

## Capítulo 74 Canal com degrau



## Capítulo 74- Canal com degrau

### 74.1 Introdução

Quando um canal tem declividade grande conforme Figuras (74.1) e (74.2) é uma prática comum se executar um degrau conforme Guo, 2009, pois desta maneira evitaremos altas velocidades e consequentemente a erosão do mesmo.

Além do mais, os canais com muita declividade tendem a ter escoamento instável e isto é verificado com o número de Vedernikov.

A instabilidade no escoamento supercrítico envolve a formação de ondas conforme Guo, 2009.

Uma solução para mitigar o problema é fazer um degrau no canal para criar um alteamento do nível no canal a montante e criar uma bacia de dissipação a jusante.

Esta estrutura vertical pode ser feita em concreto, gabiões ou rip-raps. Conforme Guo, 2009 é preferível fazer vários degraus que um com muita altura que poderá ter erosão em sua base causando a sua queda.

O canal em degrau é também um dissipador de energia e neste texto iremos mostrar a estimativa de dissipação de energia.

Lembremos que o canal a montante e a jusante possuem uma declividade, isto é, os patamares não estão em níveis.

### 74.2 Cálculos para um só degrau

A máxima energia dissipada no degrau do canal está ligada ao número de Froude e da rugosidade do canal “n”. O valor máximo do número de Froude para a máxima dissipação de energia deve estar entre **0,6 a 0,8** segundo Guo, 2009. Guo, 2006 recomenda  $F \leq 0,80$ .

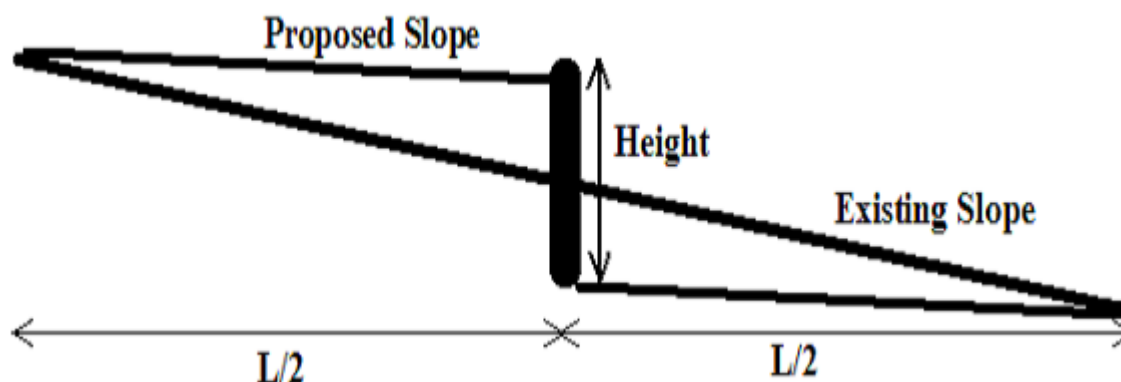


Figura 74.1- Esquema do degrau no canal e as distancias L/2



**Figura 74.2- Canal com degraus. Fonte: José Rodolfo Scarati Martins, 2000**

Segundo Guo, 2009 a localização do degrau no canal deve estar em uma região retilínea com aproximadamente 30m a 40m a montante ou a jusante conforme mostra a Figura (74.1).

Temos a declividade existente do canal  $S_o$  e queremos a declividade  $S_n$  do canal projetado da maneira que:

$$H = (S_o - S_n) L \quad \text{Equação 74.1}$$

Sendo:

$H$  = altura do degrau (m)

$S_o$  = declividade do fundo do canal existente (m/m)

$S_n$  = declividade do canal projetado (m/m)

Usando a equação de Manning temos:

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

Sendo:

$V$  = velocidade média (m/s)

$n$  = rugosidade de Manning

R= raio hidráulico (m)

Sn= declividade do canal projetado (m/m)

Elevando-se os dois lados da equação acima e tirando-se o valor de Sn temos:

$$S_n = (n^2 V^2) / R^{4/3}$$

Número de Froude

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

$$D = A/T$$

T= comprimento da superfície livre (m)

A= Área molhada (m<sup>2</sup>)

D= diâmetro hidráulico (m)

Q= A . V

V=Q/A

Fazendo as substituições temos:

$$S_n = n^2 \cdot D \cdot g \cdot F^2 / R^{4/3}$$

R= raio hidráulico (m)

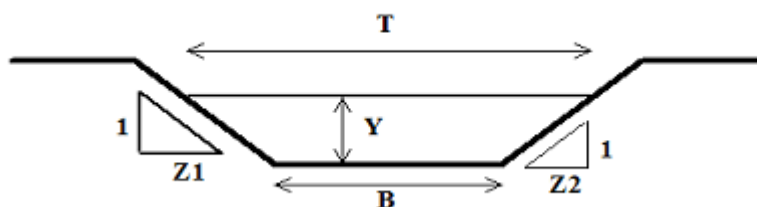
Substituindo Sn na Equação (74.1) temos:

$$H = (S_o - S_n) L$$

$$H = (S_o - n^2 \cdot D \cdot g \cdot F^2 / R^{4/3}) L \quad \text{Equação 74.2}$$

Notar que a altura H do degrau representa a dissipação de energia de acordo com o comprimento L.

