

Eventos extremos e a variação do nível do mar

C. Antunes (1)

(1) IDL – Instituto Dom Luiz, FCUL – Universidade de Lisboa. cmantunes@fc.ul.pt.

Resumo: As variações do nível do mar com origem em eventos extremos e anómalos têm forte impacto nas zonas costeiras de Portugal, em particular, eventos de forte sobre-elevação e de forte agitação marítima como as que se têm vindo a assistir nos últimos tempos. A monitorização do nível do mar, de forma criteriosa, através dos dados dos marégrafos de Cascais e Lagos tem permitido uma análise dos fenómenos forçadores destes eventos, bem como, um estudo da relação entre as variações do nível do mar, periódicas e periódicas não-regulares, e os impactos de erosão, galgamento e inundação costeira. A comunicação, para além de apresentar o estudo preliminar da estimativa de cotas máximas de galgamento e inundação, pretende iniciar uma discussão sobre a caracterização das tempestades geradoras dos eventos de sobre-elevação meteorológica e agitação marítima forte. Serão apresentadas análises de alguns exemplos de eventos recentes com forte impacto costeiro.

Palavras-chave: nível do mar, eventos extremos, sobre-elevação, galgamento, inundação, erosão costeira.

1. INTRODUÇÃO

A análise da incidência de temporais na costa portuguesa, quer ao nível da caracterização dos processos quer ao nível da avaliação das consequências, é hoje um dos temas actuais e pertinentes para a gestão e defesa da orla costeira. Os elevados prejuízos, sociais e económicos, justificam o esforço no estudo das causas e da avaliação dos impactos destes eventos extremos com elevado potencial destrutivo. Os elevados níveis energéticos da agitação marítima incidente com origem em temporais com valores de *fetch* (área de geração das ondas) elevados potenciam o poder destrutivo em litorais mais expostos e com características erosivas. Os riscos associados à erosão, galgamento e inundação das zonas vulneráveis são uma constante preocupação na costa portuguesa, pondo em causa a segurança de pessoas e bens em situações extremas.

A costa atlântica portuguesa é assolada normalmente por dois tipos de tempestades, as subtropicais vindas do quadrante sudoeste e as extratropicais provenientes do quadrante noroeste (Rogers, 1997). Estes dois tipos de temporais têm características distintas e causam, geralmente, impactos diferentes. As tempestades subtropicais geram-se geralmente em zonas tropicais, transportam massas de ar quente e caracterizam-se por um centro de baixas pressões, um núcleo quente, sem sistemas frontais associados e ventos fortes localizados mais longe do centro (Evans e Guishard, 2009). As tempestades extratropicais desenvolvem-se nas latitudes médias, 30 a 60°, e são caracterizados por um núcleo frio, ventos fortes e chuvas moderadas a torrenciais (Gulev *et al.*, 2001). As tempestades extratropicais do Atlântico Norte desenvolvem-se de Oeste para Este, e devido aos seus fortes ventos geram agitação marítima de elevada energia (*swell*) que atinge com maior frequência a costa britânica, o norte da Europa e por vezes atinge também o norte da Península

Ibérica, devido à deriva para sul do *swell*. Por seu lado, as tempestades subtropicais são sistemas cavados que originam, normalmente, sobre-elevações meteorológicas elevadas na costa portuguesa e atingem, predominantemente, a Península Ibérica de sudoeste.

A sobre-elevação meteorológica (SM) e a forte agitação marítima de elevada energia são os dois tipos de eventos extremos que têm origem nestes dois tipos de tempestades, subtropicais e extratropicais, e estão associados a elevado risco de, respectivamente, erosão e galgamento nas zonas costeiras e, inundação das zonas ribeirinhas.

A análise da variação do nível do mar, através das séries maregráficas, permite, por um lado, a caracterização das SM e a sua associação aos eventos meteorológicos forçadores, e por outro lado, permite uma avaliação da agitação marítima através da análise das ondas infragravíticas (alta frequência). A variabilidade atmosférica do Atlântico Norte, quer através da sua principal oscilação, a Oscilação do Atlântico Norte (NAO – *North Atlantic Oscillation*), quer através de outros tipos de circulação atmosférica, influenciam fortemente a ocorrência destes eventos costeiros extremos, por constituírem o seu principal mecanismo forçador.

