



**PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO**

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

**SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS**

EMITENTE

**SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS**

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
<b>DP-H08</b>	<b>DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM</b> Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	<b>30/06/99</b>

**DP-H08**

**DIRETRIZES DE PROJETO PARA PERDA DE CARGA  
EM SINGULARIDADES DE CANAIS E GALERIAS**



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

## ÍNDICE

PÁG.

1.	OBJETIVO.....	138
2.	EQUAÇÕES GERAIS PARA O ESTUDO DAS SINGULARIDADES .....	138
3.	EMBOQUES EM NÍVEL .....	142
4.	EMBOQUES A PARTIR DE VERTEDORES .....	145
5.	ALARGAMENTO DE SEÇÃO .....	147
6.	ESTREITAMENTO DE SEÇÃO .....	149
7.	REBAIXAMENTO DE NÍVEL.....	150
8.	PILARES DE PONTE .....	152
9.	CONFLUÊNCIAS.....	156
10.	BIFURCAÇÕES.....	159
11.	MUDANÇA DE DIREÇÃO .....	160



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

## 1. OBJETIVO

Esta diretriz tem por objetivo apresentar os métodos e parâmetros de cálculos de perdas de carga em singularidades dos canais de drenagem, de seus afluentes e das principais galerias que compõem um sistema de macro drenagem. Para os casos de maior complexidade recomenda-se que sejam feitos ensaios em modelo físico reduzido, como, por exemplo, quando a singularidade é verificada em galeria de células múltiplas.

A seguir, está transcrito um texto extraído da publicação "Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo" (FCTH, 1995).

## 2. EQUAÇÕES GERAIS PARA O ESTUDO DAS SINGULARIDADES

Todos os problemas relativos às singularidades são resolvidos com o conjunto das equações da conservação da massa, conservação da energia e da quantidade de movimento, expressas simplificadamente da forma:

$$\sum Q_i = 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\sum E_i = 0 \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\sum (Fext)_i \text{ (em } x \text{ ou } y) = \sum (\rho \cdot Q_i \cdot V_i) \text{ (em } x \text{ ou } y) \dots\dots\dots (2.3)$$

onde:

$$Q_i = \text{ vazões na seção } i \text{ montante ou a jusante da singularidade, } E_i = z_i + y_i + \frac{\alpha V_i^2}{2g} ;$$



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

$E_i$  = níveis de energia na seção  $i$  a montante e a jusante da singularidade:

$$E_i = Z_i + y_i + \frac{\alpha V_i^2}{2g};$$

$Z_i$  = cota do fundo do canal seção  $i$ ;

$y_i$  = altura da água na seção  $i$ ;

$V_i$  = velocidade de escoamento na seção  $i$ ;

$\alpha$  = coeficiente de corrosão;

$g$  = aceleração da gravidade;

$b_i$  = largura das seções imediatamente a jusante e montante da singularidade.

$\Sigma F_{ext,i}$  = resultantes das forças de contato e de campo em torno do volume de controle que envolve a singularidade, projetadas em uma direção preferencial  $x$  (do canal principal, por exemplo) ou perpendicular a esta direção  $y$ ;

$\rho$  = massa específica de água;

$\rho Q_i V_i$  = valores das quantidades de movimento calculadas a montante e a jusante da singularidade, também nas direções  $x$  e  $y$ ;

a) Exemplo de caso: ressalto hidráulico

Para exemplificar, consideremos o caso do ressalto hidráulico, um fenômeno muito utilizado em estruturas de dissipação de energia. O ressalto hidráulico é uma desaceleração brusca do escoamento em regime torrencial (supercrítico), passando ao regime fluvial (subcrítico).

Seja a Figura 2.1, com um volume de controle envolvendo o ressalto hidráulico. Nesse desenho, encontram-se representados todos os elementos de cálculo e assume-se que o leito seja plano, horizontal, com perdas por atrito em contato com a parede desprezíveis.



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

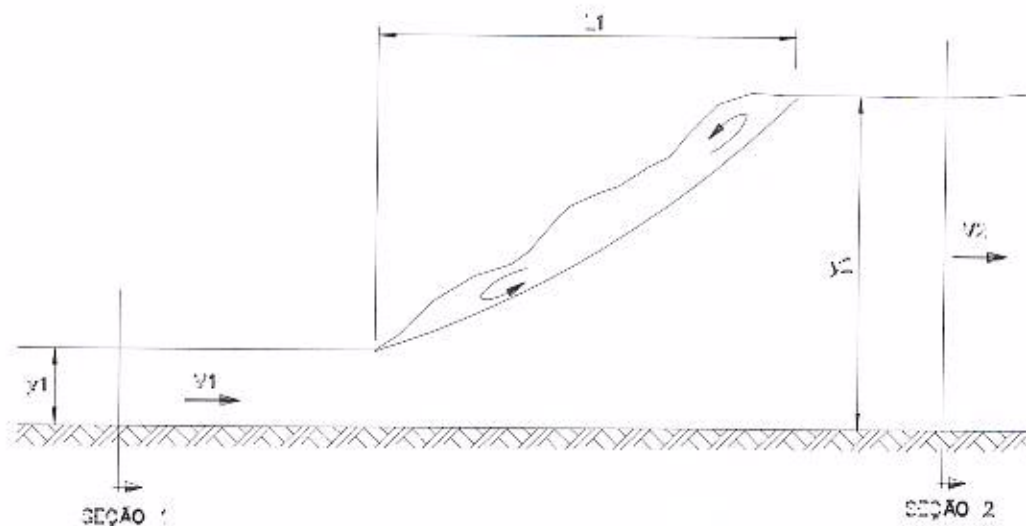
EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

onde:

$S_1$  e  $S_2$  = são as seções imediatamente a montante e a jusante do ressalto hidráulico;  
 $L$  = comprimento do ressalto.



**Figura 2.1**  
**Elementos do ressalto hidráulico**

Pode-se concluir que a soma das forças externas na direção do escoamento seja igual à diferença entre os empuxos hidrostáticos das extremidades do volume de controle (seções 1 e 2):

$$(F_{ext}) = E_1 - E_2 \dots\dots\dots (2.4)$$

A variação da quantidade de movimento, também nesta direção, é expressa pela seguinte equação:



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

$$\Sigma (\rho \cdot Q_i \cdot V_i) = \rho \cdot Q_o \cdot (V_2 - V_1) \dots\dots\dots (2.5)$$

Portanto, da aplicação da equação da quantidade de movimento resulta:

$$E_1 - E_2 = \rho \cdot Q_i \cdot (V_2 - V_1) \dots\dots\dots (2.6)$$

Utilizando-se ainda a equação de conservação da massa, pode-se desenvolver esta equação que resulta na forma clássica da função das profundidades conjugadas:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 \cdot F_1^2} - 1 \right) \dots\dots\dots (2.7)$$

onde:

$F_1$  = número de Froude do escoamento na seção 1.

A partir da equação de conservação de energia, aplicada entre as seções 1 e 2, calcula-se a perda de carga no ressalto hidráulico  $\Delta H_{1-2}$ :

$$z_1 + y_1 + \frac{a \cdot V_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + y_2 + \frac{a \cdot V_2^2}{2 \cdot g} + \Delta H_{1-2} \dots\dots\dots (2.8)$$

Desenvolvendo-se esta equação, chega-se à expressão simplificada:

$$\Delta H_{1-2} = \frac{\left( \frac{y_2}{y_1} - 1 \right)^3}{4 \cdot \frac{y_2}{y_1}} \dots\dots\dots (2.9)$$



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

### 3. EMBOQUES EM NÍVEL

Os emboques em galerias seguem os mesmos critérios de dimensionamento de bueiros, com a particularidade de que devem ser dimensionados para que não entrem em carga em qualquer circunstância. Para que isto ocorra, é necessário que não só as dimensões da galeria sejam suficientemente dimensionadas, para que funcione em regime de escoamento com superfície livre, como também que as condições de jusante e montante sejam tais que não permitam o afogamento. A experiência demonstra que existe um valor crítico da altura do nível de montante, entre 1,2 e 1,5 vezes a altura da galeria, acima da qual o emboque deve entrar em carga (Figura 3.1).

Há situações, como por exemplo as saídas de reservatórios, em que o nível de água a montante ultrapassa o valor limite de afogamento, porém, com o escoamento à superfície livre no interior do conduto (Figura 3.1). Nestes casos, deve-se dimensionar a entrada da galeria como se fosse um orifício de grandes dimensões, a partir da equação de conservação de energia, escrita da forma:

$$Q = C_o \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \dots\dots\dots (3.1)$$

onde:

$Q$  = vazão de projeto da galeria;

$C_o$  = coeficiente de descarga do orifício;

$A$  = área da seção de entrada da galeria;

$H$  = carga no reservatório referida ao piso da galeria.



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

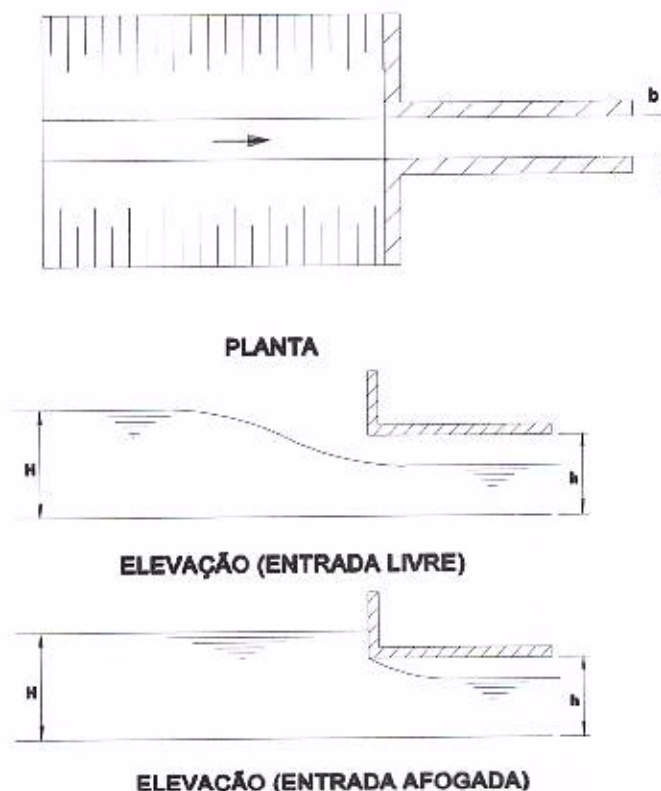
DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99



**Figura 3.1**  
**Emboque em galeria**

O coeficiente de descarga neste caso varia entre valores de 0,45 e 0,75 aproximadamente, dependendo da geometria na entrada (Chow - 1959).

