

Capítulo 70

Vedernikov, Montuori e ar em canais

Capítulo 70- Vedernikov, Montuori e ar em canais

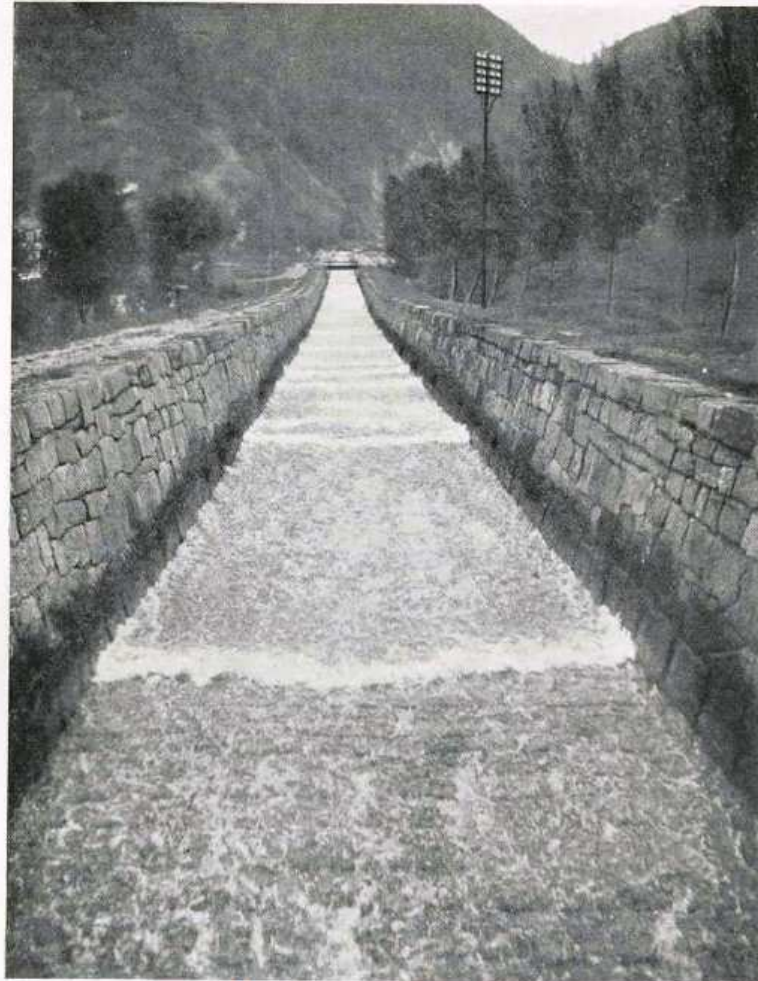
70.1 Introdução

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 (m²)

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:

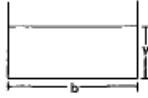
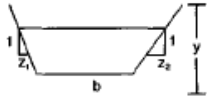
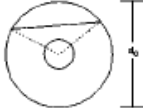
V_e = número de Vedernikov (adimensional)

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

F = número de Froude

Nota: em grego temos o gama minúsculo γ e o maiúsculo Γ

Tabela 70.1- Fatores de forma da seção (Γ)

Channel Definition (1)	Γ (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/s²= aceleração da gravidade

D= profundidade hidráulica (m)= A/ T

A= área da seção molhada (m²)

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

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

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 .

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

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 número 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*.

