul apresenta algumas praias encaixadas, compostas maioritariamente por materiais com granulometria muito grosseira na zona emersa, como é o caso da praia Formosa.

O presente trabalho debruça-se sobre a caracterização geomorfológica e sedimentológica da actual praia, a caracterização da agitação marítima, a modelação e interpretação da dinâmica hidro-sedimentar da actual praia, a proposta de soluções de requalificação, e o estudo da estabilidade e viabilidade de uma nova praia, de areia (branca), em lugar da actualmente existente. Por fim, resumem-se as conclusões deste trabalho e elaboram-se algumas recomendações referentes à execução da nova praia.

2 – Caracterização da praia actual

2.1 – Caracterização do local

A Praia Formosa (Figura 1) tem uma extensão de, aproximadamente, 1000 m, e está localizada no Concelho do Funchal, na Região Autónoma da Madeira. A praia é delimitada, em terra, por um passeio marítimo em quase todo o seu desenvolvimento, para o interior do qual se encontra um parque de reservatórios de combustível, estaleiros de construção e pequenos equipamentos precários de recreio (RISCO, 2002). Esta área encontra-se ainda limitada por arribas a montante e recebe as águas da Bacia da Ribeira de São Martinho.



Cerca de 1200 m a Oeste da Praia Formosa existe uma zona sob a jurisdição da Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira (APRAM), designada por Terminal da Praia Formosa, onde está instalado um terminal de combustíveis destinado à descarga de granéis líquidos (derivados do petróleo).

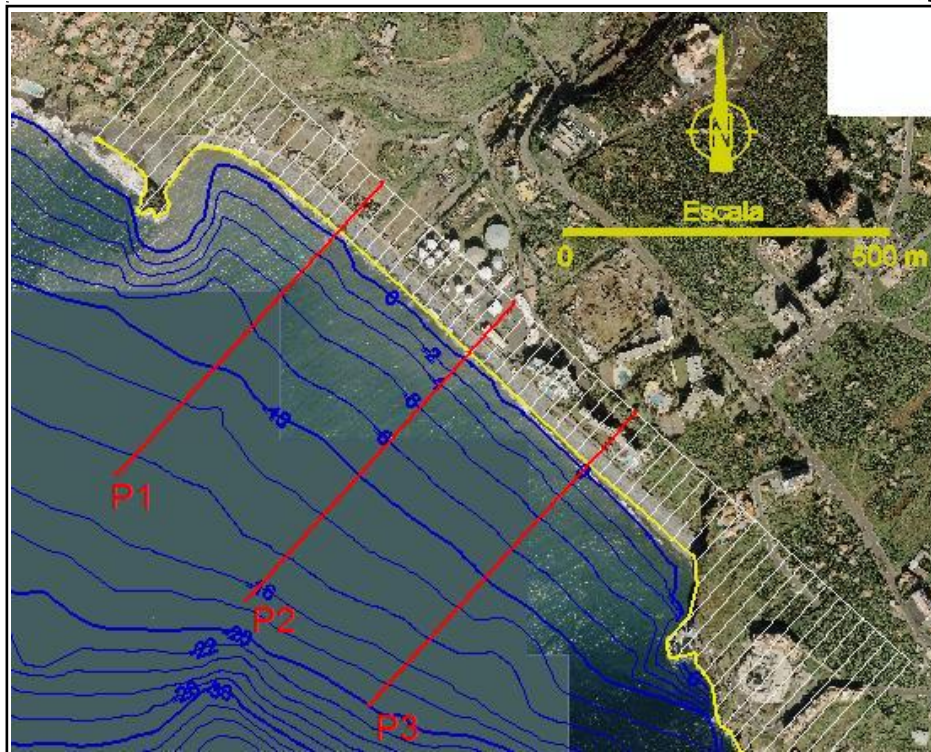


Figura 1 – Praia Formosa. Localização dos perfis de praia e grelha de cálculo.

A praia Formosa está delimitada a Este e Oeste por promontórios rochosos (Figura 2), salientes cerca de 100 m, que condicionam a transposição natural de sedimentos da praia para as regiões costeiras adjacentes. O extremo Oeste da praia encontra-se artificializado através da ligação por aterro da praia a um ilhéu rochoso. Este aterro, efectuado entre 1987 e 1992, é formado por um enchimento de material de características sedimentares mais finas do que as da praia e está protegido contra a acção das ondas por enrocamento (Figura 3a) e um muro vertical. A praia apresenta uma defesa frontal (“paredão”) que suporta o actual passeio marítimo. Esta é uma estrutura do tipo muro vertical com crista deflectora, que apresenta um desnível em relação à praia da ordem de 2 a 3 m, e que se encontra também protegida por enrocamento em certas zonas (Figura 3b).

Na ausência de um levantamento topo-hidrográfico recente da praia e zona marítima adjacente, elaborou-se uma base de dados de hidrografia (pontos X,Y,Z, referidos ao sistema UTM e Zero Hidrográfico) resultantes da combinação de vários levantamentos hidrográficos existentes e compatíveis (Sancho, 2004), de origens e datas diversas.

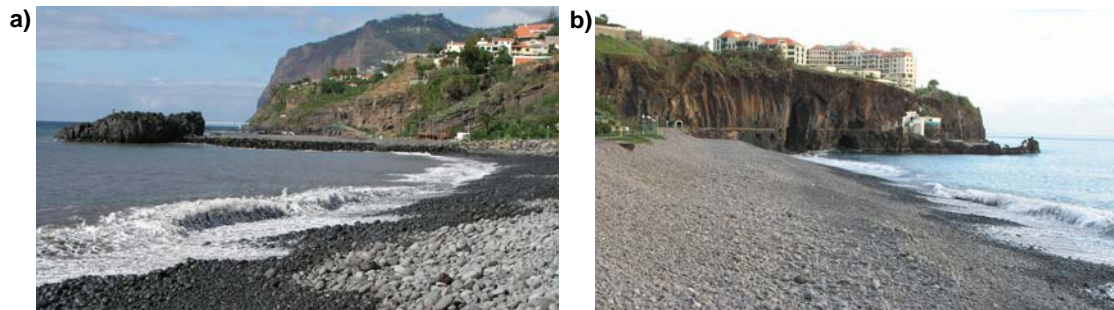


Figura 2 – Extremos da praia Formosa (2004/11/19): a) rochedo Oeste; b) promontório Leste.

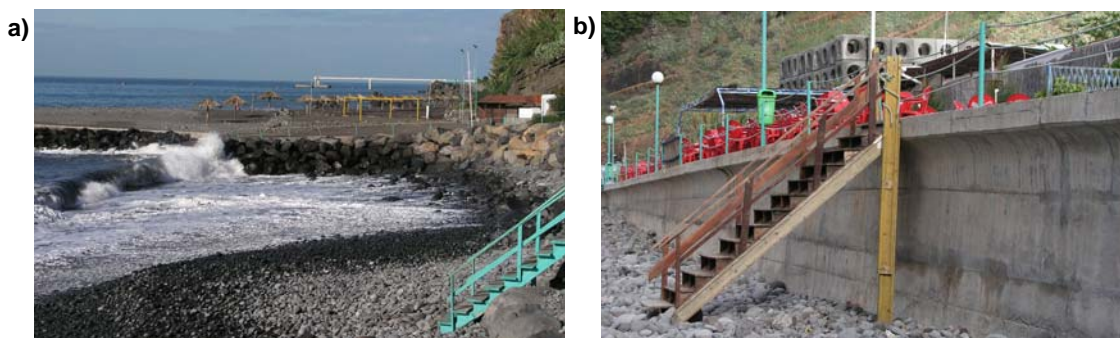


Figura 3 – Praia Formosa (2004/11/19): a) protecção de enrocamento no extremo Oeste; b) defesa frontal aderente.

Complementarmente, foi efectuado um levantamento topográfico da parte emersa da praia e passeio marítimo, em Novembro de 2003. Com base nestes elementos, construiu-se um modelo digital de terreno (MDT) para a zona de estudo, referido ao Zero Hidrográfico (ZH). Saliente-se que o MDT final (Figura 4) resulta da interpolação de um conjunto variadíssimo de levantamentos com escalas e precisões diversas, que contêm algumas lacunas e não estão totalmente actualizados.

