



Análise da Vulnerabilidade ao Impacto de Tsunami nos Edifícios do Porto de Sines – Uma Abordagem SIG

André TRINDADE*¹, Rachid OMIRA^{2,4}, Martin WRONNA⁴ e Maria Ana BAPTISTA^{2,3,4}

¹ FCUL - DEGGE, Universidade de Lisboa

² IDL - Instituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa

³ ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

⁴ IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera

(andretrindade@gmail.com; omirarachid10@yahoo.fr; martinwronna@gmail.com; mavbaptista@gmail.com)

Palavras-chave: Tsunami, Vulnerabilidade, Curvas de fragilidade, SIG, Sines.

Resumo: O resultado devastador do impacto do recentes grandes tsunamis da última década (Oceano Índico em 2004, Chile em 2010 e Leste do Japão em 2011) conduziram ao aumento da disponibilidade de dados referentes ao comportamento e resposta dos edifícios afectados. A análise do dano observado nos edifícios de diferentes tipologias possibilitou a adopção de novos modelos de vulnerabilidade empírica. O presente trabalho pretende avaliar a vulnerabilidade ao impacto de tsunami das estruturas do Porto de Sines adaptando curvas de fragilidade que representam a probabilidade de dano esperado em função da inundação e da classificação dos edifícios. Os parâmetros de classificação das estruturas considerados foram o material de construção, o número de pisos e a localização. O modelo adoptado foi desenvolvido em ambiente SIG com recurso a uma *toolbox* para ArcGIS criada especialmente para o propósito, que poderá ser utilizada em trabalhos futuros aplicados em novas áreas de estudo. Como resultados deste trabalho, obtiveram-se mapas de vulnerabilidade das estruturas para diferentes probabilidades de ocorrência de dano, considerando ou excluindo o efeito do número de pisos no controlo da vulnerabilidade.



1. Introdução

O território de Portugal continental revela uma elevada susceptibilidade à ocorrência de sismos e tsunamis, tanto pela sua localização junto ao cruzamento de uma margem continental de orientação norte-sul, relacionada com a abertura do Atlântico Norte, como pela sua proximidade e posição relativamente à Zona de Fractura Açores-Gibraltar, (limite entre as placas litosféricas Euroasiática e Africana). Esta região foi designada por AT2- "Atlantic" no catálogo *Genesis and Impact of Tsunamis on the European Coasts* (GITEC), (Baptista, 1998). Nesta região definiram-se zonas de geração de grandes sismos e tsunamis que afectam a faixa costeira portuguesa. A secção central da Zona de Fractura dos Açores-Gibraltar (ZFAG) é constituída pela zona de fractura Falha da Glória e o Banco de Goringe é a região leste da ZGAF situado entre a planície Abissal do Tejo a Norte e a planície Abissal de Ferradura a Sul. Segundo registos históricos, podem-se identificar 17 tsunamis ocorridos em território nacional maioritariamente de origem sísmica. Existem referências a um tsunami em 60 a.C., outro no ano de 382 d.C., destacando-se o de 1 de Novembro de 1755 considerado o maior desastre natural ocorrido em Portugal, terminando com os de 28 de Fevereiro de 1969 e de 26 de Maio de 1975 (este com amplitude máxima nos Açores), (Baptista e Omira, 2014).

O problema da localização de Portugal na proximidade de fontes tsunamigénicas que gera susceptibilidade a tsunamis, é agravado pela forte urbanização da faixa costeira do país (Trindade et al., 2014) consequentemente tornando-nos mais vulneráveis. A vulnerabilidade a tsunami exprime a capacidade que determinado elemento tem para resistir ou ser afectado pelo evento geofísico. Esta capacidade depende de uma vasta variedade de atributos, incluindo características arquitectónicas, materiais de construção, o tipo de fundações, entre muitos outros. Estes atributos podem coexistir em inúmeras combinações possíveis, tornando a análise da vulnerabilidade edifício-a-edifício um desafio experimental complexo (Tarbotton e Dall'Osso et al., 2014).

