



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

DP-H14

**DIRETRIZES DE PROJETO PARA HIDRÁULICA
EM DRENAGEM URBANA**



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

ÍNDICE

PÁG.

1.	OBJETIVO	320
2.	INTRODUÇÃO	320
3.	ELEMENTOS BÁSICOS DA HIDRÁULICA DE CANAIS.....	321
3.1	ELEMENTOS GEOMÉTRICOS	322
4.	EQUAÇÃO DA ENERGIA	325
5.	EQUAÇÕES DO REGIME UNIFORME	327
6.	CÁLCULO DE LINHA D'ÁGUA EM REGIME PERMANENTE GRADUALMENTE VARIADO	328
6.1	MÉTODO EM QUE A VARIÁVEL É A PROFUNDIDADE ("DIRECT STEP METHOD")	330
6.2	MÉTODO EM QUE A VARIÁVEL É A POSIÇÃO DA SEÇÃO ("STANDARD STEP METHOD").....	332
6.3	CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES	335
7.	MODELOS	336



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

1. OBJETIVO

Esta diretriz tem por objetivo apresentar as equações ou métodos de cálculo que podem ser utilizados, considerando-se estes como critérios mínimos de dimensionamento hidráulico, para canais e galerias.

2. INTRODUÇÃO

Inicialmente, são feitas algumas considerações sobre princípios básicos da hidráulica de canais e das equações do escoamento em regime uniforme. Este nível de equacionamento serve como um critério de pré-dimensionamento na fase de estudo de concepção geral de projeto, análises econômicas e outras definições gerais, que não implicam ainda num maior nível de qualidade de informações.

Para um maior detalhamento de projeto, é necessário considerar a variação da linha d'água ao longo do canal, principalmente quando se quer fazer uma avaliação mais realista das perdas de carga em singularidades ou eventuais limitações externas, como passagens sob pontes, entre outras. São apresentados dois métodos de cálculo, de uso consagrado, para a determinação do escoamento em regime gradualmente variável no espaço. No primeiro, a variável independente é a profundidade de escoamento e, no segundo, a variável é o espaçamento entre seções de cálculo.

O dimensionamento hidráulico feito pelo pico de vazão de uma onda de enchente, considerando-se o evento como sendo permanente, resulta um critério conservativo. Há situações de maior complexidade que exigem um estudo mais realista e, portanto, a simulação do regime não permanente.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

O texto a seguir apresentado se baseia na publicação – “Diretrizes Básicas para Projeto de Drenagem Urbana no Município de São Paulo” da FCTH-USP, 1995.

3. ELEMENTOS BÁSICOS DA HIDRÁULICA DE CANAIS

O escoamento em canal é, por definição, aquele que se dá à superfície livre, ou seja, com uma fronteira exposta à atmosfera. Tradicionalmente, classificam-se os escoamentos em canais como permanentes (nos quais as variações no tempo das variáveis de escoamento são desprezíveis), e não permanentes. Dependendo da relação entre magnitude das forças de inércia e gravitacionais, os escoamentos são também divididos em subcríticos, críticos e supercríticos. O parâmetro utilizado para isto é o número de Froude:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} \dots\dots\dots (3.1)$$

onde:

V = velocidade característica do escoamento;

y = profundidade hidráulica, definida como sendo a área da seção de escoamento dividida pela largura superficial;

Se $F = 1$ atinge o estado crítico; as forças de inércia e gravitacionais estão em equilíbrio.

Se $F < 1$ o escoamento é subcrítico, predominando as forças gravitacionais (escoamento fluvial).

Se $F > 1$ o escoamento está em estado supercrítico, e as forças de inércia são predominantes (escoamento torrencial).