Para um canal trapezoidal com taludes Z<sub>1</sub> e Z<sub>2</sub> conforme Figura (74.2) temos:



**Figura 74.2- Seção transversal trapezoidal**

$$F^2 = Q^2 \cdot T / gA^3 = \{ Q^2 [ B + Y(Z_1 + Z_2) ] \} / \{ g [ B \cdot Y + \frac{1}{2} Y^2 (Z_1 + Z_2) ]^3 \}$$

**Sendo:**

**Area transversal=A=B.Y + 1/2 Y<sup>2</sup> (Z<sub>1</sub>+Z<sub>2</sub>)**

$$\text{Perímetro molhado}=\text{P}=\text{B}+\text{Y} (1+\text{Z}_1^2)^{0,5} + \text{Y} (1+\text{Z}_2^2)^{0,5}$$

$$\text{Raio hidráulico}=\text{R}=\text{A}/\text{P}$$

$$\text{Largura da superfície da água}=\text{T}=\text{B}+\text{Y}(\text{Z}_1+\text{Z}_2)$$

$$\text{Diâmetro hidráulico}=\text{D}=\text{A}/\text{T}$$

### 74.3 Máxima dissipação de energia de um só degrau com adimensionais

Guo, 2009 salienta que além da importância do número de Froude F temos também a distância L escolhida.

Recomenda-se ainda que a **altura máxima do degrau seja de 2,10m** devido a problema de segurança e custo de construção, sendo que o **Manual de Denver aconselha degrau com no máximo 0,90m**.

Conforme Guo, 2009 máxima dissipação de energia usando os adimensionais:

$$\text{Max } H^* = \text{Max} (S_0 - n^{*2} \cdot D^* \cdot g \cdot F^{*2} / R^{*4/3}) L^*$$

As variáveis adimensionais são definidas conforme Guo, 2009 da seguinte maneira:

$$H^* = H/Y$$

$$L^* = L/Y$$

$$n^* = [(n^2 \cdot g)/Y^{(1/3)}]^{0,5}$$

$$R^* = R/Y$$

$$D^* = D/Y$$

$$F^* = Q^{*2} T^* A^{*3}$$

$$Q^* = Q / (g \cdot Y^5)^{0,5}$$

$$T^* = T/Y$$

$$A^* = A/Y^2$$

### Exemplo 74.1

Calcular a altura do degrau em um canal trapezoidal com vazão de  $28,3\text{m}^3/\text{s}$ , base  $B=3,00\text{m}$ , taludes  $Z=4$  e  $L=30,00\text{m}$ ,  $S_o= 0,050\text{m/m}$ .

Na Tabela (74.1) os dados de entrada estão nas colunas 1, 2,3,4,5,6 e 9.

Na coluna 8 está a altura de entrada sugerida nos cálculos e isto é feito por tentativas.

O restante dos cálculos segue a rotina normal de cálculo de um canal em que se usa a fórmula de Manning, mas introduzindo também os adimensionais de Guo.

**Tabela 74.1- Cálculos**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q (m <sup>3</sup> /s)	B	S <sub>o</sub>	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	n	n*	Y	L (m)
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1387	1,10	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1377	1,15	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1367	1,20	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1358	1,25	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1349	1,30	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1341	1,35	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1333	1,40	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1325	1,45	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1317	1,50	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1310	1,55	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1303	1,60	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1297	1,65	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1290	1,70	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1284	1,75	30
28,3	3	0,05	4	4	0,045	0,1278	1,80	30

**Tabela 74.2- continuação dos Cálculos**

10	11	12	13	14	15	16	17	18
L*	Area (m2)	A*	P(m)	Rh (m)	R*	T (m)	T*	Dh (m)
27,3	8,14	6,73	12,07	0,67	0,61	11,8	10,73	0,69
26,1	8,74	6,61	12,48	0,70	0,61	12,2	10,61	0,72
25,0	9,36	6,50	12,90	0,73	0,60	12,6	10,50	0,74
24,0	10,00	6,40	13,31	0,75	0,60	13,0	10,40	0,77
23,1	10,66	6,31	13,72	0,78	0,60	13,4	10,31	0,80
22,2	11,34	6,22	14,13	0,80	0,59	13,8	10,22	0,82
21,4	12,04	6,14	14,54	0,83	0,59	14,2	10,14	0,85
20,7	12,76	6,07	14,96	0,85	0,59	14,6	10,07	0,87
20,0	13,50	6,00	15,37	0,88	0,59	15,0	10,00	0,90
19,4	14,26	5,94	15,78	0,90	0,58	15,4	9,94	0,93
<b>18,8</b>	15,04	<b>5,88</b>	16,19	<b>0,93</b>	<b>0,58</b>	<b>15,8</b>	<b>9,88</b>	<b>0,95</b>
18,2	15,84	5,82	16,61	0,95	0,58	16,2	9,82	0,98
17,6	16,66	5,76	17,02	0,98	0,58	16,6	9,76	1,00
17,1	17,50	5,71	17,43	1,00	0,57	17,0	9,71	1,03
16,7	18,36	5,67	17,84	1,03	0,57	17,4	9,67	1,06

**Tabela 74.3- continuação dos Cálculos**

19	20	21	22	23	24	25	26	27
D*	F	F*	Q*	Sn	H	H*	V	Qcalc
0,63	1,34	1,79	7,12	0,04139	0,26	0,235	3,48	28,30
0,62	1,22	1,49	6,37	0,03415	0,48	0,413	3,24	28,30
0,62	1,12	1,25	5,73	0,02838	0,65	0,541	3,02	28,30
0,62	1,03	1,06	5,17	0,02374	0,79	0,630	2,83	28,30
0,61	0,95	0,90	4,69	0,01998	0,90	0,693	2,65	28,30
0,61	0,88	0,77	4,27	0,01691	0,99	0,735	2,50	28,30
0,61	0,81	0,66	3,90	0,01439	1,07	0,763	2,35	28,30
0,60	0,76	0,57	3,57	0,01231	1,13	0,780	2,22	28,30
0,60	0,71	0,50	3,28	0,01058	1,18	0,788	2,10	28,30
0,60	0,66	0,43	3,02	0,009	1,23	0,791	1,98	28,30
<b>0,59</b>	<b>0,62</b>	<b>0,38</b>	<b>2,79</b>	<b>0,00791</b>	<b>1,26</b>	<b>0,789</b>	<b>1,88</b>	<b>28,30</b>
0,59	0,58	0,33	2,58	0,00688	1,29	0,784	1,79	28,30
0,59	0,54	0,29	2,40	0,00601	1,32	0,776	1,70	28,30
0,59	0,51	0,26	2,23	0,00527	1,34	0,767	1,62	28,30

O objetivo é dimensionar a **altura do degrau** que dê a máxima dissipação de energia e isto é conseguido, segundo Guo, 2009.