A análise de fotografias aéreas e ortofotomapas do local, datadas de 1979 a 1999 (Sancho, 2004), permitiu concluir que a praia Formosa apresenta uma linha de costa relativamente estável, podendo no entanto haver pequenos desvios sazonais da mesma. As imagens sugeriram, ainda, que existe uma percentagem significativa de sedimentos finos em suspensão, até distâncias da ordem dos 500 m da linha de costa.

2.2 – Sedimentologia e morfologia

Com vista à caracterização granulométrica dos sedimentos, foi realizada uma campanha de amostragem e recolha de areias nos dias 18 a 20 de Novembro de 2003 (Freire e Sancho, 2004), cujos resultados se resumem de seguida:

- As areias da zona sub-aérea da praia Formosa são areias lavadas, bem seleccionadas, de grão médio, cujo diâmetro mediano varia entre 0,3 e 0,4 mm. Estas areias estão localizadas, fundamentalmente, em duas zonas distintas: uma a Oeste da Praia Formosa, na zona do aterro de ligação do ilhéu rochoso à costa; outra sensivelmente abaixo do ZH, ao longo de todo o desenvolvimento da Praia Formosa, com maior visibilidade no seu

extremo Oeste. Em determinadas zonas, as areias aparecem também misturadas com cascalho.

- A zona da berma da praia é composta por balastros (sedimentos com diâmetro superior a 2 mm) de cor escura. Na generalidade, mais próximo da linha de água encontra-se cascalho com diâmetro mediano igual a, aproximadamente, 50 mm, e na parte mais alta da praia encontram-se seixos e blocos, de dimensões médias variáveis, predominantemente da ordem de 100 a 300 mm.
- Os sedimentos ao largo (situados a profundidades entre -10 e -20 m ZH) são areias vasosas, cuja fracção silto-argilosa varia entre 9 e 24%. A fracção arenosa corresponde a areias finas a muito finas, com diâmetro mediano entre 0,1 e 0,15 mm.

De acordo com a informação disponível na carta "NORTH UP CHART 24", n.º 5122-CAM-NU-24-10K, realizada pela empresa "Fugro Survey Limited" na plataforma interna até à batimétrica -10 m (ZH), identificam-se, fundamentalmente, areias finas negras e pequenas zonas de fundo rochoso. Entre os -10 e -15 m de profundidade existe uma camada de areia e cascalho sobre fundo rochoso, ao longo de toda a praia. Abaixo do -15 m (ZH) predomina a areia fina com silte e cascalho. Ao longo do vale submarino identificado na zona leste da praia Formosa depositam-se argilas-arenosas, até profundidades de 100 m.

Constata-se que, de uma forma geral, a vertente Sul da ilha da Madeira é de inclinação acentuada, por vezes escarpada, verificando-se alguma deposição dos sedimentos transportados pelos cursos de água que a drenam (PRAM, 2002). Relativamente à morfologia dos fundos, o estudo de IH (2003a) contém informação sobre a natureza dos fundos na costa Sul da ilha da Madeira, na zona entre a Ponta do Pargo e o Cabo Girão.

De uma forma geral, em frente à praia Formosa, a plataforma costeira é estreita (Figura 4), com declives da ordem de 1:30 entre os -10 e -50 m (ZH), tornando-se mais acentuados com o aumento da distância à costa. Nesta faixa costeira, na zona Leste da praia Formosa, existe um vale submarino pronunciado entre os -20 e -100 m (ZH) que drena os sedimentos transportados no sentido Oeste-Leste ao longo da praia; existem também alguns rochedos mais ou menos pronunciados. A partir dos 100 a 200 m de profundidade, a plataforma cai abruptamente.

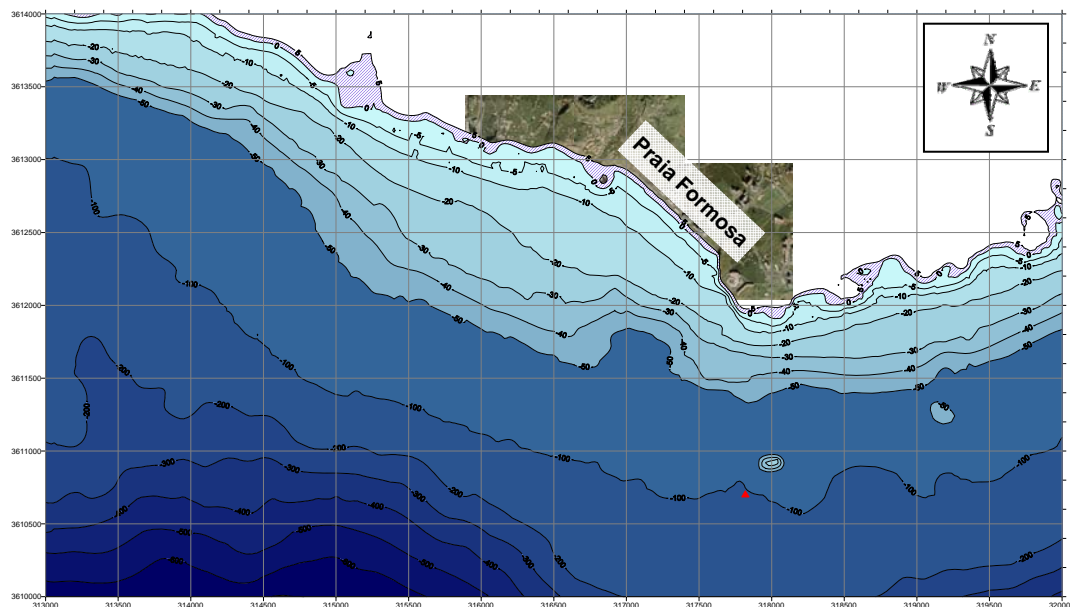


Figura 4 – Localização da bóia-ondógrafo (○) e batimetria da zona marítima em frente à praia Formosa.

2.3 – Agitação marítima

A agitação marítima é o agente físico dominante responsável pela dinâmica sedimentar na praia Formosa, devido à fraca contribuição de outros agentes, tais como, correntes marítimas ou de maré. Consequentemente, estimou-se o regime geral de agitação marítima na batimétrica -10 m (ZH), em frente à praia Formosa. Devido à ausência de dados locais, determinou-se em primeiro lugar o regime geral de agitação marítima ao largo (vidé Capitão *et al.*, 2003) a partir de 6 anos de dados provenientes duma bóia-ondógrafo localizada ao largo da Ponta da Cruz, Funchal (Figura 4). Uma vez estabelecido, o regime ao largo foi propagado para a frente da praia Formosa, através do modelo numérico REF/DIF (Dalrymple e Kirby, 1991), permitindo assim reconstituir o regime de agitação local (Sancho, 2004).

Os dados da bóia-ondógrafo utilizados correspondem ao período entre 1 de Janeiro de 1997 e 31 de Dezembro de 2002. Este ondógrafo encontrava-se fundeado aos 100 m (ZH), na posição 32°37'06"N e 16°56'30"W (referido ao sistema WGS84). Complementarmente, colmatou-se as falhas de dados durante este período de registo (devido a paragens do sistema de recolha de dados) com resultados do modelo de hindcast MAR3G (Pires e Carvalho, 1996), calibrado para o efeito.

Como resultado deste trabalho, apresenta-se na Figura 5a a distribuição da frequência de ocorrência acumulada, por classes de alturas de onda e para cada sector de direcção da agitação marítima de amplitude de 22,5°. A direcção de incidência é relativa ao Norte geográfico. Da análise desta figura facilmente se conclui que as ondas mais frequentes são provenientes dos sectores W e WNW, em particular, para as ondas com maior altura significativa, Hs. As ondas com Hs inferior a 0,5 m são maioritariamente provenientes da direcção SSW. Por outro lado, a Ilha da Madeira proporciona na costa Sul um abrigo natural à ondulação proveniente do sector Norte. Por isso, o regime ao largo não apresenta registos provenientes das direcções entre WNW e ENE.

Apresenta-se ainda na Figura 5b o histograma marginal do período de zero ascendente, Tz, obtido da análise da mesma série de dados. Esta distribuição mostra que as ondas mais frequentes têm períodos compreendidos entre 5 e 7 s.

