



MATEMÁTICA APLICADA À GESTÃO DE RISCO COSTEIRO

A gestão de risco costeiro é uma ferramenta fundamental no âmbito das políticas de desenvolvimento sustentável. No entanto, para os perigos naturais extremos, como os tsunamis, há uma escassez de dados reais devido ao seu carácter infrequente. A matemática assume um papel essencial na geração de dados sintéticos complementares, que contribuem para entender a física dos fenómenos e para desenvolver estratégias de mitigação de risco. No âmbito da expansão do *hub* de carga contentorizada do porto de águas profundas de Sines, e em resposta à Administração dos Portos de Sines e do Algarve (APS), foi desenvolvida, validada e aplicada uma metodologia numérica que prevê:

Como garantir que o porto permanece em serviço na eventualidade de um evento tipo sismo e tsunami de 1755?

1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

O porto de águas profundas de Sines deve ter um desempenho estrutural que permita, mesmo que em condições extremas, receber e acolher ajuda de outras regiões (aspectos sociais) e manter o fluxo de trocas comerciais potenciando a recuperação económica (aspectos económicos).

Eventos passados, como o sismo e tsunami de 1755, mostram que Sines se encontra numa região que pode ser afetada por perigos naturais de origem tectónica. Embora Portugal se encontre numa região com atividade tectónica caracteristicamente moderada, existem documentos históricos e dados mais recentes, já registados na rede acelerográfica nacional, como o sismo e tsunami de 1969, que mostram a possibilidade de ocorrência de sismos de elevada magnitude, com origem no mar e próximo da costa, que podem originar tsunamis.

Sabe-se que a geração destes sismos de elevada magnitude está associada a um complexo sistema de estruturas

geológicas a sudoeste da Península Ibérica e no golfo de Cádiz. Sabe-se também que a rutura destas falhas localizadas no mar e relativamente perto da costa gera sismos e tsunamis que afetam principalmente as costas portuguesa, espanhola e marroquina. Uma das formas mais eficazes de mitigação de risco tsunamigénico é baseada no dimensionamento e na construção de estruturas com capacidade para resistir aos efeitos em cascata devidos aos movimentos intensos do solo provocados pelo sismo e aos efeitos hidráulicos induzidos pelo tsunami.

No entanto, o regulamento europeu para dimensionamento de estruturas, Eurocódigo [3], não prevê a ação do tsunami nem fornece recomendações explícitas para o dimensionamento de estruturas críticas, como os portos. Os critérios de desempenho estrutural incluem princípios de segurança e limite de danos, mas a tendência global de regulamentação de estruturas críticas já inclui critérios mais exigentes de ocupação imediata ou mesmo de ope-

CLÁUDIA REIS,
School of Civil
and Construction
Engineering, Oregon
State University;
Instituto Superior
Técnico, Universidade
de Lisboa
claudia.reis@tecnico.ulisboa.pt

STÉPHANE CLAIN,
Centre for
Mathematics,
University of Coimbra
clain@mat.uc.pt

ANDRÉ R. BARBOSA,
School of Civil
and Construction
Engineering, Oregon
State University
andre.barbosa@oregonstate.edu

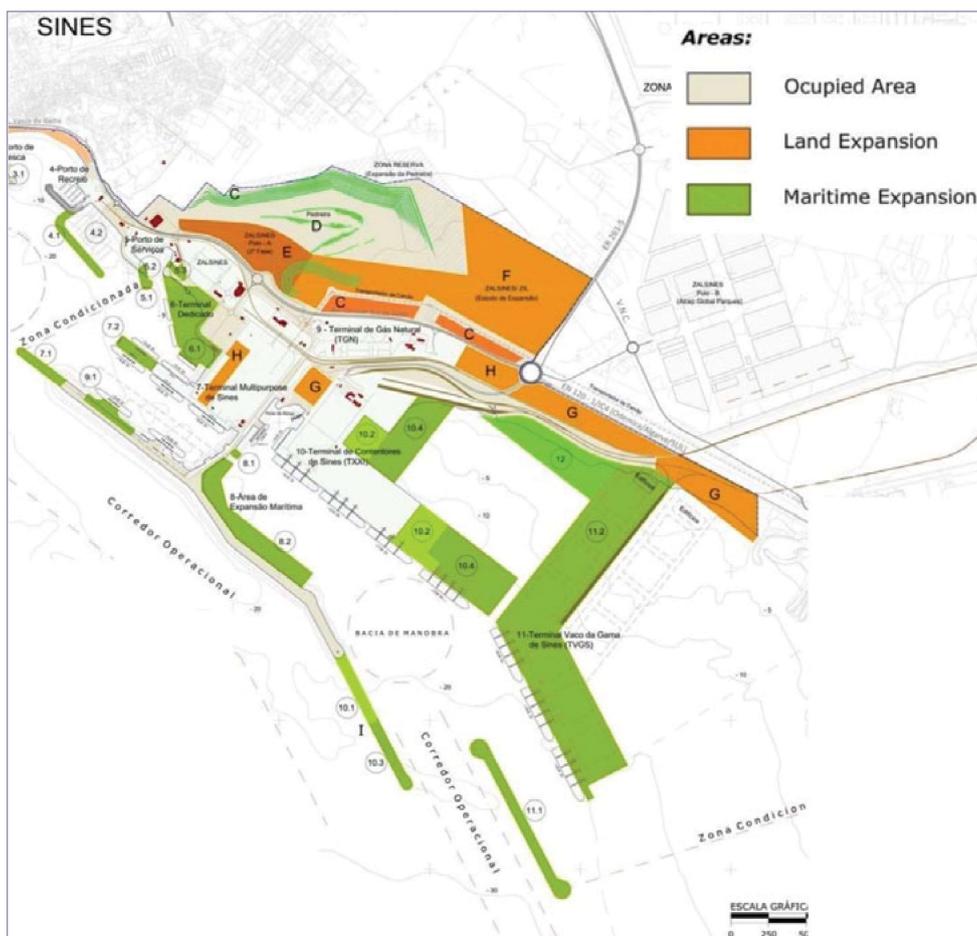


Figura 1. O plano estratégico para aumentar o volume de carga contentorizada movimentada no Porto de Sines prevê: 1) a expansão do terminal de contentores existente, o Terminal XXI, e 2) a construção de um novo terminal de contentores, o Terminal Vasco da Gama.