Na coluna 25 da Tabela (74.3) com o  $\max(H^*)$  no caso é 0,789 e portanto, a máxima dissipação de energia é de 78,9%.

O valor  $S_n=0,00791\text{m/m}$  altura  $H=1,26\text{m}$  e o número de Froude  $F=0,62$  são correspondentes ao  $\max(H^*)$ .

Guo, 2009 achou em suas pesquisas que o número de Froude se situa na faixa de 0,6 a 0,8. A velocidade no canal é de 1,88m/s.

Guo, 2009 salienta também a necessidade de se fazer análise de sensibilidade, variando, por exemplo, o valor da rugosidade “n”.

Observar que entramos com o valor  $L=30,00\text{m}$  que consideramos satisfatório. A altura do degrau que obtemos na coluna 24 foi de 1,26m que é razoável embora a PMSP adote como máximo de 1,00m e o Manual de Denver recomende o máximo de 0,90m.

Guo informa que a máxima dissipação de energia de um degrau é de 80% a 85% da profundidade normal. Isto corresponde ao número de Froude variando entre 0,6 a 0,8 e este critério pode ser usado para dimensionamento.

**Dica: critério de dimensionamento: usar número de Froude entre 0,6 a 0,8.**



#### 74.4 PMSP

A Prefeitura Municipal de São Paulo adota degrau máximo de 1,00m, informando que o degrau é um elemento de transição de nível e um dissipador de energia. Informa ainda que apesar de não existir limitação hidráulica para fixação do desnível, é conveniente que suas dimensões não sejam muito elevadas para evitar problemas de dissipação de energética cujas implicações estruturais em geral são problemáticas.

Segundo PMSP, a prática tem mostrado que valores de desníveis até a ordem de 1,00m são adequados e permitem resolver a maioria dos problemas.

Salienta ainda a PMSP, 2000 a importância da aeração de superfície inferior da lâmina vertente conforme Figura (74.3).

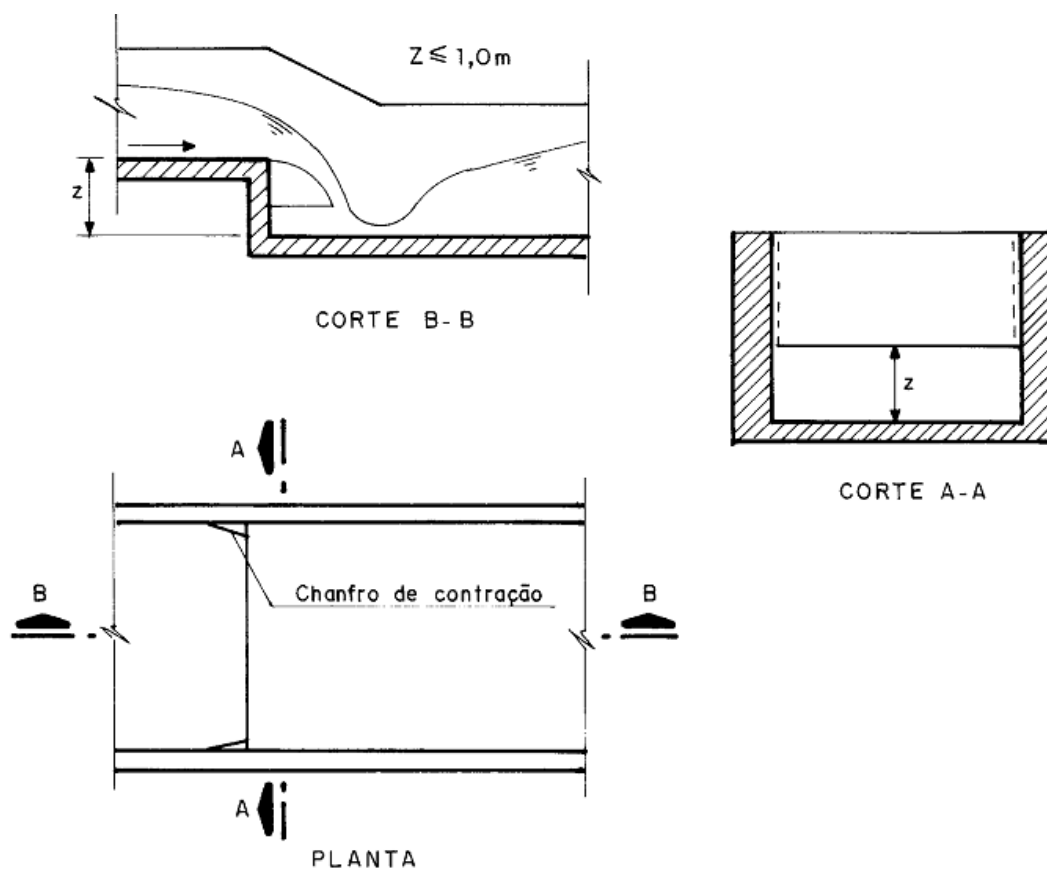


Figura 74.3- Esquema do degrau em canais  
Fonte: PMSP, 2000

#### 74.10 Degrau vertical (também chamado de vertedor vertical)

Os degraus são dissipadores de energia e podem ser construídos em concreto, gabiões ou pedra assentada com cimento e areia conforme Figura (74.4) e possuem uma altura de aproximadamente 1,50m de altura. O degrau vertical é um dissipador de energia. Lembremos o patamar é suposto plano.

