

## **Capítulo 58**

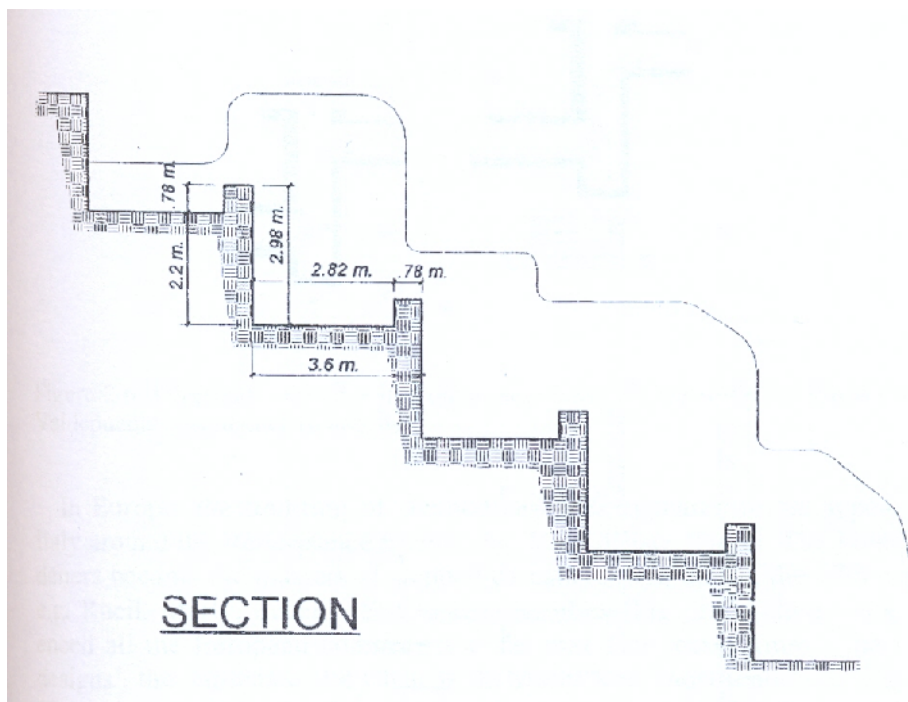
### **Escada hidráulica com reservatórios no patamar**

## Capítulo 58-Escada hidráulica com reservatórios no patamar

### 58.1 Introdução

Vamos exemplificar como dimensionar uma escada hidráulica com reservatórios no patamar conforme Figura (58.1) usando escoamento tipo *nappe flow* usando os conceitos de: Aigner, 2004, Chanson 2002 e Khatsuria, 2005.

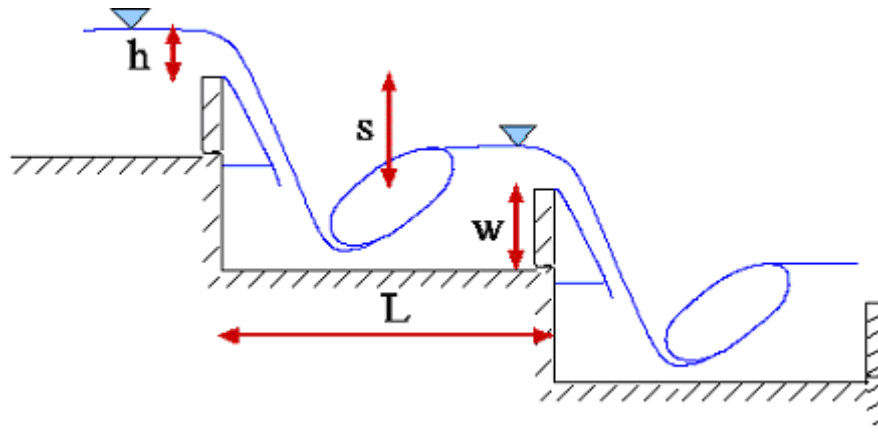
A escada hidráulica com reservatórios no patamar deve ser evitada em lugares onde há o efeito de neve e congelamento, o que não existe no Brasil.



**Figura 58.1- Escada hidráulica com reservatórios no patamar feita pelos Romanos conforme Chanson, 2002**

### 58.2 Escada hidráulica com reservatório no patamar

Na Figura (58.2) temos uma seção de uma escada hidráulica com reservatório no patamar que possui a grande vantagem de apresentar uma dissipação de energia muito grande. Os degraus fazem a redução da energia cinética transformando-a em calor.



**Figura 58.2-** Escada hidráulica com reservatórios no patamar com escoamento *nappe flow*.  
Fonte:Aigner, 2004.

O escoamento deve ser mantido como *nappe flow*.

Conforme Aigner, 2004 existem muito poucos trabalhos sobre escadas hidráulicas com reservatório no patamar.

### 58.3 Tipos básicos de escoamento em escada hidráulica

Em escada hidráulica temos três tipos de escoamentos:

- Escoamento em **quedas sucessivas** (*nappe flow*)
- Escoamento **intermediário ou misto** (zona de transição)
- Escoamento **deslizante sobre turbilhões** (*skimming flow*)

#### Escoamento em quedas sucessivas (*nappe flow*)

No regime denominado *nappe flow* as vazões são baixas e o gradiente também é baixo e a água cai de um degrau para o outro de uma maneira pulsante. Forma-se o ar nos degraus.

Chanson, 2001 divide o escoamento *nappe flow* em três tipos:

#### 58.3.1 Escoamento *nappe flow* com ressalto hidráulico completo denominado $NA_1$

Neste caso conforme Chanson, 2002 a condição para termos o escoamento com ressalto hidráulico o valor  $hc/s$  deve atender a equação:

$$hc/s < 0,0916 \times (s/b)^{-1,276} \quad (\text{Equação 58.1})$$

Sendo:

$hc$  = altura crítica (m)

$S$  = altura da escada (m)

$b$  = largura do patamar da escada (m)

No escoamento *nappe flow* com ressalto hidráulico forma-se um ressalto hidráulico dentro do patamar do degrau e é bastante usado dissipando bem a energia, mas precisamos de espaço para a sua aplicação.

