

# **Capítulo 71**

## **Bacia de dissipação em rampa conforme DAEE**

## Capítulo 71- Bacia de dissipação em rampa conforme DAEE

### 71.1 Introdução

Os canais em rampas (*Smooth chute* ou *Spillways chute*) apresentam a peculiaridade da entrada de ar na água o que faz com que aumente a altura de água necessitando dimensionar as laterais para não haver extravasamento. Outro fator importante é o ponto de incipiência de ar para verificação do risco de cavitação.

### 71.2 Ar na água

O ar na água do canal em rampa pode ser mostrado em perfil com quatro regiões, desde o fundo do canal onde tem pouco ar e acima onde a quantidade de ar vai aumentado.

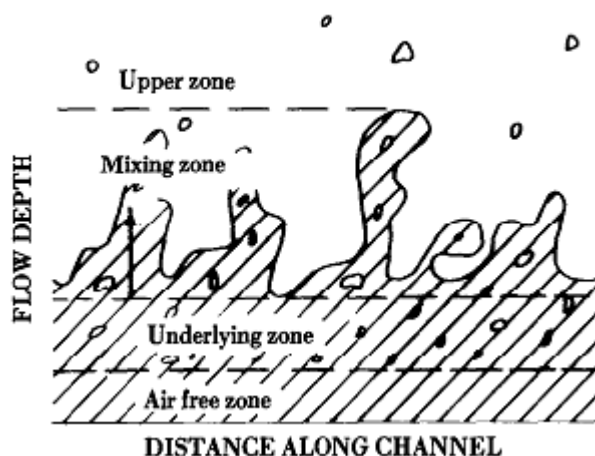
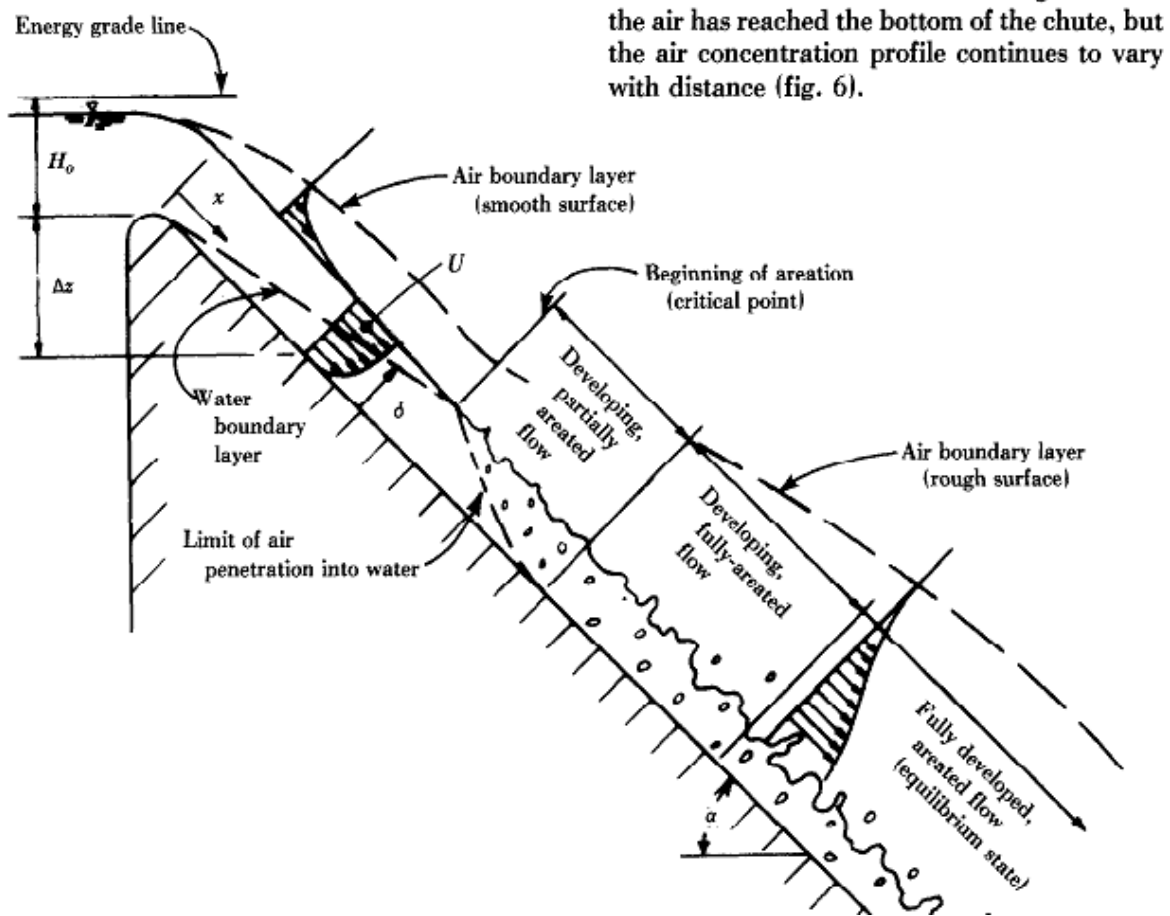


Figura 71.1- Distribuição vertical do ar em um canal em rampa  
Fonte: Bureau of Reclamation, 1980

### 71.3 Entrada de ar na rampa do canal

Ao longo da rampa do canal da Figura (71.2) podemos observar que no começo da rampa não há ar e quando a mesma vai descendo a rampa a quantidade de ar vai aumentado até chegar a um limite.



**Figura 71.2- Entrada do ar na água no canal em rampa**  
**Fonte: Bureau of Reclamation, 1980**

#### 71.4 Ponto de entrada de ar

Notar na Figura (71.2) o ponto de entrada de ar na rampa.  
 Deveremos tomar cuidado com o risco de cavitação acima do ponto de incipiência, isto é, do início de ar na água.

#### 71.5 Concentração média de ar

A concentração média de ar no canal em rampa na região aerada segundo Chaudhry, 1993 é fornecida pela equação empírica obtida por Hager, 1991 *in* Chaudhry, 1993.

**Dica: verificar que somente a partir do ponto de incipiência é que teremos concentração de ar.**

$$C = 0,75 \times (\text{sen}(\theta))^{0,75}$$

#### Exemplo 71.1

Calcular a concentração média de ar na água na região aerada de uma rampa com talude 1:1,5

$$\tan \theta = 1/1,5 = 0,667 \quad \theta = 33,7^\circ$$

$$C = 0,75 \times (\text{sen}(\theta))^{0,75}$$

$$C = 0,48$$

Portanto, teremos concentração de ar na água de 48%.