O dimensionamento do vertedor vertical não deve ser confundido com o da escada hidráulica.

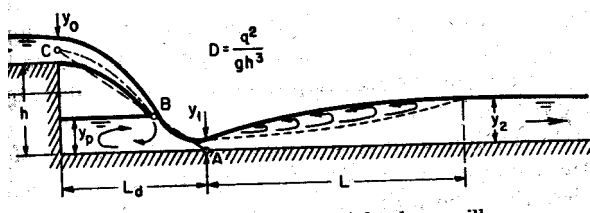


Figura 74.4- Esquema do degrau

Fonte: Ven Te Chow, Open Channels, 1985

Os degraus podem ser calculados usando o número de queda (*drop number*)  $D_n$  que Chow, 1985 informa que foram criados por Moore, Bakhmeteff e Feodoroff baseados exclusivamente em dados experimentais.

**São válidos para regime sub-crítico e supercrítico.** Conforme o livro de Drenagem Urbana, 1980 e Kathsuria, 2005 temos:

$$\begin{aligned}D_n &= q^2 / g \times h_0^3 \\L_d &= h_0 \times 4,30 \times D_n^{0,27} \\y_1 &= h_0 \times 0,54 \times D_n^{0,425} \\y_2 &= h_0 \times 1,66 \times D_n^{0,27} \\y_p &= h_0 \times 1,00 \times D_n^{0,22} \\L &= 6,9 (y_2 - y_1)\end{aligned}$$

Sendo:

$D_n$  = *drop number* (adimensional)

$h_0$  = altura do espelho do degrau (m)

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

$q$  = descarga unitária por unidade de comprimento da crista da soleira (m<sup>3</sup>/s x m)

$y_1$  = profundidade ao pé da lâmina vertente ou no início do ressalto hidráulico (m)

$y_2$  = profundidade da água a jusante do ressalto (m)

$y_p$  = profundidade a jusante e junto ao pé do degrau (m)

$L_d$  = comprimento de queda (distância desde o espelho do degrau até a posição da profundidade  $y_1$ )

$L$  = comprimento até a profundidade  $y_2$  (m). Para o cálculo de  $L$  pode ser usado os gráficos de Peterka.

A importância das distâncias  $L_d$  e  $L$  são para evitar erosão, pois conforme o caso temos que concretar bem a distância  $L_d$  e em casos até a distância  $L$  inclusive.

**De modo geral a altura do degrau é no máximo de 1,50m.**

Chanson, 2010 admite que a altura do degrau chegue até 7 a 8m para descargas até  $10\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

### Exemplo 74.2

Estimar o comprimento  $L_d + L$  supondo degrau vertical com vazão de  $28,3\text{m}^3/\text{s}$ , base  $B=3,00\text{m}$ , taludes  $Z=4$  e  $L=30,00\text{m}$ ,  $S_o=0,050\text{m}/\text{m}$ .

Primeiramente calculamos o Drop number  $D_n=4,5$  e depois calculamos  $L_d=8,15\text{m}$  bem como  $y_1=1,29\text{m}$  e  $y_2=1,90\text{m}$ . O valor  $L=4,16\text{m}$  sendo o total  $L_d+L=12,31\text{m}$

Drop number	$L_d$ (m)	$y_1$	$y_2$	$L$ (m)	$L_d+L$
4,5	8,15	1,29	1,90	4,16	12,31

No Exemplo 74.1 supomos degrau com 30m, sendo 15m a montante e 15m a jusante. No caso teremos que concretar o fundo do canal em 12,31m que é aproximadamente os 15m.

Nota 1: poderíamos chegar somente ao valor  $L_d=8,15\text{m}$

Nota 2: o autor já viu projetos em loteamentos onde dimensionaram as escadas hidráulicas em *nappe flow* como no exemplo acima, mas de maneira que o comprimento do degrau fosse no máximo  $L_d$ , isto é, antes do ressalto hidráulico.

### 74.11 Escoamento *nappe flow* em cascata (vários degraus)

Chanson, 2010 informa que quando a distância vertical excede de 7,00m a 8,00m ou a topografia não é adequada por um simples degrau, podemos fazer uma sucessão de degraus, ou seja, uma **cascata**.

Teremos então uma sucessão de graus com *nappe flow* e o regime de escoamento é denominado por Chanson, 2010 de *escoamento nappe flow*.

No regime *nappe flow* deve ser observado as relações entre a altura do degrau e o comprimento do patamar do degrau através da equação:

$$d_c / h < 0,89 - 0,4 \cdot h / L_1$$

Sendo:

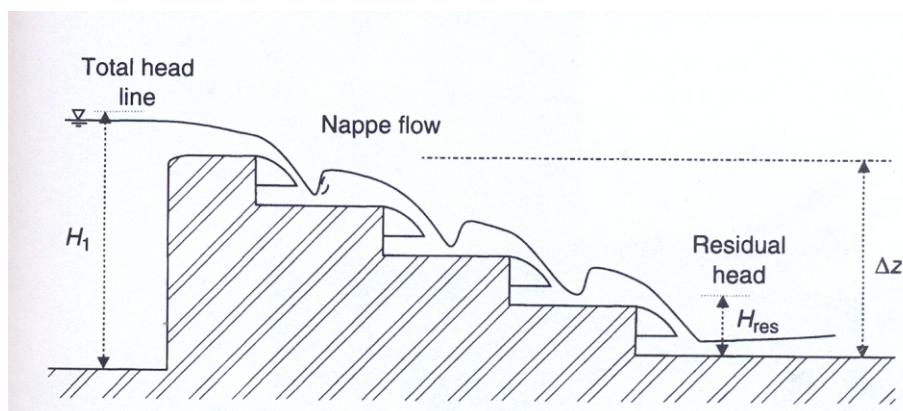
$d_c$ = altura crítica (m)