racionalidade. A comissão COM2: Analysis and Design da International Federation of Structural Concrete, FIB, conta com um grupo de trabalho, TG2.13 – Design and assessment for tsunami loading, atualmente a desenvolver investigação no âmbito da engenharia de tsunamis [4]. O objetivo deste grupo é criar conhecimento para introduzir critérios e recomendações de dimensionamento no Eurocódigo que prevejam a resiliência estrutural à ação do tsunami. Por enquanto, a engenharia de tsunamis com aplicabilidade em portos está prevista apenas no regulamento japonês [14] e no regulamento geral da *World Association for Waterborne Transport Infrastructure*, PIANC [5], que se encontra também em fase de revisão [6].

No âmbito da expansão do *hub* de carga contentorizada do porto de águas profundas de Sines, foi desenvolvida uma metodologia numérica para caracterizar a perigosidade tsunamigénica e o respetivo comportamento de resposta do sistema geoestrutural que compõe o terminal de contentores, incluindo configurações correntes e futuras, i.e., após expansão do Terminal XXI e após construção

do novo Terminal Vasco da Gama.

O porto de Sines, com a sua atual capacidade de 1.8 milhões de TEU movimentados (unidade equivalente a vinte pés, Twenty Equivalent Feet, que representa as dimensões padrão de contentor e constitui a unidade de medida da carga contentorizada), consolidou a sua posição como líder nacional em volume de carga e detém a 14.^a posição na lista dos maiores portos de contentores da União Europeia, de acordo com a *PortEconomics*. Após as primeiras obras de expansão do Terminal XXI, a APS prevê a possibilidade de operar mais navios em simultâneo, duplicando a capacidade de movimentação anual para 4.1 milhões de TEU. Após a construção do Terminal Vasco da Gama, a APS espera conseguir atingir mais 3.5 milhões de TEU adicionais. Com o volume total de carga contentorizada em cerca de 7.6 milhões de TEU, o porto de Sines garantirá o posicionamento entre os quatro portos europeus com maior movimentação de carga contentorizada [13]. A figura 1 mostra a expansão prevista para o *hub* de carga contentorizada do porto de Sines.

2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo do trabalho é identificar, caracterizar e fornecer informação para tomadas de decisão informadas no que diz respeito a medidas estruturais que aumentem a resiliência dos terminais de contentores perante eventos tsunamigênicos extremos. Estas estratégias de caráter preventivo perante um sismo e tsunami, como o passado evento de 1755, incluem reforço de estruturas existentes e considerações de projeto para as novas infraestruturas.

A metodologia adotada para garantir critérios de desempenho estruturais que evitem a interrupção das atividades do porto é baseada numa aproximação numérica que

visa reproduzir a física associada ao fenómeno natural e à respetiva resposta da estrutura. Em tese, esta aproximação tira partido das similaridades entre as fases de geração, propagação e chegada/ interação das ondas sísmicas e de tsunami com as infraestruturas costeiras (neste caso, o *hub* de carga contentorizada). Como cada fase, do maior para o menor domínio, aceita esquemas numéricos de crescentes sofisticação e exigência computacional, o acoplamento através de condições de fronteira do tipo Dirichlet entre domínios permite manter a qualidade das soluções numéricas e controlar os custos computacionais. A figura 2 mostra o esquema geral da metodologia numérica. Por