O denominador da Equação 3.1 é a velocidade de propagação das ondas superficiais em águas rasas, e daí conclui-se que:



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana		30/06/99

- a) Quando o escoamento é subcrítico, a velocidade " V " é menor que a velocidade de propagação das ondas superficiais. Logo, perturbações se propagam tanto para montante como para jusante, e diz-se que fenômenos a jusante podem afetar o escoamento a montante no canal;
- b) Quando o escoamento é supercrítico, a velocidade " V " é maior que a velocidade de propagação das ondas superficiais. Logo, as perturbações que ocorrem a jusante não podem afetar o escoamento a montante nos canais.

3.1 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS

Em função da seção transversal de escoamento, os canais são denominados artificiais ou regulares, quando a forma geométrica da seção obedece a uma lei conhecida e naturais, quando a forma geométrica desenvolveu-se através de processos naturais. As propriedades do escoamento nos canais relacionadas com a seção transversal são denominadas parâmetros hidrogeométricos:

a) Profundidade y

Distância vertical entre o fundo da seção e o nível d'água. Também é usual a referência à profundidade " d " na seção, que é a medida entre o fundo da seção e o nível d'água perpendicular ao fundo da seção. A relação entre d e y é dada por $y = d/\cos\theta$, onde θ é o ângulo entre o fundo e a horizontal.

b) Cota do nível d'água h

Elevação do nível d'água em relação a uma referência. Em geral, $h = (y + z)$, onde z é a elevação do fundo da seção.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

c) Largura superficial B

Largura da seção medida na superfície livre.

d) Área molhada A

Área da seção transversal do escoamento.

e) Perímetro molhado P

Comprimento linear da interface fluido-contorno.

f) Raio hidráulico R_h

Relação entre área e perímetro molhados.

O Quadro 3.1 indica as principais expressões para a determinação destes parâmetros em seções típicas de canais de drenagem. A distribuição de velocidade na seção transversal de um canal depende, entre outros fatores, da forma da seção, rugosidade das paredes e presença de bermas. Como resultado destas distribuições, a energia cinética do escoamento $V^2/2g$ e sua quantidade de movimento QV/g , sendo g a aceleração da gravidade, são na realidade maiores do que aquelas determinadas considerando-se apenas a velocidade média V .

Para avaliação correta da energia cinética e quantidade de movimento, são introduzidos os coeficientes de Coriolis α e β , de ajuste da média.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM

DATA

DP-H14 Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana

30/06/99

Usualmente, no dimensionamento de canais e galerias de águas pluviais não é necessário considerar os coeficientes α e β . No entanto, cabe ao projetista avaliar quando utilizar estes coeficientes.

QUADRO 3.1 - ELEMENTOS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS

SEÇÃO TIPO	ÁREA A	PERÍMETRO P	RAIO HIDRÁULICO R_h	LARGURA SUPERFICIAL B	PROFUNDIDADE CRÍTICA y_c
	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b	$\left(\frac{\psi}{b^3}\right)^{\frac{1}{5}}$
	$y(b+my)$	$b+2y\sqrt{1+m^2}$	$\frac{(b+my)y}{b+2y\sqrt{1+m^2}}$	$b+2my$	$0,31\left(\frac{\psi}{m^{0,18}b^{0,25}}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{b}{30m}$
	my^2 $\frac{1}{2}B y$	$2y\sqrt{1+m^2}$	$\frac{my}{2\sqrt{1+m^2}}$	$2my$	$\left(\frac{2\psi}{m^2}\right)^{0,20}$
	$\frac{1}{8}(\theta - \text{sen } \theta) D^2$ ou $D^2 \frac{4}{3} r^3 \left(1 - \frac{1}{4} r - \frac{4}{25} r^2\right)^3$	$\frac{1}{2} \theta \cdot D$	$\frac{1}{4} \left(1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta}\right) D$	$2\sqrt{y(D-y)}$ ou $D \frac{\theta}{2}$	$\left(\frac{1,01}{d^{0,26}}\right)^{0,25}$

$m = [\tan(\text{ângulo})]^{-1}$

$\theta = \text{ângulo em radianos}$

$\theta = 2 \arccos(1-2y/D)$

$\theta = 2 \arctg(B/(D-2y))$

$\psi = 0,1g^2$

* Aproximação satisfatória

Quadro 3.1



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO	DATA
DP-H14	DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