$h$ = altura do degrau (m)

$L_1$ = comprimento total do patamar do degrau (m)

$L_1 = L_d + L$

## Perda de energia



**Figura 74.5- Esquema de escoamento em regime nappe flow de uma estrutura em cascata. Fonte: Chanson, 2010.**

Para o escoamento com ressalto hidráulico completo conforme Chanson, 2010 a perda de energia pode ser calculado por:

$$\Delta H / H_1 = 1 - [ 0,54 (dc/\Delta z)^{0,275} + 1,715 (dc/\Delta z)^{-0,55} ] / [ 1,5 + (\Delta z / dc) ]$$

Sendo:

$H_1$  = altura máxima com o nível de água conforme Figura (74.5)

$dc$  = altura crítica (m)

$\Delta z$  = diferença de nível (m) dos degraus conforme Figura (74.5)

Chanson, 2010 chama a atenção que quando se trata de regime de escoamento *nappe flow*, deveremos ter cuidado com a aeração para perfeita operação da estrutura em degraus a fim de se evitar problemas, como o da cavitação.

**Dica: fazendo o regime de escoamento nappe flow, cuidado com a ventilação dos degraus.**

### 74.12 Profundidades conjugadas

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.

$$q = Q/B$$

Sendo:

$q$  = descarga unitaria por unidade de comprimento ( $m^3/s/m$ )

$Q$  = vazão de entrada ( $m^3/s$ )

$B$  = largura do degrau (m)

$$V_1 = q / y_1$$

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

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

Observar que nos cálculos do degrau vertical é sempre considerado que o número de Froude seja menor que 1, isto é, temos que estar no regime subcrítico.

### 74.13 Altura crítica

A altura crítica da água no canal que chega a água para a escada hidráulica é dada pela equação:

$$y_c = [Q^2 / (g B^2)]^{(1/3)}$$
$$y_c = [q^2 / (g)]^{(1/3)}$$

Sendo:

$d_c$  = altura crítica do canal no início da escada hidráulica (m)

$Q$  = vazão total ( $m^3/s$ )

$B$  = largura da escada hidráulica (m)

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

### 74.14 Tailwater

Conforme Mays, 1999 a altura do *tailwater* TW influencia em algumas informações. Quando  $TW < y_2$  então o ressalto hidráulico se move a jusante. Neste caso deve ser construído um avental ou blocos no fim do mesmo.

- Se  $TW > y_2$  então o ressalto hidráulico ficará submerso.
- Se  $TW = y_2$  então o ressalto hidráulico começa na profundidade  $y_2$  e não haverá movimento supercrítico no avental e o comprimento  $L_d$  será o mínimo.

Chow, 1986 faz as observações sobre o *tailwater* sempre supondo que a largura do degrau é a mesma do canal, ressaltando que se a largura do degrau for menor que a largura do canal, deverão tomar cuidados especiais com erosão devido a altas velocidades no centro devido a contração.

Chow, 1986 também não esclarece se o escoamento a montante está no regime subcrítico ou supercrítico. Chanson, 2010 informa que as equações obtidas com o *drop number* são para **regime subcrítico** e informa que para regime supercrítico a montante, deve ser calculado a trajetória de impacto da água causada pelo degrau e a resistência à erosão no piso após o degrau. Chanson, 2010 cita ainda pesquisas feitas por diversos autores como Rouse, Rajartnam, Hager e Marchi que para movimento da forma do jato devido ao movimento supercrítico e aplicando a equação do momento na base da queda do jato de água e chegando a equação de White, 1943.

$$y_1/d_c = (2 \cdot Fr^{-2/3}) / \{ 1 + (2/Fr^2) + [1 + (2/Fr^2)(1 + (\Delta z/d_c)Fr^{2/3})]^{0,5} \}$$

Sendo:

$Fr$  = número de Froude no **movimento supercrítico** a montante.

$\Delta z = h_0$

$d_c =$  altura crítica (m)

### 74.15 Dissipação de energia para um degrau somente

Conforme Kathuria, 2005 cita os estudos de Rajaratnam, 1995 que propôs a seguinte equação para dissipação de energia em um degrau vertical.

$$E_1/E = 0,896 (y_c/h)^{-0,766}$$

#### Exemplo 74.3

Supomos um canal com largura de  $B=3,00\text{m}$ , vazão de  $9\text{m}^3/\text{s}$ , velocidade  $V=5\text{m/s}$  e altura do degrau igual a  $1,00\text{m}$ .