O tema da avaliação da vulnerabilidade estrutural de edifícios associada a tsunamis tem vindo a ser abordado por diversos estudos, com visões e metodologias distintas. Os primeiros modelos eram condicionados pela disponibilidade de dados (nomeadamente levantamentos pós-evento), quantitativamente limitados e tendiam a abordagens altamente qualitativas. Isto levou ao desenvolvimento de modelos de vulnerabilidade baseados em índices como o PTVA - *Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment* (Papathoma and Dominey-Howes, 2003; Dall'Osso et al., 2010; Tarbotton et al., 2012) ou o BTV - *Building Tsunami Vulnerability* (Omira et al., 2009). Estes modelos qualitativos estimam uma ponderação de vulnerabilidade relativa atribuindo diferentes pesos aos factores envolvidos (características dos edifícios, da inundação ou da topografia). Estas ponderações não têm significado por si só, servindo apenas como termo de comparação entre as estruturas sujeitas a análise.

Após os últimos grandes tsunamis (Oceano Índico em 2004, Sul de Java em 2006, Chile em 2010 e Leste do Japão em 2011) e com os recentes avanços científicos e tecnológicos (detecção remota, modelação numérica da inundação, bóias DART e redes de marégrafos, entre outros) a quantidade de dados de levantamentos pós-tsunami aumentou sem precedente em escala e detalhe. Como resultado do aparecimento desta quantidade de dados acerca do dano observado, pela primeira vez, passa a ser possível criar modelos de vulnerabilidade baseados na estatística, mais conhecidos por funções de vulnerabilidade empírica. Cerca de 20 estudos que utilizam funções de vulnerabilidade já foram publicados desde 2004, entre estes: Dias et al., (2009), Koshimura et al., (2009), Suppasri et al., (2011) e Valencia et al., (2011) com dados recolhidos do tsunami do Oceano Índico; Mas et al., (2012) com dados do tsunami do Chile; Suppasri et al., (2013) e Charvet et al., (2014) com dados do tsunami do Japão. Estes estudos produziram funções de vulnerabilidade para uma vasta gama de tipologias de edifícios e para estados de dano.

Com este trabalho pretende-se testar a aplicabilidade de um conjunto de funções de vulnerabilidade, partindo da relação inundação-edifício, para pelo processo inverso (sem observação do dano provocado), se poder estimar a probabilidade de um edifício vir a sofrer determinado nível de dano.

2. Área de estudo e inundação por tsunami

Sines está localizada na costa oeste de Portugal continental a cerca de 150km a sul de Lisboa. A cidade de Sines é o principal centro urbano do município. Dispõe de uma linha de costa de aproximadamente 7km e o seu município cobre uma área de 202,7km². Tem 14280 habitantes e uma população flutuante de cerca de 5000 devido às suas actividades económicas nomeadamente o turismo (INE, 2011). O Porto de Sines e toda a área industrial circundante (o maior porto de águas profundas da Europa Ocidental, uma central termoelétrica da EDP, dois parques eólicos e refinaria da GALP, o complexo industrial petroquímico da Repsol) desempenham um papel importante em termos de produção e distribuição de energia, sendo um dos principais pólos de interesse

estratégico para a economia do país. Devido à sua abertura e exposição ao mar o impacto de um tsunami trariam graves consequências para as infra-estruturas e população expostas.

Previamente a esta fase do projecto foram desenvolvidas simulações hidrodinâmicas para cálculo de grelhas de máxima altura de onda baseadas em cenários (SBTHA - *Scenario-Based Tsunami Hazard Assessment*) com resolução de 10m. As grelhas foram desenvolvidas tendo como base um MDT (Modelo digital de terreno) gerado a partir de informação batimétrica e altimétrica: Dados LIDAR de 2 m de resolução horizontal (Direção-Geral do Território 2013); Modelo batimétrico de 100 m de resolução horizontal (Instituto Hidrográfico de Portugal 2012); cartas náuticas de 1: 12.500 escala (Instituto Hidrográfico de Portugal 2010), e os dados adicionalmente recolhidos em campo usando GPS-RTK. Estas simulações basearam-se em 18 cenários diferentes de inundação por tsunami. Estes cenários de inundação estão associados a falhas tipo (FT) de diferentes zonas fonte tsunamigénicas, a cenários de máximo sismo credível e tendo em consideração a influência das marés no tsunami. Como FT foram consideradas a falha do Banco de Goringe (GBF), a falha de Marquês de Pombal (MPF), a falha de Ferradura (HSF), a falha do Golfo de Cádiz (CWF) e um cenário adicional compósito da HSF com a MPF.

