MARCOS NARVAEZ GAIA

Modelação Matemática de Bueiros

São Paulo

2014

MARCOS NARVAEZ GAIA

Modelação Matemática de Bueiros

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo

2014

MARCOS NARVAEZ GAIA

Modelação Matemática de Bueiros

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica e Ambiental

Orientador:
Profº Drº Podalyro Amaral de Souza

São Paulo

2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de agosto de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catlogação-na-publicação

Gaia, Marcos Narvaez

Modelação matemática de bueiros / M.N. Gaia. – versão corr.

– São Paulo, 2014

60 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

1.Bueiros 2.Escoamento 3.Engenharia hidráulica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental II.t.

EPÍGRAFE

O princípio do modelo constitui o mais forte apoio das modificações que se verificam no mundo.

(Max Scheler)

RESUMO

Há tempo que engenheiros vêm procurando amenizar os problemas relacionados aos bueiros. Não só nos escritórios de engenharia, na fase de projetos e cálculos, como também no assentamento final, procurando manter o sistema hidráulico dos bueiros funcionando corretamente.

A maioria dos problemas encontrados está associada a mal dimensionamento dos bueiros, dimensionamento insuficiente, ou má avaliação das vazões a serem escoadas.

O presente trabalho de pesquisa analisa o escoamento dos bueiros nas obras rodoviárias e ferroviárias de forma a viabilizar seu bom funcionamento.

Para tanto, dos nove (9) tipos de escoamentos identificados na atualidade, foram estudados e discutidos dois (2) deles: Escoamento com entrada livre e Escoamento com entrada afogada, ambos com controle na entrada do bueiro.

A seção do bueiro escolhida foi a circular, uma vez que a bibliografia específica para este tipo de seção é menos abundante.

O desenvolvimento do trabalho foi feito através de modelação matemática buscando-se encontrar o ponto de transição entre os dois (2) tipos de escoamento.

Através dos resultados foi possível uma análise mais detalhada, com sugestão de critérios para projetos de bueiros.

Palavras-chave: Bueiros; Escoamento; Engenharia hidráulica.

ABSTRACT

There is a long time that engineers has been trying to reduce problems related to culverts. Not only in the engineering offices, in the stage of projects and calculations, as well in the final putting down the culverts, trying to keep the hydraulic system of culverts working well.

Most of problems encountered related to culverts are due to weak design conditions, insufficient design condition or bad review of discharges to be flow.

This research aims to analyze the culverts flow in roads and rails projects in order to produce a smooth functioning.

Therefore, from nine types of flow recently identified there were studied and discussed two of them: Flow with free entry and flow with submerged entry, both cases with inlet control.

The cross section of the culvert chosen was the circular, once that the specific literature for this kind of section is less widespread.

The work development was done by mathematical modeling where the objective was to find the transition point between these two types of flow.

From the results it was possible to develop a detailed analysis and to propose a culvert design criteria.

Key-words: Culverts; Flow; Hydraulic engeneering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bueiro (Corte e Seção).....	15
Figura 2 – Tipos de escoamentos	21
Figura 3 – Gráfico comparativo de seções circulares com e sem aresta viva	24
Figura 4 – Tipos de escoamento: Controle de Entrada	26
Figura 5 – Tipos de escoamento: Controle de Saída	28
Figura 6 – Bueiro de seção quadrada com 90° e 15° de alargamento de parede lateral	33
Figura 7 – Vista esquemática do modelo físico	34
Figura 8 – Modelo físico (a montante).....	34
Figura 9 – Experimento para 1, 2, 4 e 6 células	35
Figura 10 – Experimento para 1 e 2 células	36
Figura 11 – I – escoamento com tubo livre e II – escoamento com tubo afogado....	38
Figura 12 – Geometria da seção hidráulica transversal	39
Figura 13 – Contração vertical (C_{cv}) e horizontal (C_{ch}) em bueiro de seção circular	41
Figura 14 – Gráfico Resultante – Modelo	44
Figura 15 – Ábaco de valor estimado de H_w/D em bueiros circulares com bordas quadradas na entrada e escoamento parcialmente cheio	47
Figura 16 – Exemplo de aplicação: Caso 1	51
Figura 17 – Demonstração da eq. (66).....	54
Figura 18 – Foto do Modelo Experimental no Laboratório de Hidráulica	55
Figura 19 – Foto do Modelo Experimental em funcionamento	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes para a Curva UT-CRWR	33
Tabela 2 – Valores de C_{cv} para solução numérica da eq. (49)	42
Tabela 3 – Valores encontrados por Henderson	44
Tabela 4 – Valores de C e Y	45
Tabela 5 – Quadro Comparativo	48
Tabela 6 – Quadro Resumo da lei $\frac{Q^2}{gD^5} = m$	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCE	American Society of Civil Engineers
CTH	Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos (DAEE-USP)
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DER	Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo
DNIT	Departamento Nacional de infraestrutura de Transportes
FHWA	Federal Highway Administration
NIST	National Institute of Science and Technology
SI	Sistema Internacional de Unidades de Medida

LISTA DE SÍMBOLOS

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>	<u>Unidade (SI)</u>
A	área molhada do bueiro	m^2
A_c	área na condição crítica	m^2
B	base do bueiro	m
c	coeficiente do modelo	-
C	constante	-
C_b, C_B	coeficiente de contração de largura do bueiro	-
C_c	coeficiente de contração na vertical da entrada do bueiro	-
C_C	coeficiente de contração perimétrica	-
C_{ch}	coeficiente de contração horizontal	-
C_{cv}, C_h, Y	coeficiente de contração vertical	-
C_Q	coeficiente de descarga	-
C_V	coeficiente de velocidade	-
D	diâmetro ou altura do bueiro	m
E, H, H_w	carga específica	m
E_c	carga específica na profundidade crítica	m
F_r	número de Froude	-
F_{rm}	número de Froude do modelo	-
g	aceleração da gravidade	m/s^2
ΔH	variação de um termo a outro	m
K	coeficiente do modelo	-
L	comprimento do bueiro	m
m	constante	-

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>	<u>Unidade (SI)</u>
M	coeficiente do modelo	-
q	vazão específica	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$
Q	vazão do bueiro	m^3/s
Q_d	vazão de projeto	m^3/s
Q_i	vazão da célula (seção retangular)	m^3/s
Q_i^*	vazão calculada	m^3/s
Q_T	vazão do canal	m^3/s
r	raio do tubo	m
S	declividade longitudinal do bueiro	m/m
SE	erro	-
v_{en}	velocidade de entrada no bueiro	m/s
V	velocidade	m/s
y	profundidade ou altura d' água no interior do tubo	m
y_c	profundidade crítica	m
y_{cont}	profundidade ou altura d' água constante	m
β	ângulo entre a vertical e a lâmina d' água no tubo	-
β_c	ângulo na condição crítica	-
σ	tensão superficial	N/m

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVO.....	15
3. JUSTIFICATIVA.....	17
4. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA	18
4.1 HISTÓRICA.....	18
4.2 CLÁSSICA.....	19
4.3 ATUAL.....	24
5. BUEIRO COM SEÇÃO CIRCULAR.....	38
5.1 MODELO MATEMÁTICO	38
5.1.1 Modelo I – Escoamento com entrada livre	39
5.1.2 Modelo II – Escoamento com entrada afogada.....	40
5.1.3 Determinação da condição de passagem do escoamento, no emboque, de livre a afogado.....	42
5.1.3.1 Henderson	44
5.1.3.2 Computer	45
5.1.3.3 Chow.....	47
5.1.3.4 Quadro Comparativo.....	48
5.2 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	48
5.2.1 Desenvolvimento.....	49
5.2.2 Critérios de Projeto.....	50
5.2.2.1 Critério de Projeto – Caso 1.....	50
5.2.2.2 Critério de Projeto – Caso 2.....	51
5.2.2.3 Comparativo.....	53
5.2.3 Comentários Pertinentes.....	53

5.3	OBSERVAÇÃO LABORATORIAL	55
6.	CONCLUSÕES.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
	REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento demográfico em alta nas grandes cidades e centros urbanos com a utilização de uma infra-estrutura hidráulica precária há, como consequência, os resultados culminados na atualidade: grandes enchentes, rios transbordados, galerias assoreadas e não funcionando; caos total.

Está se tornando comum, pela imprensa, o emprego da palavra “bueiro” para justificar as ocorrências de enchentes principalmente em cidades. O termo é usado erroneamente para descrever problemas com bocas de lobo, poços de visita, caixa de inspeção, etc sendo que o bueiro propriamente dito faz a conexão entre estes dispositivos de drenagem.

Antigamente os intelectuais e cientistas abordavam os fundamentos dos bueiros como algo empírico, sem procurar fazer qualquer comprovação dos fundamentos através de suas anotações / idéias com a realidade. Nas últimas décadas tem-se estudado maneiras de aprimorar este problema abandonando antigos pensamentos e pensando na modernidade. Tem-se o Modelo Conceitual.

Modelo conceitual é obtido por método teórico e os dados experimentais e/ou de campo são usados apenas como apoio à validação do modelo conceitual.