### 71.6 Altura da água com ar na rampa do canal

A altura da água com ar na rampa do canal conforme Chaudhry, 1993 é dada pela equação:

$$y_{99} = y_w + 1,35 \cdot y_w \cdot \left[ \frac{(y_w \cdot \sin(\theta))^3}{(n^2 g^3)} \right]^{(1/4)}$$

Sendo:

$y_{99}$  = altura do nível de água quando a concentração de ar for de 99% (m)

$y_w$  = profundidade normal calculada pela fórmula de Manning (m) considerando a não existência de ar;

$\theta$  = ângulo da declividade

$n$  = coeficiente de Manning

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

### Exemplo 71.2

Calcular  $y_{99}$  para uma rampa em concreto com talude 1:1,5, altura da água = 0,16m e  $n=0,018$ .

$$y_{99} = y_w + 1,35 \cdot y_w \cdot \left[ \frac{(y_w \cdot \sin(\theta))^3}{(n^2 g^3)} \right]^{(1/4)}$$
$$y_{99} = 0,16 + 1,35 \times 0,16 \left[ \frac{(0,16 \times \sin(33,7^\circ))^3}{(0,018^2 \cdot 9,81^3)} \right]^{(1/4)}$$

$$y_{99} = 0,28\text{m}$$

Devemos tomar o cuidado para que não haja extravasamento.

### 71.7 Freeboard do canal em rampa

$$Fb = (K \cdot y_1)^{0,5}$$
$$H_1 = y_1 + Fb$$

Sendo:

$Fb$  = freeboard (m)

$K = 0,8$  para vazão de  $0,5\text{m}^3/\text{s}$  a  $1,4$  para  $85\text{m}^3/\text{s}$

$y_1$  = altura da água na escada hidráulica (m)

$H_1$  = altura da parede lateral da escada hidráulica (m)

#### Sugestões de freeboard conforme Chaudhry, 1993

Descarga	<1,5m <sup>3</sup> /s	1,5 a 85m <sup>3</sup> /s	>85m <sup>3</sup> /s
Freeboard (m)	0,50	0,75	0,90

### Exemplo 71.3

Calcular o freeboard para  $V=9,93\text{m/s}$ , altura normal  $y_1 = 0,16\text{m}$

$$Fb = (K \cdot y_1)^{0,5}$$

$$Fb = (1,00 \times 0,16)^{0,5}$$

Freeboard (m) = 0,40m

A altura da parede lateral será igual a altura da água:

$$h = y_{99} + 0,40\text{m} = 0,28 + 0,40 = 0,68\text{m}.$$

### 71.8 Declividade do canal em rampa

Conforme Gupta, 2008 o canal em rampa deve ser mantido no **regime supercrítico** para evitar a formação de ressalto hidráulico no canal. Usamos a equação de Manning e calculamos a declividade crítica e adotamos um valor, não igual, mas um pouco maior devido a dificuldade de se escolher o valor da rugosidade de Manning “n” adequada

$$S_c = 12,6 \cdot n^2 / q_c^{0,222}$$

Sendo:

$S_c$  = declividade crítica do canal (m/m)

n = rugosidade de Manning

$q_c$  = descarga crítica por metro ( $m^3/s/m$ )

$$q = Q/B$$

Sendo:

q = vazão específica ( $m^3/s/m$ )

B = largura do canal (m)

$$y_c = (q^2/g)^{(1/3)}$$

Sendo:

$y_c$  = altura crítica (m)

q = vazão específica ( $m^3/s/m$ )

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

#### Exemplo 71.4

Dada vazão de  $Q = 4 m^3/s$  e largura de  $B = 2,5$ ,  $n = 0,018$  achar a declividade crítica.

$q = Q/B = 4/2,5 = 1,6 m^3/s/m$

$y_c = (q^2/g)^{(1/3)}$

$y_c = (1,6^2/9,81)^{(1/3)} = 0,64 m$

$$S_c = 12,6 \cdot n^2 / q_c^{0,222}$$

$$S_c = 12,6 \cdot 0,018^2 / 1,6^{0,222} = 0,00368 m/m$$

### 71.9 Transição

Gupta, 2008 adota que para transição convergente ou divergente deve se usar pesquisas do *Bureau of Reclamation* dos Estados Unidos de que o ângulo não deve exceder o valor dado pela equação.

$$\tan \alpha = 1 / (3 \cdot F)$$

$$F = V / (g \cdot y)^{0,5}$$

Sendo:

$\alpha$  = ângulo da parede com respeito a linha do centro

F = número de Froude

V = velocidade média no início do canal (m/s)

$g = 9,81 m/s^2$

y = altura no fim da transição (m)

### 71.10 Qual a velocidade limite ?

Para concreto adotamos no máximo 18 m/s para evitar o risco da cavitação.

O DAEE, 2005 baseado no *U.S. Bureau of Reclamation* classificou as bacias de dissipação de acordo com o número de Froude e da velocidade média de escoamento e conforme Peterka, 2005.

**Tipo I**  $1,7 < F < 2,5$

**Tipo II**  $F > 4,5$  e  $V > 15\text{m/s}$  ( para Barragens altas)

**Tipo III**  $F > 4,5$  e  $V < 15\text{m/s}$  a  $18\text{m/s}$  (Muito usado pelo DNIT)

**Tipo IV**  $2,5 < F < 4,5$  (Dissipador de impacto muito usado na PMSP e outras)

### 71.11 Dissipação de energia em escada hidráulica

Vamos usar os estudos de Peruginelli e Pagliara, 2000 para canais em rampa.

Define o valor de  $H/yc$  em função do talude da rampa.

Assim para talude 1V:2H temos:

$$H/yc = 0,062 (h_1/yc)^{-3,59} \quad \text{com a condição } H/yc < 40$$

Sendo:

H= altura da rampa (m)

yc= altura crítica (m)

$h_1$ = altura da água na rampa (m)

Assim para latude 1V:4H temos:

$$H/yc = 0,026 (h_1/yc)^{-4,76} \quad \text{com a condição } H/yc < 40$$

Sendo:

H= altura da rampa (m)

yc= altura crítica (m)

$h_1$ = altura da água (m)

Baseado em pesquisas Peruginelli e Pagliara, 2000 acharam duas equações:

**Para  $H/yc < 40$**

$$\text{Dissipação de energia} = [2 + 10,34 \cdot (H/yc)^{0,83}] / [6,54 \cdot (H/yc)^{0,28} + 4,36 \cdot (H/yc)^{1,28}]$$

**Para  $H/yc > 40$**

$$\text{Dissipação de energia} = [2 + 10,01 \cdot (H/yc)^{0,63}] / [646 \cdot (H/yc)^{0,21} + 4,31 \cdot (H/yc)^{1,21}]$$

### Exemplo 71.5

Dado uma rampa com declividade 1: 1,5 ; altura de água  $h_1 = 0,16\text{m}$  e altura crítica  $yc = 0,64\text{m}$  calcular a energia dissipada na rampa.