Neste ponto do trabalho a metodologia foi apenas aplicada num cenário agregado que consiste na combinação dos resultados obtidos para os cenários individuais (valores máximos de cada pixel) num único cenário (Figura 1). Os resultados da SBTHA para o cenário agregado estão resumidos no Quadro 1.

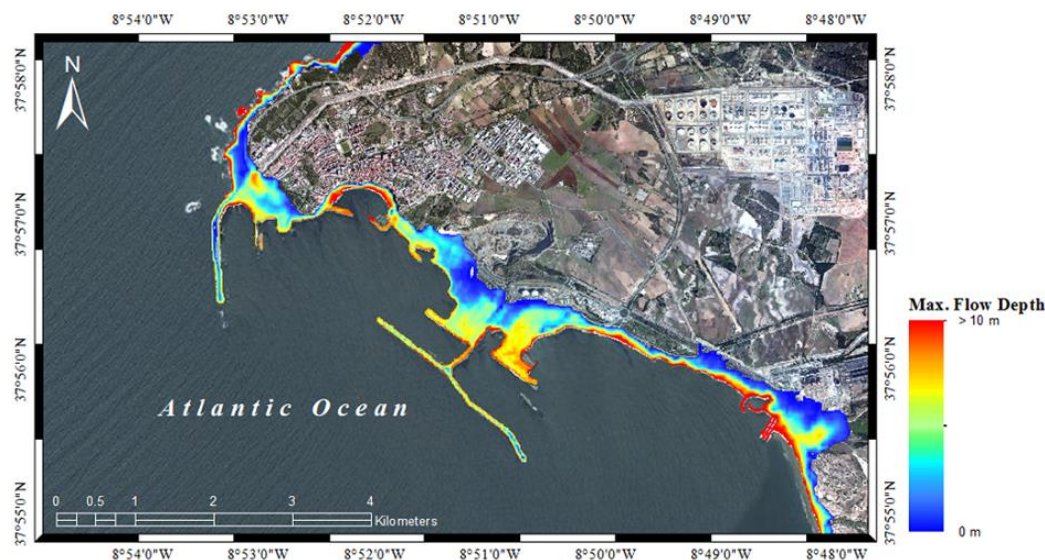


Figura 1 – Cenário agregado de Inundação por tsunami na área de estudo de Sines

Quadro 1 – Resumo dos resultados da SBTHA para a área de estudo de Sines considerando o cenário agregado

Aggregate Scenario	
Maximum Wave Height	23,55 m
Maximum Flow Depth	22,65 m
Maximum Run-up	27,6 m
Flooded area	4,12 km ²
Max. Drawdown area	4,63 km ²

3. Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto ASTARTE (*Assessment, STrategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe*) financiado pelo sétimo programa para a investigação da União Europeia ao abrigo do acordo de subvenção nº603839. Para cumprir os objectivos da tarefa deste projecto relativa à vulnerabilidade o trabalho desenvolveu-se segundo as seguintes fases:



- Levantamento de campo dos edifícios localizados na área de inundação na área de estudo de Sines. Classificação do tipo de edifícios segundo os critérios material de construção e número de pisos;
- Adopção de uma escala de dano de seis níveis proposta em Suppasri et al., (2013) representada no Quadro 2;
- Adaptação das curvas de fragilidade das tipologias dos edifícios derivadas do levantamento pós-tsunami 2011 do Japão ao *test-site* de Sines;
- Desenvolvimento de uma ferramenta SIG que combina dados campo, resultados do *hazard* (grelhas de inundação), e curvas de fragilidade de forma a estimar automaticamente a classe de dano esperado.