2. OBJETIVO

Figura 1 – Bueiro (Corte e Seção) (NORMANN; HOUGHTALEN; JOHNSTON, 2001)

O termo “bueiro” tem sua definição discriminada por algumas bibliografias. Segundo Gribbin (2009, p. 137): “[..] são estruturas destinadas a transportar um córrego ou um canal através de uma obstrução, como um aterro em uma via férrea ou rodovia. [...]”. Thornton et al. (2005, p. 1) relata que “pode ser considerado um conduto ou canal usualmente colocado sob o aterro de uma rodovia ou ferrovia para conduzir o escoamento da água do ponto mais alto para o ponto mais baixo [...]”. Normann, Houghtalen e Johnston (2005, p. 2) dizem que “é um conduto hidráulicamente curto que conduz o escoamento da água através de um aterro de uma estrada ou demais tipos de obras. [...]”.

Pode-se dizer que os bueiros são estruturas hidráulicas fundamentais na infraestrutura urbana e das estradas, como esquematizado na Figura 1. Os bueiros são constituídos por alguns elementos: boca ou ala de entrada, tubo ou galeria, boca ou ala de saída e dispositivo de amortecimento.

Além do dimensionamento hidráulico dos bueiros existem alguns fatores importantes para se projetar os bueiros, tais como: “o tipo de material, a durabilidade, as condições locais, os aspectos geotécnicos e o tipo de plataforma [...]” (COSTA, 1998, p. 1)

Há duas questões que são abordadas nos escritórios de Engenharia: custo e prazo. Justamente por isso é que se observa na atualidade que há um descuido, principalmente quanto à execução das obras de drenagem, ocorrendo a má execução dos bueiros com o subdimensionamento dos mesmos. No fim, por consequência, pode haver falha parcial ou total da obra viária ou ferroviária.

Este trabalho será desenvolvido com os seguintes objetivos:

- a) Estudar as formas de ocorrência de escoamentos em bueiros;
- b) Estudar, em particular, a condição de mudança de regime de escoamento, na entrada do bueiro, de livre a afogado, em se tratando de bueiro com seção retangular;
- c) Propor um modelo matemático que identifique a mudança de condição livre para afogada, do escoamento na seção de entrada de um bueiro com seção circular;
- d) Propor critérios para projetos hidráulicos de bueiros baseados em condições críticas de afogamento da seção de entrada.

3. JUSTIFICATIVA

Os bueiros são estruturas muito importantes nos meios urbanos, rodoviários e ferroviários. Sem eles, possíveis patologias ocorreriam como: das águas infiltrarem diretamente na camada dos pavimentos, causando fissuras e rompimentos; erosão na terraplenagem; colapso total da estrutura viária de forma que grandes maciços de terra em conjunto com o pavimento desabariam de uma só vez.

Dentre estes problemas, os bueiros devem ser considerados como estruturas de utilidade direta, onde o escoamento de um córrego, riacho ou rio podem passar por ele.

Sabendo-se que os bueiros possuem muitas características a se analisar, deve-se ter em mente suas classificações ou tipos de escoamento para dimensioná-los de forma qualitativa e quantitativamente em prol da economia e segurança da obra viária. Conhecendo estes critérios são possíveis melhores ajustes no projeto de drenagem e modos de execução e correção mais precisos quanto a drenagem dos bueiros.

A escolha do tema para esta pesquisa foi motivada pela dificuldade no momento de execução dos bueiros que não são, mas deveriam ser a grande importância na execução das obras rodoviárias e ferroviárias, pois sem eles o corpo estradal não “fica de pé”.

Percebe-se claramente que há uma enorme gama de materiais didáticos e normas de projeto informando todos os parâmetros necessários à boa execução e manutenção dos bueiros. Apesar de se ter todas as informações e dados necessários ainda se têm continuado a prática da não atenção a este dispositivo tão pequeno se comparado ao tamanho de uma obra, porém tão grande se comparado aos desastres que ele pode causar devido a um precário estudo e execução.

4. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

Neste item serão descritas brevemente as literaturas usadas neste trabalho. Esta análise está subdividida em três (3) partes: Histórica, Clássica e Atual.

4.1 HISTÓRICA

Neste item serão retratadas as abordagens históricas sobre os bueiros de uma forma geral, sendo este o primeiro contato que se tem com os mesmos. Também será tratada a questão de algum nome de destaque da literatura que contribuiu para os estudos e o desenvolvimento desta área de estudo de uma maneira mais ampla.

“Drenagem é qualquer processo, natural ou artificial, de remoção do excesso de água de um terreno, mediante valetas e canais, e de esgotamento de águas servidas, por meio de tubos e condutores” (NOVA ENCICLOPÉDIA BARSA, 1997, p. 248).

Anteriormente a drenagem era usada como um complemento de irrigação de terrenos. Passou então a ter funções bem diferentes, como recuperar grandes extensões de terrenos inundados, regular a umidade do solo em pequenas áreas de cultivo agrícola e desviar as águas do subsolo em terrenos destinados a construção. As técnicas de drenagem são usadas a milênios, como comprovam as pinturas egípcias nos tempos dos faraós e ruínas de canais. A atividade de drenagem, no seu princípio, era de escavar valas cruzando terrenos de montante para jusante. Tendo-se alguns inconvenientes, como ocupação de valas em terras valorizadas, surgimento de insetos e obstrução do escoamento por crescimento de vegetação, levou este sistema a ser substituído por dutos cobertos, sendo, no início, de argila cozida.

Podem-se citar como obras de drenagem as obras no vale do Pó, na Itália (no Império Romano) e no Fens, na Inglaterra.

Fora estas participações, um nome importante que não se pode esquecer foi o do renascentista Leonardo da Vinci, realizador de muitos inventos; entre 1514 e 1515 projetou a drenagem dos pântanos de Pontini, no sul da Itália.

Embora o bueiro mais antigo do mundo seja desconhecido, os Minuanos e os Etruscos construíram bueiros antigos em Creta e no Nordeste da Itália, respectivamente. [...] Os formatos dos bueiros eram em arco ou retangular (ou célula). Os romanos construíram bueiros a jusante dos aquedutos. [...] Ao longo do aqueduto de Nîmes, um amplo bueiro de seção quadrada foi escavado em Vallon No. 6, localizado a 17Km a jusante de Pont du Gard entre o Combe de la Sartenette e Combe Joseph na Bois de Remoulins. [...] (CHANSON, 2004, p. 564)

4.2 CLÁSSICA

São as literaturas clássicas que na maioria dos casos são referência em diversos livros e revistas científicas atuais.

Chow (1959): este livro possui uma escrita com um embasamento teórico bem estruturado, na língua inglesa, descrevendo a hidráulica clássica com excelente nível. O autor descreve bem abrangente os bueiros, demonstrando as fórmulas matemáticas para cálculo, contendo gráficos, ábacos, Figuras ilustrativas e fotografias. Possui a simbologia elementar da hidráulica, sem exceções. A literatura não segue totalmente o modelo conceitual, mas também não é totalmente empírico, havendo um pouco dos dois métodos.

Bueiros são estruturas muito complexas de se analisar. Eles podem funcionar como um canal se o fluido estiver escoando livre pela tubulação tendo, na maioria das vezes, uma lâmina d'água característica juntamente com a presença da pressão atmosférica. Senão, pode funcionar sob pressão ou forçado, onde o líquido preenche toda a seção transversal do conduto, sem atuação da pressão atmosférica.

Além disso, há classificações dos regimes quanto às profundidades d' água dentro do conduto, sendo: fluvial (ou subcrítico), crítico e torrencial (ou supercrítico).

Segundo Chow apud Yarnell, Nagler e Woodward (1926) eles foram notáveis pioneiros que fizeram mais de 3000 ensaios com bueiros com seções circulares e retangulares que serviram de referência para estudos posteriores. Chow (1959) classificou o funcionamento dos bueiros, após análises e observações, em seis (6) tipos de escoamentos de maneira bem generalizada e prática, sem levar em consideração uma classificação refinada em termos de controle de entrada e de saída.

Esta classificação se encontra na Figura 2. Na Figura optou-se por manter a legenda em inglês por questão de respeito ao estudo apresentado neste trabalho. Uma observação a se fazer é de que o autor, na maioria de suas apresentações/comparativos, analisa os resultados obtidos por ensaios/equacionamentos a partir de gráficos.

Após muitos estudos relacionados aos bueiros, segundo Costa (1998), a melhora da geometria de entrada dos bueiros, propiciando um aumento na capacidade hidráulica, levou a publicação de circulares do Federal Highway Administration chamadas “Hydraulic Design of Improved Inlets for Culverts” (1972) e “Hydraulic Design Series nº 5” (1985) respectivamente. No nosso estudo estar-se-á dando uma ênfase maior a esta última publicação mencionada. Ela será melhor abordada no item 4.3 deste trabalho.

Figura 2 – Tipos de escoamentos (CHOW, 1959)

Para o primeiro caso, tanto a montante como a jusante do bueiro, o escoamento é afogado. O bueiro funciona como um conduto forçado.

No segundo caso, a montante está afogado e a jusante desafogado, estando o bueiro completamente cheio. Este escoamento se caracteriza como de um tubo longo.

No terceiro caso, a montante está afogado e a jusante desafogado, estando o bueiro com superfície livre ao longo. O escoamento é do mesmo tipo de um tubo curto, funcionando como um orifício.

No quarto caso, a montante está afogado e a jusante desafogado. O escoamento neste caso é do tipo fluvial. ($y > y_c$).

Para o quinto caso, a montante está afogado e a jusante desafogado. O escoamento, a jusante do bueiro, tende a se tornar crítico. Em toda a extensão do bueiro o escoamento é similar ao do quarto caso. Há o controle do escoamento na saída do bueiro, neste caso.