A análise conjunta da série temporal de 6 anos dos ternos de valores Hs, Tz e θ , permitiu, ainda, estabelecer o regime simplificado de agitação marítima ao largo (Sancho, 2004), cujos detalhes se omitem aqui por brevidade. Esta simplificação resultou na caracterização do regime ao largo através de 37 combinações distintas de Hs, Tz e θ , representativas do regime observado.

Com base no regime ao largo simplificado, efectuaram-se cálculos com o modelo de propagação e deformação de ondas REF/DIF para a obtenção das condições de agitação marítima em frente à praia Formosa. As profundidades para os cálculos com o modelo de propagação de ondas foram obtidas a partir do MDT, para as condições do nível médio anual de maré: +1,40 m (ZH). Não se consideraram, assim, variações do nível do mar nos cálculos da agitação marítima local.

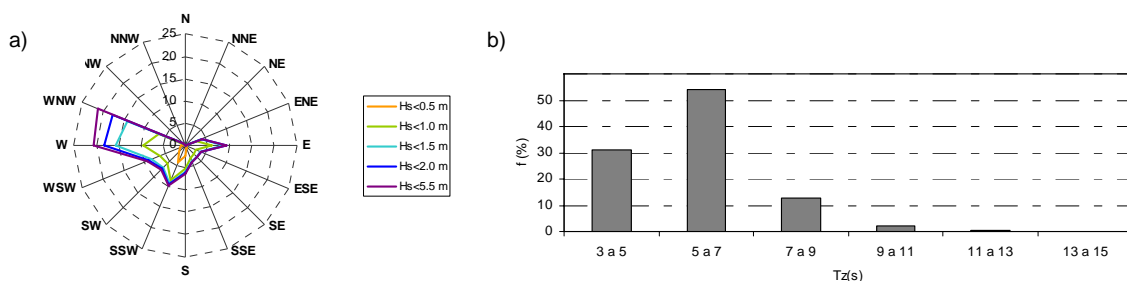


Figura 5 – Regime geral de agitação marítima ao largo do Funchal (dados de 1997 a 2002); a) Frequências acumuladas (em %) por classes de Hs, para cada rumo; b) Histograma marginal de Tz.

Dadas a larga gama de direcções de onda a simular, as características da batimetria da zona e as limitações do modelo, foram utilizados três diferentes domínios rectangulares de cálculo para o modelo REF/DIF, de acordo com a direcção de onda incidente a propagar. Cada um destes domínios apresenta rotações distintas em relação ao sistema de coordenadas UTM, de forma a que a direcção de onda dominante seja sensivelmente alinhada com um dos eixos principais nestes domínios rectangulares.

A título de exemplo, apresenta-se na Figura 6 os índices agitação e direcções de onda na batimétrica -10 m (ZH), em frente à praia Formosa, para duas ondas ao largo provenientes da direcção SSE ($\theta=157,5^\circ$), com período $T=6$ s e alturas significativas $H_s=0,79$ m e $H_s=1,41$ m, respectivamente. Neste caso, verifica-se um aumento das condições de agitação marítima ao longo da praia, de Oeste (à esquerda no eixo das abcissas) para Leste (à direita). No entanto, para outras condições de agitação ao largo, o resultado local poderá ser diferente.

Os cálculos efectuados permitem concluir que, de uma forma geral, o índice de agitação aumenta gradualmente à medida que a onda incidente roda de E (90°) para SW (225°), atingindo um máximo para esta direcção incidente. Seguidamente, à medida que a onda roda de SW (225°) para W-WNW (285°), o índice de agitação diminui gradualmente. Este resultado é de esperar, visto que a Praia Formosa está orientada na perpendicular ao rumo 225° (sendo o alinhamento da praia sensivelmente igual a 315°).

Verifica-se também, para grande parte dos resultados, que os índices de agitação são quase uniformes ao longo da praia. Existem, no entanto, algumas excepções a este resultado, que importa referir, pois o equilíbrio longitudinal da linha de costa também depende da variação longitudinal da altura de onda; em particular, as maiores variações ocorrem exactamente para as ondas provenientes do sector W-WNW, que ocorrem com uma frequência significativa (aproximadamente 22% do tempo). Assim, existe tendência para uma agitação ligeiramente mais intensa na extremidade Este da praia.

Por último, visando prosseguir com a análise da dinâmica sedimentar da praia, refira-se que se reconstituíram as séries temporais de 6 anos de agitação marítima locais, em frente à praia Formosa, nos pontos de profundidade 10 m (ZH) localizados ao longo dos perfis P1, P2 e P3, identificados na Figura 1.

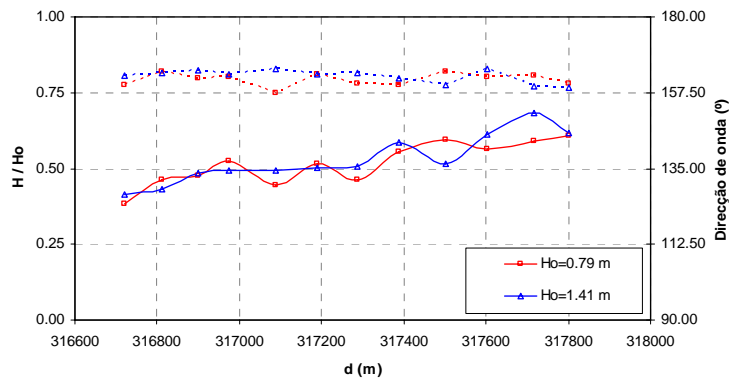


Figura 6 – Índices de agitação (—) e direcção de onda (- - -) na batimétrica -10 m (ZH) para as onda incidentes com direcção SSE ($157,5^\circ$), $T=6$ s, e $H_s=0,79$ m e $H_s=1,41$ m.

2.4 – Equilíbrio transversal

É reconhecido na literatura da especialidade que o perfil transversal de uma praia reflecte as condições de onda incidentes. Por outras palavras, existe um equilíbrio (mútua adaptação entre a agitação incidente e a forma do perfil transversal) que é dinâmico dada a variabilidade da agitação incidente. No entanto, para uma praia estável, geralmente existe um “perfil de



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

equilíbrio”, que corresponde a um perfil “médio”, dependente quase exclusivamente das características geométricas dos sedimentos (Dean, 1977).

Assim, procurou-se a função matemática típica do “perfil de equilíbrio” (Larson e Kraus, 1989) que melhor se ajustasse aos perfis transversais P1 e P3 indicados na Figura 1,

$$y = \frac{h}{m_0} + \left(\frac{h}{A} \right)^{3/2} .$$

Nesta função, h representa a profundidade, y a distância da linha de costa para barlar, m_0 o declive da berma da praia e A é um parâmetro de ajuste. Este ajuste permitiu estimar $m_0=5,5$ e $A=0,3 \text{ m}^{1/3}$. Vários estudos (USACE, 1995) apontam que o parâmetro A pode ser relacionado com o diâmetro mediano através da expressão $A = 0,21 d_{50}^{0,48}$. Para o valor $A=0,3 \text{ m}^{1/3}$ resulta então $d_{50}=2,1 \text{ mm}$.

Note-se que o diâmetro “teórico” encontrado é superior ao valor medido nas zonas submersa e sub-aérea da praia. A discrepância entre estes valores conduz às seguintes considerações: (i) os diâmetros dos sedimentos da zona submersa são em geral uma ordem de grandeza inferiores ao valor teórico; (ii) o perfil natural de uma praia com sedimentos de diâmetro inferior ao valor teórico seria bastante mais suave do que o observado. O facto do perfil transversal medido ser mais abrupto do que o esperado para os sedimentos existentes poderá ser atribuído à possível existência de “bed-rock” à superfície (suportado pela carta “NORTH UP CHART 24” referida na secção 2.2), e/ou à existência no material de fundo de uma fracção não desprezável de siltes e argilas, que lhe confere propriedades coesivas.

Com o objectivo de reproduzir o equilíbrio do perfil de praia existente efectuaram-se ensaios em modelo físico. Uma vez que no protótipo existem dois materiais com características granulométricas muito distintas, o que tornaria as condições de simulação muito complexas, optou-se por simular em separado a evolução do perfil para cada um destes materiais. Assim, reproduziu-se no canal de ondas regulares, à escala geométrica 1:50, o “perfil de equilíbrio” da praia, descrito anteriormente. Fizeram-se dois ensaios, um correspondente a uma praia de seixo, representado no modelo por areão; e outro correspondente a uma praia com areia de diâmetro, aproximadamente, igual a 1,3 mm, representada no modelo por areia fina (Sancho *et al.*, 2005).