Quadro 2 – Escala de níveis de dano, classificação e descrição correspondentes aos efeitos do tsunami de Tohoku-oki de 2011 provocados nos edifícios. Adaptado de Suppasri et al., (2013).

Damage Level	Classification	Description
D1	Minor Damage	No significant structural or non-structural damage, possible to be used immediately after minor floor and wall clean up
D2	Moderate Damage	Slight damages to non-structural components, possible to be used after moderate repair
D3	Major Damage	Heavy damages to some walls but no damages in columns, possible to be used after major repairs
D4	Complete Damage	Heavy damages to several walls and some columns, possible to be used after complete repair and retrofitting
D5	Collapse	Destructive damages to walls and several columns, loss of functionality
D6	Washed away	Total overturned, Non-repairable

3.1 Levantamento de campo

Após terem sido identificadas e delimitadas as áreas costeiras de Sines susceptíveis a serem inundadas através das simulações numéricas, realizou-se o trabalho de campo de inventariação dos edifícios segundo tipologias. Foram identificados 153 edifícios dentro das áreas inundáveis e classificados consoante o material de construção e a elevação entre outros. Esta informação foi adicionada à *shapefile* do edificado fornecida pela Administração do Porto de Sines. Foram levantados quatro tipos quanto ao material de construção, aço, betão, alvenaria, madeira ou estrutura metálica, com alturas compreendidas entre os 3 e os 25 metros. Entre os 153 edifícios identificados, o material de construção dominante é a de alvenaria com mais de 100 estruturas existentes na área inundável. No quadro 3, são resumidos os resultados do levantamento, com destaque para o número dos edifícios, o respectivo material de construção e a variação das cotas.

3.2 Curvas de fragilidade

Por não existirem observações do dano provocado por tsunamis nas construções típicas de Sines, tornou-se obrigatório recorrer a curvas de fragilidade publicadas em Suppasri et al. (2013) e adapta-las às tipologias construtivas da área de estudo. Escolheu-se este conjunto de curvas de fragilidade por se referirem à informação mais recentemente compilada a partir do inventário realizado pelo ministério do interior do Japão após o tsunami de Tohoku de Março de 2011. Outra razão desta escolha foi a consistência da informação (levantamento de um total de 251 301 edifícios) que especifica detalhadamente o nível de dano observado, o material de construção (betão, aço, alvenaria e madeira ou outra estrutura de leves) e o número de pisos por edifício. As curvas de fragilidade para tsunami foram reconstruídas usando os parâmetros estatísticos derivados da função de fragilidade (P probabilidade cumulativa de ocorrência de danos) de Koshimura et al. (2009) dada pela Eq. (1):

$$P(x) = \Phi \left[\frac{\ln x - \mu'}{\sigma'} \right] \quad (1)$$

onde Φ representa a função de distribuição normal padronizada, x representa altura da inundação (m), μ' e σ' representam a média e desvio padrão de $\ln x$, respectivamente.

A probabilidade de ocorrência de dano foi calculada pela distribuição normal em intervalos de 0,01m (de 0 a 20 metros) de altura de inundação utilizando os valores das médias e desvios-padrão fornecidos em Suppasri et al. (2013) para cada nível de dano. Através da representação gráfica da distribuição normal da probabilidade acumulada para cada par material de construção-número de pisos, foi possível identificar os valores de altura de inundação que circunscreveriam os intervalos de cada nível de dano. Esses limites foram a chave da nossa classificação de probabilidade de dano dos edifícios.

A Figura 2 ilustra um exemplo das curvas de fragilidade calculadas, neste caso para os edifícios de alvenaria. As curvas na figura 2 apresentam a probabilidade de ocorrência dos níveis de danos em função da altura da inundação para uma dada estrutura costeira. No Quadro 3 são apresentados os valores de limite de altura de inundação extraídos a partir das curvas de fragilidade de cada nível de dano para 20%, 50% e 80% de probabilidade de dano. Estes valores integrarão a classificação modelada no SIG.