Esta comunicação pretende iniciar uma discussão sobre a caracterização das tempestades e o regime de circulação atmosférica que pode estar por detrás de cada tipo de evento, SM e agitação marítima forte, em conjugação ou em separado, para o caso particular da costa portuguesa.

2. SOBRE-ELEVAÇÃO METEOROLÓGICA E A VARIABILIDADE DO NMM

A variabilidade do NMM de curto período parece estar, em certa medida, associada a mecanismos de circulação meteorológicos forçadores de oscilação inter-anual a decadal. Para se compreender melhor esta relação, realizaram-se dois estudos, um sobre a

caracterização das sobre-elevações meteorológicas ao longo de 50 anos, e outro sobre a correlação do índice da NAO com a variação do NMM observado no marégrafo de Cascais. Os períodos de forte ocorrência e incidência de SM ocorridos na última década são indicadores da relação com os mecanismos de circulação atmosférica do Atlântico Norte.

2.1. Análise e caracterização das sobre-elevações meteorológicas

A variação do nível do mar em relação à oscilação periódica previsível da maré astronómica é designada por sobre-elevação meteorológica, a qual resulta de um forçamento atmosférico associado à passagem de tempestades caracterizadas por uma grande depressão atmosférica e ventos fortes.

Da série de registos horários do marégrafo de Cascais foi feita uma análise harmónica, a partir da qual foi obtida a componente residual que corresponde à SM verificada ao longo de 50 anos, de 1960 a 2010 (Vieira *et al.*, 2012). Sobre esta série temporal de registos horários de SM analisou-se a respectiva série das máximas amplitudes anuais e da frequência anual de SM com amplitude superior a 10 cm (correspondente ao percentil 90).

Este estudo (Vieira *et al.*, 2012) mostrou uma evidente tendência de aumento, quer na máxima amplitude quer na frequência de SM. Embora na máxima amplitude essa tendência seja ténue, e por isso pouco conclusivo, já na frequência verifica-se uma estimativa com significativo aumento e considerável correlação. Em ambas as séries nota-se uma oscilação com período de 15 a 20 anos, apontada como provável associação às oscilações interdecadais próprias das variações de longo período dão índice da NAO.

Nesse estudo foram também estimados os respectivos períodos de retorno das SM extremas. Da respectiva análise obtiveram-se as amplitudes de 62 e 67 cm de SM para períodos de retorno de 50 e 100 anos, respectivamente. É pois expectável que possamos esperar, até ao final do século, valores máximos de SM na ordem dos 60 a 70 cm, tendo sido já observado um valor de 52 cm em Dezembro de 2009 (Antunes, 2011).

2.2. Correlação da NAO com a variabilidade do NMM

Para melhor compreender as flutuações e variações do NMM, dado pela série secular de dados do marégrafo de Cascais, analisou-se a correlação da variação residual do NMM do marégrafo de Cascais com a série de dados do índice da NAO.

O índice da NAO é um indicador da oscilação do sistema bipolar formado pelos centros de baixa e alta pressão da região do atlântico norte, respectivamente, o ciclone da Islândia e o anticiclone dos Açores que controla a intensidade e direcção dos ventos e tempestades do atlântico norte vindos de Oeste (Rogers, 1997). Estes dois centros

de pressão oscilam na direcção Este-Oeste em períodos quase regulares, com variação do gradiente de pressão, influenciando o regime do clima na região do Atlântico Norte. Em fases de índice positivo da NAO aumenta a intensidade do centro subtropical de altas pressões e diminui, mais do que o normal, o centro polar de baixas pressões. O resultado é um inverno na Europa mais ameno e chuvoso, e um inverno seco e frio na zona norte do Canadá e Gronelândia. É neste quadro que normalmente se desenvolvem as tempestades extratropicais que assolam o norte da Europa, tal como aconteceu neste último inverno, de Dezembro de 2013 a Março de 2014. Em fases de índice negativo da NAO, verifica-se um gradiente de pressão mais baixo entre os dois centros, as altas pressões mais baixas e o deslocamento para Este do centro subtropical e, baixas pressões mais altas e o deslocamento para Oeste do centro polar. Neste quadro é típico um inverno dominado por tempestades subtropicais, como o que aconteceu no período de 2009-11.

O primeiro gráfico da Figura 1 mostra a série da média móvel de 3 meses do índice da NAO, desde 1990, onde se verifica o prolongado período do índice negativo que se verificou desde o final de 2009 até ao início de 2011.