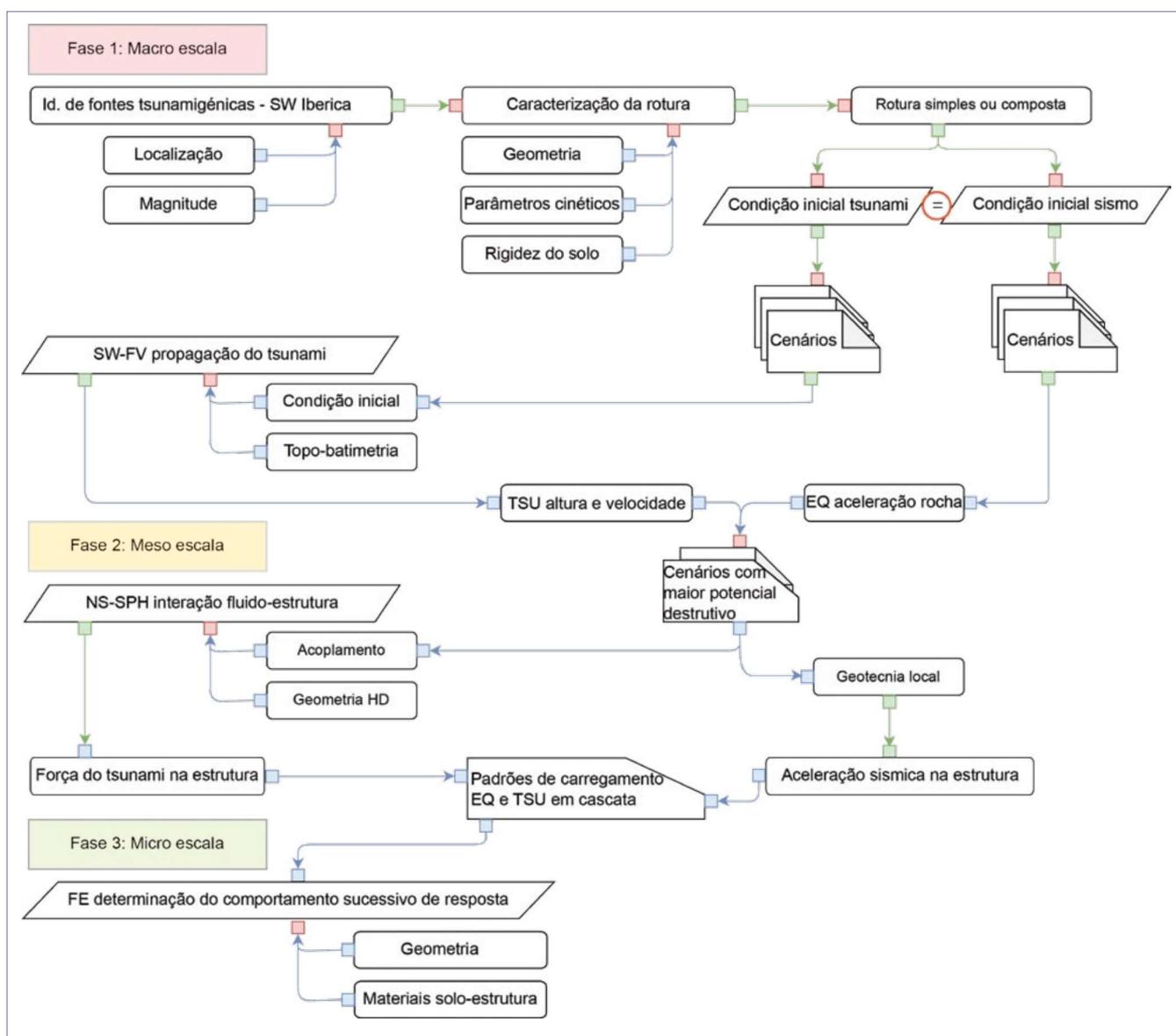


Figura 2. Infografia da metodologia numérica desenvolvida para determinar multi-perigosidade tsunamigênica, respetivos padrões de carregamento em cascata e sucessiva resposta estrutural.

uma questão de síntese, a descrição dos vários esquemas numéricos é remetida para a respetiva literatura.

A primeira fase de geração e propagação das ondas engloba um domínio com escalas espaciais e temporais de centenas de quilómetros e até várias horas, respetivamente. A macroescala é baseada em:

- ▶ Aproximações estocásticas baseadas em *Ground Motion Prediction Equations*, GMPE, que englobam parâmetros da fonte sísmica, atenuação na propagação das ondas e possíveis efeitos de sítio devidos a características geotécnicas dos solos acima do substrato rochoso, com potencial para amplificar as acelerações impostas à infraestrutura [9, 10];
- ▶ Sistema de equações não lineares *Shallow-Water* discretizado pelo método dos Volumes Finitos, SW-FV, para quantificar alturas de onda e velocidades de corrente [2,11].

A simulação das ondas na chegada ao porto engloba um domínio com escalas espaciais e temporais de centenas de metros e alguns minutos, respetivamente. Na mesoescala são adotadas:

- ▶ Aproximações estocásticas baseadas em GMPE com consideração das características geotécnicas locais do sítio de interesse, para quantificar a aceleração transmitida ao sistema solo-estrutura [9, 10];
- ▶ Acoplamento do domínio resolvido através do esquema SW-FV com o domínio altamente não linear resolvido pelo esquema numérico que considera as equações Navier-Stokes discretizadas através do método de partículas *Smoothed Particle Hydrodynamics*, para caracterização da interação fluido-estrutura e quantificação da ação hidrodinâmica do tsunami [12,14].

Após a caracterização do padrão de carregamento em cascata referente às acelerações sísmicas e a força do tsunami, o comportamento do sistema solo-estrutura é simulado pelo método clássico dos elementos finitos aplicado à resolução das Leis de Movimento de Newton complementadas com os Princípios de D'Alembert e tendo em consideração as relações constitutivas não lineares que definem o comportamento dos materiais [7]. A microescala representa uma ordem de grandeza espacial correspondente à estrutura em análise (edifícios com alguns metros, estruturas de portos até alguns quilómetros ou pontes com vários quilómetros) e uma escala temporal de alguns segundos.

3. PROVA DE CONCEITO

Os vários esquemas numéricos que compõem a metodologia numérica (e as respetivas técnicas de acoplamento) foram sujeitos a um exaustivo processo de verificação e validação antes da aplicação ao caso de estudo. Este processo assenta na correlação entre as soluções numéricas e os dados analíticos e instrumentais, registados durante campanhas experimentais e eventos reais. A realização abrange os diversos modelos que reproduzem os vários fenómenos físicos, desde a génese do sismo e tsunami até à respetiva resposta da estrutura costeira. Por uma questão de síntese, as figuras 3 e 4 mostram alguns dos testes de validação representativos de macro, meso e microescalas.