Henderson (1966) indica uma equação para seções de galerias quadradas ou retangulares, que se aproxima muito dos valores observados, com desvios da ordem de 2%:

$$Q = C_Q \cdot b \cdot h_{gal} \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - C_Q \cdot h_{gal})} \dots\dots\dots (3.2)$$





## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

onde:

$h_{gal}$  = altura da galeria;

$b$  = largura da galeria;

$C_Q$  = 0,6 para bordos com aresta quadrada, 0,8 para bordos arredondados.

Não ultrapassando o limite para o afogamento na entrada da galeria (Figura 3.1), Henderson (1966) recomenda que se utilize uma equação semelhante, admitindo que o escoamento passe pelo regime crítico na entrada da galeria:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_b \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g \cdot H} \dots\dots\dots (3.3)$$

onde:

$C_b$  = coeficiente de contração lateral que assume o valor unitário quando as bordas são arredondadas com raio de curvatura superior a 10% do valor da largura da boca da galeria, e valor igual a 0,9, quando os bordos têm aresta quadrada.

Em se tratando de aproximação em canal, a perda de carga no emboque irá depender basicamente das condições geométricas de aproximação. O ideal é que a aproximação seja feita na mesma direção do eixo da galeria, com uma transição geométrica gradual para minimizar as perdas de carga. No caso que seja inevitável uma passagem com variação geométrica mais brusca, que envolva mudança de largura de seção ou mesmo uma aproximação em curva, deve-se calcular estes efeitos a partir dos equacionamentos que são apresentados nos itens a seguir.



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

## 4. EMBOQUES A PARTIR DE VERTEDORES

Há casos em que o início de uma galeria pode ser feito superiormente, com uma ligação aos sistemas de micro-drenagem. Neste caso, convém que esta entrada seja feita através de vertedor frontal e/ou lateral ou em forma de tulipa, dependendo do arranjo específico de cada obra. Estes vertedores devem ser dimensionados de forma a ter uma capacidade de descarga igual ou superior à da galeria, evitando-se assim que se crie um ponto de restrição.

O equacionamento dos vertedores segue basicamente a mesma estrutura da Equação 3.1, com a diferença de que a altura de carga é tomada em relação à crista vertente, como se vê a seguir:

$$Q = C_D \cdot l \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H^3} \dots\dots\dots(4.1)$$

onde:

$l$  = comprimento da crista do vertedor.

O coeficiente de vazão  $C_D$  pode variar entre 0,385 para vertedores de soleira espessa a 0,49 para vertedores de soleira normal. A Figura 4.1 mostra um exemplo deste tipo de configuração de emboque.

No caso em que seja necessário fazer a dissipação de energia, deve-se seguir o critério de dimensionamento que é apresentado nas Diretrizes de Projeto – DP-H15 – Dissipação de energia da SVP/PMSP.



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

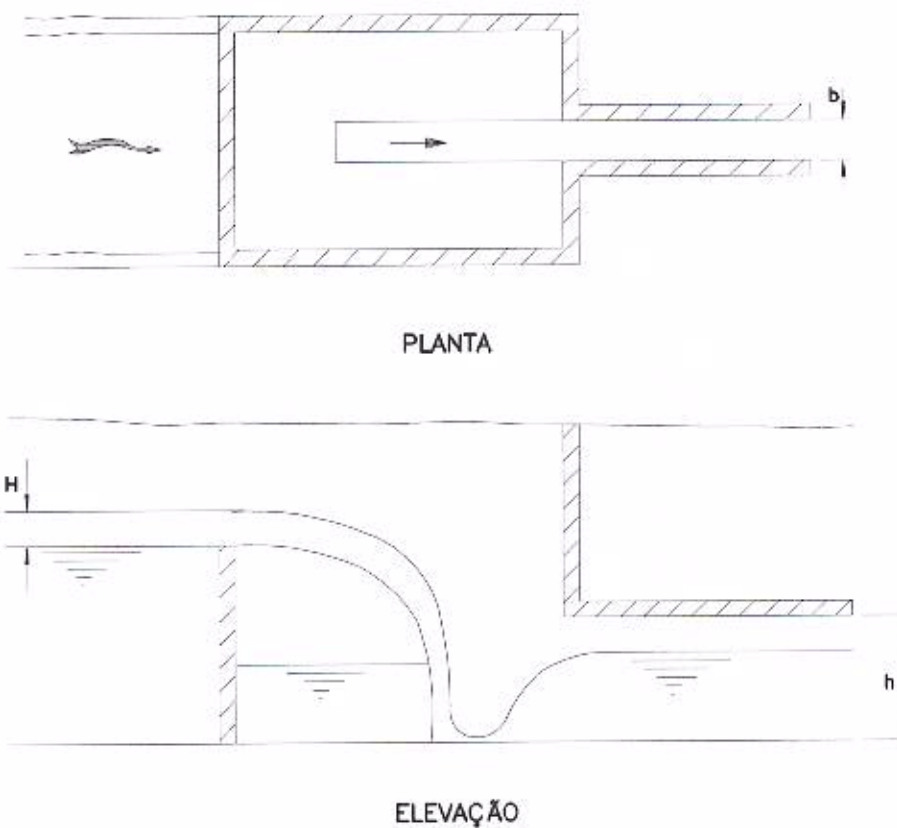
DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99