#### Exemplo 50.1

Verificar se uma escada hidráulica com altura do degrau  $s = 1,92\text{m}$  e largura do patamar dos degraus  $b = 15,5\text{m}$ . A vazão de entrada na escada hidráulica é  $29,56\text{m}^3/\text{s}$  e a largura da escada  $B = 10,5\text{m}$ .

$$q = Q/B = 29,56 / 10,5 = 2,815\text{m}^3/\text{s/m}$$

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

$$hc = (2,815^2/9,81)^{(1/3)}$$

$$hc = 0,931\text{m}$$

Relação  $hc/s = 0,931 / 1,92 = 0,48$

Vamos verificar o segundo lado da Equação (58.1).

$$A = 0,0916 \times (s/b)^{-1,276}$$

$$A = 0,0916 \times (1,92/15,5)^{-1,276}$$

$$A = 1,32$$

Portanto, teremos regime de escoamento *nappe flow*, pois,  $hc/s < 1,32$

Para o escoamento com ressalto hidráulico completo conforme Khasuria, 2005 e Chanson, 2002 a perda de energia pode ser calculado por:

$$\Delta E / H_{\max} = 1 - [ 0,54 (hc/s)^{0,275} + 1,715 (hc/s)^{-0,55} ] / [ 1,5 + (Hd / hc) ]$$

Sendo:

hc= altura crítica (m)

s= altura da escada (m)

Hd= altura total da escada hidráulica (m)

Hmax= Hd + 1,5 hc

### Exemplo 58.2

Calcular a dissipação de energia em uma escada hidráulica com altura do degrau s=1,92m, hc= 0,931m e altura total de escada Hd= 9,58m

$$\Delta E / H_{\max} = 1 - [ 0,54 (hc/s)^{0,275} + 1,715 (hc/s)^{-0,55} ] / [ 1,5 + (Hd / hc) ]$$

Relação hc/s= 0,931/ 1,92= 0,48

$$\Delta E / H_{\max} = 1 - [ 0,54 (0,48)^{0,275} + 1,715 (0,48)^{-0,55} ] / [ 1,5 + (9,58 / 0,931) ]$$

$$\Delta E / H_{\max} = 0,74$$

Portanto, a perda de energia na escada hidráulica é de 74%.

Isto significa que a energia residual é = 1-0,74= 0,26

Como Hmax= 9,58m a altura residual Hr= 9,58 x 0,26= 2,49m

### Dissipação de energia

Aigner, 2004 calculou que a máxima energia dissipada numa escada hidráulica com reservatórios nos patamares com a equação abaixo, salientando que a verdadeira dissipação é um pouco menor e que a equação não apresenta precisão, pois não apresenta o número de degraus que aumentaria a dissipação de energia.

$$\Delta h / H_{\max} = H / (H + 1,5xhc) = H/hc / (H/hc + 1,5)$$

Sendo:

H= altura total da escada (m)

Hmax= H + 1,5 hc = altura máxima da escada hidráulica (m)

### Exemplo 58.3

Calcular a dissipação de energia em uma escada hidráulica com altura do degrau s=1,92m, hc= 0,931m e altura total de escada H= 9,58m

$$\Delta h / H_{\max} = H / (H + 1,5xhc)$$

$$\Delta h / H_{\max} = 9,58 / (9,58 + 1,5 x 0,931) = 0,87$$

Portanto, a dissipação de energia será de 87%.

$$Hr/H = 1 - 0,87 = 0,13$$

$$Hr = 0,13 x 9,58 = 1,25m$$

### 58.3.2 Escoamento *nappe flow* com ressalto hidráulico não completo denominado NA<sub>2</sub>.

Neste caso Chanson, 2002 impõe duas condições simultâneas que devem ser obedecidas:

$$hc/s > 0,0916 * (s/b)^{-1,276}$$

#### Exemplo 58.4

Dado s=1,92m e b=15,5m verificar se satisfaz a relação:

hc= 0,931m já calculado

hc/s= 0,931/ 1,92=0,48

$$A=0,0916 \times (s/b)^{-1,276}$$

$$A=0,0916 \times (1,92/15,5)^{-1,276}$$

$$A= 1,32$$

Portanto a primeira condição **não está satisfeita:**

$$hc/s > 0,0916 * (s/b)^{-1,276}$$

Observar que hc/s deve ser maior.

Ainda que deve acontecer que:

$$hc/s < 0,89 - 0,4 \times s/b$$

#### Exemplo 58.5

Dado s=1,92m e b=15,5m verificar se satisfaz a relação:

hc= 0,931m já calculado

hc/s= 0,931/ 1,92=0,48

$$A=0,89 - 0,4 \times s/b = 0,89 - 0,4 \times 1,92/15,5 = 0,84$$

$$A= 0,84$$

Como hc/S é menor que 0,84 é satisfeita a segunda condição. Como a primeira condição não foi satisfeita e a segunda foi, então o escoamento em *napple flow* terá ressalto hidráulico completo como já vimos.

### 58.3.3 Escoamento *nappe flow* sem ressalto hidráulico denominado NA<sub>3</sub>.

Para o caso do escoamento *nappe flow* sem ressalto hidráulico denominado NA<sub>3</sub> conforme Chanson, 2002 informa não pode ser calculado analiticamente e somente pode ser obtido através de modelos.

#### Escoamento intermediário ou misto (zona de transição)

Segundo Chanson, 2001 o escoamento de transição deve ser evitado, pois o seu comportamento não pode ser previsto totalmente

#### Escoamento **deslizante sobre turbilhões** (*skimming flow*)

O escoamento denominado *skimming flow* conforme Chanson, 2001 é dividido em três escoamentos definidos pela declividade da escada hidráulica.

- Declividade da escada hidráulica menor que 15° teremos o escoamento denominado SK<sub>1</sub>,
- Declividade entre 15° e 25° teremos o escoamento denominado SK<sub>2</sub> e

- Declividade da escada maior que 25° teremos escoamento *skimming flow* SK<sub>3</sub>.



Figura 58.3- Escoamento *nappe flow* (com quedas sucessivas)

1. .

#### 58.4 Equações usadas

Um degrau tem altura “s” e comprimento do patamar “L” e o ângulo se calcula assim:

$$\tan \theta = s / b$$

Sendo:

$\theta$  = ângulo da escada

s= altura do degrau ou altura do espelho (m)

b= comprimento do patamar (m)

#### Exemplo 58.6

Dado a altura do degrau s=1,92m e comprimento do patamar b=15,5m achar o ângulo  $\theta$ .

$$\tan \theta = s / b$$
$$\tan \theta = 1,92 / 15,5 = 0,0774$$
$$\theta = 7,8^\circ$$

A altura crítica  $h_c$  considerando a descarga específica “q” em m<sup>3</sup>/s/m se calcula da seguinte maneira:

$$q = Q/B$$
$$h_c = (q^2/g)^{(1/3)}$$

Sendo:

Q= vazão que entra na escada hidráulica (m<sup>3</sup>/s)

B= largura da escada hidráulica (m)

q= vazão específica (m<sup>3</sup>/s/m) ou (m<sup>2</sup>/s)

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

hc= altura crítica (m)

### Mosquito da dengue

Como no Brasil temos mosquito da dengue devemos evitar água parada e é importante prover cada reservatório no patamar tenha um ou mais orifícios para esvaziamento completo do reservatório em cada patamar.

