



ACÇÃO DO TEMPORAL DE OUTUBRO DE 1999 SOBRE A OBRA DE REFORMULAÇÃO DO PORTO DE PESCA DE RABO DE PEIXE.

António Trigo Teixeira¹
Ildeberto Mota Oliveira¹
António Alberto Pires Silva¹

¹Instituto Superior Técnico
Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura
Av. Rovisco Pais
1049-001 Lisboa

SUMÁRIO

Na presente comunicação analisam-se os efeitos do temporal de 22 de Outubro de 1999 sobre a Obra de Reformulação do Porto de Pesca de Rabo de Peixe, na costa norte da Ilha de S. Miguel, Açores, a qual, naquela data, se encontrava numa fase adiantada de execução. Em primeiro lugar, é feita uma descrição das infra-estruturas portuárias existentes no local e são apresentados os elementos de projecto incluídos na reformulação do porto, dando particular atenção ao tipo estrutural de obra de abrigo e às condições gerais de dimensionamento da obra. São referidos os temporais que fustigaram o local dos trabalhos até Outubro de 1999 e é feita uma descrição da situação da obra nesta data. A aproximação do temporal de Outubro de 1999 foi prevista pelo Instituto de Meteorologia (IM), e como tal a obra foi “preparada” para o receber.

Tendo em vista determinar as condições de agitação junto à obra aquando da ocorrência do temporal é utilizado o modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore), desenvolvido na Universidade Técnica de Delft (TUDelft). Trata-se de um modelo espectral de média em fase, de terceira geração, que permite simular a evolução das ondas de gravidade geradas pelo vento na superfície livre do mar na zona costeira, desde a entrada da plataforma continental até à zona de rebentação. Como condições de fronteira ao largo foram utilizadas as estimativas do modelo MAR 3G, em exploração operacional no IM. A aplicação do modelo SWAN não evidenciou qualquer fenómeno especial de concentração de energia junto ao porto para a situação de agitação de 22 de Outubro de 1999.

São analisadas as condições de galgamento do molhe, para se concluir que a obra é muito susceptível aos galgamentos. Este fenómeno verificou-se ao longo de todo o perímetro marítimo durante o temporal, tendo sido atingidas edificações da zona urbana a cotas elevadas. A entrada de mar deu-se até à zona do edificado mais antigo havendo a assinalar a destruição de construções, um acontecimento raro e de que não há memória entre os residentes do local. É ainda analisada a extraordinária sobre-elevação do nível de mar induzida por rebentação (“setup”), potenciada pelo facto de o molhe fechar parcialmente a enseada de Rabo de Peixe, “setup” este que agravou ainda mais o fenómeno do galgamento..

Por fim são descritos os danos sofridos pelo molhe e pela obra em geral, apresentando-se o galgamento como principal responsável pelo acidente. Conclui-se com algumas recomendações sobre condicionamentos a impor no futuro à exploração do terraplano portuário.

1. INTRODUÇÃO

O porto de pesca de Rabo de Peixe fica situado na costa norte da Ilha de S. Miguel no arquipélago dos Açores. A pesca constitui a principal actividade económica do local e o porto conta-se entre os mais antigos da Região. O desenvolvimento de Rabo de Peixe foi contemplado no Plano de Médio Prazo (1995-2000) da Secretaria Regional da Agricultura e Pescas do Governo Regional dos Açores, no capítulo que se destina à pesca. Da Figura 1 consta uma carta da Ilha de S. Miguel mostrando a localização do porto.

O porto situa-se numa pequena enseada que oferece pouco ou quase nenhum abrigo natural à agitação do quadrante norte. Até ao início dos anos oitenta as infraestruturas existentes limitavam-se a uma pequena rampa varadouro e uma área para estacionamento de embarcações à cota (+14.0) ZH. No decurso da década de oitenta as instalações foram alargadas com a construção de uma segunda área de estacionamento, a cota mais baixa (+7.0) ZH. A nova área de estacionamento foi protegida em toda a bordadura marítima por um muro cortina e um manto de tetrápodos. Para aceder à nova área de estacionamento foi construída uma segunda rampa. Em terra, foi criado um edifício para a lota na parte sul da área de estacionamento a cota mais elevada, Figura 2.

Qualquer melhoria da operacionalidade do “porto” passa pela existência de uma área líquida para estacionamento de embarcações. A situação até ao início da década de oitenta era a de usar as rampas varadouro para estacionar as embarcações, sempre que se encontram no porto. Esta operação é sempre difícil e demorada e dificultada pelo facto das rampas varadouros serem atingidas directamente pela agitação marítima. No mesmo sentido apontam as conclusões do diagnóstico feito às condições oferecidas pelo porto, onde se concluiu que os maiores estrangulamentos ao desenvolvimento da actividade portuária se deviam no final da década de oitenta à inexistência de área líquida abrigada para estacionamento das embarcações em flutuação. Nesta situação, tornava-se perigoso e difícil o uso das rampas e a transferência das embarcações para as áreas de estacionamento em seco.

O porto foi objecto de um “Estudo Prévio de Reformulação e Desenvolvimento Portuário” Consulmar, (1995), estudo aprovado pela Secretaria Regional de Agricultura e Pescas, a que se viria a seguir o Projecto para Concurso que incluía: Anúncio e Programa do Concurso, Caderno de Encargos e Projecto Base Consulmar, (1996).

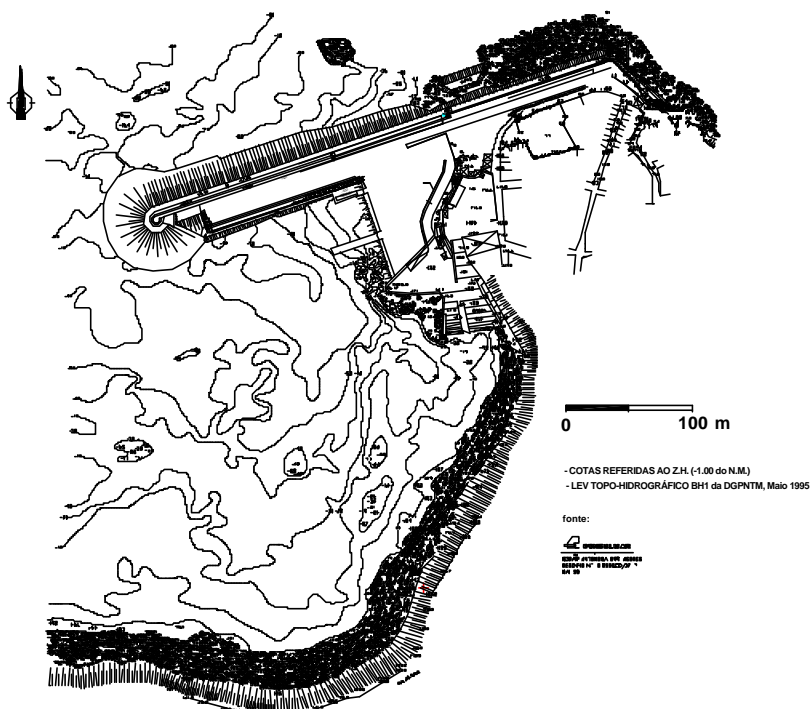
No projecto de reformulação do porto de pesca de Rabo de Peixe são consideradas várias infraestruturas portuárias. A peça fundamental do novo arranjo portuário é um quebramar com cerca de 250 m de comprimento. O quebramar apresenta um núcleo de T.O.T, um submanto em enrocamento, um manto de protecção em blocos antifer e uma superestrutura de betão in situ com muro cortina. O muro cortina atinge a cota (+8.5)ZH nos primeiros 100m junto ao enraizamento e a cota (+9.5)ZH nos restantes 150 m que se desenvolvem até à cabeça da obra. Pelo intradorso do quebramar desenvolve-se um muro cais em blocos vasados com cerca de 100 m de comprimento compreendendo dois trechos iguais fundados às cotas (-5.00) e (-3.00)ZH. A cota de coroamento do cais e do terraplano adjacente é de (+3.00)ZH. O projecto considera ainda a construção de uma doca para pórtico mecânico, uma ponte-cais e duas vias de acesso: uma que corre segundo o alinhamento do quebramar e contorna o edificado existente por cima do pequeno promontório existente no local, e uma segunda que faz a ligação ao terraplano que já existe a maior cota.

