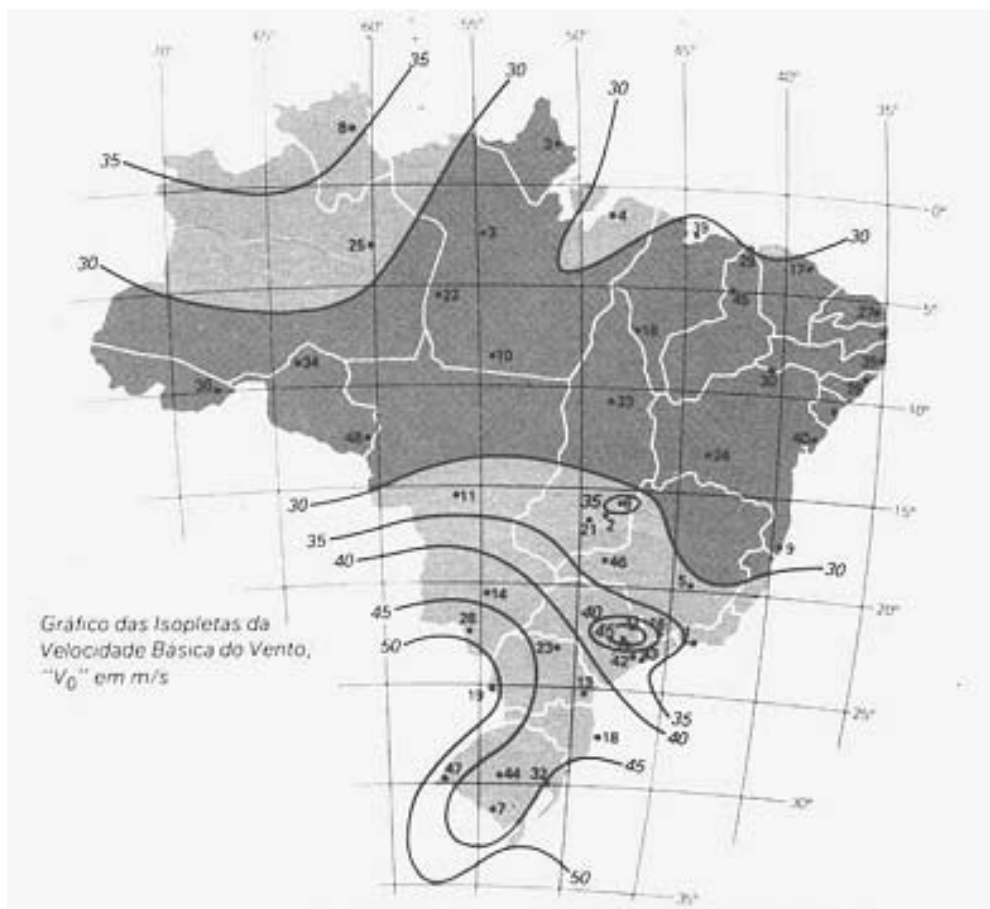


Capítulo 80

Efeito do vento em rios e lagos



Mapa das Isopletas de vento. Velocidade básica (m/s)

SUMÁRIO

| Ordem | Assunto |
|--------------|---|
| 80.1 | Introdução |
| 80.2 | Determinação da borda livre de um lago conforme Stevenson |
| 80.3 | Fórmula de Molitor |
| 80.4 | Determinação da altura da onda conforme Narfet |
| 80.5 | Comprimento da onda conforme Eckart, 1952 |
| 80.6 | Tensão trativa em rios |
| 80.7 | Bibliografia e livros consultados |

10 páginas

Capítulo 80-Efeito do vento em rios e lagos

80.1 Introdução

Em lagos é muito importante a determinação da borda livre, pois a ação do vento faz criar ondas na superfície da água que atinge até uma determinada altura. A Figura (80.1) mostra esquematicamente o comprimento, altura e o período da onda.

