

## Capítulo 70

# Vedernikov, Montuori e ar em canais

## Capítulo 70- Vedernikov, Montuori e ar em canais

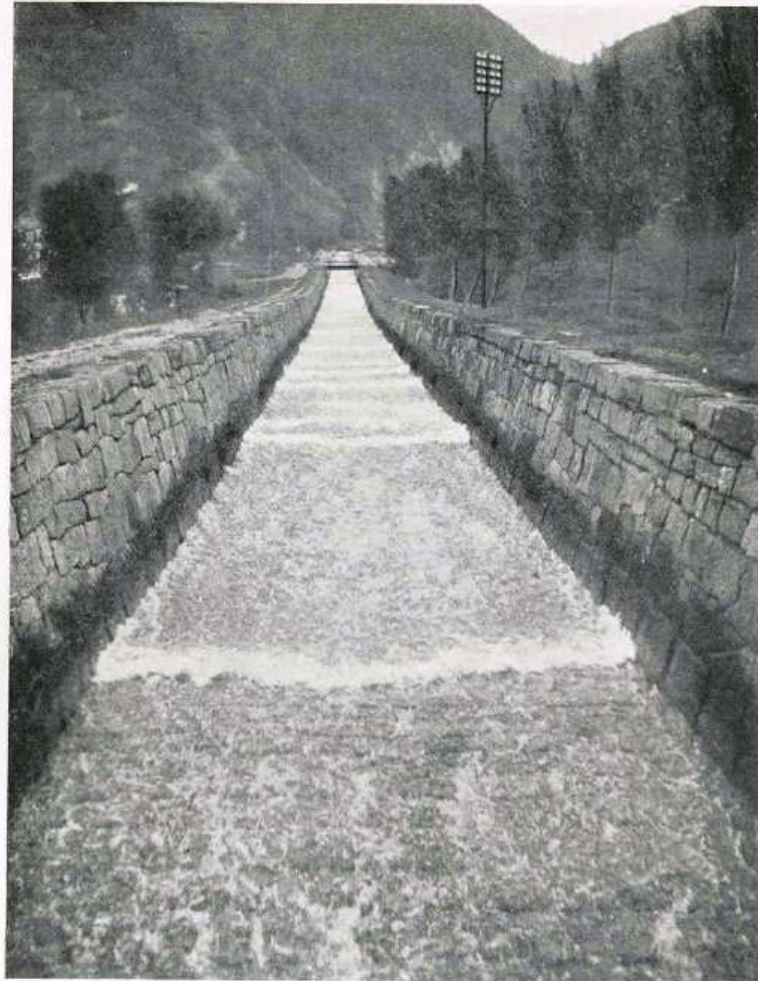
### 70.1 Introdução

Apesar de escoamento em um canal ser uniforme dependendo da velocidade e da declividade do canal teremos **instabilidades na superfície da água**. Esta instabilidade é a formação de ondas na superfície da água.

Segundo Chow, 1983 este fenômeno foi observado pela primeira vez em canais abertos nos Alpes em 1910 por Cornish conforme Figuras (70.1) a (70.3). Este canal conduz a água advinda dos Alpes para o lago de Thun e se pode perceber a natureza periódica das ondas formadas, longas e rasas com cristas íngremes quase verticais conforme Ferreira, 2013.

O maior problema com estas ondas é que elas sobem mais que o *freeboard* normalmente adotado e parte da água é jogada fora do canal. O prof. dr. V. M. Ponce menciona que no Peru foi feito o Canal de Arequipa e os engenheiros não levaram em conta o número de Vedernikov devido as ondas que formam. Aconteceu que caía tanta água fora que tiveram que fazer estruturas em degraus para eliminar a instabilidade da superfície. Isto mostra a importância do número de Vedernikov.

Consta que em 1945 foi feita a pesquisa por Wedernikov com a letra W e a mesma foi apresentada em 1946 só que o nome passou a ser Vedernikov com a letra V.



7

Fonte: Cornish (1910).

**Figura 70.1- Roll waves em Grunbach na cidade de Merlingen, Suíça, visualizando no sentido jusante conforme Cornish, 1910. Fonte: Ferreira, 2013**

Estas ondas são fenômenos de escoamento transitórios.

Em 1945 Vedernikov empregando aproximações das equações de Saint Venant desenvolveu um critério que foi chamado **número de Vedernikov  $V_e$** .

**Dica: a utilidade prática do número de Vedernikov é para dimensionar o *freeboard*.**

### 70.2 Número de Vedernikov

Chow, 1983 mostra a forma genérica do número de Vedernikov desenvolvido na URSS em 1945. A fórmula genérica do número de Vedernikov é:

$$V_e = x \cdot F \cdot (1 - R \cdot dP/dA)$$

Sendo:

$V_e$  = número de Vedernikov. Quando  $V_e > 1$  o canal é instável.

$F$  = número de Froude

$R$  = raio hidráulico (m)

$P$  = perímetro (m)

$A$  = área (m<sup>2</sup>)

$dP$  = variação no perímetro molhado

$dA$  = variação da seção transversal do escoamento

$dP/dA$  = derivada de  $P$  em relação a  $A$

$x = 2/3$  para equação de Manning

$x = 1/3$  para equação de Chezy

Para a fórmula de Manning que é mais comum entre nós temos:

$$V_e = (2/3) \cdot F \cdot (1 - R \cdot dP/dA)$$

Quando se usa a fórmula de Manning a equação de Vedernikov fica assim:

$$V_e = (2/3) \cdot \Gamma \cdot F \quad (\text{Equação 70.1})$$

Sendo:

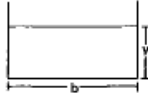
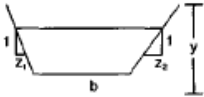

$V_e$  = número de Vedernikov (adimensional)

$\Gamma = (1 - R \cdot dP/dA)$  = fator de forma da seção do canal conforme Tabela (70.1).

$F$  = número de Froude

Nota: em grego temos o gama minúsculo  $\gamma$  e o maiúsculo  $\Gamma$

**Tabela 70.1- Fatores de forma da seção ( $\Gamma$ )**

Channel Definition (1)	$\Gamma$ (2)
Rectangle 	$\frac{b}{b + 2y}$
Trapezoid with unequal side slopes 	$1 - \frac{R(\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2})}{T}$
Circle 	$1 - \frac{\theta - \sin(\theta)}{\theta[1 - \cos(\theta)]}$

**Fonte: Richard H. French in Mays, 2001**

O número de Froude F seja calculado pela equação:

$$F = V / [(g \cdot D)]^{0,5} \quad \text{(Equação 70.2)}$$

Sendo:

F= número de Froude (adimensional)

V= velocidade média na seção (m/s)

g= 9,81m/s<sup>2</sup>= aceleração da gravidade

D= profundidade hidráulica (m)= A/ T

A= área da seção molhada (m<sup>2</sup>)

T= comprimento da superfície livre do canal (m)



**Figura 70.2- *Roll waves***

### Exemplo 70.1

Achar o número de Vedernikov em um canal com concreto com declividade de 3%, coeficiente de Manning  $n=0,014$ , onde passam  $141,5\text{m}^3/\text{s}$ , considerando canal retangular com base de 6 m e canal trapezoidal com talude  $z= 1$  e raio hidráulico  $R= 1,08\text{m}$ ,  $F= 3,75$  e  $T= 8,92\text{m}$  (comprimento da superfície livre do canal)

$$\Gamma = 1 - [R(1+z^2)^{0,5} + (1+z^2)^{0,5}]/T$$
$$\Gamma = 1 - [1,08(1+1^2)^{0,5} + (1+1^2)^{0,5}]/8,92 = 0,67$$

$$Ve = (2/3) \cdot \Gamma \cdot F$$

$$Ve = (2/3) \times 0,67 \times 3,75 = 1,68 > 1,0$$

Portanto, haverá formação de ondas.



