

Universidade Regional do Cariri – URCA

Pró – Reitoria de Ensino de Graduação
Coordenação da Construção Civil
Disciplina: Estradas II

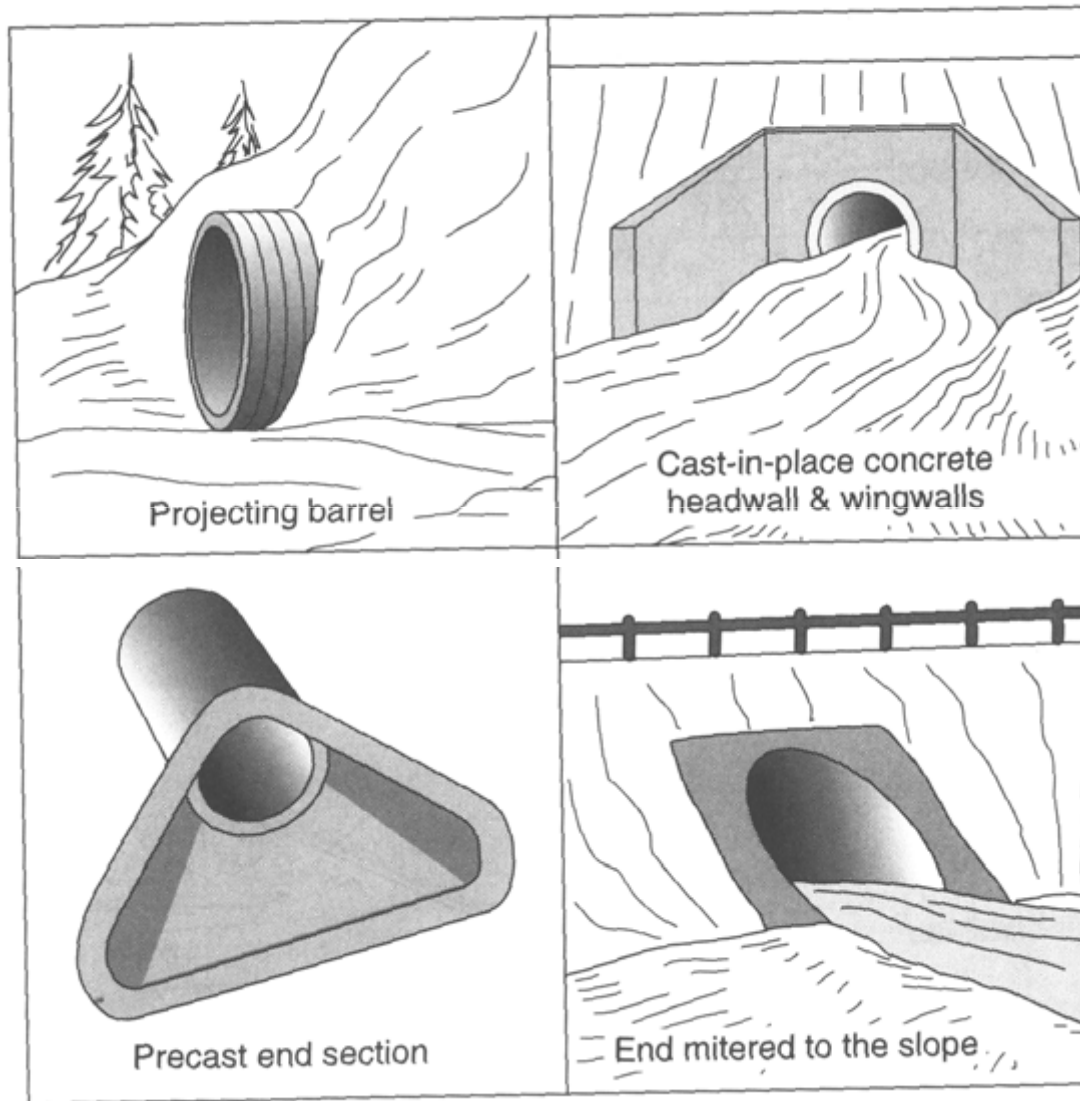


Estruturas hidráulicas

Dimensionamento Hidráulico de Bueiros

Renato de Oliveira Fernandes

*Professor Assistente
Dep. de Construção Civil/URCA
renatodeof@gmail.com*



Classificação

- Número de linhas
 - Simples, duplo e triplo
- Forma da seção
 - Circular e celular
- Material
 - Concreto e celular



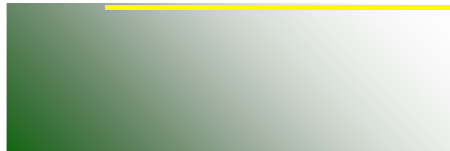
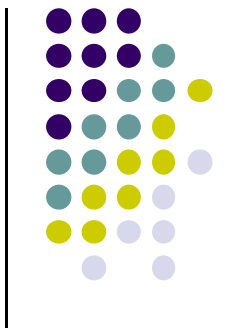
Galerias de águas pluviais - circular