**Figura 4.1**  
Emboque a partir de vertedores



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

## 5. ALARGAMENTO DE SEÇÃO

A situação mais crítica, em termos de variação da largura de canalização, ocorre quando há um alargamento brusco de seção. A partir dos princípios de conservação de energia e da quantidade de movimento, pode-se conduzir o seu equacionamento. Considerando-se, dentro do esquema da Figura 5.1, que o escoamento é fluvial, resulta a seguinte equação de perda de carga na singularidade (Henderson-1966):

$$\Delta E = \frac{Q^2}{2.g.(y_1.b_1)^2} \left[ \frac{2.F_1^2.b_1^3.(b_2 - b_1)}{b_2^4} + \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right)^2 \right] \dots\dots\dots (5.1)$$

onde:

- $\Delta E$  = perda de carga entre as seções de montante e de jusante;
- $F_1$  = número de Froude do escoamento a montante da singularidade;
- $y_1$  = profundidade imediatamente a montante do alargamento.

Quando o número de Froude é muito baixo ou a relação de larguras é elevada, a primeira parcela da expressão entre colchetes assume um valor muito baixo, podendo ser desprezada. A equação, então, tende a se aproximar da equação equivalente a condutos forçados, ou seja:

$$\Delta E = \frac{Q^2}{2.g.(y_1.b_1)^2} \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right)^2 \dots\dots\dots (5.1)$$



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

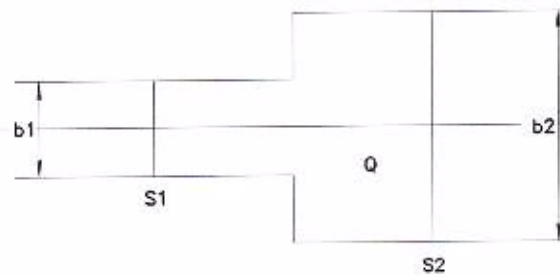


FIGURA 5.1 - ALARGAMENTO BRUSCO

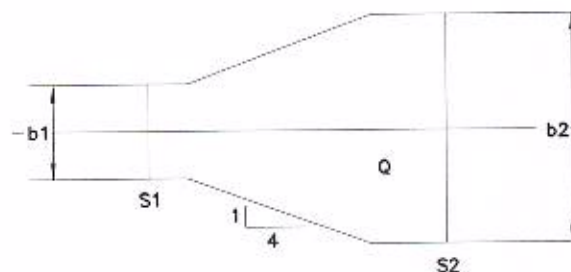


FIGURA 5.2 - ALARGAMENTO GRADUAL

Na maior parte dos casos, esta equação apresenta resultados conservativos. Nos experimentos de Fórmica (1955), foram encontrados valores de perda de carga ligeiramente inferiores aos desta equação simplificada (da ordem de 10%).

Nos alargamentos graduais, as perdas de carga se reduzem a valores da ordem de 0,3 vez o valor determinado pela Equação 5.1. Segundo Henderson (1966), não há ganhos significativos ao se utilizar razões de expansão superiores a 1:4 (largura:comprimento), sendo este valor



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

recomendado para projetos. Também a forma de transição não assume uma importância relevante, sendo apenas recomendado que se evite formação de arestas nas junções.

As mudanças de seção em regime torrencial, conforme já foi mencionado, apresentam formação de ondas estacionárias superficiais que exigem uma sobrelevação da borda-livre. Este problema requer cuidados maiores nos projetos, principalmente ao tratar-se de galeria. Neste caso, devido à possibilidade de uma eventual formação de ressalto ou elevação do nível de água devido às ondulações, a galeria pode entrar em regime de conduto forçado.

## 6. ESTREITAMENTO DE SEÇÃO

A exemplo do que ocorre em condutos forçados, as perdas são menores no estreitamento de seção, quando comparadas aos alargamentos. A partir das mesmas considerações feitas no item anterior e seguindo o esquema da Figura 6.1, pode-se chegar a uma expressão semelhante à anterior, considerando as mesmas hipóteses simplificatórias:

$$\Delta E = K_{est} \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot (y_2 \cdot b_2)^2} \dots \dots \dots (6.1)$$

onde:

$K_{est}$  = coeficiente de perda de carga devido ao estreitamento de seção que depende fundamentalmente da geometria da transição.