Figure 4.6: Roll waves propagating down a spillway at Lion's Bay, British Columbia. The width of the flow is about 2 m, and the water depth is about 10 cm. Photograph courtesy Neil Balmforth.

### Figura 70.3- Roll waves

Chow, 1985 faz as seguintes observações sobre a Equação (70.1):

- Quando o canal é muito largo o valor de  $\Gamma=0$ .
- Quando o canal é muito estreito o valor de  $\Gamma=1$

A utilidade do número de Vedernikov é saber se haverá ou não onda no canal, isto é, se o canal será estável ou instável. O escoamento de ondas em inglês são denominados de *Slug Flow* e *Roll Waves*. Há distinção entre o *Slug Flow* e *Roll Waves*, mas ambos são para escoamento instável.

Caso  $Ve$  for menor que a unidade o canal será estável sem formação de ondas;

$$\begin{aligned}Ve < 1 & \text{ escoamento estável} \\Ve = 1 & \text{ canal com escoamento tem escoamento neutro} \\Ve > 1 & \text{ escoamento instável}\end{aligned}$$

Quando  $Ve$  for maior que a unidade o canal terá escoamento instável com formação de ondas e haverá fenômenos transitórios. O problema das ondas é que elas aumentarão o nível da água no canal e poderá extravasar..

Outra observação é que podemos ter a formação de ondas mesmo com o número de Froude baixo, como por exemplo,  $F < 0,74$ . **Isto mostra que o número de Froude sozinho não é suficiente para sabermos se haverá a formação de ondas ou não.**

Número de Vedernikov para seção uniforme retangular estável

$$Ve = \left(\frac{2}{3}\right) \left[1 - \frac{2Y^*}{(2Y^* + 1)}\right] \times F \quad (\text{Equação 70.3})$$
$$Ve \leq 1$$

Sendo:

$Ve$  = número de Vedernikov

$Y^*$  =  $y/b$

$b$  = largura do canal (m)

$F$  = número de Froude usual

### 70.3 Número de Froude limite

Clark County, 1999 introduz o conceito de **número de Froude limite**, que é aquele obtido pela Equação (70.1) quando se faz número de Vedernikov  $Ve \leq 1$  e se representa  $F_1$ .

$$Ve = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \Gamma \cdot F$$
$$1 = \left(\frac{2}{3}\right) \times \Gamma \times F_1$$
$$F_1 \leq 1 / \left[\left(\frac{2}{3}\right) \times \Gamma\right] \quad F_1 \leq (3/2) / \Gamma \quad (\text{Equação 70.4})$$

#### Exemplo 70.2

Calcular o número de Froude limite  $F_1$  para seção retangular com base  $b=3,00\text{m}$  e altura  $y=2,00\text{m}$ . Conforme Tabela (70.1) para seção retangular temos:

$$\Gamma = b / (b + 2y)$$

$$\Gamma = 3 / (3 + 2 \times 2) = 0,43$$

$$F_1 \leq (3/2) / 0,43 = 3,49$$

Portanto, o número de Froude limite  $F_1 = 3,49$ , significando que se o número de Froude calculado for maior que 3,49, teremos escoamento instável com a formação de ondas.

Para um **canal retangular** o número de Froude limite  $F_1$  é:

$$F_1 \leq (3/2) \cdot (2 Y^* + 1) \quad (\text{Equação 70.5})$$

Sendo:

$F_1$  = número de Froude limite calculado pelo número de Vedernikov

$Y^* = y/b$

$b$  = largura do canal

Para um **canal trapezoidal** conforme Guo, 1999 temos:

$$F_1 \leq (3/2) \cdot \left\{ \frac{(1+2kY^*)(1+2zY^*)}{(1+2zY^* + 2kzY^{*2})} \right\} \quad (\text{Equação 70.6})$$

Sendo:

$$K = (1 + z^2)^{0,5}$$

$z$  = talude lateral

$Y^* = y/b$

$b$  = largura da base do canal

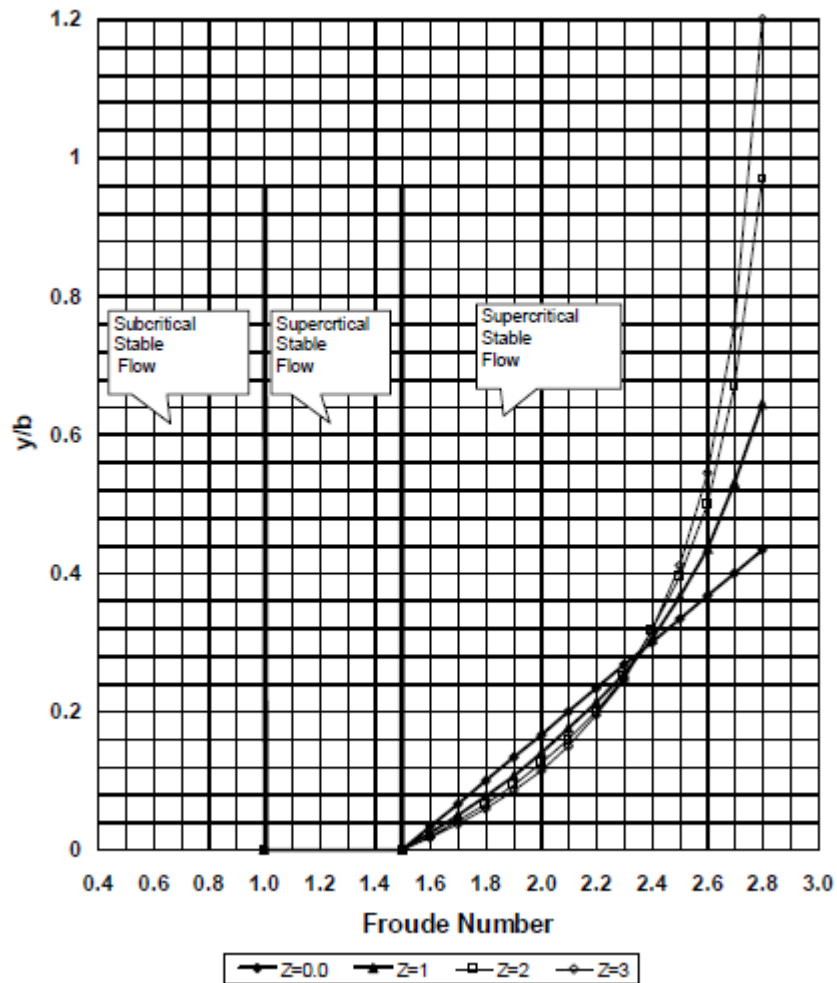
Quando  $z=0$  temos a equação para seção retangular:  $F_1 \leq (3/2) \cdot (2 Y^* + 1)$

Guo, 1999 a Figura (70.4) que mostra os limites do número de Froude para canais com taludes  $z=0; 0,5; 1,0; 2,0$  e  $3,0$ . As curvas separam os regime supercrítico em regime estável uniforme com número de Froude igual ou menor que o numero limite de Froude e o escoamento pulsante com número de Froude maior que o número limite de Froude.

