

EFEITOS DE TSUNAMIS EM NAVIOS AMARRADOS EM PORTOS

*João Alfredo Santos¹, Luís Matias², Maria Ana Baptista³,
Conceição J.E.M. Fortes¹ e Leonel Fernandes⁴*

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil,
Lisboa, Portugal,
jasantos@lnec.pt, jfortes@lnec.pt

² Instituto de Meteorologia,
Lisboa, Portugal
lmatias@fc.ul.pt

³ Fundação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa,
Lisboa, Portugal
mabaptista@dec.isel.ipl.pt

⁴ Instituto de Engenharia Mecânica,
Lisboa, Portugal
leonel@dem.ist.utl.pt

Resumo

Os tsunamis são talvez a única catástrofe natural capaz de causar destruição em zonas costeiras afastadas milhares de quilómetros da zona fonte. Eles podem causar perturbações significativas nas actividades portuárias devido a movimentos excessivos dos navios amarrados no seu posto de acostagem excitados por movimentos da superfície livre que podem ser quase imperceptíveis. Neste caso, o que importa é a gama de frequências presente nas forças de excitação actuantes no navio conter, ou não, as frequências próprias dominantes do conjunto navio/sistema de amarração. Para a maioria dos navios de carga estas frequências são mais baixas do que as associadas às da agitação marítima gerada pelo vento.

Nesta comunicação revêem-se os tsunamis registados ao longo da costa portuguesa no século XX e apresenta-se o Sistema Nacional de Alerta contra Tsunamis (SNAT). Descreve-se também o projecto de investigação em curso para desenvolvimento de uma ferramenta integrada capaz de avaliar os efeitos de tsunamis em navios amarrados no interior de portos e de um procedimento para incorporar esses efeitos no SNAT.

1 Introdução

Os tsunamis são ondas de grande comprimento de onda geradas por deformações bruscas do fundo do oceano. A causa mais comum são os sismos submarinos de forte magnitude, embora possam ser causados por deslizamentos de terras, erupções vulcânicas e impactos de meteoritos. Apesar de pouco frequentes, quando comparados com outros eventos naturais, os tsunamis têm um enorme potencial destruidor. Portugal, com uma costa oceânica de cerca de 800 km de extensão, agrega na faixa litoral a maioria da sua população e concentra nela a maioria da sua actividade económica, pelo que é um país onde o risco de tsunami tem que ser equacionado.

Com efeito, e para mencionar apenas dois dos eventos mais destruidores, basta recordar o tsunami associado ao terramoto de 1 de Novembro de 1755 e o ainda menos conhecido evento de 26 de Janeiro de 1531. A memória destes fenómenos ter-se-ia limitado ao âmbito da comunidade científica, não fosse a ocorrência do tsunami de Sumatra, no dia 26 de Dezembro de 2004, e a divulgação das suas consequências desastrosas, no ano em que se completavam 250 anos do tsunami de 1755. Tal facto, despoletou em Portugal a preocupação do público em geral.

Na sequência do sismo e do tsunami de 26 de Dezembro de 2004, no oceano Índico, a Comissão Oceanográfica Intergovernamental da UNESCO, reconhecendo que os tsunamis são uma ameaça real mesmo nas zonas onde ocorrem com menor frequência, decidiu coordenar as acções para a implementação de um sistema mundial de alerta de tsunamis – “*Global tsunami warning system*”. O oceano “global” encontra-se dividido, para este efeito, em sub-regiões: Pacífico, Índico, Caraíbas, Nordeste Atlântico e Mediterrâneo, em cada uma das quais será implementado um sistema de alerta regional. A costa portuguesa encontra-se incluída na sub-região NEAMTWS.

Os tsunamis são talvez a única catástrofe natural capaz de causar destruição em zonas costeiras afastadas milhares de quilómetros da zona fonte.

No dia 1 de Novembro de 1755, o tsunami gerado pelo sismo com epicentro ao largo do golfo de Cadiz atingiu zonas costeiras nas Caraíbas, cerca de 7 horas depois do sismo, inundando costas baixas nas ilhas de Antígua e Barbados e nas ilhas francesas de Guadaloupe e Martinica, recuando depois cerca de uma milha (1.6 km). Na ilha de Antígua observou-se uma subida de cerca de 12 pés (4 metros), (Affleck, 1755).

Recentemente o tsunami gerado pelo sismo de Sumatra, a 26 de Dezembro de 2004 causou forte destruição em portos afastados do epicentro. No Brasil

os marégrafos de Natal e Paraná registaram ondas de amplitude superior a 1 metro cerca de 22 horas depois do sismo (Candella *et al.*, 2008).