No sexto caso, a montante está afogado e a jusante desafogado. O escoamento no bueiro é do tipo torrencial ($y < y_c$). Há o controle na entrada do bueiro. (CHOW, 1959, p. 496, tradução nossa)

Henderson (1966): este livro é bastante similar ao anterior. Quanto ao assunto bueiros, ele os trata de uma maneira bem simplificada, onde em seu conteúdo se tem algumas formulações básicas, ábacos e Figuras. Pode-se dizer que o livro se enquadra entre o modelo empírico e o modelo conceitual.

Nas considerações do autor, foram usados alguns adimensionais para seções circulares e retangulares. Eles estão mencionados a seguir.

$$\text{Seção circular: } \frac{Q}{D^2\sqrt{gD}}, \frac{H}{D}, S_o$$

$$\text{Seção retangular: } \frac{Q}{BD\sqrt{gD}}, \frac{H}{D}, S_o$$

Os dados experimentais indicados pelo autor foram ajustados e produziram as equações a seguir:

$$\frac{Q}{D^2\sqrt{gD}} = 0,48 \left(\frac{S_o}{0,40} \right)^{0,05} \left(\frac{H}{D} \right)^{1,9} \quad (1)$$

Esta equação é indicada quando o valor de H/D está entre 0 e 0,8.

$$\frac{Q}{D^2\sqrt{gD}} = 0,44 \left(\frac{S_o}{0,40} \right)^{0,05} \left(\frac{H}{D} \right)^{1,5} \quad (2)$$

Sendo neste caso os limites de H/D entre 0,80 e 1,20.

Já para a seção retangular foram estudados dois casos particularmente conhecidos: escoamento funcionando como um vertedouro e escoamento funcionando como um orifício.

Como vertedouro, foi adotada uma condição já conhecida da hidráulica que é a altura d' água (H) sendo igual a 3/2 do valor da lâmina crítica (y_c), porque foi

considerado que a altura d'água não ocupa toda a entrada do bueiro ou não o afoga. Esta situação está apresentada na Figura 11-I.

Partindo da condição crítica

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (3)$$

e usando a definição de vazão específica

$$g(y_c)^3 = \frac{Q^2}{B^2} \quad (4)$$

obteve a expressão para a vazão Q .

$$Q = \frac{2}{3} C_B B H \sqrt{\frac{2}{3} g H} \quad (5)$$

O coeficiente de contração C_B será estudado no item 5 deste trabalho.

Quanto ao escoamento funcionando como um orifício foi adotada a situação onde o bueiro está totalmente cheio na entrada (afogado), representado pela Figura 11-II.

Nesta situação, o fluido, ao entrar no bueiro contrai-se no sentido da altura D e percorre, pelo comprimento do bueiro, praticamente com uma altura d'água constante (y_{cont}). Com esta condição se pode adotar a seguinte condição:

$$y_{cont} = C_h D \quad (6)$$

Aplicando a equação de Bernoulli, obteve:

$$H + \frac{V_a^2}{2g} = y_{cont} + \frac{V_{cont}^2}{2g} + \Delta H_{a,cont} \quad (7)$$

Fazendo algumas simplificações, substituindo a eq. (6) em (7) e isolando a vazão (Q) obteve:

$$Q = C_h B D \sqrt{2g(H - C_h D)} \quad (8)$$

Estes resultados apresentados pelo autor são de enorme importância, pois com o método adotado e os equacionamentos feitos pode-se compreender melhor o funcionamento dos bueiros com diferentes arestas no emboque e também se fazer uma análise em termos de transição de escoamento (vide Figura 3). Os resultados destes estudos serão melhor discutidos no item 5 deste trabalho.

Figura 3 – Gráfico comparativo de seções circulares com e sem aresta viva (HENDERSON, 1966)

4.3 ATUAL

É a literatura mais atual possível publicada, como: livros, revistas, sites e artigos científicos.

Novak et al. (2007): livro com uma literatura mais simples e ilustrativa da hidráulica, em inglês. Têm no seu conteúdo fórmulas matemáticas bem simplificadas, poucos gráficos, bastantes Tabelas e Figuras. É uma literatura meramente informativa.

Computer (1997): livro com uma abordagem bem similar ao livro anterior. E também está escrito em inglês. Além de ser um livro/manual para utilização de software educativo sobre o assunto de hidráulica, o mesmo possui uma estrutura interessante parecendo um livro escrito na atualidade.

Gribbin (2009): este livro possui uma literatura bem estruturada com um bom embasamento teórico. É apresentado com muitas fórmulas matemáticas, gráficos, Tabelas, Figuras e fotos. Este livro se enquadraria no modelo conceitual, onde busca corroborar com os resultados experimentais as hipóteses adotadas.

Normann; Houghtalen e Johnston (2001): Esta circular foi produzida em 1985, porém, neste trabalho, será usada versão mais recente, datada de maio de 2001.

Esta circular (ou manual) tem como utilidade principal analisar a hidráulica, a princípio, de uma maneira generalizada e, em outro momento, parte para as condições particulares dos bueiros, como seu funcionamento, situações de controle, ábacos, etc. Tem diversas fórmulas, Figuras, ábacos, Tabelas e outros. Enquadra-se também no modelo conceitual-empírico.

Após muitos estudos, ensaios de laboratório e in situ, os bueiros possuem uma classificação mais atualizada e que contempla melhor a maioria dos casos de escoamento dos bueiros quanto a tipos de controle de entrada e de saída. Recentemente, eles foram classificados em nove (9) tipos, sendo quatro (4) deles por controle de entrada e cinco (5) por controle de saída. A classificação com controle de entrada está representada na Figura 4 e com controle de saída na Figura 5. Como no item 4.2, a língua inglesa nas Figuras também foi preservada, sem haver traduções.

Figura 4 – Tipos de escoamento: Controle de Entrada (NORMANN; HOUGHTALEN; JOHNSTON, 2001)

Pela Figura 4 tem-se a seguinte classificação dos escoamentos:

Figura 4-A retrata a condição onde nem a entrada nem a saída do bueiro estão submersos. O escoamento passa através da profundidade crítica exatamente a jusante da entrada do bueiro e o escoamento no tubo é torrencial. O escoamento no bueiro é livre em todo seu comprimento, aproximando-se da condição normal a jusante.

Figura 4-B mostra que a saída, por estar submersa, não garante o controle de entrada. Neste caso, o escoamento a jusante da entrada é torrencial e um ressalto hidráulico se forma no bueiro.

Figura 4-C é a situação mais típica. A entrada está submersa e a saída escoar livremente. Novamente, o escoamento é torrencial e livre ao longo do bueiro. A profundidade crítica está localizada após a entrada do bueiro e a profundidade tende a normal na saída.

Figura 4-D é uma condição não usual, com entrada e saída afogadas, mas com escoamento livre internamente. Para que este escoamento livre não fique sujeito a depressão faz-se necessária a presença de um dreno para garantir a pressão atmosférica. A não existência desse dreno produzirá um escoamento interno livre, mas sob depressão ou um escoamento totalmente afogado. (NORMANN; HOUGHTALEN; JOHNSTON, 2001, p. 25, tradução nossa)

Figura 5 – Tipos de escoamento: Controle de Saída (NORMANN; HOUGHTALEN; JOHNSTON, 2001)

Para a Figura 5 há a classificação para escoamentos por controle de saída.

Figura 5-A representa a condição clássica de bueio cheio, com entrada e saída submersas. O bueio está operando em conduto forçado. Esta condição é frequentemente assumida nos cálculos, mas raramente acontece.

Figura 5-B retrata a saída submersa com a entrada não submersa. Para este caso, a altura d' água é tão rasa a montante que a entrada é exposta e o escoamento contrai dentro do bueiro.

Figura 5-C mostra a entrada submersa com o bueiro todo cheio e a saída não submersa. Esta é uma condição rara. Requer uma extrema altura d' água para manter o tubo cheio sem ter altura d' água a jusante. As velocidades são usualmente altas nesta condição.

Figura 5-D é a mais típica. A entrada do bueiro está submersa pela altura d' água e na saída o escoamento é livre com baixa altura d' água. Para esta condição, o bueiro escoar parcialmente cheio em parte do seu comprimento (escoamento fluvial) e a condição crítica está à próxima a saída, para montante.

Figura 5-E é também típica, onde nem a entrada nem a saída do bueiro estão submersas. O escoamento no bueiro é livre em todo o comprimento, sendo o escoamento fluvial. (NORMANN; HOUGHTALEN; JOHNSTON, 2001, p. 32, tradução nossa)

Após a apresentação dos nove (9) tipos de escoamentos, durante os momentos de pesquisa e análises bibliográficas, foram analisadas todas as situações e se chegou a conclusão que as situações de maior frequência e importância, seriam as situações 4-A e 4-C. Estas duas situações tratam de um comportamento bem particular no escoamento dos bueiros: a passagem de um tipo de escoamento para o outro tipo, isto é, de livre a afogado, a montante.

Se for feito um comparativo desta nova classificação (Figuras 4 e 5) com a classificação da Figura 2 ver-se-á alguns detalhes importantes.