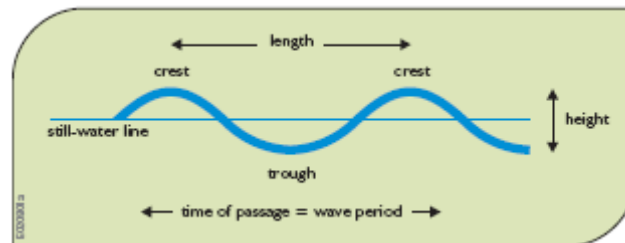


Figura 80.1- Comprimento, altura e período da onda

Fonte: Unesco, 2005

Conforme Asce, 1996 as ondas na água podem ter diversas origens: vento, força gravitacional devido a Lua, atividade sísmica ou movimento de água dentro de um vaso ou deslocamento de um navio. Existem teorias para as ondas do mar, mas para ondas em lagos e rios o processo é estatístico. Em rios e lagos é importante a velocidade do vento e o fetch.

80.2 Determinação da borda livre de um lago conforme Stevenson

Conforme prof. dr. K. Tamada, 1999 da EPUSP a altura da onda h_o é obtida através da fórmula empírica de Stevenson.

$$h_o = 0,028 \times (V \times F)^{0,5} + 0,76 - 0,26 \times (F)^{(1/4)}$$

Sendo:

h_o = altura da onda (m)

V = velocidade do vento (km/h). São Paulo: velocidade do vento adotada está entre 100km/h a 120km/h

F = *fetch* (km). *Fetch* é a medida em linha reta sem cortar qualquer obstáculo físico como ilhas e penínsulas até o barramento conforme Figura (80.2). O ângulo entre o *fetch* e a direção do vento é denominado de Φ .

h = borda livre (m)

$h = 1,40 \times h_o$

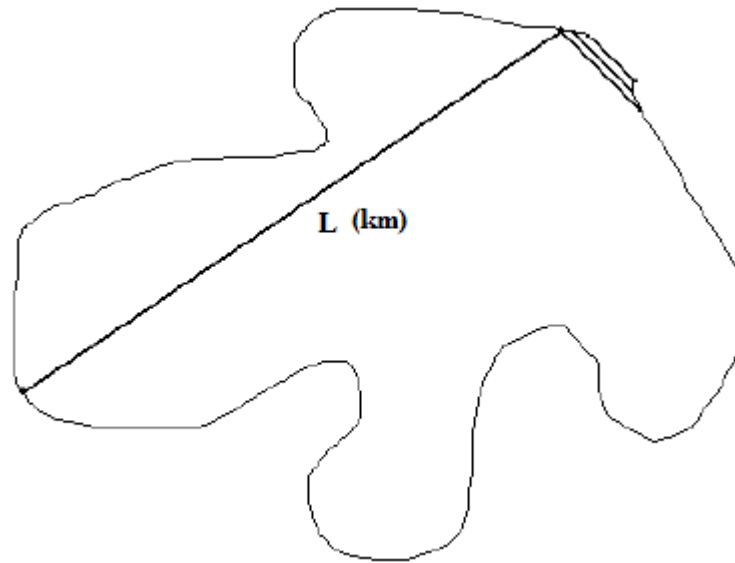


Figura 80.2- Fetch de comprimento L em km

Conforme Novak, 2007 temos:

$F < 20 \text{ km}$

$$H = 0,34 \times F^{0,5} + 0,76 - 0,26 \times F^{1/4}$$

Para fetch maior que 20Km despreza-se os últimos dois termos ficando:

$F > 20 \text{ km}$

$$H = 0,34 \times F^{0,5}$$

Sendo:

F= fetch (km)

H= altura da onda (m)

Conforme Novak, 2007 em reservatórios de tamanho médio o *freeboard* fw pode ser estimado por:

$$fw = 0,75H + c^2/2g$$

Sendo:

fw= *freeboard* (m)

H= altura da onda (m)

c= velocidade da onda (m/s)

g= 9,81 m/s² =aceleração da gravidade

Mas o valor de c é:

$$c = 1,5 + 2H$$

E então teremos:

$$fw = 0,75 H + (1,5 + 2H)^2/2g$$

Onda significativa H_s

O conceito de altura de onda significativa H_s que é a altura média do terço da da ondar mais alta.

É recomendado por ICE, 1996 conforme Novak, 2007 que a altura de projeto H_d seja um múltiplo de H_s variando de $H_d = 0,75 H_s$ to $1,3 H_s$ para barragens de concreto.

Para barragens em terra $H_d = 1,67 H_s$. O valor de H_s pode ser obtido conforme Novak, 2007 pela Figura (80.3) ou pela equação:

$$H_s = V \cdot F^{0,5} / 1760$$

Sendo:

H_s = altura da onda significativa (m)

V = velocidade do vento (m/s)

F = fetch (m)

H_d = altura significativa da onda (m). É a altura da onda para o projeto.

