

ESTUDO DE GALGAMENTOS UTILIZANDO REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS DO TIPO ARTMAP COM LÓGICA FUZZY

Francisco L. dos Santos¹, Maria Teresa Reis², Conceição Juana Fortes², Anna Diva P. Lotufo¹,
Geraldo de Freitas Maciel¹

¹UNESP/UNEMAT – Departamento de Engenharia – Ilha Solteira – Brasil

²LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa – Portugal

RESUMO

Esta comunicação analisa a aplicabilidade de uma rede neural artificial do tipo ARTMAP com lógica Fuzzy ao estudo do galgamento num trecho do molhe Oeste do Porto de Sines. Os resultados produzidos pela ferramenta foram comparados com dados de galgamento obtidos em ensaios em modelo físico bidimensional realizados no LNEC (2008), para o perfil em estudo. Os resultados da nova ferramenta foram ainda comparados com os provenientes de duas ferramentas neuronais do tipo *multi-layer feed-forward*: NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) e OVERTOPPING (Verhaeghe, 2005). Verifica-se que a rede ARTMAP-Fuzzy é capaz de estimar valores de galgamento próximos dos valores observados no modelo físico, embora consistentemente superiores, apesar de, em geral, apresentar resultados menos satisfatórios que a ferramenta OVERTOPPING. Estes resultados foram obtidos utilizando para parâmetros de treino da nova rede valores ainda não otimizados, pelo que será necessário realizar uma análise de sensibilidade a estes parâmetros para garantir que a rede ARTMAP-Fuzzy gere os melhores resultados possíveis.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do projeto de uma obra marítima, o estudo do galgamento é efetuado normalmente recorrendo a ensaios em modelo físico, bidimensionais ou tridimensionais, os quais estão em geral associados a custo e tempo de execução elevados. Sendo assim, na fase inicial do projeto, para obtenção de estimativas de galgamento, é usual o recurso a formulações empíricas, a modelos numéricos e, mais recentemente, à utilização de técnicas baseadas em Redes Neurais Artificiais (RNAs).

Por exemplo, para o cálculo do galgamento de estruturas marítimas foram desenvolvidas na última década, no âmbito do projeto de investigação Europeu CLASH (Crest Level Assessment of coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping) e contemporaneamente ao projeto, duas ferramentas que se baseiam no desenvolvimento e análise de sistemas de redes neuronais artificiais, do tipo *multi-layer feed-forward*, que usam no processo de treino o algoritmo matemático de *error-backpropagation* combinado com um algoritmo *quasi-Newton* ou *Levenberg-Marquardt*: NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) e OVERTOPPING (Verhaeghe, 2005). Estas redes têm como base uma extensa coletânea de, aproximadamente, 10.500 testes de galgamentos, que resultaram de ensaios em modelo físico reduzido e de medições em protótipo, que constam da base de dados CLASH (Van der Meer *et al.*, 2009) e que foram distribuídos pelas fases de treino e de teste das redes neuronais através de um procedimento de amostragem *bootstrapping*. Estas ferramentas têm-se mostrado muito úteis na prática da Engenharia, mas apresentam ainda limitações, relacionadas essencialmente com a falta de capacidade de generalização a casos desconhecidos das redes.

Assim, é analisada nesta comunicação científica, a utilização de uma nova ferramenta para o estudo do galgamento: uma Rede Neural Artificial do tipo ARTMAP (*Adaptive Resonance*

Theory), com técnicas de Lógica Fuzzy (Carpenter e Grosseberg, 1987; Carpenter *et al.*, 1991), para tentar ultrapassar algumas das limitações dos modelos de previsão de galgamentos existentes atualmente. Esta ferramenta é aplicada ao estudo do galgamento do trecho do molhe Oeste do Porto de Sines, na costa Oeste de Portugal, em frente ao posto 2 do terminal de granéis líquidos.

Este trabalho é uma continuação do trabalho desenvolvido por Santos *et al.* (2013), em que a referida ferramenta foi utilizada na previsão da agitação marítima transferida desde a bóia situada em frente ao Porto de Sines até ao posto 2. Os resultados mostraram que, em geral, as previsões fornecidas pela rede acompanham o perfil das alturas, dos períodos e das direções de onda na costa, sugerindo uma boa adaptação da rede aos resultados do modelo SWAN.

A seguir a esta introdução, no ponto 2, descrevem-se, brevemente, as redes neuronais do tipo ARTMAP-Fuzzy. No ponto 3 apresenta-se a metodologia adotada no desenvolvimento da nova ferramenta de cálculo do galgamento. O ponto 4 apresenta o caso de estudo relativo ao trecho do molhe Oeste do Porto de Sines para o qual existem dados de galgamento obtidos em modelo físico reduzido bidimensional desenvolvido no LNEC (2008). No ponto 5 procede-se à validação da nova ferramenta por comparação com os dados do modelo físico. Os resultados da nova ferramenta são ainda comparados com os provenientes das duas ferramentas neuronais referidas anteriormente para o perfil em estudo. A comunicação termina com a apresentação das principais conclusões do trabalho já realizado.

2. REDES NEURAIS ARTMAP-FUZZY

Com o intuito de simular a capacidade humana de aprendizagem, através de estruturas semelhantes à rede neuronal biológica, surgiram as Redes Neuronais Artificiais (RNAs). Segundo Braga (2000), uma das principais características das RNAs é a sua capacidade de aprender através de exemplos, sem a necessidade de serem explicitamente programadas, ou seja, são uma forma de programação não algorítmica, baseada em processamento distribuído paralelo das suas unidades, os neurónios artificiais.

Uma construção bastante popular no domínio de reconhecimento de padrões é a rede *multi-layer*, utilizando o algoritmo de aprendizagem *backpropagation*. Embora este modelo atenda razoavelmente as capacidades citadas em relação às unidades constituintes do cérebro, apresenta problemas quanto aos requisitos da memória como faculdade mental: a aprendizagem incremental e as duas classificações, de curto e longo termo. Uma vez treinada, se apresentado um exemplo novo, sozinho, à rede, podem ser perdidas informações anteriores no processo.

Outra família de redes, denominadas redes ART (*Adaptive Resonance Theory*), parece resolver satisfatoriamente estes requisitos (Carpenter e Grosseberg, 1987). A camada de reconhecimento (correspondente a F_2) classifica a entrada (Fig. 1), resultando o neurónio com maior valor na função de ativação. Esta envia os resultados de volta à camada de comparação (correspondente a F_1), capaz de avaliar se a classificação escolhida corresponde razoavelmente à entrada. Esta comparação resulta na classificação definitiva ou na criação de um novo neurónio na camada de reconhecimento, para este novo exemplo.