Esvaziamento de um reservatório

$$t = [2 \cdot A_s \cdot (y_1^{0,5} - y_2^{0,5})] / [C_d \cdot A_o \cdot (2 \cdot g)^{0,5}]$$

Sendo:

A<sub>o</sub>= área da seção transversal do orifício (m<sup>2</sup>);

C<sub>d</sub>= 0,62 coeficiente de descarga;

A<sub>s</sub>= área transversal do reservatório na profundidade y (m<sup>2</sup>);

t= tempo de esvaziamento (segundos);

y<sub>1</sub>= altura da água no início (m);

y<sub>2</sub>= altura do nível de água no fim (m) e

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

O orifício mínimo deve ter diâmetro ≥ 50mm.

### Exemplo 58.7

Calcular o diâmetro dos orifícios para uma escada hidráulica com patamar com altura do degrau s= 1,92m, largura do patamar b=15,5m, altura do reservatório w=0,88m e largura da escada B= 10,5m

Area transversal= B x b= 10,5 x 15,5= 162,75m<sup>2</sup>

y<sub>1</sub>= 0,88m

y<sub>2</sub>=0

A<sub>o</sub>= area de cada orificio

Supondo 2 orificio com diametro de 0,05m

A<sub>o</sub>= PI x D<sup>2</sup>/4 x 2= 3,1416 x 0,05<sup>2</sup> =0,003927 m<sup>2</sup>

t= [2 . A<sub>s</sub> . (y<sub>1</sub><sup>0,5</sup> - y<sub>2</sub><sup>0,5</sup>) ] / [C<sub>d</sub> . A<sub>o</sub> .(2.g )<sup>0,5</sup>]

t= [2 x 162,75 . 0,88<sup>0,5</sup> ] / [0,62 . 0,003927 .(2.9,81 )<sup>0,5</sup>]

t=28313,28s

t= 7,9 h

Portanto, o tempo de esvaziamento do reservatorio de cada patamar será de 7,9h com dois orificios de 50m.

### 58.5 Verificação do tipo de escoamento escolhido

É importante sabermos o tipo de escoamento que queremos.



### Equação de Chanson, 1994

A equação de Chanson, 1994 limita o escoamento *nappe flow* com *skimming flow*.

$$h_c/s = 1,057 - 0,465 \times s/L$$

(Equação 12 da Figura 58.4)

Sendo:

$h_c$  = altura crítica (m)

$s$  = altura do degrau (m)

$L$  = comprimento do patamar (m)

### Equação de Aigner, 2004

Aigner, 2004 elaborou uma **equação para delimitar** dentro do *nappe flow* quando tempos escada hidráulica com reservatórios nos patamares (***pooled step***) que é a Equação 13 da Figura (58.4) chamada também de Equação de Aigner, 2004.

$$h_c/s = [ 0,55 - 0,16 \cdot \text{LN}(s/L) ]^6$$

(Equação 13 da Figura 58.4)

Sendo:

$h_c$  = altura crítica (m)

$s$  = altura do degrau (m)

$L$  = comprimento do patamar (m)

LN= logaritmo neperiano.

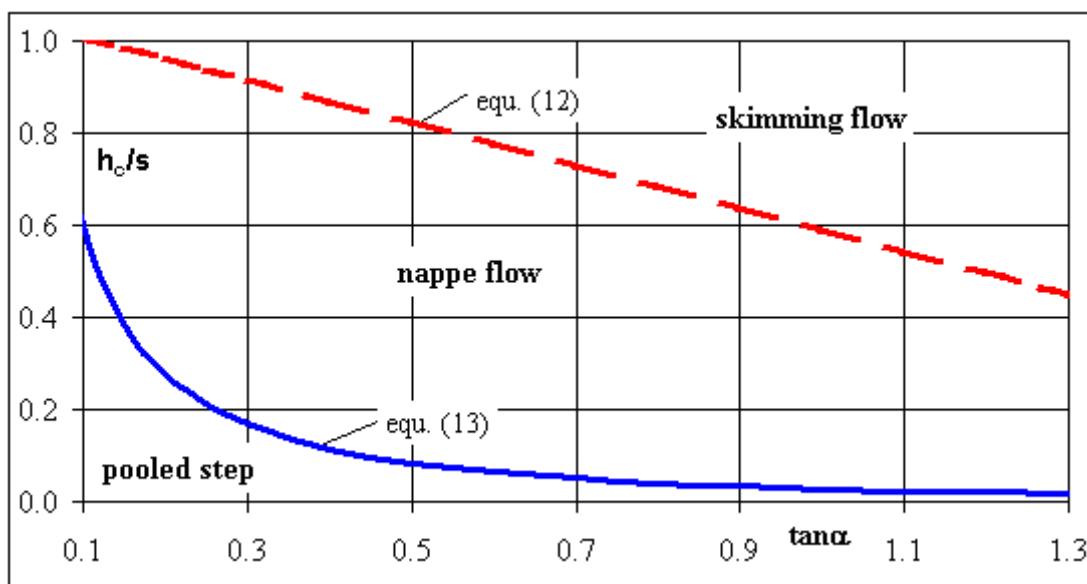


Figura 58.4- Verificação do tipo de escoamento conforme a tangente e  $h_c/s$  de escada hidráulica com reservatórios no patamar com escoamento *nappe flow*.

Fonte:Aigner, 2004.

### 58.6 Dimensionamento de escada hidráulica com patamar com reservatórios

Aigner, 2004 apresentou também as Figuras (58.5) e (58.6) que usaremos para dimensionamento através de exemplos.

Khatsuria, 2005 recomenda que os parâmetros devam estar em determinados intervalos:

$$\begin{array}{l} 0,1 \tan \quad 0,5 \\ 0 \quad hc/s \quad 0,5 \\ 0,1 \quad w/s \quad 0,5 \end{array}$$