- a) Classificação clássica (Figura 2): Há uma classificação que engloba os vários tipos de escoamentos, desde os casos de escoamento forçado (1 e 2) até os casos comumente vistos em laboratório e em campo. (escoamentos fluvial e torrencial). Trata-se de uma classificação simples e bem didática, sendo que o leitor vendo apenas as Figuras representantes de cada tipo de escoamento consegue entender cada caso sem ter de consultar a descrição detalhada.
- b) Classificação atual (Figuras 4 e 5): Trata-se de uma classificação mais abrangente, fazendo referencia a todos os tipos possíveis de ocorrência de escoamento dos bueiros, tanto por controle de entrada como de saída. Nesta classificação, pode-se dizer que são também citados escoamentos em transição, como os casos 4-A (transição do caso 4-B) e 5-B (transição do

caso 5-A). É uma classificação um pouco mais complexa e detalhada, sendo que somente vendo as ilustrações não basta para interpretar o que realmente está ocorrendo em cada caso, sendo necessária a consulta a descrição dos tipos de escoamentos.

Charbeneau; Henderson e Sherman (2006): A divulgação deste tema/assunto da revista ASCE foi de extrema importância para o desenvolvimento do nosso trabalho. O tema do artigo (*Hydraulic Performance Curves for Highway Culverts*) (Performance Hidráulica para Bueiros de Estrada) se tratou de um experimento com bueiros, onde foi analisado o comportamento do escoamento d' água com controle de entrada nos estados desafojado e afogado do bueiro. O objetivo deste experimento foi poder representar o comportamento d'água através das curvas da FHWA (Administração Federal de Estradas), órgão americano que controla a qualidade dos projetos rodoviários.

Para este estudo, foi considerada e experimentada a seção do bueiro sendo retangular. Foram feitos ensaios com uma célula e várias células.

Para o bueiro desafojado, tem-se a equação:

$$\frac{Hw}{D} = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{C_b} \right)^{2/3} \left(\frac{Q}{A\sqrt{gD}} \right)^{2/3} \quad (9)$$

Onde:

D : altura da seção do bueiro;

A : área da seção transversal do bueiro;

C_b : coeficiente de contração de largura do bueiro;

Hw : carga específica;

Q : vazão que passa pelo bueiro

g : aceleração da gravidade.

Quando o bueiro está totalmente afogado, ele funciona como um orifício, sendo representado pela equação:

$$Hw = \frac{v_{en}^2}{2g} + C_c D \quad (10)$$

Onde:

v_{en} : velocidade de entrada no bueiro;

C_c : coeficiente de contração vertical na entrada no bueiro.

Como há também o efeito da contração na largura do bueiro (C_b), a equação é representada a seguir:

$$\frac{Hw}{D} = \frac{1}{2(C_b C_c)^2} \left(\frac{Q}{A\sqrt{gD}} \right)^2 + C_c \quad (11)$$

Para determinar a condição de transição entre a situação desafogada e afogada, foi eliminado o adimensional $\left(\frac{Q}{A\sqrt{gD}} \right)$ entre as eqs. (9) e (11), resultando:

$$\left(\frac{Hw}{C_c D} \right)^3 - \frac{27}{4} x \left(\frac{Hw}{C_c D} \right) + \frac{27}{4} = 0 \quad (12)$$

Como esta é uma equação de 3º grau, podem ser obtidas três raízes para $\frac{Hw}{C_c D}$. Como uma delas é negativa (-3), as outras encontradas foram iguais a $\frac{3}{2}$. Como somente valores positivos expressam a possibilidade de ocorrência de um evento/fenômeno, então o valor de $\frac{Hw}{C_c D}$ adotado foi:

$$\frac{Hw}{C_c D} = \frac{3}{2} \quad (13)$$

A transição entre as situações desafogado e afogado é expressa a seguir:

$$\frac{Hw}{D} = \frac{3}{2} C_c \quad (14)$$

$$\frac{Q}{A\sqrt{gD}} = C_b C_c^{3/2} \quad (15)$$

Através da plotagem destes dois (2) resultados (curvas), observa-se que há um ponto em comum entre elas e com tangentes coincidentes. Este ponto em comum pode ser representado da seguinte maneira:

$$\frac{d\left(\frac{Hw}{D}\right)}{d\left(\frac{Q}{A\sqrt{gD}}\right)} = \frac{1}{C_d \sqrt{C_c}} \quad (16)$$

Através dos estudos da FHWA (Administração Federação das Estradas), conduzido pela NIST (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia) foram feitos muitos experimentos com bueiros, resultando em curvas e nomogramas. Para os casos de situação desafogada (para seção retangular), tem-se:

$$\frac{Hw}{D} = \frac{E_c}{D} + K \left(g^{M/2} \right) \left[\frac{Q}{A\sqrt{gD}} \right]^M - 0,5S \quad (17)$$

$$\frac{Hw}{D} = K \left(g^{M/2} \right) \left[\frac{Q}{A\sqrt{gD}} \right]^M \quad (18)$$

Onde:

E_c : carga específica na profundidade crítica;

Q : vazão;

A : área da seção transversal do bueiro;

S : declividade do bueiro;

K e M : coeficientes do modelo que dependem das configurações do bueiro.

Para a situação do bueiro afogado (para seção retangular), tem-se:

$$\frac{Hw}{D} = c(g) \left[\frac{Q}{A\sqrt{gD}} \right]^2 + Y - 0,5S \quad (19)$$

Onde: c e Y são coeficientes que dependem da forma, material, e da configuração de entrada do bueiro.

A Figura 6 mostra um gráfico que representa a transição entre a situação desafogada e afogada do bueiro para seção retangular [aplicação das eqs.(17), (18) e (19)].

Através da eq.(15) se obteve a transição no gráfico.

Figura 6 – Bueiro de seção quadrada com 90° e 15° de alargamento de parede lateral (CHARBENEAU; HENDERSON; SHERMAN, 2006)

Através do ponto de transição encontrado, foram obtidos os resultados para os coeficientes C_b e C_c ($C_b = 0,815$ e $C_c = 0,754$), com a utilização dos termos ($H_w/D = 1,132$ e $Q/[A(gD)^{0,5}] = 0,534$) e encontrado um erro (SE) de 0,0152 sobre o valor de H_w/D .

Através destes experimentos foi feita uma tabela com todos os dados encontrados para diversos tipos de seções transversais de bueiros. Vide tabela a seguir.

Tabela 1 – Constantes para a Curva UT-CRWR (CHARBENEAU; HENDERSON; SHERMAN, 2006 (adaptado pelo autor))

Culvert type	Description	C_b	C_c	SE
Circular concrete	Square edge with headwall	0,944	0,662	0,0108
Circular concrete	Groove end with headwall	1	0,729	0,0051
Circular concrete	Groove end projecting	0,998	0,712	0,0138
Rectangular box	30-75° wingwall flares	0,854	0,752	0,0371
Rectangular box	90 and 15° wingwall flares	0,815	0,754	0,0152
Rectangular box	0° wingwall flares	0,792	0,749	0,0272
Rectangular	Tapered inlet throat	0,982	0,91	0,0072

Foram feitos ensaios laboratoriais em bueiros de seção retangular para uma (1) célula e múltiplas células para efeito de comparação dos valores teóricos com os valores experimentais a serem encontrados.

Estes ensaios foram feitos em células de base (B)=3,05m e altura (D)=1,83m na escala 1:10 em modelo reduzido. Este modelo tinha a montante, um canal trapezoidal e a jusante o conjunto dos bueiros. (ver Figuras 7 e 8)

Figura 7 – Vista esquemática do modelo físico (CHARBENEAU; HENDERSON; SHERMAN, 2006)

Figura 8 – Modelo físico (a montante) (CHARBENEAU; HENDERSON; SHERMAN, 2006)

Pelos ensaios foi constatado que a vazão medida em cada célula era diferente uma da outra. Portanto, foi utilizada uma fórmula para se calcular esta vazão corrigida. Ela está representada a seguir:

$$Q_i = (Q_i^*) \left(\frac{Q_T}{\sum_i Q_i^*} \right) \quad (20)$$

Onde:

Q_i : vazão da célula;

Q_i^* : vazão calculada usando a medida da altura d'água e a equação de performance;

Q_T : vazão do canal.

Através deste procedimento foram corrigidas as vazões e se chegaram a resultados mais consistentes. Foi também calculado um erro (SE) para cada valor encontrado. A fórmula está a seguir:

$$SE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \left(\frac{Q}{A\sqrt{gD}} \right)_{mi} - \left(\frac{Q}{A\sqrt{gD}} \right)_{di} \right\}^2} \quad (21)$$

Foram então encontrados os valores de $C_b = 1,098$, $C_c = 0,574$ e o erro (SE) de 0,0369. Vários experimentos foram ensaiados e dois (2) deles foram analisados: o experimento com cento e setenta e quatro (174) dados e o de trinta e cinco (35) dados. O ensaio com cento e setenta e quatro (174) dados foi testado para uma (1), duas (2), quatro (4) e seis (6) células. (ver Figura 9). O de trinta e cinco (35) dados para uma (1) e duas (2) células. (ver Figura 10)

Figura 9 – Experimento para 1, 2, 4 e 6 células (CHARBENEAU; HENDERSON; SHERMAN, 2006)

Figura 10 – Experimento para 1 e 2 células (CHARBENEAU; HENDERSON; SHERMAN, 2006)

Comparados com os valores da literatura, os valores encontrados de C_c estão bem consistentes. Porém, não se pode dizer o mesmo para os valores de C_b . Uma das razões seria a de que o uso de múltiplas células ocasionou esse resultado, onde na literatura se usou apenas 1 célula). Porém, para múltiplas células o valor de $C_b=1,0$ é considerado satisfatório.