Devido a declividade adotamos a equação:

$$H/yc = 0,026 (h_1/yc)^{-4,76}$$

$$H/yc = 0,026 (0,16/0,64)^{-4,76} = 18,37$$

$$\text{Dissipação de energia} = [2 + 10,34 \cdot (H/yc)^{0,83}] / [6,54 \cdot (H/yc)^{0,28} + 4,36 \cdot (H/yc)^{1,28}]$$

$$\text{Dissipação de energia} = [2 + 10,34 \cdot (18,37)^{0,83}] / [6,54 \cdot (18,37)^{0,28} + 4,36 \cdot (18,37)^{1,28}] = 0,73$$

Portanto, a dissipação de energia somente na rampa é de 73%.

### 71.12 Bacia de Dissipação Tipo I

Para estimar a dissipação de energia no ressalto hidráulico da bacia de dissipação Tipo I vamos usar o gráfico de Peterka, 2005, usando a curva superior entrando na abscissa com o número de Froude.

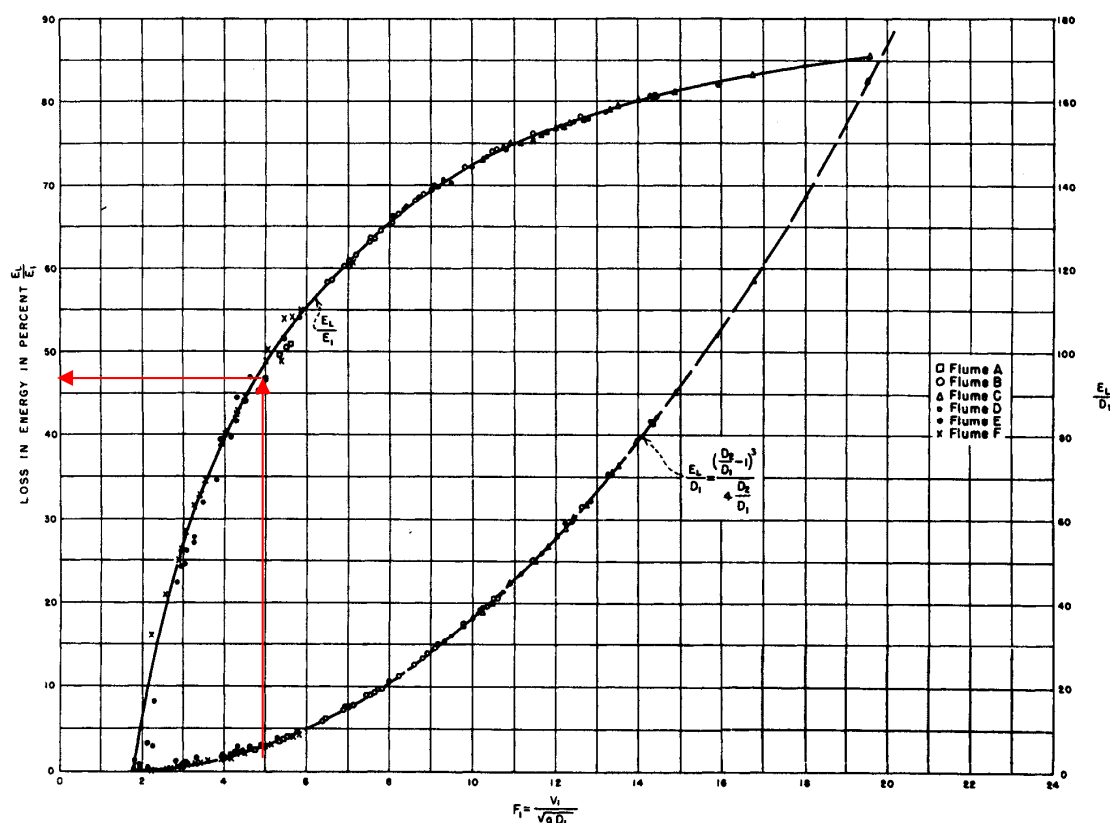


Figura 71.3- Perda de energia no ressalto hidráulico na bacia de dissipação de fundo plano Tipo I do USBR. Consultar a curva à esquerda  $E_L/E_1$ .

Fonte: Peterka, 2005

### 71.13 Perda de energia na rampa e no ressalto

A perda de energia na rampa e no ressalto é dada pela equação:

$$\text{Perda total de energia} = 1 - [(1 - \text{perda na escada hidráulica}) \times (1 - \text{perda no ressalto})]$$

#### Exemplo 71.6

Calcular a perda de energia total, sendo que na rampa é de 73% e no ressalto da bacia de 34%.

$$\text{Perda total de energia} = 1 - [(1 - 0,73) \times (1 - 0,34)] = 0,82$$

Portanto, a perda total de energia na rampa e no ressalto da bacia de fundo plano é 82%.

### 71.14 Região não aerada

Conforme CHAUDHRY, 1993 para se achar a região não aerada achamos o ponto de insepção onde a altura  $\delta$  é igual a altura do nível de água.

Conforme Brito, 2011 na região de baixa pressão são geradas as cavidades (bolhas de vapor) que implodem quando atingem regiões de pressão mais elevada no escoamento conforme Figura (71.4).

Ainda conforme Brito, 2001 algumas irregularidades de superfície é causa frequentes da ação erosiva da cavitação em vertedores conforme esquematicamente na Figura (71.5).

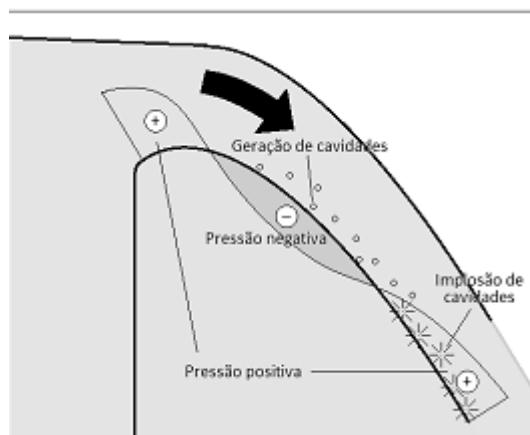


Figura 71.4- Esquema de geração de cavidades e sua implosão junto ao fundo de um vertedor. Fonte: Brito, 2011