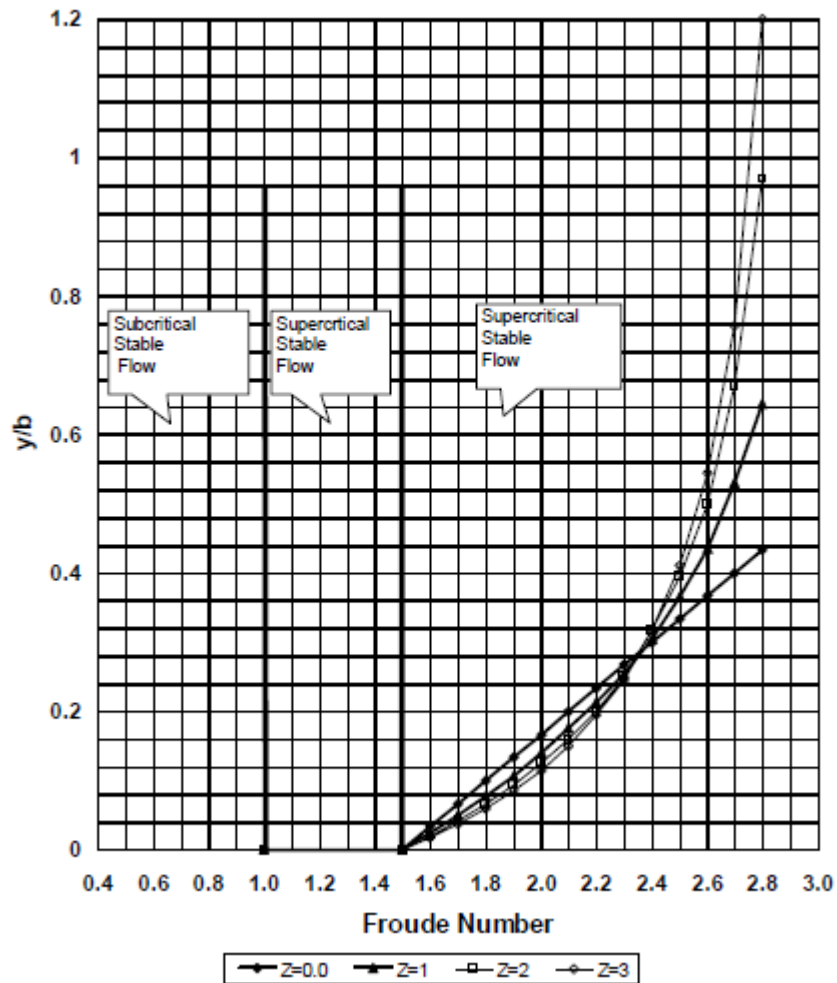


Figura 70.4- Regime de escoamento em canais livres.
 Fonte: Guo, 1999.

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.

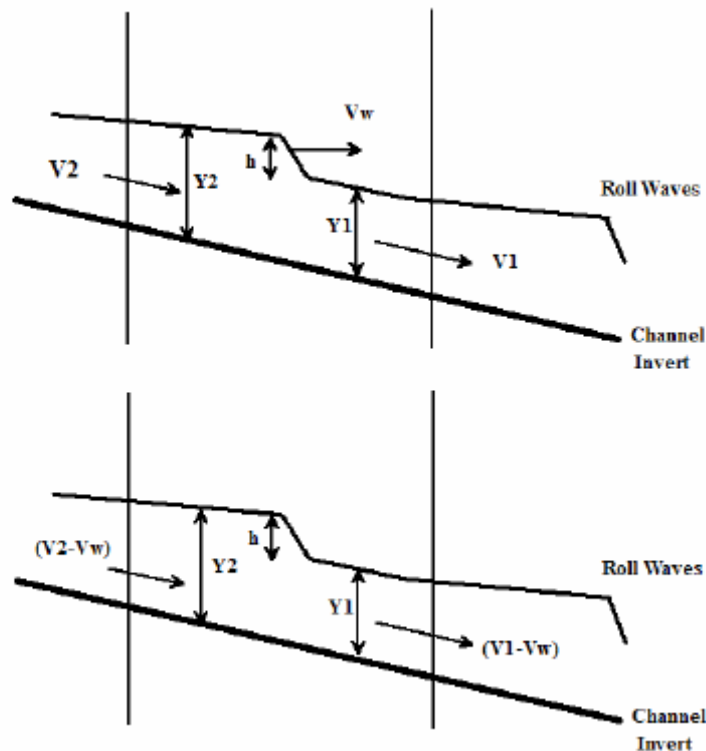


Figura 70.5-Esquema do movimento do ressalto hidráulico.
 Fonte: Guo, 1999

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

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

$$h = y_2 - y_1$$

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 contrario 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 (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 (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 Γ 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)	Γ	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 ³ /s)	(m)			(m)	(m ²)	(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 ³ /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	Γ	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)