Para múltiplas células, as curvas de performance são especificadas pelas eqs. (9) e (11), usando os valores de $C_b=1$ e $C_c=2/3$. Obtiveram:

$$\frac{Hw}{D} = \frac{3}{2} \left(\frac{Q}{A\sqrt{gD}} \right)^{2/3} \quad (22)$$

$$\frac{Hw}{D} = \frac{9}{8} \left(\frac{Q}{A\sqrt{gD}} \right)^2 + \frac{2}{3} \quad (23)$$

Para casos onde se tem baixos níveis d'água nos bueiros na estrada, foi adotado $y_1 = D$, onde y_1 é a profundidade de entrada d'água. Sendo $Hw/D > 1$ a eq. (23) fica transformada em:

$$\frac{Hw}{D} = \frac{19}{15} \quad (24)$$

Substituindo este valor na eq. (22), obtiveram:

$$\frac{Q}{BD\sqrt{gD}} \cong 0,73 \quad (25)$$

A eq. **(25)** pode ser usada para calcular a largura total do bueiro para uma vazão Q_T e a altura do bueiro D , como apresentada a seguir:

$$B = \frac{Q_T}{0,73\sqrt{g}(D)^{3/2}} \quad \textbf{(26)}$$

Se for calculado pelas equações da FHWA ($C_b=0,815$ e $C_c=0,754$ [Tabela 1]) com $H_w/D=19/15$ a eq. **(11)** vai resultar no valor de $Q/[A(gD)^{0,5}]=0,62$. Isto mostra que o bueiro é 17% maior que o valor obtido pela eq. **(26)**. Esta diferença é significativa para múltiplas células por conta de haver diferença de vazões em cada célula e ocorrer sedimentação nelas.

Concluindo, a transição das situações desafojado e afogado é representada muito bem pelo modelo, sendo o escoamento contínuo e regular, demonstrado pelas eqs. **(14)** e **(15)**. Para múltiplas células, é favorável usar as eqs. **(22)** e **(23)** com $C_b=1$ e $C_c=2/3$. Para baixos níveis d'água nos bueiros de estrada é adequado usar a eq. **(26)** que especifica a largura total do bueiro para uma determinada vazão e determinada altura de bueiro.

5. BUEIRO COM SEÇÃO CIRCULAR

5.1 MODELO MATEMÁTICO

Para o bueiro de seção circular será modelada matematicamente a condição hidráulica correspondente à passagem do escoamento de livre a montante, para afogado a montante.

O modelo matemático será desenvolvido apenas para as condições a seguir:

- (a) Bueiro com seção circular;
- (b) Bueiro com baixa declividade;
- (c) Escoamento livre (pressão atmosférica) ao longo do bueiro;
- (d) Com controle de montante, livre e afogado;
- (e) Emboque com aresta viva.

Primeiramente, na literatura técnica e acadêmica, tem-se muitos tipos de escoamento de bueiros, como os mostrados no item 4 deste trabalho. Serão analisados e considerados 2 tipos de escoamento: Escoamento com entrada livre e escoamento com a entrada afogada, ambos com controle de entrada. (ver Figura 11)

Figura 11 – I – escoamento com tubo livre e II – escoamento com tubo afogado

5.1.1 Modelo I – Escoamento com entrada livre

Na situação I, a equação de energia é apresentada a seguir:

$$E = y_c + \frac{Q^2}{(A_c^2)2g} \quad (27)$$

Utiliza-se a relação clássica da hidráulica sobre a profundidade crítica:

$$y_c \cong \frac{2}{3}E \quad (28)$$

Substituindo-se a eq. (28) na (27), tem-se:

$$\frac{E}{3} = \frac{Q^2}{(A_c^2)2g} \quad (29)$$

A área na condição crítica (A_c) da seção circular do tubo é dada por:

$$A_c = \frac{D^2}{4} (\beta_c - \sin\beta_c \cos\beta_c) \quad (30)$$

O ângulo β é mostrado na Figura a seguir:

Figura 12 – Geometria da seção hidráulica transversal

A profundidade crítica (y_c) da seção circular é expressa como:

$$y_c = \frac{D}{2} (1 - \cos\beta_c) \quad (31)$$

Isolando-se $\cos\beta_c$ e usando-se a eq. (28), obtém-se:

$$\cos\beta_c = 1 - \frac{4E}{3D} \quad (32)$$

Isolando-se o β_c , tem-se:

$$\beta_c = \cos^{-1} \left(1 - \frac{4E}{3D} \right) \quad (33)$$

Através das relações trigonométricas, encontrou-se o valor de $\sin \beta_c$:

$$\sin \beta_c = \sqrt{\frac{8E}{3D} - \frac{16E^2}{9D^2}} \quad (34)$$

Substituindo-se as eqs. (32), (33) e (34) na eq. (30), vem:

$$A_c = \frac{D^2}{4} \left[\cos^{-1} \left(1 - \frac{4E}{3D} \right) - \left(1 - \frac{4E}{3D} \right) \sqrt{\frac{8E}{3D} - \frac{16E^2}{9D^2}} \right] \quad (35)$$

Substituindo-se a eq. (35) na eq. (29), chega-se a:

$$\left(\frac{E}{D} \right) = \frac{24 \left(\frac{Q^2}{gD^5} \right)}{\left[\cos^{-1} \left(1 - \frac{4E}{3D} \right) - \left(1 - \frac{4E}{3D} \right) \sqrt{\frac{8E}{3D} - \frac{16E^2}{9D^2}} \right]^2} \quad (36)$$

A eq. (36) corresponde ao modelo matemático do escoamento livre na entrada do bueiro com seção transversal circular.

5.1.2 Modelo II – Escoamento com entrada afogada

A equação para tubo afogado é a mesma eq. (29) com a diferença de que não se está analisando o estado crítico do escoamento, apenas aplica-se a equação de Bernoulli, sem perda de carga, entre uma seção a montante do emboque do bueiro e outra dentro do bueiro.

$$E = y + \frac{Q^2}{(A^2)2g} \quad (37)$$

Considerando-se neste caso que há efeitos das contrações vertical (C_{cv}) e horizontal (C_{ch}) (ver Figura 13), a profundidade y será substituída por $C_{cv}D$ e a área molhada A será substituída por $C_{cv}C_{ch} \frac{\pi D^2}{4}$:

$$E = C_{cv}D + \frac{Q^2}{\left(C_{cv}C_{ch} \frac{\pi D^2}{4} \right)^2 2g} \quad (38)$$

Fazendo-se as simplificações algébricas a equação fica:

$$E = C_{cv}D + \frac{Q^2}{(C_{cv}^2 C_{ch}^2) \frac{\pi^2 D^4}{8} g} \quad (39)$$

Adotando-se o coeficiente de contração horizontal (C_{ch}) como aproximadamente um (1) e fazendo-se as simplificações necessárias, tem-se:

$$\left(\frac{E}{D}\right) = C_{cv} + \frac{8}{C_{cv}^2 \pi^2} \left(\frac{Q^2}{gD^5}\right) \quad (40)$$

A eq. (40) demonstra, através da modelação matemática, a configuração do escoamento do bueiro de seção circular para a situação de emboque afogado.

Figura 13 – Contração vertical (C_{cv}) e horizontal (C_{ch}) em bueiro de seção circular

5.1.3 Determinação da condição de passagem do escoamento, no emboque, de livre a afogado

Para se pesquisar esta condição de passagem elimina-se, entre as eqs. (36) e (40) o adimensional $\frac{Q^2}{gD^5}$. Esta eliminação produz a eq. (41), cuja raiz, para a incógnita $\left(\frac{E}{D}\right)$ corresponde à condição de passagem procurada.

$$\frac{3\pi^2 \left[\frac{E}{D} - C_{cv} \right]}{\left(\frac{E}{D} \right) \left[\cos^{-1} \left(1 - \frac{4E}{3D} \right) - \left(1 - \frac{4E}{3D} \right) \sqrt{\frac{8E}{3D} - \frac{16E^2}{9D^2}} \right]^2} = 1 \quad (41)$$

Como é difícil por solução analítica, talvez impossível, a obtenção do valor de $\left(\frac{E}{D}\right)$ que satisfaça a eq. (41), optou-se por técnica numérica com adoção de valores de $\left(\frac{E}{D}\right)$, usando-se o parâmetro C_{cv} (coeficiente de contração vertical) como parâmetro de simulação.

Simulação:

(1) Adota-se $\frac{E}{D} > 1$;

(2) Calcula-se o denominador (DE) da eq. (41). Com $\frac{E}{D}$ e DE calcula-se o valor de C_{cv} que satisfaz a eq. (41).

Seguindo esta rotina de cálculo e usando como referência os valores já conhecidos na hidráulica de $\frac{E}{D}$ e C_{ch} foi montada a Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Valores de C_{cv} para solução numérica da eq. (49)

E/D	DE	Ccv
1,00	4,95	0,833
1,01	5,11	0,837
1,02	5,28	0,842
1,03	5,45	0,846
1,04	5,62	0,850
1,05	5,79	0,854
1,06	5,97	0,858
1,07	6,15	0,862
1,08	6,33	0,866
1,09	6,52	0,870
1,10	6,71	0,873

(continua)

(conclusão)

E/D	DE	Ccv
1,11	6,90	0,877
1,12	7,09	0,880
1,13	7,28	0,884
1,14	7,48	0,887
1,15	7,68	0,890
1,16	7,88	0,893
1,17	8,09	0,897
1,18	8,29	0,900
1,19	8,50	0,903
1,20	8,71	0,905
1,21	8,92	0,908
1,22	9,14	0,911
1,23	9,35	0,914
1,24	9,57	0,917
1,25	9,78	0,919
1,26	10,00	0,922
1,27	10,22	0,925
1,28	10,44	0,927
1,29	10,66	0,930
1,30	10,88	0,932
1,35	11,97	0,945
1,40	13,04	0,959
1,50	14,80	0,999

adotado

calculado

Fazendo-se uso dos valores obtidos e plotando os mesmos em um gráfico, tem-se o resultado a seguir.