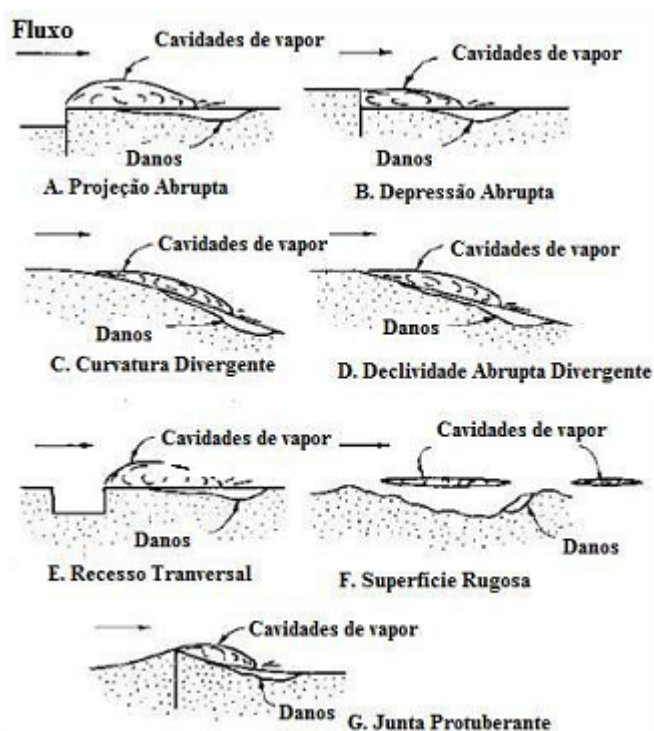


Figura 71.5- Classificação das irregularidades dos contornos sólidos e localização das áreas atingidas pela ação erosiva da cavitação.

Fonte: Brito,2011 com citação de Falvey, 1990.



CHAUDHRY, 1993 apresenta equação de Wood, 1991 aplicável em declividades de 5° a 70°.

$$\delta/xs = 0,021 (xs/hs)^{0,11} \cdot (ks/xs)^{0,10}$$

Sendo:

$\delta$  = altura da camada limite que é a distância perpendicular do fundo da rampa até onde a velocidade é 99% da linha livre de velocidade (m)

$xs$  = distância ao longo da rampa (m)

$hs$  = altura estática no ponto (m) no ponto  $xs$  dado por  **$hs = xs \cdot \text{sen}(\theta)$**

$ks$  = rugosidade equivalente a areia (m). Concreto  $ks$  varia de 0,3mm a 3mm.

Brito, 2011 cita o trabalho de Fernando e Rico, 2002 válido para canais com declividade de 5° a 70°.

$$xs = [ q / 0,056443 \cdot ks^{0,056} \cdot x (\text{sen}\theta)^{0,34} ]^F$$

$$F = [ 1,46443 \cdot ks^{0,0054} \cdot (\text{sen}\theta)^{0,0027} ]^{-1}$$

**Nota: observar que F é potência da primeira equação.**

### Exemplo 71.7

Calcular o comprimento  $xs$  ao longo da rampa para  $q=1,6\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , ângulo  $\theta=33,7^\circ$  e  $ks=0,003\text{m}$

$$F = [ 1,46443 \cdot ks^{0,0054} \cdot (\text{sen}\theta)^{0,0027} ]^{-1}$$

$$F = [ 1,46443 \cdot 0,003^{0,0054} \cdot (\text{sen}33,7^\circ)^{0,0027} ]^{-1} = 0,7057$$

$$xs = [ q / 0,056443 \cdot ks^{0,056} \cdot x (\text{sen}\theta)^{0,34} ]^F$$

$$xs = [ q / 0,056443 \cdot 0,003^{0,056} \cdot x (\text{sen}33,7^\circ)^{0,34} ]^{0,7057}$$

$$xs = 15,35\text{m}$$

Portanto, somente a 15,35m teremos o início da formação de ar. Neste caso, não haverá formação de ar, pois, a altura é de somente 5,00m.

### Exemplo 71.8

Calcular o ponto de injeção para talude 1: 1,5 para rampa em concreto com rugosidade equivalente  $Ks=3\text{mm}$  usando a equação de Wood, 2006. A altura de água é 0,16m.

**Tabela 71.1- Localização do ponto de injeção**

inclinado	Concreto (m)	pressão estática vertical		
$Xs$ (m)	$Ks$ (m)	$Hs$ (m)	$\delta/xs$	$\Delta$ (m)
0,1	0,003	0,06	0,015779	0,002
0,2	0,003	0,11	0,014723	0,003
0,3	0,003	0,17	0,014138	0,004

**Curso de Manejo de águas pluviais**  
**Capítulo 71- Bacia de dissipação em rampa conforme DAEE**  
**Engenheiro Plínio Tomaz 5 de abril de 2014 pliniotomaz@uol.com.br**

---

<b>0,4</b>	0,003	0,22	0,013737	0,005
<b>0,5</b>	0,003	0,28	0,013433	0,007
<b>0,6</b>	0,003	0,33	0,013191	0,008
<b>0,7</b>	0,003	0,39	0,012989	0,009
<b>0,8</b>	0,003	0,44	0,012817	0,010
<b>0,9</b>	0,003	0,50	0,012667	0,011
<b>1</b>	0,003	0,55	0,012534	0,013
<b>1,1</b>	0,003	0,61	0,012415	0,014
<b>1,2</b>	0,003	0,67	0,012307	0,015
<b>1,3</b>	0,003	0,72	0,012209	0,016
<b>1,4</b>	0,003	0,78	0,012119	0,017
<b>1,5</b>	0,003	0,83	0,012036	0,018
<b>1,6</b>	0,003	0,89	0,011958	0,019
<b>1,7</b>	0,003	0,94	0,011886	0,020
<b>1,8</b>	0,003	1,00	0,011818	0,021
<b>1,9</b>	0,003	1,05	0,011755	0,022
<b>2</b>	0,003	1,11	0,011695	0,023
<b>2,1</b>	0,003	1,16	0,011638	0,024
<b>2,2</b>	0,003	1,22	0,011584	0,025
<b>2,3</b>	0,003	1,28	0,011532	0,027
<b>2,4</b>	0,003	1,33	0,011483	0,028
<b>2,5</b>	0,003	1,39	0,011436	0,029
<b>2,6</b>	0,003	1,44	0,011392	0,030
<b>2,7</b>	0,003	1,50	0,011349	0,031
<b>2,8</b>	0,003	1,55	0,011308	0,032
<b>2,9</b>	0,003	1,61	0,011268	0,033
<b>3</b>	0,003	1,66	0,011230	0,034
<b>3,1</b>	0,003	1,72	0,011193	0,035
<b>3,2</b>	0,003	1,78	0,011158	0,036
<b>3,3</b>	0,003	1,83	0,011123	0,037
<b>3,4</b>	0,003	1,89	0,011090	0,038
<b>3,5</b>	0,003	1,94	0,011058	0,039
<b>3,6</b>	0,003	2,00	0,011027	0,040
<b>3,7</b>	0,003	2,05	0,010997	0,041
<b>3,8</b>	0,003	2,11	0,010967	0,042
<b>3,9</b>	0,003	2,16	0,010939	0,043
<b>4</b>	0,003	2,22	0,010911	0,044
<b>4,1</b>	0,003	2,27	0,010884	0,045
<b>4,2</b>	0,003	2,33	0,010858	0,046
<b>4,3</b>	0,003	2,39	0,010833	0,047
<b>4,4</b>	0,003	2,44	0,010808	0,048
<b>4,5</b>	0,003	2,50	0,010784	0,049
<b>4,6</b>	0,003	2,55	0,010760	0,049
<b>4,7</b>	0,003	2,61	0,010737	0,050