$$q = Q/B$$

$$q = 9\text{m}^3/\text{s} / 3\text{m} = 3\text{m}^3/\text{s} \times \text{m}$$

Adotando degrau com altura  $h_0=1\text{m}$

$$D_n = q^2 / g \times h_0^3 = 3^2 / 9,81 \times 1,0^3 = 0,92$$

$$L_d/h_0 = 4,30 \times D_n^{0,27} = 4,30 \times 0,92^{0,27} = 4,20,$$
$$y_1/h_0 = 0,54 \times D_n^{0,425} = 0,54 \times 0,92^{0,425} = 0,52\text{m}$$

$$y_1 = h_0 \times 0,52 = 0,52\text{m}$$

$$y_2/h_0 = 1,66 \times D_n^{0,27} = 1,66 \times 0,92^{0,27} = 1,62\text{m}$$

$$y_2 = h_0 \times 1,62 = 1,62\text{m}$$

$$y_p/h_0 = 1,00 \times D_n^{0,22} = 1,00 \times 0,92^{0,22} = 0,98\text{m}$$

$$y_p = h_0 \times 0,98 = 0,98\text{m}$$

Cálculo do número de Froude em  $y_1$

$$y_1 = 0,52\text{m}$$

$$q = 3\text{m}^3/\text{s} \times \text{m}$$

$$B = 3,00\text{m}$$

$$V = q/y_1 = 3 / 0,52 = 5,76\text{m/s}$$

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

$$F_1 = 5,76 / (9,81 \times 0,52)^{0,5} = 2,55$$

$$L = 6,9 (y_2 - y_1) = 6,9 \times (1,62 - 0,52) = 7,59\text{m}$$

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

$$y_c = [3^2 / (9,81)]^{(1/3)} = 0,97\text{m}$$

$$E_1/E = 0,896 (y_c/h)^{-0,766}$$

$$E_1/E = 0,896 (0,97 / 1,0)^{-0,766} = 0,92$$

**Portanto, a dissipação de energia é de 92% o que é ótimo.**

#### Exemplo 74.4

Calcular o degrau na saída de um bueiro com  $1,50\text{m}$  de altura e  $4,50\text{m}$  de largura com vazão de  $37,95\text{m}^3/\text{s}$ . Haverá uma transição passando a largura de  $4,5\text{m}$  para  $9,00\text{m}$ .

Na Tabela (74.4) estão os cálculos do degrau, salientando que a perda de energia para degrau de  $1,00\text{m}$  é de  $77\%$ , o que é muito bom.

**Tabela 74.4- Cálculo do degrau**

Drop Spillway pagina 255 livro de Spillway	
Bueiro	
Altura (m)=	1,50
Largura do bueiro (m)=	4,50
Largura adotada (m)= B=	9,00
Vazão (m <sup>3</sup> /s)=	37,95
q (m <sup>3</sup> /s/m)=	4,22
Degrau (m)= h=	1,00
Drop number =D=	1,81
Ld (comprimento até y1)=	5,05
Altura yp do nível de água (m)=	1,14
y1 (m)=	0,70
y2 (m)=	1,95
Lj (m)=	8,65
yc (m)=	1,22
V1 (m/s)=	6,06
Froude=	2,32
Perda de energia= E1/E=	0,77

#### 74.16 Transição

O ângulo ótimo baseado em Blaisdell e Donnelly, 1949.

$$\tan \theta = Fr/3$$

Se o ângulo escolhido  $\theta_w$  for maior que  $\theta$  devemos reduzir  $\theta_w$  para  $\theta$ .  
Base maior do trapézio que é a largura da escada hidráulica

A base maior do trapézio será B e que será também a largura da escada hidráulica.

$$B=D+2.L . \tan \theta$$

Sendo:

B= base maior do trapézio da transição (m)

D= largura adotada (m)

L= comprimento adotado (altura do trapézio) (m)

$\theta$ = ângulo com o fluxo da água (radianos ou graus)

Fr= número de Froude

**Dica: na prática usa-se para transição a relação 1:4.**

### 74.17 Piping

Piping é um fenômeno de escoamento de água sob a barragem que torna-se um problema, pois, as partículas são erodidas e erosão aumenta e os vazios no solo começam a ficar cada vez maior, formando um tubo (piping) de montante para jusante conforme Figura (74.6).

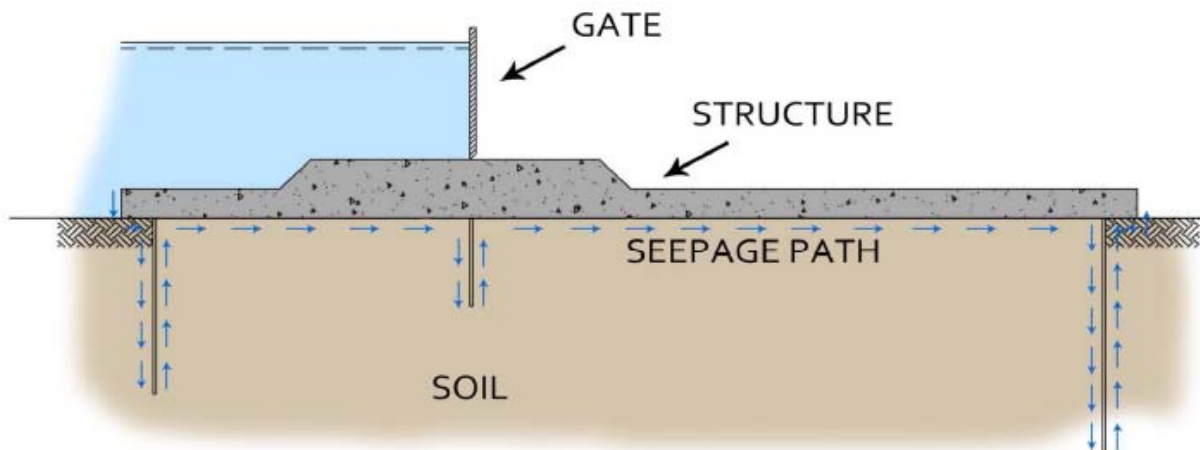


Figura 74.6- Esquema de piping

Em 1934 E. W. Lane publicou um estudo sobre o assunto recomendando o uso de *weighted-creep ratio*  $C_w$  para vários tipos de materiais conforme Tabela (74.1).