Em geral canais profundos e estreitos tendem a carregar movimento de escoamento uniforme e canais rasos e largos tendem a ter escoamento pulsante com ondas.

Quando o número de Froude  $< 1,5$  o escoamento supercrítico pode ser obtido em canais trapezoidais e quando o número de Froude  $> 3,0$  teremos escoamento pulsantes com *roll waves*.





**Figura 70.4- Regime de escoamento em canais livres.**  
 Fonte: Guo, 1999.

#### 70.4 Altura das ondas no canal instável

Conforme Clark County, 1999 para se calcular a altura das ondas no canal vamos considerar as ondas positivas que no sentido do escoamento aumentam a altura da água conforme Figura (70.5).

$$V_2 = [(V_1 - V_w) \cdot A_1 + V_w \cdot A_2] / A_2$$

onde os subscrito 1 representam a seção sem as ondas e definida pelo número de Froude limite e o subscrito 2 representa os cálculos pela fórmula de Manning.

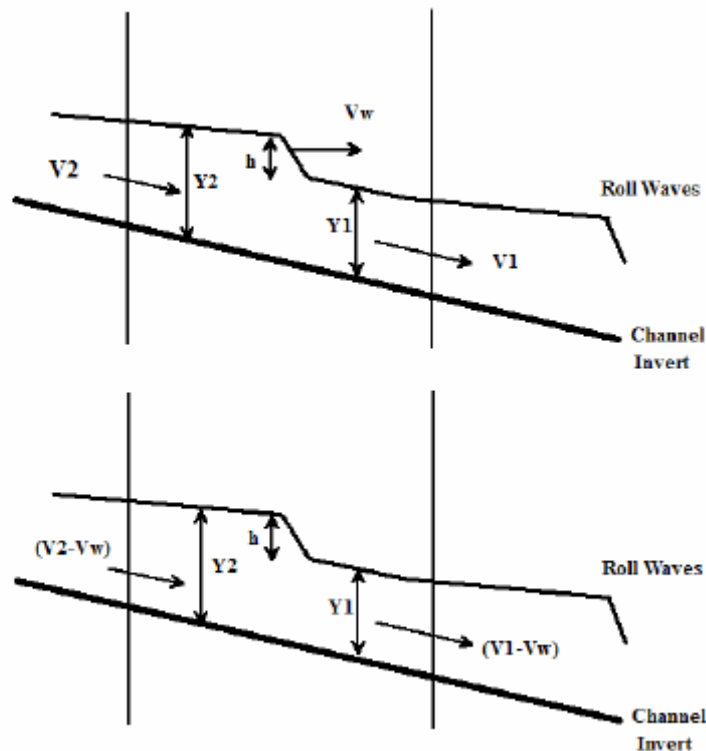


Figura 70.5-Esquema do movimento do ressalto hidráulico.  
 Fonte: Guo, 1999

Considerando a velocidade da onda  $V_w$  no ressalto conforme Guo, 1999 teremos:

$$V_w = V_1 + [ (A_2 y_2 - A_1 y_1) g / (A_1 (1 - A_1/A_2)) ]^{0,5}$$

$$h = y_2 - y_1$$

Sendo:

$V_w$  = velocidade da onda (m/s)

$A$  = área da seção no escoamento ( $m^2$ )

$g = 9,81 m/s^2$  = aceleração da gravidade

$h$  = altura das ondas (m)

$c$  = celeridade das ondas (m/s)

$F_1$  = número de Froude limite fornecido pelo número de Vedernikov.  $F_1 = V_1/C$

$F_2$  = número de Froude calculado com a fórmula de Manning  $F_2 = V_2/C$

Para um canal retangular teremos quando  $F_2 > F_1$ :

$$h = (C^2/g) \times [2y_1/(y_1+y_2)] \times (V_2/C - V_1/C)$$

$$h = (C^2/g) \cdot (2y_1/(y_1+y_2)) (F_2 - F_1) \quad \text{Equação (70.7)}$$

$$h = y_2 - y_1 \quad y_2 = h + y_1 \quad \text{Equação (70.8)}$$

$y_1$  = altura dada pela altura usando Manning

**Dica:** as Equações (70.7) e (70.8) são fundamentais para se achar a altura  $h$ .

Verificar que na Equação (70.7) temos uma equação e duas incógnitas que são “ $h$ ” e “ $y_2$ ”.

O valor de  $h$  é calculado por iteração.

Supomos um valor de  $h$ . Com este valor calculamos pela Equação (70.8) o valor de  $y_2$ .

Então usamos a Equação (70.7) e achamos o valor de “ $h$ ”.

Caso “ $h$ ” seja igual ao inicial está resolvido o problema, caso contrário adota-se outro valor de “ $h$ ” até os valores serem aproximadamente iguais.

$$C = V_w - V_2$$

Quando a altura da onda  $h$  é pequena em relação a altura do escoamento, isto é,  $y_1 \approx y_2$  então fazemos as simplificações:

$$h = (C^2 / g) \cdot (F_2 - F_1) \quad (\text{Equação 70.9})$$

Com os procedimentos acima podemos calcular a altura das ondas e o Clark County, 1999 recomenda que a a borda livre deve incluir as considerações a altura das ondas.