4. EQUAÇÃO DA ENERGIA

O princípio básico que rege o escoamento em canais é o da conservação da energia total, expresso pela Lei de Bernoulli. Originada da análise do movimento da partícula elementar e integrada ao longo da seção, onde a distribuição de pressões é admitida hidrostática e a velocidade em termos médios, pode ser expressa da seguinte forma:

$$H = \frac{V^2}{2.g} + \frac{d}{\cos \theta} + z \dots\dots\dots (4.1)$$

onde:

H = energia total por unidade de peso do fluido, admitindo como sendo unitário o coeficiente de Coriolis.

Sendo θ suficientemente pequeno, o termo $d / \cos(\theta)$ é substituído por y , ou seja, a própria profundidade na seção. Nas aplicações práticas, onde a seção e a descarga são definidas, a Equação 4.1 pode ser reduzida para representar apenas a energia específica:

$$E = \frac{V^2}{2.g} + y \dots\dots\dots (4.2)$$



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA

ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM

DATA

DP-H14

Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana

30/06/99

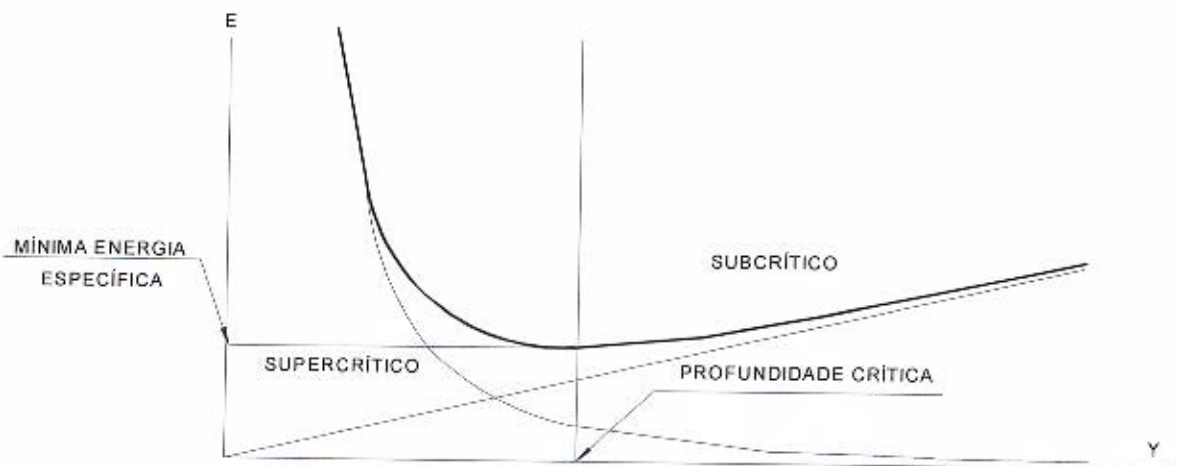


Figura 4.1

Curva de energia específica

A representação gráfica da equação anterior, vista na Figura 4.1, mostra a existência de uma energia específica mínima no escoamento, relacionada a uma profundidade limite denominada crítica.

$$\frac{dH}{dy} = \frac{d}{dy} \left(\frac{V^2}{2g} \right) + 1 = 1 - \frac{Q^2}{2gA^3} \cdot \frac{dA}{dy} = 0 \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

A raiz dessa expressão (Equação 4.3) representa esta profundidade crítica, podendo ser obtida em função da geometria da seção transversal através da Equação (4.4).

$$\frac{Q^2 B}{2gA^3} = 1 \quad \dots\dots\dots(4.4)$$

No Quadro 3.1, são apresentadas algumas expressões práticas para determinação da profundidade crítica em canais regulares.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

5. EQUAÇÕES DO REGIME UNIFORME

Embora as condições de escoamento em regime uniforme somente ocorram em situações especiais, é possível fazer uso desta condição para um pré-dimensionamento tanto de canalizações como de galerias.