A teoria de Ressonância Adaptativa (ART) foi introduzida como uma teoria sobre o processamento cognitivo de informações no cérebro humano. Esta teoria levou ao desenvolvimento de uma série de modelos de redes neuronais capazes de uma aprendizagem não supervisionada para classificação de padrões em tempo real. Os modelos nesta família compreendem: a rede ART1, que pode aprender a categorizar padrões de entrada binários apresentados em ordem arbitrária; a rede ART2, que pode aprender a categorizar padrões de entrada analógicos ou binários; e a rede ART3, que pode fazer uma busca paralela, ou teste de hipóteses, em códigos com reconhecimento distribuído.

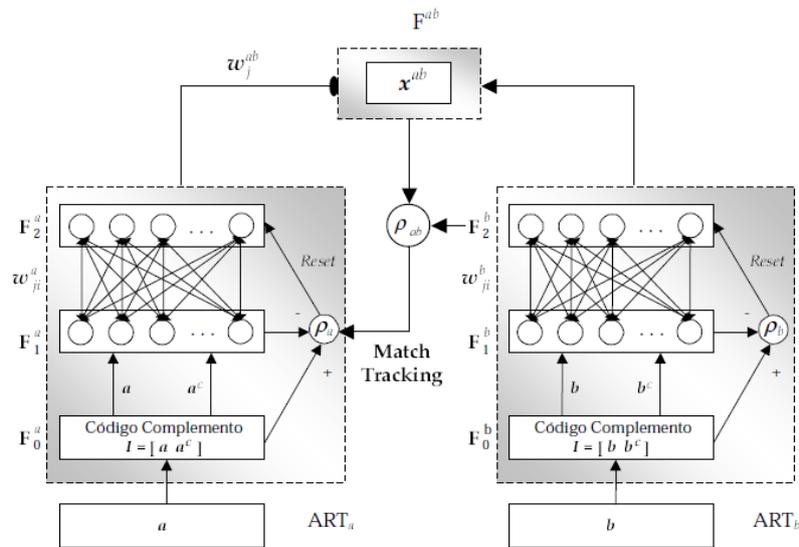


Figura 1 - Rede Neuronal ARTMAP-Fuzzy – Lopes (2005).

Por outro lado, as redes que utilizam o paradigma de aprendizagem supervisionada, em que um supervisor externo fornece informações sobre respostas desejadas para os padrões de entrada, estão limitadas no seu campo de aplicação aos casos onde estes dados são conhecidos. Existem várias aplicações em que é necessário que a rede seja treinada sem um supervisor externo ou punição/recompensa. Nestes casos, a única informação fornecida está no conjunto de padrões de entrada. Desta forma, estas redes definem os seus parâmetros por si próprias, sem auxílio externo. Esta é a ideia central dos modelos *self-organizing*, os quais utilizam o paradigma de aprendizagem não-supervisionada. Estes algoritmos utilizam um conjunto de regras de natureza local para o ajuste dos pesos.

A incorporação de elementos de lógica nebulosa (lógica Fuzzy) no modelo ART clássico possibilitou o tratamento analógico de imprecisão, característicos da maneira como a linguagem representa o mundo. A rede ARTMAP-Fuzzy (Carpenter *et al.*, 1991) possui tais características e é uma rede mais sofisticada que permite a aprendizagem incremental supervisionada, atualizando-se durante a operação sem “esquecer” o que já aprendeu anteriormente. É composta por duas sub-redes Fuzzy ART (Fig. 1): ART_a e ART_b, ligadas por um módulo intermediário, F^{ab}. Durante o treino da ARTMAP, o módulo ART_a recebe um padrão de entrada e o módulo ART_b recebe um padrão de saída que é a resposta desejada para o padrão de entrada. Estes dois módulos são conectados através de um mapeamento entre as camadas de saída e de entrada. As operações realizadas internamente na propagação dos sinais são alteradas para as operações definidas pela lógica nebulosa, trabalhando com conjuntos e operadores nebulosos.

A Fig. 2 apresenta um fluxograma geral da rede ART-Fuzzy. Note-se que se aplica ao módulo de saída a mesma rotina que se aplica ao módulo de entrada, verificando-se se há a correspondência entre entrada e saída via módulo F^{ab} (Fig. 1).

O desenvolvimento da rede ARTMAP-Fuzzy permitiu a adaptação da rede ARTMAP para a utilização de padrões analógicos tanto na entrada como na saída. A rede ARTMAP-Fuzzy é uma generalização da rede binária ARTMAP e pode ser usada para classificação e/ou associação de padrões binários e/ou analógicos de entrada e saída com dimensão arbitrária (sendo este último considerado nesta comunicação).

A proposta de construção de um ser artificial com memória consiste, portanto, na construção de um modelo desta natureza.

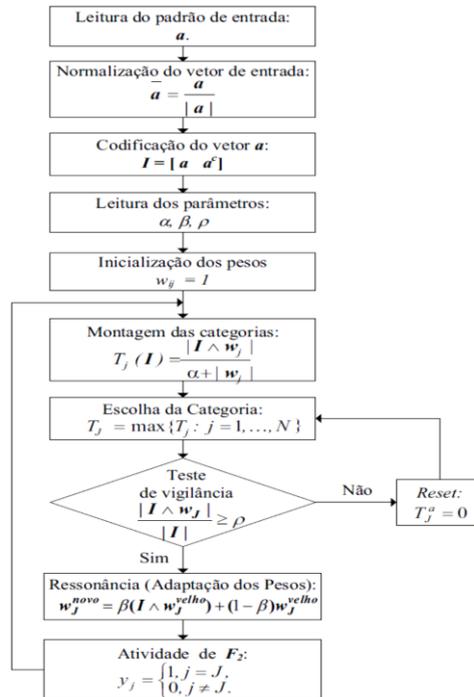


Figura 2 – Fluxograma da Rede Neuronal ART-Fuzzy - Lopes (2005).

3. METODOLOGIA

3.1 Características da Rede

O algoritmo ARTMAP-Fuzzy foi desenvolvido em plataforma MatLab® com o tratamento gráfico em Excel.

A base de dados de galgamentos CLASH (Van der Meer *et al.*, 2009), com cerca de 10.500 dados, foi utilizada na sua totalidade para treino da rede. Apresenta informação de testes em modelo físico efetuados em vários laboratórios internacionais contendo, para cada teste, informação relativa ao comportamento de vários parâmetros hidráulicos (por exemplo: características das ondas incidentes e medições dos caudais de galgamento), assim como informação relativa às estruturas marítimas em estudo. A base de dados inclui ainda informação geral sobre a fiabilidade do teste e a complexidade das estruturas. Como características do galgamento medido apresenta, para cada teste, o valor do caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura, q .

