

AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS DO GALGAMENTO COSTEIRO DE 10/11 DE DEZEMBRO DE 2013 NA FRENTE URBANA DO CONCELHO DE SANTA CRUZ, ILHA DA MADEIRA

CONSEQUENCES EVALUATION OF THE OVERTOPPING EPISODE OF THE 10/11 DECEMBER 2013 ON THE URBAN FRONT OF SANTA CRUZ MUNICIPALITY, MADEIRA ISLAND

ANA PEIXOTO⁽¹⁾ & ALBERTO GOMES⁽²⁾

Resumo:

A expansão e consolidação de áreas urbanas no litoral conduzem à exposição de um elevado número de elementos antrópicos no decorrer de galgamentos costeiros. É com o intuito de identificar e classificar as consequências de galgamentos costeiros que analisamos o recente *storm surge* de 10/11 de dezembro de 2013 que afetou a faixa costeira urbana da cidade de Santa Cruz, na costa sul da Ilha da Madeira. Assim, enquadra-se as condições atmosféricas relativas à intensidade do vento e à pressão atmosférica durante evento e caracteriza-se a agitação marítima através da direção e altura máxima da ondulação, bem como, a variação da maré. Após a caracterização oceanográfica e meteorológica, identificam-se e avaliam-se os danos estruturais na faixa costeira, nomeadamente, em edifícios, estruturas de proteção costeira e equipamentos, bem como, as consequências nas funções dos equipamentos portuários afetados pelo galgamento. Da análise quantitativa dos dados oceanográficos e atmosféricos, concluiu-se que o galgamento é do tipo *green water*, resultante de uma tempestade extratropical acompanhada de um rápido abaixamento da pressão atmosférica e de uma velocidade média dos ventos de 30km/h. O galgamento costeiro afetou de forma mais danosa cerca de 1600 metros do litoral de Santa Cruz. A análise qualitativa das consequências, revela que as estruturas portuárias sofreram consequências graves a catastróficas e uma disfunção na sua atividade. As áreas mais afetadas localizam-se nos extremos da frente urbana da cidade, registando-se consequências reduzidas a insignificantes na área intermédia. Deste modo, aponta-se como áreas de maior exposição, as áreas que registaram danos sérios a muito sérios, os quais, se poderão acentuar em futuros eventos.

Palavras-chave: galgamento costeiro, elementos expostos, Ilha da Madeira

Abstract:

The expansion and consolidation of urban areas along the coast leads to the exposure of a large number of anthropic elements to sea storm events. It is with the aim of identifying and classifying the consequences of coastal overtopping that we analyse the recent storm-surge of 10/11 December of 2013 which affected the urban coastal fringe of the city of Santa Cruz, on the south coast of Madeira Island. Therefore, the atmospheric conditions of wind intensity and atmospheric pressure are analysed and is characterised the direction of the waves and its maximum height, as well as the tide variation. After the oceanographic and meteorological characterization, it's identified and evaluated the structural damage on the coastal zone-and classified the functional consequences on the port structures affected by overtopping. The quantitative analysis of atmospheric and oceanographic data, support that this overtopping is a *green water* type resulting from an extratropical storm arising from the rapid reduction of atmospheric pressure and an average wind velocity of 30 km/h, affecting approximately 1600 meters of the coastal area of Santa Cruz. The qualitative analysis of the consequences show that the port structures suffered severe to catastrophic consequences and a dysfunction of their normal activities. The most affected areas are at the extremes of the urban front, registering reduced to insignificant consequences, in the intermediate area. Thus, it shows areas of greatest exposure, and areas that had presented serious to severe damages, which can be highlighted in future episodes.

Keywords: overtopping, exposed elements, Madeira Island

Received: 14 January, 2021 ; Accepted: 30 November, 2021

1. INTRODUÇÃO

O litoral constitui uma área muito suscetível aos perigos naturais, particularmente em frentes costeiras muito urbanizadas onde se reúnem condições hidrogeomorfológicas específicas que favorecem a ocorrência de galgamentos costeiros durante eventos extremos de agitação marítima.

O galgamento das infraestruturas e equipamentos implantados no litoral, em norma, designado como galgamento costeiro ou marítimo, corresponde à transposição de uma estrutura mari-

tima por uma massa de água por ação da agitação marítima (USACE, 1995; PULLEN *et al.*, 2007; PATRÍCIO, 2012), i.e., quando a onda transpõe a cota de coroamento das estruturas litorais, causando inundações, arrastamento de pessoas e/ou danos estruturais e funcionais (BRITO, 2007; RODRIGUES, 2011; SILVA *et al.*, 2012). A rebentação das ondas sobre a estrutura e a consequente transposição, normalmente, advém de um cenário de tempestade marítima (BRITO, 2007; HASLET & BRYAN, 2009; RODRIGUES, 2011) ou decorrente

⁽¹⁾ Câmara Municipal do Funchal, Portugal. Autor correspondente: isapiloto@geogr@gmail.com (Ana Peixoto);

⁽²⁾ CEGOT - Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Portugal.

de um tsunami (HSIAO & LIN, 2010; LYNETT *et al.*, 2003). Num sentido mais genérico, a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) indica que as tempestades (ventos fortes, chuvas torrenciais e baixas pressões) são uma das causas das inundações costeiras que submergem as áreas litorais de baixa altitude.

Para além da suscetibilidade natural, associa-se às áreas litorais uma importante componente de vulnerabilidade do território, uma vez que inúmeras áreas urbanas se implantam na frente costeira, concentrando um elevado número de elementos expostos (Dwyer *et al.* 2004). Com a expansão da urbanização ao longo de frentes costeiras (ANCP, 2010; ROCHA *et al.*, 2012), as áreas litorais tornaram-se mais vulneráveis à provável elevação do nível do mar (IPCC, 2013) e aos efeitos dos eventos naturais extremos ligados a tempestades, a ventos ciclónicos e episódios de precipitação intensa (KRON, 2013).

A frente costeira da cidade de Santa Cruz localizada na costa sul da Ilha da Madeira, constitui um exemplo do território português onde a perigosidade a galgamentos costeiros é real. Para além disso, este território, à semelhança do que acontece na costa sul da ilha, constitui uma importante área económica e urbana (RUSU *et al.*, 2008), registando uma forte densidade

populacional 555,6 hab/km² (INE, 2012) e uma forte concentração de edificado residencial, turístico e de equipamentos (TORRES & ANDRADE, 2010). Na área de estudo delimitada pela Ribeira da Boaventura e pelo Porto de Recreio, sensivelmente, uma área costeira abaixo dos 5 metros de altitude, identificam-se como principais elementos expostos duas infraestruturas portuárias, as piscinas municipais e alguns estabelecimentos comerciais e hoteleiros (Figura 1), o que se traduz em danos estruturais e na interrupção do funcionamento normal da cidade quando ocorrem galgamentos costeiros (PEIXOTO, 2013),

No Inverno de 2013, ocorreu um episódio de forte agitação marítima que afetou o litoral de Santa Cruz durante os dias 10 e 11 de dezembro, facto que suscitou o interesse para uma análise do perigo a galgamentos costeiros neste sector. Assim, o objetivo deste trabalho é duplo. Por um lado, enquadrar as condições atmosféricas e de agitação marítima que desencadearam o episódio de 10 de dezembro, e identificar as consequências e processos que sucederam durante este evento, de forma a identificar as áreas mais suscetíveis a galgamentos costeiros.