Figura 14 – Gráfico Resultante – Modelo

Através dos valores encontrados de C_{cv} pode-se observar que os resultados foram satisfatórios, porque eles estão próximos aos encontrados nas literaturas existentes de hidráulica.

Para se comparar, a seguir serão apresentados alguns dos valores encontrados na literatura de H_w/D e dos coeficientes de contração de um fluido, sendo a água o fluido a ser analisado.

5.1.3.1 Henderson

Henderson (1966) apresenta os valores encontrados na tabela a seguir, correspondente à passagem de condição de escoamento livre para afogado.

Tabela 3 – Valores encontrados por Henderson (HENDERSON, 1966 (adaptado pelo autor))

H_w/D	C_Q	C_V
1,25	0,90	0,98

A partir dos valores de coeficiente de descarga e de contração de velocidade (0,90 e 0,98 respectivamente) e sabendo-se que $C_Q = C_C C_V$, portanto o valor do coeficiente

de contração periférica é aproximadamente 0,92 ($C_c \approx 0,92$). O valor numérico encontrado pode ser correlacionado aos valores encontrados de C_{cv} da Tabela 2.

5.1.3.2 Computer

Neste livro, através da análise de controle de entrada em bueiros, para o caso particular do tubo estando afogado funcionando como um orifício foi utilizado a seguinte equação representando este escoamento:

$$\frac{Hw_i}{D} = C \left[\frac{Q}{AD^{0,5}} \right]^2 + Y - 0,5S \quad (42)$$

Onde:

Hw_i é a carga específica; D o diâmetro do tubo; Q a vazão; A é a seção da área molhada do tubo; S é a declividade do tubo; C é uma constante e Y é o coeficiente de contração vertical C_{cv} apresentados na tabela a seguir.

Tabela 4 – Valores de C e Y (COMPUTER, 1997 (adaptado pelo autor))

SHAPE AND MATERIAL	INLET EDGE DESCRIPTION	UNSUBMERGED			SUBMERGED	
		FORM	K	M	C	Y
Circular	Square edge w/headwall	1	0,0098	2,000	0,0398	0,670
Concrete	Groove end w/headwall		0,0078	2,000	0,0292	0,740
	Groove end projecting		0,0045	2,000	0,3170	0,690
Circular	Headwall	1	0,0078	2,000	0,0379	0,690
CMP	Mitered to slope		0,0210	1,330	0,0463	0,750
	Projecting		0,0340	1,500	0,0553	0,540
Circular	Beveled ring, 45° bevels	1	0,0018	2,500	0,0300	0,740
	Beveled ring, 33,7° bevels		0,0018	2,500	0,0243	0,830
Rectangular	30° to 75° wingwall flares	1	0,0260	1,000	0,0385	0,810
Box	90° and 15° wingwall flares		0,0610	0,750	0,0400	0,800
	0° wingwall flares		0,0610	0,750	0,0423	0,820
Rectangular	45° wingwall flare d=,0430	2	0,5100	0,667	0,0309	0,800
Box	18° to 33,7° wingwall flare d=,0830		0,4860	0,667	0,0249	0,830
Rectangular	90° headwall w/3/4" chamfers	2	0,5150	0,667	0,0375	0,790
Box	90° headwall w/45° bevels		0,4950	0,667	0,0314	0,820
	90° headwall w/33,7° bevels		0,4860	0,667	0,0252	0,865

(continua)

(conclusão)

SHAPE AND MATERIAL	INLET EDGE DESCRIPTION	UNSUBMERGED			SUBMERGED	
		FORM	K	M	C	Y
Rectangular	3/4" chamfers; 45° skewed headwall	2	0,5220	0,667	0,0402	0,730
Box	3/4" chamfers; 30° skewed headwall		0,5330	0,667	0,0425	0,705
	3/4" chamfers; 15° skewed headwall		0,5450	0,667	0,0451	0,680
	45° bevels; 10°-45° skewed headwall		0,4980	0,667	0,0327	0,750
Rectangular	45° non-offset wingwall flares	2	0,4970	0,667	0,0339	0,803
Box	18,4° non-offset wingwall flares		0,4930	0,667	0,0361	0,806
3/4" Chamfers	18,4° non-offset wingwall flares		0,4950	0,667	0,0386	0,710
	30° skewed barrel					
Rectangular	45° wingwall flares - offset	2	0,4970	0,667	0,0302	0,835
Box	33,7° wingwall flares - offset		0,4950	0,667	0,0252	0,881
Top Bevels	18,4° wingwall flares - offset		0,4930	0,667	0,0227	0,887
C M Boxes	90° headwall	1	0,0083	2,000	0,0379	0,690
	Thick wall projecting		0,0145	1,750	0,0419	0,640
	Thin wall projecting		0,0340	1,500	0,0496	0,570
Horizontal	Square edge w/headwall	1	0,0100	2,000	0,0398	0,670
Ellipse	Groove end w/headwall		0,0018	2,500	0,0292	0,740
Concrete	Groove end projecting		0,0045	2,000	0,0317	0,690
Vertical	Square edge w/headwall	1	0,0100	2,000	0,0398	0,670
Ellipse	Groove end w/headwall		0,0018	2,500	0,0292	0,740
Concrete	Groove end projecting		0,0095	2,000	0,0317	0,690
Pipe Arch	90° headwall	1	0,0083	2,000	0,0379	0,690
18" Corner	Mitered to slope		0,0300	1,000	0,0463	0,750
Radius CM	Projecting		0,0340	1,500	0,0496	0,570
Pipe Arch	Projecting	1	0,0296	1,500	0,0487	0,550
18" Corner	No Bevels		0,0087	2,000	0,0361	0,660
Radius CM	33,7° Bevels		0,0030	2,000	0,0264	0,750
Pipe Arch	Projecting	1	0,0296	1,500	0,0487	0,550
31" Corner	No Bevels		0,0087	2,000	0,0361	0,660
Radius CM	33,7° Bevels		0,0030	2,000	0,0264	0,750
Arch CM	90° headwall	1	0,0083	2,000	0,0379	0,690
	Mitered to slope		0,0300	1,000	0,0463	0,750
	Thin wall projecting		0,0340	1,500	0,0496	0,570
→ Circular	Smooth tapered inlet throat	2	0,5340	0,555	0,0196	0,890
	Rough tapered inlet throat		0,5190	0,640	0,0289	0,900
Elliptical	Tapered inlet-beveled edges	2	0,5360	0,622	0,0368	0,830
Inlet Face	Tapered inlet-square edges		0,5035	0,719	0,0478	0,800
	Tapered inlet-thin edge projecting		0,5470	0,800	0,0598	0,750
Rectangular	Tapered inlet throat	2	0,4750	0,667	0,0179	0,970
Rectangular	Side tapered-less favorable edges	2	0,5600	0,667	0,0466	0,850
Concrete	Side tapered-more favorable edges		0,5600	0,667	0,0378	0,870
Rectangular	Slope tapered-less favorable edges	2	0,5000	0,667	0,0466	0,650
Concrete	Slope tapered-more favorable edges		0,5000	0,667	0,0378	0,710

Observando a Tabela 4, as linhas relacionadas aos valores de $Y = C_{cv}$ para bueiros de seção circular (entrada de bueiro em aresta viva) pode-se observar que o valor médio é correspondente a 0,90.

5.1.3.3 Chow

Figura 15 – Ábaco de valor estimado de H_w/D em bueiros circulares com bordas quadradas na entrada e escoamento parcialmente cheio (CHOW, 1959 (adaptado pelo autor))

Através da curva de H_w/D de valor 1,25 foram encontrados os valores do diâmetro e de vazão do tubo de seção circular. Fazendo as devidas conversões para o Sistema Internacional (SI), temos $D=0,51\text{m}$ e $Q=0,283\text{m}^3/\text{s}$.

Utilizando estes valores, e supondo que o bueiro funcionasse como um orifício, o valor do coeficiente de contração na seção do tubo seria:

$$C_c = \frac{A_c}{A} = \left(\frac{d_c}{D}\right)^2 \cong 0,62 \quad (43)$$

Este valor é bastante conhecido na literatura hidráulica. Pensando-se em termos do diâmetro do conduto, por correlação matemática, o coeficiente de contração ficaria desta forma:

$$C'_c = \sqrt{C_c} = \sqrt{0,62} = 0,79 \quad (44)$$

A fração não contraída do diâmetro do jato do fluido tem o valor de:

$$\frac{1-0,79}{2} = 0,11 \quad (45)$$

Para o caso de bueiro, a contração do fluido haverá somente na parte superior do tubo. Sendo assim, analisando as eqs. (44) e (45), tem-se:

$$C_{cv} = 0,79 + 0,11 = 0,90 \quad (46)$$

Através do valor obtido nesta última equação, pode-se compará-lo com a Tabela 2.