Fórmica (1955) determinou experimentalmente valores de  $K_{est}$  da ordem de 0,23 para contrações com arestas quadradas e de 0,11 para contrações com estreitamentos com bordos arredondados. Já Yarnell, nos estudos de perdas de carga em pilares de ponte, encontrou valores superiores, da ordem de 0,35 e 0,18, respectivamente para arestas quadradas e



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

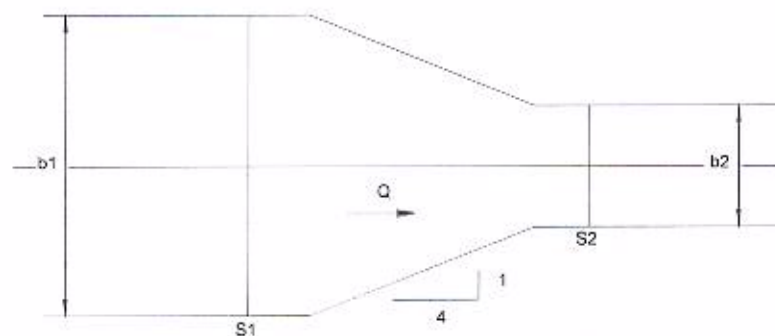
SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

bordos arredondados. Com relação aos escoamentos em regime supercrítico, valem as mesmas observações do item anterior.



**Figura 6.1**  
**Estreitamento de seção**

## 7. REBAIXAMENTO DE NÍVEL

É comum nos projetos de drenagem a necessidade de mudança de nível do leito, comumente resolvida com a introdução de degrau. No caso de desníveis pouco acentuados, dentro do regime fluvial tanto a montante como a jusante do degrau, aplicam-se da mesma forma as equações de conservação de energia e da quantidade de movimento para a determinação do nível a montante, resultando em:

$$\frac{b \cdot y_1^2}{2} + \frac{Q^2}{g \cdot b \cdot y_1} = \frac{b \cdot y_2^2}{2} - \frac{b \cdot \Delta z (2 \cdot y_2 - \Delta z)}{2} + \frac{Q^2}{g \cdot b \cdot y_2} \dots\dots\dots (7.1)$$



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

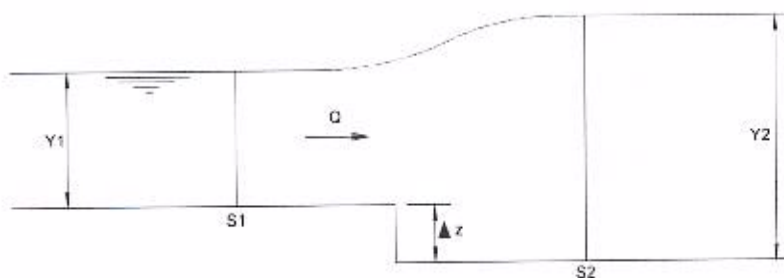
$$\Delta E = y_1 + \frac{Q^2}{2.g.(b.y_1)^2} - y_2 - \frac{Q^2}{2.g.(b.y_2)^2} + \Delta z \dots\dots\dots (7.2)$$

onde:

$\Delta z$  = desnível do degrau, conforme a indicação da Figura 7.1.

Nos casos de rampas com variação gradual (1V:4H), pode-se considerar uma redução da perda de carga a um valor da ordem de 0,3 vez o determinado pela Equação 7.2, a exemplo do que foi feito no item relativo ao alargamento de seção.

Os casos de desniveis acentuados com mudança de regime de escoamento são analisados no estudo das estruturas de queda (vide Diretrizes de Projetos – DP-H15 – Dissipação de Energia –, da SVP/PMSP), uma vez que não se trata de uma simples acomodação de nível mas, de maneira geral, há interesse em dissipar a energia cinética.



**Figura 7.1**  
**Desnível em degrau**





# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

## 8. PILARES DE PONTE

O estreitamento localizado produzido por pilares de ponte pode ser comparado a um estreitamento de seção seguido imediatamente por um alargamento, incluem-se, neste caso, além dos efeitos devido ao estreitamento de seção, os efeitos hidrodinâmicos de forma dos pilares.

Uma forma consagrada de cálculo do efeito de pilares de pontes em seções é a utilização da equação de Yarnell (1934a;1934b), determinada experimentalmente para diversos formatos de pilares:

$$\frac{y_1}{y_3} = 1 + K_f \cdot F_3 \cdot (K_f + 5 \cdot F_3^2 - 0,6) \left[ \left( 1 - \frac{b_2}{b_1} \right) + 15 \cdot \left( 1 - \frac{b_2}{b_1} \right)^4 \right] \dots\dots\dots (8.1)$$

onde:

$F_3$  = número de Froude na seção de jusante;

$K_f$  = coeficiente que considera a forma do pilar apresentada na Tabela 8.1

Seção 1 = Seção a montante dos pilares

Seção 2 = Seção estrangulada entre os pilares

Seção 3 = Seção a jusante dos pilares



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

**Tabela 8.1**  
Coeficiente de forma  $k_f$

FORMA DO PILAR	$K_f$
Extremidades semi-circulares	0,9
Forma lenticular nas extremidades	0,9
Dois pilares circulares com parede de ligação	0,95
Dois pilares circulares sem ligação	1,05
Extremidades triangulares (90°)	1,05
Pilares retangulares	1,25

Os demais elementos estão representados na Figura 8.1.