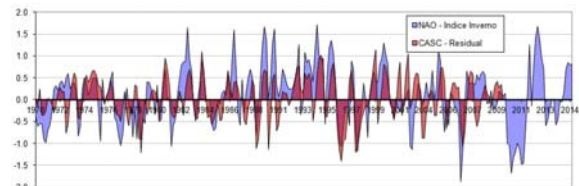


Fig. 1. Sobreposição da média móvel de 3 meses do índice da NAO de inverno com a componente residual da variação do NMM de Cascais.

Para se comparar e analisar a correlação deste fenómeno com a variação do NMM em Cascais foi calculada uma série residual a partir da série secular (Antunes e Taborda, 2009; Antunes, 2011). Essa série é obtida pelo simétrico da diferença dos valores de média mensal com a média móvel de 10 anos, que serviu para avaliar a tendência secular do NMM. A esses valores foi aplicada, à semelhança da série do índice da NAO, uma média móvel de 3 meses. Esta série está representada de forma sobreposta no gráfico da Figura 1. Esta série está calculada apenas até 2008, pelo facto da curva de tendência da série secular (média móvel centrada de 10 anos) terminar 5 anos antes dos últimos dados.

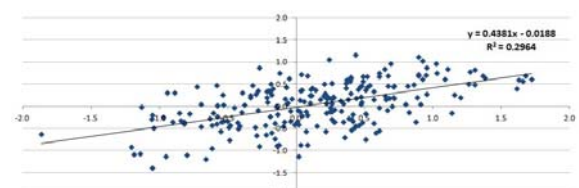


Fig. 2. Correlação entre o índice da NAO de inverno e a componente residual da variação do NMM de Cascais.

A valores negativos do índice NAO correspondem, normalmente, valores positivos da oscilação do NMM que ocorrem em períodos de sobre-elevações

frequentes, sobrelevando o NMM acima do seu valor médio decadal. Estes períodos estão, normalmente, associados a tempestades subtropicais. A Figura 2 mostra a correlação dos dados das duas séries calculada apenas com índice NAO de inverno, com dados de 1960 a 2008, evidenciando a existência de uma correlação entre a NAO e a flutuação média do NMM em Cascais. Este facto evidencia que os períodos de NAO negativa correspondem ao NMM sobre-elevado e a períodos de NAO positiva correspondem ao NMM sub-elevado (com SM nula ou negativa).

3. AGITAÇÃO MARÍTIMA, GALAGMENTOS E INUNDAÇÕES

A forte agitação marítima que chega á costa portuguesa é, na maior parte dos casos, gerada por tempestades extratropicais que se formam no Atlântico Norte e se desenvolvem de Oeste para Este com elevado *fech*. Os ventos persistentes e concentrados no núcleo das tempestades formam largas áreas de atrito entre o mar e a atmosfera, potenciando valores elevados de geração de ondas de *swell*.

No período de Dezembro 2013 a Março de 2014 assistiu-se a um fenómeno, aparentemente novo, na costa continental portuguesa, uma intensa e persistente agitação marítima que causou consideráveis danos costeiros devido à erosão e ao galgamento das ondas.

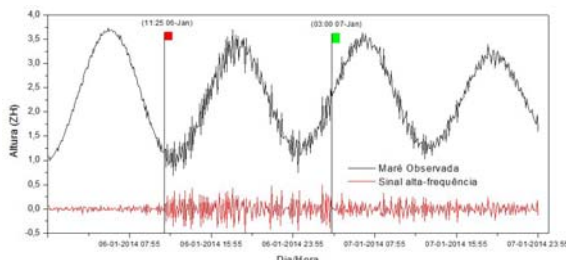


Fig. 3. Registo da maré em Cascais (preto) e diferença entre a maré registada e a maré prevista (SM a vermelho), com oscilação de alta frequência correspondente à passagem da tempestade Hercules.

Apesar de o tipo de agitação que atingiu a nossa costa estar dentro dos parâmetros habituais, com ondas significativas da ordem dos 9 a 12 m e períodos de 14 a 16 segundos, e picos máximos que chegaram aos 15 m de altura, a quantidade de eventos desta natureza que se repetiram em menos de 3 meses e a frequência com que ocorreram está efectivamente fora do habitual. A ocorrência de grandes períodos de onda de 22 segundos, como na tempestade Hércules a 6 de Janeiro de 2014, é de igual modo atípico, tendo causado danos consideráveis e atingido galgamentos que não são comuns para esta altura significativa das ondas.