A obra foi posta a concurso e adjudicada à empresa Tecnovia-Açores. Após a fase de concurso e adjudicação da obra, apareceu alguma contestação à implantação que estava prevista para o quebramar. A Secretaria Regional, no âmbito das suas competências, decidiu mandar rever o projecto e proceder ao estudo de uma nova implantação que ampliasse a área líquida abrigada pelo quebramar, adjudicando entretanto somente as obras interiores que constavam do projecto original. A implantação do quebramar acabaria por ser alterada, tendo-se operado uma pequena translação para o largo. Dada a existência de uma morfologia muito favorável no local da obra, a esta translação não correspondeu um aumento de profundidade no novo alinhamento escolhido para implantação do quebramar.



a) Ilha de S. Miguel

b) Rabo de Peixe visto da Ponta da Calheta



c) Planta Geral

Figura 1 – Porto de Pesca de Rabo de Peixe. Localização e Planta Geral.

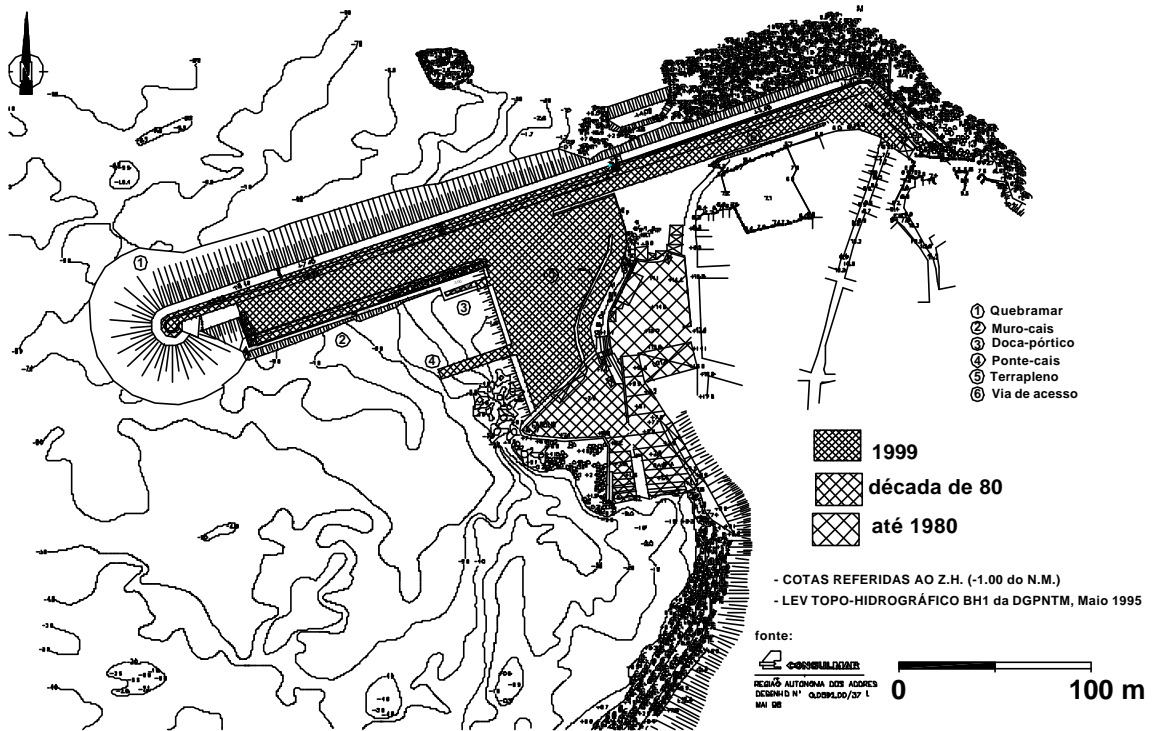
O quebramar foi objecto de ensaio em modelo reduzido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC (1998). Na sequência dos ensaios foi autorizada a construção.

A Tecnovia iniciou os trabalhos da empreitada de reformulação do porto no Verão de 1998 com a montagem do estaleiro e a realização de outros trabalhos preparatórios. As condições da costa norte da Ilha de S. Miguel cedo revelaram que a obra se iria desenvolver num ambiente particularmente adverso. Durante a empreitada a obra viria a ser fustigada por vários temporais. Contudo, o mais grave, pelos danos que causou ao quebramar que se encontrava ainda em construção, ocorreu no período que vai de 21 a 24 de Outubro de 1999.

Imediatamente após o temporal, a Tecnovia-Açores pediu ao CEHIDRO-IST que analisasse os acontecimentos que deram origem ao acidente na obra de reformulação do Porto de Pesca de Rabo de Peixe. Para atingir este objectivo os autores analisaram elementos do projecto das obras, os relatórios dos ensaios em modelo reduzido, os relatórios da inspecção submarina após o acidente, e um relatório da marcha dos acontecimentos durante o temporal.



a) Vista de cima da falésia para norte.



b) Fases de desenvolvimento e infraestruturas portuárias.

Figura 2 – Rabo de Peixe. Fases de Desenvolvimento e infraestruturas..

Foram ainda realizadas duas visitas à obra: uma imediatamente após o temporal e outra em Março de 2000. Foram analisadas imagens vídeo e fotográficas colhidas durante o temporal. Foram estudados os dados de previsão da agitação marítima ao largo do Instituto de Meteorologia, e foi feita a simulação numérica de propagação da agitação marítima do largo para a enseada de Rabo de Peixe.

2. ESTUDOS E PROJECTOS

Um dos principais aspectos a analisar é o valor da onda de projecto considerada no dimensionamento do quebramar. No Estudo Prévio das Obras, Consulmar, (1995) foram estudadas as condições de agitação ao largo (costa norte da ilha de S. Miguel) e junto ao local da obra. Para o largo, os elementos utilizados foram os resultados de “hindcast” (modelo matemático de reconstituição das condições de agitação) realizado pelo Instituto Meteorológico Britânico (UKMO), para o intervalo de Janeiro de 1978-Fevereiro de 1990. A transposição das condições ao largo para junto do local da obra foi feita utilizando um modelo de refração

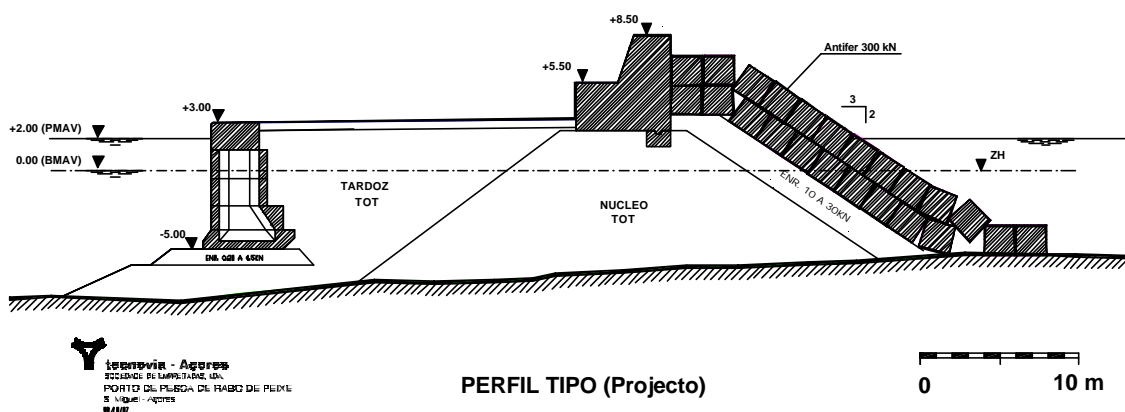


Figura 3 – Porto de Pesca de Rabo de Peixe. Perfil tipo do quebramar.

espectral. A altura significativa no local, para vários períodos de retorno, foi obtida procedendo ao ajustamento de uma distribuição estatística de valores extremos, Gumbel. No Quadro 1 apresentam-se os valores das alturas significativas máximas anuais junto à obra que constam do Estudo Prévio das obras.

