

APLICAÇÃO DO CONCEITO DA PROFUNDIDADE DE MISTURA GERADA PELA AÇÃO DE ONDAS NO RESERVATÓRIO DE LAJEADO, TOCANTINS

Marcelo Marques¹, Fernando O. de Andrade², Cristhiane M. P. Okawa¹, Elaine P. Arantes³
e Isabela Arantes Ferreira³

¹Universidade Estadual de Maringá, Umuarama, Paraná, Brasil.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

³Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil.

E-mail: mmarques@uem.br, fandrade@utfpr.edu.br, eparantes@uem.br, isarantes10@gmail.com

Introdução

A ação do vento em corpos de água interiores pode ser importante principalmente quando o eixo longitudinal do corpo de água é orientado na sua direção predominante. A profundidade média também é um fator importante, pois corpos de água rasos têm uma resposta mais rápida a processos tais como aquecimento e resfriamento ou a ressuspensão de sedimentos, influenciados por ondas geradas pelo vento (Arantes et al., 2015). Estas ondas podem induzir processos de mistura em toda coluna d'água tendendo a destruir a estratificação vertical favorecendo a criação de gradientes longitudinais e transversais mais intensos (Smith, 1994). Estudos em corpos hídricos desse tipo frequentemente demandam informações relacionadas à dinâmica da massa hídrica.

O termo profundidade de mistura é definido como a profundidade máxima afetada pela onda ao se propagar. O efeito da dispersão longitudinal provocado por ondas geradas pela ação do vento constitui-se em um processo de importante impacto no ambiente podendo provocar suspensão de sedimentos e estratificação térmica do corpo hídrico.

O conceito foi apresentado por Marques (2013) e se baseia na constatação de que uma onda de determinado comprimento, propagando-se, perturba a massa líquida a uma profundidade máxima equivalente à metade de seu comprimento. Desse modo, ao determinar a metade do comprimento da onda em um ponto se está determinando a profundidade de mistura.

No presente trabalho o conceito de profundidade de mistura foi aplicado ao reservatório de Lajeado de maneira a obter a uma representação dessa variável em toda a superfície livre para 16 direções de ventos e para intensidades de 5, 10, 15 e 20 ms⁻¹. A técnica de modelagem computacional empregada foi a paramétrica bidimensional (Marques e Andrade, 2017).

Materiais e métodos

Área de estudo

O reservatório de Lajeado que está situado no estado de Tocantins, Brasil. Este encontra-se em área de cerrado com baixo tempo de retenção (24 dias) e morfometria pouco complexa. O reservatório possui profundidade média de 3m, uma superfície de 626 km², área de drenagem de 184.219,0 km² e a velocidade média do rio Tocantins de 300m/h (Pereira, 2002). As análises do presente trabalho foram desenvolvidas no período de março de 2016 com visitas de campo e no segundo semestre de 2016 por meio de atividades de simulação computacional.

Modelo computacional

O modelo ONDACAD é capaz de calcular automaticamente a distribuição do fetch no reservatório mediante uso do método geométrico de Saville (1954). De acordo com o método de Saville, o fetch em cada ponto do domínio e para dada direção é:

$$F = \sum_1 x_i \cos \alpha_i / \sum_1 \cos \alpha_i \quad [1]$$

onde F é o fetch, α_i é o ângulo entre a direção do vento e a direção secundária; e x_i é o comprimento na direção secundária. O modelo ONDACAD aplica essa equação em uma malha computacional estruturada que cobre o reservatório de Lajeado.

O campo resultante de fetch é convertido em um campo de profundidade de mistura mediante aplicação de uma equação paramétrica. A equação paramétrica é obtida com base em conceitos físicos tratados pela teoria linear de ondas, para a qual o comprimento da onda em águas profundas é definido como:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad [2]$$

onde L é o comprimento da onda, g é a aceleração gravitacional e T é o período da onda.

Para a determinação do período da onda é adotado o modelo SMB. Trata-se de uma equação paramétrica difundida no meio técnico e tratada com profundidade por Marques (2013). O período da onda é condicionado pela aceleração da gravidade (g), pelo valor de fetch (F) e pela intensidade do vento (U) de acordo com:

$$T = 7,54 \frac{U_{10}}{g} \tanh \left[0,077 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0,25} \right] \quad [3]$$

Segundo Bretschneider (1966), o método referido como SMB foi inicialmente proposto por Sverdrup e Munk (1947) e em seguida modificado pelo autor, recebendo as letras iniciais do sobrenome de seus idealizadores. O método SMB foi objeto de inúmeras revisões e é um dos mais importantes modelos paramétricos de previsão de ondas (Cardone e Ross, 1979). É bastante empregado em função de sua simplicidade e eficiência (Kinsman, 1965; Wiegel, 1970).

Substituindo a equação [3] na equação [2] e assumindo que a profundidade de mistura (pfm) é a metade do comprimento da onda (L) é possível escrever que a profundidade de mistura é dada por:

$$pfm = \frac{4,52U_{10}^2}{g} \left\{ \tanh \left[0,077 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0,25} \right] \right\}^2 \quad [4]$$

Pela condição assumida de campo de ondas que são limitadas pelo fetch, as informações sobre a duração do vento tornam-se prescindíveis. Foi através da equação [4] que o campo de fetch foi transformado em um campo de profundidade de mistura pela utilização do modelo ONDACAD.