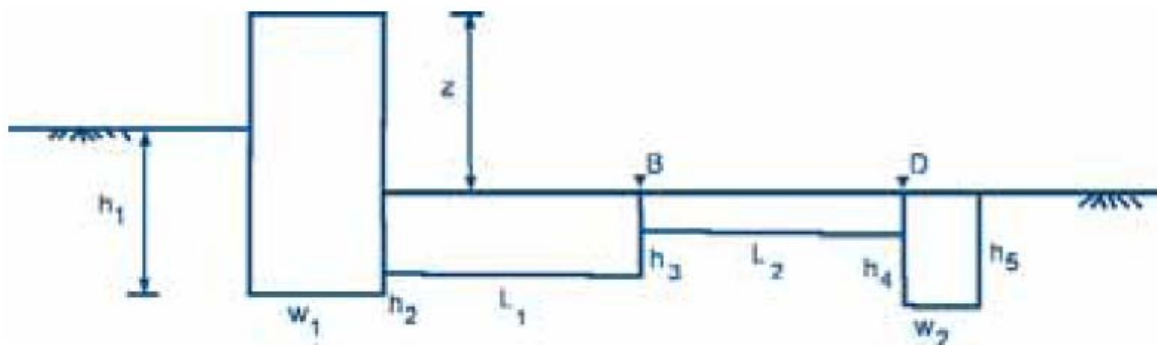


Figura 74.7- Esquema para dimensionar a laje de um canal em degrau



**Tabela 74.5- Valores de *weighted creep ratio* para diversos materiais conforme Lane, 1934.**

<b>Material</b>	<b>Safe Weighted Creep Ratio (Lane 1934)</b>
Very Fine Silt or Sand	8.5
Fine Sand	7
Medium Sand	6
Coarse Sand	5
Fine Gravel	4
Medium Gravel	3.5
Gravel and Sand	No value
Coarse Gravel, Including Cobbles	3
Boulders with Some Cobbles and Gravel	2.5
Boulders, Gravel, and Sand	No value
Soft Clay	3
Medium Clay	2
Hard Clay	1.8
Very Hard Clay, or Hardpan	1.6

Uma maneira pratica é através do uso da Figura (74.7).

Vamos fazer duas coisas. A primeira é verificar se pode ou não haver piping e a segunda é dimensionar as espessuras da laje para não haver levantamento devido as forças freáticas (*uplift*).

**Para verificar se haverá ou não *piping***

Definimos  $L_w$

$$L_w = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + (1/3) (W_1 + L_1 + L_2 + W_2)$$

Tendo-se o valor  $L_w$  fazemos o *weighted ratio*:

$L_w / Z$

Sendo:

$Z =$  altura do degrau (m)

Verificamos o tipo de solo do fundo do correço ou rio e vamos na Tabela (74.6).

Se o valor  $Lw/Z >$  valor achado, está tudo bem, isto é, não teremos *piping*. Caso contrario teremos *piping* e para isto devemos mudar algumas dimensões e uma delas é o *cut-off* no fim da laje e que aparece como  $h_5$ .

### Para dimensionar a espessura da laje

A espessura da laje é:

$t =$  pressão freática x (peso específico da água / peso específico das pedras argamssadas submerso)

A pressão freática  $P_b$  em um ponto B da Figura (74.7) é calculada assim:

$$P_b = Z - [ h_1+h_2+h_3+ (1/3) (W_1+ L_1)]/ Lw$$

### Exemplo 74.5

Verificar no exemplo da Tabela (74.4) se haverá *piping* e achar as espessuras das lajes.

Primeiramente observar que  $h_1=2,00m$ , pois, há 1m de gabião que fica enterrado.

A largura do gabião caixa é  $W_1=1,00m$

A altura  $Z$  é o degrau e a altura  $h_1$  no caso de um canal com degrau é a altura total do degrau com a parte enterrada que é  $2,00m$ .

Salientamos que estamos usando gabião caixa no degrau e no *cutt-off* enquanto que na laje usamos colchão Reno.

**Tabela 74.6- Cálculos para ver se há *piping* e espessura das lajes**

Problema1) Verificar se a estrutura é segura contra " <i>piping</i> " ?	
Altura do degrau incluindo fundação a montante (m) = $h_1=$	2,00
Altura do degrau incluindo fundação a jusante (m) = $h_2=$	2,00
Espessura da laje junto ao degrau (m)= $h_3=$	0,50
Espessura da laje junto no final (m)= $h_4=$	0,50
Espessura do cut-off (m)= $h_5=$	1,00
Largura do degrau (m)= $W_1=$	1,00
Largura do cut-off (m) = $W_2=$	1,00
Comprimento da primeira laje junto ao degrau (m)= $L_1=$	5,05
Comprimento da segunda laje junto ao degrau (m)= $L_2=$	8,65
Altura do degrau (m)= $Z=$	<b>1,00</b>
Calculos	
$Lw$ (m)=	<b>11,23</b>
$Lw/Z=$	<b>11,23</b>
T abela do materal argila	<b>2,00</b>
Verificação se haverá ou não <i>piping</i> $LW/Z >$ weighted creep ratio	<b>Tubo bem</b>
Problema 2) Calcular a espessura da duas lajes do degrau	
Altura do degrau incluindo fundação a montante (m) = $h_1=$	2,00