Desde há alguns anos que o procedimento de evacuação imediata dos navios em caso de sismo é obrigatório em alguns portos. Em Port Blair, na ilha de Andaman, em 26 de Dezembro de 2004, os navios receberam ordens para deixar o porto após o sismo, tendo o tsunami chegado 50 minutos depois, quando o porto já estava vazio; no entanto, no porto de Chennai este procedimento não existia, tendo-se verificado uma colisão entre 3 navios que partiram as amarras (Ballantyne, 2006).

No dia 15 de Novembro de 2006 ocorreu um sismo de magnitude 8.4 ao largo das Ilhas Kuril (oceano Pacífico). O tsunami gerado não causou inundações significativas ao longo da costa mas o seu impacto no porto de Crescent City na Califórnia (USA), figura 1, causou um prejuízo de cerca de 7 milhões de dólares.



Figura 1 – Danos causados em navios ancorados no porto de Crescent City pelo tsunami de 15 de Novembro de 2006 (foto por B. Andersen, reproduzido de SF Gate; <http://www.sfgate.com/cgi-bin/object/article?f=/c/a/2006/11/16/TSUNAMI.TMP&o=0>)

No caso de tsunamis de amplitude moderada, 0.5m, podem observar-se runups da ordem de 1 metro e pequenas ou moderadas inundações em praias.

No entanto, os portos e infra-estruturas costeiras são normalmente os mais afectados em particular devido à resposta dos navios, ancorados e amarrados, à excitação forçada pelo tsunami. Este facto é particularmente importante quando ocorrem operações de carga e descarga de petróleo e de outros materiais de elevado valor económico.

Os movimentos excessivos do navio no seu posto de acostagem podem dever-se à existência, nas forças de excitação actuantes no navio, de componentes com uma frequência próxima das frequências próprias dominantes do conjunto navio/sistema de amarração. Para a maioria dos navios de carga estas frequências são mais baixas do que as associadas à agitação marítima gerada pelo vento. Assim, aquelas forças podem resultar de ondas de longo período associadas à agitação marítima ou da ocorrência de tsunamis.

Como referido atrás, houve relatos de navios de grande porte arrastados pela corrente e pelas oscilações da bacia portuária em Madagáscar e nas Ilhas Nicobar devidas ao tsunami de 26 de Dezembro de 2004. Este episódio foi sentido nas costas da África Oriental causando mortes e deslocados em vários países, longe do epicentro. Importa referir que mesmo excitações de amplitude muito pequena podem levar a movimentos excessivos do navio amarrado. Tal facto confirma o interesse em estudar a resposta de navios amarrados não só para grandes tsunamis (cuja ocorrência é relativamente baixa) mas também para tsunamis de pequena amplitude, gerados por fontes longínquas ou próximas de menor intensidade, cuja ocorrência é muito mais provável.

Já existe algum trabalho na avaliação dos efeitos de tsunamis em bacias portuárias sendo no entanto, limitada, em geral, à ocorrência de ressonância na bacia, algo importante para a segurança das infra-estruturas portuárias mas nem sempre para o comportamento de navios amarrados no porto.

No Japão tem vindo a ser desenvolvido um trabalho consistente visando a definição de princípios orientadores das medidas de mitigação dos efeitos de tsunamis em portos. Existe também algum trabalho na modelação dos efeitos dos tsunamis nos movimentos dos navios amarrados e nos esforços no sistema de amarração, mas aplicado a casos idealizados de portos e não situações reais, por exemplo Sakakibara (2009).

Apresenta-se nesta comunicação não só uma revisão dos tsunamis registados ao longo da costa portuguesa no século XX mas também o Sistema Nacional de Alerta contra Tsunamis (SNAT) cuja implementação está em curso. Descreve-se ainda o projecto de investigação agora iniciado para desenvolvimento de uma ferramenta integrada capaz de avaliar os efeitos de tsunamis em navios amarrados no interior de portos e de um procedimento para incorporar esses efeitos no SNAT.

2 Tsunamis observados em Portugal

Os grandes tsunamis observados no Atlântico Nordeste encontram-se descritos em documentos históricos. O evento mais antigo corresponde ao tsunami gerado por um sismo cerca do ano 60 antes de Cristo. No entanto, em registos geológicos sedimentares o evento mais antigo data de cerca de 7000 anos antes do tempo presente. Se bem que os grandes tsunamis são relativamente pouco frequentes, os tsunamis de pequena amplitude surgem no entanto na maior parte dos sismos submarinos de magnitude igual ou superior a 7. Estes tsunamis são muitas vezes pouco perceptíveis para as populações, sendo apenas registados pelos mareógrafos.