4. CASO DE ESTUDO

A aplicação da metodologia numérica ao caso do porto de Sines, em particular ao terminal de contentores, foi desenvolvida para caracterizar: 1) a multiperigosidade de sismo e tsunami em cascata no porto de Sines; 2) o comportamento sucessivo do terminal de contentores do porto de Sines perante um evento extremo do tipo sismo e tsunami de 1755. A figura 5 exhibe as macro, meso e microescalas que compõem o domínio numérico.

No domínio da macroescala, foram identificadas as falhas do sistema geológico com potencial para gerarem tsunamis regionais ou locais. A caracterização de todas as possíveis fontes incluiu geometria e parâmetros cinéticos da rutura e a rigidez do solo. Cada rutura de falha (simples ou composta) representa as condições de um cenário de sismo e tsunami. As simulações de ondas de sismo e de tsunami de todos os cenários foram então realizadas para obter acelerações sísmicas de pico ao nível do substrato rochoso e quantidades hidrodinâmicas das ondas de tsunami em Sines, respetivamente.

Na mesoescala são consideradas as influências locais para refinar as soluções numéricas. Nas simulações das ondas sísmicas é incluído um termo a representar a potencial ampliação das acelerações, a depender das características dos solos locais, negligenciáveis em caso de solos muito rígidos. Nas simulações do tsunami na fase de inundação são tidas em consideração as configurações da linha de costa, com geometria corrente e após cada fase de expansão.

No total foram efetuadas 1000 simulações para prever o comportamento das ondas sísmicas para que fossem tidas em consideração as incertezas relacionadas com a fonte de geração dos eventos e com a atenuação da propagação das ondas sísmicas. Para o modelo de tsunami foi

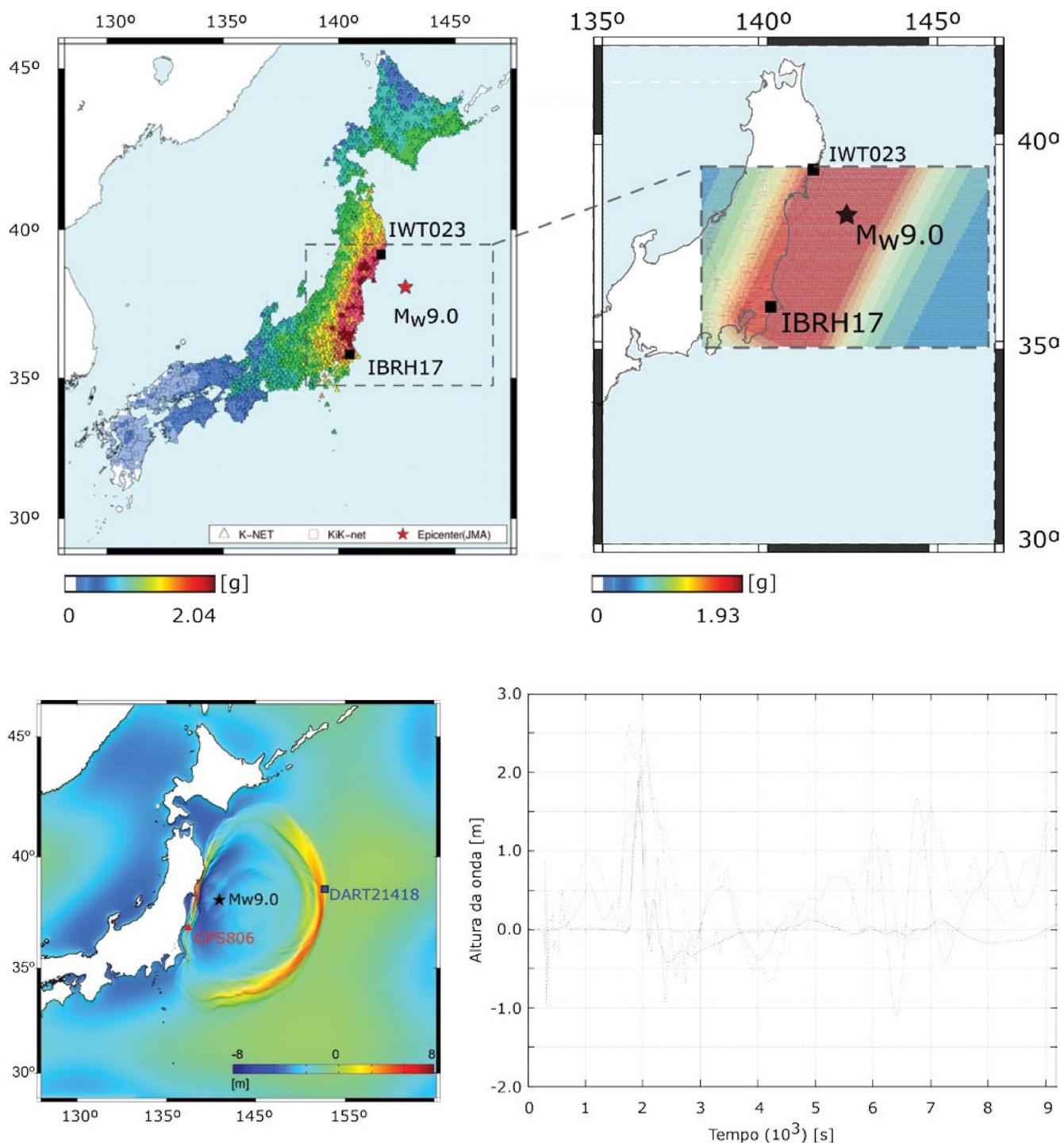


Figura 3. Validação dos modelos da macroescala com recurso a registos do sismo e tsunami do Japão, 2011, registados pelos sistemas de instrumentação que monitorizam o território japonês. Distribuição do pico de aceleração sísmica no território (em cima). Registo das ondas do tsunami (em baixo). Tempo de chegada à costa do Japão, cerca de meia hora após o sismo (à esquerda) e altura das ondas de tsunami (à direita). Linhas azuis e vermelhas representam registo em mar alto e perto da costa do Japão, respetivamente. Linhas tracejada e cheia representam registo instrumental e solução numérica, respetivamente.