Resultados e discussões

A aplicação do modelo computacional ONDACAD permitiu a geração de 16 mapas, um para cada direção e para cada uma das 4 intensidades do vento, totalizando 64 mapas. As profundidades máximas atingidas para todas as direções e intensidades de vento são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1.- Profundidades máximas (unidade em metros) atingidas pela onda para irreções E a WNW.

U (m/s)	Direção	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW
	Fetch máx (km)	8,5	9,60	14,10	14,90	15,20	14,90	13,10	9,30
5	PFM máx (m)	3,2	3,35	3,89	3,97	4,00	3,97	3,78	3,31
10		4,5	4,62	4,95	5,00	5,01	5,00	4,89	4,59
15		8,2	8,26	8,53	8,57	8,58	8,57	8,48	8,23
20		14,6	14,71	14,94	14,98	14,99	14,98	14,90	14,65

Tabela 2.- Profundidades máximas (unidade em metros) atingidas pela onda para irreções W a ESE.

U (m/s)	Direção	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE
	Fetch máx (km)	8,30	10,10	14,30	15,80	15,90	15,40	13,60	9,20
5	PFM máx (m)	3,16	3,42	3,91	4,06	4,07	4,02	3,84	3,29
10		4,49	4,66	4,96	5,05	5,05	5,03	4,92	4,58
15		8,15	8,29	8,54	8,61	8,61	8,59	8,50	8,22
20		14,62	14,74	14,95	15,01	15,01	14,99	14,92	14,65

A tabela 2 mostra que a menor profundidade perturbada pelas ondas foi de 3,2 metros, atingida pelo vento de 5m/s no sentido transversal leste. Ventos provenientes da direção sul permitem a combinação aos maiores comprimentos de fetch, gerando ondas que atingem as maiores profundidades. Por meio da Tabela 2 pode-se verificar também que vento soprando a 20 ms⁻¹ geraria ondas que, ao se propagar, atingiriam 15 metros de profundidade caso as condições batimétricas assim permitissem.

Considerações finais

O método gráfico de determinação do *fetch*, de aplicação trabalhosa pelo projetista, por exigir uma excessiva quantidade de operações gráficas, pôde ser aprimorado e aplicado com sucesso pela utilização do modelo computacional ONDACAD viabilizando a aplicação do conceito de campo de *fetch* e sua transformação para campo de profundidade de mistura. A técnica foi validada para altura de ondas (Marques e Andrade, 2017), tornando oportuna a validação da profundidade de mistura por estudos futuros.

Os resultados desse estudo indicam que o reservatório de Lajeado dificilmente atinge uma condição de estratificação térmica, devendo ser comum a ressuspensão de sedimentos do fundo. As maiores profundidades foram atingidas para ventos orientados na direção do comprimento predominante do reservatório. A aplicação do conceito de profundidade de mistura via modelagem paramétrica bidimensional mostrou-se viável. O reduzido tempo de processamento na geração dos mapas e a demanda somente das informações sobre o vento (intensidade e direção) pode tornar oportuna a incorporação do modelo em sistemas de previsão em tempo real.

Um importante desdobramento que pode ser empreendido por trabalhos futuros é a incorporação da batimetria do lago no processo de modelagem, de modo a permitir o mapeamento das tensões no fundo geradas pela onda ao se propagar.

Agradecimentos

Os autores desse trabalho agradecem a Fundação Araucária.

Referências

- Arantes, E. P.; Marques, M.; Andrade F. O.; Okawa, C. M. P.; Souza, M. L.. 2015. Conceito da profundidade de mistura gerada pela ação de ondas aplicado à Lagoa dos Patos, RS, Brasil. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 21. (SBRH), Brasília. Anais. São Paulo, 2015.
- Bretschneider, C. L.. 1966. Wave generation by wind, deep and shallow water. In: A.T. Ippen (Editor), Estuary and Coastline Hydrodynamics. McGraw-Hill, New York, pp. 744.
- Cardone, V. J.; Ross, D. B.. 1979. Wave Prediction Methods and Data Requirements, Ocean Wave Climate, edited by M. D. Earle and A. Malahoff, Plenum Publishing Corp.
- Kinsman, B. 1965. Wind Waves; Their Generation and Propagation on the Ocean Surface. Prentice Hall, Inc., 676 pp.
- Marques, M.. 2013. Modelagem paramétrica bidimensional para simulação de ondas em águas continentais. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 219 pp.
- Marques, M.; Andrade, F. O. 2017. Automated computation of two-dimensional fetch fields: case study of the Salto Caxias reservoir in southern Brazil. Lake and
- MPereira, V. L. R.. 2002. A Limnologia e o gerenciamento integrado do reservatório da Usina Hidrelétrica Luis Eduardo Magalhães - UHE Lajeado Tocantins. Tesis Doctoral de La Universidad Estadual de São Paulo, CRHEA-EESC-USP, Brasil: 262 p
- Saville, T.. 1954. The effect of fetch width on wave generation. *Technical Memorandum No. 70*, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 9 pp
- Sverdrup, H.U.; Munk, W.H.. 1947. Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting. Publication 601, *Hydrographic Office*, U.S. Navy, pp. 50
- Wiegel, R. L.; Noda, E. K.; Kuba, E. M.; Gee, D. M.; Tornberg, G. F.. 1970. Water waves generated by landslides in reservoir, J. of the Waterways and Harb. Div., *Proc. of the Am. Soc. of Civ. Eng.* 96 (WW2): pp. 307-333