4,8	0,003	2,66	0,010714	0,051
4,9	0,003	2,72	0,010692	0,052
5	0,003	2,77	0,010671	0,053
5,1	0,003	2,83	0,010649	0,054
5,2	0,003	2,88	0,010629	0,055
5,3	0,003	2,94	0,010609	0,056
5,4	0,003	3,00	0,010589	0,057
5,5	0,003	3,05	0,010569	0,058
5,6	0,003	3,11	0,010550	0,059
5,7	0,003	3,16	0,010532	0,060
5,8	0,003	3,22	0,010513	0,061
5,9	0,003	3,27	0,010495	0,062
6	0,003	3,33	0,010478	0,063
6,1	0,003	3,38	0,010460	0,064
6,2	0,003	3,44	0,010443	0,065
6,3	0,003	3,49	0,010427	0,066
6,4	0,003	3,55	0,010410	0,067
6,5	0,003	3,61	0,010394	0,068
6,6	0,003	3,66	0,010378	0,068
6,7	0,003	3,72	0,010363	0,069
6,8	0,003	3,77	0,010347	0,070
6,9	0,003	3,83	0,010332	0,071
7	0,003	3,88	0,010318	0,072
7,1	0,003	3,94	0,010303	0,073
7,2	0,003	3,99	0,010288	0,074
7,3	0,003	4,05	0,010274	0,075
7,4	0,003	4,10	0,010260	0,076
7,5	0,003	4,16	0,010247	0,077
7,6	0,003	4,22	0,010233	0,078
7,7	0,003	4,27	0,010220	0,079
7,8	0,003	4,33	0,010206	0,080
7,9	0,003	4,38	0,010193	0,081
8	0,003	4,44	0,010181	0,081
8,1	0,003	4,49	0,010168	0,082
8,2	0,003	4,55	0,010156	0,083
8,3	0,003	4,60	0,010143	0,084
8,4	0,003	4,66	0,010131	0,085
8,5	0,003	4,71	0,010119	0,086
8,6	0,003	4,77	0,010107	0,087
8,7	0,003	4,83	0,010096	0,088
8,8	0,003	4,88	0,010084	0,089
8,9	0,003	4,94	0,010073	0,090
9	0,003	4,99	0,010061	0,091

Observar que chegamos praticamente a altura de 4,99m e a altura  $\delta$  máxima atingida foi de 0,091m não ultrapassado os 0,16m da camada de água. Portanto, não acharemos o ponto de incipência de ar neste caso.

Portanto, deveremos tomar cuidado com cavitação em toda a rampa.

### 71.15 Bacia de dissipação de Ven Te Chow adaptado por Kokei Uehara

O prof. dr. Kokei Uehara apresenta no Guia Prático para Projetos de Pequenas obras hidráulicas do DAEE- Departamento de águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo publicado em 2005 um exemplo de bacia de dissipação de energia.

O DAEE adotou para dissipador de energia em pequenas obras hidráulicas o modelo de Ven Te Chow, que está no item 15-9 do livro *Open-Channel Hydraulics* de 1973- controle do ressalto por meio de soleira.

#### Método de Ven Te Chow

O método de Ven Te Chow foi adaptado pelo prof dr. Kokei Uehara. A Figura (71.5) extraída do trabalho do DAEE, 2005 mostra o esquema da bacia de dissipação usada em pequenas obras hidráulicas no Estado de São Paulo.

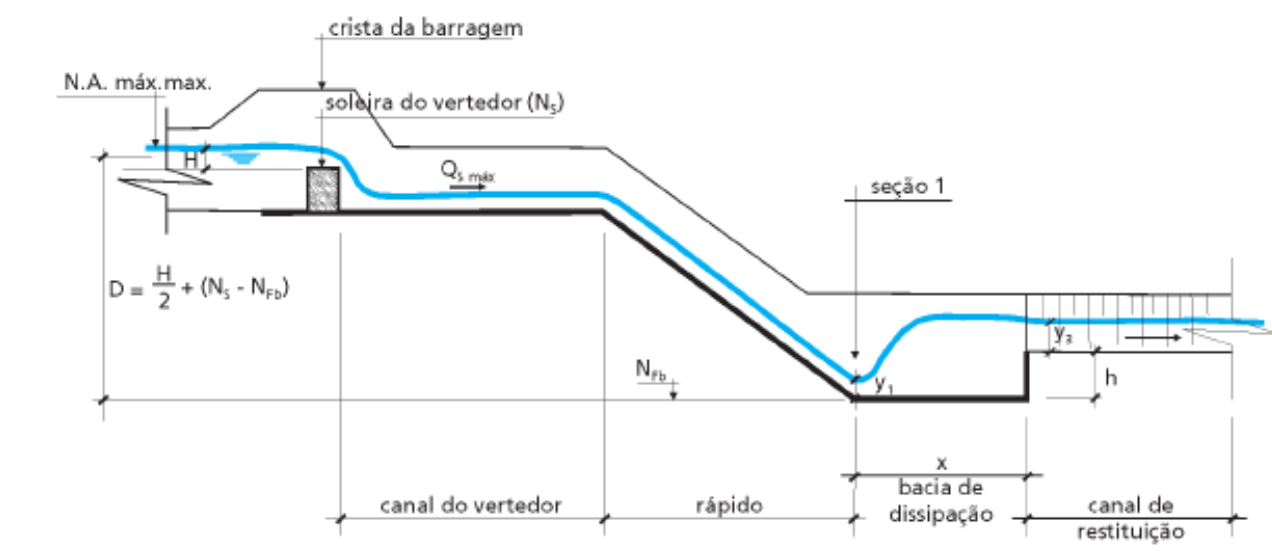
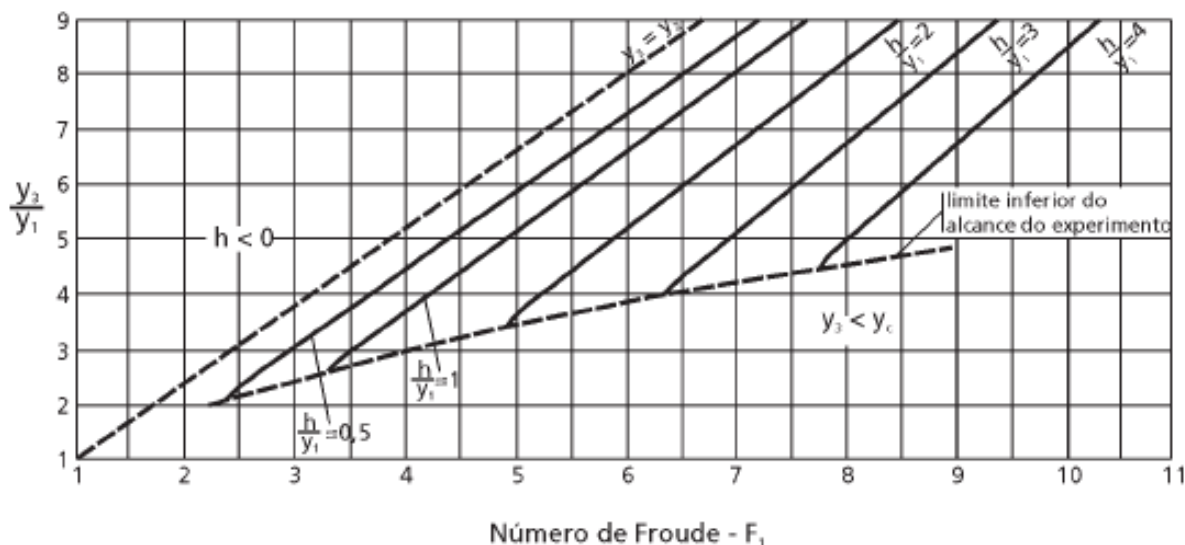