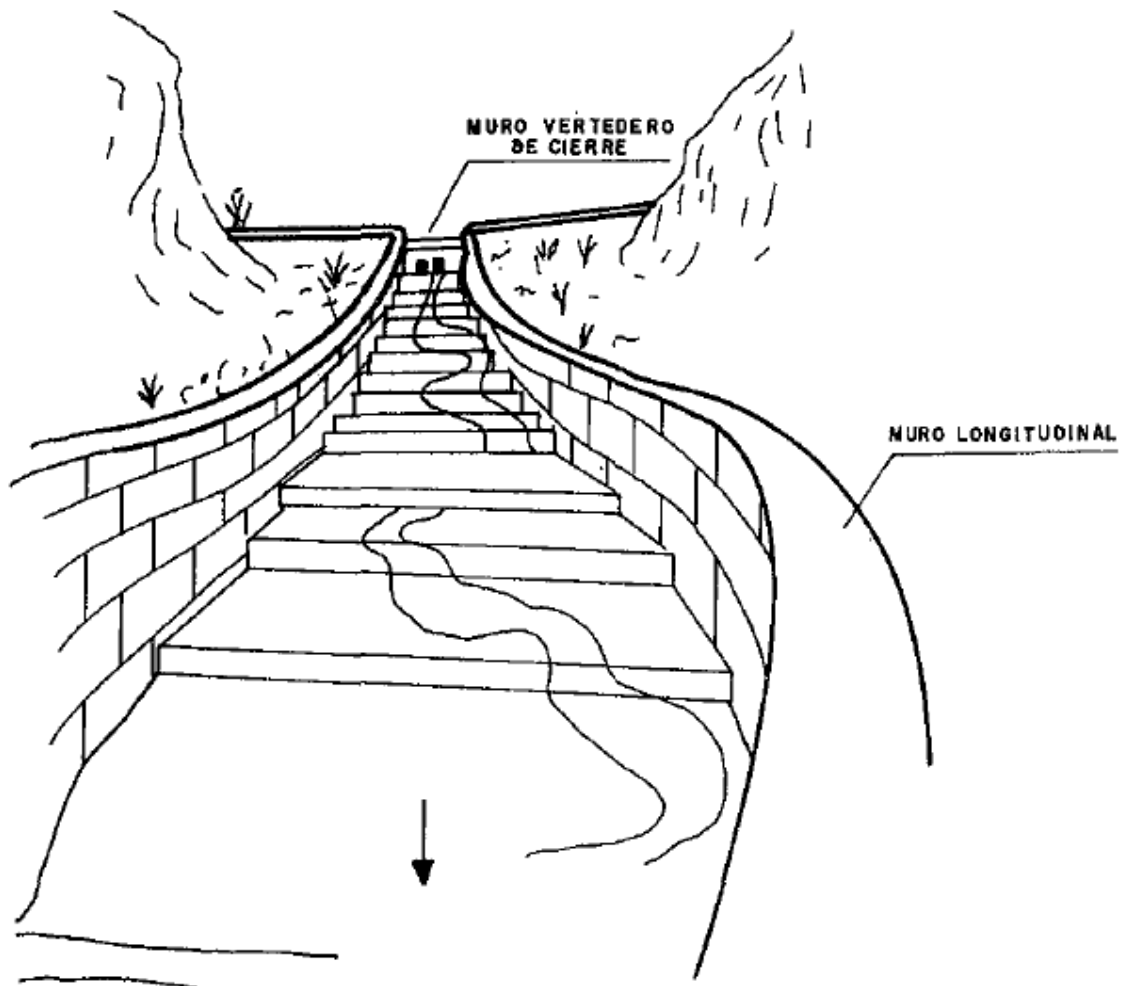


Figura 70.6-Formação de onda. Canais com com patamar de 10m e degraus de 0,50m.
Fonte: Molina, 1995.