O regime uniforme ocorre quando, num canal prismático de declividade e rugosidade constantes em sua extensão, a força gravitacional que gera o movimento se iguala às forças de resistência. Como consequência, todas as características hidráulicas, tais como o raio hidráulico e a velocidade média, entre outras, permanecem inalteradas ao longo do canal.

Das inúmeras equações disponíveis para descrever o escoamento em regime uniforme, citam-se as mais conhecidas em nosso meio que são a de Manning, de Chézy, de Darcy-Weissbach e a desenvolvida a partir da distribuição logarítmica de velocidade. Todas estas equações são válidas para o caso de escoamentos em regime turbulento rugoso, situação característica dos projetos de drenagem pluvial, podendo ser expressas de maneira unificada segundo a seguinte equação:

$$\frac{V}{V_*} = \frac{R_h^{1/6}}{n \cdot \sqrt{g}} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 5,75 \cdot \log \left(11 \cdot \frac{R_h}{K_s} \right) \dots \dots \dots (5.1)$$

onde:

- n = coeficiente de Manning;
- C = coeficiente de Chézy;
- f = fator de atrito de Darcy-Weissbach;
- K_s = rugosidade absoluta da parede;



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

$$V_s = \text{velocidade de atrito } [V_s = (gR_h j)^{0.5}];$$

R_h = raio hidráulico;

j = declividade da linha de energia (no caso igual ao leito);

g = aceleração da gravidade;

V = velocidade média na seção.

Qualquer membro desta equação representa um fator de resistência ao escoamento na forma adimensional.

6. CÁLCULO DE LINHA D'ÁGUA EM REGIME PERMANENTE GRADUALMENTE VARIADO

Nos escoamentos em canais, é comum que as profundidades não estejam numa situação de equilíbrio de forças (regime uniforme) e sim condicionadas a níveis impostos por estruturas hidráulicas ou qualquer tipo de singularidade. As possíveis curvas de remanso que podem ocorrer são, portanto, transições entre estes níveis e a situação de equilíbrio em regime uniforme. Este último poderá vir a ocorrer ou não, dependendo da extensão do canal e da diferença da profundidade vigente em relação à normal (em regime uniforme).

O princípio que permite a determinação da linha d'água é o da conservação da energia, podendo variar, de um método de cálculo para outro, apenas a forma da resolução numérica. Aqui, apresentam-se duas variantes de um método numérico consagrado que permite calcular passo a passo ou a distância em que ocorrerá um determinado nível, ou o nível da superfície livre para uma dada seção. Estas formas de cálculo são conhecidas como sendo respectivamente o "Direct Step Method" e o "Standard Step Method".

A equação que descreve a conservação da energia entre duas seções (ver Figura 6.1) é a seguinte:



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

$$z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2.g} = z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2.g} + \Delta H_{1-2} \dots\dots\dots(6.1)$$

onde:

- z = cota do leito na seção de cálculo;
- V = velocidade média na seção de cálculo;
- y = profundidade na seção de cálculo;
- g = aceleração da gravidade;
- ΔH_{1-2} = perda de carga entre duas seções de cálculo consecutivas.