$H_d = 0,75 H_s$ ou $1,3 H_s$ para barragens de concreto

$H_d = 1,67 H_s$ para barragens em terra

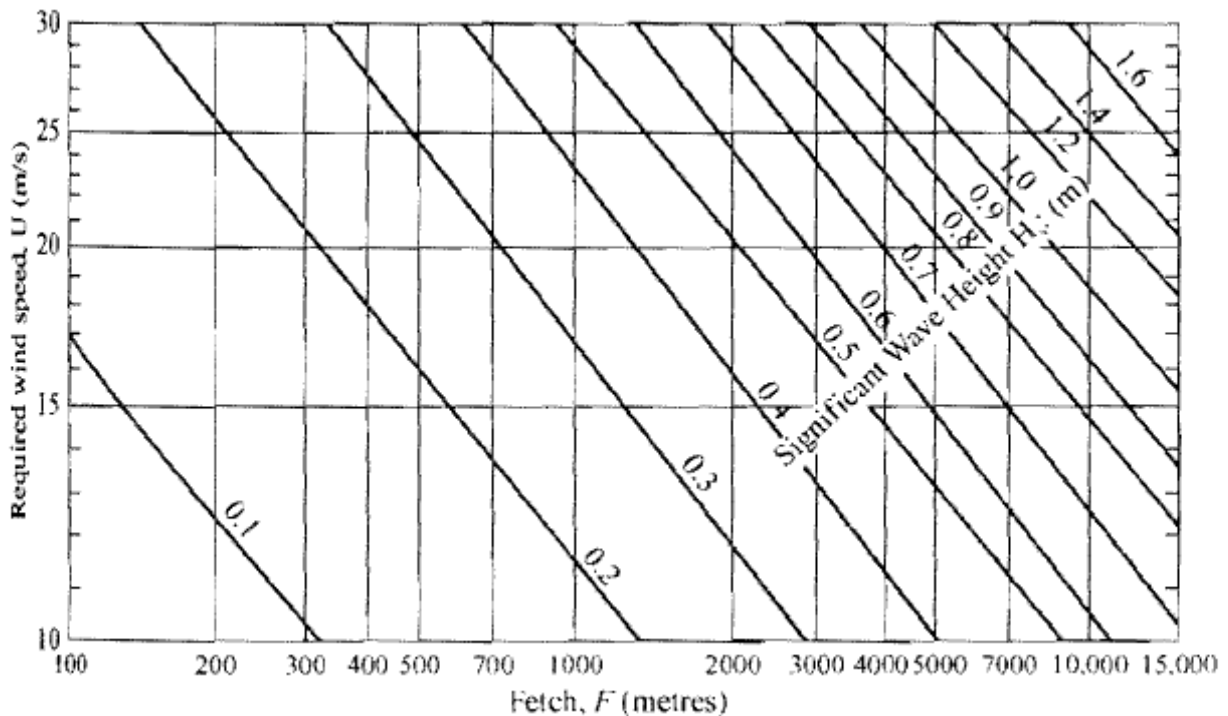


Figura 80.3- Relação entre o fetch (m) e a velocidade do vento (m/s) para se achar a altura significativa da onda (m). ICE, 1996 in Novak, 2007.

Novak, 2007 salienta que a decisão final é do projetista que terá que levar em consideração as varia situações como:

- Efeito do nível do reservatório devido ao *flood routing*
- Efeitos sísmicos
- Efeitos dos ventos na superfície da água do reservatório
- Efeitos e ação dos ventos na barragem.

Fórmula de Gaillard

$$v = 1,5 + 2 \times h_o$$

Sendo:

v = velocidade das **ondas** (m/s). Nota: não é a mesma coisa que velocidade do **vento** V
 h_o = altura das ondas (m).