Inicialmente, a entrada da rede ARTMAP-Fuzzy consistiu num vetor de 15 parâmetros (Fig. 3):

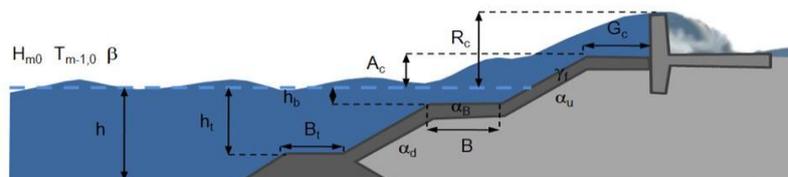


Figura 3 - Parâmetros de entrada da rede ARTMAP-Fuzzy.

H_{m0} [m]: Altura de onda significativa, calculada com o momento espectral m_0 , em frente da estrutura;

$T_{m-1,0}$ [s]: Período médio, calculado com os momentos espectrais m_{-1} e m_0 , em frente da estrutura;

β [°]: Ângulo entre a direção de propagação da agitação e a normal à estrutura;

h [m]: Profundidade junto à estrutura, mais precisamente, a altura de água imediatamente a montante da estrutura;

h_t [m], B_t [m]: Parâmetros que dizem respeito à profundidade e à largura da banquetta de fundo da estrutura, respectivamente. Se não existir banquetta de fundo B_t é igual a zero;

$\cot \alpha_d$ [-], $\cot \alpha_u$ [-]: Parâmetros usados para descrever o(s) declive(s) da estrutura. O fundo e o coroamento da estrutura já são descritos em outros parâmetros, portanto não são incluídos nestes dois parâmetros;

B [m], h_b [m], $\tan \alpha_B$ [-]: Parâmetros que descrevem a berma da estrutura: B é a largura, medida horizontalmente e h_b é a profundidade de água na berma, medida no centro da mesma. Se a berma estiver acima do nível de água, h_b é negativo. No caso da berma ser horizontal, $\tan \alpha_B = 0$;

R_c [m], A_c [m], G_c [m]: Parâmetros que descrevem o coroamento da estrutura: R_c é o bordo livre, A_c é a distância entre o meio da berma de coroamento e o nível da água e G_c é a largura de coroamento;

γ_f [-]: Parâmetro indicativo da rugosidade e da permeabilidade da estrutura: quanto maior a rugosidade/permeabilidade da estrutura, menor será o caudal galgado e maior será a energia dissipada na superfície da estrutura, conseqüentemente este parâmetro tomará valores inferiores.

Para além dos 15 parâmetros anteriormente referidos, houve a necessidade de considerar 4 parâmetros adicionais que levam em consideração o sinal de h , h_t , $\cot \alpha_u$ e h_b , sendo eles 1 para valores positivos e 0 para valores negativos. Esta atribuição foi necessária para que o vetor de entrada possuísse os parâmetros normalizados no intervalo [0,1], necessidade imposta pelo tipo de rede desenvolvida.

O vetor de saída da rede consistiu nos valores dos caudais médios de galgamento por metro linear de estrutura, q_{ART} .

Devido à grande variação de alguns dos parâmetros de entrada e saída da rede ARTMAP-Fuzzy, houve a necessidade de realizar uma adimensionalização dos mesmos. Conforme Coeveld *et al.* (2005) e Verhaeghe (2005), foi utilizada a escala de Froude e após algumas considerações, optou-se por adimensionalizar os parâmetros conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Adimensionalização dos parâmetros de entrada e saída da rede ARTMAP-Fuzzy.

Parâmetros de Entrada	Parâmetro de Saída
H_{m0} / H_{m0}	
$T_{m-1,0} / (H_{m0})^{0.5}$	
β	
h / H_{m0}	
h_t / H_{m0}	
B_t / H_{m0}	
γ_f	
$\cot \alpha_d$	$q / (H_{m0})^{3/2}$
$\cot \alpha_u$	
B / H_{m0}	
h_b / H_{m0}	
$\tan \alpha_B$	
R_c / H_{m0}	
A_c / H_{m0}	
G_c / H_{m0}	

Com base em trabalhos anteriores (Santos *et al.*, 2013), os valores dos parâmetros de treino da rede adotados foram: $\beta = 1,0$ (taxa de treino rápida), $\alpha = 0,1$ (parâmetro de escolha da categoria), $\rho_a = 0,9$ (parâmetro de monitorização inicial do módulo ART_a), $\rho_{ab} = 0,95$ (parâmetro de monitorização do módulo F^{ab}), $\rho_b = 0,995$ (parâmetro de monitorização de ART_b), $\epsilon = 0,001$ (incremento na monitorização de ART_a). Posteriormente, será necessário realizar uma análise de sensibilidade a estes parâmetros, para garantir que esta gere os melhores resultados possíveis.

O processador utilizado foi do tipo Intel Core i7 2.2 GHz - 8 GB RAM. O tempo de treino da rede foi de, aproximadamente, 10 horas.

3.2 Diagnóstico da Rede

Para efeitos de diagnóstico (teste) da rede, foram escolhidos cerca de 3.000 casos da base de dados CLASH, entre os quase 10.500 utilizados para treino, ou seja, cerca de 30% dos valores conhecidos da rede. Isto é necessário para se obter um perfil de comportamento da rede ARTMAP-Fuzzy para os casos da base de dados. Na Fig. 4 apresenta-se a comparação dos galgamentos estimados pela rede ARTMAP-Fuzzy, q_{ART} , e extraídos da base de dados do projeto CLASH, q_{CLASH} , para esses 3.000 testes. Pode observar-se que, mesmo utilizando para parâmetros de treino da rede valores ainda não otimizados, mas, utilizando um parâmetro de vigilância alto no diagnóstico, a rede apresenta estimativas do caudal médio de galgamento muito próximas dos valores constantes da base de dados CLASH (com coeficientes de correlação superiores a $R^2=0,99$), sobretudo para caudais $q_{CLASH}>0,00005 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Subsequentemente, para completar o diagnóstico da rede para casos já conhecidos da mesma, achou-se importante escolher 18 configurações distintas da estrutura marítima contempladas na base de dados CLASH (Fig. 5), para visualizar, mais em pormenor, a resposta da rede a essas diferentes configurações (Fig. 6). Para as diferentes geometrias consideradas, verifica-se uma total adaptabilidade da rede aos dados CLASH, ou seja, a rede retornou valores de galgamento exatamente iguais aos encontrados na base de dados, apesar de ter como base valores ainda não otimizados dos seus parâmetros.