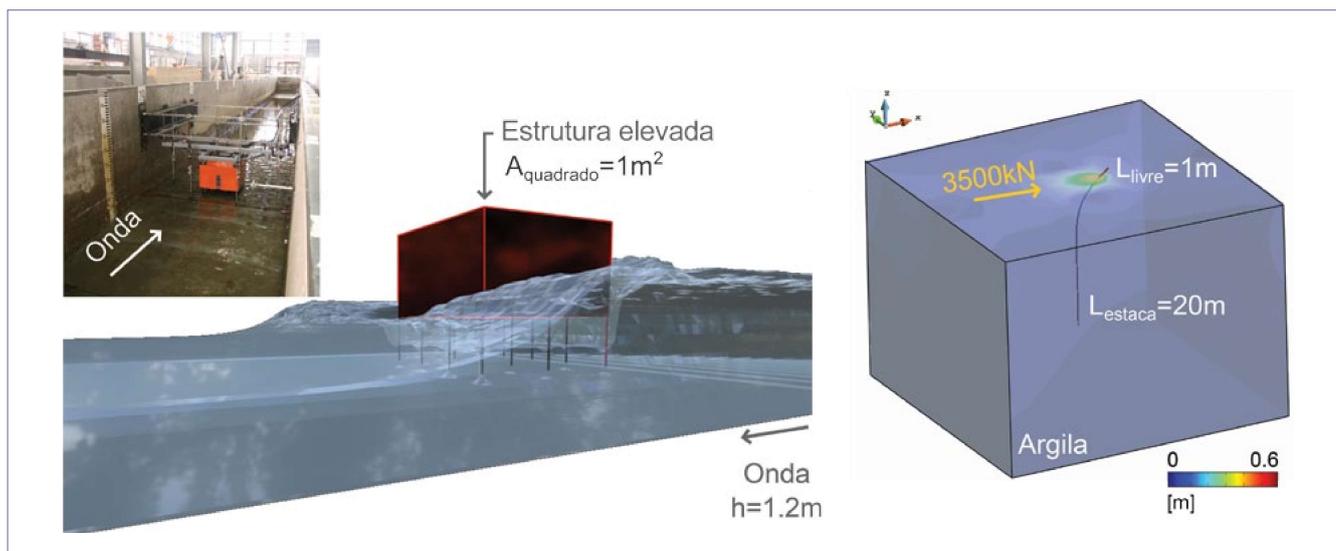


Figura 4. Validação do modelo fluido-estrutura (à esquerda) [13, 14]: comparação entre soluções numéricas obtidas pelos métodos SW-FV, NS-SPH e acoplado, e dados registados numa campanha experimental que decorreu na Oregon State University. A correlação inclui quantidades hidrodinâmicas (altura da onda e velocidade da corrente) e forças e pressões exercidas numa estrutura elevada, nas direções horizontal e vertical. Validação do modelo solo-estrutura (à direita): força lateral aplicada na extremidade livre de uma estaca de 21 m cravada em 20 m de solo argiloso.

ainda adicionada a variação das diferentes configurações da infraestrutura com o objetivo de aferir a variabilidade das forças do tsunami em função da mudança da linha de costa correspondente à configuração atual do terminal, e após as primeira e segunda fases de expansão. Para determinar as cargas de tsunami durante o período de vida útil da estrutura foram realizadas mais de 100 simulações de tsunami.

Com os modelos e várias simulações ao nível de macro e mesoescalas são obtidos os padrões de carregamento para dimensionamento da estrutura que consideram os efeitos de sismo e tsunami em cascata.

Após o estudo paramétrico, foi feita uma análise para determinar o cenário com maior potencial de infligir dano na infraestrutura. Verificou-se que o pior cenário variava de acordo com a medida de intensidade. O cenário que gerava as maiores acelerações sísmicas no sistema solo-estrutura não correspondia ao cenário que gerava as maiores forças de tsunami. O cenário que gerava as maiores ondas de tsunami também não correspondia ao cenário que gerava as ondas de tsunami com maior velocidade. Assim, ao invés de uma carga de dimensionamento em cascata, foram definidos padrões de ações de dimensionamento variando as medidas de intensidade "líder". Por exemplo, um dos padrões é deduzido do cenário que in-

duz a maior aceleração sísmica (intensidade líder) e respectivas medidas de tsunami. Estes padrões são compostos por séries temporais de acelerações sísmicas impostas às fundações da infraestrutura, e forças de tsunami aplicadas aos componentes horizontais e verticais da infraestrutura durante as fases de chegada, inundação e recuo das ondas do tsunami. A figura 6 exhibe a forma genérica de aplicação dos padrões de carregamento.