Nos escoamentos, onde o grau de constrição de seção é mais elevado e se produza o ressalto, deve-se considerar a perda de carga através da equação:

$$E_1 - E_2 = C_L \cdot \frac{V_2^2}{2g} \dots\dots\dots (8.2)$$

onde:

$C_L$  = coeficiente de perda que depende somente da forma do pilar que assume valores iguais a 0,35 para pilares retangulares e 0,18 para pilares com bordos posteriores arredondados. Pode-se admitir numa aproximação em que a seção 2 apresente a profundidade conjugada à seção 3 logo após o ressalto.

Com o valor da perda de carga e aplicando a equação da conservação da energia, obtém-se a profundidade na seção 1 a montante dos pilares. Esta equação foi desenvolvida para pilares com uma relação comprimento/largura igual a 4/1. Para relações de 7/1 e 13/1 foi obtido experimentalmente incremento de desníveis ( $y_1 - y_2$ ) da ordem de 5% e 10% respectivamente.



## PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

No caso de pilares não alinhados com a direção do escoamento, Yarnell verificou que para inclinações de  $10^\circ$  o acréscimo do desnível  $(y_1 - y_2)$  é pouco significativo. Por outro lado, para inclinações de  $20^\circ$  resultam acréscimos da ordem de 2,3 vezes o valor do desnível obtido com os pilares alinhados. Portanto, sempre que for possível, convém que se evitem tais situações.



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

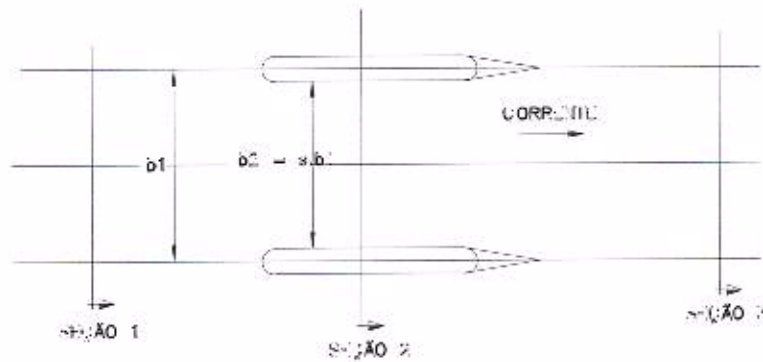
DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99



PLANTA

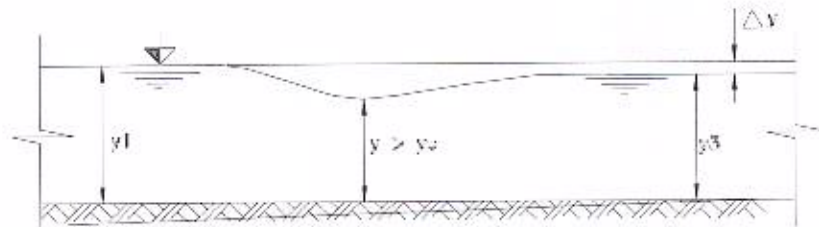


Figura 8.1  
Presença de pilares no escoamento



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

## 9. CONFLUÊNCIAS

Para o equacionamento das confluências será considerada inicialmente uma situação do tipo da representada na Figura 9.1. Segundo este esquema e nas condições em que:

- O escoamento esteja em regime fluvial;
- O canal principal esteja alinhado, com escoamento paralelo às paredes e distribuição uniforme de velocidades, inclusive no contribuinte;
- É possível desconsiderar as perdas por atritos longitudinais;
- O ângulo de incidência do afluente não exceda 45°.

Os resultados da aplicação direta das equações de conservação da massa, conservação de energia e da quantidade de movimento dão números muito próximos aos valores observados experimentalmente (Taylor-1944).