### 70.5 Velocidade da onda C

$$C = (g \cdot A / T)^{0.5} \quad (\text{Equação 70.10})$$

Sendo:

$C$  = velocidade da onda (m/s)

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$  = aceleração da gravidade

$A$  = área molhada ( $\text{m}^2$ )

$T$  = comprimento da superfície livre (m)

$D_h = A/T$  = diâmetro hidráulico (m)

### 70.6 Freeboard

A borda livre (*freeboard*) de ser encarada com uma adição a ondas, distúrbios na superfície e superelevação em caso de curvas. Clark County, 1999 apresenta a seguinte sugestão para o *freeboard* quando temos a **velocidade crítica**.

$$F_b = 0,30 + 0,05 \cdot V \cdot y^{(1/3)}$$

Sendo:

$F_b$  = altura do *freeboard* (m)

$V$  = velocidade média na seção (m)

$y$  = altura do nível de água (m)

### Exemplo 70.3

Calcular o *freeboard* para canal trapezoidal com  $z=1$ ,  $V=12,98 \text{ m/s}$  e altura  $y= 3,26 \text{ m}$ .

$$\begin{aligned} F_b &= 0,30 + 0,05 \cdot V \cdot y^{(1/3)} \\ F_b &= 0,30 + 0,05 \times 12,98 \times 3,26^{(1/3)} \\ F_b &= 1,26 \text{ m} \end{aligned}$$

#### Exemplo 70.4

Calcular a velocidade da onda sendo  $T=6,00\text{m}$ , área molhada =  $A= 10,31\text{m}^2$ ,  $y = 1,719\text{m}$   
 $D_h = A/T = 1,72\text{m}$

$$C = (g \cdot A/T)^{0,5}$$
$$C = (9,81 \times 10,31/6,0)^{0,5}$$
$$C = 4,11\text{m/s}$$

#### Exemplo 70.5 Adaptado de Guo, 1999

Seja um canal de concreto retangular com declividade  $S=0,1\text{m/m}$ , vazão de  $9,06\text{ m}^3/\text{s}$ , largura da base do canal de  $2,94\text{ m}$  e consideremos  $n=0,015$ .

Vamos explicar coluna por coluna o que consta das Tabelas (70.2) a (70.4)

Coluna 1

Declividade do canal  $0,1\text{ m/m}$  ( 10%). É uma declividade alta.

Coluna 2

Vazão fornecida  $9,06\text{ m}^3/\text{s}$

Coluna 3

Largura da base do canal  $b= 2,94\text{m}$

Coluna 4

Coefficiente de Manning adotado em canal de concreto  $n= 0,015$

Coluna 5

Talude lateral  $z$ . No caso  $z=0$ , isto é, as paredes laterais são verticais. Trata-se de um canal de concreto retangular

Coluna 6

Altura normal  $y_1$  obtida com a fórmula de Manning

Coluna 7

É a área da seção molhada  $A$  ( $\text{m}^2$ ). Vide Tabela (70.8)

$$A = y(b + zy)$$

Coluna 8

Perímetro molhado  $P$

$$P = b + 2y(1 + z^2)^{0,5}$$

$z=0$

Coluna 9

**Raio Hidráulico  $R = A/P$**

Coluna 10

**Largura do topo  $T$**

$$T = b + 2zy$$

Coluna 11

**Diâmetro hidráulico que será usado para calcular o número de Froude**

$$D = A/T$$

Coluna 12

$$\text{Auxiliar} = (1 + z^2)^{0,5}$$

**Coluna 13**

Y/b

**Coluna 14**

Número de Froude limite

$$F_1 = (3/2) \times \{ [(1+2kY^*) (1+2zY^*)] / (1+2zY^* + 2kzY^{*2}) \} \quad \text{(Equação 70.6)}$$

**Coluna 15**

Velocidade de Manning

$$V = (1/n) R^{(2/3)} \cdot S^{0.5}$$

**Coluna 16**

Equação da continuidade para calcular a vazão Q

$$Q = A \cdot V$$

**Coluna 17**

Cálculo do número de Froude usando como base a altura obtida pela fórmula de Manning

$$F = V / (g \cdot D)^{0.5}$$

**Coluna 18**

Celeridade

$$C = (g \cdot A/T)^{0.5} \quad \text{(Equação 70.9)}$$

**Coluna 19**

Vamos calcular h por tentativas.

O problema é resolvido usando a fórmula de Manning para escoamento normal  $y_1$  e Equação (70.7) usando tentativa. Arbitra-se um valor de "h" e acha-se o valor de  $y_2 = y_1 + h$ . Depois se calcula novamente o valor de h usando a Equação (70.7) até os valores serem iguais.

$$h = (C^2/g) \cdot (2y_1/(y_1+y_2)) (F_2 - F_1) \quad \text{Equação (70.7)}$$

Arbitramos um valor de há na coluna 19 e temos como resultado o valor de h calculado e que está na coluna 21

**Coluna 20**

Valor de  $y_2$ ;

$$h = y_2 - y_1$$

$$y_2 = h + y_1$$

**Coluna 21**

Altura da onda h

Valor calculado de h. Até o h da coluna 21 ser praticamente igual ao da coluna 19

**Coluna 22**

$y + h =$  altura da água + altura da onda

**Coluna 23**

É a altura crítica. Somente para informação. Vide Tabela (70.9)

$y_c$  de uma seção qualquer

$$y_c = 0,81 \left[ \Phi / z^{0,75} \cdot b^{1,25} \right]^{0,27} - b/30z$$

$$\Phi = Q^2/g$$

**Coluna 24**  
*Freeboard*

$$Fb = 0,30 + 0,05 \cdot V \cdot y^{(1/3)}$$

**Coluna 25**  
 Altura do canal  
 $Y + h + \text{freeboard}$

**Coluna 26**  
 É o valor  $\Gamma$  da Tabela (70.1).

$$\Gamma = 1 - [R (1+z_1^2)^{0,5} + (1+z_2^2)^{0,5}] / T$$

No caso  $Z_1 = Z_2 = 0$

**Coluna 27**  
 Número de Vedernikov  
 $Ve = (2/3) \cdot \Gamma \cdot F$  (Equação 70.1)

**Tabela 70.2- Cálculos**

					Manning				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Declividade (m/m)	Vazão (m3/s)	Base canal (m)	n	Talude	Altura y1 (m)	Area (m2)	Perimetro (m)	Raio hidr (m)	Largura topo (m)
0,1	9,06	2,94	0,015	0	0,345	1,01	3,63	0,28	2,94

**Tabela 70.3- Cálculos**

			Froude limite			Manning		
11	12	13	14	15	16	17	18	19
Diametro hidraulico (m)	auxiliar	Y/b	Froude limite F1	Velocid (m/s)	Vazao (m3/s)	Froude F2	C=celeridade (m/s)	Valor inicial h (m)
0,35	1,00	0,117	1,85	9,01	9,14	4,90	1,84	0,57

**Tabela 70.4- Cálculos**

20	21	22	23	24	25	26	27
Valor y2 (m)	Valor calculado h (m)	Y+h (m)	Yc (m)	Freeboard (m)	Altura canal (m)	$\Gamma$	Ve
0,92	0,58	0,92	0,99	0,62	1,54	0,56	1,84

**Observações:**

O valor  $Ve = 1,84 > 1$  mostra que haverá *roll waves*.

A altura do canal com freeboard será de 1,54m, embora a lâmina de água seja somente de 0,345m

Observar que o número de Froude do canal  $F_2 = 4,90$  da coluna 17 e que é maior que o Froude limite  $F_1 = 1,85$ . O que confirma que haverá *roll waves*.

**Exemplo 70.6. Adaptado de County Clark, 1999**

Seja um canal em concreto com declividade de 3%, coeficiente de Manning  $n=0,014$ , onde passa  $141,5\text{m}^3/\text{s}$ , considerando canal retangular com base de 6 m e canal trapezoidal com talude  $z= 1$ .