O comportamento sucessivo do sistema solo-estrutura a estes padrões de carregamento em cascata foi caracterizado via análise dinâmica não linear (figura 7). A possível resposta do sistema geoestrutural a cada padrão de carregamento é uma combinação entre três estados, de elasticidade, plasticidade e colapso. Se a aceleração de pico do sismo se mantiver abaixo do valor de cedência dos materiais, o sistema mantém a resistência original para suportar o tsunami subsequente, que pode igualmente ser insuficiente para modificar o estado de regime elástico dos materiais ou, pelo contrário, pode danificar ou mesmo levar ao colapso do sistema. Se o sismo exceder os valores de cedência, o sistema pode ficar danificado e ter a sua resistência comprometida para suportar o tsunami. Se as ações do sismo ou tsunami ou da combinação de ambos excederem os valores últimos de resistência, o terminal de contentores colapsa.

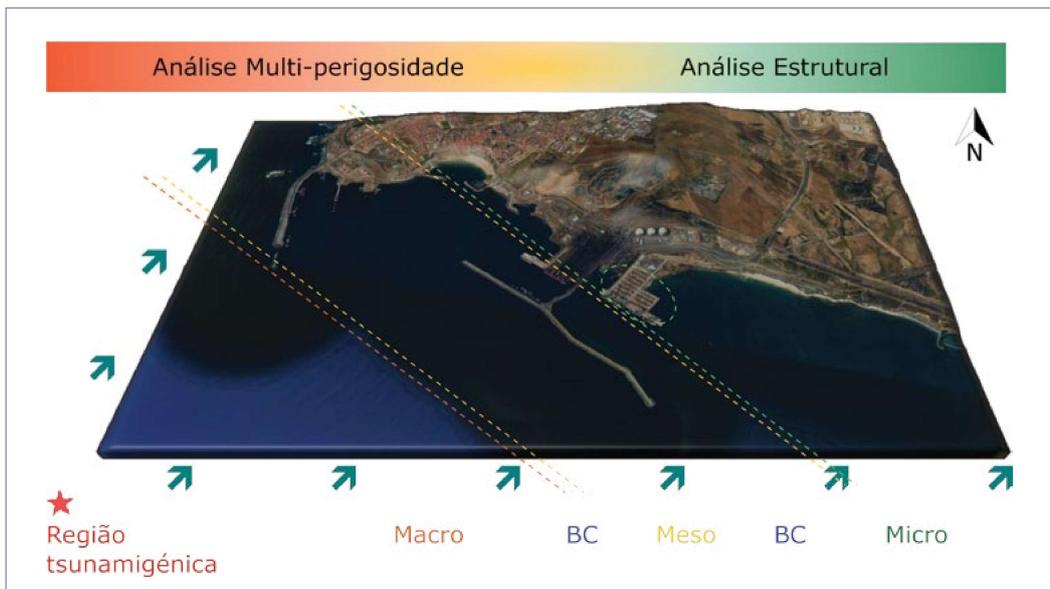


Figura 5. Infografia da metodologia numérica desenvolvida para determinar a multi-perigosidade tsunamigénica, respetivos padrões de carregamento em cascata e sucessiva resposta estrutural.

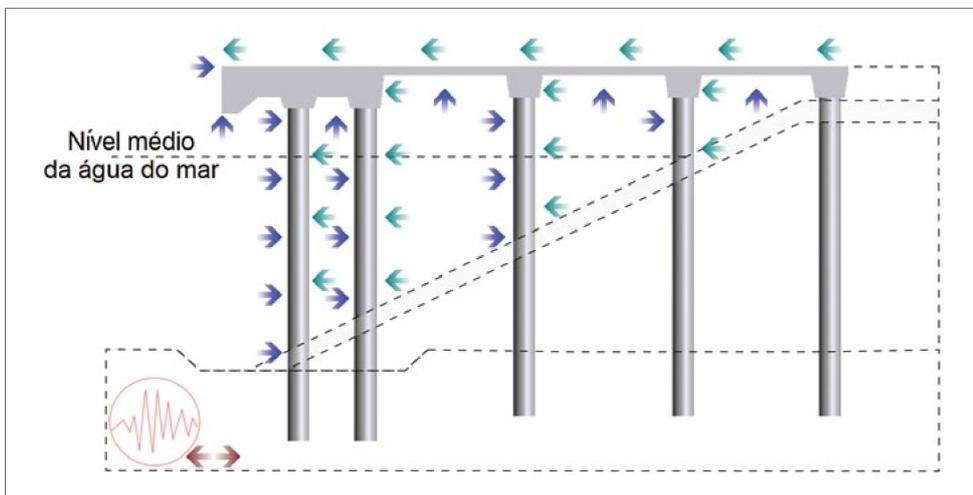


Figura 6. O padrão de cargas em cascata para dimensionamento estrutural engloba a aceleração sísmica aplicada nas fundações seguida pelos efeitos hidráulicos do tsunami nos elementos verticais e horizontais da estrutura, durante as fases de chegada, inundação e recuo das ondas de tsunami.