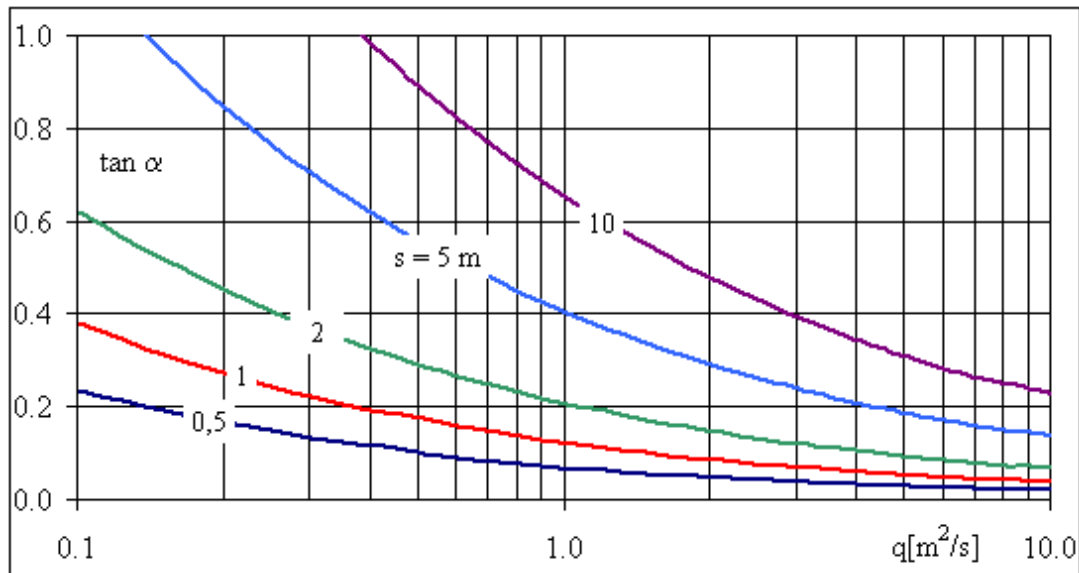
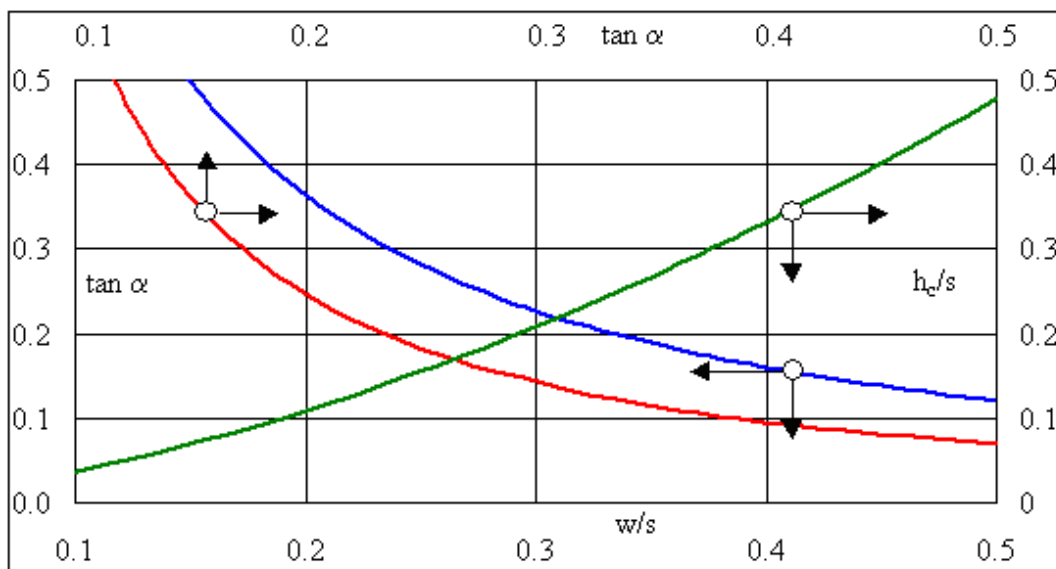


Figura 58.5- Vazão em  $m^3/s/m$  em função da declividade da escada hidráulica com reservatórios no patamar com escoamento *nappe flow*.

Fonte:Aigner, 2004.



**Figura 58.6- Dimensionamento de escada hidráulica com reservatórios no patamar com escoamento *nappe flow*.  
 Fonte: Aigner, 2004.**

**Exemplo 58.8. Adaptado de Khatsiuria, 2005**

Dimensionar uma escada hidráulica com 10 degraus de 1m de altura e patamar de 2m cada com vazão de  $0,3\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

- s= 1,00m
- L= 2,00m
- q=  $0,3\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$
- Número de degraus= 10
- H=10m (altura total da escada hidráulica)

Altura crítica  $h_c$

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

$$h_c = (0,3^2/9,81)^{(1/3)} = 0,21\text{m}$$

Verifiquemos o tipo de escoamento usando a Figura (58.6);

$$\tan \alpha = s / L$$

$$\tan \alpha = 1 / 2 = 0,5 \text{ OK}$$

$$h_c/s = 0,21/1,00 = 0,21$$

Entrando na Figura (58.6) com  $\tan \alpha = 0,5$  e  $h_c/s = 0,21$  verificamos que estamos no *nappe flow*, mas não estamos na escada hidráulica com reservatório nos patamares de Aigner, 2004.

Para atender Aigner, 204 entramos com  $hc/s = 0,21$  e na curva da equação (13) da Figura (58.4) obtemos  $\tan \theta = 0,25$

$$\begin{aligned}\tan \theta &= s / L \\ 0,25 &= 1 / L \\ L &= 1/0,25 = 4,00\text{m}\end{aligned}$$

Portanto, o patamar deverá ser de 4m.

Façamos outra verificação usando a Figura (58.5) entrando com  $0,3 \text{ m}^2/\text{s}$  e altura do degrau de 1,00m achamos aproximadamente 0,25 para  $\tan \theta$  o que confirma o que já achamos.

Cálculo da altura do vertedor no degrau

Entrando na Figura (58.4) com  $\tan \theta = 0,25$  e achamos  $w/s = 0,28$  e como  $s = 1,00\text{m}$  então  $w = 0,28 \times s = 0,28\text{m}$ .

Portanto, a altura do vertedor será  **$w = 0,28\text{m}$** .

Estimativa da dissipação de energia

$$\Delta h / H_{\max} = H / (H + 1,5 \cdot hc)$$

Sendo:

$$H = 10,00\text{m}$$

$$hc = 0,21\text{m}$$

$$H_{\max} = H + 1,5 \cdot hc = 10 + 1,5 \times 0,21 = 10,315\text{m}$$

$$\Delta h / H_{\max} = H / (H + 1,5 \cdot hc)$$

$$\Delta h / H_{\max} = 10/10,315 = 0,97$$

Portanto, a dissipação máxima será de 97%, o que é excelente.

### Exemplo 58.9

Dimensionar uma escada hidráulica para desnível máxima de 10,5m, vazão  $Q = 4,53\text{m}^3/\text{s}$ , e base disponível da escada hidráulica de 69,10m.

$$\begin{aligned}\tan \theta &= s / L \\ \tan \theta &= 10,5 / 69,10 = 0,15\end{aligned}$$

Entrando na Figura (58.5) com  $\tan \theta = 0,15$  e escolhendo altura do degrau de 0,75m acharemos a vazão específica de  $1,5\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

$$14 \text{ degraus, patamar } L = 4,94\text{m}$$

$$q = Q/B = 4,53/B = 1,5$$

$$B = 4,53/1,5 = 3,02\text{m}$$

Portanto, a largura da escada será de 3,02m. A altura do degrau será de 0,75m e o comprimento do patamar de 4,94m.