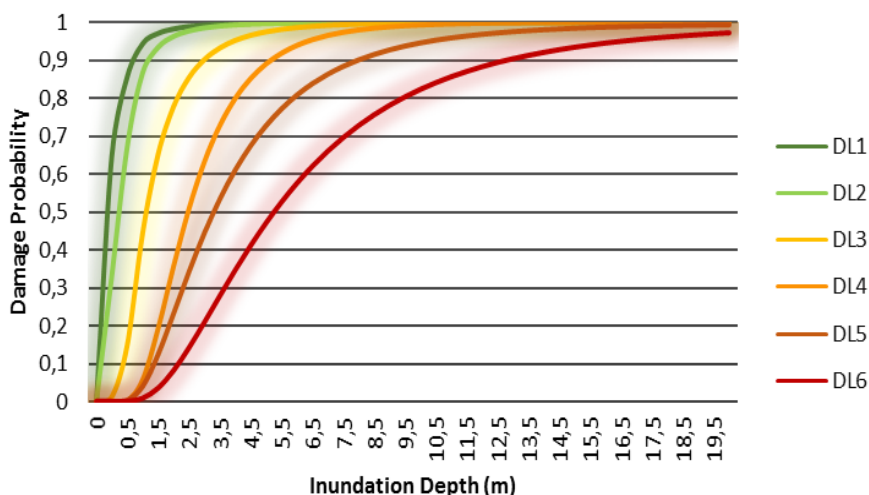


Figura 2 – Curvas de fragilidade para tsunamis geradas para edifícios de alvenaria por nível de dano (DL), (xx – altura de inundação, yy - probabilidade de nível de dano)

Quadro 3 – Limites de Altura de Inundação (m) por nível de dano para edifícios de alvenaria de 1, 2 e 3 ou mais pisos.
B_{ref} – Alvenaria (brick) referência sem discriminação do número de pisos; B₁ - Alvenaria com um piso; B₂ – Alvenaria com dois pisos; B₃ – Alvenaria com três ou mais pisos

Nível de dano	Probabilidade de dano a 20%				Probabilidade de dano a 50%				Probabilidade de dano a 80%			
	B _{ref}	B ₁	B ₂	B ₃	B _{ref}	B ₁	B ₂	B ₃	B _{ref}	B ₁	B ₂	B ₃
DL 1	0,039	0,05	0,035	0,02	0,121	0,159	0,109	0,074	0,372	0,485	0,359	0,324
DL 2	0,131	0,143	0,138	0,12	0,314	0,353	0,33	0,314	0,754	0,873	0,784	0,875
DL 3	0,582	0,589	0,608	0,619	1,112	1,163	1,182	1,203	2,124	2,299	2,288	2,32
DL 4	1,523	1,449	1,644	1,795	2,470	2,456	2,597	2,809	4,006	4,075	4,072	4,568
DL 5	1,855	1,824	2,206	2,931	3,293	3,192	3,615	4,846	5,847	5,276	5,738	8,75
DL 6	2,934	2,718	3,443	4,972	5,250	4,938	5,485	7,146	9,394	8,166	8,562	10,85

3.3 Ferramenta SIG de classificação de nível de dano de edifícios em caso de tsunami

Os mapas de vulnerabilidade em caso de tsunami foram criados com recurso à última versão do *software* da ESRI (ArcGIS 10.2). A ferramenta de classificação do nível de dano dos edifícios foi desenvolvida de raiz com o intuito de facilitar o processo cartográfico tratando e integrando os dados de entrada (grelhas de inundação, edifícios vectorizados e valores de limites das classes de dano) de forma simples e automática. Isto foi conseguido através da utilização da plataforma ModelBuilder. A ferramenta foi construída a partir de um modelo em três níveis ou camadas (modelo dentro de modelo). Num primeiro nível do modelo (Figura 3B) encontra-se o fluxo principal do processo composto por outros dois submodelos (preparação dos dados de entrada e classificação do nível de dano), pelos dados de base de entrada e pelos mapas resultantes à saída.