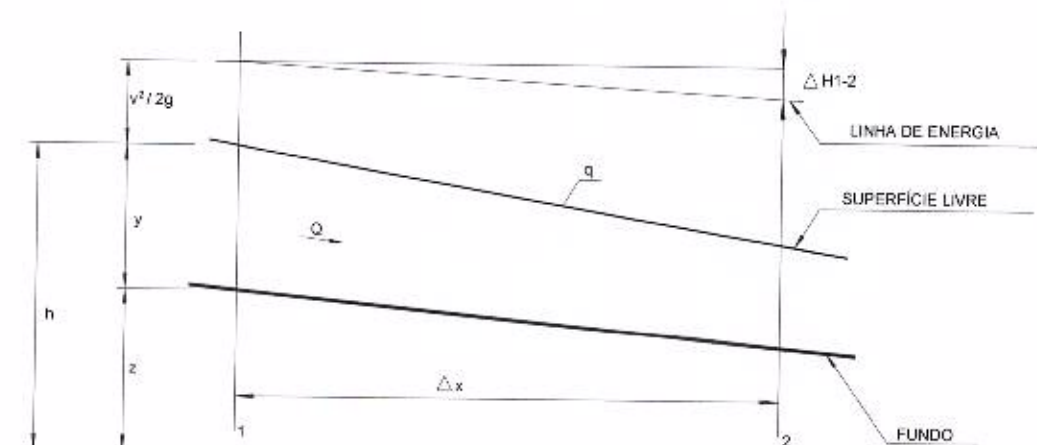


Figura 6.1
Esquema da variação da linha de energia para escoamentos com superfície livre



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

6.1 MÉTODO EM QUE A VARIÁVEL É A PROFUNDIDADE ("DIRECT STEP METHOD")

Quando se adota como variável a profundidade de escoamento, o posicionamento correspondente à seção que apresente uma dada profundidade é determinado diretamente a partir da equação da conservação de energia, reescrita na seguinte forma:

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{i - j} \dots\dots\dots(6.2)$$

onde:

$$E_i = y_i + \frac{V_i^2}{2g} \dots\dots\dots(6.3)$$

$$i = \frac{Z_2 - Z_1}{\Delta x} \dots\dots\dots(6.4)$$

$$j = \frac{j_2 + j_1}{2} \dots\dots\dots(6.5)$$

$$j_i = \left(\frac{V \cdot n}{R_h^{2/3}} \right)_i^2 \dots\dots\dots(6.6)$$

O cálculo é feito seção por seção, a partir de um ponto de partida onde se conheça a profundidade. A título de exemplo de aplicação do "Direct Step Method", considere-se o cálculo da linha d'água em um canal com 20 m de largura, com fator de atrito de Manning igual a 0,025, declividade de 0,0018 m/m escoando uma vazão de 150 m³/s. Na extremidade final do canal a profundidade é de 4,0 m, e o fundo situa-se na cota 700,00 m. Esta posição corresponde à posição 1.500 m, decrescendo para montante.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

A profundidade normal de escoamento para esta vazão é de 2,70 m em regime subcrítico (Froude = 0,54).

Apenas como simplificação de cálculo, foi feita uma regressão linear para definir uma função do raio hidráulico, tomando como variável independente a profundidade. Esta regressão resultou na seguinte expressão:

$$R_h = 0,813 \cdot y^{0,964} \dots\dots\dots(6.7)$$

O erro relativo desta função é da ordem de 5% na faixa dos valores de cálculo utilizados, o que é bastante razoável para as aplicações práticas.

As colunas indicadas na Tabela 6.1 mostram a seqüência de cálculo possível de ser realizada em canais prismáticos como o do corrente exemplo, com a aplicação das equações 6.2 a 6.6. As três últimas colunas mostram respectivamente os valores das distâncias acumuladas para cada nível de água considerado, a cota de fundo do canal e a cota do nível d'água.

Tabela 6.1
"Direct Step Method"

1 y (m)	2 A (m ²)	3 Rh (m)	4 E (m)	5 j _i (m/m)	6 j (m/m)	7 Δx (m)	8 x (m)	9 fundo (m)	10 n.a. (m)
4,0	80	3,09	4,18	0,000487	-	-	1500	700,00	704,00
3,9	78	3,02	4,09	0,000530	0,000509	-70	1430	700,13	704,03
3,8	76	2,94	4,00	0,000577	0,000553	-72	1358	700,26	704,06
3,7	74	2,87	3,91	0,000630	0,000603	-74	1283	700,39	704,09
3,6	72	2,79	3,82	0,000689	0,000659	-77	1206	700,53	704,13