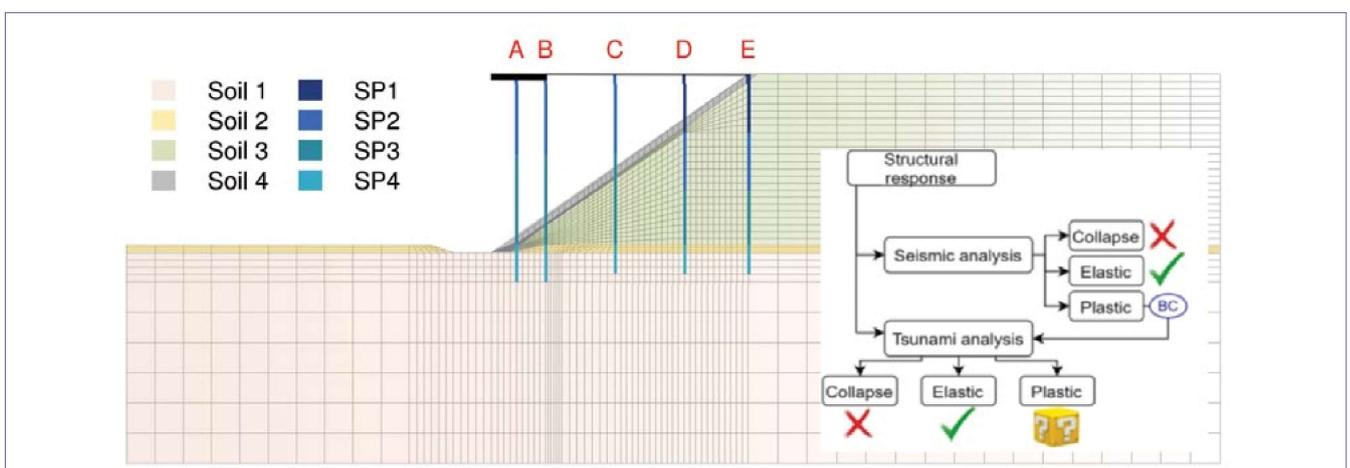


Figura 7. Modelo de discretização usado para prever a resposta sucessiva do sistema geo-estrutural ao padrão de cargas em cascata. O comportamento do sistema pode assumir uma das combinações ilustradas no esquema. As respostas possíveis do sistema são baseadas na comparação entre esforços atuantes.

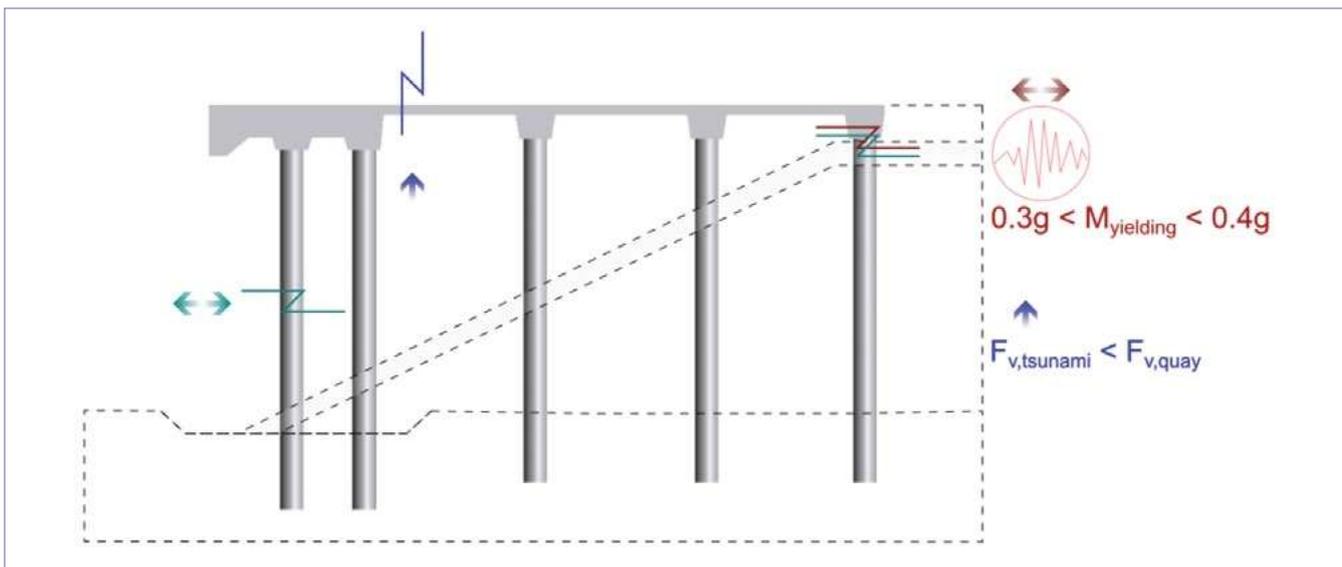


Figura 8. Comportamento sucessivo do sistema geoestrutural ao padrão em cascata de ações de sismo e tsunami.

O sistema geoestrutural mostra ter resistência à maioria dos cenários tsunamigênicos considerados neste estudo. No entanto, os cenários mais extremos mostraram que há potencial de dano e colapso se o dimensionamento das novas infraestruturas mantiver as características do atual Terminal XXI. A análise sísmica mostrou que os pontos de vulnerabilidade dos cais de estacas estão na cabeça das estacas mais curtas. Conforme ilustrado na figura 8, a resistência estrutural fica comprometida a partir de acelerações de 0.3g (similar ao recomendado pelo Anexo Nacional do Eurocódigo 8) e evolui rapidamente para colapso quando o terminal de contentores é exposto a acelerações sísmicas da ordem dos 0.4g. As simulações numéricas mostraram acelerações a exceder valores de 0.5g. O tsunami evidenciou a fragilidade das lajes mais finas do terminal de contentores devido a fenômenos de elevação. As lajes, originalmente dimensionadas para carregamento devido ao peso próprio da estrutura, dos equipamentos e de sobrecarga descendentes, não têm armadura superior para resistir à deformação para uma curvatura invertida, levando ao colapso destes elementos.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Em resumo, as estratégias estruturais de mitigação de risco de sismo e tsunami para o *hub* de carga do Porto de Sines incluem:

- ▶ Caracterização multiperigosidade de sismo e tsunami orientada à infraestrutura para determinação de pa-

drões de carga de dimensionamento em cascata (em vez de mapa genérico de perigosidade sísmica);

- ▶ Lajes dimensionadas com reforço superior da armadura e/ou aberturas de escoamento para alívio da pressão à chegada da onda do tsunami;
- ▶ Redução da altura da manga metálica que envolve as estacas que suportam o cais de contentores para conferir maior ductilidade à estrutura, evitando o rápido progresso de regime plástico para colapso;
- ▶ Técnicas de ancoragem do sistema geoestrutural para compensar o deslocamento privilegiado do sistema na direção do mar devido à geometria triangular do aterro e à não linearidade dos materiais para resistir a compressões e trações.