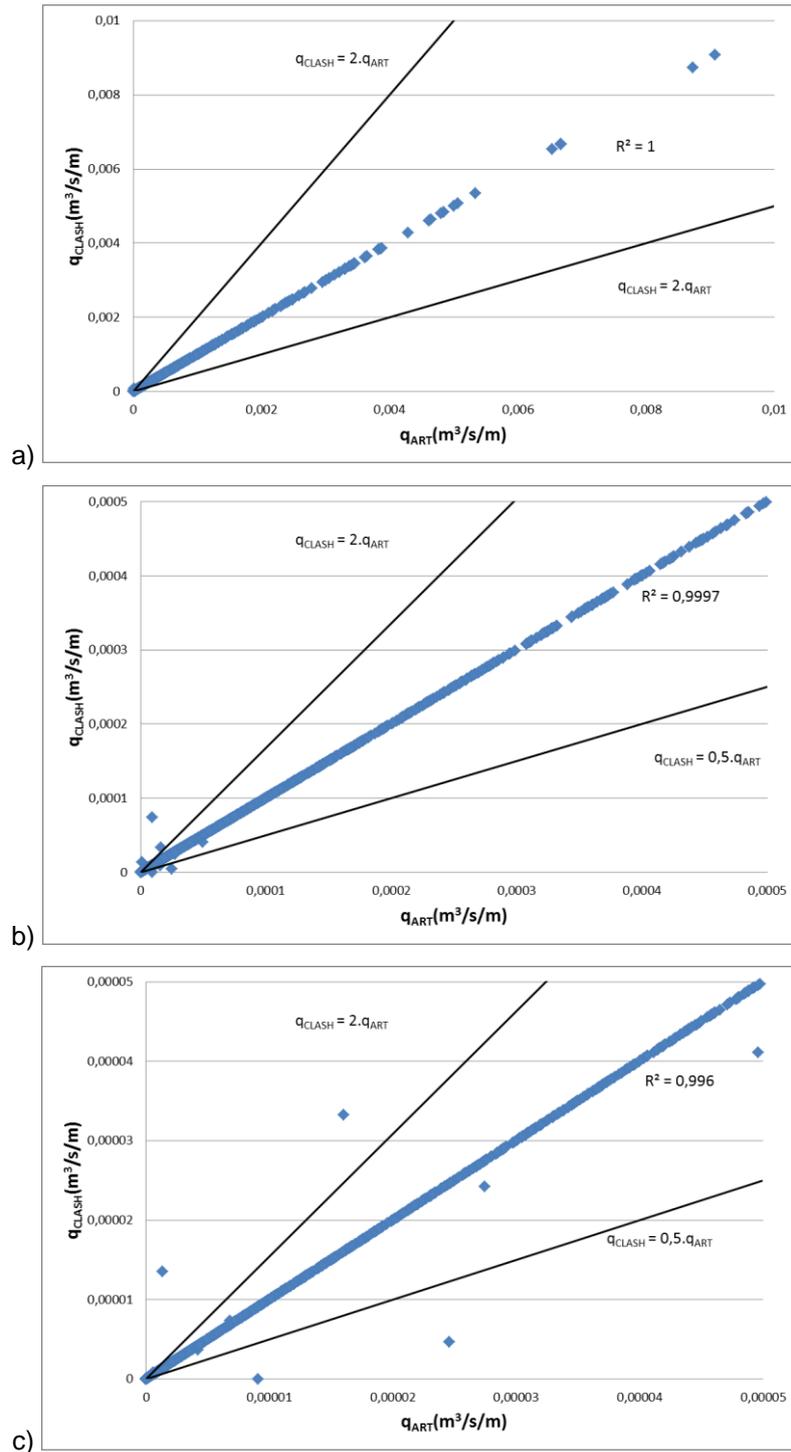


Figura 4 - Comparação dos galgamentos provenientes da rede ARTMAP-Fuzzy, q_{ART} , e da base de dados do projeto CLASH, q_{CLASH} , para 3.000 testes: a) todos os valores; b) valores para $q_{CLASH} < 0,0005 m^3/s/m$; c) valores para $q_{CLASH} < 0,00005 m^3/s/m$.

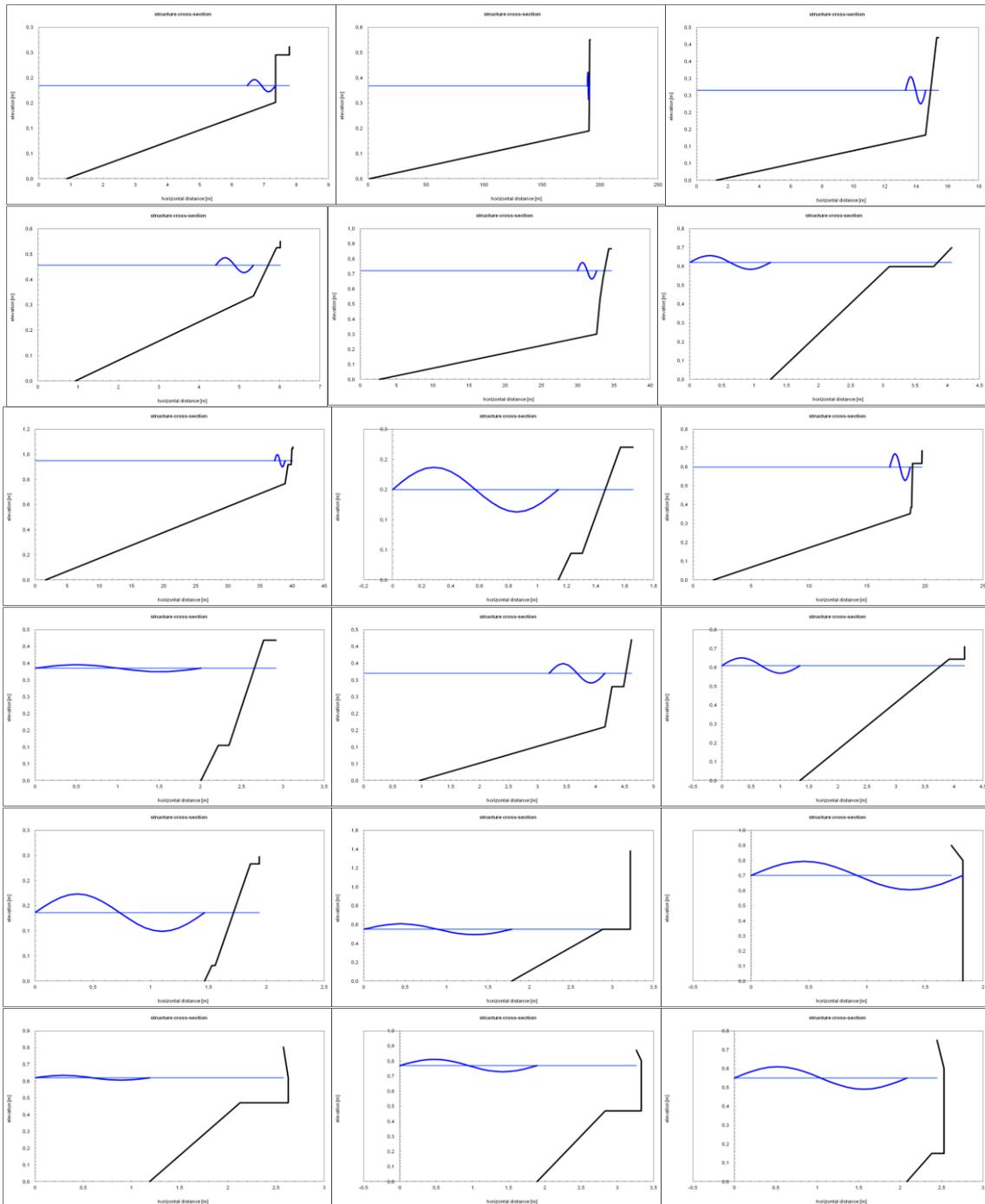


Figura 5 - Diferentes geometrias da base de dados CLASH testadas com a rede ARTMAP-Fuzzy.