$$\tan = s / L = 0,75 / 4,94 = 0,15 \text{ OK}$$

### Altura crítica $h_c$

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

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

$$h_c = (1,5^2/9,81)^{(1/3)} = 0,61\text{m}$$

$h_c/s = 0,61/0,75 = 0,81 > 0,50$  Não está bom. Vamos alargar a escada

$$h_c/s = 0,50$$

$$h_c = 0,50 \times s = 0,50 \times 0,75 = 0,375\text{m}$$

$$h_c^3 = q^2/g$$

$$q^2 = h_c^3 \times g = 0,375^3 \times 9,81 = 0,517$$

$$q = 0,71\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$$

$$Q = 4,53\text{m}^3/\text{s}$$

$$q = Q/B$$

$$B = Q/q = 4,53/0,71 = 6,38\text{m}$$

Portanto, a largura da escada será de 6,38m, altura do degrau de 0,75m, 14 degraus e comprimento do patamar de 4,94m

$$\tan = s / L = 0,75 / 4,94 = 0,15 \text{ OK}$$

$$h_c/s = 0,375/0,74 = 0,5 \text{ OK}$$

### Cálculo da altura do vertedor $w$

Entrando na Figura (58.6) com  $\tan = 0,15$  achamos  $w/s = 0,42 < 0,50 \text{ OK}$

$w = 0,42 \times s = 0,42 \times 0,70 = 0,294\text{m}$ . Adotamos  $w = 0,30\text{m}$ .

### Estimativa da dissipação de energia

$$\Delta h / H_{\max} = H / (H + 1,5 \cdot h_c)$$

Sendo:

$$H = 10,50\text{m}$$

$$h_c = 0,375\text{m}$$

$$H_{\max} = H + 1,5 \cdot h_c = 10,5 + 1,5 \times 0,375 = 11,0625\text{m}$$

$$\Delta h / H_{\max} = H / (H + 1,5 \cdot h_c)$$

$$\Delta h / H_{\max} = 10,5 / 11,0625 = 0,95$$

Portanto, a dissipação máxima será de 95%, o que é excelente.

### Exemplo 58.10 Fonte: Aigner, 2004

Dado uma barragem com altura  $H=10\text{m}$  e declividade  $\tan \alpha = 0,15$ . Dimensionar uma escada hidráulica com reservatórios nos patamares onde queremos altura do degrau  $s = 1,00\text{m}$  e número de degraus  $N=10$  para conduzir uma descarga de  $5\text{m}^3/\text{s}$ .

Da Figura (58.5) entrando com  $\tan \alpha = 0,15$  e altura do degrau  $s=1,00\text{m}$  obtemos vazão específica  $q = 0,6\text{m}^2/\text{s}$ .

$$q = Q/B$$

$$B = Q/q = 5\text{m}^3/\text{s} / 0,6\text{m}^2/\text{s} = 8,33\text{m}$$

Portanto, a largura da escada hidráulica será  **$B = 8,33\text{m}$** .

Vamos achar a altura do vertedor  $w$  entrando na Figura (58.4) e achamos  $w/s = 0,41$

$$w = 0,41 \cdot s = 0,41 \times 1,00\text{m} = \mathbf{0,41\text{m}}$$

Comprimento do patamar

$$\tan \alpha = 0,15 = s/L$$

$$L = s/0,15 = 1,0/0,15 = \mathbf{6,7\text{m}}$$

$$hc = (q^2/g)^{(1/3)}$$
$$hc = (0,6^2/9,81)^{(1/3)} = \mathbf{0,33\text{m}}$$
$$hc/s = 0,33/1,00 = \mathbf{0,33}$$

Entrando na Figura (58.4) constatamos que estamos dentro da área de escada hidráulica com reservatórios nos patamares OK.

### Estimativa da dissipação de energia

$$\Delta h / H_{\max} = H / (H + 1,5 \cdot hc)$$

Sendo:

$$H = 10\text{m}$$

$$hc = 0,33\text{m}$$

$$H_{\max} = H + 1,5 \cdot hc = 10 + 1,5 \times 0,33 = 10,495\text{m}$$

$$\Delta h / H_{\max} = H / (H + 1,5 \cdot hc)$$

$$\Delta h / H_{\max} = 10/10,495 = \mathbf{0,95}$$

Portanto, a dissipação máxima será de 95%, o que é excelente

### 58.7 Altura da escada hidráulica com reservatório no patamar

Segundo Chanson, 2002 temos que calcular a altura da parede lateral da escada hidráulica com reservatório no patamar de maneira que não haja extravazamento de água.

No final da escada devemos nos lembrar que poderemos ter um remanso.

Chanson, 2002 cita Schoktisch, 1937 que para escada hidráulica com patamar sugere a relação  $s/b = 1/3$  que a altura das paredes laterais sejam maiores que 2m.

Chanson, 2002 cita ainda Binnie, 1913 que sugere para escada hidráulica com reservatório no patamar a relação  $s/b = 1/10$  e que a **altura lateral seja igual a altura do degrau**.

### 58.8 Ventilação

A fim de evitar oscilações no fluxo da água em movimento nappe flow demos garantir uma ventilação adequada.

Podemos pela prática antiga colocar tubo de 150mm na parte superior em cada degrau em cada lado da parede lateral.

Outra alternativa é deixar cavidade lateral em cada degrau para facilitar a ventilação conforme planta da Figura (58.7).