O problema é resolvido usando a fórmula de Manning para escoamento normal  $y_1$  e Equação (70.7) usando tentativa. Arbitra-se um valor de “h” e acha-se o valor de  $y_2 = y_1 + h$ . Depois se calcula novamente o valor de h usando a Equação (70.7) até os valores sere aproximadamente iguais.

$$h = (C^2/g) \cdot (2y_1/(y_1+y_2)) (F_2 - F_1) \quad \text{Equação (70.7)}$$

**Tabela 70.5- Cálculos da altura da água devido a onda**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Declividade	Vazão	Base canal	n	Talude	Altura $y_1$	Área	Perímetro	Raio hidr	Largura topo
(m/m)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)			(m)	(m <sup>2</sup> )	(m)	(m)	(m)
0,03	141,5	6,00	0,014	1	1,460	10,89	10,13	1,08	8,92

**Tabela 70.6- Cálculos da altura da água devido a onda**

			Froude limite				Manning		
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Diâmetro hidráulico	auxiliar	Y/b	Froude	Velocid	Vazão	Ângulo	Froude	C=celeridade	Valor inicial h
(m)			F1	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	grado	F2	(m/s)	(m)
1,22	1,41	0,243	2,28	12,98	141,43	0,029991	3,75	3,46	1,25

**Tabela 70.7- Cálculos da altura da água devido a onda**

21	22	23	24	25	26	27	28
Valor $y_2$	Valor calculado h	Y+h	yc	Freeboard	Altura canal	$\Gamma$	Ve
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
2,71	1,26	2,72	3,79	1,04	3,76	0,67	1,68

Nos cálculos das Tabelas (70.5) a (70.7) podemos verificar que o número de Froude  $F_2$  obtido pela fórmula de Manning de 3,75 é maior que o número de Froude limite  $F_1 = 2,28$  obtido por Vedernikov, o que indica que **há produção de ondas**.

### 70.7 Número de Montuori (Mo)

Montuori, 1961 observou que em canal da Figura (70.6) a certa distância L se forma a onda pulsante conforme.

$$Mo = g \cdot L \cdot S / V_o^2$$

Sendo:

Mo= número de Montuori

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

S= declividade do canal (m/m)

$V_o$ = velocidade média da água no canal quando não existem ondas (m/s)

L= comprimento do canal (m)

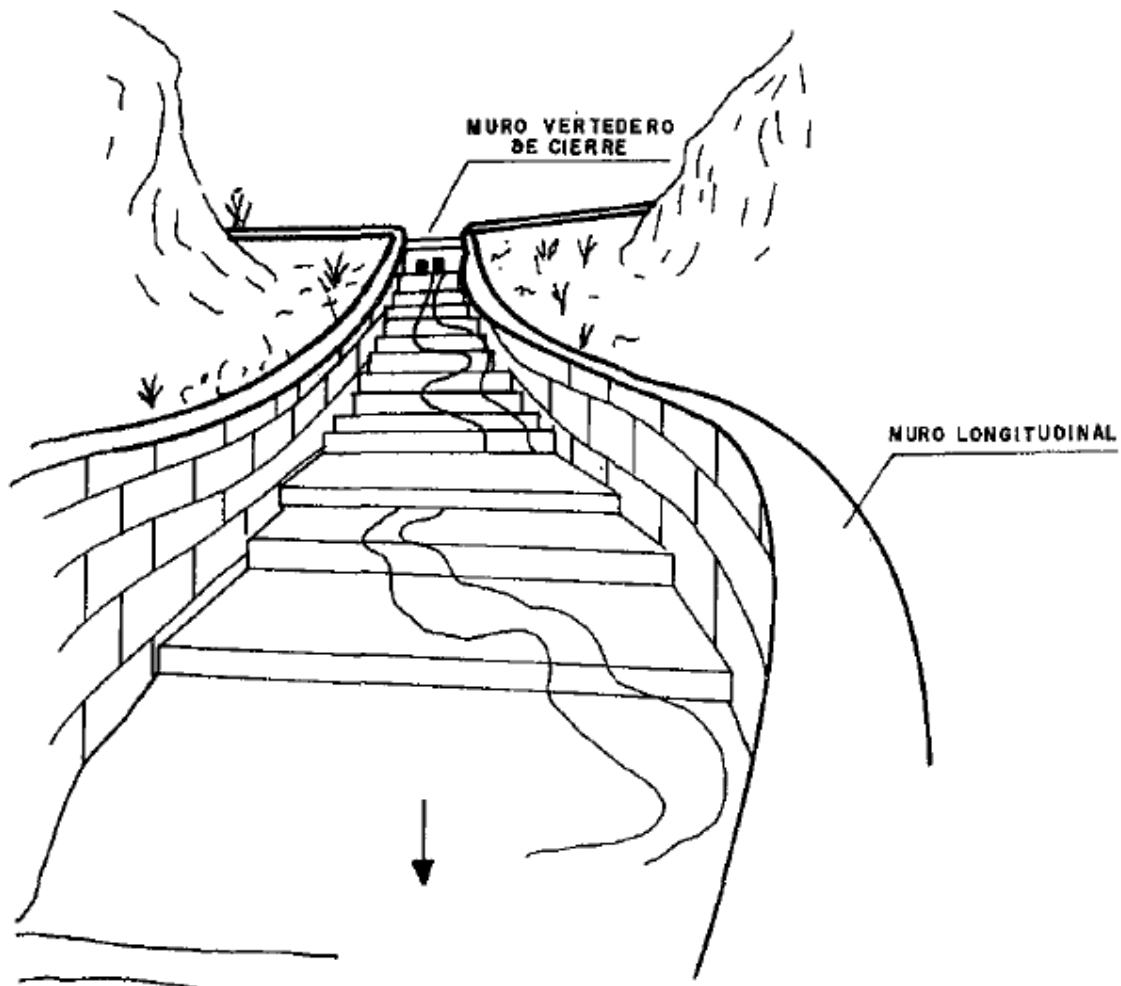
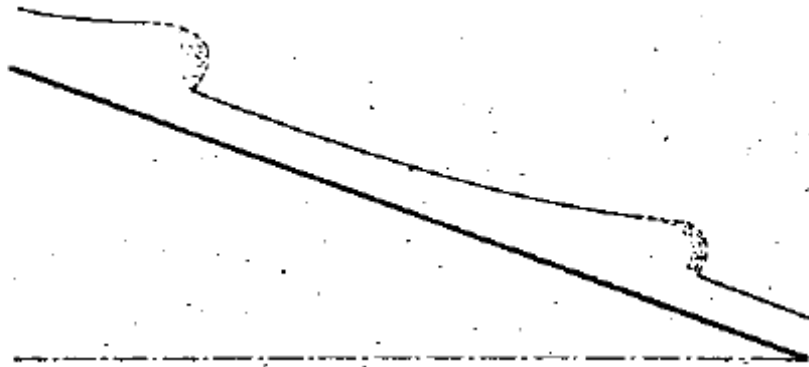
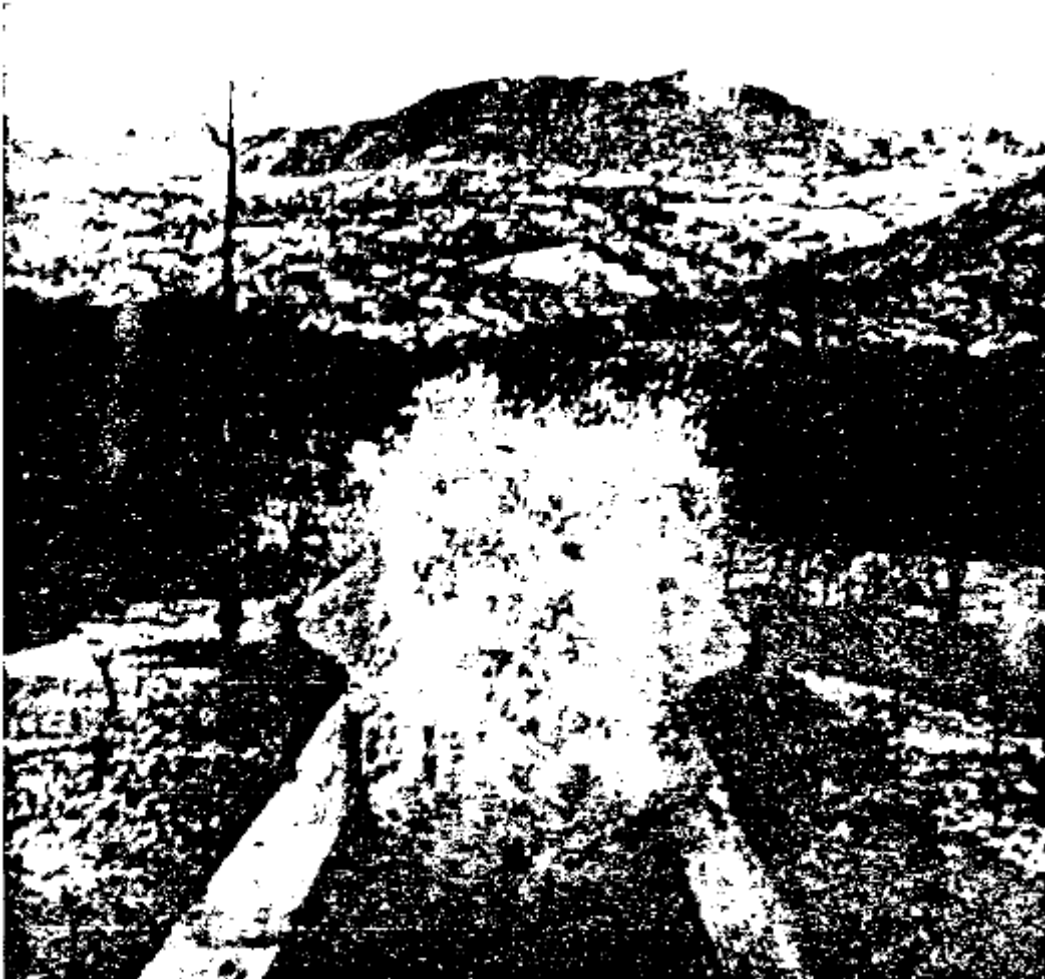