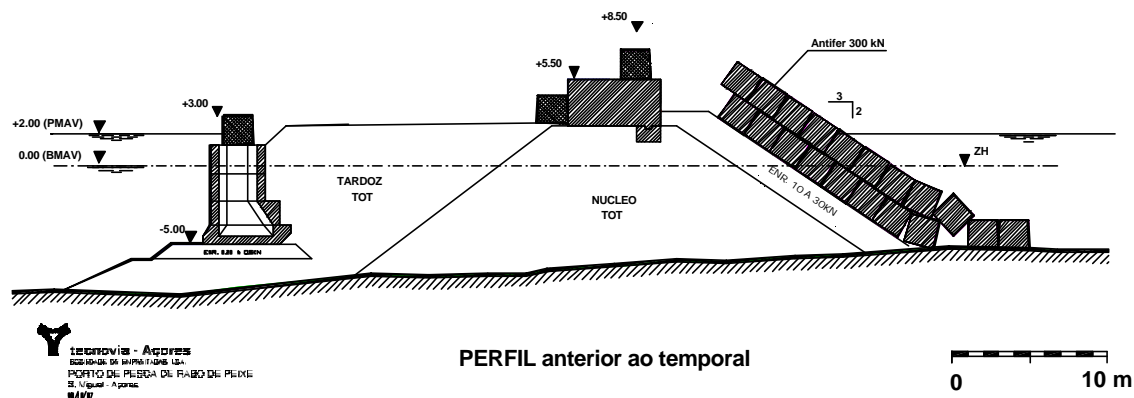
Todavia, dado que a zona de implantação do quebramar se situa em pequena profundidade (−7.0) a (−8.0) ZH, a fixação da altura de onda de projecto foi feita com base num critério de limitação da altura de onda pela profundidade. A altura de onda máxima compatível com a profundidade considerada foi de $H=6.5\text{ m}$. Pode observar-se, por consulta do Quadro 1, que se trata de uma ocorrência muito frequente a que corresponderá um período de retorno inferior a 5 anos. No Projecto Base para concurso são considerados os valores de altura de onda definidos no Estudo Prévio apesar de o quebramar ter sofrido uma pequena translação para o largo, o que não levanta problemas de maior, pois não houve um aumento correspondente de profundidade.

Período de Retorno – T (anos)	Altura Significativa- H_s (m)
5	7.4
10	8.4
20	9.3
50	10.6
100	11.5

Quadro 1 – Alturas significativas máximas anuais em função do período de retorno na enseada de Rabo de Peixe. Consulmar, (1995).

No que se refere ao galgamento, são identificados no Estudo Prévio dois trechos no molhe: um não galgável com muro cortina à cota (+9.00)ZH e um galgável junto à parte do enraizamento com o muro cortina à cota (+7.50)ZH. Estas cotas viriam a ser alteradas no Projecto Base para concurso, para (+9.50)ZH e (+8.50)ZH respectivamente.

O quebramar foi objecto de ensaio tridimensional em modelo reduzido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. No modelo, foi reproduzido um trecho de molhe com um comprimento que engloba os dois perfis-tipo da extremidade da obra, bem como o perfil de rotação da cabeça. A agitação marítima foi reproduzida para as seguintes condições: rumos locais N e N-30°-W; níveis de maré: (0.0) ZH e (+2.0)ZH; períodos de pico do espectro empírico de JONSWAP: 10 e 14 s; valores da altura de onda significativa (H_s) crescentes, em escalões de 1.0 m, desde $H_s=5.0\text{ m}$ até $H_s=6.0\text{ m}$, e em escalões de 0.5 m, desde $H_s=6.0\text{ m}$ até $H_s=9.0\text{ m}$. As alturas de onda especificadas foram medidas à saída do gerador sobre a batimétrica (−23.0)ZH, LNEC (1998).



a) Blocos colocados sobre o muro-cais e o muro cortina para protecção provisória.



b) Vista geral do quebramar antes do temporal.

Figura 4 – Porto de Rabo de Peixe. Situação da obra à data do temporal de 22 de Outubro de 1999.

Da análise do relatório LNEC (1998) respeitante aos ensaios em modelo reduzido pode concluir-se o seguinte: do ponto de vista da estabilidade (quedas de blocos e movimentos) o comportamento da obra é muito bom para a generalidade dos cenários ensaiados; já no que respeita ao galgamento a situação é pouco satisfatória, sendo a obra galgada em maior ou menor grau na generalidade dos cenários ensaiados. De notar que o ensaio em modelo permitiu ainda confirmar a hipótese de limitação da altura de onda pela profundidade, dado que para espectros empíricos correspondentes a valores superiores a $H_s = 6.0\text{ m}$ e 6.5 m quase todas as ondas presentes no estado de agitação rebentavam antes de atingir o quebramar.

3. SITUAÇÃO DOS TRABALHOS À DATA DO TEMPORAL.

O quebramar começou a ser construído em Junho de 1998. No final do Verão, foi executada uma cabeça de Inverno. Os trabalhos foram novamente retomados em Abril de 1999. Ocorreram vários temporais (a 6 de Setembro de 1998, 29 de Novembro de 1998 e 17 a 26 de Setembro de 1999), que obrigaram a interrupção dos trabalhos e causaram alguns danos. Contudo, nenhum destes temporais se compara em magnitude e poder de destruição com o que ocorreu a 22 de Outubro de 1999.

À data de ocorrência do temporal, o núcleo do quebramar e o sub-manto de protecção estavam executados em toda a extensão da obra, o mesmo acontecendo com a primeira fase de betonagem do muro-cortina. Junto ao enraizamento do molhe havia um pequeno segmento por betonar (um troço de cerca de 15m para acesso de viaturas à zona do manto) e avançava também a segunda fase de betonagem, esta às cotas finais de projecto. Os blocos Antifer do manto de protecção estavam colocados até meio do perfil de rotação da cabeça do molhe, faltando proteger a parte interior da cabeça para lá do eixo do molhe.

A infraestrutura do muro-cais de blocos vasados encontrava-se executada em toda a extensão (todos os blocos estavam colocados), faltando apenas betonar a superestrutura in situ. O terraplino do cais encontrava-se executado ao longo de toda a extensão, entre o muro cais e o muro cortina do molhe. O murete de remate do terraplino na zona da doca do pórtico mecânico e ponte-cais estava às cotas de projecto. Em suma, o confinamento e remate lateral dos materiais de aterro estava feito em a toda a extensão da obra.

Dado que as previsões meteorológicas indicavam a aproximação dum temporal, foram executadas algumas protecções adicionais provisórias. Foi executada uma banquetta com blocos Antifer de 300 kN, entre as batimétricas (+0.00 e +1.00)ZH, na zona do intradorso da cabeça do molhe. Foi efectuado o revestimento do coroamento do núcleo em TOT com uma camada de blocos Antifer de 300 kN na zona da cabeça. Foi efectuado o reforço da protecção da aresta do cais com uma fiada de blocos Antifer de 300 kN. Em toda a extensão do muro cortina e adjacente ao paramento vertical do lado do terraplino foi colocada uma fiada de blocos Antifer de 300 kN. Foi colocada uma fiada de blocos sobre a 1ª fase da betonagem do muro, na zona em que a cota de coroamento é mais baixa.

Na Figura 4 representa-se um perfil tipo e uma vista do quebramar antes da ocorrência do temporal e depois de executadas as protecções provisórias. Vêem-se os blocos colocados sobre o muro-cortina (1ª fase de betonagem), a fiada de blocos adjacente ao muro-cortina e a fiada colocada sobre o muro-cais.

4. DESCRIÇÃO DO ACIDENTE

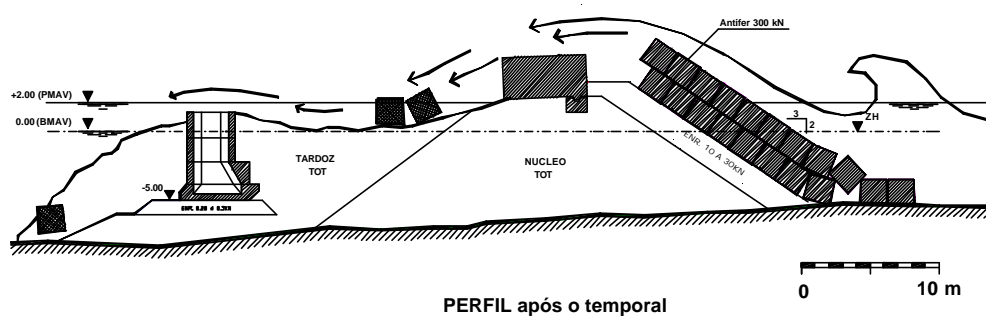
Reporta-se o que sobre o assunto diz a nota da CONSULMAR-Norma-Açores:

“Durante o período em referência, mas com particular incidência nos dias 21 e 22, verificaram-se galgamentos ao longo de todo o corpo do molhe com a projecção de grandes massas de água para o intradorso.

Na manhã do dia 21 grande parte dos blocos Antifer posicionados sobre o muro cortina foram projectados sobre o terraplino do cais, alguns dos blocos colocados no revestimento do núcleo foram remexidos. A acção erosiva da massa de água provocou o arrastamento de materiais do terraplino do cais.