Desde a instalação das primeiras estações mareográficas, Cascais em 1881 e Lagos em 1908 foram registados claramente, ao longo da costa portuguesa, 6 tsunamis de amplitude moderada durante o século XX, todos eles associados a sismos submarinos de magnitude superior a 7, com exceção para o evento dos Grandes Bancos da Terra-Nova.

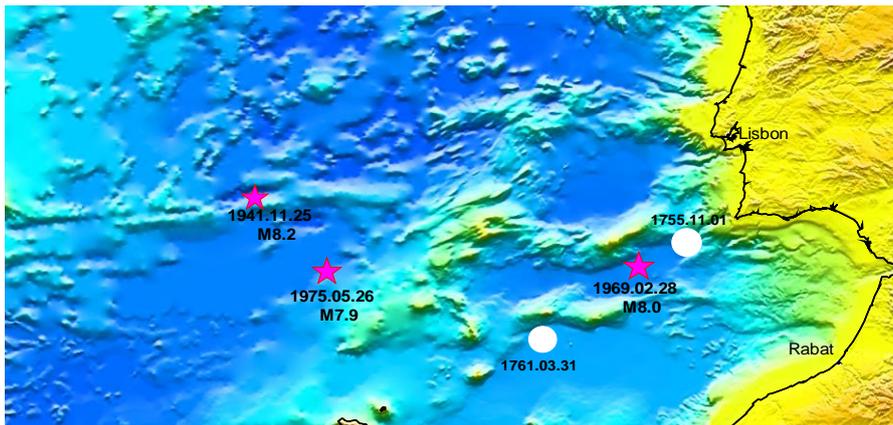


Figura 2. Localização dos epicentros dos maiores sismos tsunamigénicos: estrelas – eventos ocorridos no século XX; Círculos - eventos tsunamigénicos ocorridos no século XVIII.

Os eventos representados na figura 2 têm em comum as seguintes características: epicentro submarino, magnitude igual ou superior a 7, profundidade do foco inferior a 100 km. Segundo a “Matriz de Decisão” adoptada pelo grupo de trabalho da região NEAM, a ocorrência de eventos com estas características obriga à emissão de mensagens de aviso por parte dos centros de alerta. Por outro lado, a análise dos registos mareográficos das estações de Portugal continental, dos Açores, da Madeira e de Marrocos mostra que as amplitudes registadas são nalguns casos iguais ou superiores a

0.5 m e que os valores registados na maior parte das estações obrigam à emissão de uma mensagem de “aconselhamento” – *advisory* (cf. Tabelas 1 e 2).

Depth	Location	(Mw)	Tsunami Potential	Bulletin Type
< 100 km	Sub-sea or very near the sea (< 30 km)	5.5 to 7.0	Small potential for a local tsunami	Information Bulletin
		7.0 to 7.5	Potential for a regional tsunami < 1000 km	Regional Tsunami Advisory
		7.5 to 7.9	Potential for a destructive regional tsunami < 1000 km	Regional Tsunami Watch Ocean-wide Tsunami Advisory
		≥ 7.9	Potential for a destructive ocean-wide tsunami > 1000 km	Ocean-wide Tsunami Watch
	Inland	5.5	No tsunami potential	Information Bulletin
≥ 100 km	All Locations	≥ 5.5	No tsunami potential	Information Bulletin

Tabela 1. Matriz de Decisão adoptada pelo ICG-NEAMTWS para o Atlântico (in, IOC-NEAMTWS, 2009)

	Advisory	Watch
Run-up	< 1m	> 1m
Amplitude	0.2- 0.5 m	> 0.5 m
Impact	Currents, Bore, recession, damage in harbours, small inundation on beaches	Advisory impact + coastal inundation

Tabela 2. Relação entre a amplitude do tsunami registada no marégrafo e o tipo de mensagem a enviar pelos centros de alerta, adoptada pelo ICG-NEAMTWS (in, IOC-NEAMTWS, 2009)

2.1 Descrição dos tsunamis registados no século XX

2.1.1 O tsunami de 18 de Dezembro de 1926

O sismo de 18 de Dezembro de 1926, ocorreu às 14:45 e as coordenadas do epicentro do sismo dadas por Martins e Victor (2001) são: 09.20 E, 38.70 N. O Diário de Notícias de 19 de Dezembro relata: “...A agitação no Tejo foi grande, tendo-se sentido muito em todas as embarcações encostadas à

muralha e nas que se encontravam na caldeira do Arsenal...” (Diário de Notícias, 1926)