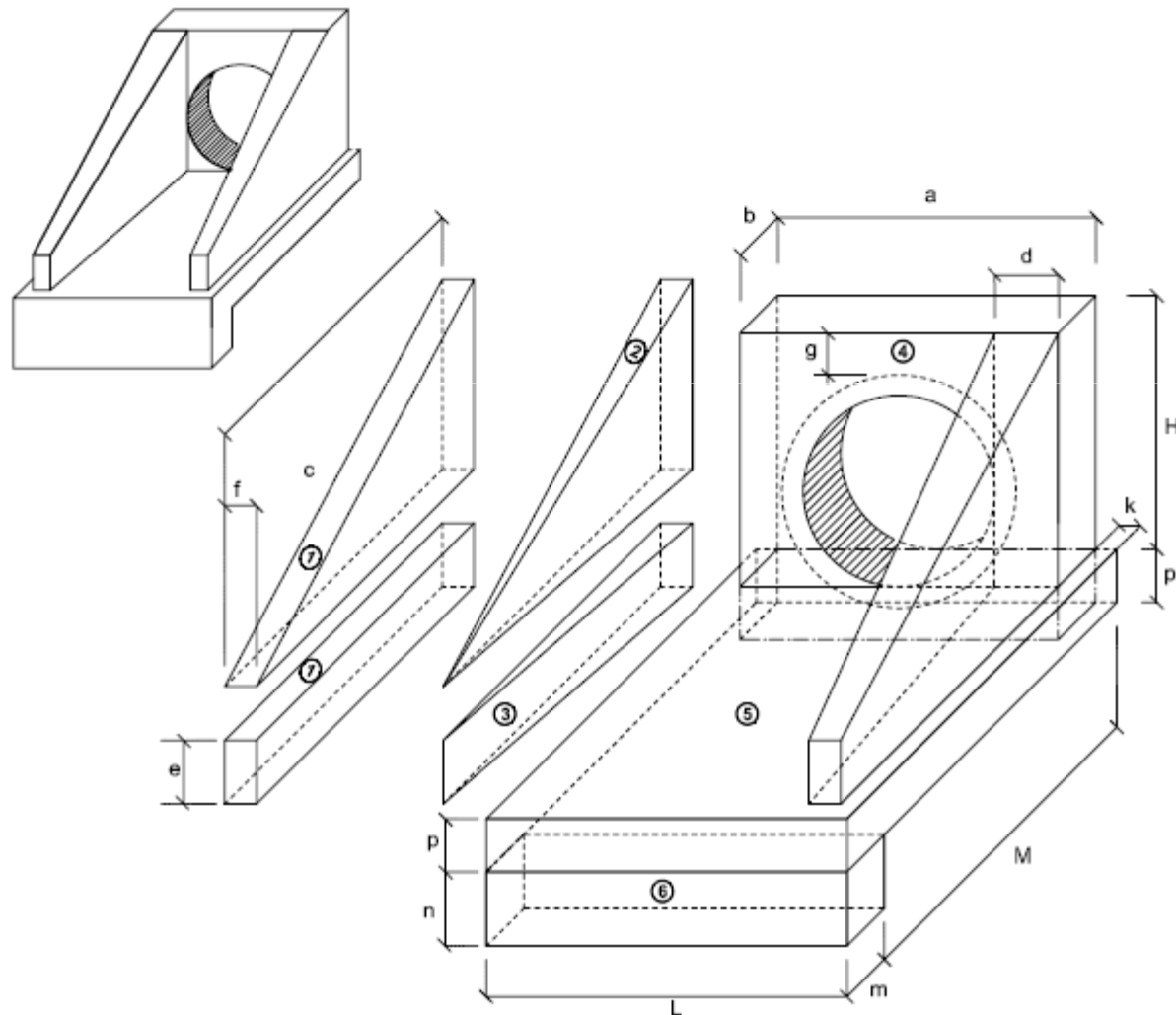
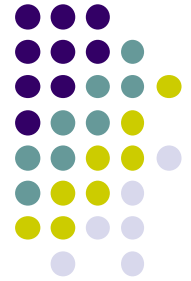


Bueiro celular de concreto

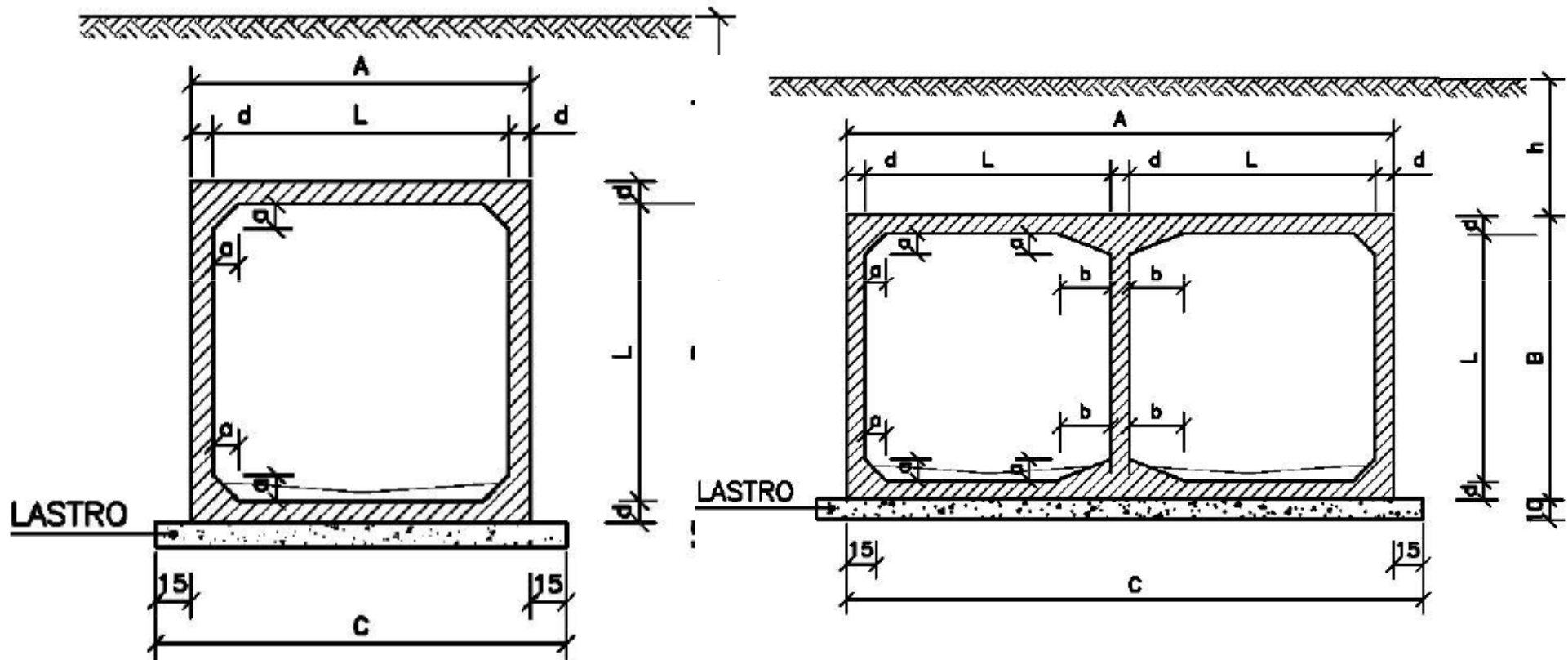




Bueiro simples tubular



Bueiro celular simples e duplo





- Bueiros (variáveis usadas no dimensionamento)
 - Material das paredes do conduto
 - Característica geométricas
 - Comprimento e declividade
 - Condições de entrada a montante e saída a jusante (afogado e não afogado, altura do aterro)





- Para o dimensionamento hidráulico dos bueiros podem se admitir que eles possam funcionar como **canais**, **vertedoures** ou como **orifícios**.
 - **Orifício**: quando a vazão afluyente supera a capacidade do bueiro ocorrendo a elevação do nível somente montante
 - **Canal**: quando as extremidades de montante e jusante não se encontram submersas.
 - **Vertedoures**: dimensionar pela fórmula de Francis, considerando a altura d'água sobre a borda superior nula





- O funcionamento como orifício ou canal (os mais comuns) depende da possibilidade da obra poder funcionar com carga hidráulica a montante.
 - **Com carga hidráulica a montante:** funciona como orifício. É necessário verificar a altura máxima da carga hidráulica em relação ao aterro.
 - **Sem carga hidráulica a montante:** funciona como canal. Verificar a declividade crítica para definir o regime de escoamento.