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

1 y (m)	2 A (m ²)	3 Rh (m)	4 E (m)	5 j _i (m/m)	6 j (m/m)	7 Δx (m)	8 x (m)	9 fundo (m)	10 n.a. (m)
3,5	70	2,72	3,73	0,000756	0,000722	-81	1125	700,68	704,18
3,4	68	2,65	3,65	0,000831	0,000794	-85	1039	700,83	704,23
3,3	66	2,57	3,56	0,000917	0,000874	-92	948	700,99	704,29
3,2	64	2,49	3,48	0,001015	0,000966	-100	848	701,17	704,37
3,1	62	2,42	3,40	0,001126	0,001070	-112	736	701,37	704,47
3,0	60	2,34	3,32	0,001254	0,001190	-131	605	701,61	704,61
2,9	58	2,27	3,24	0,001402	0,001328	-165	441	701,91	704,81
2,8	56	2,19	3,17	0,001573	0,001488	-241	200	702,34	705,14
2,7	54	2,12	3,09	0,001773	0,001673	-571	-370	703,37	706,07

6.2 MÉTODO EM QUE A VARIÁVEL É A POSIÇÃO DA SEÇÃO ("STANDARD STEP METHOD")

Este método utiliza as mesmas equações anteriores, somente que, como a incógnita agora é o nível da linha d'água na seção de cálculo, e este valor está implícito nos valores da energia específica e da declividade da linha de energia, o processo de cálculo passa a ser iterativo. Este processo é exemplificado de forma sumarizada de acordo com os seguintes passos e Tabela 6.2:

Passo 1

Determinam-se inicialmente as equações (ou funções gráficas) das curvas das variações da energia específica e declividade da linha de energia para cada seção típica de cálculo:

$$E_i = \text{função}(y) \text{ ou } y = \text{função}(E) \text{ e } j_i = \text{função}(y)$$

Este procedimento pode ser feito, na maior parte dos casos, com uma simples regressão linear.



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

Passo 2

Nas duas primeiras colunas, colocam-se o posicionamento absoluto e relativo de cada seção de cálculo.

Passo 3

Na primeira seção de cálculo, conhecida a profundidade de escoamento, calcula-se a energia específica e a declividade da linha de energia (colunas 3 a 10 e equações).

Passo 4

Para a seção de partida, a energia específica (coluna 12) é igual à energia específica na seção.

Passo 5

Para a seção seguinte são calculados os parâmetros característicos de escoamento a partir de uma altura estimada (igual ao Passo 3).

Passo 6

É calculado o valor da declividade média da linha de energia entre as duas seções (coluna 11):

$$j_m = \frac{j_1 + j_2}{2} \dots\dots\dots (6.8)$$

Passo 7

É calculado o valor de energia específica (coluna 12) que atende às condições de remanso entre as seções:

$$E_2 = E_1 + \Delta x \cdot j_m \dots\dots\dots (6.9)$$



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

Passo 8

Comparados os valores das colunas 9 e 12, se estes estiverem com diferença superior aos limites de precisão estabelecido, retorna-se ao passo 5, corrigindo o valor de altura de água. Caso contrário, passa-se ao cálculo de nova seção (passo 5).

Existem muitas outras possibilidades de esquemas de cálculo, além dos exemplificados, encontrados em diversos programas, comercializados ou de domínio público, que permitem o cálculo da linha d'água em seções predeterminadas, além de outras possibilidades como o cálculo de seções naturais com rugosidade variável, presença de singularidades, dentre outras inúmeras facilidades que poderiam ser enumeradas.

Tais programas, caso utilizados, deverão ser especificamente aprovados pela Fiscalização; apenas como exemplificação, pode-se ver uma forma extremamente simples de cálculo na Tabela 6.2, utilizando-se o mesmo exemplo visto anteriormente. Esta tabela foi preparada para ser executada em planilha de cálculo, utilizando basicamente as mesmas equações vistas no método anterior, diferenciado somente pelo fato de que, neste caso, as profundidades em cada seção preestabelecida são determinadas por um processo de tentativas. Em outras palavras, parte-se de uma profundidade conhecida na primeira seção de cálculo e as demais são determinadas sucessivamente por tentativas (quarta coluna) até que o resultado da distância calculada (penúltima coluna) coincida com a conhecida (segunda coluna).