5.1.3.4 Quadro Comparativo

A seguir, estão apresentados os três valores encontrados e citadas nos itens 5.1.3.1 a 5.1.3.3 deste trabalho. Lembrando que a notação mantida do coeficiente de contração vertical é a C_{cv} .

Tabela 5 – Quadro Comparativo

Autor	Hw/D	C_{cv}
Chow (1959)	1,25	0,90
Computer (1997)	-	0,90
Henderson (1966)	1,25	0,92

Através deste quadro é possível se ter uma boa noção dos valores encontrados de Hw/D e de C_{cv} de diferentes autores. Comparando estes valores como os encontrados na Tabela 2 e da Figura 14, é possível dizer que os resultados foram satisfatórios por estarem dentro dos limites apresentados na literatura estudada. Quanto aos valores encontrados de Hw/D , até pelas condições impostas anteriormente, a lamina d' água posiciona-se, na totalidade, a montante, acima da geratriz superior do tubo.

5.2 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Com a análise considerada no item 5.1.3.4, deste trabalho, pode-se utilizar os resultados encontrados para dar suporte/embasamento para soluções/alternativas em projetos de drenagem de estradas e ferrovias. Estas aplicações serão vistas a seguir.

5.2.1 Desenvolvimento

Fazendo-se uma comparação dos valores encontrados na literatura e os encontrados na Tabela 2, optou-se por analisar os valores de $C_{cv} = 0,90 = \frac{9}{10}$ e $\frac{E}{D} = 1,18$. Nesta condição, a profundidade y encontra-se acima da entrada do bueiro ($y > D$).

A questão a ser respondida: Qual seria o valor de $\frac{E}{D}$ quando a profundidade y tem como valor o diâmetro do tubo ($y \equiv D$)?

Usando-se esta condição na eq. (40) tem-se:

$$\left(\frac{E}{D}\right) = \frac{9}{10} + \frac{8}{\left(\frac{9}{10}\right)^2 \pi^2} \left(\frac{Q^2}{gD^5}\right) \quad (47)$$

Fazendo-se algumas operações algébricas, tem-se:

$$\left(\frac{E}{D} - \frac{9}{10}\right) = \frac{(8)(100)}{81\pi^2} \left(\frac{Q^2}{gD^5}\right) \quad (48)$$

Com mais algumas modificações, a equação fica:

$$\frac{81}{800} \left(\frac{E}{D} - \frac{9}{10}\right) = \frac{Q^2}{16 \left(\frac{\pi^2 D^4}{16} gD\right)} \quad (49)$$

Usando-se a relação $Q = vA$ e sabendo-se que o termo $\frac{\pi^2 D^4}{16}$ é A^2 , tem-se:

$$\frac{81}{800} \left(\frac{E}{D} - \frac{9}{10}\right) = \frac{v^2}{(8)(D)2g} \quad (50)$$

Isolando-se o termo $\frac{v^2}{2g}$ obtém-se:

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{81}{100} \left(\frac{E}{D} - \frac{9}{10}\right) D \quad (51)$$

Fazendo uso da Equação de Bernoulli, tem-se:

$$E = y + \frac{v^2}{2g} = D + \frac{81}{100} \left(\frac{E}{D} - \frac{9}{10}\right) D \quad (52)$$

Dividindo todos os termos por D , vem:

$$\frac{E}{D} = 1 + \frac{81}{100} \left(\frac{E}{D} - \frac{9}{10}\right) \quad (53)$$

Isolando o termo $\frac{E}{D}$ tem-se:

$$\frac{E}{D} \left(\frac{19}{100}\right) = \frac{271}{1000}$$

ou

$$\frac{E}{D} = \frac{271}{190} \cong 1,43 \quad (54)$$

O valor $\frac{E}{D} = 1,43$, obtido quando $y \equiv D$, está de acordo com a condição livre a montante, pois do contrário, quando $\frac{E}{D} = 1,18$, com o escoamento na condição limite livre-afogado, certamente a profundidade de montante supera o valor do diâmetro ($y > D$), pelo fato de ocorrer uma convergência do escoamento, com diminuição da profundidade.

Se for feita a substituição de $\frac{E}{D} = \frac{271}{190} = 1,43$ na eq. (47) tem-se:

$$\left(\frac{271}{190}\right) = \frac{9}{10} + \frac{8}{\left(\frac{9}{10}\right)^2 \pi^2} x \left(\frac{Q^2}{gD^5}\right) \quad (55)$$

Isolando-se os termos na eq. (55) tem-se:

$$\frac{271-(9)(19)}{190} = \frac{800}{81\pi^2} \left(\frac{Q^2}{gD^5}\right) \quad (56)$$

Isolando-se o termo $\left(\frac{Q^2}{gD^5}\right)$ obtém-se:

$$\left(\frac{Q^2}{gD^5}\right) = \frac{81\pi^2}{1520} = 0,526 \quad (57)$$

Este valor encontrado para o adimensional pode ser usado como critério de projeto. As utilizações serão vistas a seguir.

5.2.2 Critérios de Projeto

Como utilização de critérios de projeto pode-se admitir dois (2) casos/situações bem frequentes encontrados no momento de se definir a seção do bueiro.

5.2.2.1 Critério de Projeto – Caso 1

Neste caso o diâmetro “D” será fixado e a partir dele será calculada a vazão do bueiro. Através da resolução algébrica da eq. (57) obtém-se a vazão do bueiro:

$$Q = \sqrt{(0,526) (9,81) (D^5)} \quad (58)$$

Pode-se utilizar, como exemplo, $D=1,00\text{m}$.

A vazão calculada pela eq. (58) fica:

$$Q = \sqrt{(0,526) (9,81) (1,00^5)} = 2,27\text{m}^3/\text{s} \quad (59)$$

Com a vazão calculada Q , pode-se compará-la com a vazão de projeto Q_d de um bueiro de uma rodovia/ferrovia, com o seguinte roteiro:

- (1) Se $Q > Q_d \rightarrow \text{OK}$;
- (2) Se $Q < Q_d \rightarrow \left[\text{inteiro} \left(\frac{Q_d}{Q} \right) + 1 \right]$.

No caso da segunda condição, o valor a ser encontrado representará o número de células/tubos de diâmetro “ D ” do bueiro a ser projetado.

Supondo que o valor da vazão de projeto $Q_d = 3,00 \text{ m}^3/\text{s}$, o número de células/tubos para passar a vazão solicitada será:

$$n^{\circ} \text{ células} = \left[\text{inteiro} \left(\frac{3,00}{2,27} \right) + 1 \right] = 2 \text{ células} \quad (60)$$

Este resultado implica que, para a situação apresentada deste projeto, haverá a necessidade de se assentar/construir duas (2) células com diâmetro “ D ” de 1,00m para atendê-lo. Entretanto deve-se sempre que possível, adotar célula única ou módulos bem afastados para se evitar obstrução por detritos.

Figura 16 – Exemplo de aplicação: Caso 1 (NORMANN; HOUGHTALEN; JOHNSTON, 2001 (adaptado pelo autor))

5.2.2.2 Critério de Projeto – Caso 2

O segundo questionamento que pode ser feito seria: A partir de uma determinada vazão de projeto qual deveria ser o diâmetro D do bueiro?

Através da eq. (57) isola-se o termo D e obtém-se:

$$D = \left(\frac{Q^2}{g(0,526)} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (61)$$

Supondo-se que a vazão de projeto $Q_d = Q = 10m^3/s$, calculando-se o valor de D pela eq. (61), tem-se:

$$D = \left(\frac{10^2}{(9,81)(0,526)} \right)^{\frac{1}{5}} = 1,809m \quad (62)$$

Através do valor calculado na eq. (62) tem-se o diâmetro necessário para passar a vazão solicitada. Dependendo do material do bueiro, o valor do diâmetro calculado pode não ser o usualmente fabricado pelos fornecedores. Se neste caso o material fosse o concreto, dever-se-ia usar o diâmetro de 2,00m para a execução do bueiro, sendo que não existe comercialmente o diâmetro de 1,809m.

Um fator primordial que se deve ter atenção após o cálculo do diâmetro é se o bueiro possui o recobrimento mínimo necessário para atender ao projeto estradal ou ferroviário ($D < altura de aterro$), visto que o mesmo não pode ser danificado ou ter colapso antes ou pós-obra rodoferroviária. Vide Figura 16.

No caso do diâmetro D ser superior a altura de aterro ($D > altura de aterro$) poder-se-ia adotar a metade do valor da vazão de projeto ($Q_d/2$) e projetar dois (2) bueiros de mesmo diâmetro no local desejado.

Sendo o valor do diâmetro D menor que o diâmetro mínimo considerado nas literaturas ($D < D_{min}$), adotar sempre o diâmetro mínimo. Por exemplo, o DAEE considera o D_{min} igual a 0,60m.

5.2.2.3 Comparativo

Se na eq. (57) a constante 0,526 for substituída por 0,500, obtém-se outros resultados que estão indicados e comparados na Tabela 6.

Tabela 6 – Quadro Resumo da lei $\frac{Q^2}{gD^5} = m$

D (m)	Q ₁ (m ³ /s) m=0,526	Q ₂ (m ³ /s) m=0,500	(Q ₁ -Q ₂)/Q ₁
0,50	0,402	0,392	0,026
1,00	2,272	2,215	0,025
1,20	3,583	3,494	0,025
1,50	6,260	6,103	0,025
1,75	9,203	8,973	0,025
2,00	12,850	12,528	0,025

Como observado na tabela 6, foram simulados dois (2) valores para a constante m , 0,526 e 0,500. Variando-se o diâmetro D foram encontradas as vazões Q_1 ($m = 0,526$) e Q_2 ($m = 0,500$) e, na sequência, foi calculada a diferença relativa entre estas vazões.