2.1.2 O tsunami de 18 de Novembro de 1929

No dia 18 de Novembro de 1929, às 20:32 TUC, um sismo de magnitude 7.2 ocorreu a sul dos Grandes Bancos da Terra Nova provocando um deslizamento de terras submarino com um volume estimado de 200 km³ (Fine et al., 2005). O deslizamento de terras terá gerado um tsunami que atravessou o Atlântico norte tendo sido registado nas estações de Ponta Delgada, figura 3, e Leixões (Baptista e Miranda, 2009).

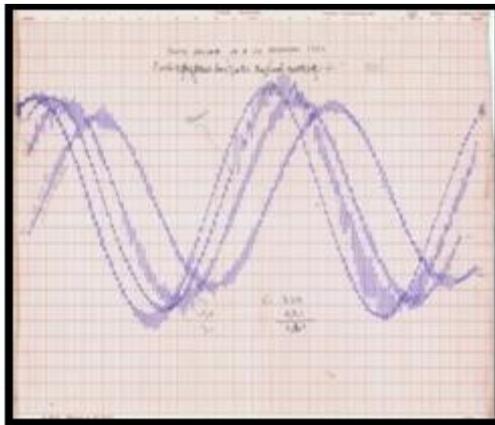


Figura 3. Registo maregráfico da estação de Ponta Delgada. 18 de Novembro de 1929

2.1.3 O tsunami de 4 de Março de 1930, Madeira

Este é um dos poucos tsunamis, presenciado por testemunhas oculares, que foi gerado por um deslizamento de terras sub-aéreo. As ondas penetraram cerca de 300 metros dentro de terra tendo causado a morte a 20 pessoas (Baptista e Miranda, 2009)

2.1.4 O tsunami de 9 de Maio de 1939

Foi registado um tsunami nas estações maregráficas de Ponta Delgada e da Terceira gerado por um sismo de magnitude 7.1, com epicentro nos Açores (37.40 N, -23.90E), (Buforn et al., 1988).

2.1.5 O tsunami de 25 de Novembro de 1941

O tsunami gerado pelo sismo foi registado nas estações de Cascais, Lagos, Leixões, Douro (Portugal), Casablanca (Marrocos), Pontinha (Madeira), Ponta Delgada (Açores), Newlin (Cornwall, UK). De acordo com o Diário de Notícias de dia 26: “...Na Foz do Douro o pânico não foi menor provocado não só pelo abalo sísmico como também pelo rugir estranho do mar que tomado de súbita fúria galgou as praias atingindo a rua de S Bartolomeu...” (Diário de Notícias, 1941).

2.1.6 O tsunami de 28 de Fevereiro de 1969

O sismo de 28 de Fevereiro de 1969 de magnitude 7.9 ocorreu às 02:40 TUC, a cerca de 300 km a sudoeste do Cabo de São Vicente. O tsunami gerado teve amplitude máxima de 0.9 m em Casablanca, tendo sido registado nas estações maregráficas do continente, Açores, Madeira e ao longo do estuário do Tejo (Paço de Arcos, Cacilhas, Terreiro do Paço, Cabo Ruivo). Existe apenas um testemunho de pescadores ao largo de Matosinhos, provavelmente porque o sismo ocorreu durante a noite (Baptista e Miranda, 2009).

2.1.7 O tsunami de 26 de Maio de 1975

Tsunami gerado pelo sismo localizado no Atlântico, -17.5E, 35.9N. O Diário dos Açores relata que às 8:15 (hora local) se registou um sismo com epicentro a sudeste de São Miguel. A primeira página do Diário dos Açores de 26 de Maio relata: “...Cerca das 9:40 (hora local), no fundo do porto artificial como na área do velho começou a verificar-se o fenómeno do rápido escoamento do mar, que logo depois regressava atingindo a completa maré cheia. Naqueles locais, férteis zonas mais salientes do fundo ficaram a descoberto, havendo embarcações que chegaram a tocar com a quilha no fundo...” (Diário dos Açores, 1975) O marégrafo da Horta (Faial) registou a máxima amplitude de 34.5 cm (Baptista e Miranda, 2009).