No início da tarde do mesmo dia já não havia praticamente Antiferes posicionados sobre o muro cortina e que ficaram espalhados pelo terraplino do cais. Foram também projectados para a baía alguns Antiferes que se encontravam colocados sobre as pilhas de blocos de cais na zona do (-5.00m)ZH. Os blocos na protecção do núcleo da cabeça e até ao troço n.º 31 do muro cortina começaram a ser arrastados para o intradorso. As escavações no núcleo e terraplino do cais começaram a acentuar-se.

No final da tarde do dia 21 verificava-se que os blocos na zona de rotação da cabeça foram projectados para o intradorso, a protecção do manto em Antiferes no alinhamento recto e onde ainda não se encontrava executado o muro cortina apresentava-se já com sinais evidentes de deslocamento de alguns blocos do coroamento em ambos os sentidos vertical e horizontal. Mais Antiferes posicionados sobre as pilhas de blocos no cais a (-5.00m)ZH foram projectados para a baía. Alguns blocos posicionados na fiada adjacente ao muro cortina começaram a rodar com as infraescavações provocadas pela erosão da água no terraplino. O troço n.º30 do muro cortina encontrava-se fora do seu alinhamento de forma acentuada. Em algumas zonas do cais a (-5.00m)ZH verificava-se já um grande assoreamento motivado pelo arrastamento dos materiais do terraplino e dos próprios Antiferes.




Sogehidro - Engenharia
 Engenharia de Hidráulica,
 Engenharia de Estruturas,
 Engenharia de Transportes,
 Engenharia de Minas,
 Engenharia de Ambiente



Figura 5 – Porto de Rabo de Peixe. Situação da obra após do temporal de 22 de Outubro de 1999. Blocos projectados para o terrapleno e assentamento do muro cortina.

Na manhã de 22 constatou-se que durante a noite as condições de agitação ocorridas provocaram:

- A queda de mais Antiferos colocados sobre os blocos de cais a (-5.00m)ZH e até à transição para o cais a (-3.00m)ZH.
- O aumento da infraescavação no núcleo e no terrapleno do cais abrindo uma autêntica “vala” segundo o eixo longitudinal do molhe.

- A queda de blocos da fiada adjacente ao muro cortina (entre o troço nº31 e nº22/23) na “vala”.
- A rotação e assentamentos de três módulos do muro cortina (troços nº31, 30 e 29), o módulo nº31 mergulhava com bastante inclinação segundo a direcção da cabeça.
- O assoreamento do cais de forma significativa.
- O deslocamento dos Antiferes nas fiadas superiores de protecção do manto para a zona do intradorso, fora da zona com muro cortina.
- O assoreamento numa faixa adjacente à cabeça e no sentido da baía em resultado do transporte dos blocos e enrocamentos para esta área.

Durante o dia 22 aumentaram os assoreamentos no cais e na zona do intradorso da cabeça. No muro cortina houve mais dois módulos (troço nº28 e nº27) que se deslocaram, tendo aumentado o desvio dos módulos já afectados e sob o troço nº5 foi detectada também alguma infraescavação. Verificou-se o agravamento da infraescavação no terrapleno e no núcleo, aumentando a profundidade da “vala”.

Durante o dia 23 a situação de agitação marítima melhorou enquanto que no dia 24 houve um ligeiro agravamento não atingindo ainda assim o nível de agitação verificado nos dias 21 e 22 havendo apenas a registar o aumento do assoreamento em resultado dos galgamentos, embora de menor intensidade e frequência, que continuaram a ocorrer.”

O galgamento da obra foi generalizado ao longo de toda a extensão. Importa salientar que parte do galgamento se deu na zona do enraizamento do molhe. Estas águas engrossariam a torrente em direcção ao eixo da plataforma do molhe-cais e contribuiriam para a erosão do terrapleno.

5. TEMPORAL DE 22 DE OUTUBRO DE 1999.

5.1 Caracterização da agitação marítima ao largo.

Os elementos que caracterizam o estado do mar ao largo são provenientes da simulação numérica da evolução das ondas de gravidade geradas pelo vento na superfície livre do mar. Com base nas previsões do estado do mar ao largo, do Instituto de Meteorologia (IM), estudaram-se as condições junto do quebramar.

O MAR 3G, em operação no IM, é um modelo numérico espectral de 3ª geração baseado no modelo WAM (Komen et al., 1994). Esta família de modelos é apropriada para águas profundas e para aplicações com escalas espaciais e temporais oceânicas. A base da previsão assenta na integração da equação de balanço da densidade espectral de energia numa malha regular, sendo o campo de ventos à superfície a principal função forçadora. A partir do espectro é possível obter parâmetros integrais de interesse com sejam a altura significativa (H_s), a direcção média (θ) e várias medidas da escala temporal do estado de agitação, representada por diferentes definições do período.

A informação disponibilizada pelo IM encontra-se, basicamente, na forma de quadros/tabelas, em que uma das entradas é constituída pelos referidos parâmetros integrais, em número de oito, e a outra por um conjunto de pontos da malha de cálculo, em número de 38, referenciados pelas designações das localidades adjacentes. Estas tabelas traduzem uma informação diária referida às 12:00. Dos oito parâmetros só consta uma definição do período, $T_e = m \cdot 1/m_0$, designado por período equivalente de energia, que tem pouco interesse em estudos de simulação da propagação da agitação marítima.

O ponto da malha de cálculo do modelo MAR 3G mais próximo do porto de pesca de Rabo de Peixe é o designado por Ponta do Cintrão, situado nas coordenadas 37° 50.9' N, 25° 29.5' W, e a uma profundidade de 58 m (sonda reduzida). Em relação a esta localização foi estudada a evolução de H_s e de H_{max} (altura máxima mais provável), referente ao período compreendido entre 15 e 26 de Outubro de 1999.

Constata-se um agravamento das condições de mar a partir do dia 20 de Outubro, com o valor da altura significativa a aumentar, de uma forma continuada, desde 3,0 m até atingir um pico de 6,4 m no dia 22. Seguiu-se uma quebra no dia 23 ($H_s = 4,0$ m), e novo agravamento nos dias 24 e 25, não alcançando, todavia, o valor estimado para o dia 22. Note-se que neste dia o valor do parâmetro H_{max} ultrapassou doze metros. As considerações expostas estão de acordo com a “Descrição da Ocorrência” do relatório de avaliação da Consulmar/Norma-Açores, SA.

A direcção de propagação das ondas, representada pelo parâmetro da direcção média vectorial, manteve-se persistentemente de NW na parte inicial do período mencionado, com rotação para NNW nos dias 24 e 25, e finalmente de norte no dia 26.

Do dia 21 ao dia 26 o valor de H_s situou-se acima de 5,0 m (com excepção do dia 23). Note-se que o Instituto Hidrográfico, na programação das suas bóias ondógrafo, define (na costa oeste do continente) o limiar de 5,0 m de altura significativa como o valor para se passar a observações em contínuo, considerando, assim, uma situação de tempestade.

5.2 Caracterização da agitação marítima junto ao molhe.

5.2.1 O modelo SWAN

A caracterização da agitação marítima junto ao molhe do porto de pesca de Rabo de Peixe foi realizada, no âmbito da análise do acidente, através do modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore), desenvolvido na Universidade Técnica de Delft (TUDelft). Trata-se de um modelo espectral de média em fase, de terceira geração, que permite simular a evolução das ondas de gravidade geradas pelo vento na superfície livre do mar na zona costeira, desde a entrada da plataforma continental até à zona de rebentação. O modelo SWAN (Ris, 1997; Pires Silva et al., 1999) trata explicitamente a física dos processos característicos da propagação em águas pouco profundas. Em particular, a refacção, o empolamento, a dissipação por atrito e a rebentação induzida pela subida do fundo; as interacções ressonantes a três ondas e a interacção com as correntes na forma de refacção, de empolamento e de variação da frequência são representadas no modelo. Este está dotado de um esquema numérico implícito, que o torna particularmente apropriado para as escalas necessárias em zonas costeiras.

À semelhança do modelo WAM, também o SWAN se baseia numa formulação euleriana da equação de balanço espectral, discretizada, da acção de onda (densidade espectral de variância a dividir pela frequência intrínseca). Na ausência de correntes, esta última variável coincide com a densidade espectral de variância (proporcional à densidade espectral de energia). Neste tipo de modelos a incorporação do fenómeno da difracção não encontra ainda solução satisfatória, estando ausente na versão do SWAN utilizada. Deste modo, a modelação dos campos associados a interacções ondas-estrutura não cabe no âmbito da presente simulação. Em especial, a propagação da agitação para o interior da bacia portuária não foi efectuada.