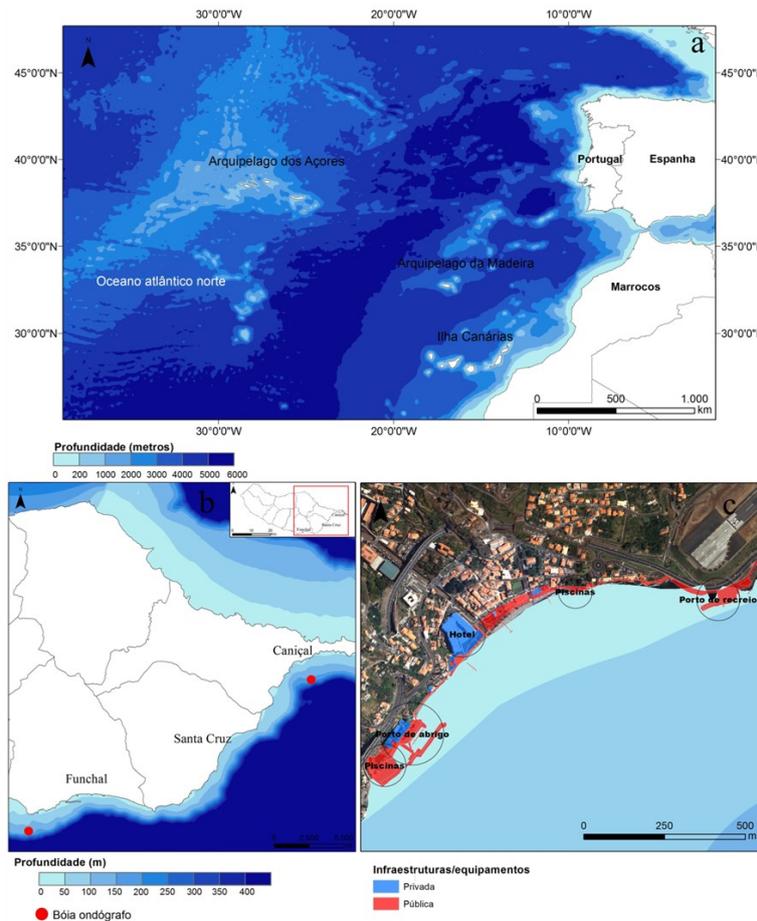


Fig. 1. Enquadramento geográfico da Ilha da Madeira: a – Ilha no oceano atlântico norte; b- Batimetria do setor oriental da Ilha da Madeira; c – Faixa costeira da cidade de Santa Cruz. Os dados batimétricos usados nos mapas podem ser obtidos em <http://www.hidrografico.pt/download-gratuito.php>.

Fig. 1. Geographic setting of Madeira Island: a - Island in the North Atlantic Ocean; b- Bathymetry of the eastern sector of Madeira Island; c - Coastal strip of Santa Cruz city. The bathymetric data used in the maps can be obtained from <http://www.hidrografico.pt/download-gratuito.php>.

1.1. A Costa Sul da Madeira

A Ilha da Madeira, região portuguesa e ultra-periférica da União Europeia (RUSU *et al.*, 2012), localiza-se no atlântico norte (Figura 1) e possuiu uma costa rochosa, composta por arribas de grande altitude (FERNANDES, 2009, NEVES, 2010), como é exemplo a arriba com *ca.* 600 m de altura no Cabo Girão, contrastando com algumas baías da costa sul. A erosão marinha destas arribas originou algumas áreas da orla costeira de menor altitude (FERNANDES, 2009), que na atualidade são constituídas por praias de calhaus rolados (NEVES, 2010), com granulometrias variáveis (SILVEIRA *et al.*, 2010).

Em termos de maré, o porto do Funchal regista uma maré semidiurna, seguindo um regime mesomareal em que que a amplitude máxima anual atinge os 2,8 metros (IH, 2013).

No que se refere ao ambiente batimétrico a ilha é marcada pelos fortes gradientes, atingindo-

se os 4000 metros de profundidade na proximidade da plataforma insular (CIIMAR-MADEIRA, 2013). Esta rápida mudança de profundidade é particularmente sensível na costa sul (RUSU *et al.*, 2008; CAMPUZANO *et al.*, 2004). Face a este forte gradiente batimétrico, infere-se que a rebentação das ondas deve ocorrer muito próximo da linha de costa.

A costa sul devido a sua posição geográfica encontra-se "*protegida dos processos de refração-difração combinados*" (RUSU *et al.*, 2008), uma vez que, não é influenciada pela ondulação vinda de noroeste e norte (ESTEVES & PINTO, 2007), nem pelos ventos dominantes, o que coloca-a desprotegida das tempestades com direção sudeste e sudoeste (TORRES & ANDRADE, 2010).

Em média, a ondulação na costa sul possui uma direção oeste ou sul atingindo altura significativa entre 0,5 a 1 metro (Quadro 1), dependendo da posição geográfica da área em análise, estação do Funchal ou do Caniçal.

Tab. 1. Caracterização da agitação marítima da estação ondógrafo do Funchal e do Caniçal (adaptado de ESTEVES & PINTO, 2007)
Tab.1. Characterization of wave propagation at Funchal and Caniçal wave stations (adapted from ESTEVES & PINTO, 2007)

Estação	Funchal			Caniçal		
	Direção*	Altura significativa (m)*	Altura Máxima (m)**	Direção*	Altura significativa (m)*	Altura Máxima (m)**
Ondulação predominante: Anual	W	0,5 - 1	12	S	0,5	7
Ondulação predominante: Inverno	W	0,55 - 1,18	>3	SE	<1	2-4
Verão	S	≤1	<3	S	<1	1-2,3
	E			W		

* Dados médios referentes à observação da ondulação no período compreendido entre 1989 e 2006 (ESTEVES & PINTO, 2007)

** Dados referentes aos registos da ondulação por bóia ondógrafo no período compreendido entre 1999 e 2013 (Instituto Hidrográfico)

Tab. 2. Ocorrência de cenários de tempestade na estação ondógrafo do Funchal (adaptado de ESTEVES & PINTO, 2007)
Tab. 2. Occurrence of storm scenarios at Funchal wave station (adapted from ESTEVES & PINTO, 2007)

Estação do Funchal						Duração (dias)				
Direção						Altura Máxima	<1	1-2	>2	Total
SE	SSE	SSW	SW	WSW	W					
X	X	X	X	X	X	3-4	26	4	0	30
			X	X	X	4-5	7	9	5	21
				X		>5	0	0	1	1
							33	13	6	52

Dados médios referentes à observação da ondulação no período compreendido entre 1989 e 2006 (ESTEVES & PINTO, 2007)

Os dados referentes à ondulação observado no período de 1989 a 2006 e disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico, demonstram que a estação do Funchal possui, em média, uma ondulação nos meses de inverno de oeste com uma altura significativa entre os 0,55 metros a 1,18 metros. Já no que se refere aos cenários de tempestade, apesar da sua pouca expressividade, na estação do Funchal observa-se uma ondulação de 3 a 4 metros com predominância da direção de oeste e oeste-sudoeste

(Quadro 2). Os dados mais recentes da bóia ondógrafo estacionada frente ao Funchal evidenciam um valor de altura máxima de 12 metros. No que se refere, à duração das tempestades a regra é a de que não excedem um dia, contudo, quando se prolongam são acompanhadas por um aumento da altura da ondulação. É exemplo o temporal analisado (2 dias) em que a ondulação superou os 5 metros. Outro padrão na duração das tempestades corresponde às ocorrências das tempestades com a

direção de sudeste que se manifestam num período inferior a 6 horas (ESTEVES & PINTO, 2007). Apesar de raras, verificaram-se episódios de agitação marítima sem uma direção dominante (ESTEVES & PINTO, 2007), com variações superiores a 90°. Estas situações são explicadas por rápidas mudanças da circulação atmosférica.

Na estação do Caniçal, em comparação com a estação do Funchal, a ondulação possui pouca expressividade, uma vez que, a altura significativa ao longo do ano não ultrapassa 1 metro (Quadro 1), em parte, por estar protegida das influências de oeste (ESTEVES & PINTO, 2007). Por conseguinte, assume-se, que a estação do Funchal é a que se aproxima mais do regime de agitação marítima registada na área da cidade de Santa Cruz.