Exemplo 80.1

Calcular a folga para uma barragem que tem um *fetch* de $F=25\text{km}$

<http://www.carisia.com.br/barragensG-Aula3-projetodebarragens.pdf>

Acessado em 31 de outubro de 2007

$F > 18\text{km}$

$$h_o = 0,34 \times F^{0,5}$$

$$h_o = 0,34 \times 25^{0,5} = 1,70\text{m}$$

$$v = 1,5 + 2 \times h_o$$

v = velocidade das ondas (m/s)

$$v = 1,5 + 2 \times 1,70 = 4,90\text{m/s}$$

$$\text{Folga} = 0,75 \times h_o + \frac{v^2}{2g} = 0,75 \times 1,70 + \frac{4,9^2}{(2 \times 9,81)} = 2,50\text{m}$$

Exemplo 80.2

Calcular a borda livre de uma represa do Cabuçu em Guarulhos com *fetch* = $1,5\text{km}$, velocidade do vento de 120km/h .

$$h_o = 0,028 \times (V \times F)^{0,5} + 0,76 - 0,26 \times (F)^{(1/4)}$$

$$h_o = 0,028 \times (120 \times 1,5)^{0,5} + 0,76 - 0,26 \times (1,5)^{(1/4)}$$

$$h_o = 0,38 + 0,76 - 0,29 = 1,27\text{m (altura da onda)}$$

$$h = 1,40 \times h_o = 1,4 \times 1,27 = 1,78\text{m (borda livre)}$$

80.3 Fórmula de Molitor

Para $F < 30\text{km}$

Para $F > 30\text{km}$

$$h_o = 0,75 + 0,032 \times (V \times F)^{0,5} - 0,27 \times (V \times F)^{(1/4)}$$

$$h_o = 0,032 \times (V \times F)^{0,5}$$

Sendo:

h_o = altura da onda (m)

V = velocidade do vento (km/h)

F = fetch (km). Nota: não confundir o fetch F com a folga F .

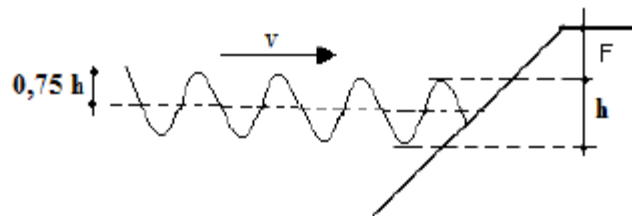


Figura 80.4- Altura da onda h e F = folga

A folga F é $0,75$ vezes a altura das ondas mais $V^2/2g$

$$F = 0,75h + \frac{v^2}{2g}$$

Onde:

h = altura das ondas (m)

v = velocidade das ondas (m/s)

g = aceleração da gravidade (m²/s)

80.4 Determinação da altura da onda conforme Narfet

Conforme Allan et al, 2000 a estimativa da altura da onda e do período pode ser obtida usando as equações de Narfet.

$$h_o = 0,0015 \times g^{-0,5} \times F^{0,5} \times [V \cos(\Phi)]$$
$$T_p = 2,6 \times g^{0,72} \times F^{-0,28} \times [V \cos(\Phi)]^{-0,44}$$

Sendo:

h_o = altura da onda (m)

F = *fetch* na direção do vento (m)

V = velocidade do vento (m/s)

(Φ) = ângulo entre a direção do vento e o Fetch

g = 9,81 m/s²

T_p = período da onda (s)

De modo geral segundo observações de Allan, 2000 a equação de Narfet aumenta um pouco o valor da altura da onda e diminui um pouco a período da onda, mas mesmo assim é usada.

Exemplo 80.3

Dada a velocidade do vento de 120 km/h (33,33 m/s) e *fetch* de 500 m calcular a altura da onda h_o e o período da onda T_p.

$$h_o = 0,0015 \times g^{-0,5} \times F^{0,5} \times [V \cos(\Phi)]$$
$$T_p = 2,6 \times g^{0,72} \times F^{-0,28} \times [V \cos(\Phi)]^{-0,44}$$

$$h_o = 0,0015 \times 9,81^{-0,5} \times 500^{0,5} \times [33,33 \cos(0)] = 0,36 \text{ m (altura da onda)}$$

$$T_p = 2,6 \times 9,81^{0,72} \times 500^{-0,28} \times [33,33 \cos(0)]^{-0,44} = 0,5 \text{ s (período)}$$

80.5 Comprimento da onda conforme Eckart, 1952

Conforme Eckart, 1992 in Allan, 2000 o comprimento da onda pode ser obtido usando a equação:

$$L = (g \times T_p^2 / (2 \times \text{PI})) \times \left\{ \tanh \left[\frac{4 \times \text{PI}^2 \times d}{T_p^2 \times g} \right] \right\}^{0,5}$$