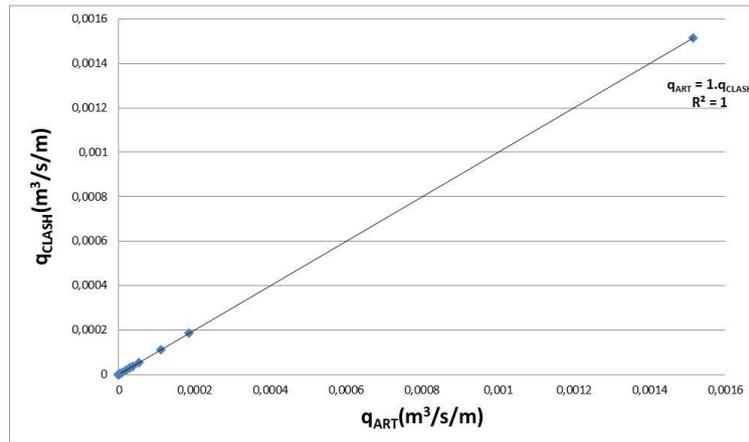


Figura 6 - Comparação dos galgamentos provenientes da rede ARTMAP-Fuzzy, q_{ART} , e da base de dados do projeto CLASH, q_{CLASH} , para os tipos de geometria analisados.

4. CASO DE ESTUDO

O Porto de Sines, localizado na costa Oeste de Portugal continental, é protegido por dois molhes: Oeste e Este (Fig. 7a). O molhe Oeste é o molhe principal e serve de abrigo aos postos de acostagem de águas profundas para navios petroleiros e aos quatro terminais principais do porto.

O perfil-tipo do trecho do molhe que protege o posto 2 do terminal de granéis líquidos do porto consiste num quebramar de taludes, com cubos Antifer de 900 kN colocados, em duas camadas, de forma regular acima do zero hidrográfico (ZH) e de forma irregular abaixo do ZH (Fig. 7b). Devido à realização de vários trabalhos de reabilitação, o talude da estrutura não é uniforme, com quatro troços inclinados ao longo da zona ativa do manto. O coroamento é composto por uma berma de 20 m de largura à cota +18,0 m (ZH), encostada a uma superestrutura de betão com deflector de onda, com o coroamento à cota +19,0 m (ZH) (Reis *et al.*, 2011).

Para este perfil, foram realizados no LNEC ensaios em modelo físico bidimensional de estabilidade e galgamento num canal de ondas irregulares, tendo sido utilizada a escala geométrica de 1:60 (LNEC, 2008). Os ensaios contemplaram dois níveis de maré, 0,0 m (ZH) e +4,0 m (ZH), e foram realizados para diferentes condições de agitação incidente irregular, com uma configuração espectral empírica de JONSWAP, períodos de pico do espectro, T_p , entre 10 s e 20 s e alturas de onda significativa, H_s , entre 4 m e 14 m, aproximadamente, valores estes referidos em protótipo.

A Tabela 2 apresenta os valores dos caudais médios de galgamento por metro linear de estrutura medidos no modelo físico, q_{MF} , para doze ensaios realizados nos estudos de reabilitação do molhe. Neste quadro, as características da agitação, T_p e H_s , representam valores medidos em frente da estrutura, à profundidade -45,0 m (ZH) (valor do protótipo).

a)



b)

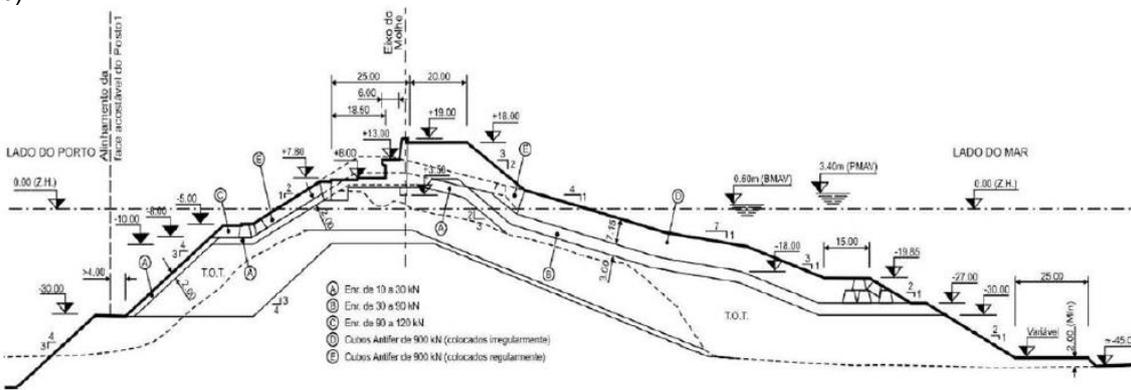


Figura 7 – a) Molhe Oeste do Porto de Sines e posto 2 do terminal de granéis líquidos; b) perfil-tipo do trecho do molhe que protege o posto 2.

Tabela 2 - Caudais médios de galgamento por metro linear de estrutura obtidos no modelo físico, q_{MF} , em valores do protótipo (LNEC, 2008).

Ensaio	Nível de Maré (m ZH)	T_p (s)	H_s (m)	q_{MF} ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$)
1	0,0	10	6	0,0
2		14	9	0,0
3		18	11,5	1,8
4		16	12	0,3
5		20	13	13,5
6		20	14	35,3
7	4,0	10	6	0,0
8		14	9	0,6
9		18	11,5	44,2
10		16	12	33,3
11		20	13	138,6
12		20	14	246,8

5. RESULTADOS

5.1 Comparação com Resultados do Modelo Reduzido do Molhe Oeste do Porto de Sines

Sendo o perfil geométrico do trecho do molhe Oeste do Porto de Sines bastante complexo, é difícil de o representar corretamente através dos 15 parâmetros de entrada considerados na rede ARTMAP-Fuzzy desenvolvida, implicando que diferentes representações da estrutura devem ser analisadas. Esta análise foi realizada por Bravo *et al.* (2013) no âmbito da aplicação das ferramentas neuronais NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) e OVERTOPPING (Verhaeghe, 2005) ao mesmo caso de estudo. Na Tabela 3 apresentam-se os parâmetros geométricos de entrada da rede ARTMAP-Fuzzy para as várias representações da estrutura analisadas por Bravo *et al.* (2013), para os níveis de maré de 0,00 m (ZH) e +4,00 m (ZH), respetivamente.