Em termos atmosféricos existem duas influências sazonais a considerar: o anticiclone dos Açores e o do Marrocos. O primeiro, exerce a sua ação nos meses de inverno quando se encontra a sul, tornando a energia das ondas mais intensa (RUSU *et al.*, 2008). Tal é explicado pela formação de ventos alísios de nordeste que apresentam rajadas de 20km/h (IH, 1979 citado por CAMPUZANO *et al.*, 2004). Já o anticiclone de Marrocos influencia a ilha no período de novembro a fevereiro com a formação de ventos fortes (RUSU *et al.*, 2008).

1.2. Elementos expostos na faixa costeira da cidade de Santa Cruz

A cidade de Santa Cruz (Figura 1c), com uma frente costeira aproximadamente de 1600 metros - desde a foz da Ribeira da Boaventura ao Porto de Recreio, é constituída em quase toda extensão por praias de calhaus rolados que assentam sobre areias grosseiras. A faixa terrestre adjacente à praia é composta por inúmeros elementos construídos que podem sofrer danos com a ocorrência de galgamentos costeiros. Nesta faixa costeira existe uma primeira linha de infraestruturas compostas por vários pontões e dois portos (Figura 3), um de abrigo no quadrante oeste e outro de recreio no quadrante leste, seguindo-se numa segunda linha (adjacente às praias), uma promenade com uma extensão igual ao comprimento da baía. Por fim, um pouco mais recuada mas potencialmente exposta, localiza-se a edificação urbana, com a função centrada no setor terciário, como é exemplo, a unidade hoteleira, a restauração e o comércio de retalho.

O crescimento urbano que decorreu no final do século XX originou novas áreas de vulnerabilidade (PEIXOTO, 2013), uma vez que se intensificaram as construções no litoral, que outrora era apenas ocupado por fortes, pelas praias e sedimentos dos leques aluviais terminais das ribeiras.

A evolução da edificação na faixa litoral manifestou-se nos anos 50 e 60, intensificando-se nos anos 90 (séc. XX) com a construção das piscinas municipais e o aumento da promenade. Ainda nesta década foi construído o Porto de Recreio em Santa Catarina, posteriormente melhorado e dotado de acessos. Já no século XXI, no leito de cheia da Ribeira de Santa Cruz edificou-se uma unidade

hoteleira e aumentou-se a promenade existente. Na área da Ribeira de Boaventura, a área abandonada a oriente da ribeira foi reabilitada com uma frente marítima que passou a dispor de jardins, comércio e outros equipamentos. O Porto de Recreio e o Porto de Abrigo servem para a amarração de embarcações de pequeno e média dimensão, destinando-se à atividade piscatória e ao lazer.

Assim, os mais significativos elementos expostos a galgamentos costeiros são: a promenade, os estabelecimentos comerciais, a área de lazer e as infraestruturas costeiras (marinas, piscinas municipais). Por tudo isto, decidiu-se concentrar a nossa análise na faixa litoral delimitada pelo sítio de Santa Catarina (Porto de Recreio) e pela Ribeira da Boaventura.

2. METODOLOGIA

A análise do evento de galgamento costeiro na cidade de Santa Cruz decorreu segundo três etapas principais: i) inventário das ocorrências de galgamentos costeiros na cidade de Santa Cruz; ii) recolha e análise dos dados meteorológicos e oceanográficos; iii) identificação e avaliação das consequências do galgamento de 10/11-12-2013.

Em primeiro lugar, identificou-se mediante o trabalho de campo e através de vários registos, as ocorrências que compuseram a cronologia de galgamentos costeiros danosos no período de 1993 a 2010 (PEIXOTO, 2013), ao que se acrescentou as ocorrências recentes. O registo das novas ocorrências adveio do registo fotográfico dos cidadãos e dos meios de comunicação, Jornal da Madeira e Diário de Notícias da Madeira. Assim, no final desta etapa foi possível ter uma ideia preliminar da susceptibilidade desta faixa costeira, bem como a identificação dos elementos expostos na frente urbana da cidade de Santa Cruz.

Na segunda etapa, seguindo uma abordagem quantitativa, foram analisados os dados da bóia ondógrafo do Funchal por se localizar a cerca de 16 km da área costeira de Santa Cruz, e porque a bóia ondógrafo do Caniçal está protegida das influências de oeste, não exemplificando as condições que ocorreram no litoral de Santa Cruz. Os dados observados foram a altura e direção da ondulação no período de 22 de novembro a 22 de dezembro de 2013 (dados obtidos no portal do Instituto Hidrográfico). De modo a completar a informação de ESTEVES & PINTO(2007) introduziu-se na análise da caracterização da altura máxima das ondas o período de 1993 a 2013.

De forma a correlacionar os dados oceanográficos com as condições meteorológicas, recorreu-se aos dados da estação meteorológica do Funchal, considerando-se como variáveis de análise a intensidade do vento e a pressão atmosférica, no período de 01 de dezembro a 14 de dezembro 2013 e os dados disponíveis para os dias 10 e 11 de dezembro de 2013, no Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). No final desta fase, correlacionou-se a propagação das ondas com a situação atmosférica de forma a tipificar, segundo a classificação de DEMIRBILEK & VICENT (2002), o sistema de vento responsável pela tempestade marítima de

10/11 de dezembro.

A terceira etapa dedica-se ao registo dos processos decorridos durante o evento, bem como, das consequências. A avaliação das consequências teve como base os relatos dos meios de comunicação, Jornal de Notícias da Madeira e Diário de Notícias da Madeira (de 10 de dezembro a 12 de dezembro de 2013), bem como a análise de dois vídeos disponíveis sobre o evento. A compilação e o cruzamento da informação, permitiu enquadrar a sucessão de acontecimentos das 00.00 h do dia 10 de dezembro até às 13:00h do dia 11 de dezembro de 2013. Para assinalar as consequências relacionadas, efectuou-se uma visita pela área afetada a 26 de dezembro de 2013 (15 dias após o evento), fotogra-

fando-se e registando as consequências que não constavam nos relatos dos meios de comunicação, bem como, inquirindo moradores e instituições locais sobre o episódio.

Após a identificação dos danos na faixa litoral da cidade, avaliou-se os mesmos através do grau de consequência seguindo de perto os critérios definidos no trabalho de ROCHA *et al.* (2012), focando-se na questão funcional da gestão portuária e nos danos estruturais no património, nomeadamente, nos edifícios, equipamentos e estruturas de protecção costeira (Quadro 3). Acrescentou-se aos critérios definidos, a deposição de material nas praias e nas áreas de acesso.

Tab. 3. Classificação do grau de consequências presentes na ocorrência de um perigo (adaptado de ROCHA *et al.*, 2012).

Tab. 3. Grading degree of consequences in the occurrence of an hazard (adapted from ROCHA *et al.*, 2012).