5.2.2 Morfologia local e condições fronteira

O porto de pesca de Rabo de Peixe situa-se na costa norte da ilha de S. Miguel. Nesta zona a linha de costa apresenta uma reentrância, desenhando um arco com a corda alinhada na direcção Este-Oeste, ficando a povoação de Rabo de Peixe na parte Sul. Este arco é, grosso modo, limitado a leste pela Ponta do Cintrão e a oeste pelo Morro das Capelas. A configuração da batimetria constitui-se quase paralela à linha de costa, formando também arcos de grande raio. Junto à Ponta do Cintrão a batimétrica de -50 aproxima-se consideravelmente da costa, inflectindo de seguida para sul.

O domínio de cálculo tem como fronteira de mar um alinhamento formado, sensivelmente, pela Ribeira Grande a leste, e a Ponta das Calhetas a oeste, Figura 6. A morfologia do fundo foi digitalizada da “Carta Hidrográfica da Ilha de S. Miguel” de 1939-1949 à escala 1:100000. Na aplicação em causa, o espaço geográfico tem uma extensão de 10000 m na direcção Este-Oeste e 2100 m na direcção Norte-Sul, tendo sido discretizado com uma malha cujas

dimensões das células são: $\Delta x = 100$ m (Este-Oeste) e $\Delta y = 50$ m (Norte-Sul). A discretização do espectro no espaço θ compreendeu um sector de -60° a $+60^\circ$ (em torno da direcção Norte), com um $\Delta\theta = 4^\circ$. No domínio da frequência, foram consideradas componentes espectrais situadas entre um mínimo de 0.05 Hz e um máximo de 0.25 Hz, e em número de 20, com um incremento logarítmico. A Figura 6 indica, esquematicamente, a localização do molhe e os pontos onde foram calculados os espectros.

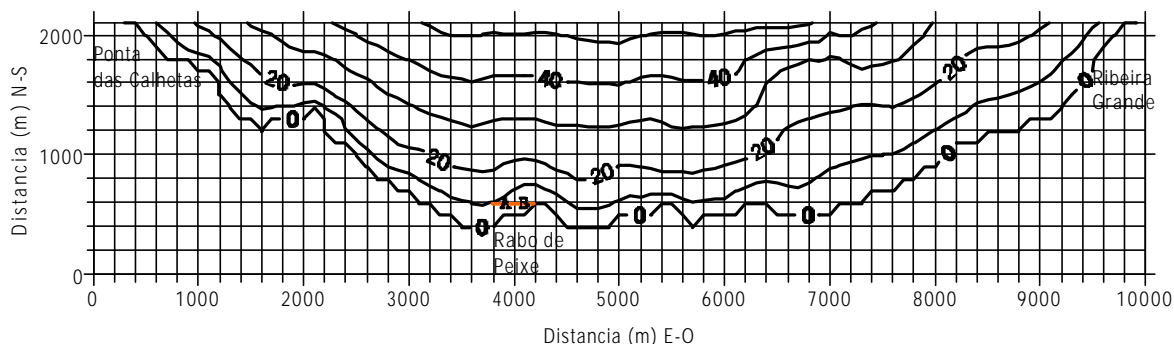


Figura 6 Batimetria da zona adjacente ao porto de Rabo de Peixe, com indicação aproximada da posição do molhe (linha a vermelho) e dos pontos A (3900 m, 600 m) e B (4100 m, 600 m).

Dada a formulação do modelo SWAN, em que a principal variável de prognóstico é o espectro direccional, é necessário especificar uma estimativa desta função na fronteira de mar aberto. O modelo tem capacidade para aceitar várias formas desta estimativa: o valor de cada componente da densidade espectral direccional, o valor de cada componente do espectro unidireccional (espectro de frequência), complementado com o valor médio da direcção e da dispersão para cada frequência ou o valor de parâmetros integrais para serem usados em expressões analíticas do espectro de frequência e da função de distribuição direccional. Em relação à primeira hipótese, o valor das referidas componentes pode ser obtido de medições de campo ou como resultado de simulação numérica.

Para as condições de fronteira ao largo foram utilizadas as estimativas do modelo MAR 3G, mencionadas no ponto 5.1. Como estas incluíam apenas parâmetros espectrais foi necessário adoptar formulações analíticas correspondentes. Foram escolhidos o espectro JONSWAP e a função de distribuição direccional de coseno quadrado.

A aplicação das citadas expressões pressupõe a especificação da altura significativa e do período de pico, T_p , (como condições mínimas) no primeiro caso, e a direcção média, θ , e uma medida da dispersão, σ_θ , no segundo caso. Dos dados do IM foram adoptados os valores de 22 de Outubro: $H_s = 6,4$ m; $\theta = 317^\circ$.

Como os mencionados dados são omissos nos dois outros parâmetros tornou-se imprescindível arbitrar valores, que foram os seguintes: $T_p = 12,5$ s e $14,0$ s; $\sigma_\theta = 20^\circ$ e 30° .

Os valores do período de pico foram baseados numa análise da publicação do Instituto Hidrográfico (IH) "Dados Direccionais de Agitação Marítima na Costa Portuguesa" e nos resultados do estudo "European Wave Energy Atlas", referente ao ponto de coordenadas 39° N, 24 W (tabela bivariada de H_s e T_p). No que diz respeito a σ_θ usou-se a já citada publicação do IH e avaliaram-se valores típicos de situações de temporal.

As fronteiras laterais, que podem constituir uma dificuldade em costas abertas (Pires Silva et al., 1999), não levantam qualquer problema nesta aplicação, dado o carácter encaixado do domínio de cálculo Figura 6.

5.2.3 Apresentação de resultados

Considerando as dimensões relativamente reduzidas do domínio, foi utilizado o modo estacionário, uma vez que o tempo de propagação das ondas de vento é francamente inferior às escalas temporais de variação dos agentes condicionantes exteriores. Nesta fase não foram consideradas a acção do vento e das correntes, e foi tomado um nível de maré igual a (+ 1,6)ZH, constante em todo o espaço geográfico.

Os resultados da simulação apresentados são expressos através de espectros direccionais, espectros unidireccionais, campo de variação de H_s , representado com escala de cores, variação da direcção média, indicada por campo de vectores e quadros com valores de parâmetros integrais. Nestes é utilizado como escala temporal o inverso da frequência média do espectro, $T_{01} = m_0/m_1$.

As saídas do modelo dizem respeito aos pontos A (8,25 m de profundidade) e B (3,25 m de profundidade) da Figura 6 e à combinação dos valores de H_s e com os dois valores de T_p e σ_θ .

Os quadros que se seguem resumem a informação relativa a parâmetros integrais.

Pontos	Profundidade (m)	H_s (m)	T_{01} (s)	(°)	σ_θ (°)
A	8,25	4,60	10,74	338	8,35
B	3,25	3,17	11,33	335	10,66

Quadro 2 - Parâmetros integrais relativos aos pontos marcados na Figura 6 ($T_p = 12,5$ s e $\sigma_\theta = 20^\circ$).

Pontos	Profundidade (m)	H_s (m)	T_{01} (s)	(°)	σ_θ (°)
A	8,25	4,57	10,85	344	11,21
B	3,25	3,26	11,46	344	14,62

Quadro 3 - Parâmetros integrais relativos aos pontos marcados na Figura 6 ($T_p = 12,5$ s e $\sigma_\theta = 30^\circ$).

A comparação dos Quadros 2 e 3 mostra que a especificação da dispersão angular na fronteira não tem influência decisiva nos resultados, originando variações inferiores a 3% na altura significativa e na direcção média, e inferiores a 2% no período médio.

Pontos	Profundidade (m)	H_s (m)	T_{01} (s)	(°)	σ_θ (°)
A	8,25	4,75	12,44	339	7,86
B	3,25	3,33	12,71	335	10,10

Quadro 4 - Parâmetros integrais relativos aos pontos marcados na Figura 6 ($T_p = 14,0$ s e $\sigma_\theta = 20^\circ$).

Pontos	Profundidade (m)	H_s (m)	T_{01} (s)	(°)	σ_θ (°)
A	8,25	4,73	12,26	344	10,60
B	3,25	3,48	12,88	343	14,08

Quadro 5 - Parâmetros integrais relativos aos pontos marcados na Figura 6 ($T_p = 14,0$ s e $\sigma_\theta = 30^\circ$).