Portanto, as profundidades de montante se obtém a partir de:

$$\frac{Q_3^2}{g.A_3} + \frac{m_3.y_3^2}{2} = \frac{Q_1^2}{g.A_1} + \frac{Q_2^2}{g.A_2} \cdot \cos(\theta) + \frac{m_1.y_1^2}{2} \dots\dots\dots(9.1)$$

para seção retangular:

$$m_1 = b_1 ; m_3 = b_3 \dots\dots\dots(9.2)$$



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

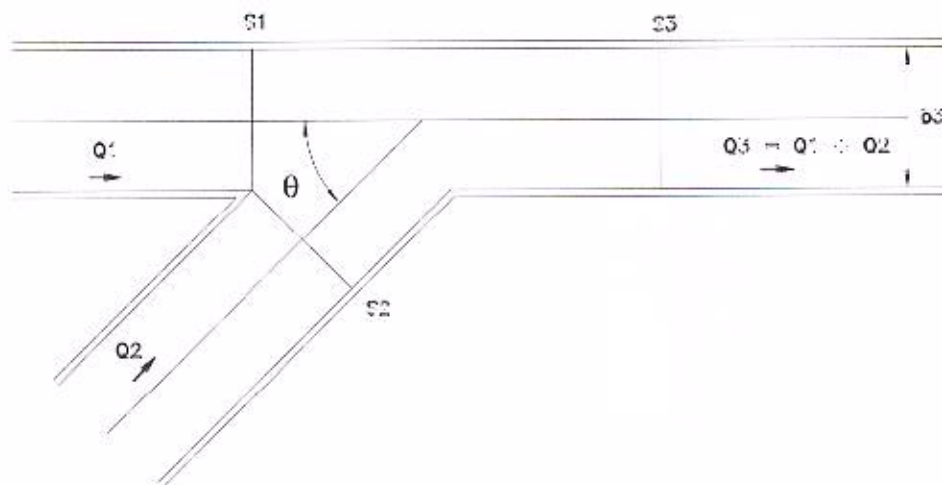
REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

para seção trapezoidal:

$$m_3 = b_3 + Z_3 \frac{2 \cdot y_3}{3}; m_1 = b_1 + Z_1 \frac{2 \cdot y_1}{3} \dots\dots\dots(9.3)$$

onde:

- subíndice 1 seção de montante do canal principal;
- subíndice 2 seção de montante do canal secundário;
- subíndice 3 seção de jusante do canal principal.



**Figura 9.1**  
**Confluência**

Não é recomendável que na região da junção o regime seja supercrítico, pela ocorrência de ondas estacionárias que produzem a elevação do nível de água, principalmente em se tratando de galeria fechada. Caso seja inevitável este tipo de solução, é recomendável o estudo em modelo reduzido para a otimização da solução. Para efeito de pré-dimensionamento é



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

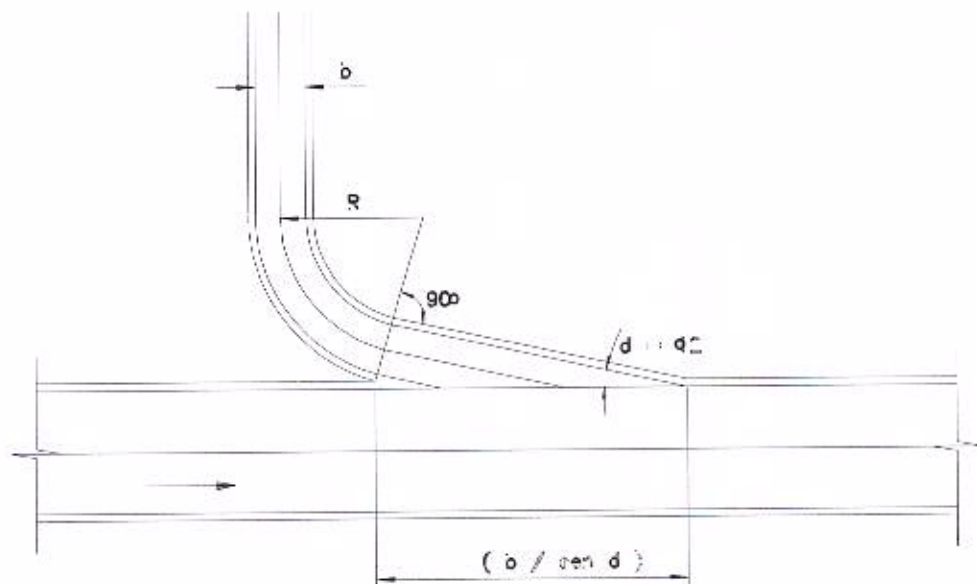
EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

recomendável que o ângulo de incidência não supere  $12^\circ$  e que a profundidade de escoamento não exceda 0,80 da profundidade crítica para evitar a formação de ressalto ondulado.

A condição ideal de confluência seria a indicada na Figura 9.2, situação em que as perdas seriam minimizadas ao máximo, com um custo adicional aproximadamente equivalente a um curto prolongamento do canal contribuinte.



**Figura 9.2**  
**Confluência ideal**



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

## 10. BIFURCAÇÕES

Seguindo-se as mesmas hipóteses apresentadas anteriormente pode-se, de maneira análoga, aplicar as mesmas equações para bifurcações em regime fluvial. A diferença fundamental é que os níveis em cada canal, após a bifurcação, dependem de uma condição de jusante conhecida. A incógnita passa a ser o nível a montante da bifurcação. Portanto, pode-se aplicar o conjunto de equações de 9.1 a 9.3, seguindo-se o esquema da Figura 10.1. Valem, também, as mesmas recomendações feitas no item anterior.