REFERÊNCIAS

- [1] ASCE 7-2022. *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers.
- [2] Clain, S., Reis, C., Figueiredo, J., Baptista, M. A., Miranda, J. M. (2016). "Second-Order Finite Volume with Hydrostatic Reconstruction for Tsunami Simulation". *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8, pp. 1691-1713. doi: 10.1002/2015MS000603.

- [3] EN 1998-1, 2004. *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance*. 1st ed. Brussels: BSi.
- [4] International Federation of Structural Concrete, FIB, TG2.13 – *Design and Assessment for Tsunami Loading*. <https://fib-international.org/commissions/com2-analysis-design.html>.
- [5] MarCom WG 112. *Mitigation of Tsunami Disasters in Ports. Technical Report 112*, World Association for Waterborne Transport Infrastructure, PIANC, 2010
- [6] MarCom WG 239. World Association for Waterborne Transport Infrastructure, PIANC. <https://www.pianc.org/uploads/publications/reports/ToR-MarCom-WG-239-Mitigation-of-tsunami-disasters-in-ports.pdf>.
- [7] McKenna, Frank (2011). *OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation*. *Computing in Science and Engineering*, 4 13, pp. 58-66. doi.: 10.1109/MCSE.2011.66.
- [8] MLIT 2570. *Technical Advice N°. 2570*. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Tokyo, Japan. MLIT, 2011.
- [9] Motazedian, Dariush and Atkinson, Gail M. (2005). "Stochastic Finite-Fault Modeling Based on a Dynamic Corner". *Bulletin of the Seismological Society of America* 3, 95 pp. 995-1010. doi.: 10.1785/0120030207.
- [10] Pagani, M., and Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M., Vigano, D. (2014). "Openquake Engine: an Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model". *Seismological Research Letters*, 3, 85, pp. 692-702. doi.: 10.1785/0220130087.
- [11] Reis, C., Figueiredo, J., Clain, S., Omira, R., Baptista, M. A. Miranda, J. M. (2018). "Comparison Between Muscl and Mood Techniques in a Finite Volume Well-Balanced Code to Solve Swe. The Tohoku-Oki, 2011 Example". *Geophysical Journal International*. doi.: 10.1093/gji/ggy472.
- [12] Reis, C., Clain, S., Figueiredo, J. Barbosa, A. R., Baptista, M. A., Lopes, M. (2021). "Experimentally Validated Numerical Models to Assess Tsunami Hydrodynamic force on an Elevated Structure". *Engineering Structures*, 249. doi.: 10.1016/j.engstruct.2021.113280.
- [13] ShipHub. <https://www.shiphub.co/top-container-ports-in-the-eu-2021>.
- [14] Reis, C., Barbosa, A.R., Figueiredo, J., Clain, S., Lopes, M., Baptista, M.A. (2022). "Smoothed Particle Hydrodynamics Modeling of Elevated Structures Impacted by Tsunami-Like Waves" *Engineering Structures*, 270. doi.: 10.1016/j.engstruct.2021.114851.
- [15] *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan. The Overseas Coastal Development Institute of Japan*. OCIDI, 2020. Disponível em <https://ocdi.or.jp/en/download-pdf>.

SOBRE OS AUTORES

Cláudia Reis, Ph.D., P.E., é doutorada em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico (IST) e membro do grupo Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability, IST, ULisboa. Desenvolve investigação como post-doctoral scholar no Departamento de Engenharia Civil da Oregon State University em áreas relacionadas com gestão multirrisco de infraestruturas costeiras no âmbito do projeto Cascadia CoPes Hub. É membro de equipas de consultoria para a indústria e de comités científicos para o desenvolvimento da engenharia de tsunamis, nomeadamente no TG2.13 – Design and Assessment for Tsunami Loading da FIB.

Dr Stephane Clain é professor catedrático no departamento de Matemática da Universidade de Coimbra e diretor do Laboratório de Matemática Computacional do Centro de Matemática da mesma universidade. As suas áreas de investigação são a construção e a análise de esquemas numéricos com principal ênfase nas aplicações. Trabalha também na área de Machine Learning, mais especificamente, na integração de inteligência artificial na construção de métodos numéricos.

André Barbosa, Ph.D., P.E., é engenheiro de estruturas com 25 anos de experiência profissional e académica dedicada à caracterização da resposta estrutural a fenómenos naturais extremos, tais como sismos, tsunamis e furacões. É professor catedrático na Oregon State University, EUA, e professor adjunto na Washington State University, EUA, e na University of Bristol, UK. Atualmente faz parte da liderança do Center of Excellence for Community Resilience, financiado pelo National Institute of Standards and Technology, e de vários comités da American Society of Civil Engineering (ASCE), nomeadamente do ASCE 7-28.

Secção coordenada pela PT-MATHS-IN, Rede Portuguesa de Matemática para a Indústria e Inovação pt-maths-in@spm.pt