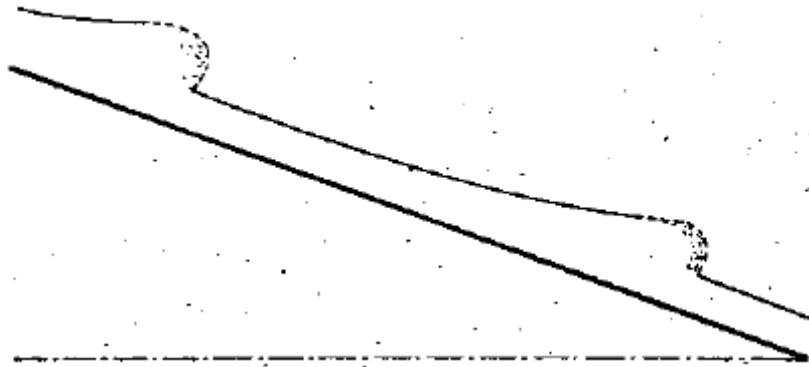


Figura 70.7- Comprimento entre as ondas.
Fonte: Montuori, 1961

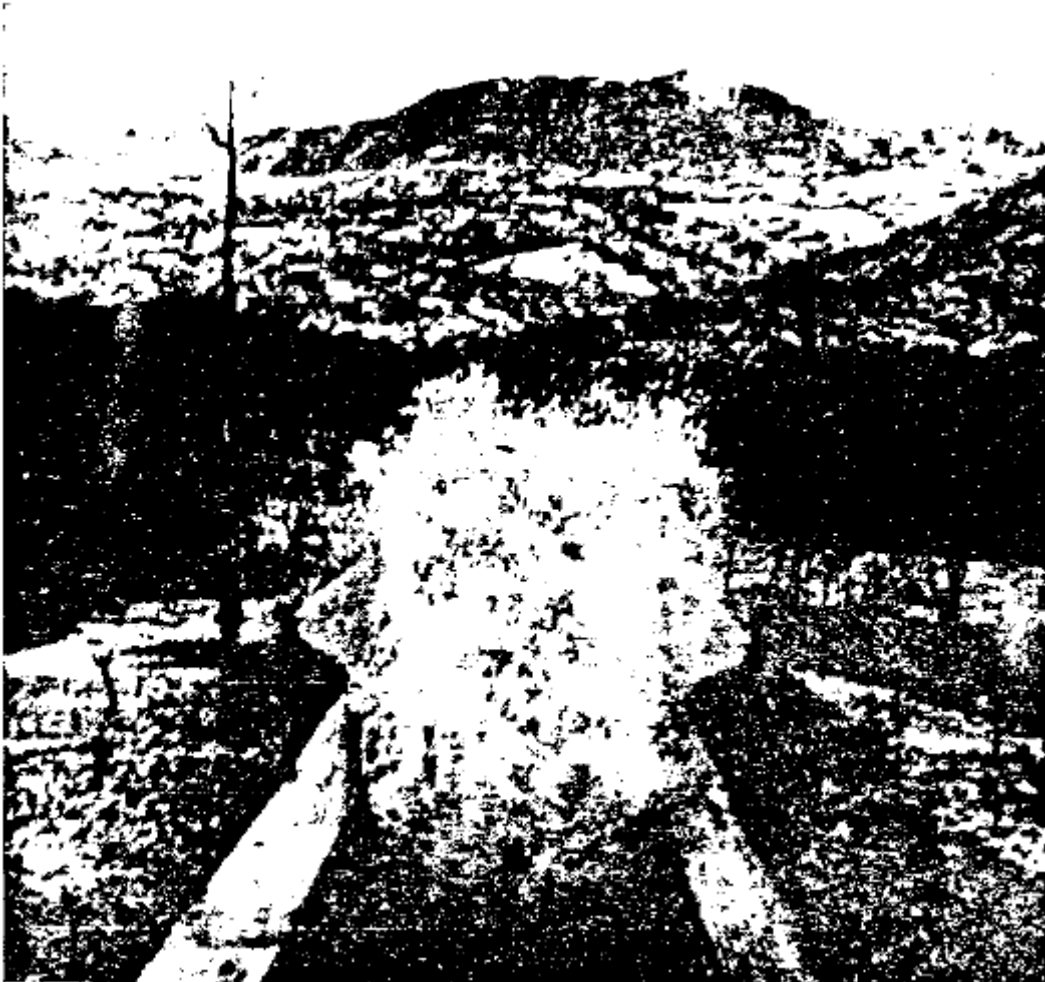


Figura 70.8- Efeito da onda quando chega ao dissipador de energia.
Fonte: Molina, 1995.