Bueiro funcionando como orifício



- Bueiro funciona como orifício quando (DNIT):
 - $h \geq 1,2D$ ou $h \geq 1,2H$
 - D é o diâmetro do bueiro tubular
 - H é a altura do bueiro celular

$$Q_{adm} = c \cdot S \cdot (2 \cdot g \cdot h)^{0,5}$$

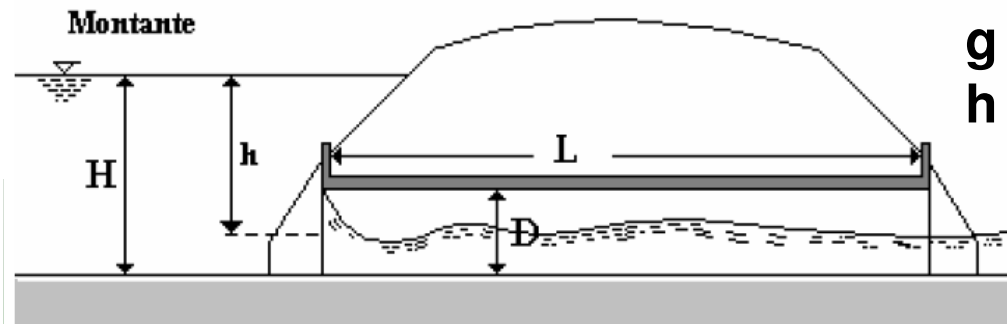
Em que:

C – coeficiente de descarga (0,63)

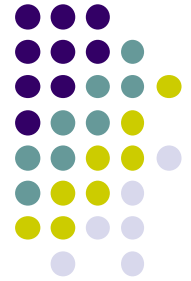
S – área da seção do bueiro (m²)

g – aceleração da gravidade (m²/s)

h – carga hidráulica (m)



Bueiro funcionando como orifício



Vazão:

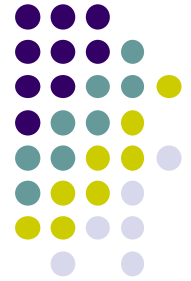
$$\text{bueiro simples: } Q_1 = \frac{c\sqrt{2g}}{4} \times D^2 \times 3,14159 \sqrt{h}$$

$$\text{Velocidade: } Q_1 = 2,192 \times D^2 \sqrt{h}$$

$$V = c\sqrt{2g \times h} \quad \text{e} \quad V = 2,79 \sqrt{h}$$

h = carga hidráulica





Terminologia

- BSTC - bueiro simples tubular de concreto;
- BDTC - bueiro duplo tubular de concreto;
- BTTC - bueiro triplo tubular de concreto;
- BSCC - bueiro simples celular de concreto;
- BDCC - bueiro duplo celular de concreto;
- BTCC - bueiro triplo celular de concreto;
- BSTM - bueiro simples tubular metálico;
- BDTM - bueiro duplo tubular metálico;
- BTM - bueiro triplo tubular metálico.





Vazão, velocidade e carga hidráulica de bueiros tubulares trabalhando como orifício com $c = 0,63$ (bueiro simples)

TIPO	DIÂMETRO (m)	h = 1,2 D		h = 1,5 D		h = 2D	
		Q (m ³ /s)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	V (m/s)
BSTC OU BSTM	0,60	0,67	2,37	0,75	2,65	0,86	3,06
	0,80	1,37	2,73	1,54	3,06	1,77	3,53
	1,00	2,40	3,06	2,68	3,42	3,10	3,95
	1,10	3,05	3,21	3,41	3,58	3,93	4,14
	1,20	3,79	3,35	4,23	3,74	4,89	4,32
	1,30	4,63	3,48	5,17	3,90	5,97	4,50
	1,40	5,57	3,62	6,23	4,04	7,19	4,67
	1,50	6,62	3,74	7,40	4,19	8,54	4,83
	1,60	7,78	3,87	8,69	4,32	10,04	4,99
	1,70	9,05	3,98	10,12	4,46	11,68	5,14
	1,80	10,44	4,10	11,67	4,58	13,48	5,29
	1,90	11,95	4,21	13,36	4,71	15,43	5,44
	2,00	13,58	4,32	15,19	4,83	17,54	5,58

h – carga hidráulica (m); D - diâmetros

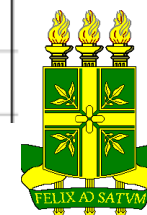


Vazão, velocidade e carga hidráulica de bueiros tubulares trabalhando como orifício com $c = 0,63$ (bueiro duplo)



TIPO	DIÂMETRO O	h = 1,2 D		h = 1,5 D		h = 2D	
		Q (m ³ /s)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	V (m/s)
BDTC OU BDTM	0,80	2,75	2,73	2,92	3,06	3,37	3,53
	1,00	4,80	3,06	5,37	3,42	6,20	3,95
	1,10	6,09	3,21	6,81	3,58	7,87	4,14
	1,20	7,58	3,85	8,47	3,74	9,78	4,32
	1,30	9,25	3,48	10,35	3,90	11,95	4,50
	1,40	11,14	3,62	12,45	4,04	14,38	4,67
	1,50	13,23	3,74	14,80	4,18	17,08	4,83
	1,60	15,55	3,87	17,39	4,32	20,08	4,99
	1,70	18,10	3,98	20,23	4,46	23,36	5,14
	1,80	20,88	4,10	23,34	4,58	26,95	5,25
	1,90	23,90	4,21	26,72	4,71	30,85	5,44
	2,00	27,17	4,32	30,37	4,83	35,07	5,58

h – carga hidráulica (m); D - diâmetros



Vazão e velocidade dos bueiros celulares trabalhando como orifício para cargas hidráulicas em relação à altura do bueiro



TIPO	B	H	h = 1,2 H		h = 1,5 H		h = 2,0 H	
			Q	V	Q	V	Q	V
BSCC	1,00	1,00	3,06	3,06	3,42	3,42	3,95	3,95
	1,50	1,50	8,43	3,74	9,42	4,19	10,88	4,83
	2,00	1,50	11,23	3,74	12,56	4,19	14,50	4,83
	2,00	2,00	17,30	4,32	19,34	4,83	22,33	5,58
	2,00	2,50	24,17	4,83	27,02	5,40	31,20	6,24
	2,00	3,00	31,77	5,30	35,52	5,92	41,02	6,84
	2,50	2,50	30,21	4,83	33,78	5,40	39,01	6,24
	3,00	1,50	16,85	3,74	18,84	4,19	21,75	4,83
	3,00	2,00	25,94	4,32	29,00	4,83	33,49	5,58
	3,00	2,50	36,26	4,83	40,54	5,40	46,81	6,24
BDCC	3,00	3,00	47,66	5,30	53,29	5,92	61,53	6,84
	2,00	2,00	34,59	4,32	38,67	4,83	44,66	5,58
	2,00	2,50	48,34	4,83	54,05	5,40	62,41	6,24
	2,00	3,00	63,55	5,30	71,05	5,92	82,04	6,84
	2,50	2,50	60,43	4,83	67,56	5,40	78,01	6,24
	3,00	2,00	51,89	4,32	58,01	4,83	66,98	5,58
	3,00	2,50	72,51	4,83	81,07	5,40	93,61	6,24
	3,00	3,00	95,32	5,30	106,57	5,92	123,06	6,84