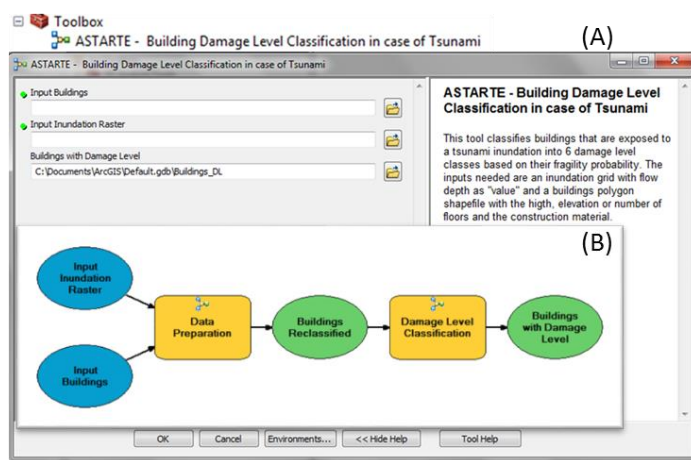


Figura 3 – (A) ASTARTE BDLC *tool process dialog box*. (B) Diagrama do modelo principal da ferramenta

O submodelo “Preparação dos Dados” serve para pré-processamento dos dados brutos de entrada vectoriais (*shapefile* de edifícios) e matriciais (grelhas de inundação), procedendo à georreferenciação, vectorização, junção e reclassificação, para que à saída disponham dos valores e atributos necessários à classificação. O submodelo “Classificação do nível de dano” é constituído internamente por quatro modelos de terceiro nível que correspondem a cada tipo de material de construção. É dentro de cada modelo de terceiro nível que é adicionado um novo campo ou atributo de nível de dano (DL) a cada edifício. Para se calcular o “DL” são efectuadas selecções por tipo de edifício (Material e número de pisos agregados) e executadas expressões condicionais “If / Else” em linguagem Python. As expressões condicionais dependem dos limites de altura de inundação de cada nível de dano, e, para além disso, da localização do edifício na área inundada (máximo de Inundation Depth dos pixels da grelha a 10m do centróide do edifício).

4. Resultados

As figuras 4 A e B retratam a vulnerabilidade a tsunamis das estruturas da área de estudo de Sines. A vulnerabilidade a tsunamis é expressa pelo nível de dano que se espera que ocorra a uma probabilidade de 50%. Os resultados demonstram claramente que as estruturas localizadas mais junto à costa são extremamente vulneráveis ao impacto de um pior cenário de inundação com níveis de dano entre D2 e D6. Esta vulnerabilidade decresce com a distância à linha de costa onde a altura da onda não é tão significativa. Para além disso o nível de dano estimado varia significativamente com a probabilidade de ocorrência (aos 80% de probabilidade reduz um ou dois níveis relativamente aos 50%). Para além do material de construção a altura da estrutura desempenha um papel importante no controlo da vulnerabilidade a tsunamis. A figura 5 ilustra, para a mesma estrutura, a probabilidade de dano para os diversos níveis de dano considerados, com e sem número de pisos. Os resultados (curvas azul e verde) mostram claramente que o número de pisos altera significativamente a vulnerabilidade dos edifícios, em particular a sua probabilidade de sofrer grandes danos ou de colapsarem (nível D4, D5, D6). As duas classes de número de pisos dos extremos, na maioria dos edifícios conduzem à redução (no caso de 3 ou mais pisos) e ao aumento (no caso de 1 piso) de um DL (para prob.50%).