Figura 70.6-Formação de onda. Canais com com patamar de 10m e degraus de 0,50m.  
Fonte: Molina, 1995.





**Figura 70.7- Comprimento entre as ondas.**  
Fonte: Montuori, 1961



**Figura 70.8- Efeito da onda quando chega ao dissipador de energia.**  
Fonte: Molina, 1995.

Montuori observou que em canais largos mesmo com número de Froude menor que 0,5 podem ser formar ondas pulsantes (*roll waves*), isto é, em velocidades subcríticas.

Quando  $Mo \gg 1$  teremos instabilidade no canal.

Mays, 2001 salienta que o fenômeno das ondas pulsantes é caracterizado pelo número de Vedernikov, pelo número de Montuori e pela concentração de sólidos na água.

A Figura (70.9) mostra os dois números: Vedernikov e Montuori.

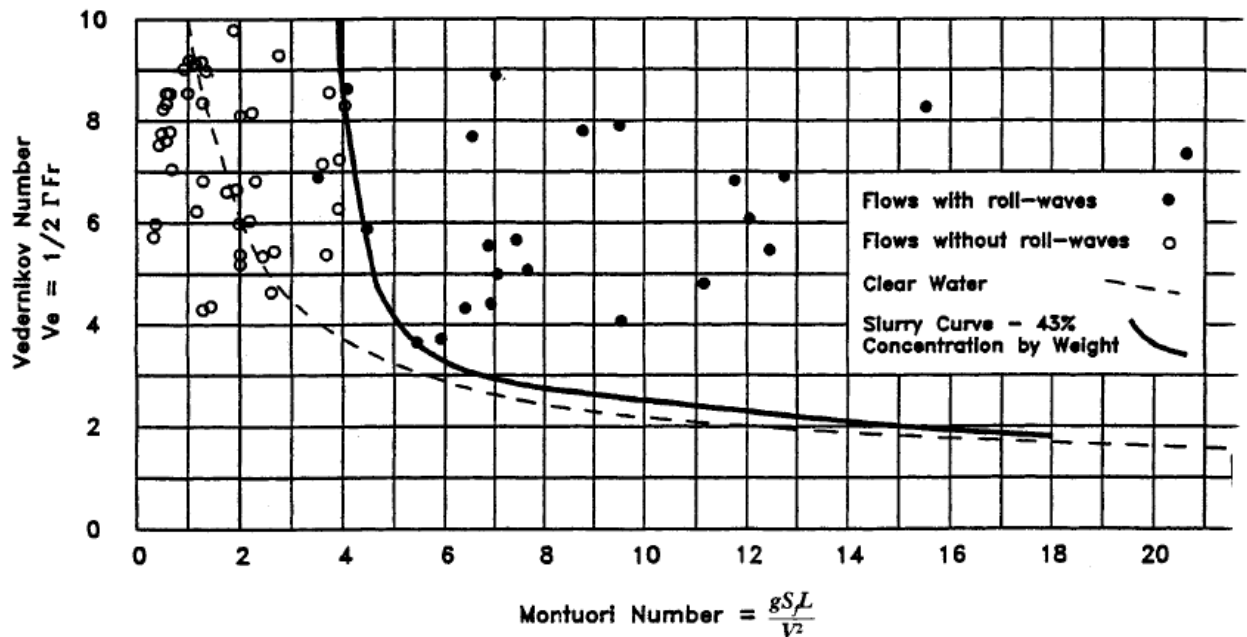


Figura 70.9- Número de Montuori e Número de Vedernikov.

Fonte: Richard H. French in Mays, 2001

### Pesquisas na Bolívia em canais em La Paz

Foram examinados três canais com comprimentos de 411,1m; 438,8m; 1806,0m com declividades de 6,72%, 9,17% e 9,01% respectivamente e o resultado de um desde canais está simplificado na Figura (70.8).

O número de Vedernikov  $Ve$  pode determinar se há ou não *roll waves*.

