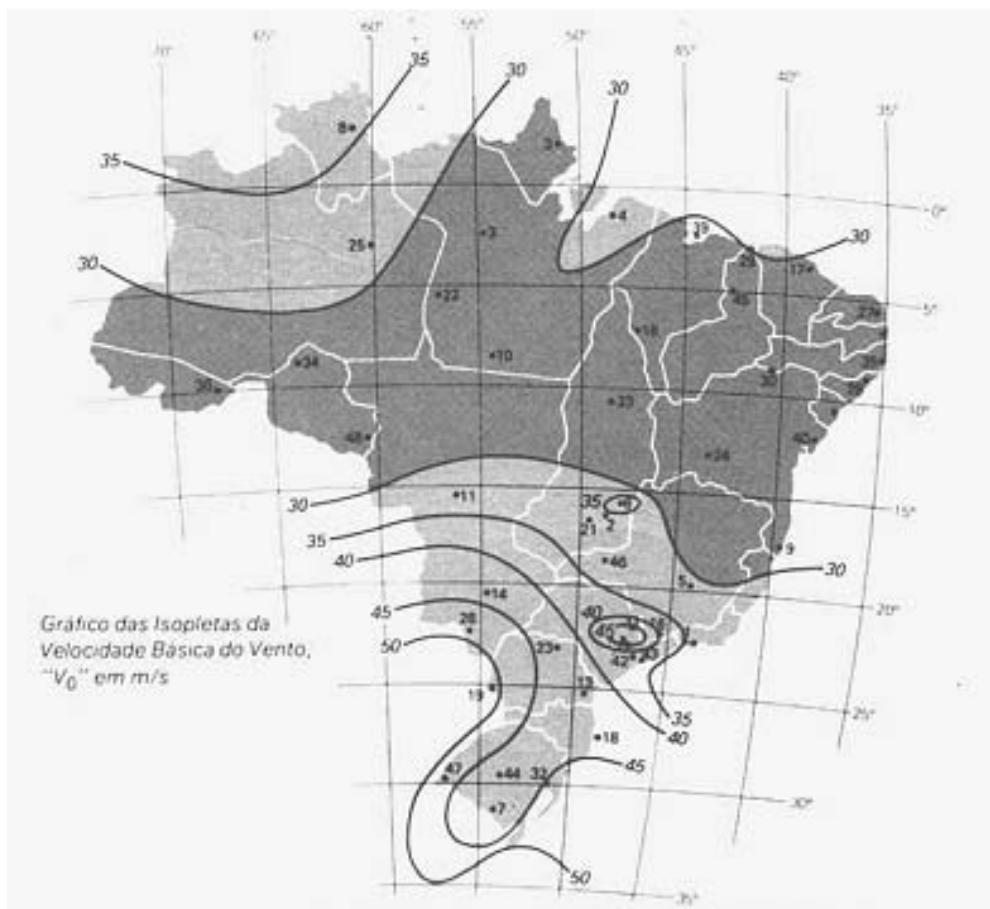


## Capítulo 80

### Efeito do vento em rios e lagos



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

## SUMÁRIO

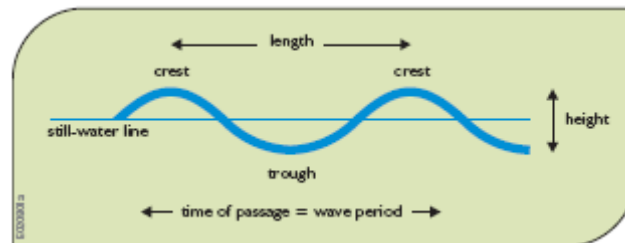
<b>Ordem</b>	<b>Assunto</b>
80.1	Introdução
80.2	Determinação da borda livre de um lago conforme Stevenson
80.3	Fórmula de Molitor
80.4	Determinação da altura da onda conforme Narfet
80.5	Comprimento da onda conforme Eckart, 1952
80.6	Tensão trativa em rios
80.7	Bibliografia e livros consultados

**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  $\Phi$ .

$h$  = borda livre (m)

$h = 1,40 \times h_o$

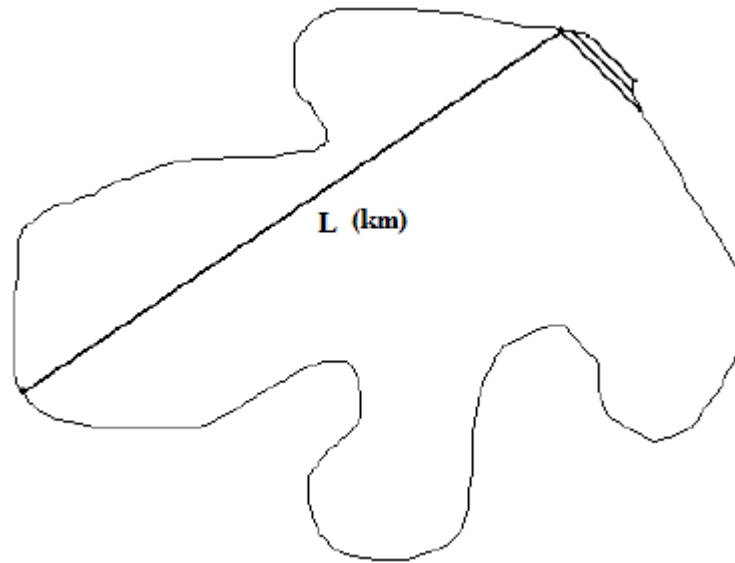


Figura 80.2- Fetch de comprimento L em km

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/s<sup>2</sup> =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