Tabela 3 - Parâmetros geométricos usados na rede ARTMAP-Fuzzy para definição do trecho do molhe Oeste em frente ao posto 2 para os níveis de maré de 0,00 m (ZH) e de +4,00 m (ZH) (valores de protótipo).

Nível de Maré (m ZH)	h	h _t	B _t	cot α _d	h _b	B	tan α _B	cot α _u	A _c	R _c	G _c	γ _f
0,0	45	19,85	15,0	4,18-7,00	-6,20 -7,00	0	0,0	1,50-3,56	18,0	19,0	20,0	0,42-0,59
4,0	49	23,85	15,0	4,00-7,00	-2,20 -11,00	0	0,0	1,50-3,15	14,0	15,0	20,0	0,47-0,65

Tal como para as ferramentas NN_OVERTOPPING2 e OVERTOPPING, para a rede ARTMAP-Fuzzy existiu uma representação da estrutura (i.e., uma combinação dos parâmetros referidos) que conduziu aos melhores resultados de galgamento para cada nível de maré e são esses resultados que se apresentam nesta comunicação. Note-se que, tal como indicado na secção 5.2, essa representação da estrutura não foi exatamente a mesma para as três ferramentas neuronais consideradas nesta comunicação. Na Tabela 4 e na Fig. 8 apresenta-se uma comparação dos caudais médios de galgamento obtidos com a rede ARTMAP-Fuzzy e provenientes do modelo físico reduzido para os 12 ensaios analisados.

Tabela 4 - Comparação dos galgamentos provenientes da rede ARTMAP-Fuzzy, q_{ART}, e do modelo reduzido, q_{MF}, para os 12 ensaios analisados.

Ensaio	Nível de Maré (m ZH)	T _D (s)	H _s (m)	q _{MF} (10 ⁻³ m ³ /s/m)	q _{ART} (10 ⁻³ m ³ /s/m)
1	0,0	10	6	0,0	0,4
2		14	9	0,0	0,7
3		18	11,5	1,8	3,9
4		16	12	0,3	1,0
5		20	13	13,5	17,1
6		20	14	35,3	48,2
7	4,0	10	6	0,0	2,2
8		14	9	0,6	2,1
9		18	11,5	44,2	46,8
10		16	12	33,3	45,8
11		20	13	138,6	178,9
12		20	14	246,8	200,0

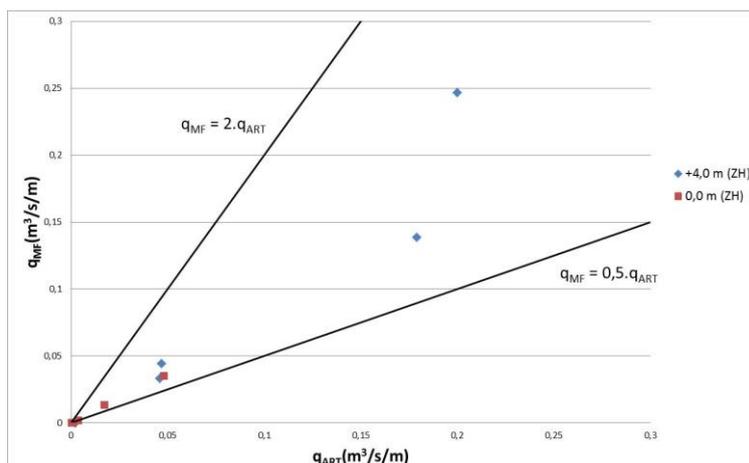


Figura 8 – Comparação dos galgamentos provenientes da rede ARTMAP-Fuzzy, q_{ART} , e do modelo reduzido, q_{MF} , para os 12 ensaios analisados.

A Tabela 5 contém os valores calculados do erro médio quadrático (RMSE) e da média (μ) e do desvio padrão (σ) do erro viés (EV) para os caudais médios de galgamento:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C^{MF}(n) - C^{ART}(n))^2} \quad (1)$$

$$EV = C^{MF}(n) - C^{ART}(n) \quad (2)$$

Tabela 5 – Mapeamento dos erros dos caudais médios de galgamento obtidos através da rede ARTMAP-Fuzzy (melhor representação da estrutura) para os 12 ensaios analisados.

Nível de Maré (m ZH)	Erros (m ³ /s/m)	
0,0	RMSE	0,0055
	EV	μ -0,0034
		σ 0,0048
4,0	RMSE	0,0258
	EV	μ -0,0021
		σ 0,0282

Como se pode verificar, à exceção dos ensaios para os quais os caudais médios de galgamento foram nulos no modelo físico, a rede ARTMAP-Fuzzy foi capaz de estimar valores de galgamento próximos dos valores observados no modelo. Outro fator de interesse, verificado através da análise da média dos erros viés, é que a rede tende a sobrestimar os valores de galgamento quando comparada com os valores apresentados no modelo físico (à exceção do ensaio 12). No que diz respeito à análise do maior desvio padrão dos erros viés, o valor de 0,0282 m³/s/m, ou seja 28,2 l/s/m, ainda é muito alto.

Assim, os valores previstos pela rede ARTMAP-Fuzzy terão que ser refinados através de uma análise de sensibilidade aos parâmetros de treino da rede.

5.2 Comparação com Resultados de Outras Ferramentas Neurais

Bravo *et al.* (2013) comparam os caudais médios de galgamento obtidos pelas ferramentas neuronais NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) e OVERTOPPING (Verhaeghe, 2005)

com os caudais medidos no modelo físico reduzido para o caso de estudo em questão. A Tabela 6 e a Fig. 9 apresentam essa comparação para a representação da estrutura que conduziu aos melhores resultados de galgamento para cada nível de maré com cada uma das duas ferramentas. Inclui-se também na Tabela 6 os correspondentes resultados da rede ARTMAP-Fuzzy. Os erros apresentam-se na Tabela 7.

Como se pode verificar, as ferramentas NN_OVERTOPPING2 e OVERTOPPING estimam valores de galgamento bastante próximos dos valores observados no modelo físico. Para os caudais médios de galgamento mais reduzidos, os quais são muitas vezes condicionantes do ponto de vista da operação da estrutura e da utilização das áreas circundantes, as ferramentas tendem a sobrestimar os caudais medidos e a ferramenta NN_OVERTOPPING2 nem sempre foi capaz de produzir uma estimativa de galgamento (ensaio 1), limitada pelo seu domínio de aplicabilidade. Ao contrário da ferramenta NN_OVERTOPPING2 e ARTMAP-Fuzzy, a ferramenta OVERTOPPING é capaz de identificar estados de agitação incidentes na estrutura que originam galgamentos nulos (ensaio 1). Contudo, para alguns estados de agitação que deram origem a galgamentos nulos no modelo físico reduzido, OVERTOPPING estimou também galgamento diferente de zero. As previsões de galgamento da ferramenta OVERTOPPING foram, na maior parte dos casos, mais próximas das medições no modelo físico reduzido do que aquelas estimadas por NN_OVERTOPPING2 e ARTMAP-Fuzzy, quando o nível de maré foi de +4,0 m (ZH). No caso do nível de maré 0,0 m (ZH), verificou-se que a rede ARTMAP-Fuzzy foi a que conduziu a resultados mais próximos do modelo físico no caso dos testes 3, 4 e 5, sendo a ferramenta OVERTOPPING a melhor nos restantes testes.