Com o número de Montuori se pode prever a formação de ondas conforme se pode ver na Figura (70.9) embora o número de Vedernikov igual ou maior que 1 já se encontra em região de instabilidade.

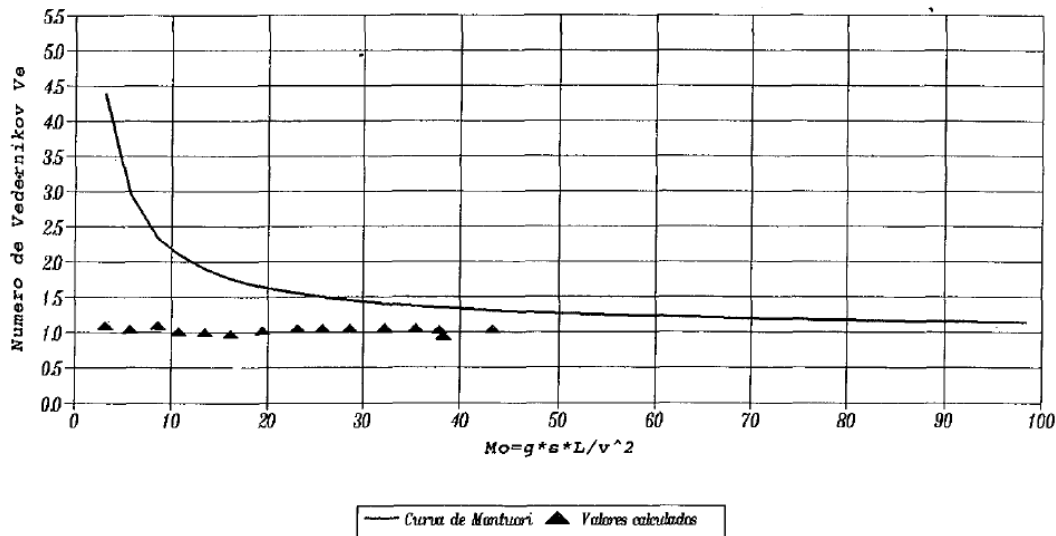


Fig. 5 - Estabilidade según Montuori - Canal Kellumani.  
 Prof.  $y_m = 0,30$  m

Figura 70.10- Número de Montuori e Número de Vedernikov.  
 Fonte: Molina, et al, 1995

### Número de Reynolds em canais

$$Re = V.R / \nu$$

Sendo:

Re= número de Reynolds

V= velocidade média (m/s)

R= raio hidráulico do canal (m)= A/ P

A= área molhada (m<sup>2</sup>)

P= perímetro molhado (m)

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido. Para água  $\nu = 1,006 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s

Para canais temos:

Quando  $Re < 500$  o escoamento será **laminar**

$Re > 2000$  o escoamento será **turbulento**

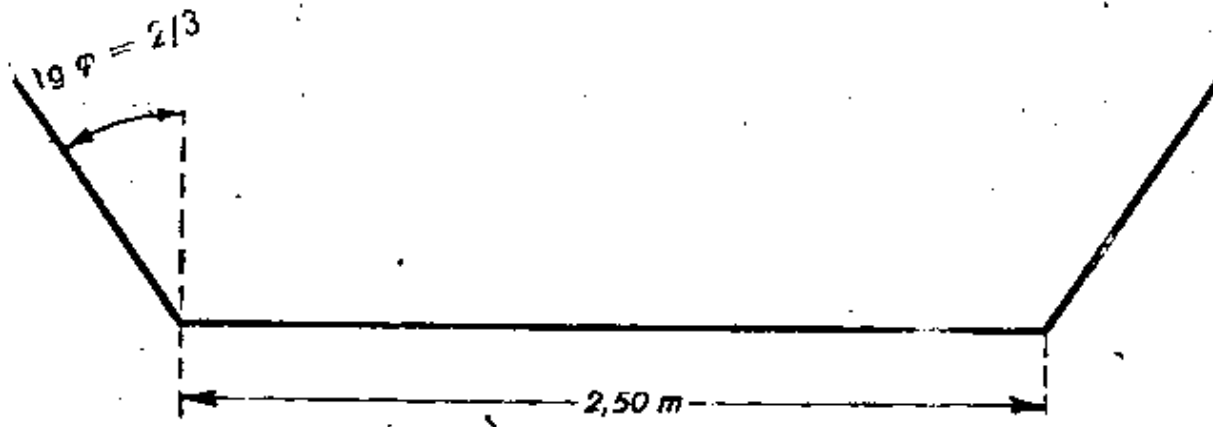
Quando  $500 < Re < 2000$  o escoamento será de **transição**

### Escoamento em canal raso (Sheet flow)

Um canal é raso quando a largura dividido pela altura da água é maior do que 10 conforme Chow.

**Exemplo 70.7- Adaptado do original de Montuorio**

Canal de concreto com  $Q= 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $v= 10\text{m/s}$ , declividade  $S=0,603\text{m/m}$ ,  $b= 2,50\text{m}$ , altura da onda  $h= 0,04\text{m}$ , rugosidade de Manning  $n=0,009$  e comprimento do canal  $L=150\text{m}$ . Talude  $z= 0,66$ .



$$Mo = g \cdot L \cdot S / V_o^2$$

$Mo = 9,81 \times 150 \times 0,603 \cdot 10^{-2} = 88,73 \gg 1$  o que mostra que existirá formação de ondas

**Tabela 70.8- Cálculos da altura da água devido a onda**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Declividade	Vazão	Base canal	n	Talude	Altura y1	Área	Perímetro	Raio hidr	Largura topo
(m/m)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)			(m)	(m <sup>2</sup> )	(m)	(m)	(m)
0,603	1	2,50	0,009	0,66	0,040	0,10	2,60	0,04	2,55

**Tabela 70.9- Cálculos da altura da água devido a onda**

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Diâmetro hidráulico	auxiliar	Y/b	Froude	Velocid	Vazão	Ângulo	Froude	C=celeridade	Valor inicial h
(m)			F1	(m/s)	(m <sup>3</sup> /s)	grado	F2	(m/s)	(m)
0,04	1,20	0,016	1,56	9,91	1,00	0,542622	15,90	0,62	0,17

**Tabela 70.10- Cálculos da altura da água devido a onda**

21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Valor y2	Valor calculado h	Y+h	yc	Freeboard	Altura canal	L	Mo	Gama	Ve	Re
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)				
0,21	0,18	0,22	0,26	0,47	0,69	150	88,73	0,51	5,43	383520

### 70.8 Tabelas importantes de French, 2000

As Tabelas (70.11) e (70.12) apresentam elementos geométricos importantes usados normalmente em canais.