Os Quadros 4 e 5 suscitam os mesmos comentários quanto à repercussão de σ_θ . Em todos eles é patente uma rotação para norte da direcção média, devida à refacção, e uma diminuição da dispersão, quando comparadas com os valores da fronteira de mar aberto.

Os valores de H_s variam entre um mínimo de 4,57 m e um máximo de 4,75 m para o ponto A, e um mínimo de 3,17 m e um máximo de 3,48 m para o ponto B (considerando todas as combinações). Estes valores atestam a atenuação devida ao efeito de fundo durante a propagação no domínio e também as diferenças de profundidade entre os pontos A e B e estão, basicamente, de acordo com o esperado dadas as características da tempestade, da morfologia do fundo e do enquadramento da linha de costa.

As Figuras 7 e 8 suportam as conclusões acerca da influência da dispersão

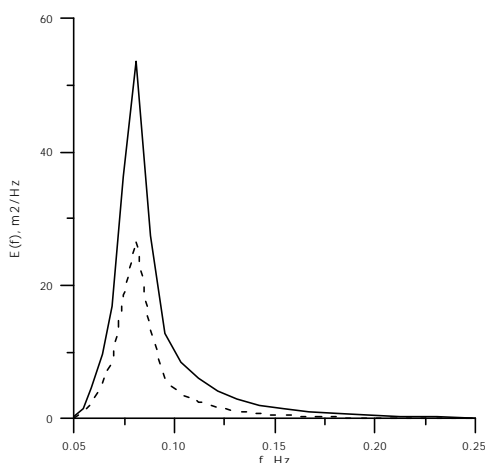


Figura 7 - Espectros pontos A (—) e B(- -).
 $T_p = 12,5$ s, $\sigma_\theta = 20^\circ$

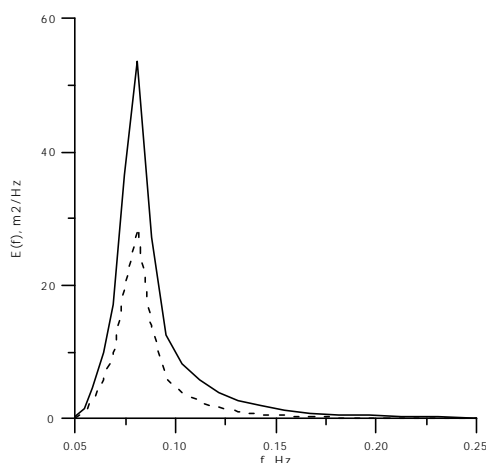


Figura 8 - Espectros pontos A (—) e B(- -).
 $T_p = 12,5$ s, $\sigma_\theta = 30^\circ$

A Figura 9 evidencia os efeitos da refacção na evolução das ondas junto à costa, com uma ligeira rotação para norte, o que é também patente nos valores da direcção média, e acima comentado.

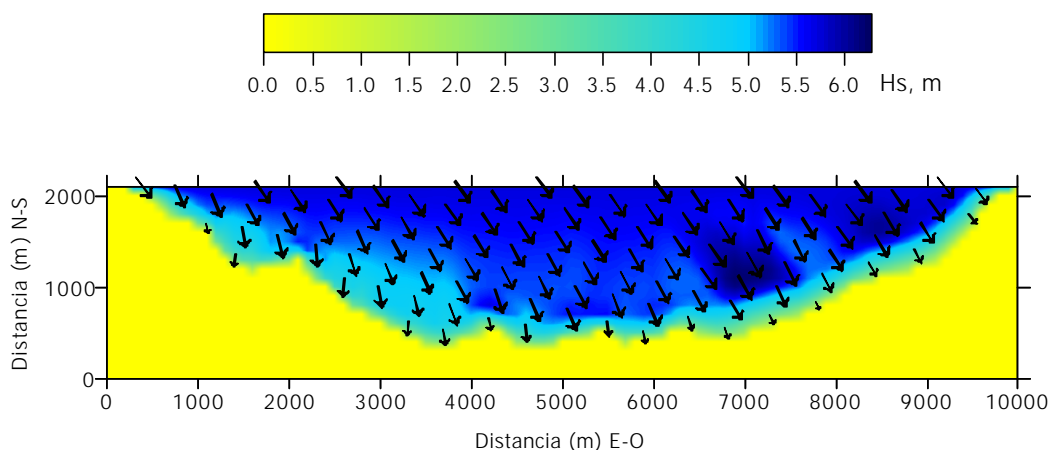


Figura 9 - Campo de variação de H_s com escala de cores e vectores proporcionais ao valor na fronteira ($T_p = 12,5$ s e $\sigma_\theta = 20^\circ$).

As figuras A e B da Figura 10 dizem respeito ao Quadro 2 e as figuras C e D ao Quadro 3. Nelas pode-se observar a diminuição da dispersão em relação ao valor atribuído na fronteira de mar.

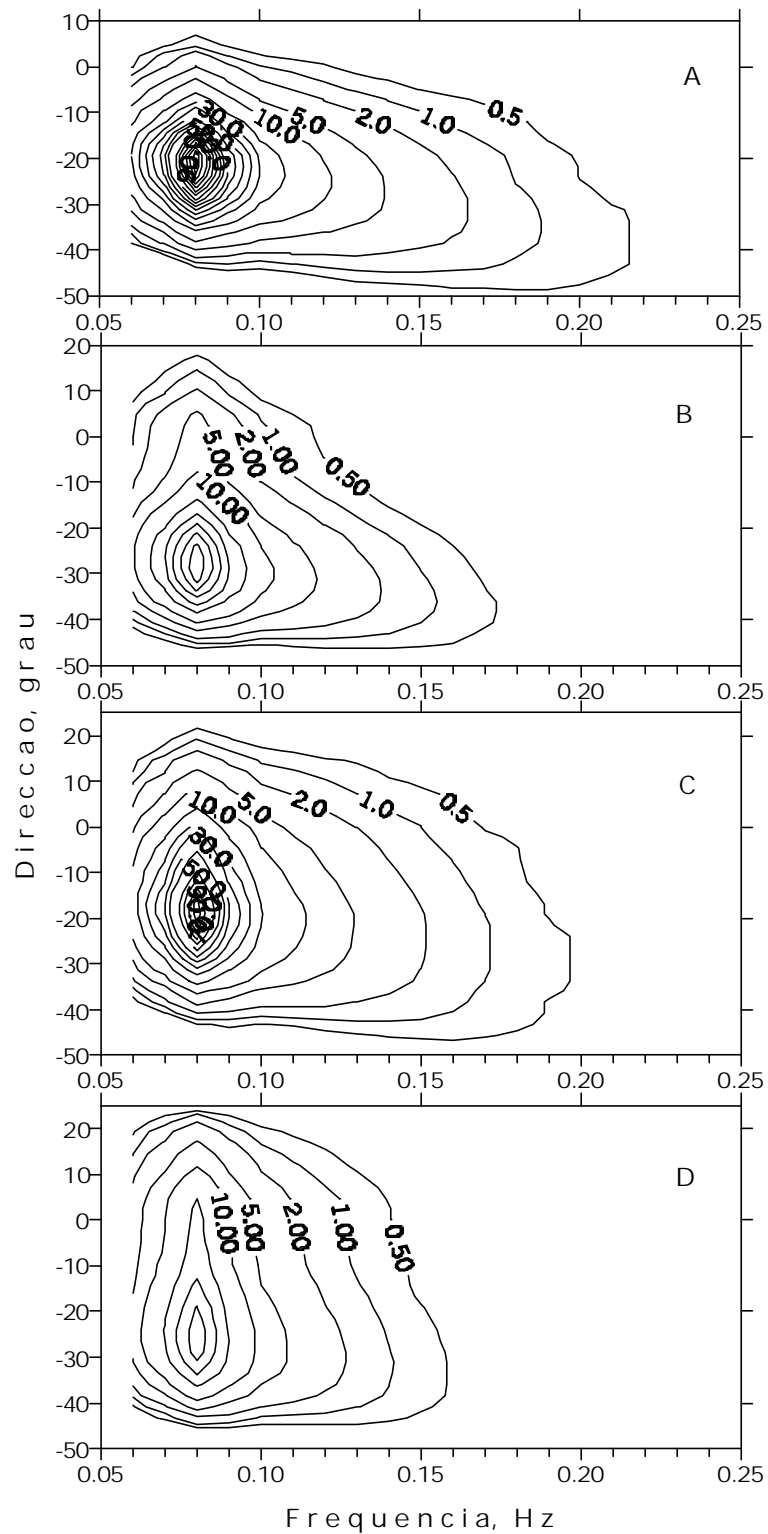


Figura 10 - Espectro direccional nos pontos A (A e C) e B (B e D). $T_p = 12,5$ s e $\sigma_\theta = 20^\circ$ (A e B) e 30° (C e D).