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

Tabela 6.2

Standard Step Method

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
SEÇÃO	x	fundo	y	A	R _h	V	V ² /2g	E	j	j _m	E
	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m/s)	(m)	(m/m)	(m/m)	(m)
S0	1.500	700.000	4.00	80.0	3.09	1.88	0.18	704.179	0.0487%		704.179
S1	1.400	700.180	3.86	77.2	2.99	1.94	0.19	704.232	0.0548%	0.0518%	704.051
S2	1.300	700.360	3.72	74.4	2.88	2.02	0.21	704.287	0.0619%	0.0583%	703.929
S3	1.200	700.540	3.59	71.8	2.79	2.09	0.22	704.352	0.0695%	0.0657%	703.815
S4	1.100	700.720	3.47	69.4		2.16	0.24	704.428	0.0778%	0.0736%	703.709
S5	1.000	700.900	3.36	67.2	2.62	2.23	0.25	704.514	0.0864%	0.0821%	703.611
S6	900	701.080	3.25	65.0	2.53	2.31	0.27	704.601	0.0964%	0.0914%	703.522
S7	800	701.260	3.16	63.2	2.46	2.37	0.29	704.707	0.1057%	0.1011%	703.443
S8	700	701.440	3.07	61.4	2.40	2.44	0.30	704.814	0.1163%	0.1110%	703.374
S9	600	701.620	3.00	60.0	2.34	2.50	0.32	704.939	0.1254%	0.1208%	703.315
S10	500	701.800	2.93	58.6	2.29	2.56	0.33	705.064	0.1355%	0.1305%	703.266
S11	400	701.980	2.88	57.6	2.25	2.60	0.35	705.206	0.1434%	0.1395%	703.225
S12	300	702.160	2.84	56.8	2.22	2.64	0.36	705.355	0.1502%	0.1468%	703.192
S13	200	702.340	2.80	56.0	2.19	2.68	0.37	705.506	0.1573%	0.1538%	703.166

6.3 CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES

Para efetuar os cálculos de linha d'água por qualquer um dos métodos expostos, não é uma condição necessária, mas é muito conveniente, fazer uma análise do tipo de curva de remanso que se deve esperar e poder verificar se o andamento dos cálculos vai na direção esperada. Também nesta análise pode-se ter certeza se o ponto de partida de cálculo está correto.

No caso do escoamento ser fluvial, os níveis são determinados por uma condição de jusante, e no caso do escoamento torrencial, são determinados por uma condição de montante. Por esta razão, estas metodologias apresentam um certo grau de dificuldade no cálculo de linha d'água em canalizações de drenagem urbana, uma vez que são comuns



PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

SECRETARIA DE VIAS PÚBLICAS

EMITENTE

SUPERINTENDÊNCIAS DE PROJETOS E DE OBRAS

REFERÊNCIA	ASSUNTO: DIRETRIZES DE PROJETO DE HIDRÁULICA E DRENAGEM	DATA
DP-H14	Diretrizes de Projeto para Hidráulica em Drenagem Urbana	30/06/99

mudanças de regime locais. A ocorrência destas mudanças de regime e as suas resoluções devem ser analisadas e resolvidas com base na experiência do projetista.

Outro fator, a ser considerado, é o das perdas de carga por singularidades existentes no canal, as quais deverão ser computadas conforme indicado na DP-H8 – Perda de Carga em Singularidades de Canais e Galerias, e adicionadas ao processo de cálculo de remanso, com ambos os processos descritos.

7. MODELOS

Para o estudo do escoamento não permanente, deve-se recorrer à modelagem matemática (modelo hidrodinâmico), cujos cálculos podem ser realizados de maneira analítica ou processados com os recursos de informática disponíveis.

A modelagem física por modelos reduzidos deve ser adotada para os casos mais complexos, a critério da Projetista e / ou da Fiscalização da SVP/PMSP.