Descrição	Consequências			
	Gestão Portuária	Edifícios	Equipamento	Património Estrutura
Insignificantes	Alterações ligeiras nas atividades portuárias	Danos exteriores quase inexistentes	Danos quase inexistentes e deposição de material	Dano na zona ativa da estrutura não necessitando de reparação
Reduzidas	Algumas alterações nas atividades portuárias; má publicidade para o porto a nível local	Danos interiores e exteriores insignificantes	Danos ligeiros que não implicam a paragem do equipamento; resolução quase imediata	Ocorrência de movimentos e quedas de blocos sem exposição de filtros; reparação imediata desnecessária
Sérias	Operações de carga e descarga condicionadas; possibilidade de paragem parcial do porto; má publicidade generalizada	Danos interiores moderados	Dano que implicam inatividade temporária do equipamento para reparação	Ocorrência de movimentos e quedas de blocos com exposição de filtros; supraestrutura afetada mas sem movimentos significativos
Muito Sérias	Impossibilidade da realização de operações de carga e descarga durante vários dias; má publicidade a nível nacional	Grandes danos no interior; estrutura do edifício afetada	Danos graves; inatividade prolongada do equipamento	Filtros afetados movimentos substanciais da supraestrutura
Catastróficas	Restrições muito sérias às operações de carga e descarga durante muito tempo; perda de trocas comerciais durante muito tempo; má publicidade internacional	Danos interiores muito graves; estrutura do edifício seriamente afetada; colapso iminente	Perda equipamento (reparação impossível)	Colapso da estrutura

3. GALGAMENTOS COSTEIROS NA FAIXA COSTEIRA DA CIDADE DE SANTA CRUZ (1993-2014)

A cidade de Santa Cruz desenvolve-se entre os 0 metros (linha de costa) e os 50 metros de altitude, no entanto, uma parte significativa do seu núcleo urbano encontra-se até aos 5 metros de altitude o que expõe os elementos urbanos a episódios extremos de agitação marítima, tais como os galgamentos costeiros históricos patentes no

quadro 3, sobretudo durante os meses de inverno. A área suscetível a galgamentos costeiros possui uma extensão de 1600 metros e pode atingir os 100 metros para o interior da área urbana, como sucedeu no evento de 01-04-1995 (PEIXOTO, 2013).

A análise preliminar dos eventos permite concluir que num episódio de agitação marítima de 5 metros de altura, a frente costeira da cidade é inundada. Outra conclusão é a de que os episódios de galgamento costeiro na cidade de Santa Cruz

podem ser acompanhados por inundação urbana, pois a incapacidade de escoamento na rede pluvial face à penetração marinha, em conjugação com um caudal elevado das ribeiras, reflete-se no escoamento da rede pluvial à superfície (PEIXOTO, 2013). É exemplo desta situação o evento de 02-02-2010.

O perigo a galgamento costeiro não é frequente na cidade, contudo, quando se observa apresenta prejuízos de diferentes graus (PEIXOTO, 2013). Uma consequência direta consiste no impedimento da circulação automóvel na Rua da Praia que consequentemente impossibilita o trânsito nas ruas adjacentes, refletindo-se numa diminuição dos clientes dos estabelecimentos comerciais da Rua da Praia e áreas adjacentes, uma vez

que, é nesta área que se localiza o estacionamento da cidade. Já nos danos tangíveis é comum registarem-se danos nas estruturas que marginam a costa: a promenade e a destruição de jardins (PEIXOTO, 2013).

No ano de 2013 a frente costeira da cidade registou dois eventos, o primeiro a 3 de março e segundo a 10/11 de dezembro. O primeiro episódio não foi notícia nos meios de comunicação, contudo o registo dos cidadãos demonstra que os danos foram sobretudo, estruturais e localizados no Porto de Recreio, com a cedência do pavimento de um setor da estrutura (Figura 2a e b), o qual, com a tempestade de 10 de dezembro acabou por ser destruído na sua totalidade (Figura 2c e d).



Ocorrências de galgamentos costeiros no litoral de Santa Cruz											
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
-	02-02-2010	03-03-2013	01-04-1995	-	-	-	-	-	30-10-1993	-	10-12-2013

Fig. 2. Destruição do Porto de Recreio pela consequência dos galgamentos costeiros e registo das ocorrências de galgamentos costeiros na cidade de Santa Cruz segundo o mês e datação do mesmo.

Fig. 2. Destruction of the Porto de Recreio caused by overtopping and recording of the overtopping occurrences in the city of Santa Cruz according to the month and date.

4. O EVENTO DE 10 DE DEZEMBRO DE 2013

A costa sul da Ilha da Madeira no dia 10-12-2013 experimentava uma forte agitação marítima desencadeada por uma tempestade extratropical, marcada pelo aumento da intensidade do vento e pela diminuição da pressão atmosférica (Figura 3 c e d), intensificando-se ao longo do dia 10 e durante a madrugada do dia 11. A agitação marítima acompanhou o incremento da intensidade do vento

no dia 10, sobretudo entre das 8h às 16h, hora em que se registou o valor médio máximo de 30km/h (Figura 3c). Em conjugação, observou-se uma diminuição de 50 hPa em 16 horas, o que diminuiu a pressão sobre a massa de água e explica de certa forma a ondulação máxima de 9 metros (Figura 3a). Toda esta conjuntura traduziu-se na formação de um *storm surge* que motivou um aviso vermelho pelo IPMA.

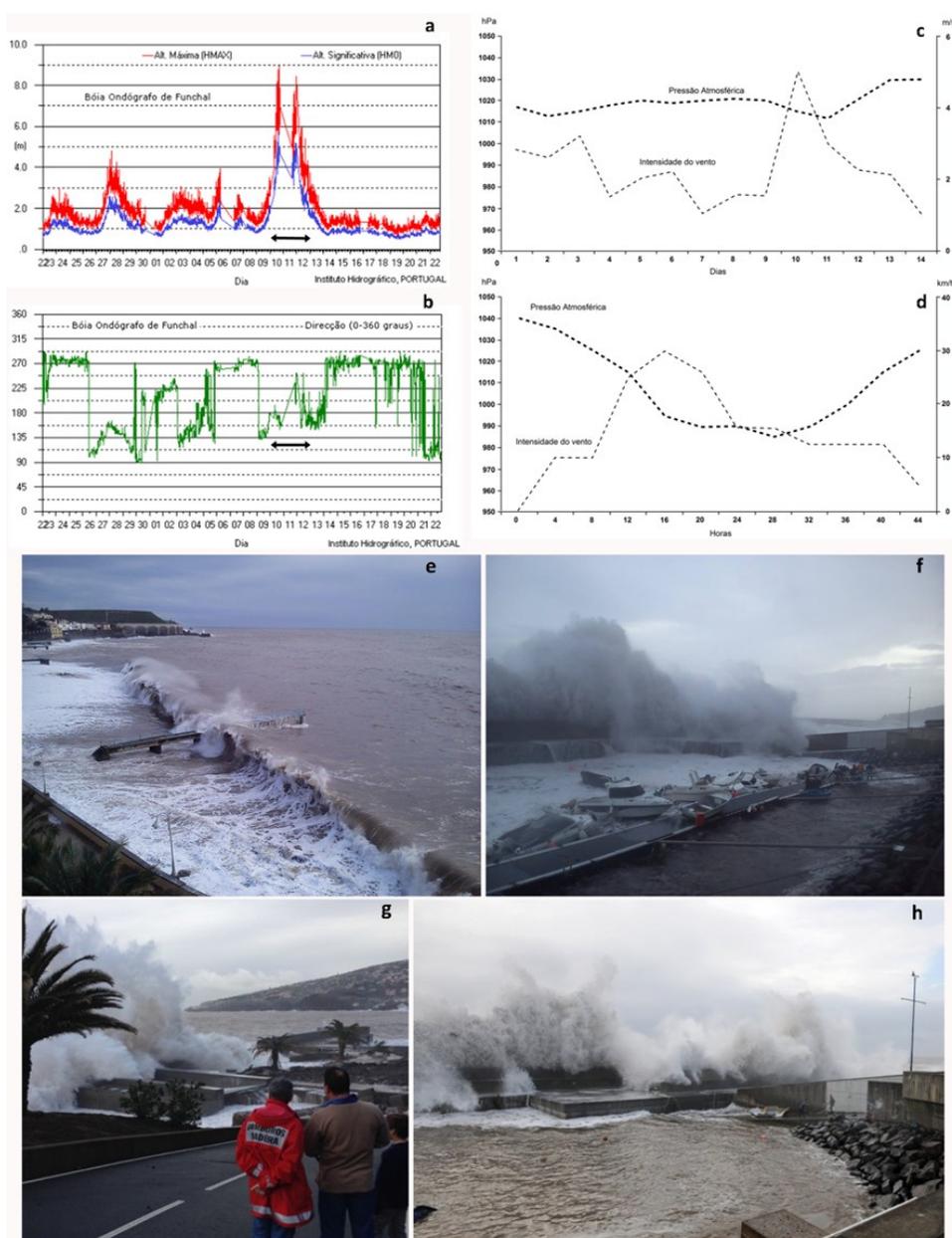


Fig. 3. Dados meteorológicos e oceanográficos de enquadramento da tempestade de 10/11 de dezembro 2013: a - altura da ondulação entre 22 novembro a 22 de dezembro de 2013; b - direção da ondulação entre 22 novembro a 22 de dezembro de 2013; c - intensidade do vento, pressão atmosférica na estação meteorológica do Funchal (1 a 14 dezembro 2013); d - intensidade do vento e pressão atmosférica instantânea na estação meteorológica do Funchal (10 e 11 dezembro de 2013); e - ondulação de SSW; f- galgamento do paredão do Porto de Abrigo; h- espriamento *green water* no Porto de Abrigo; g- espriamento *green water* no Porto de Recreio.