5.3 Rebentação da Onda.

Verificou-se que, durante a ocorrência do temporal, a generalidade das ondas presentes no estado de agitação rebentava antes de atingir o quebramar, funcionando, assim, o critério de limitação da altura de onda pela profundidade. Este fenómeno tinha já sido observado nos ensaios em modelo reduzido. Na Figura 11 pode ver-se a onda a rebentar frente ao quebramar.

5.4 Galgamento e “Setup”.

Como se referiu anteriormente, a obra foi francamente galgada ao longo de toda a bordadura marítima por muitas das ondas presentes no estado de agitação, apesar de muitas delas rebentarem mesmo frente à obra. O terraplano do cais e o terraplano junto ao enraizamento do molhe foram invadidos por enormes massas de água. A água entrava: por galgamento do muro cortina do molhe, tanto nos perfis onde estava executada apenas a primeira fase de betonagem como na zona onde o muro cortina já se encontrava às cotas de projecto; pela pequena secção que se encontrava ainda aberta no enraizamento; por galgamento do murete, coroado cerca da cota (+7.50)ZH, que separa o terraplano do mar na via de acesso ao novo porto. A entrada de mar deu-se até à zona do edificado mais antigo havendo a assinalar a destruição de construções, um acontecimento raro e de que não há memória entre os residentes do local. Na Figura 12, encontra-se assinalada a zona inundada pelo mar em consequência do espraiamento das ondas sobre o terraplano; chama-se a atenção para as cotas máximas atingidas, indicadas pelo limite da inundaçãõ num dos arruamentos contíguos. Importa salientar que não menos importante foi a entrada de água através da zona abrigada pelo molhe, ou seja, pela parte interior e “abrigada” do porto, como se pode ver no registo que se apresenta da Figura 12. Não será demais reforçar que, nesta zona da obra, a retenção marginal já se encontrava concluída e às cotas finais do projecto (+3.00)ZH. Significa isto que, mesmo na ausência de galgamentos, o mar teria invadido o terraplano se o porto estivesse em exploração por simples efeito de “setup” (sobreelevação do nível do mar na faixa de rebentação, por efeito desta).

Dada a configuração da costa e o facto do molhe ter passado a “fechar” parte da enseada de Rabo de Peixe, estão criadas condições para que se gere um “setup” significativo devido à rebentação da onda. Nos estudos e projectos consultados não foi possível encontrar referência a este fenómeno. Uma referência indirecta aparece no relatório dos ensaios em modelo reduzido, LNEC,(1998): “(...), nunca será demais salientar o facto de os ensaios terem sido efectuados sem a reprodução das condições locais de vento e de eventuais sobrelevações do nível das águas, factores que poderão influenciar tanto os aspectos relacionados com os galgamentos da obra, como mesmo (ainda que em menor escala) com os relacionados com a estabilidade do talude exterior.” (acrescentou-se o itálico).

Importará ter presente que os ensaios de estabilidade, realizados para um nível máximo de maré de +2.00 ZH (LNEC, estudo citado), puseram em evidência a susceptibilidade da solução executada ao galgamento. Com efeito, e como exemplo, ondas com rumo local de N-30°-W e período T=14s, associados àquele nível de maré, conduziram a galgamentos de grau 4-5, ou seja, “importantes-sérios” (frequentemente, constituídos por uma lâmina de água-frequentemente, constituídos por grandes massas de água).

Por outro lado, face à informação recolhida, nomeadamente fotográfica, não há qualquer dúvida que o nível dentro do porto ultrapassou o +3.00ZH, ou seja, excedeu em mais de um metro o nível estático considerado nos referidos ensaios, e excedeu em cerca de 1.4m o nível de preia-mar astronómica prevista para o dia 22/10/99 (PM=1.6-Tabela de Marés, IH). Tendo presente a posição de início da rebentação das maiores ondas registadas em 22/Out/99, pode-se afirmar que aquela sobrelevação não afectou apenas a bacia abrigada, antes foi sentida na zona exterior adjacente à obra de abrigo. De facto aquelas ondas começavam a rebentar antes de atingirem o talude exterior do molhe.

Pode então concluir-se que as ondas atacavam a obra a partir dum nível bem superior ao +2.00ZH considerado nos ensaios, verosimilmente aproximando-se do +3.00ZH. Não deverá por isso surpreender o carácter excepcional dos galgamentos registados no temporal de 22/Out/99 que, no entanto, nenhum elemento de estudo anterior poderia fazer prever.



Figura 11 – Porto de Rabo de Peixe. Temporal de 22 Out. 99. Rebentação da onda frente ao quebramar

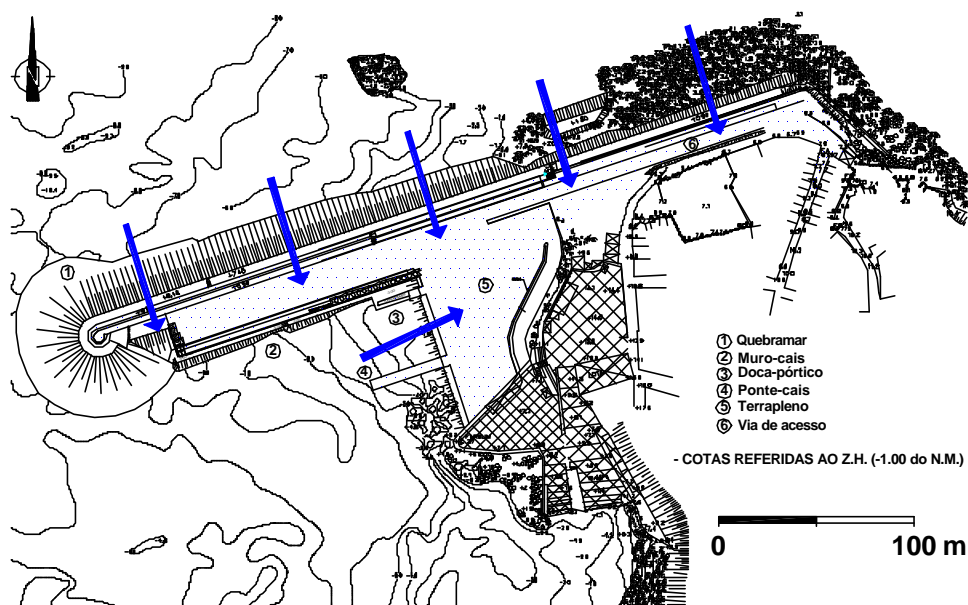


Figura 12 – Porto de Rabo de Peixe. Temporal de 22 Out. 99. Galgamento e inundação do terrapleno.

6. DANOS À OBRA.

Os danos na obra de Reformulação e Melhoramento do Porto de Pesca de Rabo de Peixe, em consequência do temporal de 22 de Outubro de 1999, foram avaliados por diversos meios e resultaram essencialmente do galgamento. A avaliação dos danos foi feita através de uma inspeção do local logo após o acidente, do levantamento aos assoreamentos e deslocamentos na zona do muro-cais, dos resultados do relatório de inspeção submarina do molhe e do levantamento da zona inundada na parte superior do terrapleno (edificado antigo).

Para além do equipamento danificado e destruído que se encontrava sobre o terrapleno, as principais zonas afectadas foram o terrapleno do muro-cais, o muro-cortina e o muro-cais. De salientar o bom comportamento estrutural do manto de protecção do molhe.

O terrapleno foi erodido por acção das massas de água que passaram sobre o molhe. Os antiferes que se vêem no interior da vala na Figura 5 foram empurrados de cima do muro-cortina, local em que se encontravam provisoriamente e onde tinham sido colocados antes do temporal para evitar o galgamento. O material de aterro foi arrastado para dentro da bacia abrigada pelo molhe e para o intradorso da cabeça.

As secções do muro-cortina mais próxima da extremidade do molhe adornaram no sentido da cabeça e para a parte interior. Este movimento foi devido essencialmente ao descalçamento que o muro sofreu ao serem arrastados os materiais do terraplano - Figura 5. Importará lembrar que são peças betonadas in situ de grande tonelagem

No muro-cais não há danos estruturais a assinalar, mas sim um assoreamento da frente do cais, já que o material do terraplano para aí foi arrastado. Como se referiu anteriormente, quando ocorreu o temporal estava executada a infraestrutura em blocos pré-fabricados vazados, que tinha sido carregada por uma fiada de blocos antiferes, antes do temporal. Parte destes blocos foram também projectados para dentro da bacia de estacionamento, frente ao cais.