3 O sistema de alerta contra tsunamis em Portugal

3.1 *Descrição geral*

Assumindo a sua responsabilidade no domínio da monitorização e mitigação de desastres naturais, o Instituto de Meteorologia, em colaboração com o Instituto D. Luís e o Joint Research Center (JRC), tem vindo a desenvolver desde 2007 o Sistema Nacional de Alerta contra Tsunamis (SNAT),

segundo as recomendações e padrões definidos pelas instâncias internacionais. Deste esforço resultou a recente nomeação do IM como o Ponto Focal nacional para o alerta de tsunamis na região NEAMTWS.

O SNAT, à semelhança de outros sistemas já em funcionamento, apenas se ocupa de tsunamis que sejam gerados por sismos, não estando preparados para emitir alertas de tsunamis de outras origens, como explosões vulcânicas ou impacto de meteoritos. Por isso, todo o processo de alerta é desencadeado pela atempada detecção e avaliação dos sismos de maior magnitude (Figura 4). A modernização da rede de observação sísmica e uma operação em permanência (24/7) garantem hoje que qualquer sismo tem a sua localização e magnitude local calculados em cerca de 3 minutos após a geração do sismo. A magnitude de referência para o alerta de tsunamis é a magnitude de momento, M_w , sendo esta calculada com registos de estações mais afastadas, estando disponível ao fim de 5 minutos, dentro das recomendações internacionais (US IOTWS, 2007).

A informação sísmica é introduzida na aplicação TAT (*Tsunami Analysis Tool*) desenvolvida pelo JRC que explora uma base de dados de cenários de geração de tsunamis (ver sub-capítulo seguinte), permitindo a emissão de uma primeira mensagem à protecção civil contendo estimativas da amplitude e do tempo de chegada à costa do tsunami, para um conjunto de pontos representativos pré-definidos.

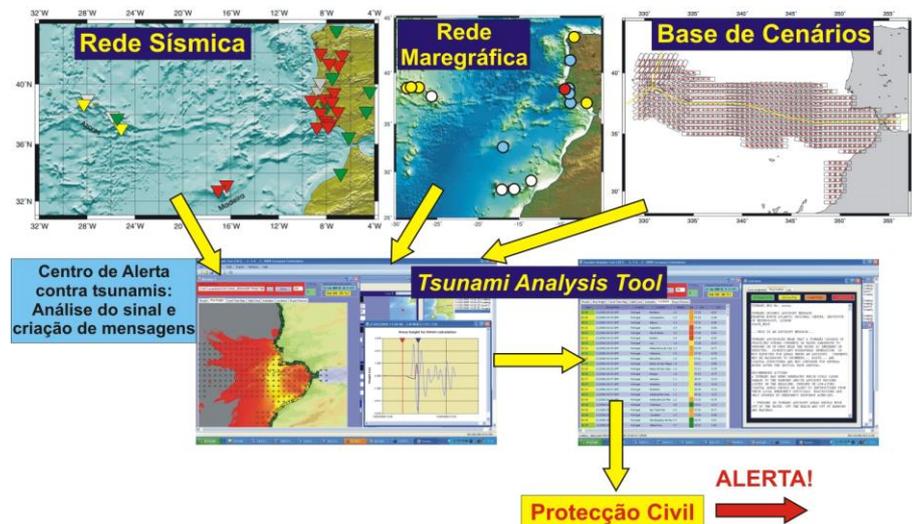


Figura 4. Esquema de funcionamento do Sistema de Alerta contra Tsunamis instalado no IM em regime pré-operacional, adaptado de Annunziato et al (2009).

Esta primeira mensagem tem uma baixa fiabilidade pois sabe-se que a maior parte dos sismos, mesmo de elevada magnitude, não dão origem a tsunamis

destruidores. Torna-se necessário por isso fazer a confirmação (ou cancelamento) do alerta de tsunamis, através da observação directa da onda. No Oceano Pacífico, Índico e Atlântico Ocidental existem já sistemas de bóias e/ou sensores ligados por cabo submarino que permitem a observação do tsunami muito antes de ele chegar à costa, permitindo a emissão de mensagens com uma antecedência adequada. Ao largo de Portugal estes sistemas ainda não existem, fazendo-se a observação da perturbação do nível do mar por estações maregráficas costeiras. Algumas destas encontram-se já a ser recebidas em tempo real no concentrador de dados do IM, graças à colaboração do Instituto Geográfico Português, o Instituto Hidrográfico e ao Departamento de Oceanografia e Pescas da Universidade dos Açores (ver Figura 4). Outras estações são recebidas via Internet mas com um grande atraso, o que reduz a sua utilidade para o alerta.