Fig. 3. Meteorological and oceanographic data of the storm on 10/11 December 2013: a - swell height from 22 November to 22 December 2013; b - swell direction from 22 November to 22 December 2013; c - wind intensity, atmospheric pressure at Funchal weather station (1 to 14 December 2013); d - wind intensity and instantaneous atmospheric pressure at Funchal weather station (10 and 11 December 2013); e - SSW swell; f- overtopping of the Abrigo Harbour; h- *green water* spreading at Abrigo Harbour; g- *green water* spreading at Recreio Harbour.

No que refere à escala local os ventos registados na Estação de Santa Catarina, concelho de Santa Cruz, circulavam com uma velocidade média de 24 km/h e com uma predominância de SW o que se aproximou da direção da ondulação que oscilou no dia 10 entre SE e o SSW durante o dia, atingindo no final do dia uma direção de SSE, marcando-se às 12h uma mudança de direção (Figura 3b). A ondulação caracterizou-se por uma

altura máxima de 9 metros intercalada com ondas de 5 metros que quebraram muito próximo da linha de costa (Figura 3e).

As ondas mantiveram-se com altura elevada até o dia 13, o que demonstra que a tempestade durou 3 dias, sendo o primeiro dia mais intenso (Figura 3a). Assim, registou-se mais uma exceção aos valores normais da estação do Funchal, confirmando-se que quanto maior é a duração da tem-

pestade maior é altura da ondulação. A direção da ondulação manteve-se no quadrante sul nos dias seguintes. Note-se, no entanto, que os valores de dia 11 registam lacunas, passando de SSE para SW no dia 12 de dezembro. Deste modo, verifica-se que a ocorrência da tempestade não possuiu uma direção dominante, mas sim, uma variação de 45° no dia 10 e de 90° para o dia 12, regressando a oeste, *i.e.*, à direção predominante, no dia 14 de dezembro.

Os dados registados nas estações meteorológicas e boias ondógrafos permitem inferir que o galgamento costeiro adveio de uma tempestade extratropical de intensidade moderada, uma vez que, ocorrência ocorreu num contexto de diminuição da pressão atmosférica, onde os ventos locais possuíam a direção de SW. A ondulação registou valores de altura máxima entre os 8 a 9 metros e com períodos máximos de 8 a 15 segundos, situação correspondente à tempestade extratropical classificada por DEMIRBILEK & VICENT (2002).

A interação entre a onda-estrutura resultou num espraçamento elevado da ondulação que transpôs o coroamento das estruturas ocorrendo sucessivos galgamentos do tipo *green water* (Figura 3f, g e h). O mesmo processo foi registado nas praias onde o espraçamento influenciado também pelo vento, e a deriva costeira motivada pela forte ondulação transportou material de variada dimensão (blocos, calhaus, troncos de árvore, fragmentos das embarcações destruídas e das obras costeiras, assim como muito lixo urbano) e depositou-o ao longo da promenade e nas estru-

ras galgadas. Segundo os dados apurados a maioria do material transportado e depositado na frente costeira, principalmente os troncos e restos de árvores, serão provenientes do episódio de precipitação intensa de 29 de novembro de 2013, em que os caudais das ribeiras transportaram abundante material resultante dos incêndios do verão.

O galgamento das estruturas portuárias efetuou-se segundo dois tipos de fluxo relacionados com a altura da onda e o modo de transposição da estrutura (Figura 4). O primeiro, designado por fluxo I, sucedeu-se sempre com as ondas com altura máxima, transpõe a totalidade do muro até ao interior do porto, atingindo diretamente a plataforma interior de amarração das embarcações. Já o segundo fluxo, advindo de ondas de menor altura galgou a estrutura em forma de escada, perdendo energia ao longo do percurso até o interior do porto. A combinação destes fluxos em conjugação com a entrada lateral da ondulação no Porto de Abrigo originou um movimento de oscilação no interior do porto semiaberto, formando as seichas responsáveis pela destruição das embarcações e da plataforma (Figura 4). Já o galgamento no Porto de Recreio afetou a estrutura através de (Figura 4): i) galgamento do muro de proteção; ii) um fluxo que circulava pelo vazio deixado na estrutura pela cedência do pavimento advindo do evento de 03-03-2013; iii) espraçamento oriundo pela rampa de acesso das embarcações ao mar.

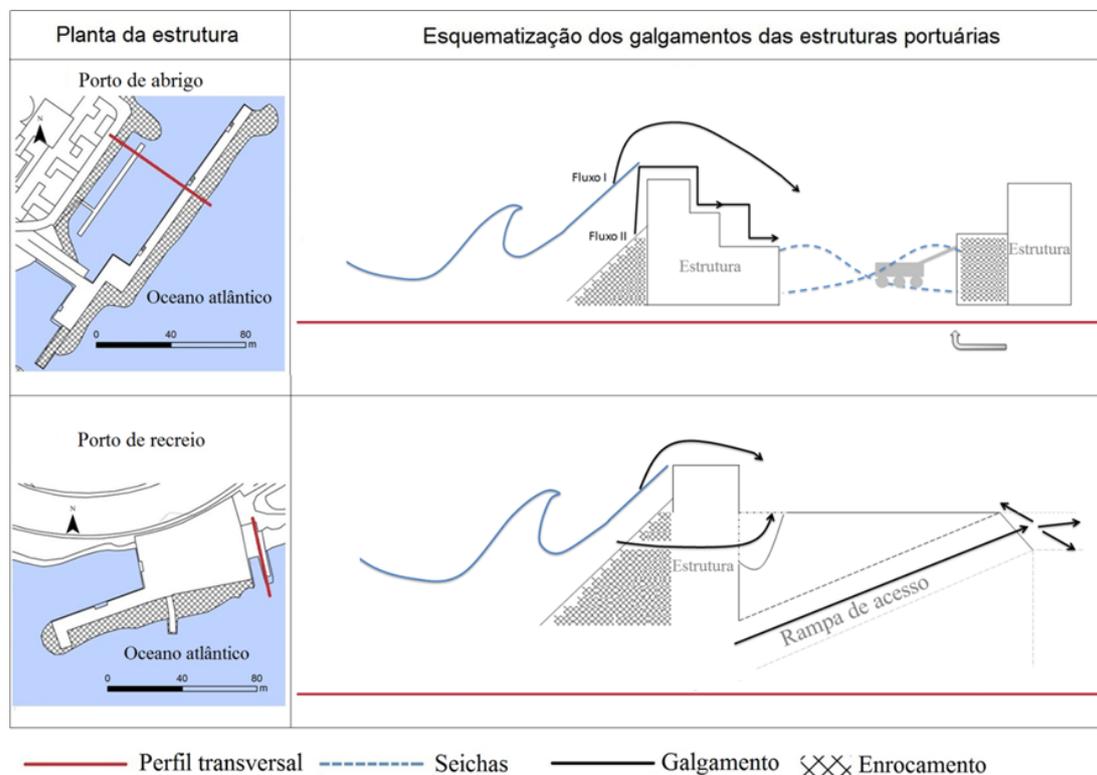


Fig. 4. Hipótese sobre a circulação do espraçamento da agitação marítima de 10/11-12-2013 nas estruturas portuárias.
Fig. 4. Hypothesis about the spreading circulation of the storm surge on 10/11-12-2013 in the harbour structures.