Altura do degrau incluindo fundação a jusante (m) = h2=	2,00
Espessura da laje junto ao degrau (m)= h3=	0,50
Espessura da laje junto no final (m)= h4=	0,50
Espessura do cut-off (m)= h5=	1,00
Largura do degrau (m)= W1=	1,00
Largura do cut-off (m) =W2=	1,00
Comprimento da primeira laje junto ao degrau (m)=L1=	5,05
Comprimento da segunda laje junto ao degrau (m)=L2=	8,65
Altura do degrau (m)= Z=	<b>1,00</b>
Calculos	
Lw (m)=	<b>11,23</b>
<b>Ponto B</b>	
Pressão hidrostática (m) Pb=	<b>0,42</b>
Espessura no ponto B (m)=	0,30
<b>Ponto D</b>	
Lw ponto D=	<b>9,90</b>
Pressão hidrostática (m) Pb=	<b>0,12</b>
Espessura no ponto D (m)=	0,08

No ponto B achamos espessura de 0,30m que poderá ser feito em colchão Reno e depois jogado concreto sob o mesmo como é de praxe em fundos de rios e córregos. Na parte da espessura no ponto D de 0,08m usamos o mesmo colchão Reno com 0,30m. Não esquecer que  $h_5 = 1,00\text{m}$  que é o colchão Reno que fica ancorado fazendo um *cut-off*.

#### Exemplo 74.6

Estimar o comprimento  $L_d + L$  supondo degrau vertical com vazão de  $28,3\text{m}^3/\text{s}$ , base  $B=3,00\text{m}$ , taludes  $Z=4$  e  $L=30,00\text{m}$ ,  $S_o = 0,050\text{m/m}$ .

Primeiramente calculamos o Drop number  $D_n=4,5$  e depois calculamos  $L_d=8,15\text{m}$  bem como  $y_1=1,29\text{m}$  e  $y_2=1,90\text{m}$ . O valor  $L=4,16\text{m}$  sendo o total  $L_d+L=12,31\text{m}$

Drop number	$L_d$ (m)	$y_1$	$y_2$	$L$ (m)	$L_d+L$
4,5	8,15	1,29	1,90	4,16	12,31

No Exemplo 74.1 supomos degrau com 30m, sendo 15m a montante e 15m a jusante. No caso teremos que concretar o fundo do canal em 12,31m que é aproximadamente os 15m.

Nota 1: poderíamos chegar somente ao valor  $L_d=8,15\text{m}$

Nota 2: o autor já viu projetos em loteamentos onde dimensionaram as escadas hidráulicas em *nappe flow* como no exemplo acima, mas de maneira que o comprimento do degrau fosse no máximo  $L_d$ , isto é, antes do ressalto hidráulico.

**Altura do degrau=H= 1,26m**

Problema1) Verificar se a estrutura é segura contra "piping" ?	
Altura do degrau incluindo fundação a montante (m) = h1=	3,00
Altura do degrau incluindo fundação a jusante (m) = h2=	3,00
Espessura da laje junto ao degrau (m)= h3=	0,50
Espessura da laje junto no final (m)= h4=	0,30
Espessura do cut-off (m)= h5=	2,00
Largura do degrau (m)= W1=	1,00
Largura do cut-off (m) =W2=	1,00
Comprimento da primeira laje junto ao degrau (m)=L1=	8,15
Comprimento da segunda laje junto ao degrau (m)=L2=	4,16
Altura do degrau (m)= Z=	<b>1,26</b>
Calculos	
Lw (m)=	<b>13,57</b>
Lw/Z=	<b>10,77</b>
T abela do materal argila	<b>2,00</b>
Verificação se haverá ou não piping LW/Z > weihthed creep ratio	<b>Tubo bem</b>
Problema 2) Calcular a espessura da duas lajes do degrau	
Altura do degrau incluindo fundação a montante (m) = h1=	3,00
Altura do degrau incluindo fundação a jusante (m) = h2=	3,00
Espessura da laje junto ao degrau (m)= h3=	0,50
Espessura da laje junto no final (m)= h4=	0,30
Espessura do cut-off (m)= h5=	2,00
Largura do degrau (m)= W1=	1,00
Largura do cut-off (m) =W2=	1,00
Comprimento da primeira laje junto ao degrau (m)=L1=	8,15
Comprimento da segunda laje junto ao degrau (m)=L2=	4,16
Altura do degrau (m)= Z=	<b>1,26</b>
Calculos	
Lw (m)=	<b>13,57</b>
<b>Ponto B</b>	
Pressão hidrostática (m) Pb=	<b>0,56</b>
Espessura no ponto B (m)=	0,40
<b>Ponto D</b>	
Lw ponto D=	<b>11,24</b>
Pressão hidrostática (m) Pb=	<b>0,43</b>
Espessura no ponto D (m)=	0,31

**Conclusão: não haverá piping e a espessura da laje no primeiro trecho a montante é 0,30 e a jusante de 0,31.**

#### **74.18 Bibliografia e livros consultados**

- CETESB. *Drenagem urbana- Manual de projeto*. 3ª ed 1986, Cetesb. 451 páginas,
- CHANSON, HUBERT. *The hydraulics of open channel: na introduction*. 2a ed. Elsevier, 585 páginas, ano 2010.
- CHOW, VEN TE. *Open channel*. McGraw-Hill, 1986, 680 páginas.
- GUO, JAMES C. Y. *Drop height for channel erosion control*. Prof. de engenharia civil da Universidade do Colorado localizada em Denver, 2009.
- GUO, JAMES C. Y. *Urban hydrology and hydraulic design*. Editora WRP, ano 2006, 507 páginas, ISBN-10: 1-887201-48-3.
- HENRIX, JOSHUA et al. *Predicting underseepage of masonry dams*. 8 paginas , outubro 2009
- KHATSURIA, R. M. *Hydraulic of Spillways and Energy dissipators*. New York, 2005, 649 páginas.
- MAYS, LARRY W. *Hydraulic design Handbook*. 1999, McGraw-Hill,
- PMSP (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO). *Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo*. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, ano 2000, 289 páginas.