A tempestade Hercules constituiu um bom exemplo do tipo de tempestades extremas, gerando ondas de 20 m de altura e 20 a 23 segundos de período, que atingiram fortemente a costa britânica e a parte

ocidental da Europa continental, incluindo a Península Ibérica, com severos danos nas zonas costeiras.

Na Figura 3 é visível o momento da chegada do forte *swell* associado á tempestade Hercules com elevado sinal de oscilação de alta frequência, cujo espectro está representado na Figura 4, onde se observam dois grupos de ondas infragravíticas, um de 12 minutos de período e outro em torno dos 15 minutos de período. Na Figura 3 é também notório a ausência de sobre-elevação meteorológica (média da curva a vermelho) neste evento extremo.

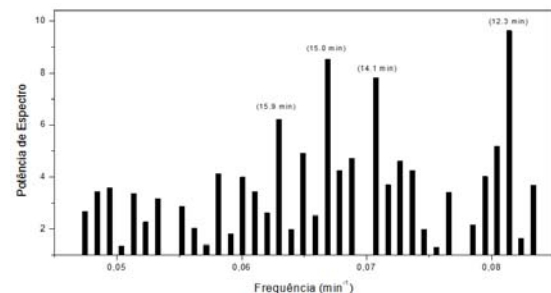


Fig. 4. Espectro das onda de alta frequência registadas no marégrafo de Cascais no período de passagem da tempestade Hercules.

A monitorização destes eventos, de Janeiro a Março de 2014, e o cálculo das cotas máximas de galgamento através do *runup* total das ondas, sobreposto à previsão de maré meteorológica para cada uma das tempestades, permitiu concluir que ocorreram galgamentos que excederam os 6 m de cota nas preias-mar (PM), tendo mesmo excedido os 7 m em períodos de águas-vivas (AV). Facto, que está de acordo com a observação e os relatos de todas as ocorrências que se verificaram desde meados de Dezembro de 2013 até ao início de Março de 2014.

Nesta comunicação apresentamos o cálculo de estimativa da cota máxima de galgamento com base na maré astronómica, na SM e no *runup* total para três casos, a tempestade HERCULES de 6 de Janeiro, a tempestade BRIGID de 2 de Fevereiro e a STEPHANIE de 8 de Fevereiro de 2014.

A metodologia de cálculo do *runup* total aqui apresentada segue o método DIM (*Direct Integration Method*) usado pela agência americana de protecção civil (FEMA, 2005).

Basicamente, seguindo a metodologia de FEMA (2005), o *runup* total inclui três componentes: 1) o *setup* estático das ondas, $\bar{\eta}$; 2) o *setup* dinâmico das ondas, $\hat{\eta}$; e, 3) o *runup* de incidência das ondas (espraio), R_{inc} , correspondente a:

$$R = \bar{\eta} + \hat{\eta} + R_{inc} \quad (1)$$

onde $\bar{\eta}$ e $\hat{\eta}$ correspondem, respectivamente, à amplitude média e à componente de oscilação do *setup* das ondas.

O *runup* de incidência, R_{inc} , é expresso em termos do número Iribarren, ξ , e corresponde ao *runup* excedido por 2% de todos os *runup*:

$$R_{inc} = 0.6\xi_0 H_0 \quad (2)$$

Sendo H_0 a altura significativa da onda ao largo.

A componente estática do *setup* é definida a partir do produto de 4 factores, da altura da onda (Fh), do período da onda (FT), de um factor espectral (F_{Gamma}), e do declive:

$$\bar{\eta} = 4.0 F_H F_T F_{Gamma} F_{Slope} \quad (3)$$

Já a componente dinâmica do *setup* é definida a partir da combinação do desvio padrão da flutuação do *setup*, σ_1 , e do desvio padrão do *runup* de incidência, σ_2 , resultando na seguinte expressão:

$$\hat{\eta} = 2.0 \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (4)$$

Para os factores e coeficientes aqui usados, para efeitos de análise prévia, foram experimentados valores mais adequados de majoração para comparação com os casos de galgamento de estruturas observados neste período de temporais, que ocorreram na Costa da Caparica, Carcavelos, Estoril e Praia Grande.