As consequências da tempestade marítima ocorreram quando a pressão atmosférica atingiu os 1010 hPa (entre as 16h e as 18h do dia 10) e as rajadas de ventos rondavam os 30 km/h (Figura 5). Desse modo, interditaram a promenade aos cidadãos (a área de passeio e lazer), uma vez que o espriamento atingia o equipamento. Com a intensificação da propagação das ondas registou-se: i) afundamento de embarcações; ii) corte de vias rodoviárias; iii) inundações num estabelecimento

comercial. Em resposta aos danos, na madrugada do dia 11, a autarquia iniciou as ações de minimização das consequências com a remoção do material que impedia o desaguar da Ribeira de Santa Cruz. Na manhã do mesmo dia contabilizaram-se os estragos e começaram as operações de limpeza, bem como, a divulgação que o parque de estacionamento do Porto de Recreio e área adjacente estavam totalmente ou parcialmente destruídos.

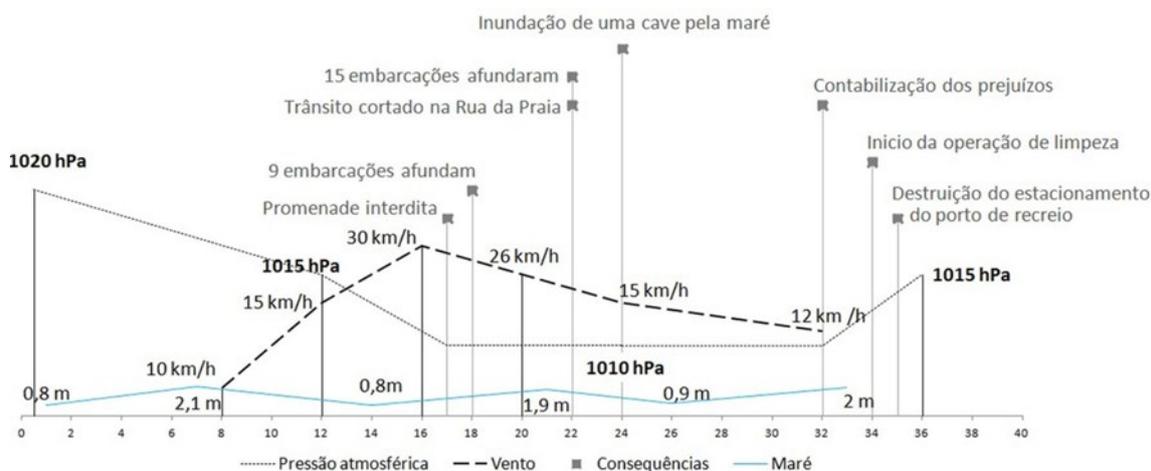


Fig. 5. Sucessão dos acontecimentos, desde as 00.00h do dia 10-12-2013 às 13.00h do dia 11-12-2013 do galgamento costeiro na cidade de Santa Cruz.

Fig. 5. Sequence of events, from 00.00 hrs on 10-12-2013 to 13.00 hrs on 11-12-2013 of overtopping in the Santa Cruz city.

3.1. Consequências na faixa costeira de Santa Cruz resultantes do galgamento costeiro de 10/11 de dezembro de 2013

A energia da agitação marítima e sucessiva transposição das estruturas e equipamentos costeiros repercutiu-se no território através das modificações na faixa costeira, em prejuízos na propriedade pública e em bens públicos e privados.

No que se refere à nova configuração da linha de costa ocorreram dois processos, a erosão que ocorreu na praia frente unidade hoteleira e na área do Porto de Recreio, e uma acentuada acreção que se deu nas praias localizadas a oriente das fozes dos principais cursos de água (Figura 6a e g), resultando num aumento da largura e extensão destas praias (Figura 6h). Cremos que a acreção foi motivada pela deriva litoral local que se estabeleceu durante a tempestade.

Mediante a observação direta detetaram-se rapidamente as consequências insignificantes na faixa costeira considerada, que consistiu na deposição de material (Figura 6f e i), o que se verificou em quase toda a extensão da área afetada. O material depositado foi sobretudo composto por troncos de árvores, lixo urbano e calhaus e blocos, bem como, os restos das embarcações destruídas (Figura 6f). O efeito destrutivo da energia das ondas foi amplificado pelo arremesso de sedimentos grosseiros dado que as praias são es-

sencialmente constituídas de material grosseiro (seixos e calhaus), o que danificou parcialmente as estruturas que marginavam o litoral. São exemplo destas consequências, os blocos que cobriam os muros e o levantamento da calçada dos acessos pedonais. A estes danos atribuiu-se o grau de reduzido. Esta classificação baseou-se na observação de fendas no Porto de Abrigo (Figura 6b e c), enquadrando-se na tipificação de “*ocorrência de movimentos e quedas de blocos sem exposição de filtros e reparação imediata desnecessária*”; já a promenade registou “*danos ligeiros que não implicam a paragem do equipamento e a sua resolução é quase imediata*” ROCHA *et al.* (2012). O grau de consequências sério, verificou-se nas piscinas municipais (Figura 6i) e na promenade desde a Ribeira do Moreno até ao Porto de Recreio (Figura 5l). Tanto nas piscinas municipais como na promenade o dano implicou a inatividade temporária do equipamento para reparação.

O quarto nível de consequências, grau muito sério, registou-se em elementos do Porto de Recreio (Figura 6m e n), onde os danos são considerados graves, implicando uma inatividade prolongada do equipamento, bem como, nalguns segmentos da estrutura de proteção observou que existem “*filtros afetados e movimentos substanciais da supraestrutura*”. No edifício de apoio (balneários), o interior foi afetado, bem como, a própria estrutura (Figura 5n).

As consequências da tempestade marítima ocorreram quando a pressão atmosférica atingiu os 1010 hPa (entre as 16h e as 18h do dia 10) e as rajadas de ventos rondavam os 30 km/h (Figura 5). Desse modo, interditaram a promenade aos cidadãos (a área de passeio e lazer), uma vez que o espriamento atingia o equipamento. Com a intensificação da propagação das ondas registou-se: i) afundamento de embarcações; ii) corte de vias rodoviárias; iii) inundação num estabeleci-

mento comercial. Em resposta aos danos, na madrugada do dia 11, a autarquia iniciou as ações de minimização das consequências com a remoção do material que impedia o desaguar da Ribeira de Santa Cruz. Na manhã do mesmo dia contabilizaram-se os estragos e começaram as operações de limpeza, bem como, a divulgação que o parque de estacionamento do Porto de Recreio e área adjacente estavam totalmente ou parcialmente destruídos.



Fig. 6. Consequências do galgamento costeiro de 10/11-12-2013 registados na frente costeira da cidade de Santa Cruz no dia 26-12-2013: a – acreção sedimentar na praia; b, c - fendas na infraestrutura do porto; d– destruição das plataformas flutuantes; e – ausência dos elementos do porto devido a sua destruição; f – depósito de material e barcos parcialmente destruídos; g – mudança da foz; h- a acreção sedimentar da praia e aumento a largura da praia; i- destruição de elementos, como varandas e da própria infraestrutura da piscina municipal; j- destruição parcial do parque de estacionamento do Porto de Recreio; i - levantamento da calçada dos acessos; m- danificação dos pilares de suporte da via rápida (VR1); n- destruição parcial dos balneares.