Os resultados sugerem que o perfil de areia fina está em equilíbrio com as condições de agitação impostas, representativas do clima de agitação médio em frente à praia Formosa (determinado na secção anterior). Ou seja, o perfil está em equilíbrio para uma areia com diâmetro mediano de 1,3 mm, da mesma ordem de grandeza das dimensões dos sedimentos que foram estimadas para o perfil teórico ($d_{50}=2,1 \text{ mm}$).

Os ensaios efectuados em modelo físico permitiram ainda concluir que as ondas actantes na praia Formosa têm características predominantemente não erosivas, dando origem a perfis do tipo reflectivos, isto é, mais declivosos. Tal facto advém de as ondas predominantes possuírem declividades pequenas e de o declive da praia ser relativamente elevado. Neste caso, somente tempestades marítimas mais duradouras provocarão o transporte de sedimentos para maiores profundidades, conduzindo a perfis dissipativos.

2.5 – Transporte sedimentar longitudinal

O modelo LITDRIFT (DHI, 2003) foi aplicado com vista a avaliar o transporte sedimentar longitudinal, induzido pela agitação marítima. Consideraram-se três perfis transversais da Praia Formosa, P1, P2 e P3, localizados de forma equidistante ao longo da praia (Figura 1) e as séries de agitação marítima locais, calculadas anteriormente. Para cada perfil de praia, estimou-se a distribuição do transporte longitudinal em ambos os sentidos, Oeste e Este, permitindo assim conhecer a actual extensão da zona activa submersa da praia, i.e., onde ocorre transporte longitudinal significativo. Em cada perfil de praia também se discretizou o transporte sedimentar em função dos parâmetros altura e direcção da onda incidente,

permitindo conhecer as classes de ondas que oferecem maior contribuição para o transporte longitudinal neste trecho da costa sul da ilha da Madeira (Sancho *et al.*, 2005).

Dada a existência de minerais pesados nos sedimentos (IH, 2003), a massa volúmica considerada para os sedimentos foi 3000 kg.m^{-3} . No que respeita à granulometria dos sedimentos ao longo dos três perfis, desde o limite superior da praia até ao nível de baixa-mar (+0,4 m ZH), considerou-se na simulação um diâmetro mediano d_{50} igual ao valor médio do das amostras sedimentares mais próximas. Abaixo do nível de baixa-mar, admitiu-se $d_{50}=2,1 \text{ mm}$, que corresponde ao diâmetro mediano do material sedimentar que está em equilíbrio com a geometria do perfil observado.

Para a estimativa do transporte sedimentar longitudinal utilizaram-se as séries de agitação marítima locais, calculadas na batimétrica -10 m (ZH), em cada perfil. Os resultados obtidos indicam que o transporte longitudinal ocorre maioritariamente no sentido Oeste-Este (Figura 7). Durante os 6 anos de simulação (1997-2002), o transporte para Este foi cerca de 88% do transporte total. No período analisado ocorreram variações interanuais do transporte longitudinal. No entanto, observa-se que o transporte ocorre predominantemente nos dois últimos e dois primeiros meses do ano, identificando assim uma tendência que poderá corresponder a um padrão sazonal.

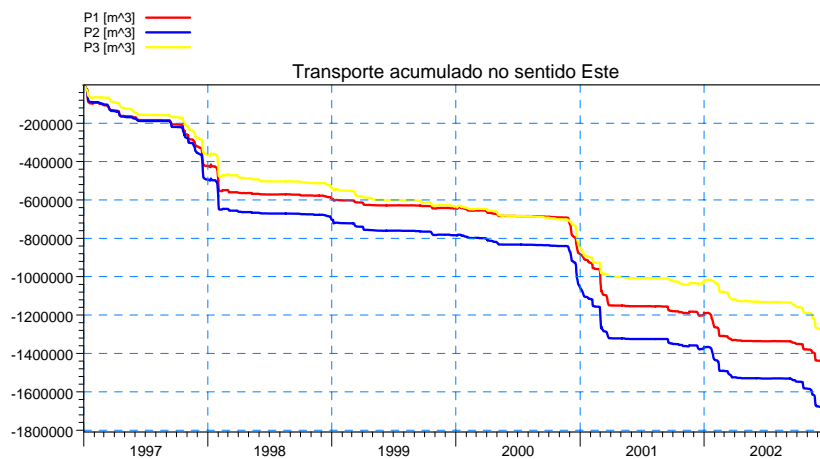


Figura 7 – Transporte acumulado (m^3) para Este nos perfis P1, P2 e P3 da praia Formosa.

Com base no valor médio para os três perfis (P1, P2 e P3), obteve-se o transporte no sentido Oeste-Este anual médio de $260 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$.

Os cálculos efectuados indicam, ainda, que a zona activa da praia, ou seja, a zona onde ocorre transporte longitudinal significativo, tem uma extensão de cerca de 125 m. Simultaneamente, a magnitude do transporte máximo aumenta de Oeste para Este. Estas pequenas diferenças advêm não só das diferenças entre os três regimes de agitação locais, mas também da pequena diferença de inclinação do fundo que afecta a zona activa da praia.

A Figura 7 revela ainda que, no início de 1998 e início de 2001, se verificou um pequeno diferencial de transporte nos três sectores da praia, Oeste, central e Este. O impacto destes diferenciais de transporte longitudinal na configuração geométrica da linha de água são apresentados na secção seguinte.

2.6 – Dinâmica sedimentar longitudinal

Aplicou-se o modelo LITLINE (DHI, 2003) para simular a evolução da linha de costa por acção da agitação marítima, durante os 6 anos de dados. Desta forma, foi possível: (i) calibrar uma série de parâmetros hidromorfológicos específicos do modelo de forma a aplicá-lo adequadamente na análise de estabilidade da nova praia; e (ii) avaliar os máximos recuos e

avanços da linha de água, identificar zonas de vulnerabilidade deste trecho costeiro e verificar a ocorrência de tendências sazonais da geometria da linha de água.

Os resultados obtidos (Sancho *et al.*, 2005), dos quais se mostra um exemplo na Figura 8, indicam que praia aparenta sofrer oscilações reversíveis da linha de água, relativamente pouco acentuadas. Durante o período de simulação o maior recuo foi cerca de 21 m. Verifica-se também uma tendência para avanço da linha de água na zona Este e recuo na zona Oeste (excluindo o extremo).

O facto dos dados de campo indiciarem oscilações menores que as resultantes da simulação matemática, deverá estar relacionado com o menor transporte efectivo devido ao efeito desmobilizador da presença de sedimentos coesivos no fundo. A praia exhibe alguma vulnerabilidade, embora pequena, a uma acção erosiva no seu sector Oeste.

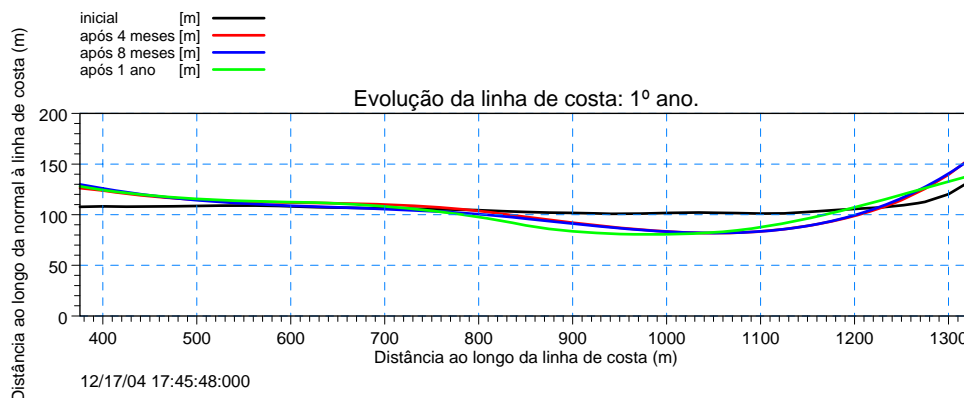


Figura 8 – Simulação da evolução da linha de costa na praia actual entre 1997 e 1998.