Dimensionamento como canal

Equação de Manning



$$V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} \sqrt{i}$$

6

onde:

V = velocidade média (em m/s)

n = coeficiente de rugosidade de Manning

i = declividade média (em m/m)

R_H = raio hidráulico (em m)

$$R_H = \frac{A_m}{P_m}$$

com:

R_H = raio hidráulico (em m)

A_m = área molhada (em m²)

P_m = perímetro molhado (em m)



Elementos hidráulicos de um canal



Geometria da Seção	Área Molhada (A_m)	Perímetro Molhado (P_m)	Raio Hidráulico (R_H)	Largura Superficial (B)
	$(b+mh)h$	$b + 2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{(b+mh)h}{b + 2h\sqrt{1+m^2}}$	$b+2mh$
	$b \cdot h$	$b+2h$	$\frac{b \cdot h}{b+2h}$	b
Seção Plena	$\frac{\pi \cdot D^2}{4}$	$\pi \cdot D$	$\frac{D}{4}$	----
Meia Seção	$\frac{\pi \cdot D^2}{8}$	$\frac{\pi \cdot D}{2}$	$\frac{D}{4}$	----
Vazão Máxima	$0,7662 \cdot D^2$	$2,6467 \cdot D$	$0,2895 \cdot D$	----

Dimensionamento como canal

Equação de Manning



$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

7

(m/m)

onde:

Δh – diferença de cotas jusante e montante

L – comprimento do trecho do canal

• Equação da Continuidade

$$Q = V A_m$$

8

onde:

V = velocidade média (em m/s)

A_m = área molhada (em m²)

Q = vazão (em m³/s)



Dimensionamento hidráulico da vazão de um canal



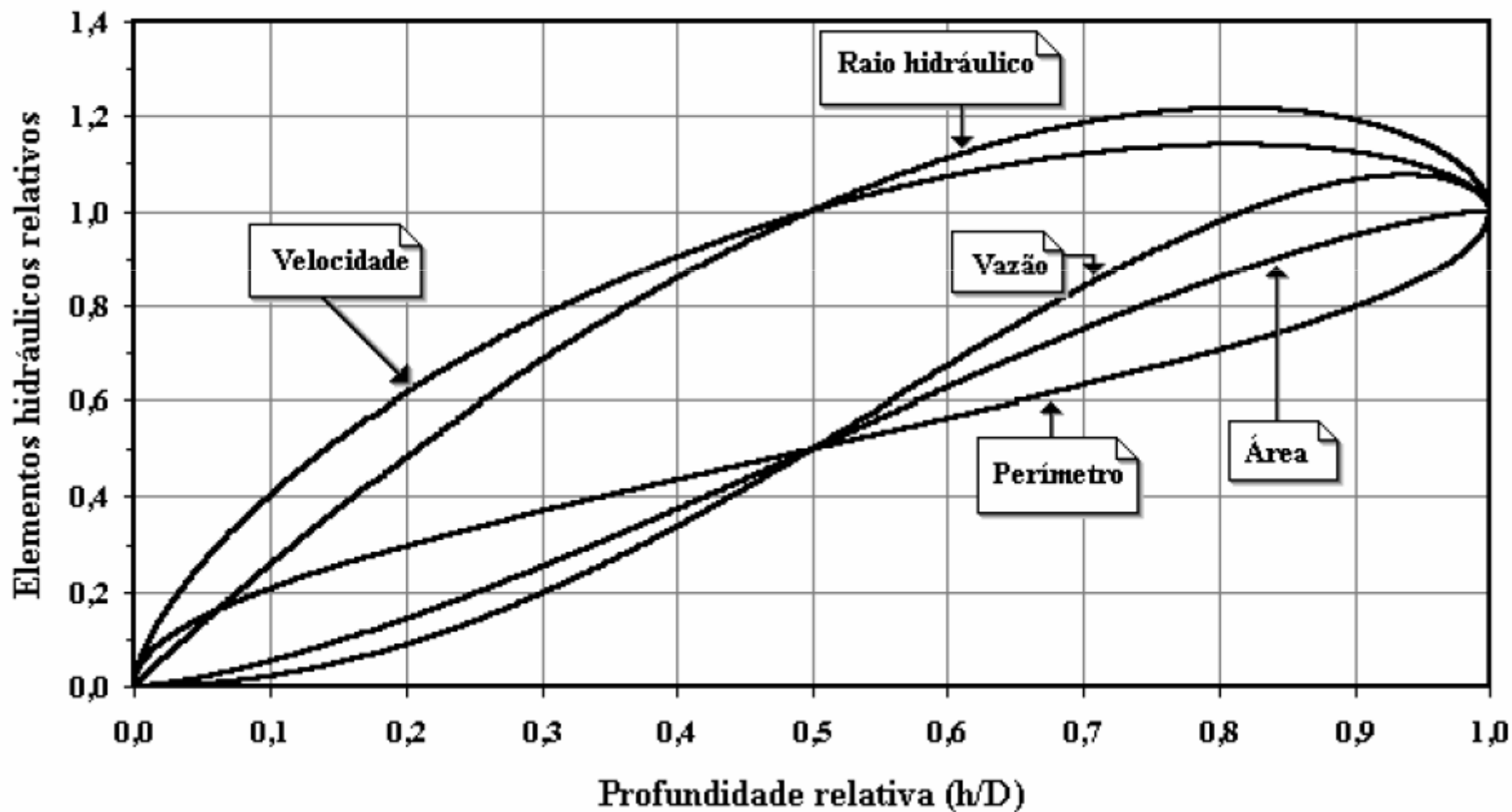
- Das equações 6 e 8, resulta:

$$Q = \frac{1}{n} R_H^{2/3} \sqrt{i} A_m$$

9

Essa é a vazão máxima que o canal transporta nas condições de declividade, rugosidade e diâmetro ou largura. Essa vazão deve ser maior ou igual a vazão gerada na bacia hidráulica de contribuição. Caso contrário surgirá uma lâmina de água a montante e o bueiro funcionará como canal.