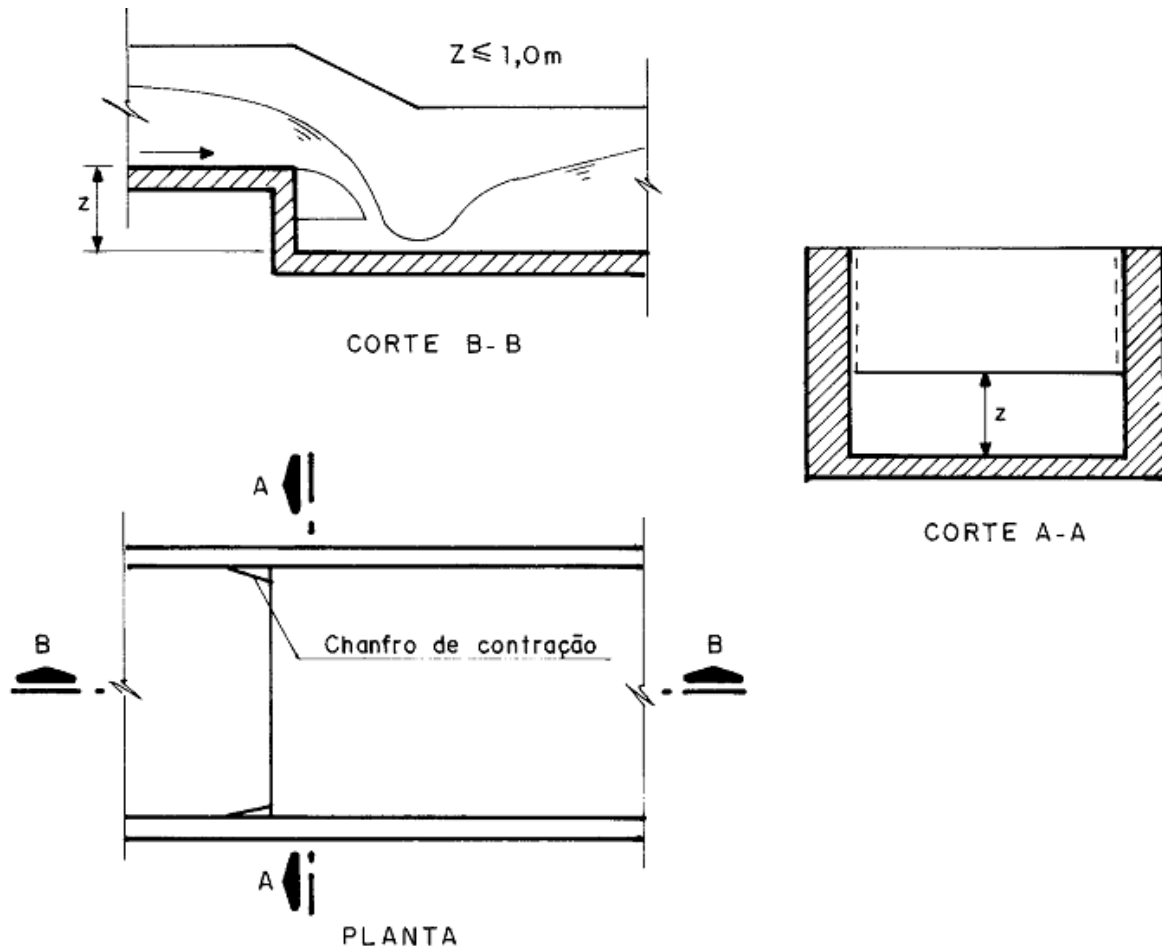
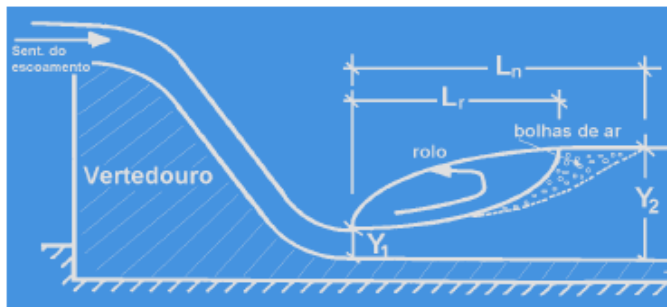


Figura 58.7- Esquema do degrau em canais. Observe o chanfro de contração  
Fonte: PMSP, 2000



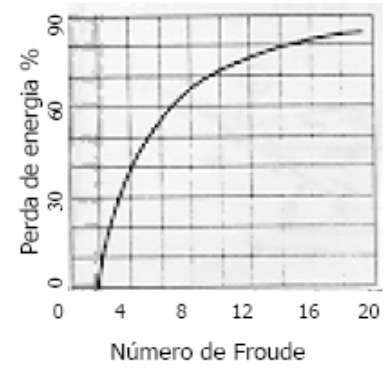
### 58.9 Dissipador de fundo plano Tipo I do USBR

No fim da escada teremos um plano e vamos fazer um dissipador de energia de fundo plano Tipo I do USBR conforme Figura (58.8).



Comprimento aproximado do:

Rolo  $L_r/Y_2=4,5$       Ressalto  $L_n/Y_2=6$



Perda de energia no  
ressalto hidráulico

Figura 58.8- Ressalto hidráulico e perda de energia no ressalto

As profundidades  $y_1$  e  $y_2$  são denominadas de **profundidades conjugadas**. Foi verificado experimentalmente que os pontos A, B e C estão alinhados numa linha reta conforme Chow, 1985.

O número de Froude onde temos a altura  $y_1$  é:

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

Conforme Peterka, 2005 o valor  $y_2$  será:

$$y_2/y_1 = -0,5 + (0,25 + 2x F_1^2)^{0,5}$$

ou

$$y_2/y_1 = 0,5x [(1 + 8x F_1^2)^{0,5} - 1]$$

O comprimento do ressalto hidráulico  $L$  pode ser obtido pela Figura (58.9) conforme Peterka, 2005 entrando com o número de Froude onde está a altura  $y_1$  e olhando-se na curva escrita "recommended".