3 – Viabilidade técnica da construção da nova praia

3.1 – Considerações gerais

Genericamente, considera-se que a execução de alimentação artificial numa praia para fins turísticos é mais viável, técnica e economicamente, se se conjugarem os seguintes requisitos: ter uma importância turística significativa, haver disponibilidade próxima de areia adequada para o enchimento, ser a praia sujeita a um regime de agitação marítima moderado e não existirem grandes condicionalismos ambientais. Os autores consideram que no caso da Praia Formosa a terceira condição está preenchida não estando, no entanto, a segunda. Contudo, a areia poderá ser importada de outro lugar economicamente viável, preenchendo então também esse requisito. A avaliação dos outros requisitos está fora do âmbito deste estudo. A seguinte filosofia de intervenção foi adoptada neste estudo (Sancho *et al.*, 2005):

- propor uma solução, ou soluções, com impacte visual mínimo no que respeita a obras marítimas;
- estudar as soluções tecnicamente mais fiáveis, tendo em consideração as características locais da morfologia e da dinâmica sedimentar;
- considerar soluções que ofereçam um acréscimo máximo da largura da praia, da ordem de 50 m, e que impliquem intervenções mínimas na zona do passeio marítimo existente;
- estudar soluções técnicas independentemente da origem das areias.

Face aos resultados da análise do equilíbrio da praia existente e da morfologia da zona submersa, com particular destaque para o relativamente elevado declive dos fundos, considera-se que qualquer solução viável de construção de uma nova praia deverá tomar como ponto de partida a utilização de areias grosseiras. De facto, uma praia de areia grosseira ou seixos garante um perfil transversal de equilíbrio mais abrupto que o de uma areia fina ou média. Dado que o fundo rochoso onde os sedimentos assentam é inclinado, admite-se que o

perfil da praia com a camada arenosa subjacente siga, sensivelmente, paralelo ao fundo rochoso. Assim, concluiu-se que uma intervenção na praia com areias finas seria inviável.

Diversas soluções técnicas podem ser apresentadas para a possível execução de uma nova praia artificial de areia. Dada a inexistência de areia grosseira em percentagem significativa na zona emersa, qualquer solução passa imprescindivelmente por uma alimentação artificial, acompanhada, ou não, por obras de defesa, que poderão ser dos seguintes tipos: (i) esporões transversais à costa; (ii) quebra-mar destacado, emerso, paralelo à costa; (iii) soleira de retenção, submersa; ou (iv) uma combinação/variante das obras anteriores.

Tendo em consideração a filosofia de intervenção preconizada, as condicionantes do local e as alternativas de solução, escolheram-se como mais vantajosas e promissoras as seguintes opções de intervenção:

- Solução A) Enchimento artificial da praia, em toda a sua extensão, complementada com a construção de um esporão terminal na extremidade Este. Esta solução assenta na ideia que, após um reequilíbrio transversal, as areias se distribuem desde a berma da praia até à profundidade de fecho, com uma espessura sensivelmente uniforme;
- Solução B) Enchimento artificial da praia, complementada com a construção de um esporão terminal no extremo Este e construção de uma soleira submersa, de retenção de areias no sopé da praia, ao longo de todo o seu comprimento (Figura 9). Esta solução favorece a criação de uma praia semelhante à anterior até profundidades da ordem de -3 m (ZH), com menor volume de enchimento.

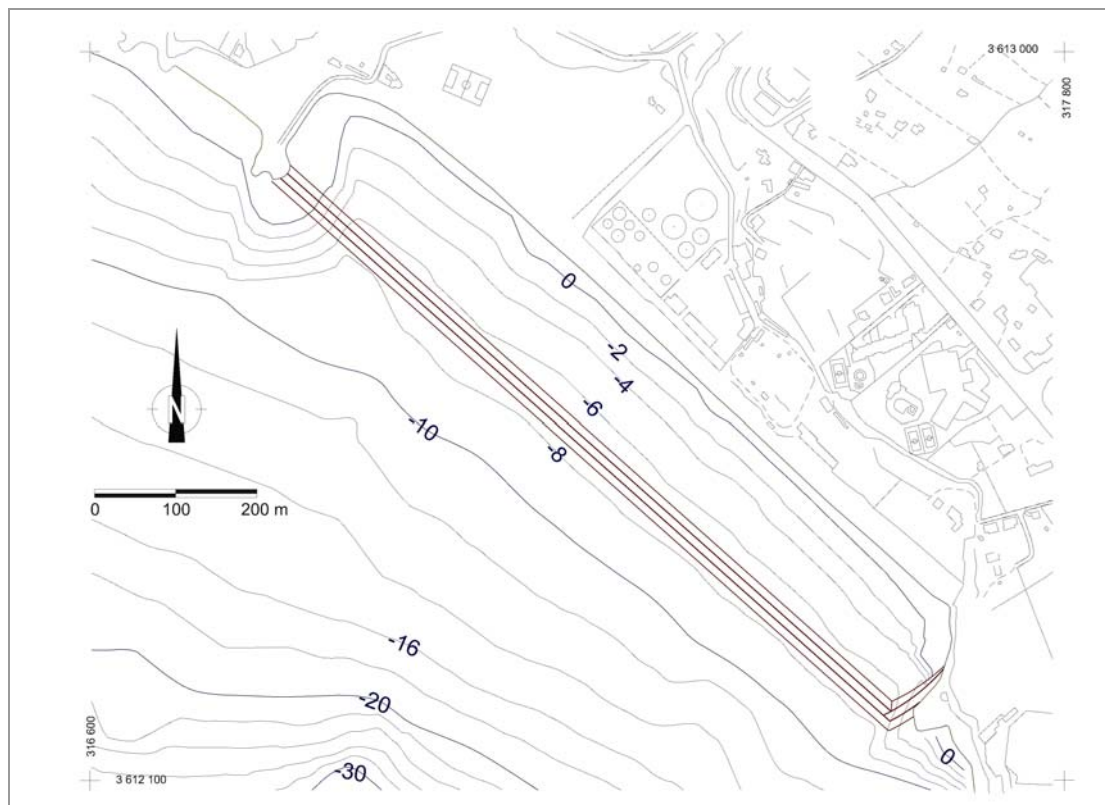


Figura 9 – Planta da configuração das estruturas da solução B para a nova praia.

Existe, particularmente para a solução A, a possibilidade de haver transporte longitudinal perto da profundidade de fecho, gerado quer pelas ondas quer por outras correntes marítimas, que levem à erosão contínua irreversível, mas previsivelmente lenta, do perfil de enchimento.

Pretende-se que o esporão terminal na extremidade Este, que poderá ser enquadrado na actual paisagem sem grande impacte visual e valorizado adequadamente através de intervenções arquitectónicas e paisagísticas, tenha a função de impedir a fuga de areia da praia através do canhão existente na base submersa da arriba. Este esporão deverá ter o comprimento mínimo suficiente que o ligue à soleira submersa, no caso da solução B (Figura 9). No caso da solução A deverá ter maior comprimento, de forma a evitar a transposição de areias que poderão ser arrastadas para este extremo da praia. A Oeste, a praia é contida pela estrutura artificial transversal já existente.

3.2 – Equilíbrio transversal

Em ambas as soluções considerou-se um enchimento com areia grosseira de diâmetro mediano 2,1 mm, compatível com um declive da praia semelhante ao actual, e com massa volúmica $2\ 650\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Considerando a sua utilização balnear, pretendeu-se a formação de uma praia com um declive médio da berma igual a 1:10, valor inferior ao actual, de 1:5,5.

Destas condições resulta o perfil teórico da nova praia, aplicando as equações anteriores, com $m_0=10$ e $A=0,3\ \text{m}^{1/3}$ (Figura 10). Este perfil define a geometria da praia desde o limite superior da berma até ao encontro com a soleira submersa no caso da solução B, e até à profundidade de fecho (7,5 m ZH), no caso da solução A.