Figura 71.6- Esquema da bacia de dissipação de Ven Te Chow adaptada pelo prof dr. Kokei Uehara.

A Figura (71.6) de Forster e Skrinde é resultado de pesquisas baseado na teoria do momento e relaciona  $F$ ,  $y_3/y_1$  e  $h/y_1$  a uma subida abrupta a  $X = (5(H+y_3))$ .



**Figura 71.7- Dado o número de Froude  $F_1$  e a relação  $y_3/y_1$  achamos por interpolação o valor  $h/y_1$**   
**Fonte: DAEE, 2005 e Chow, 1985**

O método do prof. dr. Kokei Uehara consiste em achar  $V_1$ ,  $y_1$ ,  $F_1$  e  $y_3$  e com estes valores entramos no gráfico da Figura (71.4) e achamos o valor  $h$  e está resolvido o problema.

O comprimento  $X$  da bacia de dissipação é:

$$X = 5 (h + y_3)$$

A declividade da rampa da bacia de dissipação é geralmente  $\geq 2$  (horizontal) : 1 (vertical).

Existem na bacia de dissipação do prof Kokei Uehara quatro medidas de comprimentos básicas que são:

1. Comprimento do canal do vertedor que fica a montante e na saída do vertedor da barragem, possuindo baixa declividade sendo geralmente um canal de concreto de seção retangular.
2. Comprimento da projeção da rampa que depende da altura e da declividade escolhida.
3. Comprimento da bacia de dissipação propriamente dita  $X$ .
4. Comprimento do canal de restituição, que será o curso de água normal geralmente de terra de seção trapezoidal, onde a água escoará após passar na bacia de dissipação. Este comprimento geralmente não entra nos cálculos.

O problema é feito para calcular o valor de “ $h$ ”, que é a altura do degrau. Com a determinação de “ $h$ ” e de  $y_3$  achamos o comprimento da bacia  $X$  e está resolvido o problema.

$$X = 5 (h + y_3)$$

Salientamos que os canais à jusante da bacia de dissipação tem a sua altura  $y_3$  determinadas usando a equação de Manning.

Chanson, 2010 na página 410 observa que quando **há bloco de impacto** como no procedimento que estamos vendo, não se aplica a equação:

$$d_{con}/d = 0,5 \cdot (1 + 8F^2)^{0,5} - 1$$

Uma outra observação de Chanson, 2010 é que perda de energia pode ser calculada em função do número de Froude F calculado:

$$F = V / (g \cdot d)^{0,5}$$

Sendo:

F= número de Froude

V= velocidade

d=y<sub>1</sub>=altura de água no pé da rampa (m)

$$\Delta h/d = [(1+8F^2)^{0,5} - 3]^3 / 16[(1+8F^2)^{0,5} - 1]$$

### Exemplo 71.9

Sendo F=7,9 calcular a perda de energia no dissipador com ressalto.

$$\Delta h/d = [(1+8F^2)^{0,5} - 3]^3 / 16[(1+8F^2)^{0,5} - 1]$$
$$\Delta h/d = [(1+8 \times 7,9^2)^{0,5} - 3]^3 / 16[(1+8 \times 7,9^2)^{0,5} - 1] = 57,52\%$$

Chanson 2010 ainda recomenda que quando há bloco na bacia de dissipação e velocidade máxima de entrada deve ser menor que 20m/s a 30m/s para evitar cavitação.

### Exemplo 71.9- Adaptado do DAEE, 2005

Dimensionar a bacia de dissipação usando modelo de Ven Te Chow adaptado pelo prof dr. Kokei Uehara sendo dada a vazão pico de 4m<sup>3</sup>/s e altura D conforme Figura (71.5) D=5,00m. A largura do canal a montante é B=2,5m e D é a distância do fundo da bacia de dissipação até a metade da altura H sobre o vertedor.

Esclarecemos que foi calculada uma barragem e obtida a altura sobre o vertedor H=0,80m. A vazão específica por unidade de largura do canal retangular q será:

$$q = Q / B$$

Sendo:

q= vazão específica por unidade de largura (m<sup>3</sup>/s/m)

Q= vazão de pico no vertedor para o período de retorno adotado (m<sup>3</sup>/s)

B=largura do canal a montante antes da rampa (m)

$$q = Q / B$$

$$q = 4 \text{ m}^3/\text{s} / 2,5 \text{ m} = 1,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

$$V_1 = (2 \times g \times D)^{0,5}$$

Sendo:

V<sub>1</sub>= velocidade no fim da rampa (m/s)

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

D= altura entre o fundo da bacia de dissipação e altura média H sobre o vertedor da barragem.

$$V_1 = (2 \cdot g \cdot D)^{0,5}$$

$$V_1 = (2 \times 9,81 \times 5,0)^{0,5} = 9,9 \text{ m/s}$$

$$y_1 = q_1 / V_1 = 1,6 / 9,9 = 0,16 \text{ m}$$

Número de Froude F<sub>1</sub>

$$F_1 = V_1 / (g \times y_1)^{0,5}$$

Sendo:

F<sub>1</sub>= número de Froude na seção 1 (adimensional)

V<sub>1</sub>= velocidade na seção 1 (m/s)

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

y<sub>1</sub>= altura do nível de água na seção 1 (m)

$$F_1 = V_1 / (g \cdot y_1)^{0,5}$$

$$F_1 = 9,9 / (9,81 \times 0,16)^{0,5} = 7,9 > 1 \text{ Regime supercrítico}$$

Cálculo de  $y_3$

Considerado a vazão de  $4\text{m}^3/\text{s}$ , declividade  $S=0,0025\text{m/m}$ , canal de terra com  $n=0,035$  e seção trapezoidal com base  $B=1,5\text{m}$  usando a equação de Manning obtemos  $y_3=1,15\text{m}$ .