Fig. 6. Consequences of the overtopping on 10/11-12-2013 recorded on the coastal front of Santa Cruz city on 26-12-2013: a - sediment accretion in the beach; b, c - cracks in the harbour infrastructure; d- destruction of the floating platform; e - elements absence of the harbour due its destruction; f - material and boats deposit partially destroyed; g - estuary changes; h- sediment accretion of the beach and increase the width of the beach; i- destruction of elements, such as balconies and the municipal swimming pool infrastructure itself; j- partial destruction harbour's car park; i - lifting of the accesses' pavement; m- damage of the support pillars of the fast way (VR1); n- partial destruction of the bathing spots.

As consequências catastróficas, registaram-se no Porto de Abrigo com a perda da plataforma de amarração e o afundamento de 15 embarcações, e no Porto de Recreio onde se deu o colapso da estrutura que suportava a área de lazer e o parque de estacionamento.

Para além dos danos estruturais, deve-se considerar a disfunção portuária, que no caso do porto abrigo é classificada como catastrófica, uma vez que, não é possível atividade naquela área devido à ausência das plataformas.

Em síntese, a estrutura com maiores danos foi o Porto de Recreio (Figura 6j) que ficou totalmente destruído apenas restando o pontão. Todos os elementos adjacentes a esta estrutura, como candeeiros públicos, canalização e balneários ficaram destruídos, sendo a área atualmente depósito do material. O material que foi projetado pela energia das ondas acabou por danificar suportes da estrutura da VR1 (via-rápida), nada menos que o principal eixo de ligação das cidades da costa sul.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A ocorrência dos galgamentos costeiros na cidade de Santa Cruz, embora não sendo frequen-

te, acarreta prejuízos que conduzem a custos diretos (reconstrução, recuperação) e indiretos (disfunção de equipamentos) à cidade e aos seus habitantes.

O galgamento de 10/11-12-2013 permite concluir que o episódio de forte agitação marítima de quadrante Sul advindo de uma tempestade extratropical caracterizada por um rápido abaixamento da pressão atmosférica e ventos de 30km/h causou danos sérios e catastróficos na frente costeira da cidade Santa Cruz. Assim, estima-se que os elementos urbanos localizados aproximadamente até aos 5 metros de altitude e até aos 100 metros no interior da cidade estão expostos, tanto diretamente ao espriamento e sucessivo material transportado, como indiretamente aos efeitos da inundação por galgamento. É exemplo a interdição do trânsito na marginal por precaução.

Para além da exposição às massas de água, a frente costeira da cidade está sujeita a processos de erosão e acreção (Figura 7). Note-se que os processos de acreção sedimentar ocorreram não só pela direção das ondas (SE a SSW), mas também, pelo facto das ribeiras alimentarem a costa com sedimentos, em simultâneo, o que se traduziu numa acreção no setor oriental das ribeiras.

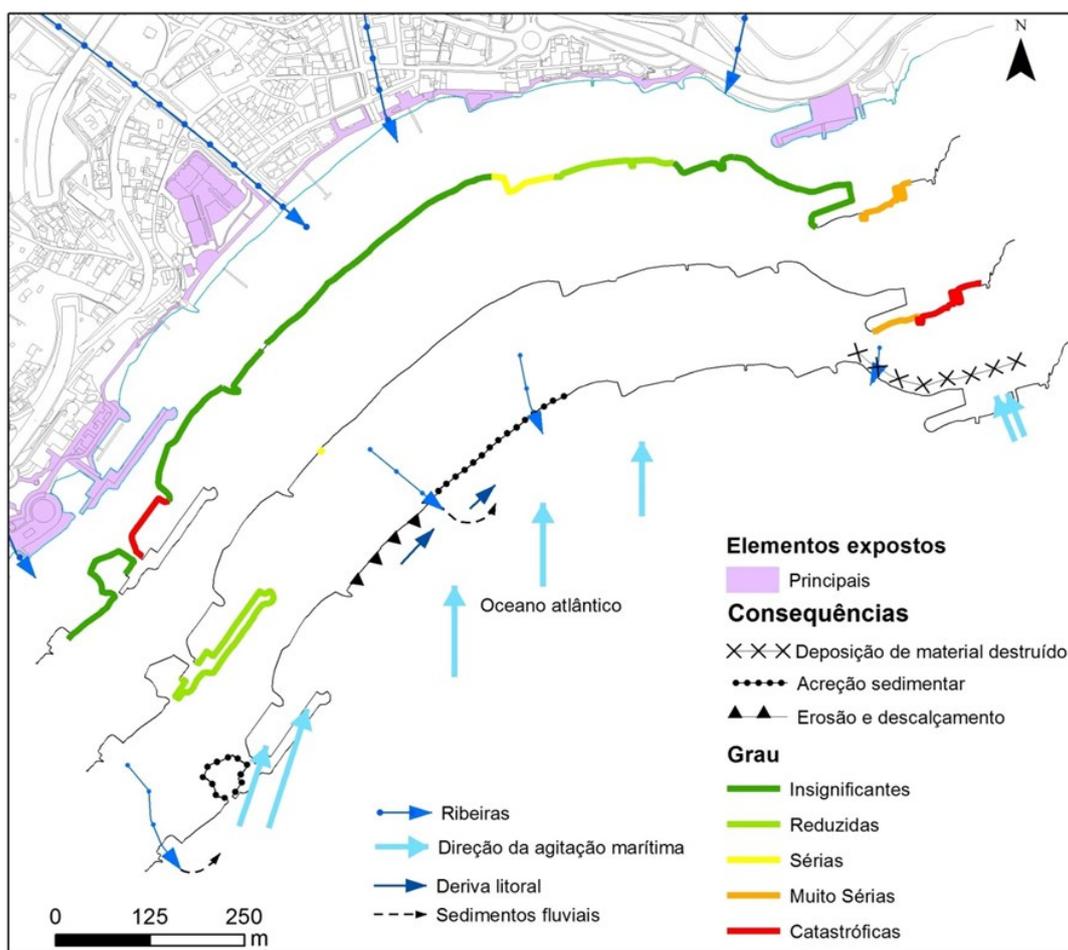


Fig. 7. Síntese das consequências segundo o grau e tipo do galgamento costeiro de 10/11-12-2013 e dos processos ocorridos.
 Fig. 7. Summary of the consequences according to the degree and overtopping type of 10/11-12-2013 and the processes that occurred.

As áreas em que os danos foram sérios a catastróficos encontram-se nos extremos da faixa costeira, registando-se na área intermédia os danos reduzidos a insignificantes. Os prejuízos no Porto de Recreio não advieram apenas da ocorrência do galgamento em análise, mas sim, da conjugação de dois episódios de forte agitação marítima.

Na atualidade, os principais elementos expostos ao perigo de galgamento são: i) o Porto de Abrigo, que apesar de não necessitar de reparação imediata pode ver os danos acentuados em episódios futuros; ii) as piscinas municipais, uma vez que, é um equipamento sazonal utilizado por um grande número de habitantes locais e pelos turistas. No que se refere à extensão, é a promenade o elemento urbano mais afetado, pois possuiu 1600 metros expostos aos galgamentos costeiros.

Conclui-se assim que é essencialmente a propriedade pública que está exposta, *i.e.*, as piscinas municipais, as estruturas portuárias e a promenade.

Apesar, da gravidade dos danos, o evento de 10 de dezembro não corresponde aos valores máximos de ondulação registados pela boia ondógrafo no período de 1993 a 2013, o que demonstra que em episódios com ondas superiores a 8 metros, podem ocorrer graves danos nos elementos costeiros. Por tudo isto, a quantificação dos eventos de agitação marítima e sucessivo registo de consequências deverão de ser a base para uma política municipal de ordenamento do território costeiro, de modo a prevenir em episódios futuros consequência de grau muito sério a catastrófico.