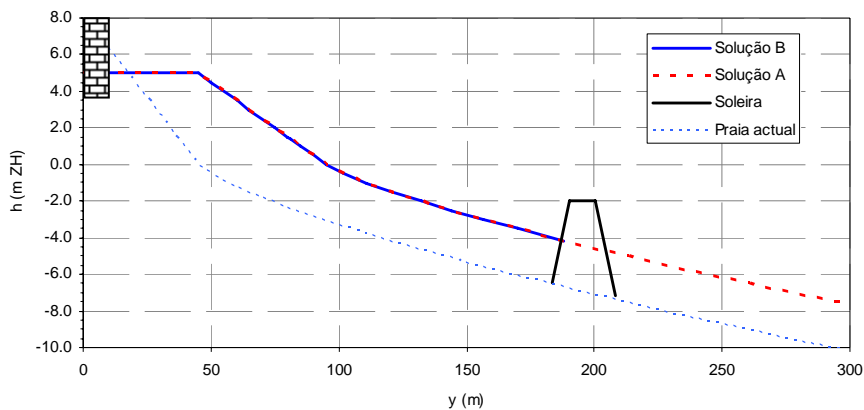


Figura 10 – Perfil teórico da praia futura: solução A e B, com indicação da estrutura de defesa aderente actualmente existente (escala vertical exagerada).

A cota superior da berma foi estipulada em +5 m (ZH), em consequência de se terem observado deslocções do perfil até este nível nos ensaios em modelo reduzido. Este valor é conservador em relação à actual cota da berma, situada entre os +3 e +4 m (ZH). A largura da berma depende da largura do enchimento da praia, igual a 50 m ao nível do ZH, sendo, aproximadamente, 32 m à cota +5 m (ZH).

Para a solução B estabeleceu-se a largura mínima da soleira igual a 10 m, tendo em consideração a sua capacidade efectiva de dissipação de energia em situações de temporal e o custo de obra. Quanto à cota de coroamento, e face ao regime de agitação incidente na praia, não deverá ser inferior a -3 m (ZH).

Efectuaram-se as seguintes simulações em modelo físico por forma a determinar a configuração final de equilíbrio transversal da praia e avaliar o risco de fuga de material para grandes profundidades:

- Solução A – um enchimento da praia com $800\ 000\ \text{m}^3$ de areia muito grosseira, de diâmetro mediano em protótipo igual a 1,6 mm;
- Solução B1 – enchimento da praia com $500\ 000\ \text{m}^3$, com o mesmo material da situação anterior e uma soleira submersa de enrocamento, paralela à linha de água, com cota de



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

coroamento -3 m (ZH), fundada entre os -6,5 e -7 m (ZH), e com declives dos taludes anterior e posterior de 3:2 (H:V);

- Solução B2 – variante das condições simuladas no ensaio anterior, correspondente à solução B, alterando a cota de coroamento da soleira para -2 m (ZH).

Note-se que os volumes de enchimento indicados são aproximados. Estima-se ainda a necessidade de remoção de cerca de 50 000 m³ do actual balastro da zona superior da praia, que deverá ser substituído também pela areia de enchimento.

Nos ensaios sujeitou-se a praia ao regime de agitação marítima médio e também a situações de temporal. Em particular, fez-se actuar (à escala do modelo) um regime correspondente ao temporal ocorrido com maior altura de onda significativa ($H_s=4$ m) local, registado no período de 6 anos de dados, entre 1997 e 2002. Fez-se ainda actuar um hipotético temporal, com $H_s=5$ m e $T=8$ s, que corresponderia a um evento de período de retorno superior a 1 ano, com ondas bastante declivosas e erosivas.

Os resultados do ensaio da solução A mostram que a zona superior da praia, acima do ZH, evoluiu no sentido de se aproximar do perfil de equilíbrio aquando da actuação do regime médio. No que diz respeito à actuação dos temporais, observa-se movimentação significativa de material até à cota -7,4 m (ZH).

Durante o ensaio da solução B1, com a actuação do regime de agitação médio anual, as oscilações morfológicas mais significativas ocorreram na zona superior da praia, cujo perfil evoluiu no sentido do perfil de equilíbrio. Durante a simulação de condições de temporal dá-se a movimentação significativa de material ao largo da soleira, aparentando haver alguma transposição de areia da praia para o largo, sobre a estrutura.

Os resultados do ensaio da solução B2 (Figura 11) mostram que as alterações morfológicas do perfil de praia foram semelhantes às que ocorreram no ensaio da solução B1, para as condições de agitação médias. Porém, durante a actuação do maior temporal (com $H_s=5$ m) durante 24 horas, observaram-se variações morfológicas mais significativas e evidências de transposição de material sobre a soleira em direcção às maiores profundidades. Nestas condições de agitação, severas, calculou-se em cerca de 10 000 m³ o material que transpôs a soleira ao longo do comprimento de toda a praia (1000 m, aproximadamente), correspondendo percentualmente a uma perda, irreversível, de 2 % do volume de enchimento. Nestas condições verifica-se também um ligeiro aumento da largura da praia emersa, de cerca de 5 m, havendo um ligeiro aumento do declive da praia.

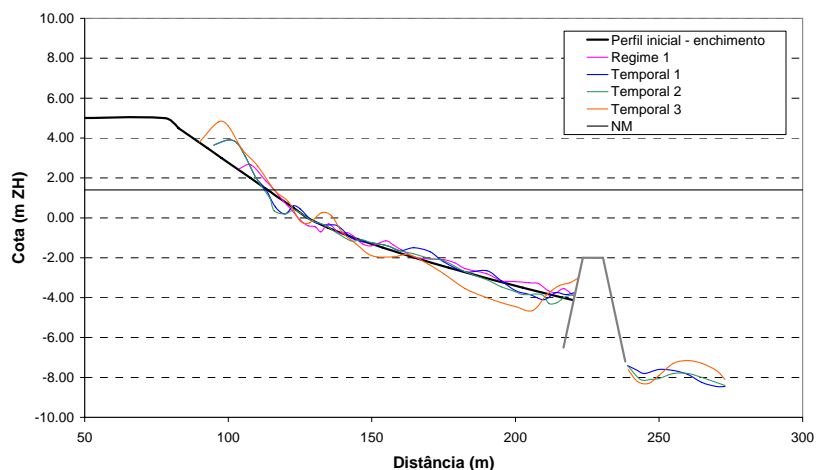


Figura 11 – Resultados do ensaio da solução B, com enchimento de 500 000 m³ e soleira com cota de coroamento a -2 m (ZH) (escala vertical exagerada).

Os resultados dos ensaios anteriores sugerem que a solução B é mais viável do que a solução A do ponto de vista do comportamento da praia, devido a haver menor perda de areias para maiores profundidades. A solução B é caracterizada pela construção de uma soleira de enrocamento à profundidade -6,5 a -7 m (ZH) com o coroamento à cota mínima de -2 m (ZH), devendo, no entanto, a definição exacta da cota de coroamento ser objecto de estudo mais detalhado.

Simulou-se ainda, com o modelo matemático LITPROF (DHI, 2003), o comportamento do perfil da nova praia sob acção da agitação marítima correspondente a uma tempestade, com vista a avaliar o efeito erosivo de um evento extremo, de curta duração. Considerou-se, assim, a actuação em modelo numérico do mesmo temporal considerado nos ensaios em modelo reduzido, nomeadamente, o maior temporal ocorrido no período de 6 anos de dados, de 15 a 19 de Dezembro de 2002, com H_s máximo da ordem de 4 m.

Os resultados da evolução do perfil em situação de temporal, para as soluções A e B (com o coroamento da soleira à cota -2 m (ZH)), são apresentados na Figura 12. Conforme era de esperar, a acção mais energética de um evento extremo de tempestade gera erosão da zona da face da praia, transporte deste material sedimentar no sentido da costa para o largo e acumulação deste material na zona submersa da praia, que resulta na formação de uma barra longitudinal. Da comparação entre estes dois resultados constata-se que a soleira limita a extensão da barra no seu desenvolvimento natural e afecta a geometria do perfil principalmente na sua parte submersa.