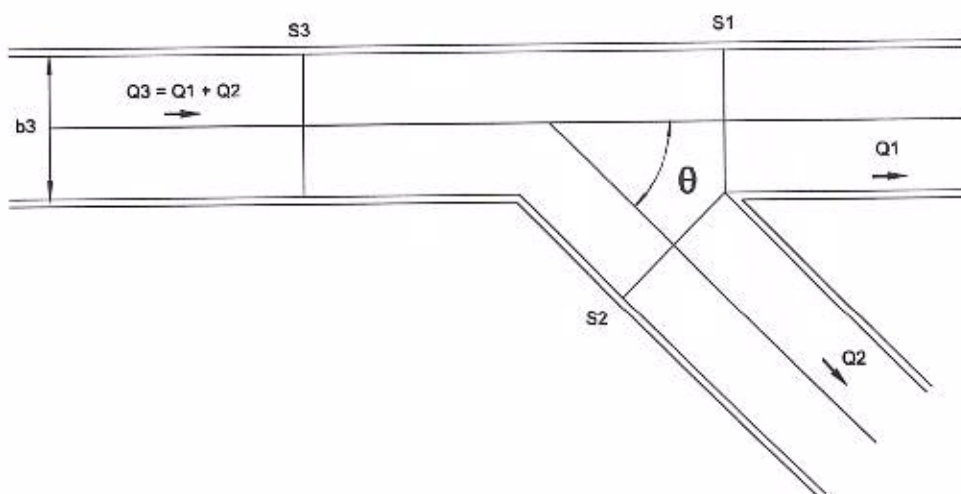


Figura 10.1  
Bifurcação





# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

## 11. MUDANÇA DE DIREÇÃO

As perdas de carga em curvas decorrem, principalmente, da presença de correntes secundárias. A intensidade destas correntes, por sua vez, é dependente de diversas características do escoamento e da geometria da seção de escoamento, tornando-se, assim difícil uma formulação generalizada.

Estudos realizados por Shukry (1950) em escoamentos subcríticos demonstraram que as correntes secundárias, de maneira geral, decrescem com o número de Reynolds do escoamento ( $Re$ ), com a razão entre o raio de curvatura e a largura da seção ( $r_c/b$  com  $r_c$  tomado até o eixo) e com a razão da profundidade com a largura ( $y/b$ ) e crescem com o ângulo de inflexão da curva ( $\theta/180^\circ$ ). As correntes secundárias passam por um valor mínimo para uma relação  $r_c/b$  da ordem de 3 e para seções relativamente largas ( $y/b$  elevado).

As perdas de carga em curvas podem ser expressas em termos de:

$$\Delta E = f_c \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (11.1)$$

onde:

$f_c$  = fator de perda de carga devido à curvatura.

Até o momento, não se tem nenhum estudo conclusivo para a determinação do fator de perda de carga ( $f_c$ ) em curvas. Embora qualitativamente as observações feitas por Shukry sejam coerentes com o fenômeno físico, seus experimentos ficaram limitados a situações de Reynolds até um valor da ordem de 75.000, valor este muito inferior ao que normalmente se



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

encontra em projetos de macrodrenagem. Henderson (1966) recomenda o uso da equação proposta por Mockmore expressa por:

$$f_c = 2 \cdot \frac{b}{r_c} \dots\dots\dots (11.2)$$

Embora esta expressão seja bastante simplificada, diante das incertezas na determinação das perdas de carga por outras metodologias, os resultados desta equação são mais conservativos.

O Manual de Drenagem Urbana de Denver (Wright-Mclaughlin - 1969) recomenda que as curvaturas não tenham raio ( $r_c$ ) inferior a 2 vezes a largura superficial ou um mínimo de 30 metros.

Uma segunda consideração a ser feita a este tipo de singularidade diz respeito à sobrelevação da linha d'água junto à margem externa da curva. Novamente pelas mesmas razões apontadas anteriormente, as equações apresentadas a seguir se restringem a escoamentos fluviais. Aplicando-se a segunda lei de Newton ao movimento em curva dentro de hipóteses simplificadoras, chega-se à expressão:

$$Q = C \left( E - \frac{C^2}{2 \cdot g \cdot r_{ext} \cdot r_{in}} \right) \log \left( \frac{r_{ext}}{r_{in}} \right) \dots\dots\dots (11.3)$$

$$\Delta h = \frac{C^2}{2 \cdot g \cdot r_{ext} \cdot r_{in}} (r_{ext}^2 - r_{in}^2) \dots\dots\dots (11.4)$$

onde:

$r_{ext}$  = raio externo da curva;

$r_{in}$  = raio interno da curva;



# PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H08	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias	30/06/99

$C$  = constante de circulação do vórtice livre determinada pela Equação 11.3;

$Q$  = vazão de escoamento;

$E$  = energia específica na seção. Com alguma simplificação, resulta a seguinte equação:

$$\Delta h = \frac{V^2 \cdot b}{g \cdot r_c} \dots \dots \dots (11.5)$$

O Manual de Drenagem Urbana de Denver (Wright-Mclaughlin - 1969) recomenda que seja adotada a metade do valor encontrado na Equação 11.5.