Através deste resultado, pode-se compreender melhor que o valor da constante m pode ser adotado como $m = 0,500$, pelos seguintes motivos a seguir:

- (1) Comparando-se a vazão encontrada para os dois (2) valores de m , vê-se que a diferença entre elas é relativamente pequena;
- (2) Valor de mais fácil memorização;
- (3) Está a favor da segurança, visto que as vazões Q_2 ($m = 0,500$) sempre foram menores do que as vazões Q_1 ;
- (4) A expressão $\left(\frac{Q^2}{gD^5} = m\right)$ tem a estrutura de um número de Froude.

5.2.3 Comentários Pertinentes

- (1) Havendo a possibilidade do bueiro encontrar-se totalmente afogado, deve-se calculá-lo como um conduto forçado;
- (2) Neste trabalho não houve a preocupação de se abordar o arredondamento da aresta de entrada do bueiro, mas sabe-se que um bueiro dimensionado

com aresta viva e com o critério proposto neste trabalho funcionará melhor se a aresta de entrada for arredondada;

- (3) Também não houve a preocupação durante o desenvolvimento deste trabalho de se levar em conta o efeito da inclinação longitudinal do bueiro, que foi tratado sempre como horizontal ou sem declividade. É certo que um bueiro dimensionado sem declividade funcionará melhor se for executado com a declividade positiva;

- (4) Para o critério de projeto proposto $\frac{Q^2}{gD^5} = \frac{1}{2}$ o escoamento adentrará o bueiro em condição livre e com ocorrência da profundidade crítica na seção de entrada. Como a condição crítica é dada por:

$$\frac{Q^2}{gD^5} = \frac{(\beta_c - \sin\beta_c \cos\beta_c)^3}{(64)\sin\beta_c} \quad (63)$$

Para esta condição impondo-se $\frac{Q^2}{gD^5} = \frac{1}{2}$ na eq. (63), obtém-se como solução:

$$\beta_c = 2,342 \text{ rad} \quad (64)$$

β_c é o ângulo correspondente à ocorrência da condição crítica no escoamento do bueiro. Através da eq. (31), mudando-se a notação da mesma para $\frac{y_c}{D}$ tem-se:

$$\frac{y_c}{D} = \frac{1}{2}(1 - \cos\beta_c) \quad (65)$$

Substituindo a eq. (64) em (65), obtém-se:

$$\frac{y_c}{D} = 0,8485 \cong 0,85 \quad (66)$$

O resultado da eq. (66) também está representado na Figura 17.

Figura 17 – Demonstração da eq. (66)

5.3 OBSERVAÇÃO LABORATORIAL

A condição livre-afogado estudada teoricamente para um bueiro de seção transversal circular pode ser qualitativamente verificada em um modelo hidráulico reduzido.

O Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos (DAEE-USP) confeccionou, em acrílico, um modelo “genérico” com dois bueiros; sendo um de seção retangular ($4,0_{\text{cm}} \times 3,0_{\text{cm}}$) e outro de seção circular ($D=4,0_{\text{cm}}$). Este modelo “genérico” foi pensado apenas para montar, qualitativamente, as possibilidades de ocorrência de escoamento. (ver Figura 18)

Figura 18 – Foto do Modelo Experimental no Laboratório de Hidráulica

O critério de semelhança, em se tratando de escoamento predominantemente livre, é baseado na igualdade do numero de Froude $\left(F_r = \frac{v}{\sqrt{gy}}\right)$ entre o modelo e o protótipo $\left(F_{rm} = F_{rp}\right)$.

Este critério não é absoluto, isto é, não se pode reduzir demasiadamente o tamanho do modelo, sob pena de surgirem os clássicos efeitos de escala, como a mudança de regime de escoamento de turbulento (protótipo) para laminar (modelo) ou a ação

de forças devidas à tensão superficial (σ) que só costuma ser significativa no modelo.

O modelo “genérico” não representa um determinado protótipo de bueiro, razão pela qual ele foi ensaiado apenas com preocupação qualitativa para se verificar tanto a condição limite livre-afogado, quanto a condição proposta para projeto ($y = D$).

No bueiro de seção circular, objeto da presente dissertação, foram marcadas na parede do modelo as profundidades $y_1 = D$ e $y_2 = 0,85D$.

Na Figura 17 está registrada a condição limite livre-afogado.

Na Figura 19 pode-se ver o funcionamento, com boa aproximação, na condição proposta para o projeto: $y_1 = D, \frac{Q^2}{gD^5} \cong 0,500$ e $y_2 = 0,85D$.

Figura 19 – Foto do Modelo Experimental em funcionamento

6. CONCLUSÕES

A partir do modelo com entrada livre (condição crítica), item 5.1.1, e do modelo com entrada afogada, item 5.1.2, foi obtida com sucesso a condição limite livre-afogado, desenvolvida analiticamente e graficamente no item 5.1.3.

Os valores de $\frac{E}{D} \left(\frac{\text{Carga Específica } E}{\text{Diâmetro } D \text{ do bueiro}} \right)$ e seus correspondentes valores de C_{cv} (sendo C_{cv} o coeficiente de contração no sentido vertical do bueiro) que satisfazem a condição limite estão de acordo com os resultados experimentais encontrados na literatura (vide Tabela 5).

O valor de $C_{cv} = 0,90$ com profundidade y de montante coincidindo com o diâmetro D do bueiro propiciou a proposta de um critério de projeto para escoamento sempre livre a montante com uma lei extremamente simples relacionando a vazão Q e o diâmetro D do bueiro: $\frac{Q^2}{gD^5} = 0,526$.

Por razões práticas, foi sugerida a adoção da constante 0,500 em substituição à constante 0,526 com vantagens favoráveis à memorização e à segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHANSON, H. **The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. 650p.

CHARBENEAU, R. J.; HENDERSON, A. D; SHERMAN, L. C. Hydraulic Performance Curves for Highway Culverts. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 132, n. 5, p. 474-481, 2006.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959. 680p.

COSTA, L. C. L. **Critério Simplificado para Seleção de Bueiros Convencionais em Rodovias/Ferrovias e Análise da Capacidade Hidráulica por Meio de Melhoria no Dispositivo de Entrada**. 1998. 236p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

COMPUTER Applications in Hydraulic Engineering. Waterbury: Haestad Press, 1997. 164p.

GRIBBIN, J. E. **Introdução a Hidráulica, Hidrologia, e Gestão de Águas Pluviais**. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 494p.

HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. New York: MacMillan, 1966. 522p.

NORMANN, J. M.; HOUGHTALEN, R. J.; JOHNSTON, W. J. **Hydraulic Design of Highway Culverts**. 2ª ed. Virginia: FHWA, 2005. 376p.

NOVA ENCICLOPÉDIA BARSA. **Macropédia**. São Paulo: Encyclopaedia Britannica do Brasil Publicações Ltda, 1997. v. 5.

NOVAK, P.; MOFFAT, A. I. B.; NALLURI, C.; NARAYANAN, R. **Hydraulic Structures**. New York: 2007. 700p.

THORNTON, C.I; ROBESON, M.D; GIRARD, L.G; SMITH, B.A. **Culvert Pipe Liner Guide and Specifications**. 1ª ed. Colorado: FHWA, 2005. 169p.

REFERÊNCIAS CONSULTADAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-8890**: Tubos de Concreto, de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitários – requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2007. 30p.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Edgar Blücher, 2011. 669p.

BRATER, E. F.; KING, H. **Handbook of Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1976. 640p.

DAEE. **Guia Prático para projetos de pequenas obras hidráulicas**. 2ª ed. São Paulo: DAEE, 2006. 116p.

DER. **Estudos Hidrológicos**. São Paulo: [s.n.], 2001. 16p.

DER. **Projeto de Drenagem**. São Paulo: [s.n.], 2001. 41p.

DER. **Manual de Drenagem Rodoviária**. São Paulo: [s.n.], [2006?]. 335p.

DNIT. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. Rio de Janeiro: IPR, 2005. 133p.

DNIT. **Manual de drenagem de Rodovias**. Rio de Janeiro: IPR, 2006. 333p.

KOGAN, G. História no buraco: As mudanças de São Paulo contadas por meio da evolução das tampas de ferro fundido. **Revista Folha de São Paulo**, São Paulo, 27 out. a 2 nov. 2013. Material integrante do Jornal Folha de São Paulo nº170, p. 26-33.

LEONARDO DA VINCI. Biografia. Disponível em: www.educ.fc.ul.pt/docentes/opombo/seminario/davinci/biografia.htm. Acesso em: 22 mai. 2013.

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. **Water Resources Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1992. 864p.

MARTINS, F. J. P. **Dimensionamento Hidrológico e Hidráulico de Passagens Inferiores Rodoviárias para Águas Pluviais**. 2000. 278p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2000.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC-USP, 2006. 519p.

PORTO, R. L. L. **PHA-5013 – Hidrologia Determinística – Notas de Aula**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. São Paulo, SP, 2011.

SUZUKI, C. Y. **PTR-5748 – Drenagem de Estradas e Aeroportos – Notas de Aula.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, SP, 2013.