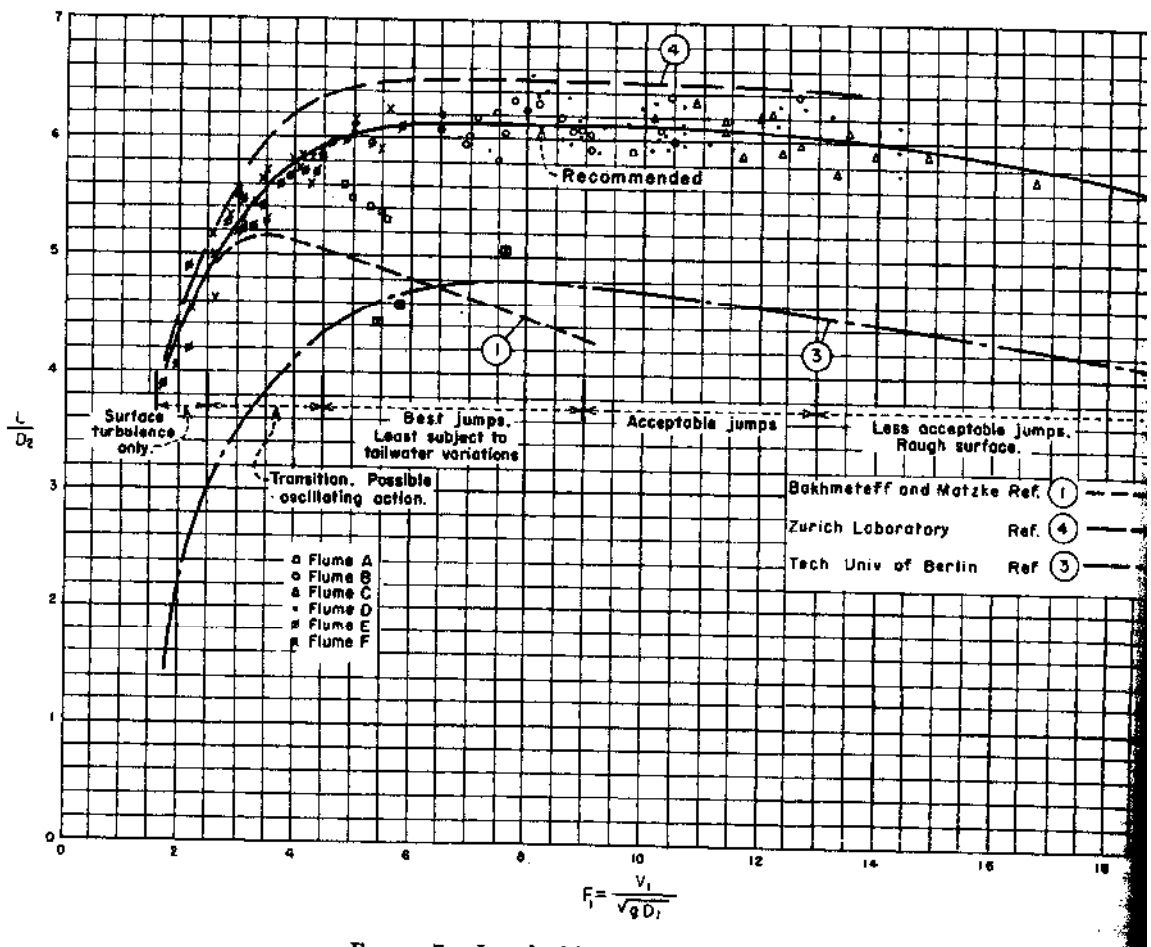


Figura 58.9- Comprimento do ressalto hidráulico  $L$  em função de  $y_2$  para bacia de dissipação de fundo plano Tipo I.

Fonte: Peterka, 2005

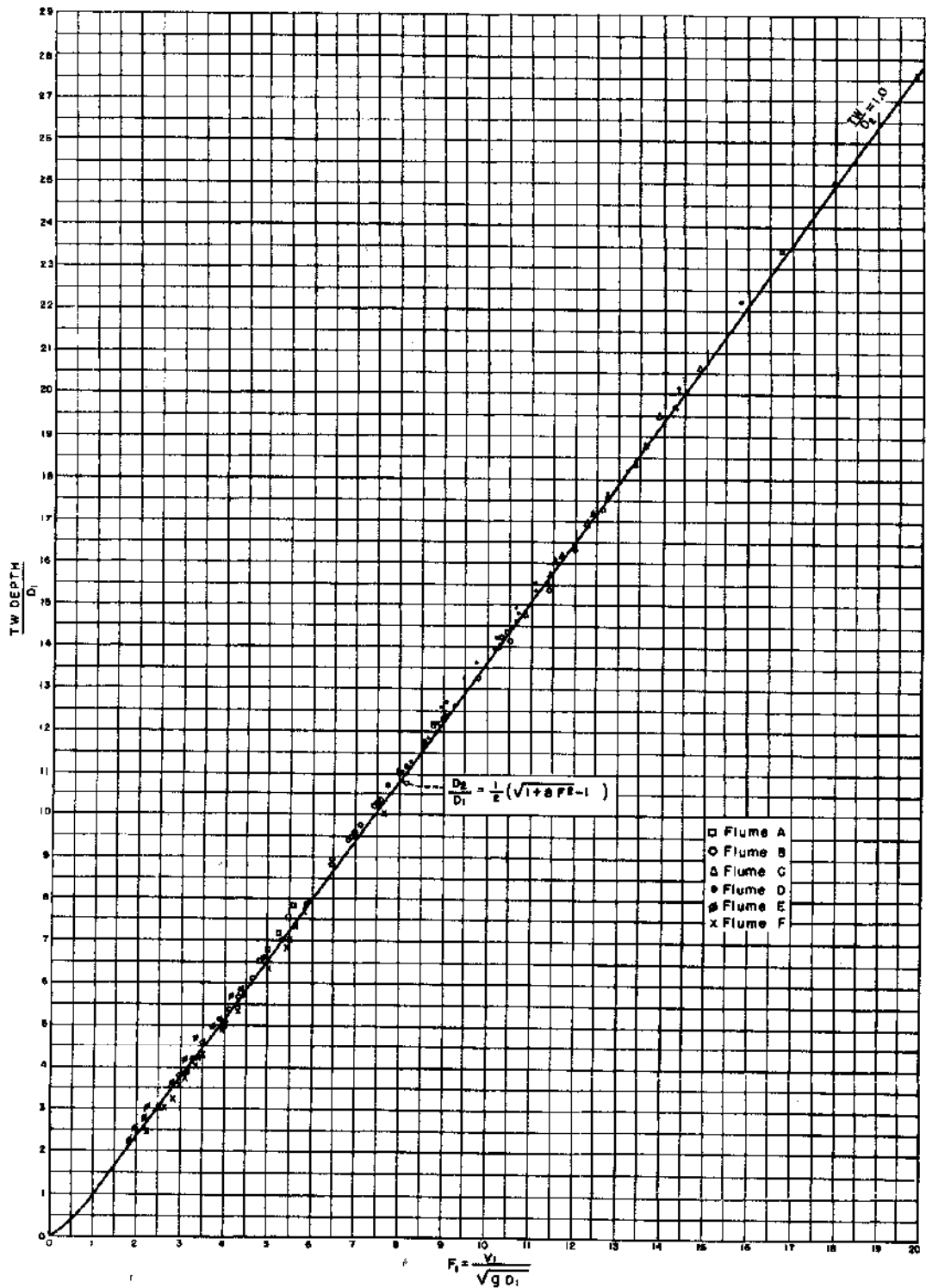


Figura 58.10- Obter  $y_2/y_1$  tendo o número de Froude em  $y_1$  para bacia de dissipação de fundo plano Tipo I do USBR.