Com base neste método de integração directa foi feito o cálculo das estimativas da cota máxima de galgamento para as várias tempestades, através da soma da maré meteorológica com o *runup* total:

$$H_{max} = h_{maré} + SM + R - ZH \quad (4)$$

onde o zero hidrográfico, ZH, para o caso de Cascais é de 2.08 m. Deste modo obtém-se a cota máxima de galgamento relativa ao NMM. Para a SM foi utilizado uma expressão empírico considerando o efeito barométrico inverso e as componentes meridional e zonal do vento. Expressão que neste caso se revelou de grande exactidão face aos valores de SM observado no marégrafo de Cascais.

Na Tabela 1 estão listadas todas as ocorrências mais significativas deste período, relativamente às tempestades aqui consideradas, Hércules, Brigid e Stephanie, com os valores de cota máxima de galgamento calculada.

Tabela 1. Cálculo da cota máxima de galgamento (H_{max} , em relação ao NMM), em função da maré em preia-mar (PM), da SM (em cm) e do *runup* total (Rup). Tempestade Hércules de 6 de Janeiro, tempestade Brigid de 2 de Fevereiro e tempestade Stephanie de 8 de Fevereiro.

Data	H	PM	SM	Hs	P	Rup	Hmax
6/01	18:30	3.36	+3	8.5	21	6.1	7.4
7/01	6:53	3.48	+4	6.8	18	4.8	6.3
2/02	4:00	4.06	-10	9.0	16	5.8	7.7
2/02	16:25	3.75	-3	7.5	16	5.0	6.7
8/02	22:17	2.86	-1	9.0	16	5.8	6.6
9/02	10:54	2.78	16	7.5	15	4.9	5.8
9/02	23:27	2.94	10	9.0	13	5.4	6.4

Tomando como referência as cotas dos paredões da Costa da Caparica, Carcavelos, Estoril e Praia Grande, que vão dos 5.1 m na praia do Tamariz a 6.4 m na praia do CDS, os valores aqui obtidos para a cota máxima de galgamento confirmam os efeitos destas tempestades que se observaram no período de Dezembro de 2013 a Março de 2014.

4. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresenta-se uma hipótese de relação entre o tipo de temporal e os eventos que atingem a costa portuguesa, hipótese que carece de um estudo mais aprofundado e baseado numa análise rigorosa de acoplamento de modelos de circulação meteorológica e oceânica, corridos sobre séries temporais com períodos significativos de dados.

Os resultados que se obtiveram no cálculo das cotas máximas de galgamento mostram coerência com os registos e observações e, evidenciam um método empírico que aparenta ser robusto e adequado, com capacidade de adaptação a diferentes perfis.

REFERÊNCIAS

- Antunes, C. and Taborda, R. (2009). Sea level at Cascais tide gauge: data, analysis and results. *Journal of Coastal Research, SI 56: Proceedings of the 10th International Coastal Symposium*, p. 218-222, Lisbon, Portugal, ISSN 0749-0258.
- Antunes, C. (2011). Monitoring sea level change at Cascais tide gauge. *Journal of Coastal Research, SI 64* (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), Szczecin, Poland, ISSN 0749-0258, p. 870-874.
- Evans, J.L. and M.P. Guishard (2009). Atlantic subtropical storms. Part I: Diagnostic Criteria and composite analysis. *American Meteorological Society*, 137: 2065-2080.
- FEMA, (2005). Guidelines and Specifications for flood hazard mapping partners. *Appendix D: Guidelines for Coastal Flooding Analysis and Mapping*, Federal Emergency Management Agency, www.fema.gov/fhm/dl_sgs.shtm.
- Gulev, S.K., O. Zolina, S. Grigoriev (2001). Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Climate Dynamics*, Springer-Verlag, 17: 795-809.
- Rogers, J.C. (1997). North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe. *American Meteorological Society*, 10: 1935-1947.
- Vieira, R., C. Antunes e R. Taborda (2012). Caracterização da sobrelevação meteorológica em Cascais nos últimos 50 anos. *Actas das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa 20-22 de Junho, p. 175-178.

Agradecimentos

Fundação para a Ciência e Tecnologia, Financed by Project FCT: "Pest-Oe/CTE/LA0019/2013-2014"