Variação dos parâmetros hidráulicos de um canal com seção circular



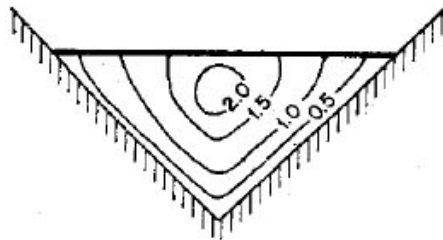


Velocidades admissíveis

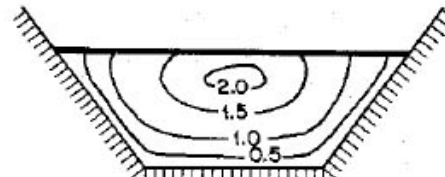
COBERTURA SUPERFICIAL	Velocidade máxima m/s
Gramma comum firmemente implantada	1,50 – 1,80
Tufos de grama com solo exposto	0,60 – 1,20
Argila	0,80 – 1,30
Argila coloidal	1,30 – 1,80
Lodo	0,35 – 0,85
Areia fina	0,30 – 0,40
Areia média	0,35 – 0,45
Cascalho fino	0,50 – 0,80
Silte	0,70 – 1,20
Alvenaria de tijolos	2,50
Concreto de cimento portland	4,50
Aglomerados consistentes	2,00
Revestimento betuminoso	3,00 – 4,00



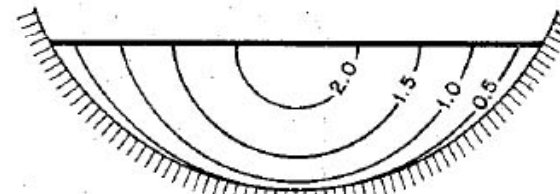
Distribuição de velocidades



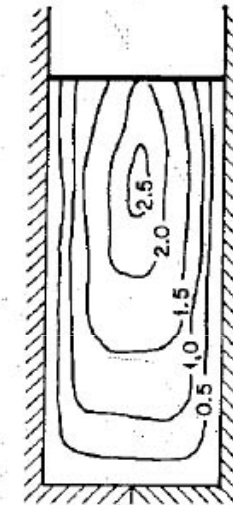
Canal triangular



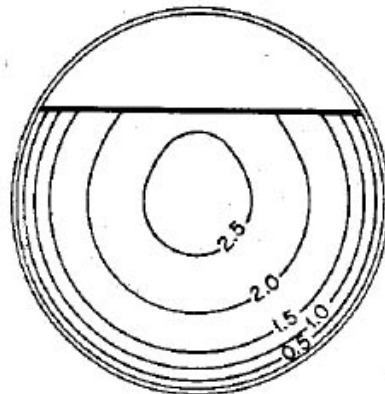
Canal trapezoidal



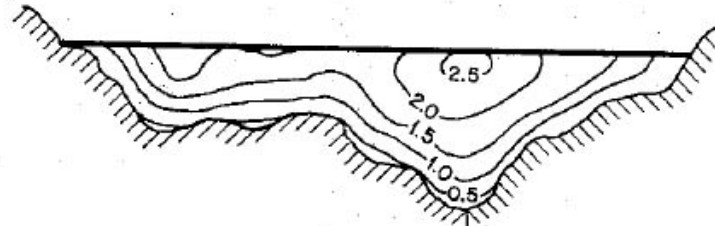
Cuneta poco profunda



Sección rectangular
angosta



Tubería



Canal natural irregular



Coeficiente de rugosidade da equação de Manning (n)



Cimento		
Superfície acabada	0,010	0,013
Argamassa	0,011	0,013
Canais abertos revestidos		
Concreto, com superfície de:		
Acabamento a colher	0,011	0,012
Acabamento a desempenadeira	0,013	0,015
Acabamento com cascalhos no fundo	0,015	0,017
Sem acabamento	0,014	0,017
Sobre escavação em rocha boa	0,017	0,020
Sobre escavação em rocha irregular	0,022	0,027

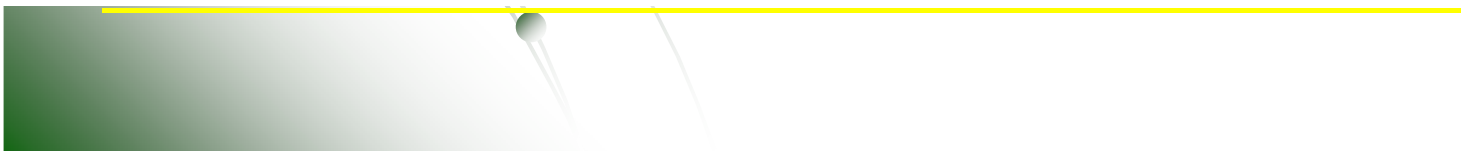
- Outros valores consultar: *Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT, 2006. p.127.*



Regimes de escoamento em canais



- **Regime crítico:** ocorre o mínimo de energia;
- **Regime supercrítico (rápido):** definido por ter uma declividade superior à do regime crítico;
- **Regime subcrítico (lento):** definido por uma declividade inferior à do regime crítico.



Energia específica



$$E = Y_n + \frac{V^2}{2g}$$

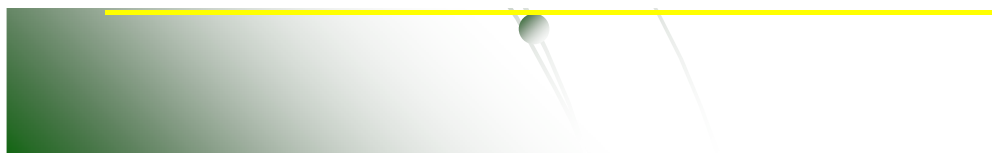
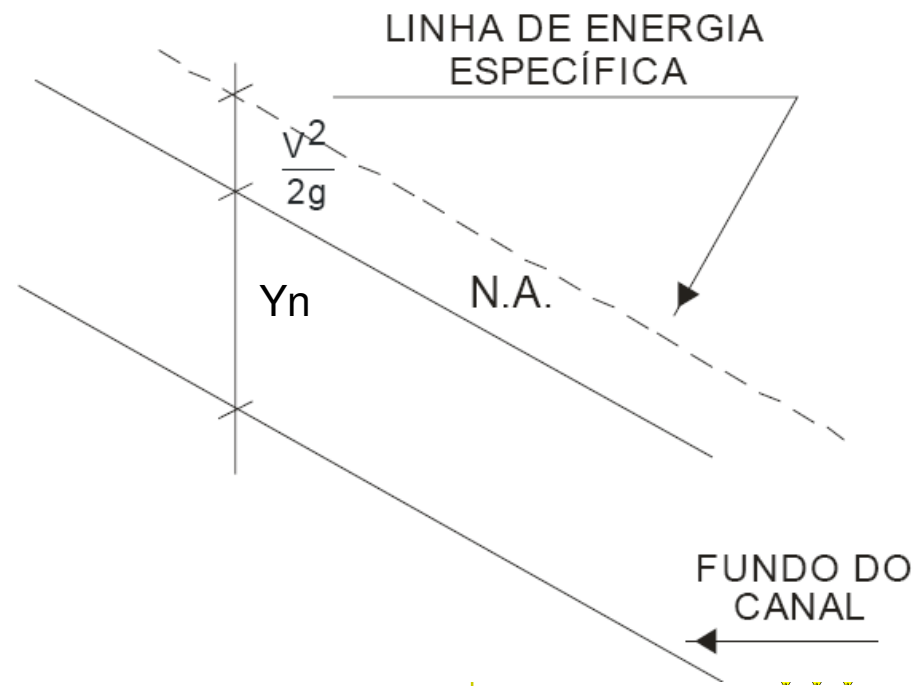
em que:

E = energia específica, m;

Y_n = profundidade normal, m;

V = velocidade da água, m/s; e

g = aceleração da gravidade, m/s².



Variação da energia específica em um canal



$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \frac{A}{B}}}$$

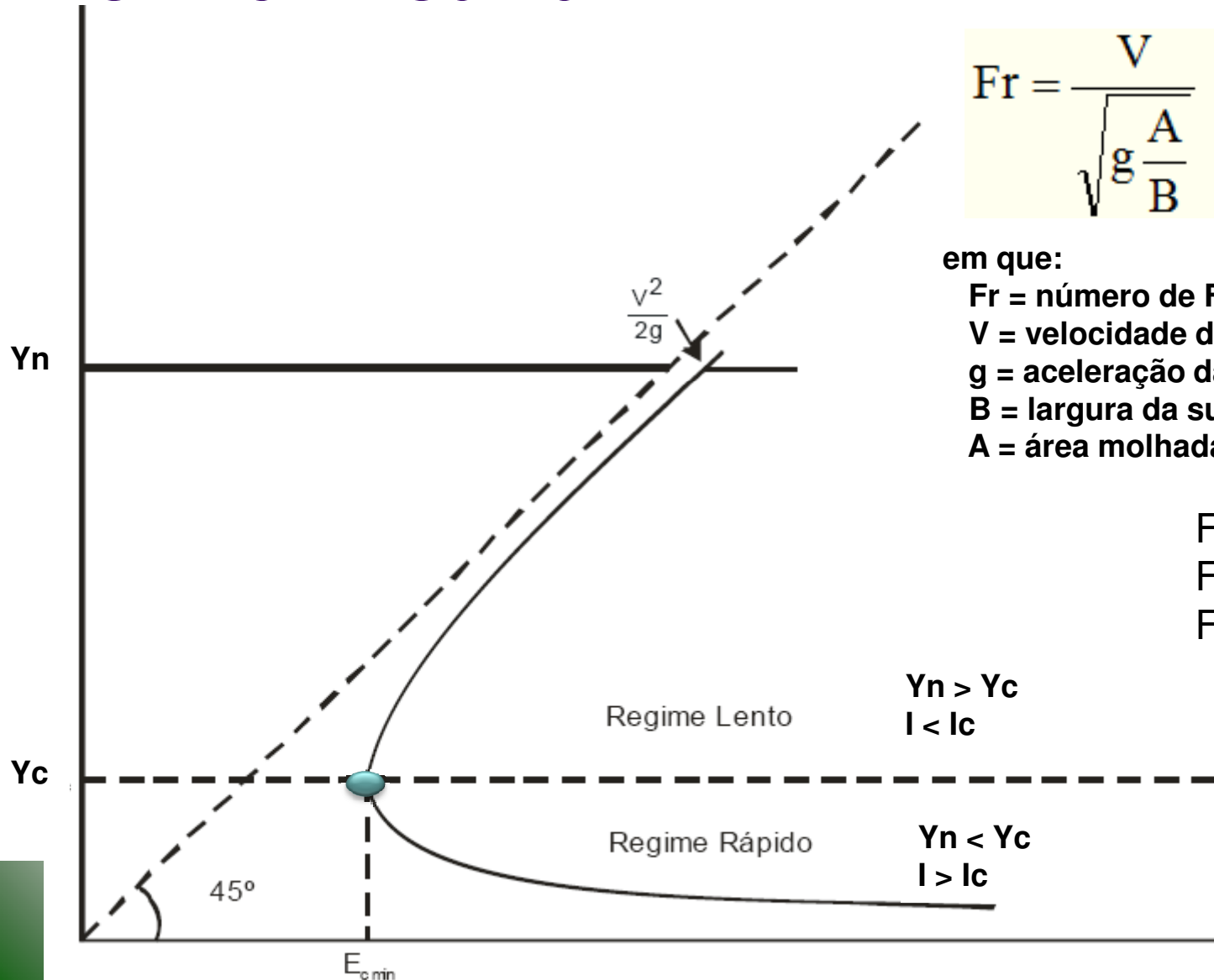
em que:

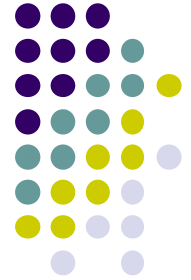
Fr = número de Froude, adimensional;
V = velocidade da água no canal, m/s;
g = aceleração da gravidade, m/s²;
B = largura da superfície do canal, m;
A = área molhada, m².

Fr = 1 (crítico)

Fr < 1 (subcrítico)

Fr > 1 (supercrítico)