Nota: o valor  $y_3$  nada mais é que o *tailwater*=TW.

$$V = 1/n \times R^{(2/3)} \times S^{0,5}$$

$$Q = V \times A$$

Sendo:

$V$ = velocidade (m/s)

$n$ = coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional)

$R$ = raio hidráulico (m)

$R = A/P$

$A$ = área molhada ( $\text{m}^2$ )

$P$ = perímetro molhado (m)

$P = (2 \cdot y_3 + b)$

$S$ = declividade (m/m)

Entrando na Figura (71.6) com  $F_1$  e  $y_3/y_1 = 1,15/0,16 = 7,2$  e fazendo a interpolação achamos  $h/y_1 = 2,7$

Como  $y_1 = 0,161\text{m}$  então  $h = y_1 \times 2,7 = 0,161 \times 2,7 = 0,44\text{m}$

$$h = 0,44\text{m}$$

O comprimento  $X$  da bacia de dissipação será:

$$X = 5 (h + y_3) = 5 (0,44 + 1,15) = 7,95\text{m} \text{ e adoto } X = 8,00\text{m}$$

Portanto, a bacia terá comprimento  **$X=8,00\text{m}$** , **degrau  $h=0,45\text{m}$**  e **largura  $b=2,5\text{m}$** .

**Tabela 71.2- Dimensionamento de rampa (rápido) conforme DAEE e cálculo da dissipação de energia**

<b>d</b>	<b>Desnível(m)</b>	<b>5,03</b>
<b>Talude</b>	<b>1:z</b>	<b>1,50</b>
<b>Declividade</b>	<b>(m/m)</b>	<b>0,67</b>
<b>Ângulo</b>	<b>(rad)</b>	<b>0,5880</b>
<b>Graus</b>		<b>33,6901</b>
<b>Projeção</b>	<b>S (m)</b>	<b>7,55</b>
	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>4,00</b>
<b>b</b>	<b>Largura (m)</b>	<b>2,5</b>
	<b>q (m<sup>3</sup>/s/m)</b>	<b>1,6</b>
<b>k</b>	<b>yc (m)</b>	<b>0,64</b>
<b>concreto</b>	<b>n</b>	<b>0,018</b>
	<b>Sc (m/m)</b>	<b>0,00368</b>
<b>h1</b>	<b>y1(m)</b>	<b>0,16</b>
	<b>V(m/s)</b>	<b>9,93</b>
	<b>Froude</b>	<b>7,90</b>
	<b>d/k</b>	<b>18,37</b>

	<b>Verificação</b>	<b>OK</b>
	<b>Dissipação rampa</b>	<b>0,73</b>
	<b>Dissip ressalto</b>	<b>0,34</b>
	<b>Dissipação total</b>	<b>0,82</b>
<b>Terra</b>	<b>n</b>	<b>0,035</b>
	<b>S(m/m)</b>	<b>0,0025</b>
<b>&lt;40</b>	<b>y3(m)</b>	<b>1,18</b>
<b>Trapezoidal</b>	<b>Talude z</b>	<b>1,5</b>
	<b>b (m)</b>	<b>2,00</b>
	<b>P(m)</b>	<b>6,25</b>
	<b>A(m2)</b>	<b>3,86</b>
	<b>R(m)</b>	<b>0,62</b>
	<b>V(m)</b>	<b>1,04</b>
	<b>Q(m3/s)</b>	<b>3,99</b>
	<b>y3/y1</b>	<b>7,33</b>
	<b>Grafico h/y1</b>	<b>2,6</b>
	<b>h(m)</b>	<b>0,42</b>
	<b>x(m)</b>	<b>7,99</b>
	<b>y99(m)</b>	<b>0,28</b>
	<b>Media ar</b>	<b>0,48</b>



### 71.16 Abaixamento abrupto

Na bacia de dissipação de Vem Te Chow e Kokei Uehara adotamos uma subida abrupta  $h$ . Agora vamos fazer o inverso, isto é, adotar uma queda abrupta na bacia de dissipação de energia conforme Figura (71.7).