Sendo:

L = comprimento da onda (m)

g = 9,81 m/s²

T_p = período (s)

tanh = tangente hiperbólica

d = profundidade do lago (m)

Exemplo 80.4

Dado um lago com profundidade d = 1,20 m, período T_p = 2,46 s

$$L = (g \times T_p^2 / (2 \times \text{PI})) \times \left\{ \tanh \left[\frac{4 \times \text{PI}^2 \times d}{T_p^2 \times g} \right] \right\}^{0,5}$$

$$L = (9,81 \times 2,46^2 / (2 \times \text{PI})) \times \left\{ \tanh \left[\frac{4 \times \text{PI}^2 \times 1,20}{2,46^2 \times 9,81} \right] \right\}^{0,5} = 7,69 \text{ m}$$

Portanto, o comprimento da onda L = 7,69 m.

80.6 Tensão trativa em rios

Conforme Tomaz, 2002 a tensão trativa média T é dada pela equação:

$$T = \gamma \cdot R \cdot S$$

Sendo:

T = tensão trativa média no perímetro molhado da seção transversal (N/m^2) ou Pascal Pa

γ = peso específico da água = $10000N/m^3$ (valor mais exato = 9800)

R = raio hidráulico (m)

S = declividade (m/m)

Sendo b a largura do rio e y altura da lâmina de água para um rio muito largo ($b/y > 4$) a tensão trativa no fundo do rio é:

$$T = \gamma \cdot y \cdot S$$

No talude a tensão trativa é menor, ou seja:

$$T = 0,7 \cdot \gamma \cdot y \cdot S$$

Conforme Unesco, 2005 a tensão trativa nos rios é a soma da tensão trativa devido ao escoamento e tensão trativa devido ao vento.

$$T = T_{\text{escoamento}} + T_{\text{vento}}$$

Tensão trativa devido ao escoamento do rio

Usando a equação da tensão trativa combinada com a equação de Manning obtemos a tensão trativa em N/m^2 ou $kg/m/s^2$ no fundo do rio dada pela equação:

$$T_{\text{vento}} = 1000 \times 9,81 \times U^2 \times n^2 / d^{(1/3)}$$

Sendo:

T_{vento} = tensão trativa devido ao vento

U = velocidade média do rio (m/s)

n = coeficiente de Manning do rio

d = profundidade do rio (m)

Tensão trativa devido ao vento

A tensão trativa no fundo do rio devido ao vento é dada pela equação:

$$T_{\text{vento}} = 0,25 \times 1000 \times f_w \times U_o^2$$

Sendo:

T= tensão trativa devido ao vento (N/m²)

f_w= fator de fricção (adimensional)

U_o= velocidade efetiva horizontal no fundo do rio devido a ondas (m/s)

$$U_o = \frac{\pi \times h_o}{(T_p \times \sinh(2 \times \pi \times d / L))}$$

Sendo:

U_o= velocidade horizontal no fundo devido as ondas (m/s)

h_o= altura da onda (m)

T_p= período da onda (s)

sinh= seno hiperbólico

L= comprimento da onda (m)

O valor aproximada de f_w:

$$f_w = \exp(-5,977 + 5,123 \times d^{-0,194})$$

Uma estimativa para f_w=0,32.

Geralmente a tensão trativa no fundo dos rios devido ao vento é muito pequena e é desprezada.

80.7 Bibliografia e livros recomendados

- ALLAN, JONATHAN et al. *Wind wave characteristics at Lake Dunstan, South Island, New Zealand*, 22 de março 2000.
- ASCE (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEER). *Hydrology handbook*, 2A ED.2006, 784 páginas.
- INTERNET- <http://www.carisia.com.br/barragensG-Aula3-projetodebarragens.pdf> Acessado em 31 de outubro de 2007
- INTERNET- <http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/hid.htm>. Acessado em 31 de outubro de 2007.
- NOVAK, P. et al. *Hydraulic Structures*. Editora E& FN Spon, 4a ed, 2007 com 700 páginas, ISBN 13-978-0-415-38625-8.
- TAMADA, K. *Construções hidráulicas*. EPUSP, 1999. Notas de aula PHD-511
- UNESCO. *Water resources systems planning and management*. Ano 2005.