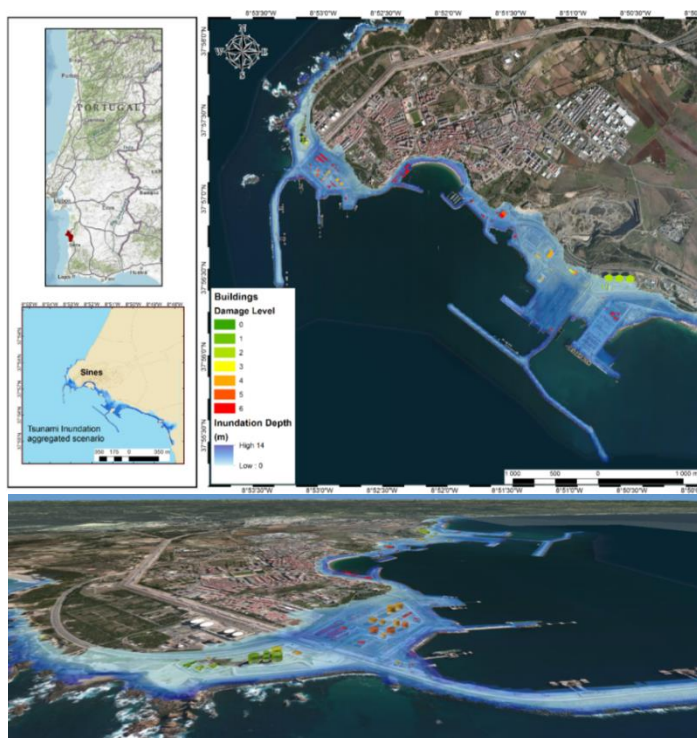


Figura 4 – (A) Mapa de vulnerabilidade a tsunamis de Sines com 50% de probabilidade de ocorrência, (B) Vista 3D do mapa de vulnerabilidade

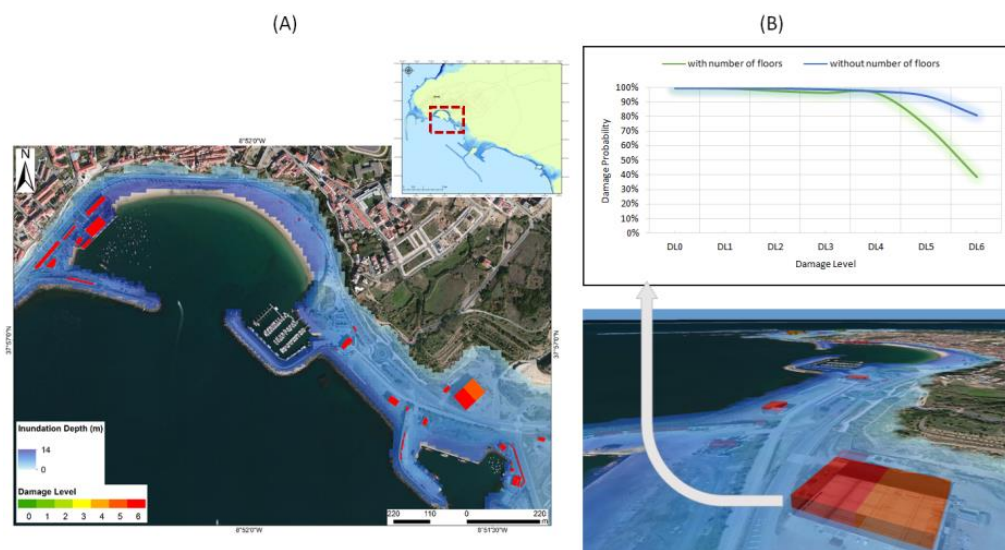


Figura 5 – (A) zoom do Mapa de vulnerabilidade a tsunamis de Sines com 50% de probabilidade de ocorrência, (B) Efeito do número de pisos na vulnerabilidade de um edifício.

5. Conclusões

A análise da vulnerabilidade à escala do edifício requer a introdução de mais parâmetros físicos. Contudo, a utilização de curvas de fragilidade baseadas num grande conjunto de dados (mais de 250 000 edifícios inventariados) foi crucial para se identificar o papel



do material de construção, número de pisos e altura da inundação na estimação do nível de dano. Em trabalhos futuros esta metodologia deve ser comparada e validada por uma abordagem mais qualitativa que inclua um maior número de parâmetros como por exemplo barreiras (naturais ou artificiais), a orientação e forma das estruturas, velocidade e direcção do escoamento, função do edifício e ocupação do piso térreo entre outros. A ferramenta SIG desenvolvida para obter a classificação dos edifícios quanto ao dano pode facilmente ser actualizada e adaptada a novos cenários de inundação e a diferentes áreas de estudo.