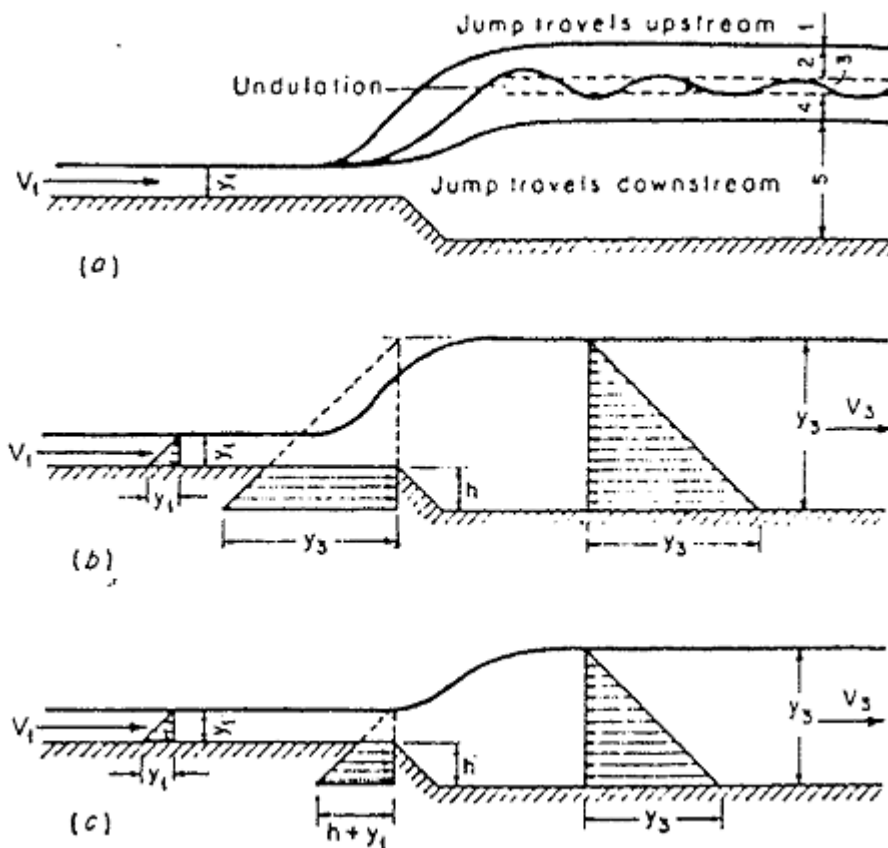
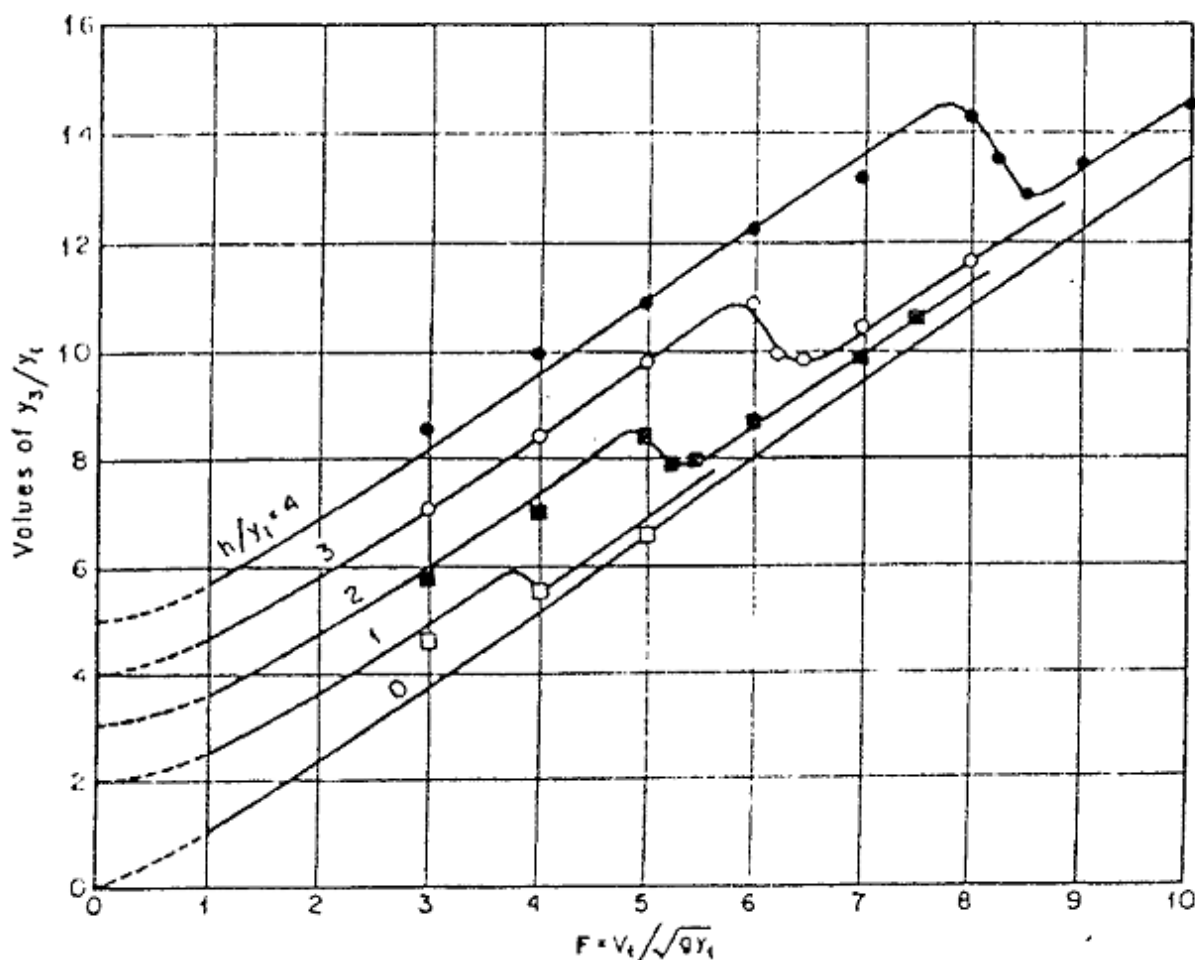


Figura 71.8- Abaixamento abrupto

Na Figura (71.8) estão as relações entre  $F$ ,  $y_3/y_1$  e  $h/y_1$  para um abaixamento abrupto.



**Figura 71.9- Relacionando entre F,  $y_3/y_1$  e  $h/y_1$  para abaixamento abrupto**

Na Figura (71.9) podemos observar 5 regiões, sendo a região 1 o limite da profundidade em que o ressalto começará para deslocamento à montante. O limite superior é a região 5 em que a profundidade na qual o ressalto começará com deslocamento à jusante.

Somente nas regiões 2 e 4 é que o ressalto será estável.

Para a região 2 foi proposta a equação verificada em experimento

$$F^2 = 0,5 \cdot [(y_3/y_1)/(1-y_3/y_1)] \cdot [1 - (y_3/y_1 - h/y_1)^2]$$

Para a região 4 foi proposta a equação verificada em experimento

$$F^2 = 0,5 \cdot [(y_3/y_1)/(1-y_3/y_1)] \cdot [(h/y_1 + 1)^2 - (y_3/y_1)^2]$$

### 71.17 Bibliografia e livros consultados

- BRITO, ROMUALDO JOSÉ ROMÃO. *Análise da aeração em escoamentos de altas velocidades em calhas de vertedores*. Mestrado, na Universidade de São Paulo –Escola de Engenharia de São Carlos, 2011, 91 páginas
- BUREAU OF RECLAMATION. *Air-water flow in Hydraulic structures*. Denver, dezembro de 1980.
- CHANSON, HUBERT. *The Hydraulics of open channel flow: an introduction*. 2° ed. ISBN 978-0-7506-5978-9. Editora Elsevier, Australia, 585 páginas, ano 2010.
- CHANSON, HUBERT. *The Hydraulics of stepped chuttes and spillways*. ISBN 90 5809 352 2. Editora Balkema, Netherlands, 384 páginas, ano 2002.
- CHAUDHRY, M. HANIFF. *Open channels flow*. Prentice Hall, 1993
- CHOW, VEN TE. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, 1985 21ª edição com direitos válidos desde 1959. 680 páginas, ISBN 0-07-Y85906-X.
- DAEE** (DEPARTAMENTO DE AGUAS E ENERGIA ELETRICA DO ESTADO DE SAO PAULO). *Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas*, 2005, 124 páginas.
- GUPTA, RAM S. *Hydrology and Hydraulic Systems*. 3a ed, Usa, 2008, 896 páginas, ISBN 1-57766-455-8.
- KHATSURIA**. R. M. *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. Editora Marcel Dekker, New York, 2005, 649 páginas.
- PERUGINELLI, ALESSANDRO e PAGLIARA, STEFANO. *Energy dissipation comparison among stepped channel, drop and ramp structures*. in *Hydraulics os Stepped Spillways* de Minor e Hager, 2000, ISBN 905809135X. Editora Balkema, Netherlands.
- PETERKA**, A. J. *Hydraulic design of stilling basins and energy*. Havaii, 2005. US Department of the Interior-Bureau of Reclamation. ISBN 1-4102-2341-8. Nota: é uma reimpressão do original.