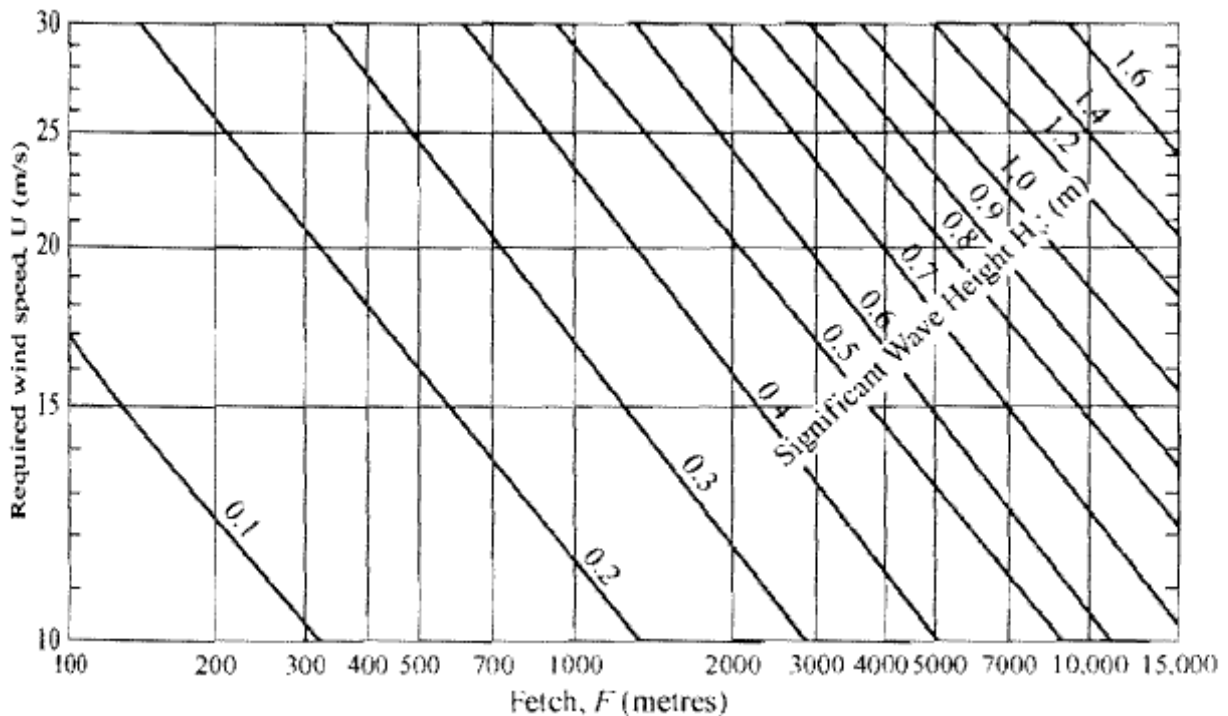


Figura 80.3- Relação entre o fetch (m) e a velocidade do vento (m/s) para se achar a altura significativa da onda (m). ICE, 1996 in Novak, 2007.

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  $120\text{km/h}$ .

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

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

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

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

### 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  $F$ .

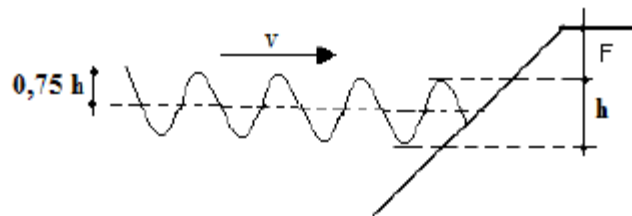


Figura 80.4- Altura da onda  $h$  e  $F$  = folga

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 (m<sup>2</sup>/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<sub>o</sub> = 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/s<sup>2</sup>

T<sub>p</sub> = 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 o 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<sub>o</sub> e o período da onda T<sub>p</sub>.

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

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

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

#### 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/s<sup>2</sup>

T<sub>p</sub> = período (s)

tanh = tangente hiperbólica

d = profundidade do lago (m)

#### Exemplo 80.4

Dado um lago com profundidade d = 1,20 m, período T<sub>p</sub> = 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

$\gamma$  = 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:

$T_{\text{vento}}$  = 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/m<sup>2</sup>)

f<sub>w</sub>= fator de fricção (adimensional)

U<sub>o</sub>= 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<sub>o</sub>= velocidade horizontal no fundo devido as ondas (m/s)

h<sub>o</sub>= altura da onda (m)

T<sub>p</sub>= período da onda (s)

sinh= seno hiperbólico

L= comprimento da onda (m)

O valor aproximada de f<sub>w</sub>:

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

Uma estimativa para f<sub>w</sub>=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.