O TAT permite fazer a comparação das observações em tempo real com o cenário pré-calculado, ficando o observador habilitado a rever ou confirmar a informação anterior. O cenário inicial pode ser modificado ou adequado às observações para permitir a actualização dos cálculos de amplitude e tempo de chegada do tsunami.

De forma a cobrir toda a área onde podem ocorrer sismos tsunamigénicos a base de dados contém 518 localizações possíveis, com um espaçamento de meio em meio grau geográficos. Em cada ponto são considerados sismos com magnitudes entre 6.5 e 9.5, com um espaçamento de 0.25 em magnitude. Desta forma a base de dados completa contém cerca de 6700 cenários de tsunami pré-calculados.

3.2 Condições fronteira para a modelação nos portos

Como mencionado anteriormente, os portos são particularmente sensíveis a tsunamis, mesmo de pequena amplitude, podendo a sua actividade ser comprometida ou haver danos nos navios atracados. Por isso, o limiar de alerta para os portos é bastante inferior ao da população em geral. Um pequeno tsunami que não dá origem à evacuação de pessoas das praias pode dar origem a um alerta às autoridades portuárias.

O cálculo dos efeitos de um tsunami num porto será feito com base numa modelação detalhada que tem como condições fronteira a altura da onda e velocidade do fluido calculadas a partir dos cenários pré-calculados.

Os cenários são calculados pelo código desenvolvido pelo JRC (SWAN-JRC) e descrito em Annunziato (2007a e 2007b). Deste método destacaremos apenas os aspectos mais importantes para a modelação em portos. Neste código SWAN-JRC são usadas as equações de propagação em águas pouco profundas (*shallow water*) tal como foram propostas por Mader

(2004). Este modelo usa as equações de conservação da massa e de quantidade de movimento a duas dimensões, usando a aproximação de velocidade constante na vertical. Esta aproximação é válida desde que a razão entre o comprimento de onda da perturbação e a profundidade do oceano seja elevada. Em águas profundas (4000 m), um tsunami gerado com um comprimento de onda de 40 km, esta aproximação é válida, não se deteriorando com a aproximação da costa e profundidades menores. Próximo da costa o efeito da interacção da onda com o fundo já não se pode desprezar, havendo ainda outros efeitos não-lineares que impedem a aplicação desta aproximação a profundidades inferiores a 20 m.

A grelha batimétrica usada na implementação SWAN-JRC é a grelha ETOPO a 2 minutos. Esta grelha é interpolada ou dizimada numa zona em torno do centro da falha que gera o tsunami, de forma que a área de trabalho tenha sempre uma dimensão de 620x620 pontos. A dimensão da área de trabalho, o passo da malha e o passo temporal de integração são escolhidos de forma a obedecer à condição de CFL. As grelhas calculadas em cada instante são guardadas na base de dados a um intervalo superior ao do passo de integração (Figura 5).

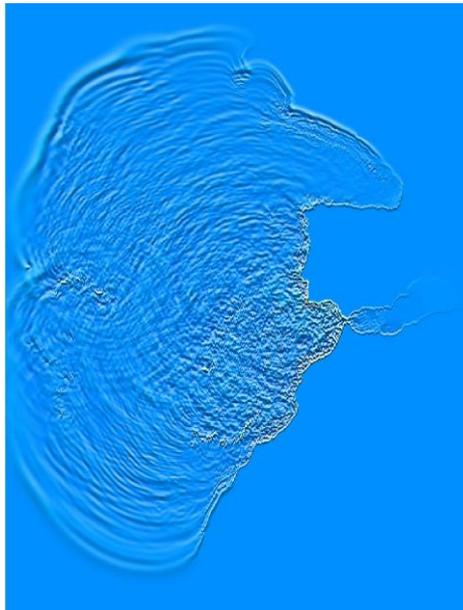


Figura 5. Exemplo da grelha de amplitudes da onda para um sismo de magnitude 8.5.

A primeira geração de cenários de tsunami criados pelo JRC tinha uma perspectiva planetária e destinava-se exclusivamente ao alerta de tsunamis catastróficos. A segunda geração de cenários, cujo cálculo se encontra

actualmente em curso no JRC, parte de uma base batimétrica mais detalhada, incorporando as observações de detalhe disponíveis nos Açores e ao largo de Portugal Continental. Além disso, a segunda geração de cenários incorpora um modelo de fonte sísmica mais realista e irá conter as grelhas de amplitude e velocidade do fluido a um passo temporal de 30 segundos, valor que se julga adequado para a definição das condições fronteira para a modelação da onda de tsunami em portos e navios amarrados.