7. Síntese e Conclusões.

A análise feita aos vários elementos de estudo coligidos (ensaios em modelo reduzido, relatórios da fiscalização da obra, inspecção submarina, inspecção do local dos trabalhos após o acidente, estudos de propagação da agitação do largo para o local da obra - modelo SWAN), permitiu concluir que:

a) A obra pode considerar-se bem dimensionada do ponto de vista estrutural; o critério utilizado para fixação da onda de projecto baseado na altura de onda máxima compatível com a profundidade, revelou-se correcto. A suportar esta afirmação estão:

- Os ensaios em modelo reduzido mostrando que a generalidade das ondas presentes nos estados de agitação reproduzidos rebentarem antes de atingirem a obra.
- Os ensaios em modelo reduzido mostrando que os danos observados na obra (quedas e movimentos de blocos) são mínimos.
- A inspecção à obra que mostrou não haver perda de geometria em planta após o acidente.
- A inspecção submarina realizada que mostrou haver poucos danos à parte submersa do talude;
- A inspecção ao manto de protecção em cubos antifer de 150 kN e 300 kN que revelou não ter ocorrido queda de nenhum bloco do manto de protecção. Alguns blocos sofreram movimentos, no entanto com deslocamentos finais muito aquém da sua dimensão característica. Todos os blocos que se encontravam dispersos pelo terraplano após o acidente eram blocos que tinham sido colocados sobre a primeira fase de betonagem do muro-cortina e que foram projectados para o interior.

b) Do ponto de vista do dimensionamento ao galgamento a obra revelou muitas insuficiências. É certo que, à data do acidente o muro cortina ainda não se encontrava betonado em toda a extensão às cotas finais de projecto (+8.5ZH e +9.5ZH). Várias fontes de informação concorrem, no entanto, para que se possa afirmar que o galgamento não se deu só pelo corpo do molhe, mas também pelo enraizamento e ao longo do murete que limita e protege a via de acesso ao porto. Por outro lado, a zona do futuro terraplano portuário sofreu ainda inundações com origem na sobrelevação do nível na zona abrigada do porto. Foi, no entanto, o galgamento o principal responsável pelos danos causados pelo temporal a 22 de Outubro de 1999. A suportar esta afirmações estão:

- Os ensaios em modelo reduzido; estes mostraram que, apesar de a onda rebentar em frente à obra, esta era quase sempre galgada em maior ou menor grau para os níveis de preia-mar.
- O galgamento, documentado fotograficamente, que ocorreu sobre o lancil de remate do terraplano na zona abrigada do porto. De facto, ele foi galgado por uma espessa

lâmina de água que o ultrapassou a toda a extensão e que foi engrossar a torrente sobre o terraplino do muro-cais.

- O galgamento que ocorreu em maior ou menor grau em toda a extensão do murete que limita, na sua bordadura marítima, a via de acesso ao porto. De facto, com uma extensão ultrapassando a centena de metros, esta via “colectou” grande quantidade de água que se veio juntar à torrente sobre o terraplino do muro-cais.
- O galgamento e a torrente de água que se formou ao longo do terraplino do cais, em acção conjugada, foram responsáveis:
 - i. pela escavação, arrastamento e dispersão de parte do material do aterro que se foi depositar em frente ao muro-cais;
 - ii. pela infraescavação do muro-cortina do molhe, provocando o adornamento de algumas das suas secções;
 - iii. pelo arrastamento e dispersão dos blocos antifer que tinham sido colocados como protecção provisória

c) Dada a configuração da costa e o facto do molhe ter passado a “fechar” parte da enseada de Rabo de Peixe, estão criadas condições para que se forme um “setup” extraordinário devido à rebentação da onda. Nos estudos e projectos consultados não foi possível encontrar qualquer referência a este “setup”, que se traduz numa sobrelevação do nível das águas do mar. A única referência a este fenómeno aparece nos relatórios dos ensaios em modelo reduzido (LNEC), da seguinte forma:

“Contudo, nunca será demais salientar o facto de os ensaios terem sido efectuados sem a reprodução das condições locais de vento e de eventuais sobrelevações do nível das águas, factores que poderão influenciar tanto os aspectos relacionados com os galgamentos da obra, como mesmo (ainda que em menor escala) com os relacionados com a estabilidade do talude exterior.”

Ora, verifica-se que, no temporal de 22/10/99, ele assumiu uma importância excepcional, de tal ordem que, mesmo sem galgamento, teria só por si determinado a inundaçãõ do terraplino portuário, à cota +3.00ZH. A importância da ocorrência reside no agravamento que necessariamente induziu no fenómeno do galgamento, que os ensaios do LNEC já haviam previsto como “sérios”, mesmo para um nível de maré de “apenas” +2.00ZH.

Como nota final e sendo certo que o molhe de abrigo é muito susceptível aos galgamentos, deveria o pavimento da plataforma do cais ter a robustez adequada às solicitações hidrodinâmicas correspondentes à queda de grandes massas de água duma altura de vários metros. Deveria ainda a autoridade portuária disciplinar a exploração/ocupaçãõ da plataforma do cais, nomeadamente mediante um trabalho de sensibilizaçãõ da populaçãõ piscatória para os riscos inerentes à frequência e importância do fenómeno de galgamento.

Agradecimentos

Os autores querem agradecer à Tecnovia-Açores a autorizaçãõ para publicaçãõ dos elementos relativos ao temporal de 22 de Outubro de 1999, incluídos no parecer elaborado pelo CEHIDRO-IST, na sequênciã do temporal.

Referências

CONSULMAR. Região Autónoma dos Açores. Secretaria Regional de Agricultura e Pescas. Direcção Regional de Pescas. *Porto de Rabo de Peixe. Reformulação e Desenvolvimento Portuário. Estudo Prévio*. Agosto 1995.

CONSULMAR. R.A.A. –S.R.H.O.P.T.C. Direcção Regional de Obras Públicas. Empreitada de Reformulação e Melhoramento do Porto de Pesca de Rabo de Peixe na Ilha de São Miguel. Processo do Concurso. Volume 3. Projecto Base. Junho de 1996.

CONSULMAR. Região Autónoma dos Açores. Secretaria Regional da Habitação e Equipamentos. Direcção Regional da Habitação e Equipamentos. Direcção Regional de Obras Públicas. *Empreitada de Reformulação e Melhoramento do Porto de Pesca de Rabo de Peixe na Ilha de S. Miguel- Obras Interiores*. Projecto de Execução. Tomo 1. Agosto 1997.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil. *Ensaios Adicionais em Modelo Reduzido do Quebra-Mar de Protecção do Porto de Pesca de Rabo de Peixe*. Relatório Final. Relatório 289/98 – NPP. Lisboa, Novembro de 1998.

CONSULMAR, Norma-Açores, SA. *Nota sobre: Temporal Ocorrido entre 99.10.21 e 99.10.24*. Out 1999.

Tecnovia-Açores. *Reformulação do Porto de Pesca de Rabo de Peixe. Temporal de 21 a 24 de Outubro de 1999. Relatório de Inspeção Submarina*. Novembro de 1999.

Tecnovia-Açores. Filme Vídeo realizado na manhã do dia 22 de Outubro de 1999, entre as 9.00h e as 12.30h.

CEHIDRO-IST, *TECNOVIA-AÇORES Porto de Pesca de Rabo de Peixe. Acidente de 22 de Outubro de 1999. Parecer*. Dezembro 1999

Dados Direcionais de Agitação Marítima na Costa Portuguesa (1994), Relatório Final da Tarefa A1-5, NATO PO-WAVES, Instituto Hidrográfico.

European Wave Energy Atlas, EU. DGXII Contract No. JOU2-CT93-0390.

Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. e Jansen, P.A.E.M. (1994), *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge Univ. Press.

Pires Silva, A.A, Makarynsky, O., Ventura Soares, C., e Coelho, E. (1999), *Propagação da Agitação Marítima ao Largo de Pinheiro da Cruz: Aplicação do Modelo SWAN*, Actas 1º Jorn. Port. de Engng. Costeira e Portuária, PIANC-DP, Porto, 47-57.

Ris, R.C. (1997), *Spectral Modelling of Wind Waves in Coastal Areas*, Ph.D. Thesis, Dept. Civil Engng., Delft Univ. Technology.

Tabela de Marés. Instituto Hidrográfico. 1999.