AGRADECIMENTOS

À Câmara Municipal de Santa Cruz agradecemos a cedência de cartografia vetorial, de ortofotomapas e o estágio profissional que facultou à autora. À população da cidade de Santa Cruz pelo relato das ocorrências e esclarecimento das consequências. Ao Sr. Roberto Abreu e Sr. Hélder Santos pela cedência das fotos relativas aos galgamentos costeiros de 3-03-2013 e de 10/11-12-2013.

BIBLIOGRAFIA

- ANPC. Riscos Costeiros - Estratégias De Prevenção, Mitigação E Proteção, No Âmbito Do Planeamento De Emergência E Do Ordenamento Do Território. Cadernos Técnicos PROCIV 15, 2010.
- BRITO, S. F. Estudo Do Galgamento Em Estruturas Marítimas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 2007.
- CAMPUZANO, F. J.; NUNES, S., MALHADAS M.; NUNES, D.; JARDIM, M.; NEVES, R. Modelação Da Hidrodinâmica Da Orla Sul Da Ilha Da Madeira. *6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Funchal (8 e 9 de outubro), 2009.
- CAMPUZANO, F. J.; NUNES, S.; MALHADAS, M.; NUNES, D.; NEVES, R. Efeito das Descargas De Aguas Residuais e Emissários Submarinos na Produção Primária Da Costa Sul Da Ilha Da Madeira., 2004.
- DEMIRBILEK, Z.; VINCENT, L. Chapter II-1: Water Wave Mechanics. In *Coastal Engineering Manual - Engineer Manual* 1110-2-1100, edited by U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC., 2002.
- DWYER, A.; ZOPPOU, C; NIELSEN, O.; DAY, S.; ROBERTS, S. Quantifying Social Vulnerability: A Methodology for Identifying Those at Risk to Natural Hazards: Geoscience Australia Canberra, Australia, 2004.
- ESTEVES, R.; PINTO, J. P. Análise Climatológica Da Agitação Marítima Na Costa Sul Da Madeira. 2007.
- FERNANDES, M. J. P. Riscos No Concelho Da Ribeira Brava Movimentos De Vertente Cheias Rápidas e Inundações. Dissertação da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, 2009.
- FITZGERALD, D. M; VAN H.; MONTELLO, M. T.. Shoreline Processes and Damage Resulting from the Halloween Eve Storm of 1991 Along the North and South Shores of Massachusetts Bay, USA. *Journal of Coastal Research*, 1994.
- HASLETT, S.K.; BRYANT, E. A. meteorological tsunamis in southern britain: an historical review. *Geographical Review*, 99, 2, 146-163, 2009.
- HSIAO, S., LIN, T. - Tsunami-like solitary waves impinging and overtopping an impermeable seawall: Experiment and RANS modeling. *Coastal Engineering*, 57: 1-18. 2010.
- INSTITUTO HIDROGRÁFICO - Tabela de marés para o porto do Funchal, 4º trimestre de 2013.
- IPPC. Climate Change 2013, The Physical Science Basis. *Cambridge University Press*, 1552 p., 2013.
- LYNETT, P. J.; BORRERO, J. C.; LIU, P.L.-F.; SYNOLAKIS, C. E. Field Survey and Numerical Simulations: A Review of the 1998 Papua New Guinea Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 160: 2119-2146. 2003.
- KRON, W.. Coasts: The High-Risk Areas of the World. *Natural hazards* 66, no. 3, 2013.
- NEVES, D. M.F. Turismo E Riscos Na Ilha Da Madeira : Avaliação, Percepção, Estratégias De Planeamento E Prevenção. Dissertação da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, 2010.
- PATRÍCIO, T. M. D. S. Modelação numérica do galgamento de quebra-mares de talude, 2012.
- PEIXOTO, A. Inundações Urbanas, Cheias Rápidas E Galgamentos Costeiros Na Cidade De Santa Cruz, Ilha Da Madeira: Áreas Afetadas, Frequência E Avaliação Da Vulnerabilidade Funcional. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 2013.
- PULLEN, T.; ALLSOP, N.; BRUCE, T.; KORTENHAUS, A.; SCH, H.; VAN DER MEER, J. Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual, 2007.
- ROCHA, T., TERESA-REIS, M; FORTES, C.; TAVEIRA-PINTO, F.; SANTOS, J.A.; NEVES, D.; PORTELA, L. Influência Da Variação Do Nível De Maré Na Avaliação Do Risco De Galgamento Na Baía Da Praia Da Vitória, Terceira, Açores. In *7ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*. FEUP, 2012.
- RODRIGUES, E. J. C.. Galgamento De Estruturas Marítimas: Comparação De Ferramentas De Cálculo. Instituto Politécnico de Setúbal, 2011.
- RUSU, E.; SOARES, C. G. Wave Energy Pattern around the Madeira Islands. *Energy*, 45, no. 1: 771-785, 2012.
- RUSU, E.; PILAR, P.; SOARES C. G.. Evaluation of the Wave Conditions in Madeira Archipelago with Spectral Models. *Ocean Engineering*, 35, no. 13 (2008): 1357-1371.

- SCHEFFNER, N. W. Chapter 5: Water Levels and Long Waves. In *Coastal Engineering Manual -Engineer Manual 1110-2-1100*, edited by U.S. Army Corps of Engineers, Vol. II. Washington, DC., 2002.
- SMITH, J. M. Chapter II-4: Surf Zone Hydrodynamics. In *Coastal Engineering Manual-Engineer Manual 1110-2-1100*, edited by U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC., 2002.
- SILVA, D. M. F.; FORTES, C. J.; TERESA-REIS, M.; CARMO, J. S.; SIMÕES, A.; RODRIGUES, C.. Avaliação Do Galgamento De Estruturas Portuárias: Porto De Ponta Delgada. *Recursos Hídricos*, 33, no. 2 , 2012.
- STORCH, H. V.. Storm Surges: Phenomena, Forecasting and Scenarios of Change." *Procedia IUTA*, 10, 2014.
- THOMPSON, E. F. Chapter 8: Hydrodynamic Analysis and Design Conditions. In *Coastal Engineering Manual-Engineer Manual 1110-2-1100*, edited by U.S. Army Corps of Engineers, Vol. II. Washington, DC., 2002.
- TORRES, C.; ANDRADE, C. Processo De Decisão De Análise Espacial Na Seleção De Áreas Óptimas Para a Aquacultura Marinha: O Exemplo Da Ilha Da Madeira. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 10, no. 3 (2010): 321-330.
- USACE - U.S. Army Corps of Engineering. Engineering and Design: *Coastal Engineering* (Engineer Manual 1110-2-1810). Washington, DC 1995.

Vídeos

<http://www.dnoticias.pt/multimedia/video/420813-agitacao-maritima-no-cais-do-aeroporto-da-madeira>,
acedido em 26 de dezembro de 2013.

<https://www.youtube.com/watch?v=x1seGHqLIVw>,
acedido em 03 de março de 2014.

Sites

INSTITUTO HIDROGRÁFICO - <http://www.hidrografico.pt/boias-ondografo.php>,
acedido em 22 de dezembro de 2013.

INSTITUTO PORTUGUÊS DO MAR E DA ATMOSFERA <http://www.ipma.pt/pt/otempo/obs.superficie.grafica/>,
acedido em 04 de janeiro de 2014

NOAA - <http://www.stormsurge.noaa.gov/>,
acedido em 10 de março de 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA—http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0000009&contexto=bd&selTab=tab2,
acedido em 21 de março de 2014.

CIIMAR-MADEIRA - <http://wakes.uma.pt/pt/research.php>,
acedido em 20 de abril de 2014.