4 Efeitos dos tsunamis no comportamento de navios amarrados

Já existe alguma experiência no LNEC com a modelação numérica do comportamento de navios amarrados, embora a totalidade dos casos estudados tenha sido com ondas geradas pelo vento incidindo no navio.

Nessa modelação numérica tem-se utilizado o pacote numérico MOORNAV, Santos (1994). Elemento fundamental desse pacote é o modelo numérico WAMIT, Newman e Sclavounos (1988) que foi desenvolvido para resolver no domínio da frequência os problemas de radiação e de difracção de um corpo flutuante livre sem levar em conta a presença de fronteiras parcialmente reflectoras na sua proximidade, como acontece com navios amarrados em portos.

Aquele modelo baseia-se na linearidade da interacção entre o corpo flutuante e as ondas e permite determinar as forças necessárias para fazer oscilar o navio, com frequência constante, segundo um dos seus seis graus de liberdade em águas de outra forma paradas – problema de radiação – ou para manter imobilizado o navio quando nele incidem ondas regulares – problema de difracção.

Devido ao comportamento claramente não-linear do conjunto navio - sistema de amarração (as amarras apenas exercem força no navio quando traccionadas e as defensas quando comprimidas) o movimento do navio amarrado não pode ser determinado directamente a partir dos resultados dos problemas anteriores definidos no domínio da frequência, sendo necessário montar e resolver no domínio do tempo as equações de movimento.

Das forças exteriores actantes no navio amarrado, as mais importantes são as provocadas pela variação da elevação da superfície livre nele incidente. A linearidade da interacção entre o navio e as ondas permite escrever a força de excitação devida a qualquer variação da elevação da superfície livre que incide no navio como a soma das forças devido a cada uma das ondas monocromáticas em que é possível decompor aquela “onda”, isto é, a sobreposição dos resultados de vários problemas de difracção.

Uma vez que aquela hipótese de linearidade deixa de ser válida quando as dimensões do navio são pequenas face ao comprimento da onda incidente – como será o esperado no caso do navio amarrado face a um tsunami – deve considerar-se, para além das forças lineares, as forças associadas a efeitos de segunda ordem, tais como as forças de atrito provocadas pelo movimento do fluido em torno do casco do navio. Nesta situação em que o amortecimento viscoso pode ter um papel importante, Sakakibara (2009) propõe a utilização de coeficientes de força de atrito, na linha de trabalhos anteriores do mesmo autor sobre a interacção de navios com ondas de longo período. Uma alternativa viável consiste na utilização das fórmulas para coeficientes hidrodinâmicos empregues no cálculo das forças exercidas pela água no casco de um navio em manobra.

Como o modelo WAMIT não leva em conta a presença de quaisquer fronteiras parcialmente reflectoras na proximidade do navio, está em curso a modificação daquele modelo de forma a modelar o comportamento de navios amarrados no interior de portos. Pretende-se utilizar a abordagem proposta por Bingham (2000) para o cálculo da força de excitação devida às ondas, i.e., combinar o potencial da onda incidente na posição do navio, quando ele lá não está, com os potenciais dos problemas de radiação.

Para se obter a elevação da superfície livre na posição do navio, necessária ao cálculo das forças de excitação no navio provocada pela variação da elevação da superfície livre, parte-se daquela elevação definida pelo modelo SWAN-JRC na zona de entrada do porto e utiliza-se o modelo numérico BOUSS3W, Pinheiro *et al.* (2009), baseado nas equações de Boussinesq estendidas por Nwogu (1993). Embora este modelo já tenha sido aplicado a portos, existem ainda alguns aspectos que necessitam de aperfeiçoamentos, nomeadamente a dissipação de energia por rebentação e as instabilidades numéricas.

5 Considerações finais

Está em curso a implementação do Sistema Nacional de Alerta contra tsunamis, seguindo-se as recomendações e padrões definidos pelas instâncias internacionais. Todo o processo de alerta é desencadeado pela atempada detecção e avaliação dos sismos de maior magnitude e baseia-se na definição *a priori* de um conjunto de cenários de geração de tsunamis que permite a emissão de uma primeira mensagem à protecção civil contendo estimativas da amplitude e do tempo de chegada à costa do tsunami.

Os registos das consequências de tsunamis anteriores mostram a capacidade dos tsunamis para causar perturbações na actividade portuária e que estes

não têm que ser gerados na vizinhança imediata do porto. Daí a importância de uma rede de instrumentos à escala global para caracterização de tsunamis.