Fonte: Peterka, 2005

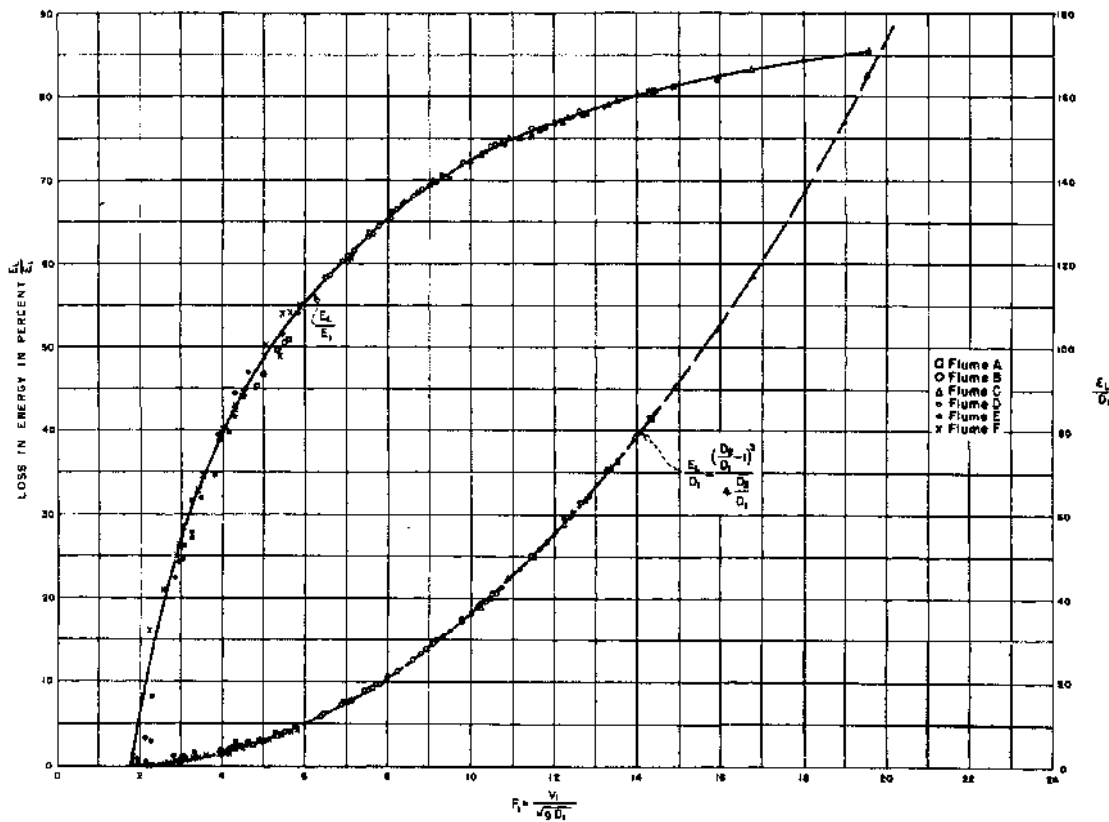


Figura 58.11- Perda de energia no ressalto hidráulico na bacia de dissipação de fundo plano Tipo I do USBR. Consultar a curva à esquerda  $E_1/E_1$ .  
 Fonte: Peterka, 2005

A descarga por metro  $q$  é obtida da seguinte maneira:

$$q = Q / B$$

- $B$ = largura do canal (m)
- $q$ = vazão específica ( $m^3/s \times m$ )
- $Q$ = vazão no canal ( $m^3/s$ )

**Exemplo 58.11**

Calcular a dissipação de energia em uma escada hidraulica com altura do degrau  $s=1,92m$ ,  $h_c= 0,931m$  e altura total de escada  $H= 9,58m$

$$h / H_{max} = H / (H + 1,5xhc)$$

$$h / H_{max} = 9,58 / (9,58 + 1,5 \times 0,931) = 0,87$$

Portanto, a dissipação de energia será de 87%.

$$HrH = 1 - 0,87 = 0,13$$

$$Hr = 0,13 \times 9,58 = 1,25m$$

Observamos neste exemplo que tínhamos altura de 9,58m com a dissipação de 87% da energia, a altura residual que temos é 1,25m.

A altura  $V = (2 \cdot g \cdot h)^{0,5}$   
 $V = (2 \times 9,81 \times 1,25)^{0,5} = 4,95m/s$   
 $Q = 29,56m^3/s$

$$A = Q/V = 29,56 / 4,95 = 5,97 \text{m}^2$$
$$\text{Largura} = 10,5 \text{m}$$
$$H = 5,97 / 10,5 = 0,57 \text{m}$$

Achar o conjugado, comprimento da bacia e eficiência da dissipação da energia.

$$F_1 = V_1 / (g \times y_1)^{0,5}$$
$$F_1 = 4,95 / (9,81 \times 0,57)^{0,5} = 2,09 \quad \mathbf{9 \text{ OK}}$$

Entrando na Figura (58.10) com  $F_1 = 2,09$  achamos  $T_w/y_1 = 2,4$

$$\text{Mas, } T_w = y_2$$

$$y_2/y_1 = 2,4$$

$$y_2 = 2,4 \times y_1 = 2,4 \times 0,57 = \mathbf{1,37 \text{m}}$$

Entrando na Figura (58.9) com  $F_1 = 2,09$  no local onde está escrito "recommended" achamos:

$$L/y_2 = 4,45$$

$$L = 4,45 \times y_2 = 4,45 \times 1,37 = \mathbf{6,10 \text{m}}$$

Portanto, o comprimento da bacia de dissipação de fundo plano Tipo I é de  $\mathbf{6,10 \text{m}}$ .

Para achar a energia dissipada no ressalto hidráulico da bacia de dissipação de fundo plano Tipo I do USBR, entramos com  $F_1 = 2,09$  na curva a esquerda da Figura (58.11) e achamos que  $\mathbf{10\%}$ .

Peterka, 2005 salienta que em outros tipos de dissipadores hidráulicos poderemos obter comprimentos menores da bacia de dissipação.

Subramanya, 2009 cita a equação de Elevatorski para o calculo de L sem usar o grafico de Peterka.

$$\mathbf{L = 6,9 \times (y_2 - y_1)}$$

$$\mathbf{L = 6,9 \times (y_2 - y_1) = 6,9 \times (1,37 - 0,57) = 5,52 \text{m}}$$

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

$$\text{Perda total de energia} = 1 - [(1 - 0,87) \times (1 - 0,10)] = \mathbf{0,88}$$

Portanto, a perda total de energia na escada hidráulica e no ressalto é de  $\mathbf{88\%}$ ,

## Riprap

Velocidade

$$V = Q / A = Q / (y_2 \times B) = 29,56 / (1,37 \times 10,5) = 2,05 \text{m/s} < 5,4 \text{m/s} \text{ OK}$$

$$\text{Froude} = V / (g \cdot y_2)^{0,5} = 2,05 / (9,81 \times 1,37)^{0,5} = 0,56$$

$$\text{diâmetro das pedras} = d_{50} = 0,0413 \times V^2 = 0,0413 \times 2,05^2 = \mathbf{0,17 \text{m}}$$

$$\text{Espessura do rip-rap} = 3,5 d_s = 3,5 \times 0,17 = \mathbf{0,60 \text{m}}$$

$$\text{Comprimento do rip-rap} = L_a = D [8 + 17 \times \log(F)]$$

$$\text{Mas a Altura} = D = 1,37 \text{m}$$

$$L_a = 1,37 [8 + 17 \times \log(0,56)] = \mathbf{5,10 \text{m}}$$



### 58.9 Bibliografia e livros consultados

- AIGNER, DETLEF. *Hydraulic design of pooled step cascades*, Technische Universitaet Dresden, 01309 Germany, 2004.
- CHANSON, HUBERT. *The hydraulics os stepped chutes and spillways*. Netherlands, 2002, ISBN 90 5809 352 2, 384 páginas.
- KHATSURIA, R. M. *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. New York, 2005, 649 páginas, ISBN 0-8247-5789-0
- PETERKA, A. J. *Hydraulic design of stilling bassns and energy dissipators*. US Department of the Interior. Bureau of Reclamation; Hawaii, 2005, ISBN-1-4102-2341-8
- PMSP (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO). *Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no municipio de São Paulo*. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, ano 2000, 289 páginas.