Tabela 6 - Comparação dos galgamentos provenientes das ferramentas NN_OVERTOPPING2, q_{NN} , OVERTOPPING, q_{OVER} , e ARTMAP-Fuzzy, q_{ART} , com os medidos no modelo reduzido, q_{MF} , para os 12 ensaios analisados.

Ensaio	Nível de Maré (m ZH)	T_p (s)	H_s (m)	q_{MF} ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$)	q_{NN} ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$)	q_{OVER} ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$)	q_{ART} ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$)
1		10	6	0,0	---1	0,0	0,4
2		14	9	0,0	0,3	0,2	0,7
3	0,0	18	11,5	1,8	5,1	4,9	3,9
4		16	12	0,3	4,3	4,3	1,0
5		20	13	13,5	21,2	20,3	17,1
6		20	14	35,3	37,4	34,6	48,2
7		10	6	0,0	0,1	0,1	2,2
8		14	9	0,6	3,3	3,5	2,1
9	4,0	18	11,5	44,2	38,0	45,5	46,8
10		16	12	33,3	33,3	39,6	45,8
11		20	13	138,6	131,3	140,0	178,9
12		20	14	246,8	199,0	261,0	200,0

¹ Parâmetro de entrada fora do intervalo de aplicabilidade. Nenhuma previsão é dada.

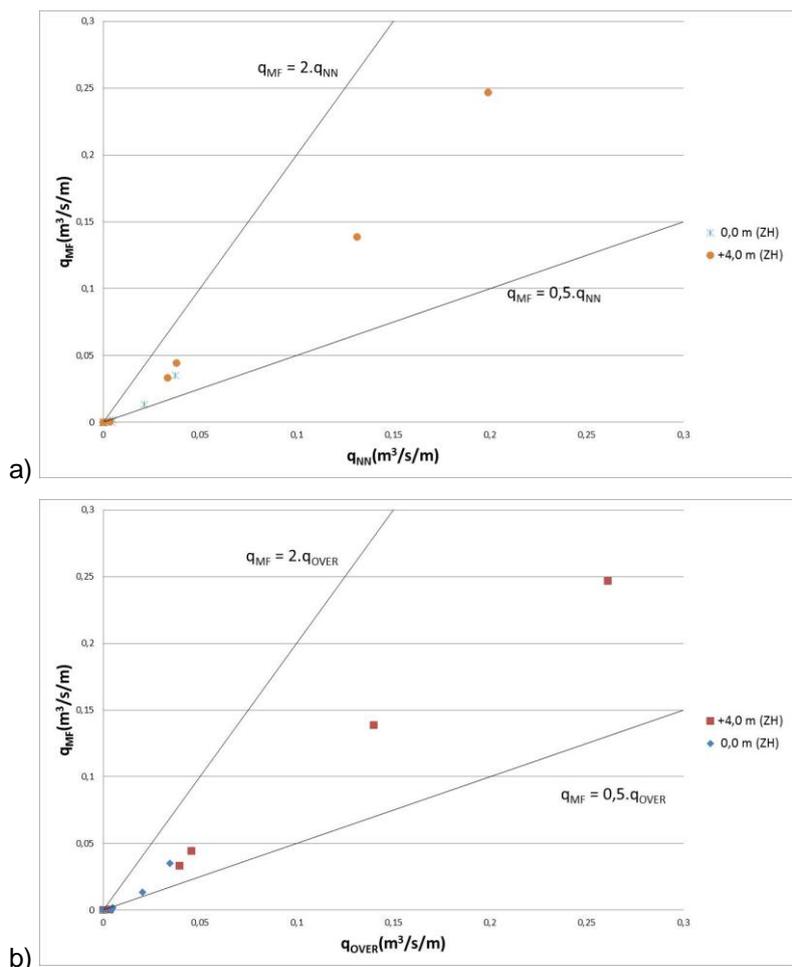


Figura 9 – Comparação dos galgamentos provenientes das ferramentas a) NN_OVERTOPPING2, q_{NN} , e b) OVERTOPPING, q_{OVER} , e do modelo reduzido, q_{MF} , para os 12 ensaios analisados.

Tabela 7 – Mapeamento dos erros dos caudais médios de galgamento obtidos através das ferramentas NN_OVERTOPPING2, OVERTOPPING e ARTMAP-Fuzzy para as melhores representações da estrutura.

Nível de Maré (m ZH)	Erros ($m^3/s/m$)				
		NN_OVERTOPPING2	OVERTOPPING	ARTMAP-Fuzzy	
0,0	RMSE	0,0042	0,0035	0,0055	
	EV	μ	-0,0035	-0,0034	-0,0022
		σ	0,0027	0,0048	0,0029
4,0	RMSE	0,0199	0,0065	0,0258	
	EV	μ	0,0098	-0,0021	-0,0044
		σ	0,0190	0,0282	0,0053

De uma forma global, a comparação dos resultados apresentados para as três redes permite concluir que, em termos de RMSE, a rede ARTMAP-Fuzzy apresentou resultados menos bons que as outras duas ferramentas neuronais. Contudo, em termos de EV, a rede ARTMAP-Fuzzy apresenta melhores resultados que as outras ferramentas para o nível de maré de 0,0 m (ZH) e para o nível de +4,0 m (ZH) aproxima-se mais do modelo físico que a rede NN_OVERTOPPING2. Tal como referido na secção anterior, os valores previstos pela rede

ARTMAP-Fuzzy terão que ser refinados através de uma análise de sensibilidade aos parâmetros de treino da rede.

Note-se que os melhores resultados de galgamento das três ferramentas utilizadas foram obtidos para representações distintas da estrutura (diferente combinação de parâmetros geométricos): com a rede ARTMAP-Fuzzy, a berma fictícia estava colocada à cota +6,20 m (ZH) para o nível de maré de 0,0 m (ZH) e a berma estava a -7,00 m (ZH) para o nível de maré de +4,0 m (ZH); no entanto, o valor de γ_f abaixo do ZH era 0,60 e acima do ZH era 0,80 para ambos os níveis. Com NN_OVERTOPPING2, a berma fictícia estava colocada à cota +6,20 m (ZH), o valor de γ_f abaixo do ZH era 0,47 e acima do ZH era 0,85 para o nível de maré de 0,0 m (ZH) e era 0,60 abaixo do ZH e 0,80 acima do ZH para o nível de maré de +4,0 m (ZH). Com OVERTOPPING, para o nível de maré de 0,0 m (ZH), a berma fictícia estava coincidente com o nível de maré e os de valores de γ_f eram 0,55 abaixo do ZH e 0,80 acima do ZH, enquanto que para o nível de maré de +4,0 m (ZH), a berma fictícia estava colocada à cota +6,20 m (ZH) e os de valores de γ_f eram iguais aos utilizados para o nível de maré de 0,0 m (ZH).

6. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, apresentou-se a utilização de uma nova ferramenta para o estudo do galgamento de estruturas marítimas, a Rede Neuronal Artificial do tipo ART (*Adaptive Resonance Theory*), com técnicas de Lógica Fuzzy (Carpenter e Grosseberg, 1987; Carpenter *et al.*, 1991).

A rede foi treinada com todos os casos da base de dados do projeto CLASH (Van der Meer *et al.*, 2009). Posteriormente, efetuou-se um diagnóstico da rede com 3.000 casos escolhidos, entre os quase 10.500 casos dessa base de dados, e os resultados da rede ARTMAP-Fuzzy mostraram que, mesmo utilizando para parâmetros de treino da rede valores ainda não otimizados, mas, utilizando um parâmetro de vigilância alto no diagnóstico, a rede apresenta estimativas do caudal médio de galgamento muito próximas dos valores constantes da base de dados CLASH (com coeficientes de correlação superiores a $R^2=0,99$), sobretudo para caudais $q_{CLASH}>0,00005 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Esta rede foi aplicada ao estudo do galgamento de um trecho do molhe Oeste do Porto de Sines e os seus resultados foram comparados com dados de galgamento obtidos em ensaios em modelo físico bidimensional realizados no LNEC (2008) para o perfil em estudo. Os resultados da nova ferramenta foram ainda comparados com os provenientes de duas ferramentas neuronais do tipo *multi-layer feed-forward*: NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) e OVERTOPPING (Verhaeghe, 2005), desenvolvidas no âmbito do projeto CLASH (Van der Meer *et al.*, 2009).

Em relação aos resultados do modelo físico, à exceção dos ensaios para os quais os caudais médios de galgamento medidos foram nulos, a rede ARTMAP-Fuzzy foi capaz de estimar valores de galgamento próximos dos valores observados no modelo, embora a rede tenda a sobrestimar os valores de galgamento.

Comparativamente aos resultados obtidos com as ferramentas NN_OVERTOPPING2 e OVERTOPPING, verificou-se que, em termos do erro médio quadrático (RMSE), a rede ARTMAP-Fuzzy apresentou resultados menos bons que as outras duas ferramentas neuronais. Contudo, em termos de erro viés (EV), a rede ARTMAP-Fuzzy apresenta melhores resultados que as outras ferramentas para o nível de maré de 0,0 m (ZH) e para o nível de +4,0 m (ZH) aproxima-se mais do modelo físico que a rede NN_OVERTOPPING2. Com efeito, para o caso do nível de maré de 0,0 m (ZH), verificou-se que a rede ARTMAP-Fuzzy foi a que conduziu a resultados mais próximos do modelo físico no caso de três dos seis testes analisados, sendo a ferramenta OVERTOPPING a melhor nos restantes testes. Verificou-se também que, ao contrário da ferramenta NN_OVERTOPPING2 e ARTMAP-Fuzzy, a ferramenta OVERTOPPING, que pode ser considerada a ferramenta que apresentou melhor desempenho, é capaz de, em alguns casos, identificar estados de agitação incidentes na estrutura que originam galgamentos nulos.

Assim, os resultados da rede ARTMAP-Fuzzy são muito promissores e, no sentido de melhorar

o seu desempenho, a análise de sensibilidade aos parâmetros de treino da rede constitui trabalho futuro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à:

- Fundação CAPES, Ministério da Educação do Brasil, Brasília. Processo: 18911-12-9.
- Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal, Suporte Financeiro através do Projeto HIDRALERTA - PTDC/AAC-AMB/120702/2010.
- Administração do Porto de Sines, S.A., Portugal, a permissão para a publicação de alguns resultados dos ensaios em modelo físico reduzido das soluções propostas para a reabilitação final do molhe Oeste do Porto de Sines, realizados no LNEC.

REFERÊNCIAS

Braga, A.P. (2000). Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.

Bravo, A. (2012). Comparação de duas Ferramentas de Cálculo do Galgamento Baseadas na Análise de Redes Neurais. Dissertação de Mestrado, ISEL, Lisboa, Portugal.

Bravo, A.A., Santos, J.A. e Reis, M.T. (2013). Comparison of Two Wave Overtopping Calculation Tools Based on Neural Network Analysis. Proc. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, 4 a 7 de Junho, LNEC, Portugal.

Carpenter, G.A. e Grosseberg, S. (1987). A Massively Parallel Architecture for a Self-organizing Neural Pattern Recognition Machine. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 37, pp. 54-115.

Carpenter, G.A.; Grossberg, S. e Reynolds, J.H. (1991). ARTMAP: Supervised Real-learning and Classification of Nonstationary Data by a Self-organizing Neural Network. Neural Network, Vol. 4, No. 5, pp. 565-588.

Coeveld, E.M.; Van Gent, M.R.A. e Posueta, B. (2005). Neural Network Manual NN_OVERTOPPING2. CLASH Workpackage 8, WL/Delft Hydraulics, Report, Delft, Netherlands.

LNEC (2008). Ensaios em Modelo Reduzido da Reconstrução do Molhe Oeste do Porto de Sines. Relatório 141/2008-NPE, LNEC, Lisboa, Março.

Lopes, M.L.M. (2005). Desenvolvimento de Redes Neurais para Previsão de Cargas Elétricas de Sistemas de Energia Elétrica. Tese de Doutoramento – UNESP, Ilha Solteira, S. Paulo, Brasil.

Reis, M.T., Neves, M.G., Lopes, M.R. e Silva, L.G. (2011). Estudo de Galgamento do Molhe Oeste do Porto de Sines. Proc. 7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Porto, Outubro.

Santos, F.L., Reis, M.T., Fortes, C.J., Lotufo, A.D.P. e Maciel, G.F. (2013). ARTMAP Artificial Neural Networks with Fuzzy Logic. Their Application to Study the Wave Conditions at Sines Port, Portugal. Proc. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, 4 a 7 de Junho, LNEC, Portugal.

Van der Meer, J.W., Verhaeghe, H. e Steendam, C.J. (2009). The New Wave Overtopping Database for Coastal Structures. Coastal Engineering, 56, pp.108-120.

Verhaeghe, H. (2005). Neural Network Prediction of Wave Overtopping at Coastal Structures. Tese de Doutoramento, Universidade de Ghent, Bélgica.