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.

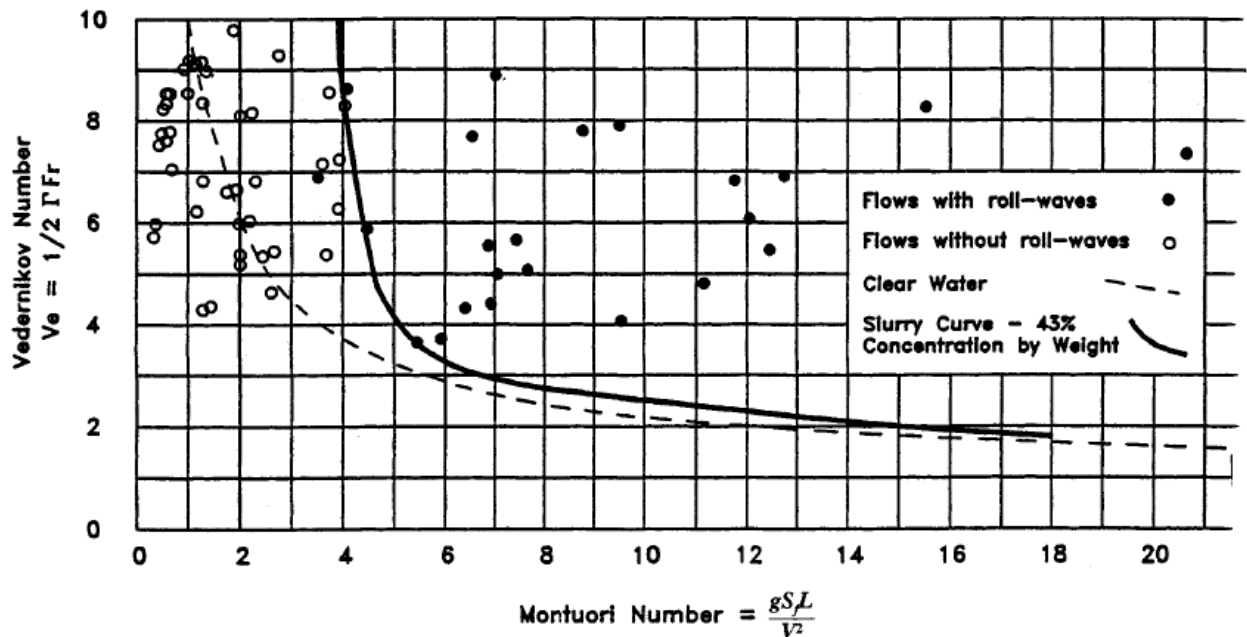


Figura 70.9- Número de Montuori e Número de Vedernikov.

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.