**Tabela 70.11- Elementos geométricos de várias seções**

**TABLE 3.1** Channel Section Geometric Properties







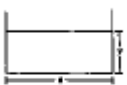
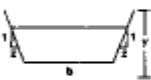
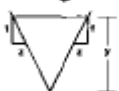

Channel Definition (1)	Area A (2)	Wetted Perimeter P (3)	Hydraulic Radius R (4)	Top Width T (5)	Hydraulic Depth D (6)
Rectangle 	$by$	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	$b$	$y$
Trapezoid with equal side slopes 	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$
Trapezoid with unequal side slopes 	$by + 0.5y^2(z_1 + z_2)$	$b + y(\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2})$	$\frac{by + 0.5y^2(z_1 + z_2)}{b + y(\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2})}$	$b + y(z_1 + z_2)$	$\frac{by + 0.5y^2(z_1 + z_2)}{b + y(z_1 + z_2)}$
Triangle with equal side slopes 	$zy^2$	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$	$0.5y$
Triangle with unequal side slopes 	$0.5y^2(z_1 + z_2)$	$y(\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2})$	$\frac{0.5y^2(z_1 + z_2)}{y(\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2})}$	$y(z_1 + z_2)$	$0.5y$
Circular 	$\frac{1}{8}(\theta - \sin\theta)d_0^2$	$0.5\theta d_0$	$0.25\left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)d_0$	$2\sqrt{y(d_0 - y)}$	$\frac{1}{8}\left[\frac{\theta - \sin\theta}{\sin(0.5\theta)}\right]$

Tabela 70.12- Altura critica em diversas seções

**TABLE 3.3** Semiempirical Equations for the Estimation of  $y_c$

Channel Definition (1)	Equation for $y_c$ in terms of $\Psi = \alpha Q^2/g$ (2)
Rectangle 	$\left( \frac{\Psi}{b^2} \right)^{0.33}$
Trapezoid 	$0.81 \left( \frac{\Psi}{z^{0.75} b^{1.25}} \right)^{0.27} - \frac{b}{30z}$
Triangle 	$\left( \frac{2\Psi}{z^2} \right)^{0.20}$
Circle 	$\left( \frac{1.01}{d_0^{0.26}} \right) \Psi^{0.25}$

Source: From Straub (1982).

### 70.9 Entrada de ar em canais livres

*Santa Clara County*, 2007 apresenta uma equação que fornece em porcentagem de aumento da área da seção conforme a velocidade e o raio hidráulico e aplicável para **velocidades maiores que 4,2 m/s**.

$$A_o = 10 \left[ 0,2 \frac{V^2}{(g.R)} - 1 \right]^{0,5}$$

Sendo:

$A_o$  = aumento da área da seção do canal livre (porcentagem)

$V$  = velocidade média (m/s)

$R$  = raio hidráulico (m)

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

A área molhada da seção com altura  $y$ ,  $b$  a base do canal e talude  $z$  é calculada:

$$A = y (b + zy)$$

Com o aumento da área da seção molhada  $A$  de  $A_o$  temos:

$$A \cdot (1 + A_o/100) = y (b + zy)$$

O valor de  $y$  é achado com cálculo de uma equação do segundo grau ou por tentativas.

#### Exemplo 70.8

Consideremos um canal com  $V = 9,01 m/s$ ;  $R = 0,28 m$ ,  $A = 1,01 m^2$ ;  $y = 0,35 m$ ;  $Q = 9,06 m^3/s$ ;  $b = 2,94 m$   $n = 0,015$ ;  $z = 0$ . Dados tirados do Exemplo (70.5).

$$A_o = 10 \left[ 0,2 \frac{V^2}{(g.R)} - 1 \right]^{0,5}$$

$$A_o = 10 \left[ 0,2 \times 9,01^2 / (9,81 \times 0,28) - 1 \right]^{0,5}$$

$$A_o = 28\%$$

A equação que fornece a área molhada é:  $A = y (b + zy)$

Como temos um acréscimo de 28%.

$$A \cdot (1 + A_o/100) = y (b + zy)$$

$$1,01 \cdot (1 + 28/100) = 1,01 \times 1,28 = y (2,94 + 0 \cdot y)$$

$$b = 2,94 m \quad z = 0$$

Por tentativas achamos o valor de  $y = 0,45 m$

Portanto, com aumento na área molhada de 28% acarretará um aumento de 0,10m e a altura passará a  $y = 0,45 m$ .

A altura achada  $h = 0,57 m$  das ondas do *roll waves* se somará a altura da água de 0,35m. Observando que a entrada de ar da equação de *Santa Clara County*, 2007 aumentará o nível de água em 0,10m enquanto que as ondas de *roll waves* aumentará em 0,57m.

#### Exemplo 70.9

Consideremos um canal com  $V = 4,2 m/s$ ;  $R = 0,26 m$ ;  $Q = 2,848 m^3/s$ ;  $S = 0,005 m/m$ ;  $n = 0,012$  e  $b = 2,00 m$ .

$$A_o = 10 \left[ 0,2 \frac{V^2}{(g.R)} - 1 \right]^{0,5}$$

$$A_o = 10 \left[ 0,2 \times 4,2^2 / (9,81 \times 0,26) - 1 \right]^{0,5}$$

$$A_o = 15\%$$

#### 70.10 Bibliografia e livros consultados

- CHAUDHRY, M. HANIF. *Open channel flow*. Prentice Hall, 1993.
- CHOW, VEN TE. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, 1985.
- CLARK COUNTY. *Hydrologic criteria and drainage design manual*. 12 de agosto de 1999.
- FERREIRA, FABIANA DE OLIVEIRA. *Estabilidade e controle dinâmico de Roll Waves*. Tese de doutorado, Ilha Solteira, SP, ano 2013, UNESP, 205 páginas
- FRENCH, RICHARD H. *Hydraulics of open channel flow* Chapter 3 in MAYS, LARRY W. *Handbook stormwater collection systems design handbook*. Editora McGraw-Hill, 2001.
- GUO, JAMES C. Y. *Slug and pulsating flow in high gradient channel*. Journal of IWRA International, Vol 24 n[úmero 1 march 1999, 5 páginas.
- JULIEN, P. Y e HARTLEY, D.M. *Formation of roll waves in laminar sheet flow- Formation d'un train d'ondes dans le écoulements superficiels laminaires*. Journal of Hydraulic Research, volume 24, 1986, número 01, 13 páginas.
- JULIEN, P. Y e HARTLEY, D.M. *Formation of roll waves in laminar sheet flow- Formation d'un train d'ondes dans le écoulements superficiels laminaires*. Janeiro de 1985 44 páginas. Civil Engineering Department Colorado State University. Fort Collins, Colorado.
- MOLINA, JORGE et al. *Olas pulsantes em ríos canalizados de la región de La Paz*. Bulletin Inst. fr. études andines, 1995. 12 páginas.
- MONTUORI, CARLO. *La Formazione spontanea dei treni d'onde su canali a pendenza molto forte*. Università di Napoli. Facoltà di Ingegneria. Istituti Idraulic. 1961, 20 páginas.
- SANTA CLARA COUNTY. *Drainage Manual*. 14 de agosto de 2007, 174 páginas
- TUCCI, CARLOS E. M. *Hidrologia*. EDUSP. 1003, 943páginas
- ZUCARELLI, GRACIELA VIVIANA e MORRESI, MARIA DEL VALLE. *Flujo em canales abiertos: caracterizacion em cursos de la provincia de Santa Fe*, República Argentina.