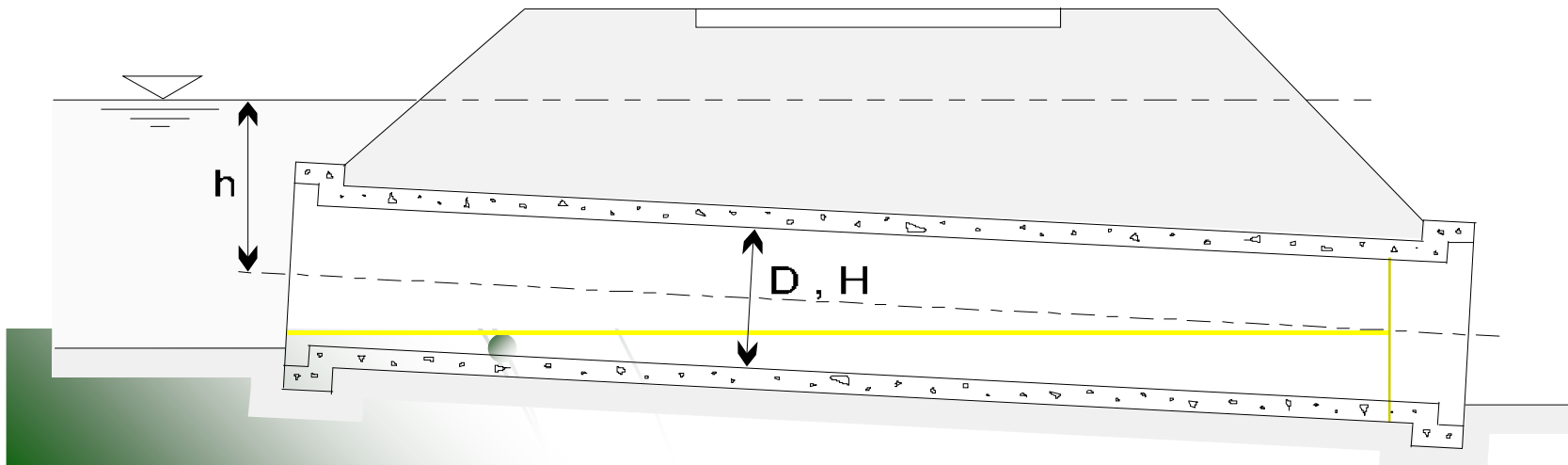




Declividade crítica

- **Tubulares :**
$$I_c = 32,82 \frac{n^2}{\sqrt[3]{D}}$$

- **Celulares :**
$$I_c = \frac{2,6.n^2}{\sqrt[3]{H}} \left(3 + \frac{4.H}{B} \right)^{4/3}$$





Escoamento crítico

- Para que aconteça o escoamento crítico no movimento uniforme é necessário que a superfície da lâmina d'água seja paralela ao fundo do canal e tenha altura igual a altura crítica (Y_c) correspondente à vazão em escoamento.
- No escoamento crítico a vazão é máxima e a energia específica é a mínima.

- Canais retangulares:

$$Y_c = \left(\frac{Q^2}{b^2 g} \right)^{1/3}$$

- Canais triangulares:

$$Y_c = \left(\frac{2Q^2}{z^2 g} \right)^{1/5}$$

- Canais circulares:

$$Y_c = \left[1 - \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \frac{D}{2}$$

$$\theta = 2 \arccos\left(1 - \frac{2Y_n}{D}\right)$$

Dimensionamento de bueiro tubulares no regime crítico



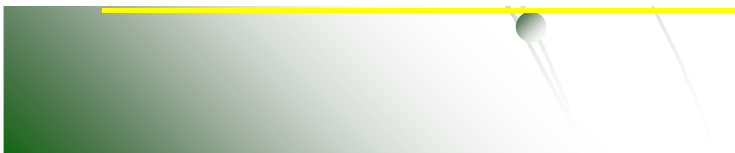
$$E = Y_n + \frac{V^2}{2g}$$

- Fazendo, $E = D$ (garante que funcionará como canal), então:

$$Q_c = 1,533 D^{2,5}, \text{ em m}^3/\text{s}$$

$$V_c = 2,56 \sqrt{D}, \text{ em m/s}$$

$$I_c = 32,82 \frac{n^2}{\sqrt[3]{D}}, \text{ em m/m}$$



Bueiro tubular de concreto (regime crítico)



Bueiros tubulares de concreto

Vazão crítica:

$$\text{bueiro simples: } Q_1 = 1,533D^{2,5}$$

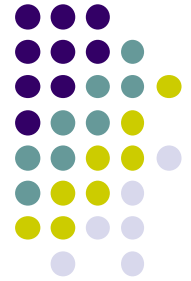
$$\text{bueiro duplo : } Q_2 = 2 \times 1,533D^{2,5}$$

$$\text{bueiro triplo : } Q_3 = 3 \times 1,533D^{2,5}$$

$$\text{Velocidade crítica: } V = 2,56\sqrt{D}$$

$$\text{Declividade crítica: } I_c = \frac{0,739}{\sqrt[3]{D}} \text{ (%) para } n = 0,015$$





Bueiro celular de concreto

Vazão crítica:

bueiro simples: $Q_1 = 1,705B \times H^{1,5}$

bueiro duplo: $Q_2 = 2 \times 1,705B \times H^{1,5}$

bueiro triplo: $Q_3 = 3 \times 1,705B \times H^{1,5}$

Velocidade crítica: $V_c = 2,56 \times V^{0,5}$

Declividade crítica:

$$I_c = \frac{0,0585}{\sqrt[3]{H}} \left(3 + \frac{4H}{B} \right)^{4/3}, \text{ em \%}, \text{ para } n = 0,015$$



Vazão, velocidade e declividade crítica de bueiros tubulares de concreto trabalhando como canal (E = D)

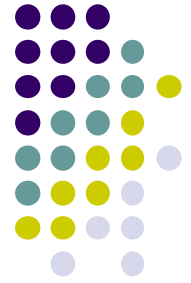


TIPO	DIÂMETRO (m)	ÁREA MOLHADA CRÍTICA (m ²)	VAZÃO CRÍTICA (m ³ /s)	VELOCIDADE CRÍTICA (m/s)	DECLIVIDADE CRÍTICA (%)
BSTC	0,60	0,22	0,43	1,98	0,88
BSTC	0,80	0,39	0,88	2,29	0,80
BSTC	1,00	0,60	1,53	2,56	0,74
BSTC	1,20	0,87	2,42	2,80	0,70
BSTC	1,50	1,35	4,22	3,14	0,65
BDTC	1,00	1,20	3,07	2,56	0,74
BDTC	1,20	1,73	4,84	2,80	0,70
BDTC	1,50	2,71	8,45	3,14	0,65
BTTC	1,00	1,81	4,60	2,56	0,74
BTTC	1,20	2,60	7,26	2,80	0,70
BTTC	1,50	4,06	12,67	3,14	0,65

Fonte: DNIT, 2006



Verificação da vazão admissível (bueiro simples)



- Se, $l < l_c$

Regime Subcrítico

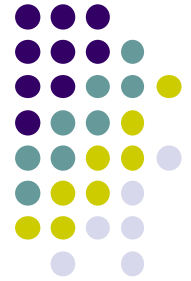
Verificar se $Q_{adm} > Q_{afuente}$

- Tubular :
$$Q_{adm} = \frac{0,305}{n} D^{8/3} I^{1/2}$$

- Celular :
$$Q_{adm} = \left[\frac{(0,8BH)^5}{(B + 1,6H)^2} \right]^{1/3} \frac{I^{1/2}}{n}$$



Verificação da vazão admissível (bueiro simples)