Além disso, um pequeno tsunami que não dá origem à evacuação de pessoas das praias pode dar origem a problemas nas actividades portuárias, devido à sensibilidade do conjunto navio – sistema de amarração às frequências das componentes da variação da elevação da superfície livre incidente no navio.

Estendendo a definição de cenários e utilizando um modelo numérico capaz de prever a elevação da superfície livre na entrada de uma baía portuária, é possível avaliar as consequências dos tsunamis nos navios amarrados em portos, logo da necessidade de envio de mensagem de aviso às autoridades portuárias sobre o mesmo.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da FCT através do projecto PTDC/ECM/73145/2006.

Referências

Affleck, B., (1755), “An account of the Agitation of the sea at Antigua, Nov. 1, 1755. By Capt. Affleck of the Advice Man of War. Communicated by Sir Charles Gray, Esq, F.R.S. in a Letter to William Watson, F.R.S.. Philosophical Transactions (1683-1775) (www.jstor.org)

Annunziato, A., (2007a), “The Tsunami Assessment Modelling System by the Joint Research Centre”, *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 26, No. 2, pp. 70-92.

Annunziato, A., (2007b), “The JRC Tsunami Assessment Modelling System”, *JRC Scientific and Technical Reports*, EUR 23063 EN, 54 pp.

Annunziato, A.; Carrilho, F., Matias, L., Baptista, M. A., e Omira, R., (2009), “Progresses in the Establishment of the Portuguese Tsunami Warning System”, *EMSC Newsletter*, April 2009, pp.10-12.

Ballantyne, D., (2006), “Lifelines”, in Summary Report on the Great Sumatra Earthquakes and Indian Ocean tsunamis of 26 December 2004 and 28 March 2005.

Baptista, M.A. e Miranda J.M., (2009), “Revision of the Portuguese Catalog of Tsunamis”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 25-42

Bingham, H.B., (2000). A hybrid Boussinesq-panel method for predicting the motion of a moored ship. *Coastal Engineering*, 40, 21-38.

Buform E., Dias A. e Colombas M., (1988), “Seismicity, source mechanisms and tectonics of the Azores – Gibraltar plate-boundary”, *Tectonophysics*, 152, 89-118.

Candella, R.N., Rabinovich, A. B. e Thomson, R.E., (2008), “The 2004 Sumatra tsunami as recorded on the Atlantic coast of South America”, *Adv. Geosci.*, 14, 117–128, 2008 www.adv-geosci.net/14/117/2008/

Diário de Notícias nº219876, 19 de Dezembro de 1926, pp. 1 e 3.

Diário de Notícias nº 27227, 26 de Novembro 1941.

Diário dos Açores nº29 792, 26 de Maio de 1975, ano 106, pp 1.

Fine, I. V., Rabinovich, A.B., Bornhold, B.D., Thomson, R.E. e Kulikov, E.A., (2005), “The Grand Banks landslide-generated tsunami of 18, 1929: preliminary analysis and numerical modelling”, *Mar. Geol.*, 215, 45-47.

IOC-NEAMTWS (2009), *Intergovernmental Coordination Group for the Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas (ICG/NEAMTWS)*, Final Draft Report (Fifth Session).

Mader, C., (2004), *Numerical modeling of water waves*, CRC Press, ISBN 0-493-2311-8, 2a edição, 274pp.

Martins, I. e Victor, L.A.M., (2001), *Contribution to the Study of Seismicity in the West Margin of Iberia*, Univ Lisboa, IGIDL Pub 25, ISSN 0870-2748.

Newman, J.N. e Sclavounos, P.D., (1988), “The computation of wave loads on large offshore structures”, *Boss 88 Conference*, 1-19.

Nwogu, O., (1993), “Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation”, *J. Waterway, Port, Coast. Ocean Eng.* 119(6), 618-638.

Pinheiro, L., Fortes, C.J.E.M., Santos, J.A. e Walkley, M., (2009), “Implementation of partial reflection boundary conditions in wave propagation model BOUSSIIW”, *J. of Coastal Research*, SI 56, 1040-1044.

Sakikibara, S. e Kubo, M., (2009), “Initial attack of large scaled tsunami on ship motion and mooring loads”, *Ocean Engineering*, doi:10.1016/j.oceaneng.2008.09.010.

Santos, J.A., (1994), *Numerical model for the behaviour of moored ships*, Report 3/94-B Project NATO PO-WAVES, IH-LNEC, Lisbon.

U.S. Indian Ocean Tsunami Warning System Program (US IOTWS), (2007), *Tsunami Warning Center Reference Guide*, supported by the United States Agency for Int. Development and partners, Bangkok, Thailand. 311 pp.