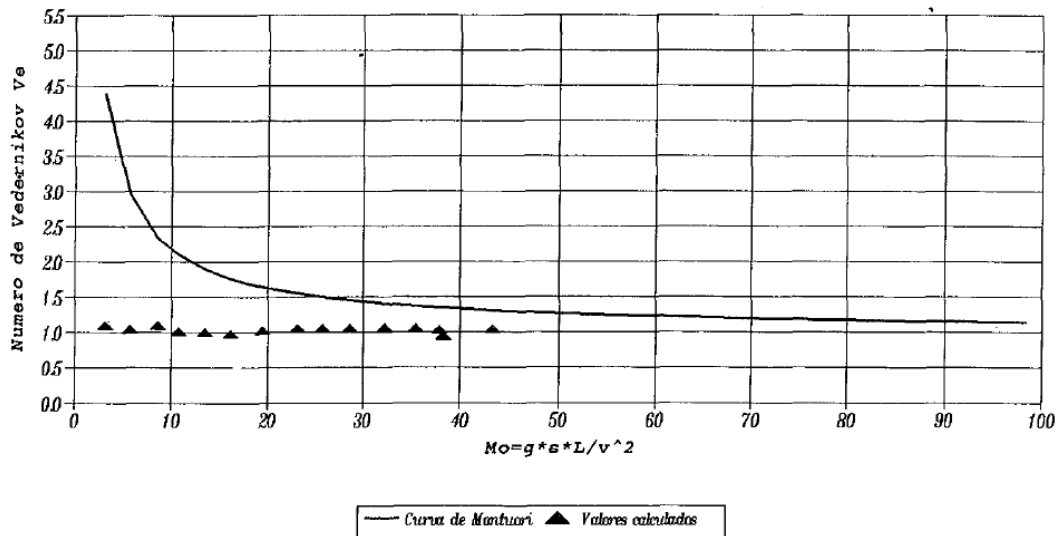


Fig. 5 - Estabilidade según Montuori - Canal Kellumani.
 Prof. $y_m = 0,30$ m

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 (m²)

P= perímetro molhado (m)

ν = viscosidade cinemática do fluido. Para água $\nu = 1,006 \times 10^{-6}$ m²/s

Para canais temos:

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

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

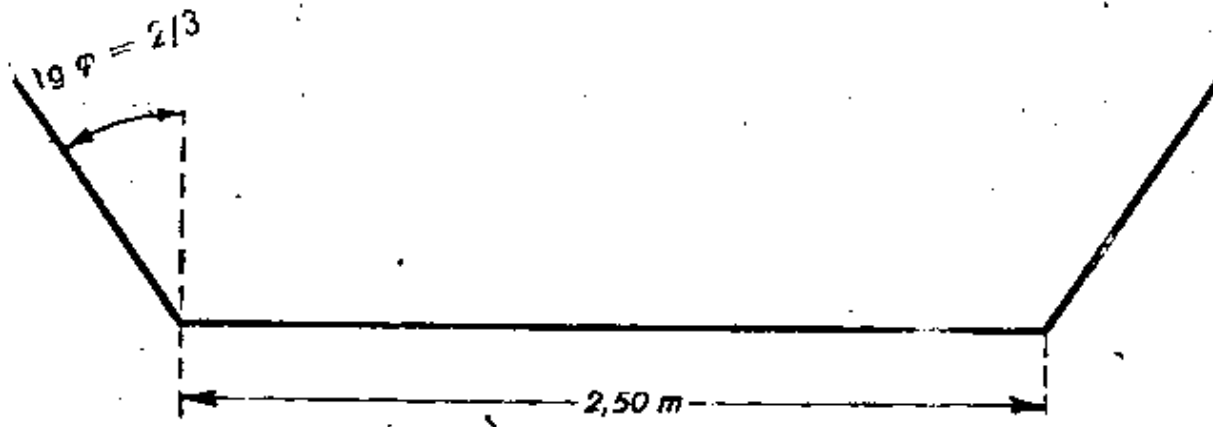
Quando $500 < Re < 2000$ o escoamento será de **transição**

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 $z= 0,66$.



$$Mo = g \cdot L \cdot S / V_0^2$$

$Mo = 9,81 \times 150 \times 0,603 \cdot 10^{-2} = 88,73 \gg 1$ 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 ³ /s)	(m)			(m)	(m ²)	(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 ³ /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







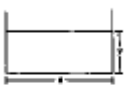
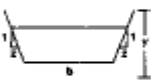
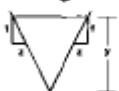

Channel Definition (1)	Area A (2)	Wetted Perimeter P (3)	Hydraulic Radius R (4)	Top Width T (5)	Hydraulic Depth D (6)
Rectangle 	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y
Trapezoid with equal side slopes 	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$
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)
<p style="text-align: center;">Rectangle</p> 	$\left(\frac{\Psi}{b^2} \right)^{0.33}$
<p style="text-align: center;">Trapezoid</p> 	$0.81 \left(\frac{\Psi}{z^{0.75} b^{1.25}} \right)^{0.27} - \frac{b}{30z}$
<p style="text-align: center;">Triangle</p> 	$\left(\frac{2\Psi}{z^2} \right)^{0.20}$
<p style="text-align: center;">Circle</p> 	$\left(\frac{1.01}{d_0^{0.26}} \right) \Psi^{0.25}$

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 Departmanet 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*. Universita di Napoli. Facolta di Ingenegneria. 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.