A classificação da vulnerabilidade testada para o cenário de inundação que agrega os máximos extremos (de altura de inundação), traduz-se no pior nível de dano a que um edifício pode estar sujeito em caso de tsunami e não corresponde a um cenário que possa de facto ocorrer. Portanto, os resultados obtidos servirão principalmente para as fases do projecto que se seguem, particularmente para a análise de risco e para a elaboração do plano de evacuação.

Agradecimentos Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto ASTARTE - Assessment, STRategy And Risk Reduction for Tsunamis in Europe (Grant Agreement no: 603839), financiado pela Fundação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FFCUL).

Referências Bibliográficas

- Baptista, M.A. (1998). Génese, propagação e impacto de tsunamis na costa portuguesa, Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.
- Baptista, M.A.; Omira, R. (2014). Avaliação de Risco de Tsunami no Concelho de Cascais, IDL, Lisboa.
- Charvet, I.; Suppasri, A.; Imamura, F.; (2014). Empirical fragility analysis of building damage caused by the 2011 Great East Japan tsunami in Ishinomaki city using ordinal regression, and influence of key geographical features. *Stoch. Env. Res. Risk A.* 15.
- Dall'Osso, F.; Maramai, A.; Graziani, L.; Brizuela, B.; Cavalletti, A.; Gonella, M.; Tinti, S. (2010). Applying and validating the PTVA-3 Model at the Aeolian Islands, Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 1547-1562.
- Dias, W.; Yapa, H.; Peiris, L.; (2009). Tsunami vulnerability functions from field surveys and Monte Carlo simulation. *Civ. Eng. Environ. Syst.* 26, 181-194.
- Koshimura, S.; Oie, T.; Yanagisawa, H.; Imamura, F. (2009). Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering Journal*, 51, 243-273.
- Mas, E.; Koshimura, S.; Suppasri, A.; Matsuoka, M.; Matsuyama, M.; Yoshii, T.; Jimenez, C.; Yamazaki, F.; Imamura, F. (2012). Developing tsunami fragility curves using remote sensing and survey data of the 2010 Chilean Tsunami in Dichato. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 2689-2697.
- Omira, R.; Baptista, M.; Miranda, J.; Toto, E.; Catita, C.; Catalão, O. J. (2009). Tsunami vulnerability assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools. *Nat. Hazards* 1- 21.
- Papathoma, M.; Dominey-Howes, D. (2003). Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Greece. *Nat. Hazards Earth Syst Sci.* 3, 733-747.
- Suppasri, A.; Koshimura, S.; Imamura, F. (2011). Developing tsunami fragility curves based on the satellite remote sensing and the numerical modeling of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nat. Hazards Earth Syst Sci* 11, 173-189.
- Suppasri, A.; Mas, E.; Charvet, I.; Gunasekera, R.; Imai, K.; Fukutani, Y.; Imamura, F. (2013). Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. *Natural Hazards*, 66(2), 319-341.
- Tarbotton, C.; Dominey-Howes, D.; Goff, J.; Papathoma-Kohle, M.; Dall'Osso, F.; Turner, I. (2012). GIS-based techniques for assessing the vulnerability of buildings to tsunami current approaches and future steps. *Geological Society Special Publication* No 361pp. 115-125.
- Tarbotton, C.; Dall'Osso, F.; Dominey-Howes, D.; Goff, J. (2014). The use of empirical vulnerability functions to assess the response of buildings to tsunami impact: Comparative review and summary of best practice, *Elsevier* 142, 120-134.
- Trindade, A.; Catita, C.; Omira, R.; Baptista, M.A.; Costa P.T. (2014). Risco de tsunami em Lagos – Rotas de evacuação, 8ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica, Évora.
- Valencia, N.; Gardi, A.; Gauraz, A.; Leone, F.; Guillande, R. (2011). New tsunami damage functions developed in the framework of SCHEMA project: application to European Mediterranean coasts. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11.