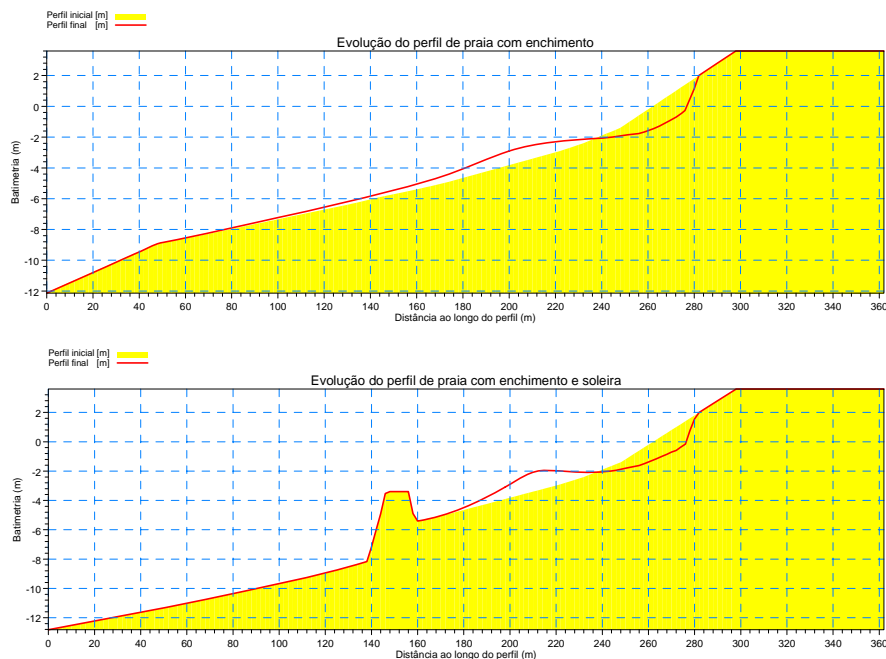


Figura 12 – Evolução das soluções A e B sob acção de ondas do temporal de Dezembro de 2002. Resultados do modelo LITPROF.

Os resultados da simulação permitem ainda concluir que a presença da soleira oferece as seguintes vantagens:

- Diminuição do volume de enchimento artificial mínimo necessário para garantir a recuperação natural do perfil de praia após a tempestade;
- Retenção do material sedimentar erodido da parte superior do perfil;
- Diminuição, ainda que não muito significativa, do volume sedimentar deslocado e conseqüentemente do recuo da face da praia.



4ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Acrescenta-se ainda que, outras simulações numéricas efectuadas com vista a analisar o comportamento da praia em função do posicionamento da soleira ao longo do perfil, assim como da altura mínima da soleira, mostraram que o posicionamento mais perto da costa e a diminuição da sua altura interferem na expansão natural do perfil de praia em condições de tempestade, aumentando assim o risco de ocorrência de transposição de areia para o largo, sem que a sua reposição para a costa se venha a fazer naturalmente.

A interpretação destes resultados, em conjunto com as conclusões dos ensaios realizados em modelo físico, indicam que a construção da soleira, com função de retenção dos sedimentos, contribui muito favoravelmente para a estabilidade da praia.

3.3 – Transporte sedimentar longitudinal

Dado que os resultados do equilíbrio transversal mostram ser a solução B mais vantajosa, prossegue-se somente com o cálculo do transporte sedimentar longitudinal da nova praia para esta solução.

Uma vez que será efectuado um enchimento artificial da Praia Formosa, admitiu-se que a morfologia do fundo será uniforme na direcção longitudinal, i.e., um único perfil representativo das condições morfo-sedimentares da praia.

Quanto ao transporte longitudinal na nova praia, solução B, observa-se que a sua grandeza para Este é cerca de $430 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, ou seja, cerca de 1,6 vezes superior ao estimado para a actual praia. Isto deve-se, exclusivamente, à substituição do material actualmente existente por outro com características sedimentológicas diferentes, uma vez que a configuração geométrica do perfil é semelhante e que quase todo o transporte se efectua na zona do perfil entre a soleira e a berma da praia (Figura 13). Conclui-se assim que na nova praia ocorrerá mais transporte sedimentar longitudinal numa extensão de praia inferior, devido à presença da soleira.

O conhecimento do transporte sedimentar é fundamental na calibração de modelos matemáticos de dinâmica sedimentar costeira e funciona como garante da aplicação dos modelos. Pensa-se que, neste estudo, o desconhecimento deste parâmetro poderá ter induzido a uma sobrestimação do transporte, quer actual, quer daquele que se estima que ocorrerá na nova praia.

Os resultados numéricos indicam ainda que o transporte longitudinal a barlamar da soleira é inferior a 0,5 % do transporte total, ou seja, é praticamente inexistente.

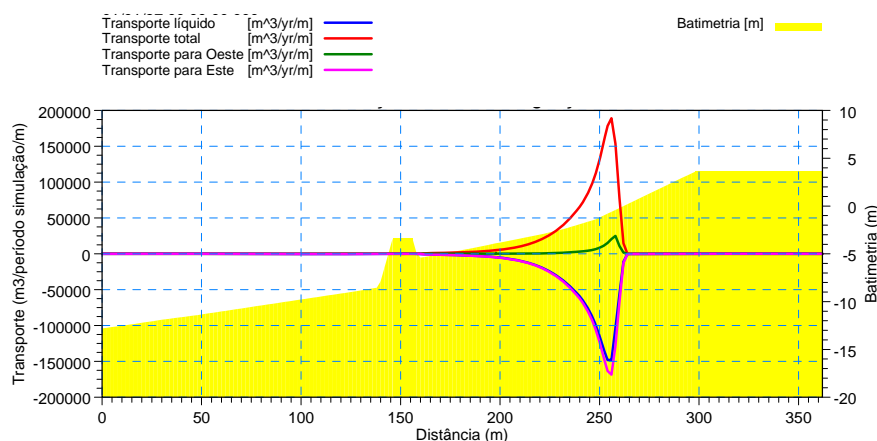


Figura 13 – Transporte sedimentar ao longo do perfil P2 da nova praia, solução B.

3.4 – Evolução longitudinal



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Finalmente, simulou-se a evolução da linha de costa da nova praia sob acção da série de seis anos de agitação marítima, tal como tinha sido feito na análise da praia actual. Pretendeu-se, assim, avaliar se a nova praia tem condições de estabilidade longitudinal, ou seja, se a acção da onda e o seu diferencial ao longo da praia garantem (ou não) a estabilidade da configuração da linha de água.

Aplicou-se o modelo LITLINE (DHI, 2003) para estudar a solução A, dado não ser aplicável para o estudo da solução B (por limitações do próprio modelo). No entanto, analisa-se qualitativamente o efeito da soleira nos resultados obtidos. Admitiu-se como situação de partida a praia após o enchimento artificial, ou seja, a linha de costa correspondente à configuração geométrica resultante de um avanço de 50 m da linha de água actual.

Os resultados (Figura 14) mostram que se acentuam as irregularidades da linha de água observadas durante a simulação da praia actual. Obtém-se a tendência para um recuo na zona Oeste da praia (a cerca de 275 m do seu extremo), atingindo valores máximos da ordem de 30 m, e um avanço no extremo Este, com valores máximos da ordem de 120 m. No entanto, este avanço máximo será substancialmente inferior para o caso da solução B, dado que a soleira, em conjunto com as estruturas transversais, funcionará de forma a impedir a saída e entrada de sedimentos na praia Formosa. Assim, para a solução B, estima-se que o recuo e avanço máximo da linha de água sejam da mesma ordem de grandeza, da ordem de 30 m.

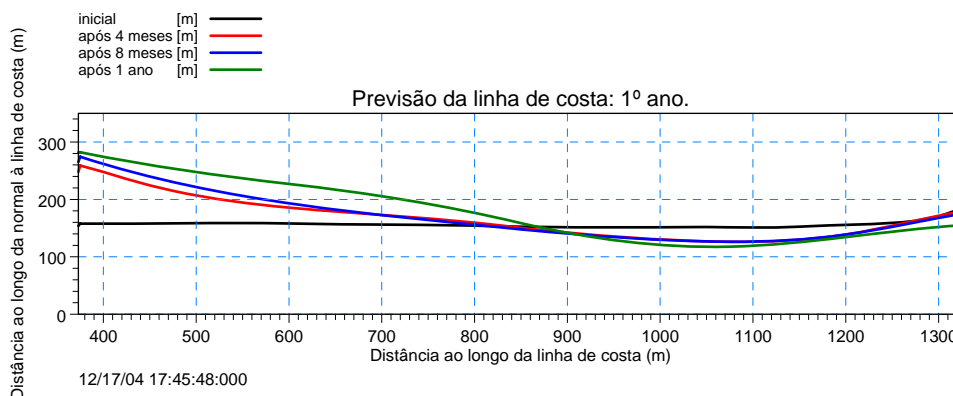


Figura 14 – Previsão da evolução da linha de costa para a nova praia.