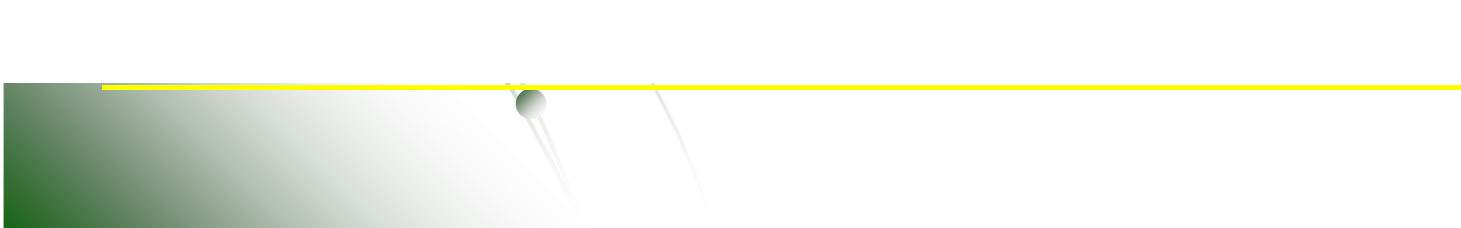


- Se, $l > l_c$

Regime supercrítico

Verificar se $Q_{adm} > Q_{afuente}$

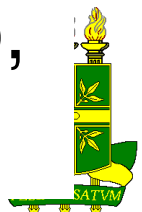
- tubular : $Q_{adm} = Q_c = 1,533 D^{5/2}$
- celular : $Q_{adm} = Q_c = 1,705 BH^{3/2}$



Seqüência de cálculo (DNIT, 2006)



- O valor de Q é conhecido porque é a descarga da bacia a ser drenada , calculada nos estudos hidrológicos do projeto
- O valor de L é conhecido pelo levantamento topográfico do local onde o bueiro deverá ser implantado;
- O valor n (coeficiente de Manning) é conhecido pois depende da natureza do material de que será feito o bueiro (concreto, chapa metálica, corrugada etc).



Seqüência de cálculo (DNIT, 2006)



- Verificar o regime de escoamento de acordo com a declividade especificada e a velocidade crítica
- Verificar a vazão admissível de acordo com o regime de escoamento.
- Caso a vazão afluyente seja inferior a vazão admissível adotar a lâmina máxima de água no bueiro, caso contrário verificar as condições de funcionamento como orifício.



Seqüência de cálculo (DNIT, 2006) – cálculo como canal



- Admite-se inicialmente um valor para a relação d/D , variando de 0,20 a 0,80, optando-se em geral pelo valor máximo;
- Com o valor adotado para a relação d/D , entra-se na tabela dos parcialmente cheios, para obtenção do coeficiente K_Q
 - $D = [Q \cdot n / (K_Q \cdot I^{0,5})]^{3/8}$
- Com K_Q determina-se o valor do diâmetro teórico e se este mostrar-se inadequado pelas restrições do local de assentamento ou por não existir comercialmente tubo com diâmetro de tal porte, deverá ser considerado bueiro de seção múltipla, dividindo-se a descarga de projeto pelo número de linhas de tubo a adotar. Ao final será fixado para a linha de tubos simples ou múltipla o diâmetro mais próximo comercialmente disponível;



Seqüência de cálculo (DNIT, 2006) – cálculo como canal



- com o diâmetro comercial calcula-se o novo valor de K_Q obtendo-se na tabela a relação d/D , e o valor de K_v , que fornecerá o valor de V , comparando a velocidade de escoamento com os valores mínimo e máximo aceitáveis, função da sedimentação das partículas em suspensão e da erosão das paredes dos tubos;
 - $K_v = V \cdot n \cdot D^{-2/3} \cdot I^{-0,5}$
- Se os valores acima estiverem dentro dos limites estabelecidos, o dimensionamento é concluído; caso contrário, faz-se nova tentativa com outra relação d/D , procurando-se aumentar ou diminuir a velocidade.



Tabela dos circulares parcialmente cheios (Manual de Drenagem de Rodovias, p.80)



d/D	A/D ²	R/D	K _v	K _Q
0,01	0,0013	0,0066	0,0353	0,00005
0,02	0,0037	0,0132	0,0559	0,00021
0,03	0,0069	0,0197	0,0730	0,00050
0,04	0,0105	0,0262	0,0881	0,00093
0,05	0,0147	0,0326	0,1019	0,00150
0,06	0,0192	0,0389	0,1147	0,00221
0,07	0,0242	0,0451	0,1267	0,00306
0,08	0,0294	0,0513	0,1381	0,00406
0,09	0,0350	0,0575	0,1489	0,00521
0,10	0,0409	0,0635	0,1592	0,00651
0,11	0,0470	0,0695	0,1691	0,00795
0,12	0,0534	0,0755	0,1786	0,00953
0,13	0,0600	0,0813	0,1877	0,01126
0,14	0,0668	0,0871	0,1965	0,01313
0,15	0,0739	0,0929	0,2051	0,0152
0,16	0,0811	0,0986	0,2133	0,0173



d/D	A/D ²	R/D	K _V	K _Q
0,56	0,4526	0,2676	0,4153	0,1879
0,57	0,4625	0,2703	0,4180	0,1933
0,58	0,4724	0,2728	0,4206	0,1987
0,59	0,4822	0,2753	0,4231	0,2040
0,60	0,4920	0,2776	0,4256	0,2094
0,61	0,5018	0,2799	0,4279	0,2147
0,62	0,5115	0,2821	0,4301	0,2200
0,63	0,5212	0,2842	0,4323	0,2253
0,64	0,5308	0,2862	0,4343	0,2306
0,65	0,5404	0,2881	0,4362	0,2358
0,66	0,5499	0,2900	0,4381	0,2409
0,67	0,5594	0,2917	0,4398	0,2460
0,68	0,5687	0,2933	0,4414	0,2511
0,69	0,5780	0,2948	0,4429	0,2560
0,70	0,5872	0,2962	0,4444	0,2609
0,71	0,5964	0,2975	0,4457	0,2658
0,72	0,6054	0,2987	0,4469	0,2705
0,73	0,6143	0,2998	0,4480	0,2752
0,74	0,6231	0,3008	0,4489	0,2797
0,75	0,6319	0,3017	0,4498	0,2842
0,76	0,6405	0,3024	0,4505	0,2886
0,77	0,6489	0,3031	0,4512	0,2928
0,78	0,6573	0,3036	0,4517	0,2969
0,79	0,6655	0,3039	0,4520	0,3008
0,80	0,6736	0,3042	0,4523	0,3047
0,81	0,6815	0,3043	0,4524	0,3083
0,82	0,6893	0,3043	0,4524	0,3118