Finalmente, importa destacar que o processo de recuo observado na zona Oeste da praia continua a ser reversível.

No essencial, esta previsão do comportamento sedimentar longitudinal da nova praia sob acção do regime de agitação marítima correspondente ao período de Janeiro/1997 a Dezembro/2002, permite concluir que:

- o sector Oeste da praia ficará sujeito a maiores oscilações da linha de água do que as observadas actualmente;
- o sector Este da praia terá tendência a permanecer com a maior largura emersa relativamente a toda a extensão da praia;
- a componente longitudinal da dinâmica sedimentar da nova praia, para a solução B, permite que haja condições de estabilidade sedimentar.

4 – Conclusões

Neste trabalho analisou-se a dinâmica sedimentar da actual praia Formosa e a viabilidade técnica de construção de uma nova praia, de areia.

No referente à primeira parte, conclui-se que:



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

- Existe uma variabilidade extrema da granulometria dos sedimentos ao longo do perfil transversal, e alguma incerteza em relação às características granulométricas e mineralógicas do material de fundo, com uma percentagem não desprezável de sedimentos finos nas areias da zona submersa até -20 m (ZH). A camada de sedimentos na zona submersa da praia deverá ser ainda de reduzida espessura.
- O declive médio do perfil transversal e do “bed-rock” subjacente é relativamente elevado, promovendo o transporte de sedimentos finos da parte superior da praia para as zonas mais profundas. Este fenómeno explica a enorme variação do diâmetro médio dos sedimentos ao longo do perfil.
- A praia apresenta um perfil de equilíbrio, deduzida dos ensaios em modelo reduzido e da análise teórica, correspondente ao de uma praia composta por areia muito grosseira.
- A praia actual encontra-se predominantemente estável, em equilíbrio dinâmico.
- A zona activa da praia situa-se até profundidades de cerca de 7 m (ZH) e ocorre transporte longitudinal significativo numa extensão transversal de, aproximadamente, 125 m.
- As ondas incidentes do sector Oeste (com direcções entre 265° e 275°) são as que mais contribuem para o transporte longitudinal ao longo da praia, com uma resultante em frente à praia no sentido Este. O transporte médio anual neste sentido é de, aproximadamente, $260 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{ano}$. No entanto, estima-se que este valor possa ser na realidade significativamente inferior, devido à influência de sedimentos coesivos existentes no material do fundo e ao efeito de possíveis afloramentos rochosos que se julga existirem.
- A praia aparenta sofrer oscilações reversíveis da posição da linha de água, relativamente pouco acentuadas, com uma ligeira tendência para avanço da linha de água na zona Este e recuo na zona Oeste (excluindo o extremo). Esta última exhibe uma maior vulnerabilidade, embora pequena, a uma acção erosiva.

Relativamente a uma nova praia, propõem-se duas soluções, uma (solução A) com o enchimento artificial da praia com $850\,000 \text{ m}^3$ de areia grosseira, em toda a sua extensão, complementada com a construção de um esporão terminal na ponta Este; e outra (solução B) com o enchimento artificial da praia com $550\,000 \text{ m}^3$ de areia grosseira, complementada com a construção de um esporão terminal na ponta Este e de uma soleira submersa, de retenção de areias no sopé da praia, ao longo de todo o seu comprimento (Figura 9).

Os ensaios em modelo físico e a utilização de modelos teóricos e numéricos permitiram concluir, quanto à viabilidade técnica da construção de uma praia artificial, que:

- É viável a construção de uma nova praia, na forma da solução B;
- A areia de enchimento deverá ser uma areia muito grosseira, com diâmetro mediano da ordem de 2 mm.
- A praia apresentará um perfil semelhante ao actual na sua zona submersa e um declive menos acentuado na sua zona sub-aérea;
- Haverá um ganho médio de cerca de 30 m da largura da praia, à cota +5 m (ZH), e de 50 m, à cota do nível médio de água. Este ganho não é contudo uniforme, havendo um realinhamento da posição da linha de água, com um aumento superior a 50 m no extremo Este e um aumento da largura de somente 20 a 30 m, no terço Oeste da praia. Este realinhamento poderá ocorrer num espaço de tempo relativamente curto, da ordem de 1 ano.
- Existe a possibilidade de perda, irreversível, de parte do volume de enchimento, devido à transposição das areias para o largo da soleira de retenção, em particular em situações de temporal, e com maior vulnerabilidade no extremo Leste da praia. Nas mesmas situações de temporal é de esperar também um recuo, reversível, da linha de água da ordem da dezena de metros, em relação à linha de água de equilíbrio do perfil de enchimento. Esta previsível perda de areias obriga à monitorização da evolução da praia.



4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

- A nova praia será mais vulnerável à acção da agitação marítima e consequente à possibilidade de erosão da linha de costa, devido ao aumento do transporte longitudinal, para Este, em relação ao actualmente existente. As areias transportadas para Este serão retidas pelo esporão terminal a construir nesse extremo.
- O esporão Este da nova praia poderá criar a ocorrência de correntes de retorno (rip-currents) localizadas junto à estrutura, que deverão ser devidamente assinaladas, por constituírem um perigo potencial para os banhistas inadvertidos.

A solução A proporcionaria uma praia muito mais vulnerável à erosão irreversível do volume de enchimento do que a solução B, devido ao forte transporte longitudinal e elevado declive dos fundos da zona adjacente. Assim, embora esta solução não seja inviável, ela acarretaria um programa de alimentação artificial exigente (com recargas cujo volume e periodicidade de execução resultariam da monitorização da evolução da praia), onerando os custos globais de execução da mesma.

Recomenda-se que o muro vertical do paredão que limita a praia seja alterado com vista a criar uma superfície não reflectora, que reduza a capacidade de transporte de areia para o largo, no caso de ser atingido por acção das ondas conjuntamente com uma sobrelevação extrema do nível do mar, em situação de tempestade.

Recomenda-se, ainda, que uma intervenção costeira deste tipo seja monitorizada não só durante o seu processo de execução como também posteriormente, numa fase em que a praia já tenha atingido o seu reequilíbrio natural. A monitorização permitirá avaliar a eficácia da solução proposta e a evolução da praia, e intervir com maior eficiência, caso seja necessário, durante a execução desta solução, facultando assim uma melhor gestão da própria obra. Esta monitorização deverá contemplar os aspectos de agitação marítima, evolução morfológica e sedimentar da praia, nas partes emersa e submersa, e ser implementada logo no início da obra.

Referências

Dean, R.G. (1977). Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Ocean Engng. Tch. Rep. No. 12, Dept. of Civil Engng. And College of Marine Studies, Univ. of Delaware.

DHI (2003). Litpack. Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves. User Guide. Danish Hydraulic Institute, Denmark.

Freire, P.M.S., Sancho, F.E.P. (2004). Estudo de Viabilidade da Construção de uma Praia Artificial de Areia Branca na Praia Formosa – Funchal; Recolha e Análise Granulométrica de sedimentos. Rel. 114/04-NEC, LNEC.

IH (2003). Dinâmica Sedimentar da Costa Sul da Ilha da Madeira. Rel.TF.GM.02/03, elaborado para a Secretaria Regional do Equipamento Social e Transportes, Governo Regional da Madeira.

Larson, M. e Kraus, N.C. (1989). "SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change; Report 1 – Empirical foundation and model development". Tech. Rep. CERC-89-9, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Sancho, F.E.P. (2004). Estudo de Viabilidade da Construção de uma Praia Artificial de Areia Branca na Praia Formosa – Funchal; Relatório 1: Informação de Base e Caracterização da Agitação Marítima. Rel. 334/04-NEC, LNEC.

Sancho, F.E., F.S.B.F. Oliveira e P.M.S. Freire (2005). Estudo de Viabilidade da Construção de uma praia artificial de areia branca na Praia Formosa – Funchal; Relatório 2: Análise da dinâmica sedimentar da praia existente e da viabilidade técnica de uma nova praia. Rel. 110/05-NEC, LNEC.

U.S.A.C.E. (1995). Beach-fill volume required to produce specific dry beach width. Coastal Engineering technical Note CETN-II-32, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.